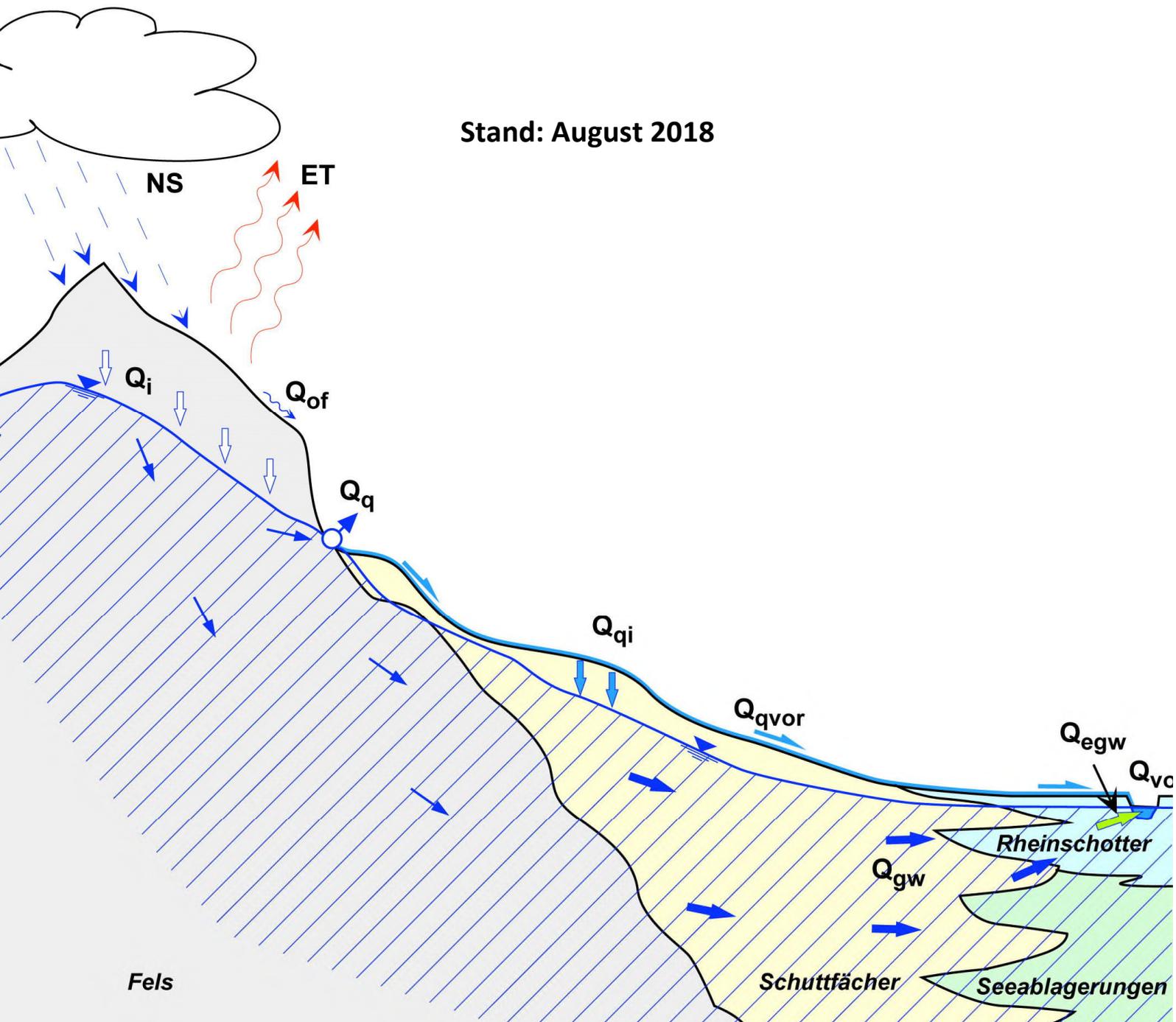


Amt für Umwelt
Fürstentum Liechtenstein

GRUNDWASSERBERICHT

Die hydrogeologischen Verhältnisse
im Fürstentum Liechtenstein

Stand: August 2018



Impressum

Herausgeber

Amt für Umwelt

Bearbeitung

Amt für Umwelt
Gerberweg 5
LI-9490 Vaduz

Elija Kind
Andreas Gstöhl

Externe Autoren:

DR. BERNASCONI AG
Beratende Geologen und Hydrogeologen
Ragazerstrasse 29
7320 Sargans

Riccardo Bernasconi
Kaspar Papritz
Pius Bissig

Titelbild: Dr. Bernasconi AG, 2009

Inhalt

1. Einführung	1
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung	1
1.2 Verwendete Unterlagen	2
1.3 Verwendete Abkürzungen	7
2. Geologische Situation	8
2.1 Überblick	8
2.2 Festgesteine	10
2.2.1 Helvetikum	10
2.2.2 Penninikum	12
2.2.3 Ostalpin	13
2.3 Lockergesteine	14
2.3.1 Allgemeines	14
2.3.2 Moränenablagerungen	15
2.3.2.1 Vorkommen typischer Moränenablagerungen	15
2.3.2.2 Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs	17
2.3.3 Lakustrische und alluviale Talfüllungen	18
2.3.3.1 Rheintal	18
2.3.3.2 Saminatal	19
2.3.4 Hangschutt, Bach- und Rüfescht	19
2.3.5 Rutschungen	21
3. Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine	22
3.1 Allgemeines	22
3.2 Festgesteine	22
3.2.1 Kluftgrundwasserleiter	22
3.2.2 Karstgrundwasserleiter	23
3.2.3 Die hydrogeologischen Eigenschaften der Felsformationen im FL	23
3.2.3.1 Helvetikum	23
3.2.3.2 Penninikum	24
3.2.3.3 Ostalpin	24
3.3 Lockergesteine	25
3.3.1 Allgemeines	25
3.3.2 Moränenablagerungen	25

3.3.3	Lakustrische und alluviale Talfüllungen	26
3.3.4	Hangschutt, Bach- und Rüfescht	27
4.	Grundwasservorkommen	28
4.1	Allgemeines	28
4.2	Grundwasserleiter im Fels	28
4.2.1	Allgemeines	28
4.2.2	Kluftgrundwasserleiter	28
4.2.2.1	Helvetikum: Kieselkalk-Formation, Garschella-Formation	28
4.2.2.2	Penninikum und Flysch: Tristel-Formation, "Gault"-Flysch	29
4.2.2.3	Ostalpin: Buntsandstein	30
4.2.3	Karstgrundwasserleiter	32
4.2.3.1	Helvetikum: Quinten-Formation, Schrattekalk-Formation	32
4.2.3.2	Penninikum und Flysch: Jes-Formation und Falknisbrekzien-Formation	32
4.2.3.3	Ostalpin: Alpiner Muschelkalk, Arlberg-Schichten, Raibler-Schichten, Hauptdolomit	33
4.3	Grundwasserleiter in den Lockergesteinen	35
4.3.1	Schotter des Alpenrheins (Rheinschotter)	35
4.3.1.1	Aufbau des Grundwasserleiters	35
4.3.1.2	Räumliche Ausdehnung	36
4.3.1.3	Durchlässigkeits-Verhältnisse und Ergiebigkeit	38
4.3.1.4	Lage und Schwankung des Grundwasserspiegels	39
4.3.1.5	Grundwasserströmung	48
4.3.1.6	Wechselwirkung zu den Oberflächengewässern	49
4.3.1.7	Grundwasserbilanz	50
4.3.1.8	Grundwasserbeschaffenheit	54
4.3.1.9	Grundwassertemperatur	58
4.3.2	Rheintalseitige Schuttfächer	61
4.3.2.1	Aufbau	61
4.3.2.2	Räumliche Ausdehnung	62
4.3.2.3	Durchlässigkeitsverhältnisse und Ergiebigkeit	63
4.3.2.4	Lage des Grundwasserspiegels, Grundwasserströmung	64
4.3.2.5	Wechselwirkungen zu den Oberflächengewässern	65
4.3.2.6	Grundwasserneubildung, Zufluss und Abfluss	67
4.3.2.7	Grundwasserbeschaffenheit und Temperatur	68
4.3.3	Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs	70
4.3.3.1	Vorbemerkung	70
4.3.3.2	Aufbau	70
4.3.3.3	Räumliche Ausdehnung	70
4.3.3.4	Durchlässigkeitsverhältnisse und Ergiebigkeit	71
4.3.3.5	Lage des Grundwasserspiegels, Grundwasserströmung	71
4.3.3.6	Wechselwirkungen zu den Oberflächengewässern	71
4.3.3.7	Grundwasserneubildung, Zufluss und Abfluss	71
4.3.3.8	Grundwasserbeschaffenheit und Temperatur	71
4.3.4	Lockergesteine im Saminatal und im Malbuntal	72
4.3.5	Lockergesteine im rheintalseitigen Hanggebiet	73

5. Die heutige Nutzung	75
5.1 Nutzungsarten	75
5.2 Deckung des Wasserbedarfs	76
5.2.1 Grundwasserkörper im Fels	77
5.2.2 Grundwasserkörper in den Lockergesteinen	78
5.2.2.1 Talschotter Rheintal (Rheinschotter)	78
5.2.2.2 Rheintalseitige Schuttfächer	80
5.2.2.3 Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs	80
5.2.2.4 Lockergesteine im Saminatal und Malbuntal	80
5.2.3 Lockergesteine im rheintalseitigen Hanggebiet	80
6. Datenerhebung und Datenpflege	82
6.1 Ziel und Zweck	82
6.2 Messstellennetze	83
6.3 Gemessene Parameter und Messintervalle	84
6.4 Auswertung / Nachführung	86
7. Gefährdungen und Beeinträchtigungen	87
7.1 Art der möglichen Gefährdungen und Beeinträchtigungen	87
7.2 Grundwasservorkommen im Fels	88
7.3 Grundwasservorkommen in den Lockergesteinen	88
7.3.1 Talschotter Rheintal (Rheinschotter)	88
7.3.1.1 Menge	88
7.3.1.2 Güte	89
7.3.2 Rheintalseitige Schuttfächer	90
7.3.3 Glaziale Ablagerungen am Fuss des Schellenbergs	91
7.3.4 Lockergesteine im Saminatal und Malbuntal	91
8. Schutzmassnahmen	92
8.1 Planerischer Grundwasserschutz	92
8.1.1 Die Gewässerschutzbereiche	92
8.1.2 Die Grundwasserschutzgebiete	95
8.1.3 Die Grundwasserschutzzonen	95
8.1.4 Die Grundwasserschutzareale	98
8.2 Objektbezogene und nutzungsorientierte Grundwasserschutzmassnahmen	99
8.2.1 Einleitung	99
8.2.2 Allgemeine Tätigkeiten und Nutzungen	99

8.2.3	Thermische Grundwassernutzung	99
8.2.3.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	99
8.2.3.2	Karte der Zulässigkeit	101
8.2.4	Erdwärmesonden	104
8.2.5	Belastete Standorte - Altlasten	108
9.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	109
9.1	Die Ressourcen für die künftigen Nutzungen	109
9.2	Gefahrenpotenziale und Schutzmassnahmen	109
9.3	Kenntnislücken	110

1. Einführung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die letzte umfassende Darstellung der Grundwasserverhältnisse im Fürstentum Liechtenstein wurde 1976 im Zusammenhang mit den Grundwasseruntersuchungen der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) unter der Leitung von Herrn Dr. P. Nänni erstellt (vgl. [32]). In der Zwischenzeit haben sich die Erkenntnisse über den Aufbau des Untergrundes mit seinen Grundwasservorkommen stark erweitert; dies als Folge der zahlreichen Bohrungen, die insbesondere für Bauvorhaben, Erdwärmesonden und thermische Nutzung des Grundwassers abgeteuft wurden. Weiter wurden im Auftrag von Privaten, der Gemeinden und insbesondere dem Amt für Umwelt systematisch Grundwasserspiegelmessungen und Untersuchungen der Grundwasserbeschaffenheit durchgeführt, welche die Datengrundlagen wesentlich aufgestockt haben.

Mit dem vorliegenden Bericht wird der heutige Stand der Kenntnisse über die Grundwasserverhältnisse und insbesondere der Zustand von Menge und Güte des Grundwassers im Fürstentum Liechtenstein zusammenfassend dargelegt.

1.2 Verwendete Unterlagen

Grundwasserrelevante gesetzliche Grundlagen und Regelwerke

- [1] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL: Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, 2004.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU: Grundwasserschutzzonen bei Lockergesteinen. Ein Modul der Vollzugshilfe Grundwasserschutz, 2012.
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU: Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute Bereich Erdwärmenutzung, 2009.
- [4] Gewässerschutzgesetz (GSchG) vom 15.5.2003, LR 814.20.
- [5] Umweltschutzgesetz (USG) vom 29.5.2008, LR 814.01.
- [6] Verordnung über den Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF) vom 16. März 1999, LR 814.201.1.
- [7] Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 16. Dezember 2008, LR 814.011.2.
- [8] Verordnung zum Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 2017, LR 814.201.
- [9] Verordnung zum Schutze des Grundwassers vom 20. September 1988, LR 814.202.0.
- [10] Verordnung zum Wasserrechtsgesetz vom 9. Januar 1979, LR 721.101.
- [11] Wasserrechtsgesetz vom 10. November 1976, LR 721.10.

Regionale geologische und hydrogeologische Grundlagendokumente

- [12] Allemann, F.: Geologische Karte des Fürstentums Liechtenstein, 1 : 25'000, 1985.
- [13] Allemann, F.: Erläuterungen zur geologischen Karte des Fürstentums Liechtenstein, 1 : 25'000, 2002.
- [14] Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Auszüge Grundwasseranalysen in den liechtensteinischen Grundwasserpumpwerken, nicht publiziert.
- [15] Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Auszüge Messdaten Grundwassertemperaturen 2008-2016, nicht publiziert.
- [16] Broggi und Wolfinger: Bericht zur Erfassung der öffentlichen Deponieplätze 1955 – 1975 im Fürstentum Liechtenstein, 1976.
- [17] Bundesamt für Umwelt: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Stand 2015.
- [18] Büro für technische Geologie AG: Amt für Umweltschutz St. Gallen, Chemische Grundwasseruntersuchung in der Rheinebene zwischen Bad Ragaz und Au, Grundwasserhochstand Mai/Juni 1986, Hydrogeologischer Bericht, 1987.

- [19] Büro für technische Geologie AG: Amt für Wasser- und Energiewirtschaft Kanton St. Gallen, Grundwasseruntersuchungen im Rheintal zwischen Bad Ragaz und Sennwald, Hydrogeologischer Bericht über das Untersuchungsprogramm vom Winter 1979/80 und dessen Ergebnisse und über das Messprogramm 1980/81, 1982.
- [20] Büro für technische Geologie AG: Amt für Wasser- und Energiewirtschaft Kanton St. Gallen, Grundwasseruntersuchungen in der Rheinebene zwischen Rüthi und Au, Hydrogeologischer Bericht über das Untersuchungsprogramm vom Winter 1983/84 und dessen Ergebnisse, 1984.
- [21] Dr. Bernasconi AG & Dr. H. Naef: Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein / Charakterisierung der potenziellen Aquifer-Formationen, Bericht, 2010.
- [22] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein, Altablagerungen entlang dem Rhein, Grundwassermonitoring Messkampagne 2007 und Qualitätssicherungsmessungen 2008, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1255-B02, 2008.
- [23] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein, Altablagerungen entlang dem Rhein, Grundwassermonitoring Messkampagne Januar 2009, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1255-B03, 2009.
- [24] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein / Isohypsenplan des Grundwasservorkommens der Talebene des Fürstentums Liechtenstein / Hydrogeologischer Bericht Nr. 1585-B01, August 2011.
- [25] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Eignungskarte für Erdwärmesonden, Auflagenkatalog gelbe Zone, Kurzbericht Nr. 1311-B05, März 2009.
- [26] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Thermische Nutzung des Grundwassers im Fürstentum Liechtenstein, Nutzungspotenzial Grundwasser, Interner Bericht Nr. 1390-B02, März 2009.
- [27] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Thermische Nutzung des Grundwassers im Fürstentum Liechtenstein, Karte der Zulässigkeit, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1390-B03, April 2009.
- [28] Dr. Bernasconi AG: Gewässerschutzkarte des Fürstentums Liechtenstein, Vorgehen bei der Ausscheidung des Gewässerschutzbereichs Au, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1311-B06, Oktober 2011.
- [29] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Eignungskarte für Erdwärmesonden des Fürstentums Liechtenstein, Vorgehen bei der Ausscheidung der zulässigen Bereiche, Kurzbericht Nr. 1311-B02, August 2005.
- [30] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Eignungskarte für Erdwärmesonden des Fürstentums Liechtenstein, Vorschlag zum Vorgehen bei der Überarbeitung, Bericht Nr. 1311-B03, August 2007.
- [31] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Eignungskarte für Erdwärmesonden Fürstentum Liechtenstein, Überarbeitung der Eignungskarte Stand 2008, Bericht Nr. 1311-B04, Februar 2008.

- [32] EAWAG: Bericht über die Grundwasserverhältnisse im Rheintal im Gebiet des Fürstentums Liechtenstein, 1976.
- [33] EAWAG: Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Rheintal, 1. Ergänzungsbericht, 1977.
- [34] Eberle, M.: Zur Lockergesteinsfüllung des St. Galler und Liechtensteiner Rheintales, *Eclogae geol. Helv.* Vol. 80, Nr. 1, S. 193-206, 1987.
- [35] Geowatt AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein: Vorstudie / Datenkompilation, Bericht, 2008.
- [36] Geowatt AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein: Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein / Ressourcenanalyse Teil 1, 2009.
- [37] Geowatt AG: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein, Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein: Tiefengeothermie im Fürstentum Liechtenstein / Ressourcenanalyse Teil II, 2011.
- [38] Hantke R.: Eiszeitalter, Kalt- und Warmzeit-Zyklen und Eistransport im alpinen und voralpinen Raum, Ott Verlag, 2011.
- [39] Hantke, R.: Eiszeitalter, Band 2, Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete, Ott Verlag, 1980.
- [40] Holinger AG: Studienkonsortium Rheinkraftwerke Schweiz- Liechtenstein, Liechtensteinische Kraftwerke, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Motor-Columbus AG, Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein, Umweltverträglichkeitsbericht zum Konzessionsprojekt 1979/80 mit Ergänzungen 1991, Fachgutachten C7 Grundwasserhaushalt, September 1991.
- [41] Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA), Projektgruppe Grundwasser: Grundwasserhaushalt Alpenrhein, Grundwassermodellierung für den Abschnitt Landquart bis Bodensee, 2000.
- [42] Internationale Regierungskommission Alpenrhein IRKA: Grundwasserhaushalt Alpenrhein, Grundwassermodellierung für den Abschnitt Landquart bis Bodensee, Planunterlagen TK Consult AG, 2004.
- [43] Internationale Regierungskommission Alpenrhein IRKA: Grundwasserhaushalt Alpenrhein, Planunterlagen TK Consult AG, 2005.
- [44] Internationale Regierungskommission Alpenrhein IRKA: Grundwassermodell Alpenrhein, Instationäre Modellierung, Bericht TK Consult AG, 2007.
- [45] Internationale Regierungskommission Alpenrhein IRKA: Grundwassermodell Alpenrhein, Modellpflege 2009, Bericht TK Consult AG, 2010.
- [46] Internationale Regierungskommission Alpenrhein IRKA: Thermische Nutzung der Gewässer des Alpenrheintals, Bericht Universität Innsbruck, Rudhardt+Gasser Ziviltechniker, Februar 2003.
- [47] Klingelé, E.: Gravity Survey of the Rhine Valley, Gravity Interpretation Final Report, April 2009.
- [48] Schälli, L.: The diffuence of the Rhine Glacier at Sargans in connection to the solid-rock surface model of the Rhine and Seez Valley, Diplomarbeit Universität Zürich, 2012.

- [49] Schweizerische Geotechnische Kommission: Hydrogeologische Karte der Schweiz 1 : 100'000, Blatt Toggenburg mit Erläuterungen, 1994.
- [50] Sprenger + Steiner AG und Ing. Büro Wenaweser: Wasserversorgung Liechtensteiner Oberland, generelles Projekt, 1990.
- [51] Sprenger + Steiner AG und Ing. Büro Wenaweser: Wasserversorgung Liechtensteiner Unterland, generelles Projekt, 2005.
- [52] swisstopo: Geologische Karte der Schweiz, 1 : 500'000, 2005.
- [53] swisstopo: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1135 Buchs mit Erläuterungen, 2016.
- [54] swisstopo: Hydrogeologische Karte der Schweiz, 1:500'000, 2007/2008.
- [55] swisstopo: Hydrogeologische Karte der Schweiz, Vulnerabilität der Grundwasservorkommen, 1 : 500'000, 2008.
- [56] swisstopo: Tektonische Karte der Schweiz, 1:500'000, 2005.
- [57] Weber E. et. al.: Der Grundwasserstrom des Alpenrheins, Wasser Energie Luft 70/5, 1978.
- [58] Wenaweser + Partner Bauingenieure AG: Grundwasserverhältnisse im Rheintal, Jahresbericht 2013.

Lokale geologische und hydrogeologische Grundlagendokumente

- [59] Allemann, F.: Gemeinde Triesenberg, Fürstentum Liechtenstein, Geologisches Gutachten über die Möglichkeit von Quelfassungen nördlich Steg, Saminatal, hydrogeologischer Bericht, 1966.
- [60] Amt für Umweltschutz und Sprenger und Steiner AG: unveröffentlichte Daten zum Quellkataster im Fürstentum Liechtenstein.
- [61] BTG Dr. Max Kobel, Sargans: Gemeinde Schaan, Grundwasserüberwachung der Altdeponien im Raume Schaan, März 1988 - Mai 1990 / Hydrogeologischer Bericht, 1989.
- [62] Bundesamt für Umwelt BAFU: hydrologische Messdaten Liechtensteiner Binnenkanal - Ruggell (2410), Jahrestabelle 2011, www.hydrodaten.admin.ch.
- [63] Büro für technische Geologie AG: Amt für Umweltschutz St. Gallen, Grundwasseruntersuchungen in der Rheinebene zwischen Bad Ragaz und Sennwald, Hydrogeologische Abklärungen mit der VLF-R-Methode im vorgeschlagenen Grundwasserschutzareal Werdenberg-Süd, Hydrogeologischer Bericht, 1991.
- [64] Diverse Autoren: Ausscheidung der Wasserschutzgebiete, Schutzzonen und Schutzareale der Gemeinden Ruggell, Gamprin, Eschen, Mauren, Planken, Schaan, Vaduz, Triesen, Triesenberg und Balzers.
- [65] Dr. Bernasconi AG: Axpo AG, 110-kV-Leitung Sargans (CH) - Balzers (FL), Projekt Rheinunterquerung – Gesteuerte Horizontalbohrung, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1730-B02, April 2012.

- [66] Dr. Bernasconi AG: Amt für Umwelt Fürstentum Liechtenstein, Grundwasserverhältnisse am Südosthang des Eschnerbergs, Untersuchungen an Erdwärmesondenbohrungen, Kurzbericht Nr. 1311D, Dezember 2015
- [67] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Balzers, Überarbeitung Versickerungskarte, Bestimmung Grundwasserhochstände für die Meteorwasserversickerung, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1772-B01, Mai 2013.
- [68] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Ruggell, Deponie „Limseneck“, Ruggell, Hydrogeologische Untersuchung zur Eignung des Standorts für eine Inertstoffdeponie, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1497-B01, November 2010.
- [69] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Schaan, Deponie „Forst“, Schaan, Altlastentechnische Voruntersuchung historischer und technischer Teil, Bericht Nr. 1506-B01, Februar 2010.
- [70] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Schaan, Deponiekonzept „Forst“, Schaan, Hydrogeologische Abklärungen zur Standorteignung für eine Inertstoffdeponie, Bericht Nr. 1506-B02, Februar 2010.
- [71] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Schaan, Deponiekonzept „Forst“, Schaan, Ergänzende Stellungnahme zu den Auswirkungen auf das Naturschutzgebiet Schwabbrünnen / Äscher, Bericht Nr. 1506-B03, März 2012.
- [72] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Triesen, Deponie „Säga“, Triesen, Untersuchungen zur Standorteignung für eine Inertstoffdeponie, Bericht Nr. 1490-B01, Januar 2010.
- [73] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Vaduz, Deponie Im Rain Vaduz, Altlastenvoruntersuchung Technische Untersuchung, Bericht Nr. 1439-B02, September 2008.
- [74] Dr. Bernasconi AG: Gemeinde Vaduz, Überarbeitung Versickerungskarte, Bestimmung Grundwasserhochstände für die Meteorwasserversickerung, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1766-B01, Mai 2013.
- [75] Dr. Bernasconi AG: Amt für Bevölkerungsschutz Fürstentum Liechtenstein, Geologische und hydrogeologische Untersuchungen 1998 – 2014, Hangrutschung Triesenberg, Synthesebericht Nr. 1124-B08, 2015.
- [76] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Deponie Rheinau Eschen / Gamprin-Bendern, Technische Untersuchung, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1267-B02, April 2004.
- [77] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Hydrogeologische Beurteilung Deponiestandorte, Deponie „Altneugut“ Balzers, Bericht Nr. 1371-B01, September 2006.
- [78] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Hydrogeologische Beurteilung Deponiestandorte, Deponie „Im Rain“ Vaduz, Bericht Nr. 1371-B02, Februar 2007.
- [79] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Hydrogeologische Beurteilung Deponiestandorte, Deponie „Forst“ Schaan, Bericht Nr. 1371-B03, Juli 2007.
- [80] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Hydrogeologische Beurteilung Deponiestandorte, Deponie „Säga“ Triesen, Bericht Nr. 1371-B04, Juli 2007.

- [81] Dr. Riccardo Bernasconi: Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Hydrogeologische Beurteilung Deponiestandorte, Deponie „Limseneck“ Ruggell, Bericht Nr. 1371-B05, November 2007.
- [82] Dr. Riccardo Bernasconi: Gemeinde Eschen: Deponie Rheinau, Projekt Geologie/Hydrogeologie, Bericht Nr. 1267-B03, September 2004.
- [83] Dr. Riccardo Bernasconi: Gemeinde Triesen, Grundwasserschutzareal „Im Damm“, hydrogeologischer Bericht Nr. 1200-B03, Dezember 2002.
- [84] Dr. Riccardo Bernasconi: Politische Gemeinde Eschen: Alte Deponie Tentschagraba, Detailuntersuchung Altlasten Bericht Nr. 1267B-01, November 2006.
- [85] Dr. Riccardo Bernasconi: Politische Gemeinde Planken: Quellen Am Alpweg, Hydrogeologischer Bericht Nr. 1098-01, Dezember 1996
- [86] Dr. Riccardo Bernasconi: Wegleitung „Bauen in den Grundwasserschutzgebieten“, Bau, Kontrolle, Unterhalt, Sanierung, Bericht Nr. 1070, 1995.
- [87] EAWAG: Fürstentum Liechtenstein, Amt für Gewässerschutz, Bericht über die Ergebnisse der im Jahre 1981 in der Gemeinde Balzers zwecks Erschliessung von Thermalwasser abgeteuften Bohrung T 11, 1983.
- [88] Gemeinde Balzers: Die Wiederbewässerung der Balzner Giessen, Dokumentation der Bewässerungsanlage „Äule-Hag“, Balznergiessen und Binnenkanal, Oktober 1989.
- [89] Rey, P.: Landeswasserbauamt Bregenz, Amt für Umweltschutz Fürstentum Liechtenstein: Neues Leben für den Spiersbach, Ein Konzept zur ökologischen und schutzwasserbaulichen Gewässerentwicklung, 2001.

1.3 Verwendete Abkürzungen

AU	Amt für Umwelt des Fürstentums Liechtenstein
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
GW	Grundwasser
GWK	Grundwasserkörper
GW-WP	Grundwasserwärmepumpe
GWP	Grundwasserpumpwerk
EWS	Erdwärmesonde
IRKA	Internationale Regierungskommission Alpenrhein
LGBl.	Liechtensteinisches Landesgesetzblatt

2. Geologische Situation

2.1 Überblick

Das Fürstentum Liechtenstein umfasst die östliche Talflanke des Alpenrheintals zwischen Ellhorn im Süden und dem Schellenberg im Norden sowie Bergegebiete (vgl. Abb. 1).

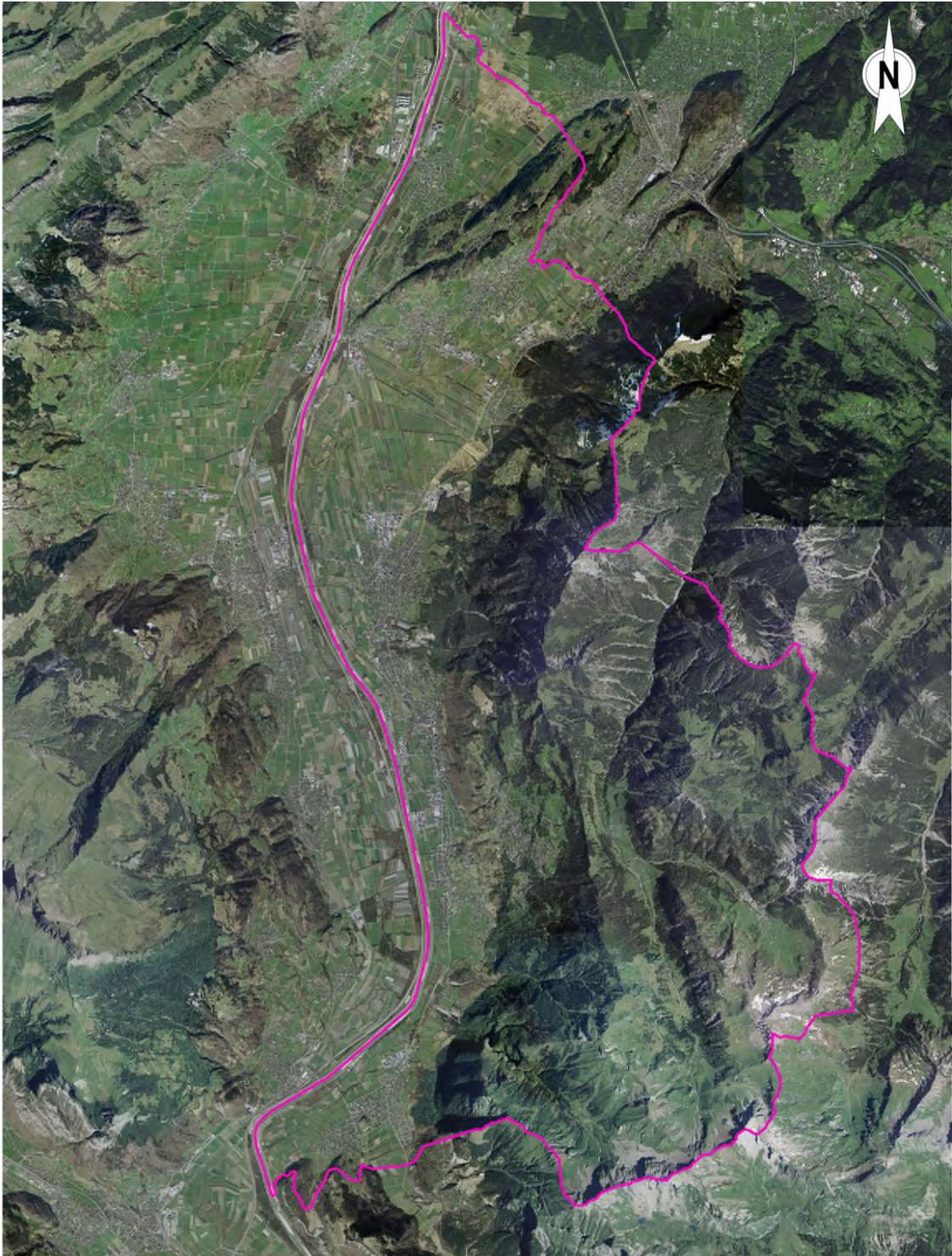


Abbildung 1: Übersicht des Fürstentums Liechtenstein (Grundlage Ortophoto).

Das wichtigste Grundwassergebiet befindet sich in der Rheinebene. Es gliedert sich grossräumig in die Talgebiete von Balzers bis Ruggell, welche durch mächtige Lockergesteinsabfolgen charakterisiert sind und nur durch den Hügelzug des Schellenbergs unterbrochen werden. Das weiter östlich anschliessende Gebiet der Talflanken wird durch Festgesteine geprägt und schliesst mit den Gebirgszügen zwischen Falknis und Drei Schwestern sowie Naafkopf bis Galinakopf das Einzugsgebiet der zur Ill entwässernden Samina ein.

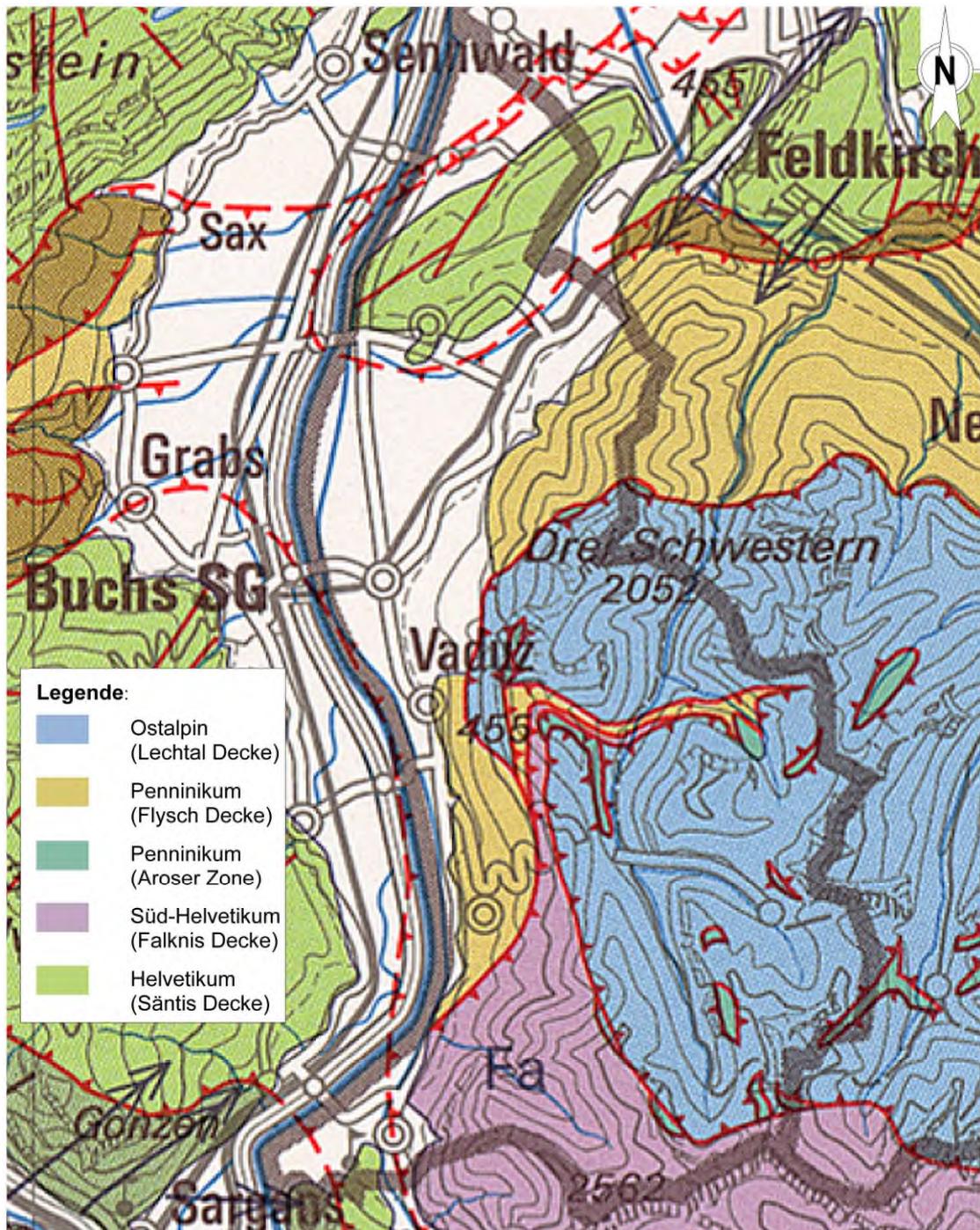


Abbildung 2: Geologie: Kartenausschnitt mit den wichtigsten tektonischen Gesteins-Einheiten im Fürstentum Liechtenstein (aus [52]).

Die geologischen Verhältnisse sind in verschiedenen Publikationen über regionale Untersuchungen veröffentlicht ([12] bis [57]). Die lokalen Gegebenheiten sind insbesondere in der geologischen Karte des Fürstentums Liechtenstein [12] und den dazugehörigen Erläuterungen [13] sowie im geologischen Blatt „Buchs“ [53] gut dokumentiert.

Die Geologie des Fürstentums Liechtenstein wird durch unterschiedliche tektonische Einheiten der Alpenbildung geprägt. Diese fallen allgemein gegen Osten ein und bilden einen Stapel von im Westen aufgeschlossenen tieferen Einheiten zu östlich darüber folgenden höheren Einheiten. Als unterste Einheit sind Gesteine des Helvetikums aufgeschlossen. Darüber befinden sich Gesteinseinheiten des sogenannten Flysch und des Penninikums. Als höchste Einheiten sind die Gesteine des Ostalpins aufgeschlossen, welche u.a. die höheren Flanken des Drei-Schwestern-Massivs bilden (vgl. Abb. 2 und 3).

2.2 Festgesteine

2.2.1 Helvetikum

Die Gesteine der tektonischen Einheit der helvetischen Sedimentdecken bauen die Gebirgsmassive des Gonzen – Alviers und des Alpsteins auf. Auf der liechtensteinischen Seite des Alpenrheintals sind sie im südlichsten Teil bei Balzers am Fläscherberg an der Oberfläche aufgeschlossen (vgl. Abb. 3 und Abb. 4). Gegen Nordosten fallen diese Schichten unter den darüberliegenden Gesteinspaketen in die Tiefe. Gegen Norden tauchen sie unter die Lockergesteinsfüllung der Talebene ab; erst im nördlichsten Landesteil treten die helvetischen Sedimentschichten wieder an die Oberfläche und sind am Hügelzug von Schellenberg in einer Antiklinalfalte aufgeschlossen.

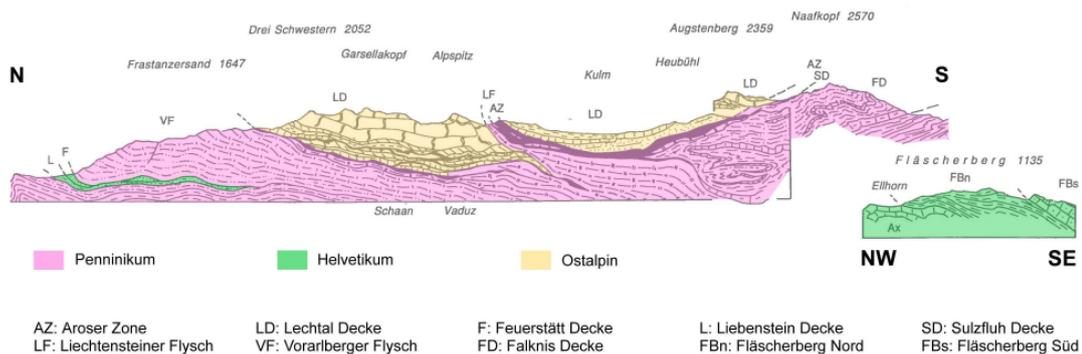


Abbildung 3: Geologie: Schematischer geologischer Schnitt mit Darstellung der wichtigsten Gesteins-Einheiten im Fürstentum Liechtenstein (aus [49]).

Im Süden am Ellhorn und Fläscherberg sind ältere, tieferliegende Sedimentschichten der oberen Jura- und unteren Kreidezeit anstehend mit massigen Kalken der Quinten-Formation und vorwiegend kieseligen Kalken der Kieselkalk-Formation. Am Hügel von Schellenberg sind die Schichten der oberen Kreide mit Mergelschiefer-Mergelkalk-Wechselfolgen des Drus-

berg-Members, dem Schrattenkalk mit grobkörnigem Kalk, der Garschella-Formation mit Tonschiefern, Sandsteinen und kieseligen Kalcken sowie der Seewen- und Amden-Formationen mit feinkörnigen Kalkbänken und mächtigen Mergel- und Tonschiefern aufgeschlossen.

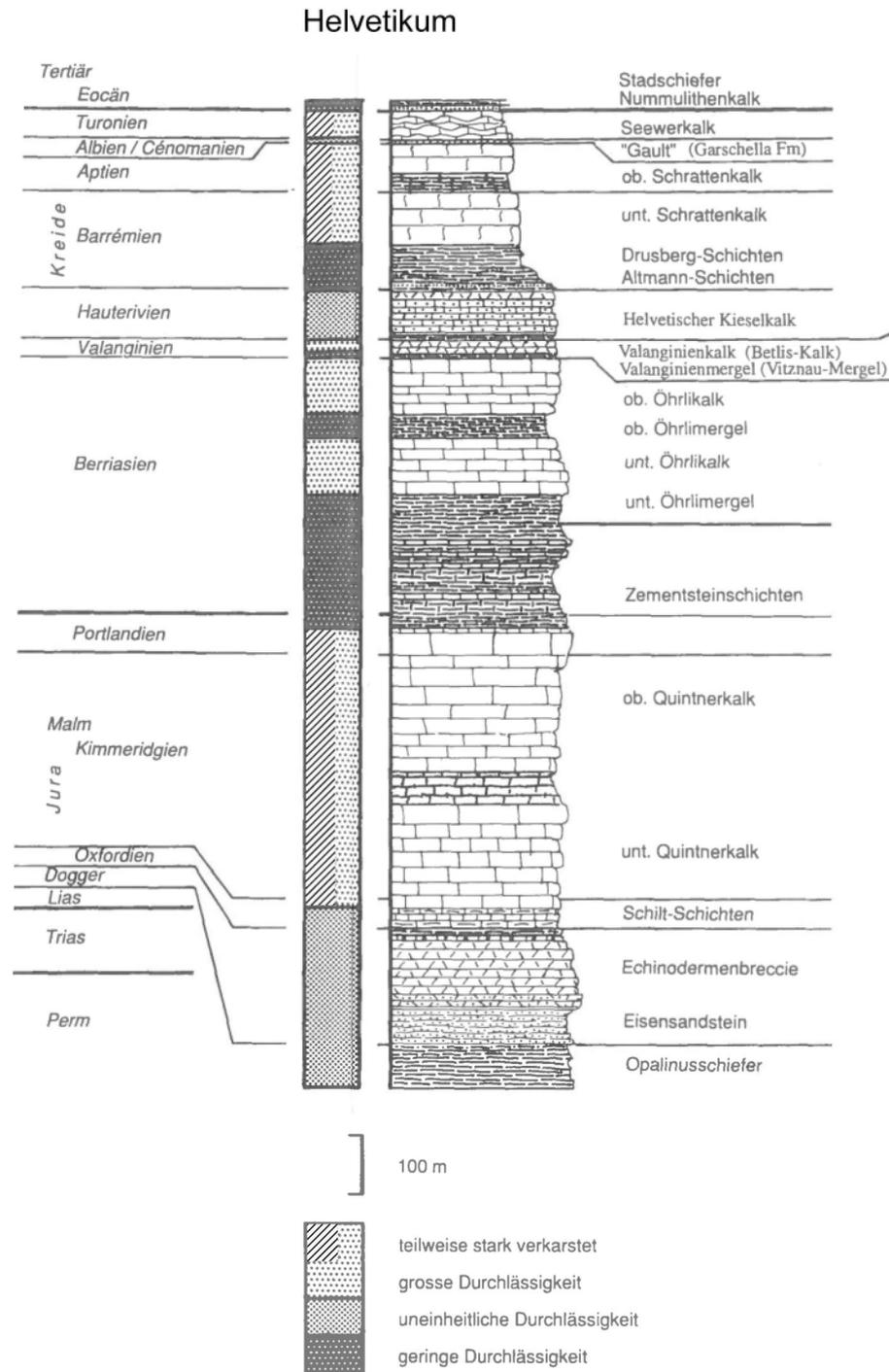


Abbildung 4: Geologie: Schematischer geologischer Schichtstapel mit den Fels-Formationen des Helvetikums (aus [49]).

2.2.2 Penninikum

Über den helvetischen Sedimentdecken folgen im südlichen Teil des Fürstentums die mächtigen, verfalteten und verschuppten Sedimentabfolgen der Falknis- und Sulzfluh-Decke (vgl. Abb. 3 und Abb. 5). Diese bestehen aus Schiefern, Kalken und Sandsteinen der mittleren Jura- bis oberen Kreidezeit und werden dem Penninikum zugeordnet. Im südlichsten Teil bauen sie das gesamte Falknismassiv bis zum Bettlerjoch und Rappenstein auf. Nördlich von Balzers wird diese Sedimentabfolge seitlich durch jüngere Flyschgesteine mit Tonschiefern und Sandsteinen des Liechtensteiner- und Vorarlberger Flyschs abgelöst, welche die unteren Bereiche der Talflanke zwischen Triesen und Planken bis Schaanwald einnehmen. Die Falknis- und Sulzfluh-Decke und die penninischen Flysche werden von einer tektonisch stark beanspruchten „Überschiebungszone“ – der Arosa-Zone – überlagert und von der darüberliegenden Gesteinseinheit getrennt. Die Arosa-Zone besteht aus einem sehr heterogenen, stark verschieferten „tektonischen Melange“ unterschiedlichster Lithologien.

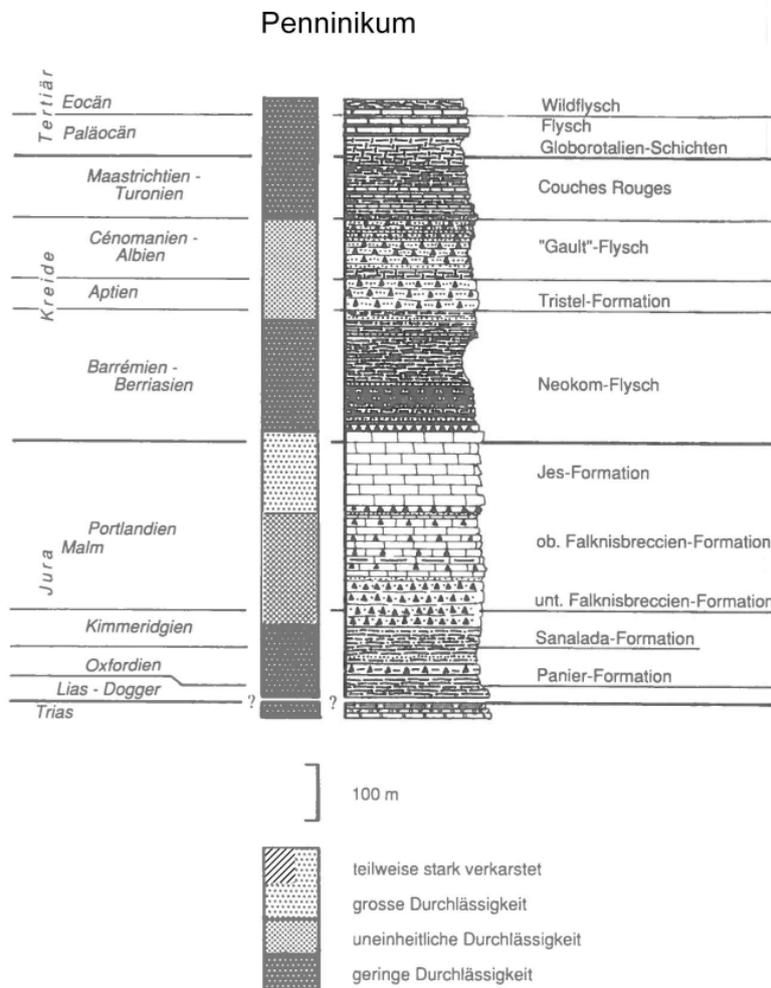


Abbildung 5: Geologie: Schematischer geologischer Schichtstapel mit den Fels-Formationen des Penninikums (aus [49]).

2.2.3 Ostalpin

Die Gesteine dieser Sediment-Decken bilden die oberste tektonische Einheit (vgl. Abb. 3 und Abb. 6). Im Rheintal bauen sie die obersten Spitzen des Heubühlkamms oberhalb Triesenberg und die Felsflanken des Drei-Schwestern-Massivs auf.

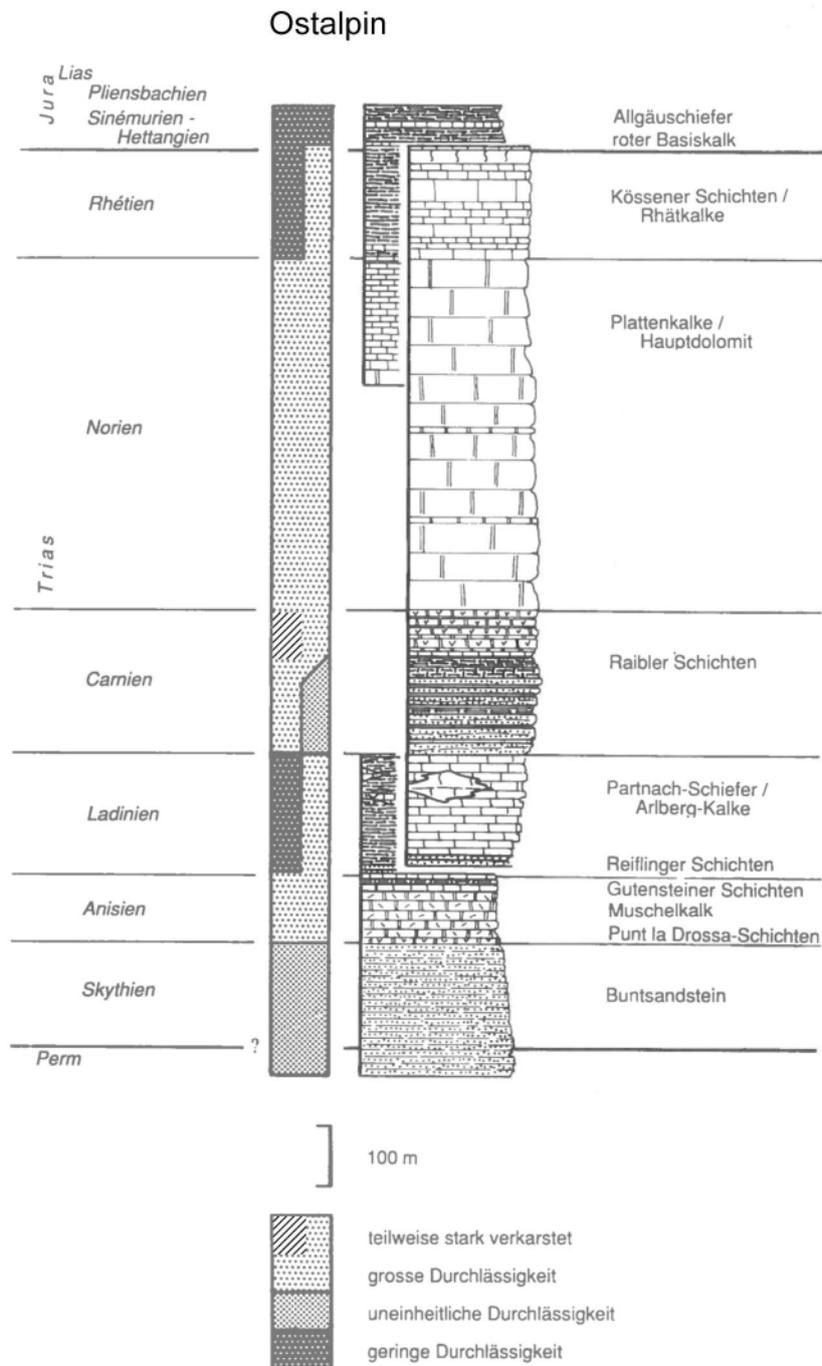


Abbildung 6: Geologie: Schematischer geologischer Schichtstapel mit den Fels-Formationen des Ostalpins (aus [49]).

Sie erstrecken sich über das gesamte Berggebiet der Valüna-, Samina- und Malbuntäler hinweg. Der tektonische Bau ist von neben- oder übereinanderliegenden Schollen wenig verfallener Schichtpakete geprägt. Der untere Teil der Gesteinsabfolge besteht aus dem Buntsandstein mit sehr harten Quarziten, aufgeschlossen zwischen dem Valünatal, Heubühl und Triesenberg. Auf diese folgen alpiner Muschelkalk mit Kalken und Schiefern und die Tonschiefer der Partnach-Schichten, sowie den geschichteten, teils geschieferten Dolomite und Kalke der Arlberg-Schichten, welche die ostseitigen Felswände Valünatal – Valorsch bilden. Darüber folgen die Raibler-Schichten mit dünngeschichteten Abfolgen von Tonschiefern, Kalken und Sandsteinen mit weichen Gips-Zwischenlagen, welche oft die Abscherzone zwischen tektonischen Schuppen bilden. Die oberste Gesteinseinheit wird vom massig ausgebildeten Hauptdolomit zwischen den Drei Schwestern – Galinakopf – Ochsenkopf aufgebaut. Buntsandstein, Muschelkalk, Arlbergschichten und Hauptdolomit weisen ausgeprägte, meist steilstehende und weitverzweigte Kluftsysteme auf. Im Gegensatz zu den massigeren Kalken und Dolomiten sind die Partnach- und Raibler-Schichten oft stark duktil deformiert und weisen tektonisch bedingt sehr variable Mächtigkeiten auf.

2.3 Lockergesteine

2.3.1 Allgemeines

Als Lockergesteine werden unverfestigte Ablagerungen aus Erosions- und Sedimentationsprozessen bezeichnet. Im Fürstentum Liechtenstein sind vor allem Moränenablagerungen, lakustrische und alluviale Ablagerungen sowie Hang- und Rüfeschuttablagerungen von Bedeutung.

Die Ausbildung und Mächtigkeit der Lockergesteine ist in Liechtenstein äusserst unterschiedlich. Entlang der heutigen Haupttäler haben die Gletscher während den vergangenen Vereisungen einen tiefen Taltrog in den Felsuntergrund erodiert (abgetragen) [38], [39]. Die Felsoberfläche liegt im Liechtensteiner Abschnitt des Alpenrheintals teilweise in mehr als 400 m Tiefe unter der Talsohle (vgl. Abb. 7). Vom Rheingletscher und von kleineren lokalen Gletschern sind nach der jüngsten Vereisung Moränenablagerungen zurückgeblieben (Kap 2.3.2). Der Taltrog wurde anschliessend mit lakustrischen und alluvialen Lockergesteinen bis auf das heutige Terrainniveau aufgefüllt (Kap. 2.3.3); gleichzeitig haben Erosions- und Transportprozesse aus höher liegenden Gebieten zum Abtrag von Fels und Lockergesteinen und deren Ablagerung – meist in Form von Schuttfächern – geführt (Kap. 2.3.4).

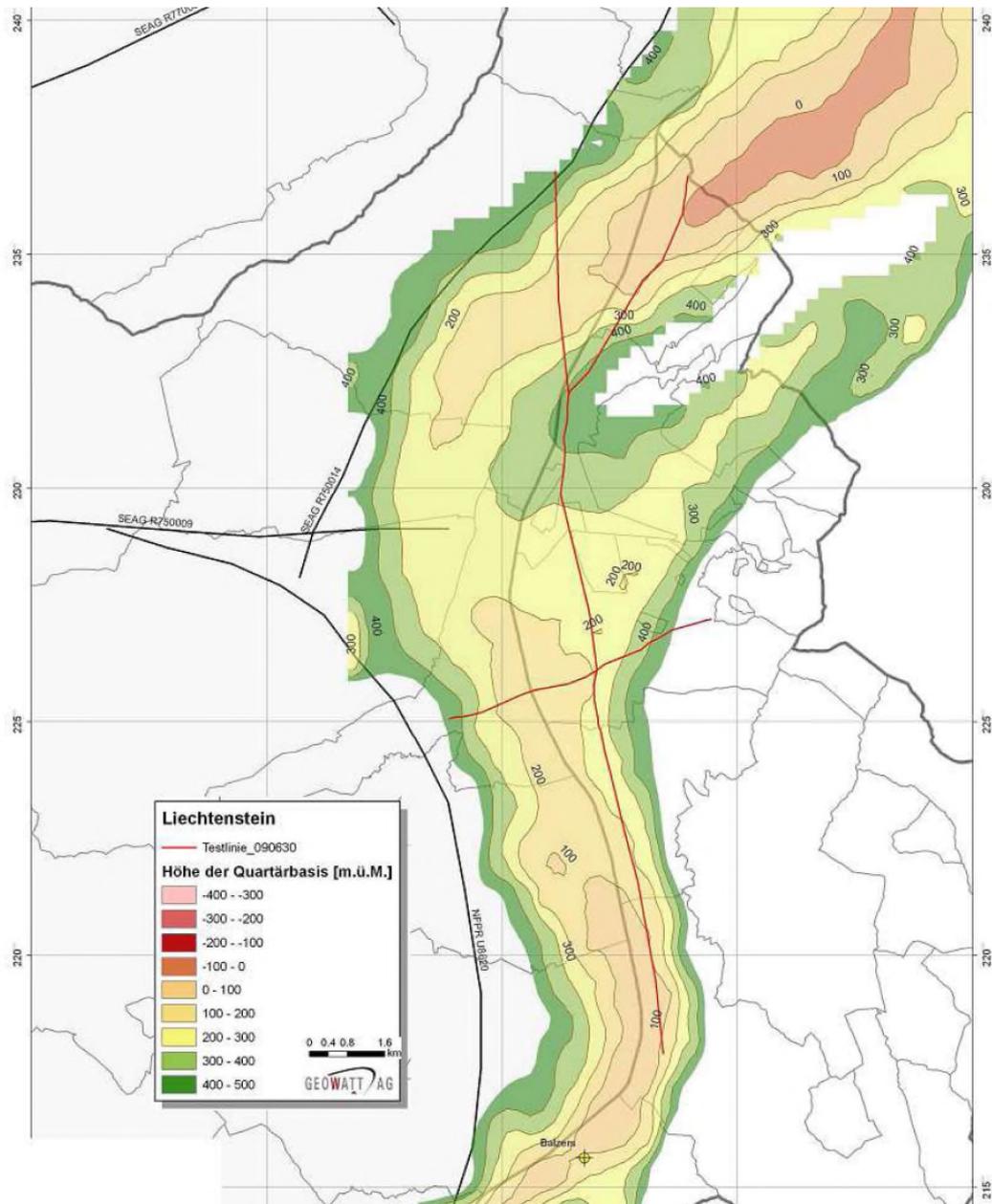


Abbildung 7: Geologie: Lage der Felsoberfläche im Talrog der Rheinebene zwischen Balzers und Ruggell (aus [47]).

2.3.2 Moränenablagerungen

2.3.2.1 Vorkommen typischer Moränenablagerungen

Als Moränenablagerungen werden generell durch Gletscher verfrachtete und abgelagerte Gesteinsmaterialien bezeichnet. Diese können je nach Prozess sowohl feinkörnig wie auch grobkörnig bis blockig zusammengesetzt sein. Charakteristisch für Moränenablagerungen ist häufig eine schlechte Sortierung des Gesteinsmaterials sowie Ritzspuren auf den groben Komponenten.

Im Gebiet von Liechtenstein bilden die nach dem Rückzug der Eismassen am Ende der letzten Eiszeit zurückgelassenen Moränenablagerungen meist die ältesten Lockergesteinsablagerungen. Es werden verschiedene Arten von Moränenablagerungen unterschieden, welche aus verschiedenen Ablagerungsräumen des Gletscherumfelds stammen:

- Material, das durch Gletschererosion an der Eissohle losgelöst und zerschrammt oder durch Spalten ins Eis gefallen ist, wurde unter dem Eis als **Grundmoräne** abgelagert und durch die darüberliegenden Eismassen kompaktiert. Grundmoränen bestehen aus Komponenten der Sand-, Kies-, Stein- und Blockfraktion, welche in einer kompakten, dicht gelagerten feinkörnigen Grundmasse eingebettet sind. Die Komponenten aus den unterschiedlichsten, vom Gletscher erodierten Gesteinstypen, sind in der Regel nur kantengerundet oder rundum poliert und weisen meistens typische Schliﬀspuren auf. Sie sind im Fürstentum Liechtenstein vor allem an den Talhängen zu finden, wo sie den Felsuntergrund grossﬂächig mit Mächtigkeiten von wenigen Metern zu mehreren Zehner-Metern überdecken. Rheintalseitig sind Grundmoränen nur in oberen Hanglagen zu finden; in tieferen Lagen werden sie von den mächtigen Schwemmschuttfächern der Rufen überlagert oder sind abgetragen worden. Das Vorhandensein von Grundmoränen auf dem Felsuntergrund unter der heutigen Talsohle ist nicht im Detail bekannt. So sind im Gebiet südlich von Schaan bisher nur einzelne Vorkommen von Grundmoränen in Bohrungen dokumentiert worden; das grossﬂächige Auftreten von Grundmoräne ist in diesem Teil des Taltroges daher unwahrscheinlich. Dagegen treten etwa ab dem Schaaner Riet in Richtung der Talmulde der Esche z.T. mächtige Moränenablagerungen in der Tiefe auf, welche sich allenfalls mit den oberﬂächennahen Ablagerungen am südlichen Hangfuss des Schellenbergs verbinden lassen. Diese Ablagerungen weisen häufig eine kiesige und feinanteilarme Ausbildung auf und entsprechen somit nicht einer typischen Grundmoräne (vgl. nachfolgendes Kapitel).
- Material, welches von den Eismassen am Rand in **End-** oder **Seitenmoränen** usw. zusammengeschoben und nach dem Abschmelzen des Eises zurückgeblieben ist, kann eine sehr vielfältige Zusammensetzung aufweisen. Das Korngrössenspektrum kann von Silt bis Blockgrösse reichen und der Anteil an siltigen Feinanteilen kann sehr unterschiedlich sein. Im Unterschied zum Grundmoränenmaterial ist es in der Regel nicht vorbelastet und ist daher normal konsolidiert bzw. locker bis mitteldicht gelagert. Typische randliche Moränenablagerungen sind im liechtensteinischen Rheintal nicht bekannt. Ausgeprägte Seitenmoränenwälle sind z.B. in Gross- und Kleinsteg erkennbar. Endmoränen sind lediglich in höheren Lagen im Alpengebiet vorhanden, wo sie sehr junge Rückzugsstadien der abschmelzenden Lokalgletscher dokumentieren.

In tieferen Lagen im Saminatal unterhalb Kote 1260 m ü.M. ist nebst den Ablagerungen des lokalen Gletschers auch Moränenmaterial von dem von Norden her in das Saminatal eindringenden Illgletscher bekannt.

Die meist in Hanglage vom Gletscher zurückgelassenen Moränenablagerungen sind in jüngerer Zeit vielerorts durch Verwitterung, Erosion und Transport umgelagert und verschwemmt worden (vgl. [38] und [39]).

2.3.2.2 Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs

Die Hügellandschaft am Fuss des Schellenbergs bei Eschen und Mauren wurde ebenfalls durch Gletscher geformt. Auffällig sind langgezogene elliptische Hügelformen sogenannte "Büchel". Das Material des Untergrundes weist oberflächennah häufig das für (Grund-) Moränen typische Korngrössenspektrum von Silt- bis Blockfraktion auf. In grösserer Tiefe sind meist feinkornarme, recht gut gerundete Kiese und Sande vorhanden, welche z.T. als glaziale Schotter beschrieben wurden ([38], [39]). Die Mächtigkeit dieser glazial geprägten Abfolge schwankt stark. So wurden am Fusse des Schellenbergs bisher bis zu rund 100 m mächtige Abfolgen angetroffen. Bemerkenswert ist auch, dass die "Schotter" am Hang bis auf Niveaus von rund 540 m ü.M. oder höher auftreten und somit gebietsweise deutlich über der Talebene liegen.

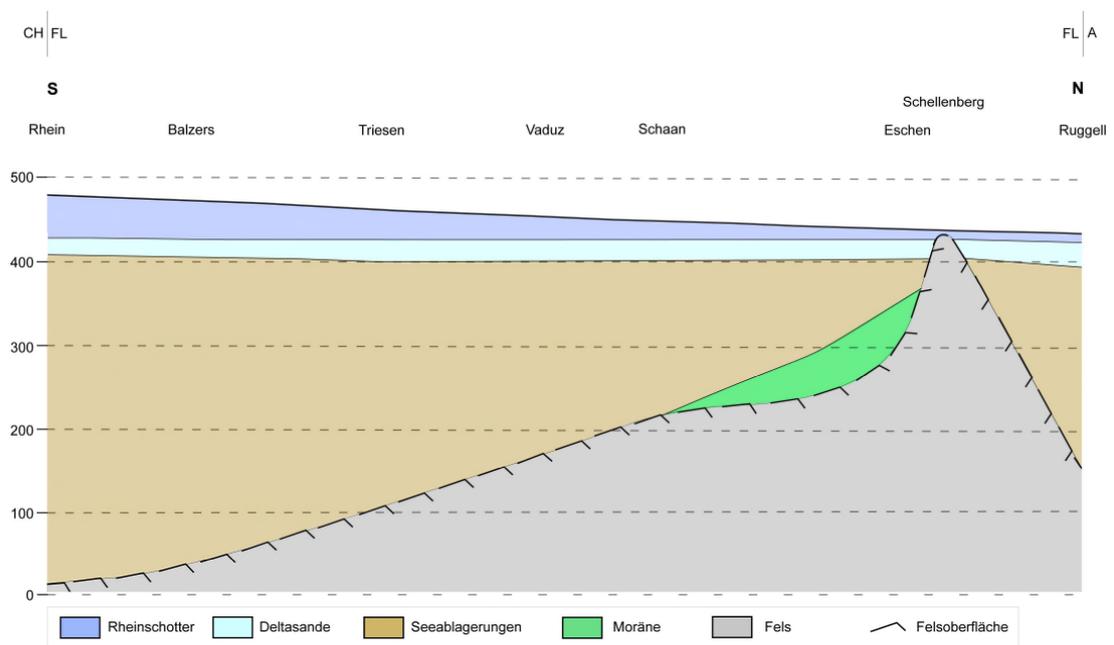


Abbildung 8a: Geologie: Schematischer geologischer Schnitt der alluvialen Talfüllung auf einer Profilspur entlang des Rheins zwischen Balzers und Ruggell.

Die Entstehung und der Aufbau dieser glazialen Abfolge sind bisher nur ungenügend geklärt. Das Vorhandensein der Moränenbedeckung über den vorwiegend kiesigen Abfolgen lässt auf ältere Schotter schliessen, welche der Gletscher während der letzten Vereisung überfahren hat. Die markanten Hügelformen können geologisch als sogenannte „Drumlins“ gedeutet werden, welche ebenfalls bei einem Überfahren des Gletschers mit stellenweiser Erosion wie auch Akkumulation von Lockergesteinen entstehen.

2.3.3 Lakustrische und alluviale Talfüllungen

2.3.3.1 Rheintal

Die Form und der Tiefenverlauf des glazial gebildeten Felstroges ist anhand von geophysikalischen Untersuchungen ermittelt worden ([47] und [48]). Diese zeigen Vertiefungen im Bereich der heutigen Talachse des Rheins im Gebiet zwischen Balzers und Triesen (Felsoberfläche bis unter Kote 100 m ü.M.) sowie nördlich von Ruggell (Felsoberfläche bis unter Kote 0 m ü.M.). Somit ergeben sich maximale Mächtigkeiten der Lockergesteinsauffüllung von über 400 m (vgl. Abb. 7 und 8a).

Generell dokumentiert die Füllung des Felstroges die Verlandung eines Sees, der spät- bis nacheiszeitlich vom heutigen Bodensee bis nach Chur reichte. Zum Alter des Sees und seiner Auffüllung bestehen insgesamt wenige Untersuchungen mit z.T. etwas abweichenden Datierungen (u.a. in [34] und [38]). Es wird davon ausgegangen, dass der See beim Rückzug des Gletschers vor rund 17'000 Jahren entstand. Anschliessend war die Sedimentationsrate von See- und Flussablagerungen offenbar relativ hoch, so dass das Ufer des Deltas vor rund 10'000 Jahren bereits in der Gegend von Kriessern und Altstätten lag.

Der untere Teil der Auffüllung des Felstroges besteht aus tonig-siltigen bis siltig-feinsandigen Sedimenten. Diese werden als **Seeablagerungen** interpretiert. Häufig nimmt deren Korngrösse gegen oben zu; dies als Folge des jeweils näher rückenden Deltas des Rheins (distale Rheinablagerungen).

Darüber folgen etwa ab Kote 400 – 410 m ü.M. zunehmend grobkörnigere, vorwiegend sandige Ablagerungen mit Einschaltungen von Kies. Diese werden als proximale **Deltaablagerungen** des vorrückenden Rheins gedeutet. Im Allgemeinen nimmt auch hier die Korngrösse von unten nach oben zu, von Fein- bis Mittelsanden zu Grobsanden; typisch ist das erwähnte Auftreten von Kies. Tendenziell nimmt die Mächtigkeit der Abfolge von Balzers talabwärts etwas ab. Die Abgrenzung dieser Einheit ist gegen unten zu den Seeablagerungen und gegen oben zu den Rheinschottern graduell und deshalb nicht immer eindeutig festzulegen.

In der Talmitte folgen über den Deltaablagerungen saubere bis leicht siltige Kiese mit Sand und Steinen. Es handelt sich um die sogenannten **Rheinschotter**, welche entlang der Hauptgerinne der Flussläufe zur Ablagerung kamen. In der Abfolge der Rheinschotter treten bereichsweise auch Sandlagen auf. Die Mächtigkeit der Rheinschotter beträgt im Gebiet von Balzers rund 40 – 60 m und nimmt talabwärts allmählich ab; in Ruggell sind die Rheinschotter im Bereich des Hauptgerinnes noch rund 15 – 20 m mächtig (vgl. Abb. 8a). Die östliche Begrenzung der Rheinschotter ist im Talverlauf unterschiedlich und wird durch Verzahnungen mit Schutfächern und feinkörnigen Hinterwasserablagerungen geprägt (Beschreibung vgl. Kap. 4.3.1.2).

Die Kiese und Sande der Rheinschotter werden vielerorts von feinsandigen bis siltigen **Überschwemmungssedimenten** bedeckt, welche häufig auch als Deckschicht oder „Kolmatierung“ bezeichnet wird. Die Sedimente stammen aus episodischen Überschwemmungsereignissen

aus der Zeit vor der definitiven Eindämmung des Rheins in sein heutiges kanalisiertes Bett. Deren Mächtigkeit variiert lokal stark und liegt im Allgemeinen zwischen 0.5 bis rund 3 m.

Abseits vom einstigen Hauptgerinne des Rheins und von grösseren Seitenbächen, bildeten sich sogenannte **Hinterwasserablagerungen**. Diese bestehen meist aus Wechsellagerungen von tonigem Silt, Feinsand und unterschiedlich mächtigen Lagen von organischen Bestandteilen. Gelegentliche Überschwemmungen der Ebene bei Hochwasser und die Verlandung von Auen, Tümpeln und Flachwasserzonen führten zu diesen feinkörnigen Ablagerungen; in sumpfigen Rietflächen kam es zu Torfbildung. Ausgedehnte Rietgebiete haben sich in jüngerer Zeit im Balzner Riet östlich vom Schlosshügel, im Schaaner Riet nördlich von Schaan und zwischen Bendern, Mauren, Nendeln und Schaanwald, sowie im Schellenberger Riet nördlich von Ruggell ausgebildet. Die Mächtigkeit der Hinterwasserablagerungen ist unterschiedlich; an Stellen wo sie die Rheinschotter seitlich weitgehend ersetzen, liegen häufig Mächtigkeiten von rund 10 – 20 m vor.

2.3.3.2 Saminatal

Im Saminatal ist die Talfüllung relativ geringmächtig und lokal geprägt. Im Bereich von Grossteg sind Seeablagerungen bekannt, diese sind jedoch glazialer Herkunft. Der Valüna-bach hat entlang der Talachse im Abschnitt der Alp Valüna und in Steg Schotter abgelagert; diese sind einige Meter mächtig, heterogen aufgebaut und weisen aufgrund ihres murgängähnlichen Ursprungs ein weites Korngrössenspektrum von siltigem Sand bis Blöcke auf. Der Untergrund wird je nach Erosionstiefe des Baches vom anstehenden Fels oder von Moränenablagerungen gebildet.

2.3.4 Hangschutt, Bach- und Rüfeschutt

Im Rheintal liegen am östlichen Talrand zwischen Balzers und Nendeln mehrere mächtige **Schuttfächer** vor. Diese Schuttfächer-Ablagerungen stammen aus den Bachrinnen mit steilen Einzugsgebieten, welche durch Felswände dominiert werden. Das erodierte Material wurde dort vorwiegend durch Murgänge (auch Rüfen genannt) transportiert und auf den Schuttfächern abgelagert. Je nach geologischer Beschaffenheit der Einzugsgebiete der Rüfen, bestehen die Schuttfächer entweder aus eher grobkörnigen Schichten mit geringem Anteil an feinkörniger Grundmasse oder aus feinkörnigeren Ablagerungen mit einer vorwiegend siltigen Grundmasse. Häufig ist auch eine Abnahme der Korngrösse vom zentralen, oberen Teil des Schuttfächers zum Fuss hin zu beobachten.

Im Schuttfächer von Balzers und bei der Lawena-Rüfe dominieren harte Kalke und Kalksandsteine im Einzugsgebiet, die Schuttfächer sind entsprechend durch meist grobkörnige Schichten mit Kies, Steinen und Blöcken charakterisiert. Bei der nördlich folgenden Badtobel-Rüfe sind aufgrund der Flyschgesteine im Einzugsgebiet insgesamt eher feinkörnigere Ablagerungen vorhanden. Der Schuttfächer von Triesen, dessen Einzugsgebiet Flyschgesteine, ostalpine

Gesteine und umgelagertes Material des Rutschgebietes einschliesst, wird hauptsächlich durch stark siltige Kiese mit Steinen aufgebaut. Die grossen Schuttfächer von Vaduz und Schaan weisen Einzugsgebiete auf, bei denen hauptsächlich Hauptdolomit ansteht. Insgesamt ist deren Aufbau vorwiegend durch kiesige Ablagerungen geprägt, wobei die Kiese meist in eine siltig-feinsandige Grundmasse eingebettet sind. Im Schuttfächer der Nendler- und Maurer-Rüfen, deren Einzugsgebiete vorwiegend Flyschgesteine aufweisen, treten wechselhafte Verhältnisse auf, mit feinkörnigen Schichten wie auch siltigen Kiesen mit Steinen.

Die Schuttfächer sind mit den Ablagerungen der Talebene seitlich verzahnt: Beim Schuttfächer der Balzner-Rüfe und den Vaduzer Schuttfächern der Mühleholz- und Quader-Rüfen reichen alluviale Schotter und Deltasande des Rheins zum Talrand hin einige hundert Meter unter / oder zwischen die Schuttfächerablagerungen hinein. Die Schuttfächerablagerungen der Lawena- und Badtobelrügen sind hingegen weit in die Talebene vorgedrungen und reichen unter einer rund 20 m mächtigen Bedeckung von Rheinschottern bis nahe an den heutigen Rheinlauf heran. In Schaan liegen die Schuttfächerablagerungen direkt den sandig-siltigen Delta- und Seeablagerungen auf, welche mehrere hundert Meter unter dem heutigen Schuttkegel und möglicherweise nahe an die seitliche Felsflanke heranreichen.

Im Bereich der Forstrüfe sowie in Nendeln fehlen tiefer reichende Sondieraufschlüsse und es sind keine Hinweise auf eine Unterlagerung des Rüfeschutts durch alluviale oder lakustrische Ablagerungen bekannt.

Im Berggebiet sind die Schuttfächerablagerungen von Schlucher und Fluatola im Gebiet Schneeflucht unterhalb Malbun, sowie des Malbunbachs im Mündungsbereich in das Saminatal in Steg zu erwähnen. Die Mächtigkeit dieser Schuttfächerablagerungen dürfte eher bescheiden sein (weniger als 10 m) und sie sind aus mehrheitlich feinkornarmem Kies- bis Blockschutt zusammengesetzt.

In steileren Partien der Hanggebiete sind aus felsigen Rinnen führende **Trockenschuttfächer** mit Gesteinsschutt in Kies-, Stein- oder Blockfraktion vorhanden. Bei tonreichem Gestein im Einzugsgebiet kann auch ein bedeutender Feinanteil vorliegen. Die Trockenschuttfächer sind meist jüngeren Datums und liegen den übrigen Lockergesteinsablagerungen oder dem Fels auf. Im Zungenbereich laufen sie talseits im flacheren Gelände aus oder werden von den Talgewässern erodiert.

Unter Felswänden bestehen an den Talflanken häufig auch flächenhafte Ablagerungen von **Hangschutt**, welche keine Schuttfächerform aufweisen. Bezüglich ihrer Zusammensetzung sind sie mit den Trockenschuttfächern gleichzusetzen.

2.3.5 Rutschungen

Rutschungen stellen einen besonderen Fall dar, da es sich dabei nicht um einen primären, genetischen Typ an Lockergesteinen, sondern um in Rutschmassen bewegte Lockergesteine unterschiedlicher Materialarten handelt.

Von spezieller Bedeutung ist die **Grossrutschung von Triesenberg**. Die Ausmasse und der Aufbau der Rutschmasse sind aus früheren Untersuchungen gut bekannt (vgl. [75]). Es handelt sich um eine komplex aufgebaute Rutschmasse, welche sich in drei Bereiche unterteilen lässt. Im oberen Bereich zeigen sich treppenartig versetzte Geländeterrassen, welche geologisch als eine Reihe von Felsrutschungen aus Triasgesteinen (Bundsandstein und Muschelkalk) zu interpretieren sind. Im mittleren Bereich handelt es sich um Blockschutt (Blockströme), welche unmittelbar am Fuss der Felsrutschung anschliessen und sich zungenförmig über mehrere Hundert Meter talwärts erstrecken. Die Blockströme bestehen vorwiegend aus grobkörnigem Material (Sand, Kies und Steine) und sind meist weniger als 20 m mächtig. Gegen unten und seitlich sind die Blockströme in feinkörnigen Mischschutt eingebettet. Der untere Bereich, welcher mit seinem frontalen Wulst am Hangfuss in Triesen in die Talebene gegen Westen vorstösst, besteht ausschliesslich aus stark tonig-siltigem und sandigem Mischschutt mit einem erhöhten Anteil an Flyschgesteinen (vgl. auch Abb. 9).

3. Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine

3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die hydrogeologischen Eigenschaften der in Kap. 2 beschriebenen Fest- und Lockergesteine erläutert. Wesentliche Eigenschaft ist die Wasserdurchlässigkeit, welche über den sogenannten Durchlässigkeitsbeiwert (k -Wert) quantifiziert wird. Die verschiedenen Gesteinseinheiten, welche eine gewisse Ausdehnung und Wasserdurchlässigkeit aufweisen, werden als Aquifere oder Grundwasserleiter bezeichnet. Als Grundwasserkörper (GWK) wird ein abgegrenztes Grundwasservolumen oder Grundwasservorkommen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter definiert.

Die drei Haupttypen der Grundwasserleiter – die Kluftgrundwasserleiter, die Karstgrundwasserleiter und die Porengrundwasserleiter – sind in Abbildung 8b schematisch dargestellt und werden in Kap. 3.2 und 3.3 mit ihren generellen Eigenschaften beschrieben.

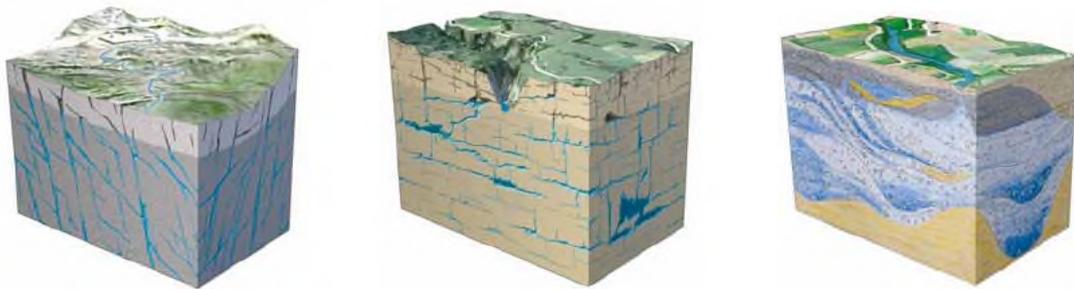


Abbildung 8b: Kluft-, Karst- und Porengrundwasserleiter (aus [1]).

3.2 Festgesteine

3.2.1 Kluftgrundwasserleiter

In geklüfteten Gesteinen fließt das Grundwasser hauptsächlich entlang eines Gefüges aus tektonischen Trennflächen wie Klüften, Spalten, Brüchen und Störungszonen sowie Schichtfugen. Die Gesteinsmatrix ist in der Regel nur sehr gering durchlässig. Je nach Dichte und Häufigkeit der Trennflächen, des Durchtrennungsgrads des Gesteinsverbands und der Öffnungsweite der Klüfte kann die Durchlässigkeit und Speicherefähigkeit des Gesteins für Grundwasser sehr unterschiedlich ausfallen: Sind Trennflächen nur kleinräumig ohne grossen Durchtrennungsgrad ausgebildet, beeinflussen diese die Durchlässigkeit lediglich im kleinen bis lokalen Massstab. Eine grosse Reichweite der Trennflächen bzw. eine komplette Durchtrennung des Gesteinsmassivs von verschiedenen Kluftscharen mit unterschiedlicher Orientierung begünstigen hingegen die Durchlässigkeit auch in grösserem Massstab. Grossräumig gesehen sind Kluftgrundwasserleiter jedoch in der Regel recht heterogen: Schwach durchlässige Bereiche mit geringem Wassertransport wechseln sich ab mit stärker geklüfteten Bereichen, welche die Hauptfliesswege des Wassers bilden (vgl. [17]).

3.2.2 Karstgrundwasserleiter

In Karbonat- und Evaporitgesteinen (z.B. Gips) können die durch Spröddeformation entstandenen Klüfte durch Anlösung im Sickerwasser oder Grundwasser zu Karsthohlräumen aufgeweitet sein. Das Grundwasser bewegt sich sowohl in schmalen Klüften, wie auch in Karstrinnen und Höhlen von z.T. beachtlichem Ausmass. In den kleinen Klüften und Hohlräumen ist die Durchlässigkeit gering, das gespeicherte Wasservolumen jedoch relativ gross. In den Karstrinnen und Höhlensystemen ist hingegen die Durchlässigkeit bei kleinem Speichervolumen sehr gross und es sind hohe Fließgeschwindigkeiten möglich. Die Karstgrundwasservorkommen sind schlecht vor qualitativen Beeinträchtigungen geschützt und die Selbstreinigungswirkung im Grundwasserleiter ist nur gering.

Die Gesteinseinheiten mit Karbonaten und z.T. auch Evaporiten (Raibler-Schichten) die als potenzielle Karstgrundwasserleiter gelten sind dem Kapitel 3.2.3 zu entnehmen.

3.2.3 Die hydrogeologischen Eigenschaften der Felsformationen im FL

Die hydrogeologischen Eigenschaften der Festgesteine wurden in vier Kategorien mit abnehmender Wasserdurchlässigkeit eingeteilt:

- A. verkarstungsfähig; potenziell gute Felsaquifere.
- B. mässig verkarstungsfähig oder meist intensiv zerklüftet; mässig gute Felsaquifere.
- C. wenig verkarstungsfähig, Wechsellagerung mit uneinheitlicher Durchlässigkeit; Grundwassergeringleiter.
- D. geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit; Grundwasserstauer.

3.2.3.1 Helvetikum

Die im Untersuchungsgebiet massgeblich auftretenden helvetischen Sedimentgesteine lassen sich bezüglich ihrer hydrogeologischen Eigenschaften wie folgt einteilen:

Tabelle 1: Hydrogeologische Eigenschaften der helvetischen Gesteine.

Hydrogeologische Eigenschaft	Gesteinseinheit nach [1], [12]	Typische Gesteine
A. verkarstungsfähig, lokal hohe Durchlässigkeit möglich	Quinten-Formation	Kalke
	Schrattenkalk-Formation	Kalke
B. geklüftet, uneinheitliche Durchlässigkeit	Kieselkalk-Formation	kieselige Kalke
	Garschella-Formation	kieselige Kalke und Sandsteine
C. wenig verkarstungsfähig resp. geklüftet	Drusberg-Formation	Mergel u. Mergelkalke
	Amden-Formation	Mergel
D. geringe Durchlässigkeit	Palfries-Formation / Vitznau-Mergel	Mergel u. Tonschiefer

3.2.3.2 Penninikum

Die in Liechtenstein auftretenden Gesteine der Zone mit Gesteinsformationen aus dem Penninikum lassen sich bezüglich ihrer hydrogeologischen Eigenschaften wie folgt einteilen:

Tabelle 2: *Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine des Penninikums und des Flyschs.*

Hydrogeologische Eigenschaft	Gesteinseinheit nach [1], [12]	Typische Gesteine
A. verkarstungsfähig, lokal hohe Durchlässigkeit möglich	Jes-Formation Falknisbrekzien-Formation	Kalke
B. bedingt verkarstungsfähig, geringe Durchlässigkeit	Couches Rouges	Kalke, Mergelkalke und Mergel
C. geklüftet, uneinheitliche Durchlässigkeit	Tristel-Formation "Gault"-Flysch	Brekzien und Sandkalke Sandsteine (u. Tonschiefer)
D. wenig verkarstungsfähig resp. geklüftet, geringe Durchlässigkeit	Panier-Formation Sanalada-Formation Neokom-Flysch Vorarlberg- und Liechtenstein-Flysch i. Allg.	Schiefer, Brekzien und Sandsteine, Kalkschiefer Mergel, Tonschiefer, Kieselkalke Schiefer, Mergel, Sandstein- u. Kalkbänke

3.2.3.3 Ostalpin

Für die Gesteinseinheiten des Ostalpins können die hydrogeologischen Eigenschaften wie folgt charakterisiert werden:

Tabelle 3: *Hydrogeologische Eigenschaften der Gesteine des Ostalpins.*

Hydrogeologische Eigenschaft	Gesteinseinheit nach [1], [12]	Typische Gesteine
A. verkarstungsfähig, lokal hohe Durchlässigkeit möglich	Alpiner Muschelkalk Arlberg-Schichten Plattenkalke/Hauptdolomit	Kalke und Dolomite Kalke und Dolomite Dolomite und Kalke
B. oft intensiv geklüftet	Buntsandstein	Sandsteine
C. z.T. verkarstungsfähig, uneinheitliche Durchlässigkeit	Raibler-Schichten	Schiefer, Brekzien, Sandsteine, gut verkarstungsfähig: Rauhwanke und Gips
D. wenig verkarstungsfähig resp. geklüftet, geringe Durchlässigkeit	Partnach-Schichten	siltige Tonschiefer

3.3 Lockergesteine

3.3.1 Allgemeines

In den Lockergesteinsablagerungen fliesst das Grundwasser durch die untereinander verbundenen Poren zwischen den Körnern. Je nach Korngrössenspektrum des Gesteins kann die Durchlässigkeit sehr unterschiedlich ausfallen (vgl. Kap. 3.3). Häufig liegen in einem Gesteinskörper auch durch den Schichtaufbau bedingte Unterschiede der Durchlässigkeiten vor; die horizontale Durchlässigkeit ist in der Regel bedeutend höher als die vertikale. Als **Porengrundwasserleiter** werden typischerweise Lockergesteinskörper mit vorwiegend grobkörniger Zusammensetzung und mässig guten bis guten Durchlässigkeiten bezeichnet (entsprechende k-Werte ca. $> 1 \times 10^{-4}$ m/s, vgl. Kap. 4.1). Feinkörnigere Lockergesteine weisen geringe Wasserdurchlässigkeiten auf und gelten als Geringleiter oder Grundwasserstauer.

Die Empfindlichkeit oder Vulnerabilität des Grundwassers gegen Verunreinigungen ist in Porengrundwasserleitern in erster Linie abhängig vom Flurabstand und vom Vorhandensein resp. der Mächtigkeit einer Deckschicht. Eine durchgehend vorhandene feinkörnige Boden- und Deckschicht bewirkt eine gute Reinigungs- und Rückhaltewirkung gegenüber Verunreinigungen. Anderenfalls ist die Vulnerabilität des Grundwassers bei Porengrundwasserleitern erhöht.

Als bedeutende Porengrundwasserleiter sind im Untersuchungsgebiet folgende Lockergesteinseinheiten aufzuführen:

- Rheinschotter (regionaler Grundwasserleiter, vgl. Kap. 2.3.3.1 und 3.3.3)
- Schuttfächer zwischen Balzers und Nendlen (vgl. Kap. 2.3.4 und 3.3.4)
- Schuttfächer und alluviale Ablagerungen in Malbun und Steg (vgl. Kap. 2.3.3.2, 2.3.4 und 3.3.4)
- Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs ("glaziale Schotter", vgl. Kap. 2.3.2.2 und 3.3.2)

Im Rahmen dieser Zusammenstellung werden lokal mögliche Grundwasserleiter in End- und Seitenmoränen wie auch in Hangschutt und Trockenschuttfächern als regional wenig bedeutend eingestuft und daher nicht weiter im Detail betrachtet. Die Abfolge der Deltaablagerungen mit ihrem meist graduellen Übergang zu den Rheinschottern wird nicht als gesonderter Grundwasserleiter behandelt (vgl. Kap. 2.3.3.1).

3.3.2 Moränenablagerungen

Die Moränenablagerungen vom Typus **Grundmoräne** sind aufgrund ihrer feinkörnigen Grundmasse fast immer nur sehr gering durchlässig. Nur untergeordnet, so z.B. in sandig-kiesigeren Zonen resp. bei oberflächlicher Auflockerung kann eine gewisse Wasserzirkulation vorhanden sein. Die Grundmoräne ist daher generell als Grundwasserstauer zu betrachten.

Bei **End- oder Seitenmoränen** sind die Materialzusammensetzung und dementsprechend auch die Wasserdurchlässigkeit sehr unterschiedlich und in erster Linie vom Feinanteil abhängig. Das Auftreten von lokalen Grundwasserleitern ist bei feinkornarmer Ausbildung solcher Moränenwälle grundsätzlich möglich. Die Bedeutung in Liechtenstein ist gemäss den Vorkommen (Kap. 2.3.2.1) insgesamt jedoch nur gering.

Bei den **glazialen Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs** sind die Durchlässigkeitsverhältnisse nicht genau bekannt. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist von geringen Durchlässigkeiten in den meist oberflächennah vorhandenen grundmoränenartigen Ablagerungen auszugehen. Dagegen weisen die meist feinkornarmen Kiese und Sande in der Tiefe vermutlich mässig hohe bis hohe Durchlässigkeiten auf ("glaziale Schotter" gemäss Kap. 2.3.2.2).

3.3.3 Lakustrische und alluviale Talfüllungen

Die **Seeablagerungen** des Rheintaltrogens sind aufgrund ihres Feinanteils nur sehr gering durchlässig; es ist mit k-Werten von weniger als 1×10^{-6} m/s zu rechnen, wobei die Durchlässigkeit der Abfolge mit zunehmendem Sandgehalt gegen oben zunehmen dürfte (bis ca. 2×10^{-5} m/s). Die Abfolge ist insgesamt als Grundwasserstauer zu beurteilen.

Die vorwiegend sandigen, teils kiesführenden **Deltaablagerungen** weisen gegenüber den Seeablagerungen höhere Durchlässigkeiten auf. Die Durchlässigkeit wird neben dem Anteil von Sand und Kies auch durch den Feinanteil bestimmt; aufgrund der aktuellen Kenntnisse ist mit k-Werten von 5×10^{-5} – 5×10^{-4} m/s zu rechnen. Aufgrund dieser Durchlässigkeiten ist die Abfolge je nach Ausbildung als Geringleiter bis Grundwasserleiter zu bezeichnen.

Die **Rheinschotter** weisen aufgrund ihrer kiesigen Zusammensetzung mit wenig Feinanteilen gute Durchlässigkeiten und entsprechend erhöhte k-Werte von 1×10^{-3} – 5×10^{-3} m/s auf (vgl. Kap. 4.3.1.3). Sie bilden den regionalen Grundwasserleiter.

Die **Hinterwasserablagerungen** sind aufgrund ihrer ausgeprägt feinkörnigen Zusammensetzung (toniger Silt) inklusive den schwammigen Torf-Zwischenlagen sehr schlecht durchlässig. Sandige Linsen oder Schichten mit mässiger Durchlässigkeit treten in diesen Ablagerungen nur untergeordnet auf; daher können diese Abfolgen insgesamt als Grundwasserstauer beurteilt werden. Die siltig-feinsandigen **Überschwemmungssedimente** sind im Einklang mit ihrer allgemein feinkörnigen Zusammensetzung die von siltigem Feinsand bis zu tonigem Silt streut, entsprechend schlecht bis gering wasserdurchlässig. Im ungestörten Zustand bilden sie deshalb einen mässig guten bis guten natürlichen Schutz des darunterliegenden Grundwasserleiters gegen das Einsickern von Schadstoffen.

3.3.4 Hangschutt, Bach- und Rüfeschutt

Die Schuttfächer des Rheintalrandes, wie auch jene von Malbun und Steg, sind als Grundwasserleiter mit vorwiegend mässig guten Durchlässigkeiten zu bezeichnen.

Über die Durchlässigkeiten der **Schuttfächer-Ablagerungen** bestehen nur lokale Kenntnisse aus punktuellen Messungen. Generell ist aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung – in erster Linie abhängig vom Anteil der feinkörnigen Matrix – von einer recht grossen Spreizung der Durchlässigkeiten auszugehen. Typische (Profil)-k-Werte von Bach- und Rüfeschutt liegen zwischen ca. 8×10^{-5} – 8×10^{-4} m/s. Meist ist tendenziell mit höheren Durchlässigkeiten im zentralen Schüttungsbereich und mit niedrigeren Durchlässigkeiten des Schuttfächers am Fuss zu rechnen. In den Schuttfächern von Vaduz und Schaan wurden z.T. auch in hangfussnahe Gebieten erhöhte k-Werte von bis rund 1×10^{-3} m/s bestimmt.

Ablagerungen von **Hangschutt** und **Trockenschuttfächer** weisen in der Regel bei grobkörniger Ausbildung gute bis z.T. sehr gute Durchlässigkeiten auf (k-Wert $\geq 5 \times 10^{-3}$ m/s). Bei Auftreten von Feinanteilen kann sich die Durchlässigkeit dagegen erheblich verringern (k-Werte $< 1 \times 10^{-4}$ m/s). Aufgrund ihres geologischen Vorkommens an meist steiler Hanglage kann in diesen Lockergesteinskörper zwar Grundwasser zirkulieren; sie stellen jedoch in praktischer Hinsicht aufgrund der beschränkten Ausmasse und der geringen Grundwasserspeicherung keine typischen Grundwasserleiter dar.

4. Grundwasservorkommen

4.1 Allgemeines

Gesteinskörper oder Gesteinsformationen, welche aufgrund ihres Umfangs und Durchlässigkeit eine gewisse Ergiebigkeit und Nutzbarkeit aufweisen, werden als Grundwasserleiter bezeichnet. Die Angaben über die Wasserdurchlässigkeit, die in diesem Bericht verwendet werden, beziehen sich in der Regel auf Durchschnittswerte über den jeweiligen Grundwasserkörper die auch als Profil-k-Werte bezeichnet werden. Als Kriterium für die Ergiebigkeit kann in Lockergesteinen eine Durchlässigkeit von mindestens 1×10^{-4} m/s und eine wassergesättigte Mächtigkeit von mindestens 2 m festgelegt werden, was einer Transmissivität von 2×10^{-4} m²/s entspricht. Dieses Kriterium wurde u.a. bei der Erstellung der Gewässerschutzkarte für die Abgrenzung des Gewässerschutzbereichs A_u angewendet (vgl.[28]). Bei den Kluft- und Karstgrundwasserleitern bestehen bezüglich der Durchlässigkeiten heterogene Verhältnisse und zudem geringe Grundlagendaten. Die Ausscheidung als Grundwasserleiter erfolgte daher gemäss Kapitel 3 aufgrund einer qualitativen Beurteilung.

Im Folgenden werden die Grundwasserleiter mit ihrem Umfang und ihrer räumlichen Anordnung beschrieben. Bezüglich dem Detaillierungsgrad ergeben sich beim Beschrieb Unterschiede, da der entsprechende Kenntnisstand nicht bei allen Grundwasserleitern gleich hoch ist; naturgemäss ist der Kenntnisstand beim regionalen und bedeutendsten Grundwasserleiter der Rheinschotter am grössten.

4.2 Grundwasserleiter im Fels

4.2.1 Allgemeines

Im Untersuchungsgebiet kommen entsprechend den geologischen Verhältnissen (Kap. 2) und den hydrogeologischen Eigenschaften der Festgesteine (Kap. 3) verschiedene Festgesteins-Grundwasserleiter vor. Im Folgenden werden die potenziellen Grundwasserleiter entsprechend ihrer Charakterisierung in Kapitel 3.2 beschrieben. Im Allgemeinen bestehen keine umfassenden Untersuchungen einzelner Fels-Grundwasserleiter und ihrer hydrogeologischer Eigenschaften; die Kenntnisse über die Grundwasserleiter stützen sich auf generelle geologische Grundlagen [21] und wo bekannt auf die Charakteristiken von Quellaustritten.

4.2.2 Kluftgrundwasserleiter

4.2.2.1 Helvetikum: Kieselkalk-Formation, Garschella-Formation

Generell können in diesen zwei Felsformationen, welche im Gebiet des Fürstentums Liechtenstein oft von einer relativ engmaschigen Kreuzklüftung gekennzeichnet sind, mässig bis sehr ergiebige Grundwasservorkommen erwartet werden. Der helvetische Kieselkalk ist ver-

breitet am nördlichen Fläscherberg aufgeschlossen, er baut die gesamte, gegen Nordosten abfallende Bergflanke vom Regitzer Spitz bis zum Felssporn von Schloss Gutenberg auf. Obschon in diesem Gebiet nur kleinere Felsquellen bekannt sind (Wisli-Quellen der Gemeinde Balzers, vgl. Tabelle 4.1), dürften im tiefen Teil nutzbare Kluftwasservorkommen erwartet werden.

Die Garschella-Formation ist am Schellenberg anzutreffen. Vor allem am südöstlichen Hang entspringen dort mehrere kleine Quellen direkt aus diesen Gesteinsschichten (z.B. Quelle Müssnen in Eschen). Aus Tiefenbohrungen ist ferner bekannt, dass diese Formation bis in grössere Tiefen als Grundwasserleiter mit mässig guten bis guten Durchlässigkeiten ausgebildet ist (vgl. auch [21] und [31]). Die Grundwasserspeisung erfolgt praktisch ausschliesslich durch die lokale Meteorwasserinfiltration im Gebiet des Schellenbergs. Die Wasserbeschaffenheit ist schlecht bekannt, entspricht jedoch mit grösster Wahrscheinlichkeit einem wenig mineralisierten (weichen) Calcium-Karbonatwasser.

Tabelle 4.1: Wasserbeschaffenheit Quellen Wisli, Balzers (Beprobung vom 29.11.1999 [60]).

Wassertemperatur °C	10.0
pH-Wert	7.9
Gesamthärte	26.5 fr.H°
Karbonathärte	22.7 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	85.7
Magnesium (Mg) mg/l	12.4
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	2.3
Nitrat (NO ₃) mg/l	6.9
Sulfat (SO ₄) mg/l	28.5

4.2.2.2 Penninikum und Flysch: Tristel-Formation, "Gault"-Flysch

Die Tristel-Formation und der Gault-Flysch sind zwei Gesteinsserien der Falknisdecke, die hauptsächlich in höherer Lage anzutreffen sind. Diese Formationen sind verbreitet wasserführend und speisen zahlreiche kleinere bis mittlere Quellen. Die meisten dieser Quellen sind ungefasst. Fassungen sind vor allem im Alpegebiet Lawena bekannt. Die Felsgrundwasserspeisung erfolgt durch die direkte Infiltration von Meteorwasser und untergeordnet durch Bachwasser-Infiltrat. Die Wasserbeschaffenheit ist schlecht dokumentiert, dürfte in der Regel einem weichen Calcium-Karbonat-Wasser entsprechen.

4.2.2.3 Ostalpin: Buntsandstein

Der Buntsandstein ist mit grösster Wahrscheinlichkeit der Felsgrundwasserleiter mit den grössten Wasserergiebigkeiten. Die Bedeutung dieses Aquifers wird dadurch verstärkt, dass der Buntsandstein in der Regel von einem Wasserstauer wie z.B. die Gesteine der Aroser Zone oder verbreitet von Flysch-Gesteinen unterlagert wird und somit die Reservoir-Funktion optimal gewährt ist (keine erheblichen Verluste in unterliegenden Formationen).

Natürliche Quellaustritte sind im oberen Teil von Triesenberg vorhanden, wo insbesondere die Quellen Bergwald mit einer mittleren Schüttung von ca. 370 l/Min. bekannt sind. Dort werden weitere bedeutende unterirdische Wasseraustritte vermutet, die am Ausbiss des Buntsandsteins, nördlich der Quellen Bergwald, direkt in die Rutschmasse von Triesenberg entwässern (vgl. Abb. 9).

Die Speisung erfolgt einerseits durch die lokale Meteorwasserinfiltration, andererseits haben Untersuchungen nachgewiesen, dass dem Buntsandstein im Gebiet Triesenberg grosse Infiltrationsmengen aus dem Valünabach zufließen [75]. Weiter ist anzunehmen, dass der Buntsandstein Zuflüsse aus dem Muschelkalk im Hangenden erhält. Die spärlichen Daten über die Wasserbeschaffenheit lassen grosse Unterschiede der Mineralisation in Abhängigkeit der Lage der jeweiligen Quellen bzw. des Zeitpunkts der Probenahme erkennen (vgl. Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Streubereich der Wasserbeschaffenheit im Buntsandstein am Beispiel der Quellen Bergwald, Triesenberg (13 Beprobungen 1986 – 2003) [60].

Wassertemperatur °C	4.5 – 10.5°
pH-Wert	7.8 – 8.1
Gesamthärte	34.8 – 41.7 fr.H°
Karbonathärte	5.0 – 11.5 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	83 – 116
Magnesium (Mg) mg/l	19.3 – 28.6
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	0.6 – 1.0
Nitrat (NO ₃) mg/l	1.9 – 2.8
Sulfat (SO ₄) mg/l	244 – 306

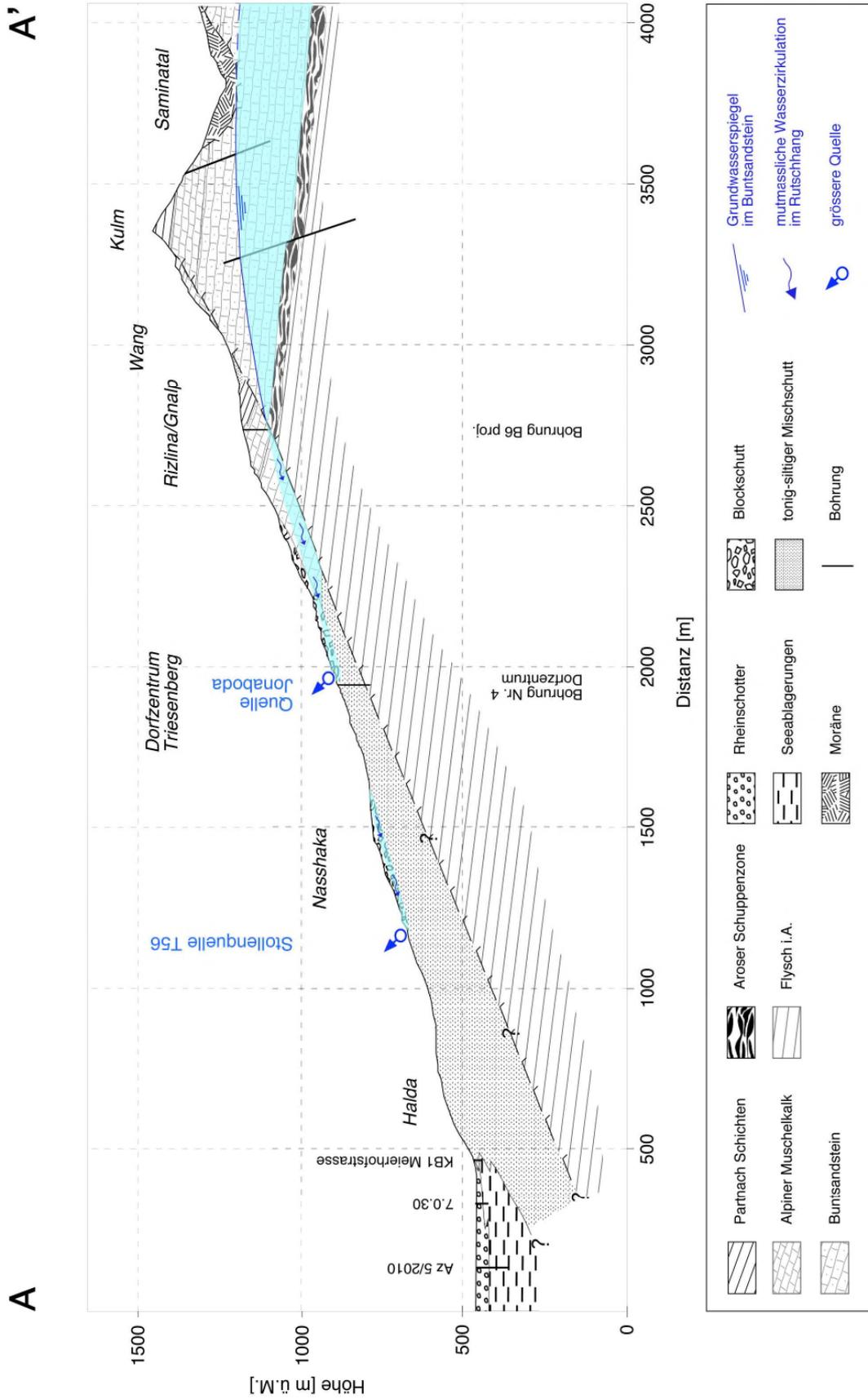


Abbildung 9: Bedeutung des Buntsandsteins als Grundwasserleiter: Gebiet Triesenberg von der Rheinebene bis ins Saminatal (aus [75]).

4.2.3 Karstgrundwasserleiter

4.2.3.1 Helvetikum: Quinten-Formation, Schrattenkalk-Formation

Der helvetische Quintnerkalk (Malm) ist im Fürstentum Liechtenstein nur am Ellhorn direkt anstehend; die Schichten tauchen dort mit etwa 30° Einfallwinkel gegen Osten unter den darüberliegenden Felsstapel ein. In den übrigen Gebieten des Landes ist diese Formation nur in grösseren Tiefen anzutreffen. Der Quintnerkalk, der als überregionaler, bedeutender Felsgrundwasserleiter gilt, hat deshalb hauptsächlich eine Relevanz für die Tiefengeothermie [21], [35] – [37].

Die Wasserbeschaffenheit in der Tiefe wird durch die langsame Erneuerung bzw. durch die grossen Aufenthaltszeiten bedingt als relativ hoch mineralisiert eingestuft. Wasseranalysen aus dem Bergwerk Gonzen [21] lassen auf ein sehr hartes Calcium-Magnesium-Karbonatwasser mit bis zu 500 mg/l gelösten Mineralien schliessen; das Wasser ist weitgehend reduziert und enthält viel gelöstes Eisen und Mangan.

Der Schrattenkalk ist auf weite Teile des Schellenbergs an der Oberfläche anstehend. Aus dieser Formation entspringen einige kleinere gefasste und ungefasste Quellen. Die Speisung des Grundwasserleiters erfolgt ausschliesslich über die direkte Infiltration von Meteorwasser. Die Wasserbeschaffenheit der lokalen Quellen ist schlecht dokumentiert, dürfte jedoch von der begrenzten Aufenthaltszeit und geringer natürlichen Filterwirkung des Gesteins bedingt von einer niedrigen Mineralisation und anfällig auf bakteriellen Verunreinigungen gekennzeichnet sein.

4.2.3.2 Penninikum und Flysch: Jes-Formation und Falknisbrekzien-Formation

Diese Gesteinsformationen gehören zum penninischen Malm und bilden grosse Teile der steilen Wände des Falknis-Massivs. Es handelt sich um nur mässig gut durchlässige Grundwasserleiter bei denen der grösste Teil der Wasserzirkulation in Klüften stattfindet, welche keine Karstentwicklung durchgemacht haben. Als wichtige Quellvorkommen sind die gefassten Quellen „Köpf“ (Wasserversorgung der Gemeinde Balzers) sowie die grosse ungefasste Quelle St. Katharinenbrunnen (Balzers) zu erwähnen. Letztere tritt zwar als Grundwasseraufstoss am Fusse des Andstein, südlich von Balzers aus dem Hang- und Rüfenschutt aus. Es wird jedoch angenommen, dass das Wasser unterirdisch der Jes-Formation des Falknis entspringt.

Die Wasserspeisung erfolgt zu einem grossen Teil über die Infiltration von Meteorwasser und zu einem weiteren Teil aus der Infiltration von Bachwasser im Falknismassiv. Die chemische Wasserbeschaffenheit der Quellen Köpf entspricht einem mittelharten Calcium-Magnesium-Karbonatwasser mit wenig Sulfat (vgl. Tabelle 4.3). Die bakteriologische Beschaffenheit ist in der Regel gut, kann dort sporadisch durch Infiltrationen von Oberflächenwasser beeinträchtigt werden.

Tabelle 4.3: Wasserbeschaffenheit der Quellen Köpf (Beprobung vom 29.11.1999) [60].

Wassertemperatur °C	9.0°
pH-Wert	8.3
Gesamthärte	21.8 fr.H°
Karbonathärte	18.5 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	47.7
Magnesium (Mg) mg/l	24.0
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	0.5
Nitrat (NO ₃) mg/l	4.1
Sulfat (SO ₄) mg/l	27.6

4.2.3.3 Ostalpin: Alpiner Muschelkalk, Arlberg-Schichten, Raibler-Schichten, Hauptdolomit

Der alpine Muschelkalk ist in den höheren Lagen des Fürstentums Liechtenstein von Planken (Sattelköpfe) bis Balzers (Valüna Obersäss) sowie im Gebiet Malbun eine weit verbreitete Gesteinsformation.

Tabelle 4.4: Streubereich der Wasserbeschaffenheit der Efiplankenquellen (Beprobung vom 10.11.1992) [60].

Wassertemperatur °C	6.8
pH-Wert	7.4 – 7.6
Gesamthärte	52.5 – 59.7 fr.H°
Karbonathärte	23.4 – 27.3 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	153 – 181
Magnesium (Mg) mg/l	34.5 – 35.1
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	0.8 – 0.9
Nitrat (NO ₃) mg/l	1.5 – 2.5
Sulfat (SO ₄) mg/l	239 – 323

Bedingt durch ihre relativ geringe Mächtigkeit (ca. 50 – 80 m) und durch den Umstand, dass diese Formation meistens von durchlässigen Gesteinsserien unterlagert wird, in denen sie entwässern kann (Buntsandstein), kann sie nur selten als eigenständiger Grundwasserleiter

auftreten. Als bedeutendste gefasste Quellen sind die Efiplankentobel-Quellen (Schaan) zu erwähnen. Diese Quellen mit einer mittleren Schüttung von ca. 480 l/Min. liefern ein sehr hartes Wasser mit eher hohem Sulfat-Gehalt (vgl. Tabelle 4.4).

Die drei weiteren Formationen der Lechtal-Decke, nämlich die Arlberg-Schichten, die Raibler-Schichten und der Hauptdolomit bilden eine ununterbrochene Gesteins-Abfolge. Obschon die einzelnen Gesteine in ihrer petrographischen Zusammensetzung sehr unterschiedlich sind, können sie in hydraulischer Hinsicht als grosser, zusammenhängender Felsgrundwasserleiter betrachtet werden. Der Hauptdolomit steht über weite Teile der Lechtal-Decke an der Oberfläche an. Aufgrund der starken Verkarstung ist die Wasserdurchlässigkeit sehr gross und der Hauptteil der Niederschläge fliesst unterirdisch ab. Die unterirdische Wasserzirkulation mündet in einzelne, meistens ergiebige aber aufgrund der sehr hohen Mineralisierung nur selten für die Trinkwassernutzung gefasste Quellen (vgl. unten). Als grosse bekannte Quellen sind die Spörry-Quellen in Vaduz oder die Quellen Quadretscha in Vaduz zu erwähnen.

Die chemische Wasserbeschaffenheit ist in der Regel massgeblich von den gipshaltigen Raiblerschichten geprägt, daraus resultiert eine sehr hohe Gesamthärte und insbesondere ein Sulfatgehalt, der deutlich über dem Richtwert für Trinkwasser liegt (vgl. Tabelle 4.5).

Bei den Spörry-Quellen liegt der Sulfatgehalt zeitweise über 450 mg/l.

Tabelle 4.5: Streubereich der Wasserbeschaffenheit der Quellen Quadretscha, Vaduz [60].

Wassertemperatur	4.8°
pH-Wert	7.5 – 8.0
Gesamthärte	65 – 72 fr.H°
Karbonathärte	23 – 27 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	95 – 130
Magnesium (Mg) mg/l	22 – 30
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (C ₁) mg/l	3 – 4
Nitrat (NO ₃) mg/l	5 – 7
Sulfat (SO ₄) mg/l	390 – 430

4.3 Grundwasserleiter in den Lockergesteinen

4.3.1 Schotter des Alpenrheins (Rheinschotter)

4.3.1.1 Aufbau des Grundwasserleiters

Unter der Ebene des Alpenrheintals liegt das bei weitem grösste und bedeutendste Grundwasservorkommen in der Region. Der Grundwasserleiter besteht grösstenteils aus den Rheinschottern die sich typischerweise aus sauberem bis leicht siltigem Kies mit Sand und Steinen zusammensetzen (vgl. auch Kapitel 2.3.3.1). Stellenweise sind darin geringmächtige Zwischenschichten und Linsen mit Sand oder seltener auch Silt vorhanden. Bedingt durch das einstige Ablagerungsmilieu eines mehrere 100 m breiten Flussbetts mit Kiesbänken liegen innerhalb der Schotter in der Fliessrichtung orientierte, lang gestreckte Strukturen von Kieskörpern mit feinkornarmen oder sandigeren Linsen vor. Es bestehen somit laterale wie auch vertikale Heterogenitäten des Grundwasserleiters.

Gegen die Tiefe werden die Rheinschotter zunehmend sandiger und gehen in Deltaablagerungen über. Die sandigen, teils kiesführenden Deltaablagerungen stellen den Übergang vom Grundwasserleiter zum darunterliegenden Grundwasserstauer der siltig bis feinsandigen Seeablagerungen dar. Der Profilschnitt in Abb. 8 zeigt den generellen Aufbau des Grundwasserleiters entlang dem Rhein zwischen Balzers und Ruggell schematisch auf. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters nimmt von Süden nach Norden ab: Südlich von Balzers sind die Schotter in der Talmitte über 70 m mächtig, in Triesen ca. 50 m bis 55 m, in Vaduz ca. 30 m bis 35 m, in Schaan 20 m bis 25 m, in Bendern ca. 20 m und in Ruggell noch rund 15 bis 20 m.

Stauende Zwischenschichten innerhalb der Rheinschotter sind südlich von Vaduz und auch nördlich von Bendern meist nicht vorhanden. Im Zentrum von Vaduz im Gebiet Äuli sind vom Hang her zur Talmitte hin auskeilende Zwischenschichten mit feinkörnigen Hinterwasserablagerungen bekannt, welche den Grundwasserleiter in zwei bis drei „Stockwerke“ unterteilen. Dabei handelt es sich aber nach heutigem Stand der Kenntnisse nicht um einen eigentlichen Stockwerk-Aufbau im hydrogeologischen Sinne, da die Schichten in westlicher Richtung zu einem einzigen Grundwasserleiter verschmelzen und zwischen den verschiedenen Schichten keine nennenswerten Potenzial-Unterschiede bestehen. Zwischen Schaan und Bendern sind häufig siltige Zwischenschichten vorhanden, welche als seitliche Ausläufer der im Talrandbereich dominierenden Hinterwasserablagerungen bis nahe zum Rhein hin reichen. Die räumliche Verbreitung einzelner Zwischenschichten und deren hydraulische Stauwirkung sind allerdings nicht genau bekannt.

Am östlichen Talrand sind die Rheinschotter entlang der Schuttfächer seitlich mit kiesig-sandigen bis siltigen Rüfeschuttablagerungen verzahnt, welche in den Grundwasserkörper hinein reichen oder diesen überlagern (vgl. Kap. 4.3.1.2).

4.3.1.2 Räumliche Ausdehnung

Die Rheinschotter bilden entlang der Talachse des Alpenrheintals einen zusammenhängenden Grundwasserleiter, welcher meist den grössten Teil der Talbreite beidseits des Rheins einnimmt. Von Bonaduz her reicht dieser Schotterkörper über Chur, Landquart und Sargans in den liechtensteinischen Talabschnitt. Unterhalb von Ruggell wird er seitlich eingeeengt: Von der Ostseite reicht der Schuttfächer der Ill und südlich angrenzende Hinterwasser- und Rietablagerungen bei Bangs in die Talebene hinein; auf der Westseite bildet die Felsschwelle des Büchelbergs bei Rüthi eine scharfe seitliche Begrenzung der Rheinschotter.

Im liechtensteinischen Talabschnitt liegt die westliche Begrenzung der Rheinschotter jenseits des heutigen Rheinlaufs entlang dem Talrand zwischen Sargans und Sennwald. Die ostseitige Begrenzung des Grundwasserkörpers in den Rheinschottern ist sehr vielfältig ausgebildet. An mehreren Stellen grenzen benachbarte hangseitig gelegene Grundwasservorkommen an den Grundwasserleiter in der Talebene an und stehen gegenseitig in direkter hydraulischer Verbindung:

- Im südlichsten Abschnitt bei **Balzers** reichen die Schotter seitlich bis an die steil abfallenden Felshänge des Ellhorns, des Tschingels und des Schlosshügels von Balzers heran. Einzig in der Talnische des Elltals liegen randlich vermutlich feinkörnige Hinterwasserablagerungen. Auch beim Ausgang des Seitentals von St. Luzisteig in die Rheinebene bei Stadel sind die Rheinschotter mit Hinterwasserablagerungen verzahnt.
- **Zwischen Balzers und Triesen** grenzen die Rheinschotter an die Schuttfächerablagerungen: Dort sind sie seitlich mit dem Schuttfächer der Balzner Rufe verzahnt und reichen z.T. weit unter den Rufeschutt. Die heterogenen Schuttfächer der Lawena- und Badtobelrufe begrenzen die Rheinschotter am Hangfuss, wobei Zwischenlagen mit Rufeschutt weit in die Talebene hinein reichen können. Bei den eher feinkörnigen Schuttfächern des Guggerboda- und Teufibachs in Triesen dürfte die Begrenzung der Rheinschotter etwa entlang vom Hangfuss und der Landstrasse verlaufen, wobei Schuttfächerablagerungen die Rheinschotter unterlagern und in der Tiefe z.T. weit in die Talebene vorstossen.
- Beim seitlichen Übergang der Rheinschotter zur **Rutschmasse von Triesen-Triesenberg** liegt in der Talnische bei St. Wolfgang verschwemmtes feinkörniges Material aus der Rutschmasse mit Rietbildungen und Torfablagerungen, welches seitlich mit den Rheinschottern verzahnt ist. Am Hangfuss des Steilhangs bei Halde ist der seitliche Übergang von den Rheinschottern zur Rutschmasse scharf ausgebildet, wie sich die Abgrenzung in der Tiefe fortsetzt, ist bisher unbekannt.
- Der feinkörnige, schlecht durchlässige Bach- und Rufeschutt der **Schuttfächer der Eichholzobel- und Erlabäche** reicht im Gebiet Galga unter die Rheinschotter in die Talebene hinein.
- Am Fuss des steil in den Untergrund abtauchenden **Felshangs zwischen Rütli-Schwefel und dem Zentrum von Vaduz** liegen verschwemmter Hangschutt und feinkörnige Hin-

terwasserablagerungen vor, welche seitlich mit den Rheinschottern verzahnt sind. Bei Spania-Heiligkreuz werden die Rheinschotter durch den kleinen Bachschuttfächer überlagert; das Grundwasservorkommen reicht jedoch auch hier bis nahe an den Talhang heran.

- Der Fuss des mächtigen **Schuttfächers der Mühleholzröfe** in Vaduz liegt den Rheinschottern auf, welche ausgehend vom topographischen Hangfuss ostwärts rund 200 bis 300 m unter die Schuttfächerablagerungen reichen und auskeilen. Das Rüfeschuttmaterial ist mässig bis gut durchlässig und ebenfalls grundwasserführend.
- Am Fuss des **Schuttfächers der Tid- oder Quaderröfe** in Schaan reichen die Rheinschotter hingegen nicht unter den Bach- und Rüfeschutt, sondern sind vermutlich in der Nähe des Hangfusses seitlich mit dem Schuttfächer verzahnt. Auch hier ist das Rüfematerial meist mässig bis gut durchlässig und grundwasserführend.
- Unter der **Talebene zwischen Schaan und Bendern – Eschen** werden die Rheinschotter seitlich gegen Osten und Nordosten geringmächtiger; dies in erster Linie als Folge der östlich zunehmenden Mächtigkeit der Überdeckung mit Hinterwasserablagerungen (rund 5 – 10 m). Auch die Basis der Rheinschotter steigt an, was die Mächtigkeit weiter verringert. Es zeigt sich jedoch, dass ein sandig-kiesig ausgebildeter Ausläufer der Rheinschotter mit wenigen Metern Mächtigkeit bis in das Gebiet der Talung der Esche zwischen Eschen und Nendeln reicht.
- Entlang des **Hangfusses der Forströfe** reichen die Rheinschotter resp. deren sandig-kiesige Ausläufer wahrscheinlich unter einer Bedeckung mit Hinterwasserablagerungen bis nahe an den Rüfeschutt am Hangfuss heran. In der Talnische von Äscher – Schwabbrünnen gehen die Schotter seitlich in Hinterwasser- und Rietablagerungen über.
- **Zwischen Eschen und Bendern** ist das Auskeilen der Rheinschotter gegen Norden nicht genau dokumentiert. Allenfalls reichen sandig-kiesige Ausläufer unter der Bedeckung mit Hinterwasserablagerungen bis zum Hangfuss der Moränenhügel des Eschnerbergs. Beim gegen Westen abtauchenden Felssporn des Schellenbergs in Bendern ist dagegen bekannt, dass die Rheinschotter bis nahe an den Hang reichen.
- Weiter talabwärts und entlang der Nordwestflanke des Schellenbergs **zwischen Bendern und Ruggell (Limseneck)** reichen die Rheinschotter ebenfalls bis an die unter die Talebene abtauchende Felsoberfläche heran. Einzige Ausnahme bildet die kleine Talnische von Hueb, welche mit feinkörnigem, aus der Talmulde von Hala stammendem Hangschutt und aus einer Überdeckung mit Hinterwasserablagerungen gefüllt ist.
- Östlich der Linie **Limseneck – Ober Riet – Bangserfeld** im nördlichsten Zipfel des Landes keilen die Rheinschotter seitlich aus, indem die feinkörnigen Hinterwasser- und sandigen Deltaablagerungen ihren Platz einnehmen.

4.3.1.3 Durchlässigkeits-Verhältnisse und Ergiebigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit (Durchlässigkeit) ist aus zahlreichen Kurzpumpversuchen in Sondierbohrungen gut bekannt. Allerdings reichen die meisten dieser Bohrungen nur bis in 15 m bis 25 m Tiefe und durchdringen die gut durchlässigen Kiessande der Rheinschotter nicht vollständig. Daher sind die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte nur für den oberen, oberflächennahen Teil des Grundwasserkörpers repräsentativ.

Die sauberen bis leicht siltigen Kiese und Sande der **Rheinschotter** sind gut bis sehr gut durchlässig. In Kurzpumpversuchen in un tiefen Sondierbohrungen wurden lokal Durchlässigkeitsbeiwerte (gemittelter Profil k-Wert) ermittelt, welche mehrheitlich zwischen 1×10^{-3} m/s bis 5×10^{-3} m/s streuen. Messungen im Vertikalprofil einzelner Sondierbohrungen mit Flowmeter-Versuchen (Bestimmung der Bereichs-k-Werte) zeigen, dass feinkornfreie Linsen und Schichten deutlich höhere Durchlässigkeitsbeiwerte aufweisen. Dank der linsenartigen Struktur des Grundwasserleiters, sind diese durchlässigsten Linsen und Schichten der Rheinschotter untereinander gut verbunden, was grossräumig in einer hohen bis sehr hohen Durchlässigkeit resultiert (Formations-k-Wert/Gebietsdurchlässigkeit), welche bis zu einer Grössenordnung über den gemessenen Profil-k-Werten liegt.

In den vorwiegend sandigen **Deltaablagerungen** ist mit k-Werten von 5×10^{-5} – 5×10^{-4} m/s zu rechnen; je nach Kiesanteil auch bis 1×10^{-3} m/s; Messdaten liegen jedoch nicht vor. Auch die Durchlässigkeit der in den Rheinschottern eingebetteten sauberen bis leicht siltigen Sandlinsen liegt etwa in derselben Grössenordnung. Siltige Zwischenschichten und **Hinterwasserablagerungen** wirken dagegen als lokale Stauer und weisen Durchlässigkeitsbeiwerte von 1×10^{-7} m/s bis 1×10^{-5} m/s auf. Die Durchlässigkeitsbeiwerte in den siltig-feinsandigen Deckschichten über den Rheinschottern liegen etwa bei 1×10^{-5} m/s bis 5×10^{-5} m/s.

Hinsichtlich der Nutzung von Grundwasser ist jedoch eine andere Kenngrösse als die Durchlässigkeit von Bedeutung: die **Transmissivität**. Die Wasserergiebigkeit eines Grundwasserleiters – so genannte – Transmissivität lässt sich aus dem Produkt der jeweiligen hydraulischen Leitfähigkeit (gemittelter Profil-k-Wert) mit der Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht (H) berechnen. Systematische Erhebungen und eine punktuelle Darstellung der Transmissivität liegen aus [32] vor; die Ergebnisse aus den seither zahlreich ausgeführten Sondierbohrungen sind hingegen nicht aufgearbeitet worden. In Gebieten, wo die Untergrenze der gut durchlässigen Kiessande der Rheinschotter nicht dokumentiert worden ist, bestehen noch bedeutende Unsicherheiten zur Ergiebigkeit. Gemäss [32] beträgt die Transmissivität in weiten Teilen des Grundwasserkörpers der Talebene mehr als 2×10^{-2} m²/s. Jüngere grossräumige hydrogeologische Untersuchungen der schweizerischen Talhälfte (vgl. [19]) zeigen auf, welche Obergrenze der Transmissivitätswerte in den Rheinschottern erwartet werden kann: So sind in der Talebene zwischen Mäls und Schollberg Transmissivitäten von mehr als 15×10^{-2} m²/s vorhanden.

Im Talabschnitt zwischen Balzers und Schaan reicht der Bereich mit hohen Transmissivitäten ($> 2 \times 10^{-2}$ m²/s) seitlich bis nahe an den Rand der Talebene. Nördlich von Schaan wird diese ergiebige Zone vom Talrand her seitlich eingengt und reicht im Gebiet Rheinau Eschen –

Bendern vom Rhein her nur unweit Richtung Osten. Im Abschnitt zwischen Bendern und Ruggell liegen hohe Transmissivitäten vorwiegend in einer schmal ausgebildeten Zone entlang dem Rhein vor; nur im Gebiet Oberau – Spetzau sind hohe Transmissivitäten in Bohrungen belegt.

Mässig hohe Transmissivitäten ($0.2 - 2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) liegen vor allem in den Übergangsbereichen zwischen den Gebieten mit vorherrschend Rheinschottern und den Rietgebieten mit mächtigen Hinterwasserablagerungen zwischen Schaan, Bendern und Eschen sowie in Ruggell vor. Die Abnahme der Transmissivitätswerte ist dabei sowohl einer geringeren Mächtigkeit der Rheinschotter als auch einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit dieser Schichten zuzuschreiben. Die in [32] dargestellten Gebiete mit nur mässig hohen Transmissivitäten in Rheinnähe in Vaduz und Schaan sind zumindest zu hinterfragen; eine neue systematische Auswertung der heutigen Datenbasis, welche dies klar widerlegen würde, ist jedoch bis anhin nicht erfolgt.

Geringe Transmissivitäten liegen erwartungsgemäss in den Rietgebieten von Balzers, Eschen-Mauren-Nendeln und randlich auch in Ruggell vor ($< 0.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), wo die Hinterwasserablagerungen vorherrschen und die Kiessande der Rheinschotter meist gänzlich fehlen.

4.3.1.4 Lage und Schwankung des Grundwasserspiegels

Im Gebiet der Talebene werden die Grundwasserstände seit Ende der 70er Jahre in den Messstellen der Profile 1 – 18 (vgl. [32]) systematisch mit Handmessungen erfasst und dokumentiert ([58], vgl. auch Kapitel 7). Seit 2008 sind zudem bei ausgewählten Messstellen automatische Messsonden mit Datenloggern installiert, welche lückenlos Jahresganglinien liefern (vgl. auch Abb. 10a und Abb. 10g).

Die Rheinschotter weisen im Allgemeinen einen untiefen Grundwasserspiegel (Flurabstand im Mittel 1.5 bis 4.0 m) mit einer freien Grundwasseroberfläche auf. Gespannte Verhältnisse, d.h. Bereiche, wo die Druckoberfläche des Grundwassers über der Obergrenze des Grundwasserleiters liegt, sind beschränkt auf Randgebiete mit mächtigen Deckschichten oder mit Hinterwasserablagerungen über den Rheinschottern anzutreffen.

Bei der Beschreibung von Grundwasserständen wird zwischen Mittelwasserstand (MW), Hochwasserstand (HW) und Niedrigwasserstand (NW) des Grundwassers unterschieden; wobei bei den letztgenannten die Häufigkeit des Auftretens zu benennen ist. Im Gebiet der Talebene ist der Mittelwasserstand durch statistische Auswertungen und räumliche Messungen gut bekannt und im Bericht [24] mit Isohypsenplänen dokumentiert. Zu den Hochwasser- resp. Niedrigwasserständen liegen bisher keine vergleichbaren, mit umfangreichen Messdaten abgesicherte Auswertungen des Gesamtgebietes vor. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse des Grundwassermodells Alpenrhein (u.a. [42], [43], [44] und [45]), bei welchem verschiedene Grundwasserstände – so auch Hochwasser und Niedrigwasser – modelliert wurden. Diese Darstellungen entsprechen jedoch nur bedingt den effektiven Grundwasserständen; da bei den Modellen relevante Vereinfachungen vorliegen (z.B. Messnetzdichte, Anbindung an Oberflächengewässer). Für die Gebiete der Gemeinden Balzers und

Vaduz bestehen Auswertungen zu massgebenden Grundwasserhochständen für die Planung der Meteorwasserversickerung, welche statistisch während einem Jahr mehrfach überschritten werden können [67] und [74]. Zu den maximal auftretenden Grundwasserhöchstständen (HHW) liegen keine regionalen Auswertungen vor.

Der saisonale Verlauf des Grundwasserspiegels weist einen Jahresgang auf, welcher durch den Rheinpegel massgebend gesteuert wird. So treten Hochwasserstände in der Regel im Zeitraum April – Juli bei hohen Rheinpegeln anlässlich der alpinen Schneeschmelze oder bei ausserordentlichen Niederschlägen am Alpennordhang ein. Jährliche Niedrigwasserstände treten bei niedrigem Rheinpegel im Winter ein (meist Januar – März). Generell kann beobachtet werden, dass der Grundwasserleiter in Rheinnähe höhere Schwankungsamplituden des Grundwasserspiegels aufweist als im rheinfernem Teil des Grundwasserleiters. Dies als Folge des Einflusses der Infiltration oder Exfiltration des Rheins (vgl. Kap. 4.3.1.6). Die hydraulische Anbindung des Grundwasserleiters an den Rheinpegel ist ausserordentlich eng, wie am Beispiel der Ganglinie in der Messstelle 2.0.40 veranschaulicht werden kann (vgl. Abb. 10a). Gerade in den Wintermonaten wird der Rheinpegel stark vom Schwall und Sunk aus dem Kraftwerkbetrieb bestimmt, dieser Verlauf wird 1:1 im Grundwasserverhalten übertragen.

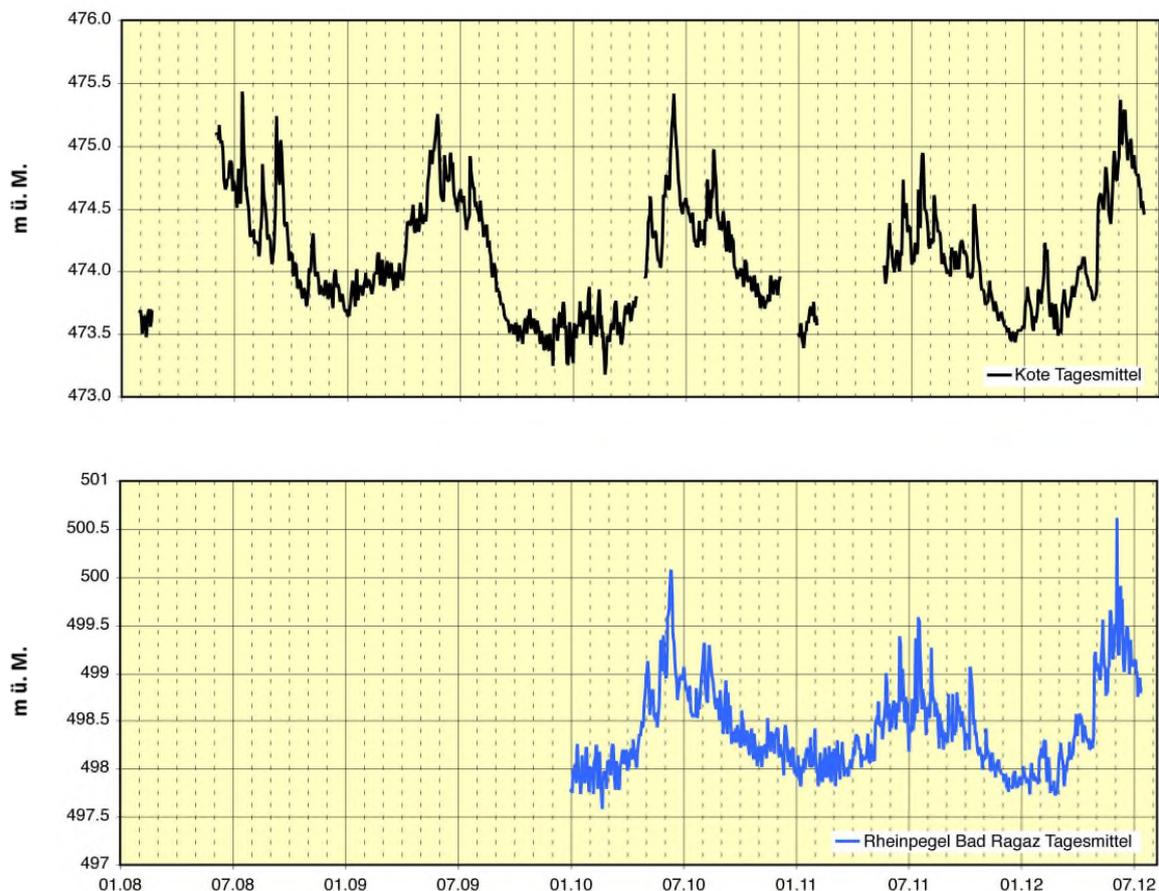
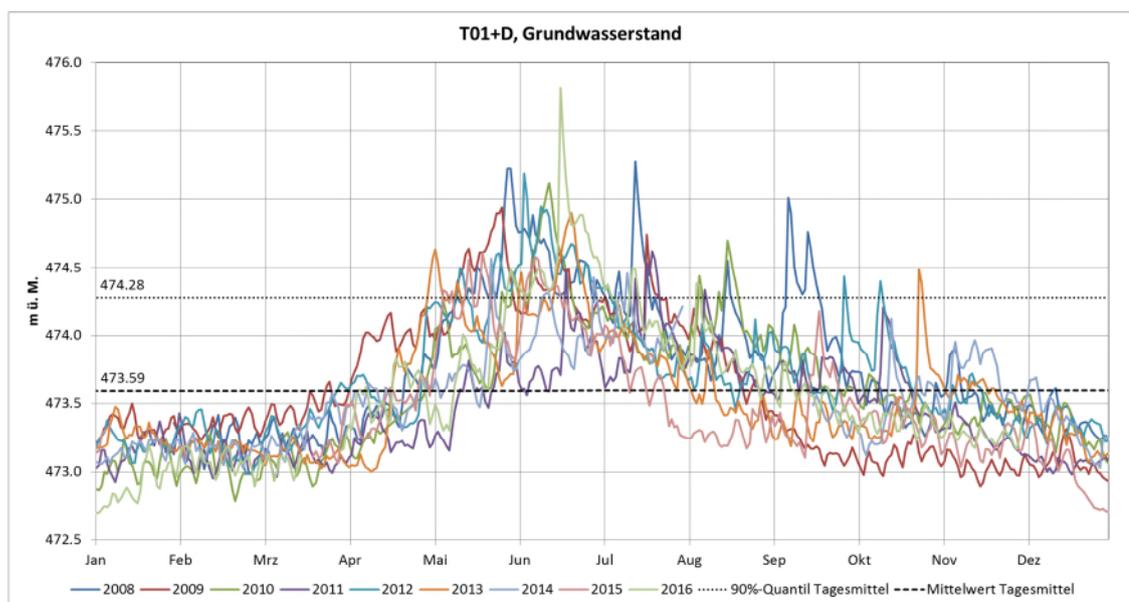
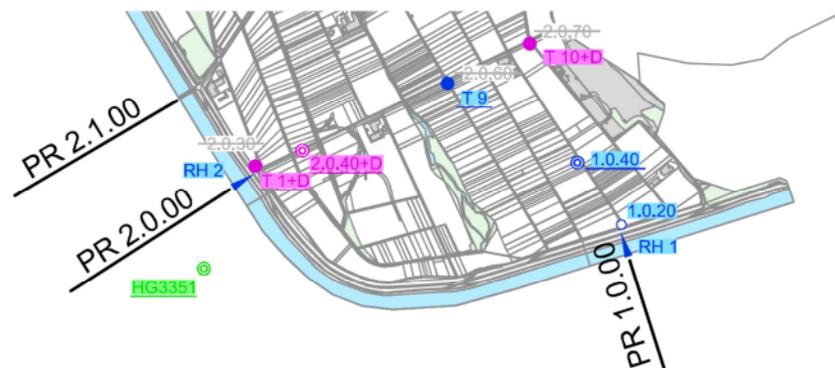


Abbildung 10a: Vergleich Ganglinie des Grundwasserspiegels in den Rheinschottern am Beispiel der Messstelle 2.0.40+D in Balzers mit Ganglinie des Rheinpegels (Quelle: AU).

Die Lage und die Schwankung des Grundwasserspiegels werden im Folgenden gebietsweise beschrieben. Die zur Orientierung angegebenen Profil-Nummern beziehen sich auf die bekannten, vom Rhein ausgehenden Profilschnitte aus dem EAWAG-Bericht [32] (vgl. z.B. Isohypsenpläne [24]).

Gebiet Balzers, zwischen Profil 1.0 und Profil 5.0

Die Mittelwasserstände liegen zwischen 476.5 m ü.M. im Südostteil (Profil 1) und ca. 467.0 m ü.M. im Nordteil des Gebiets (Profil 5) [24]. Dies entspricht Flurabständen von etwa 2.5 – 3.5 m. Am östlichen Rand der Talebene in der Nähe des Baugebiets von Balzers betragen die Flurabstände teils auch weniger als 2.5 m. Die jährlichen Hochwasserstände sind deutlich vom Rheinpegel gesteuert; sie liegen in rheinnahen Gebieten bis in wenigen Hundert Metern Entfernung rund 1.0 – 1.5 m über den Mittelwasserständen. In rheinfernen Gebieten resp. gegen den Talrand liegen sie noch rund 0.6 – 1.0 m über den Mittelwasserständen [74]. Die jährlichen Niedrigwasserstände sind allgemein rund 0.6 – 0.8 m unter den Mittelwasserständen zu erwarten. Die Variabilität der Jahresganglinien des Grundwasserspiegels in diesem Gebiet (2008 – 2016) sind in Abb. 10b veranschaulicht.



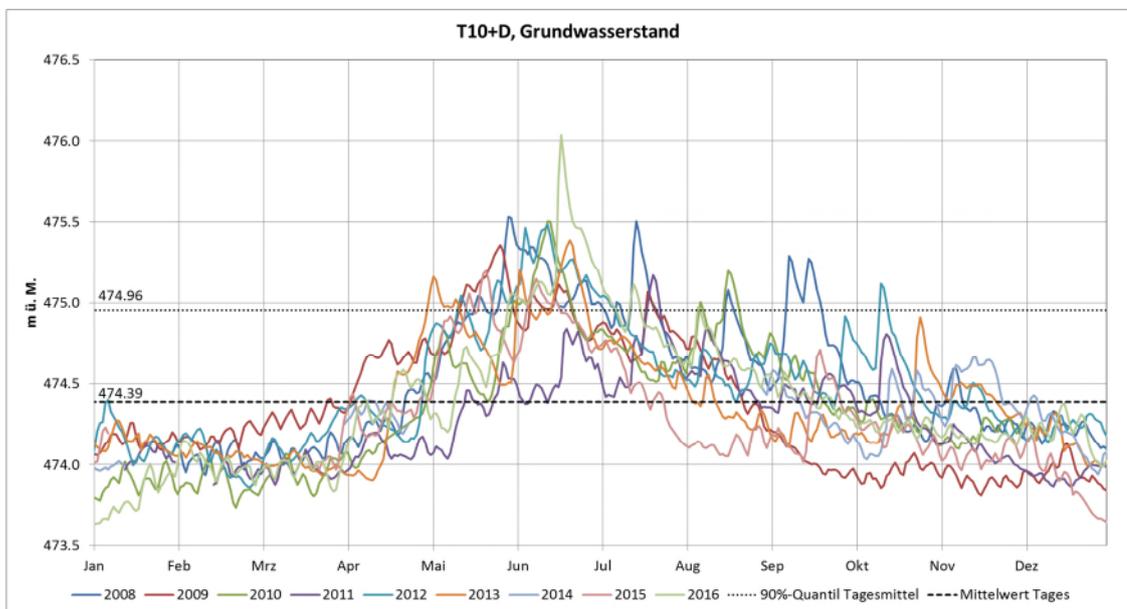
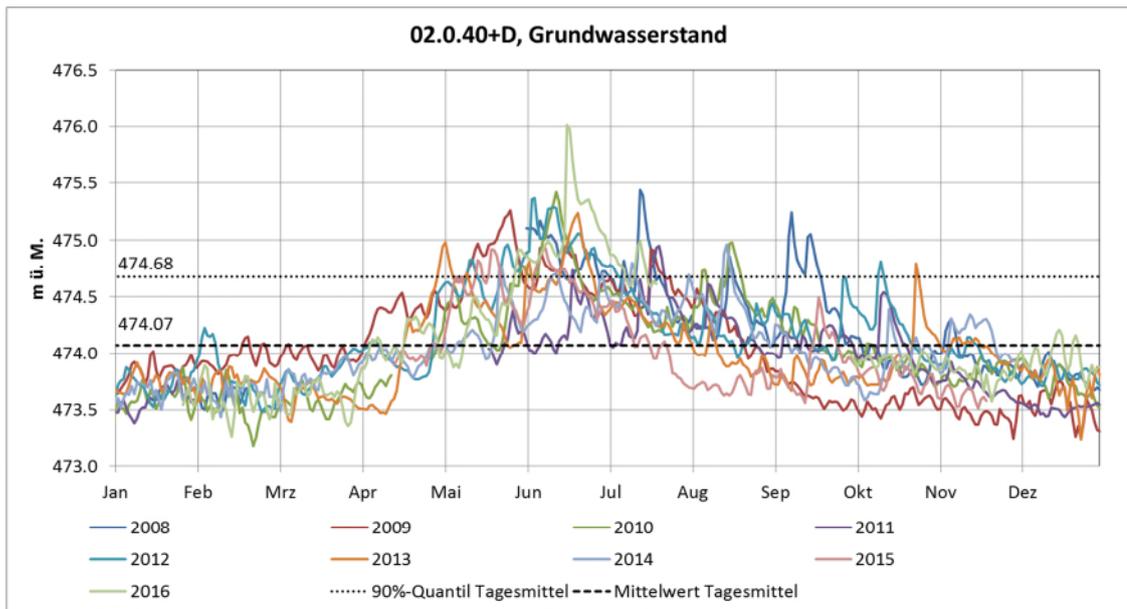


Abbildung 10b: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2016) bei den Messstellen 10.1+D, 2.0.40+D und T10+D in Balzers (Quelle: AU).

Gebiet Triesen – Schaan, zwischen Profil 5.0 und Profil 13.0

Die Mittelwasserstände gemäss Isohypsenplan [24] liegen zwischen 467.0 m ü.M. im Südteil und ca. 443.0 m ü.M. im Nordteil des bezeichneten Gebiets. Die entsprechenden Flurabstände im Südteil von Triesen betragen im Mittel etwa 3.5 – 4 m. Ab der Linie Sportplatz – Dröschistrasse nimmt der Flurabstand etwas ab und beträgt im Gebiet von Vaduz bis Schaan rund 2 – 3.5 m. Im Gebiet von Schaan nimmt der Flurabstand im Bereich der Talebene weiter ab und beträgt bei Mittelwasserstand noch rund 1.5 – 2.5 m. Die jährlichen Hochwasserstände im Südteil von Triesen dürften rund 1 m über dem Mittelwasserstand liegen; in Rheinnähe beträgt die Schwankung noch etwas mehr. Östlich des Binnenkanals, talabwärts von der Linie

Sportplatz – Dröschstrasse sind die Erhöhungen des Hochwasserstandes gegenüber dem Mittelwasserstand geringer. So liegen die jährlichen Hochwasserstände im Gebiet von Vaduz östlich des Binnenkanals nur rund 0.3 – 0.5 m über den Mittelwasserständen; zwischen Rhein und Binnenkanal ist die Schwankung grösser und es sind in Abhängigkeit von der Nähe zum Rhein Erhöhungen von rund 0.7 bis über 1 m zu erwarten [74].

Im Gebiet von Schaan treten relativ geringe Schwankungen auf und die Erhöhung des Hochwasserstandes gegenüber dem Mittelwasserstand dürfte rund 0.5 m betragen. Auch hier ist mit stärkeren Schwankungen in Rheinnähe zu rechnen. Die jährlichen Niedrigwasserstände liegen allgemein rund 0.4 – 0.6 m unter den Mittelwasserständen. Die Ganglinien des Grundwasserspiegels bei der Messstelle 06.0.12+D der Jahre 2008 – 2016 gehen aus der Abb. 10c hervor.

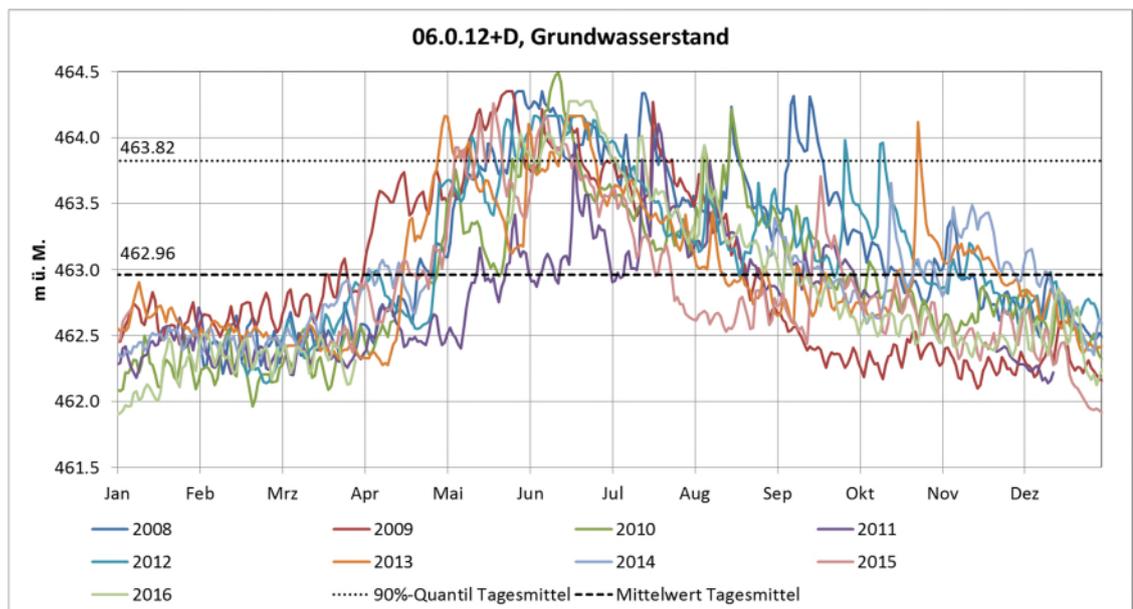
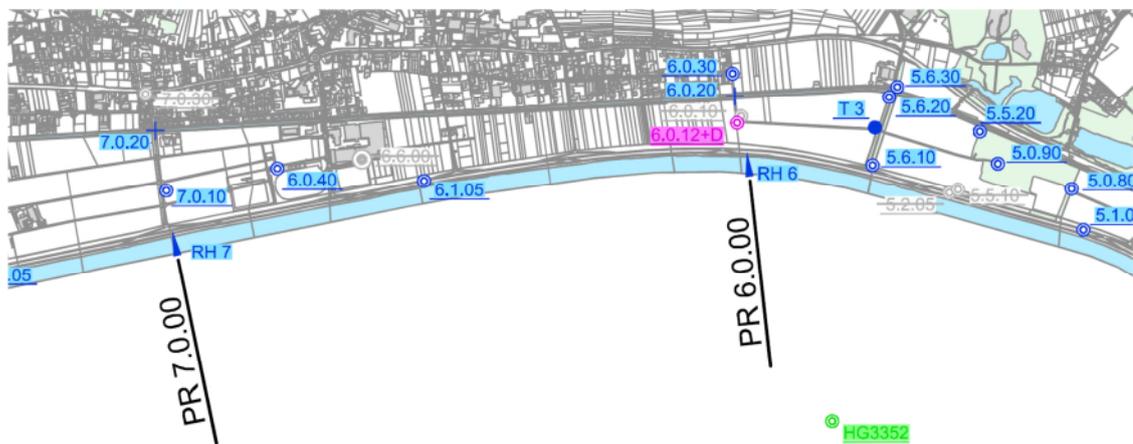


Abbildung 10c: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2015) bei der Messstelle 06.0.12+D in Triesen (Quelle: AU).

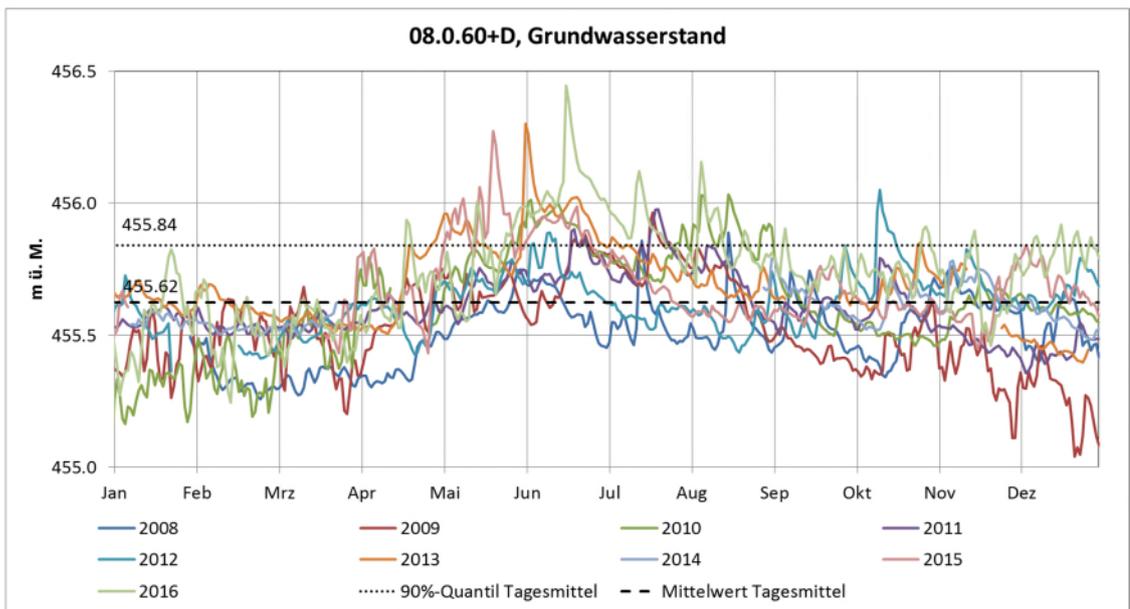
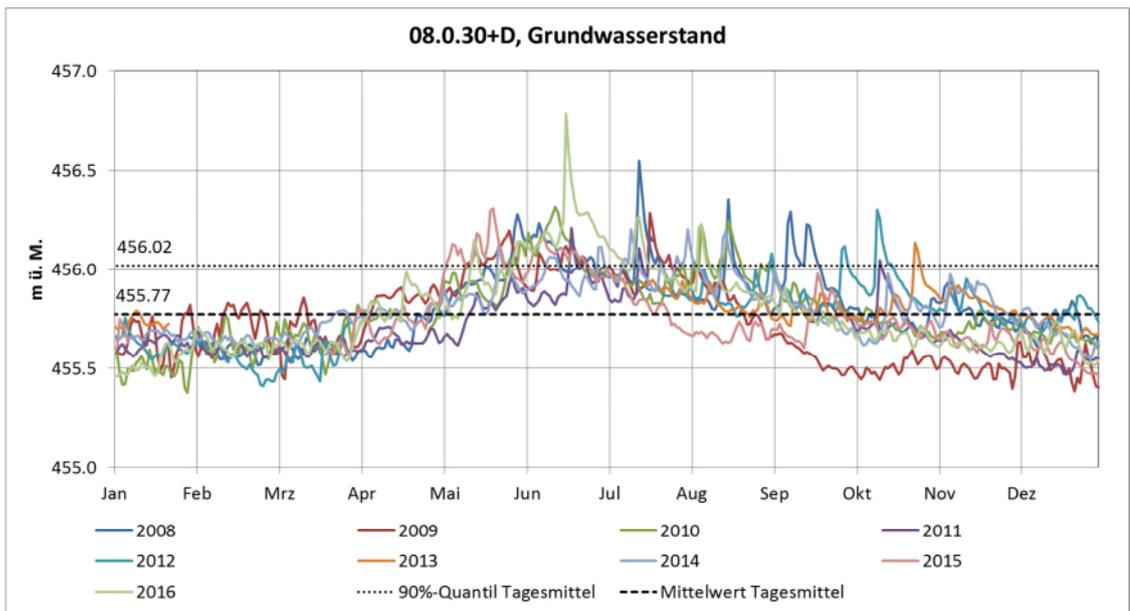
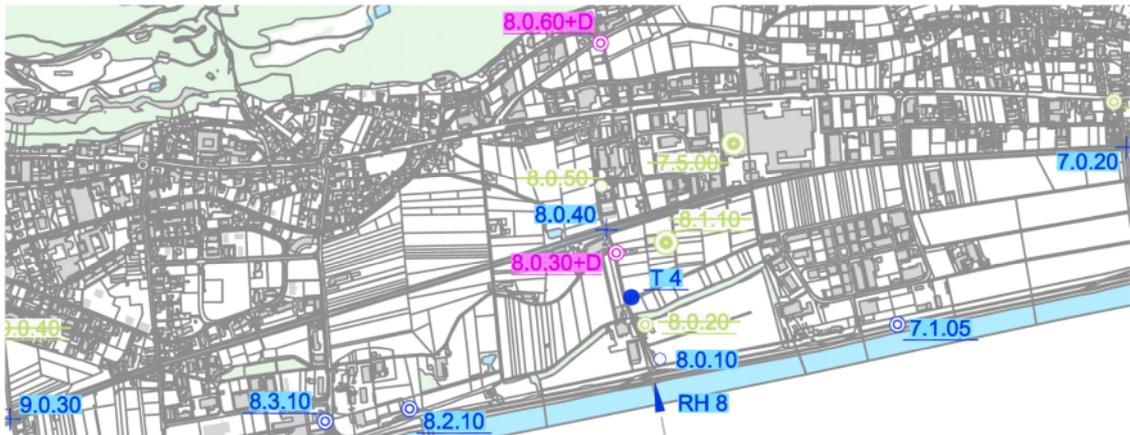


Abbildung 10d: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2016) bei den Messstellen 8.0.30+D und 08.0.60+D in Vaduz (Quelle: AU).

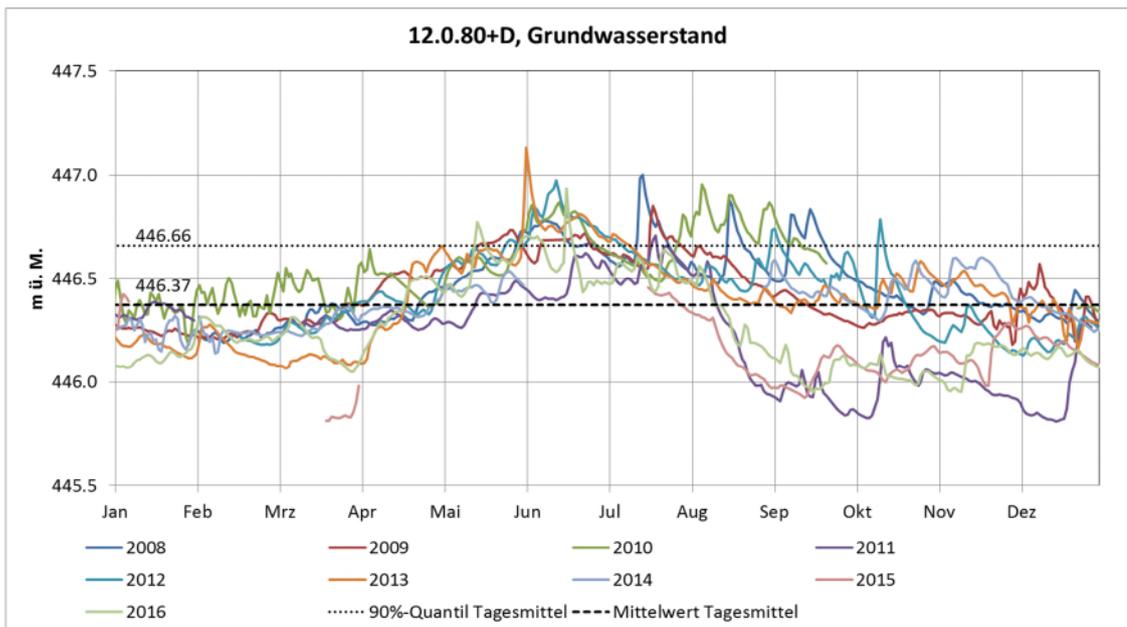
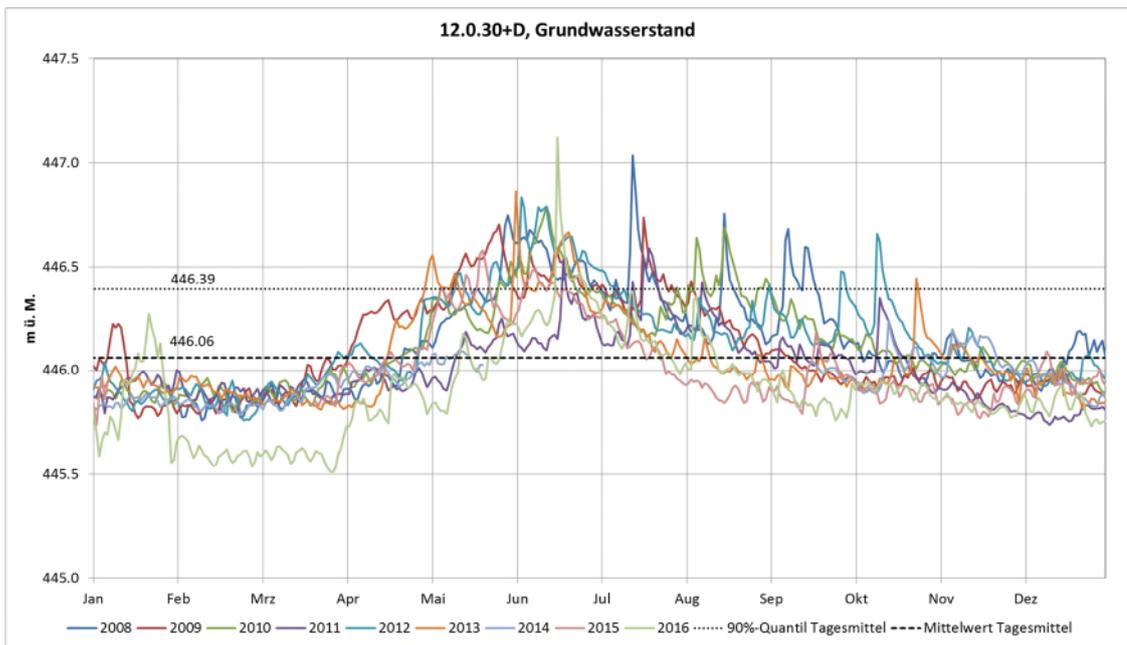


Abbildung 10e: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2016) bei den Messstellen 12.0.30+D und 12.0.80+D in Schaan (Quelle: AU).

Gebiet Schaan – Bendern, zwischen Profil 13.0 und Profil 15.0

In diesem Gebiet nimmt der ergiebige Grundwasserleiter mit Rheinschottern nur eine geringe Breite des Talquerschnittes in Rheinnähe ein. Die östlichen Ausläufer des Grundwasservorkommens unter Rietgebieten mit Hinterwasserablagerungen weisen geringe bis mässige Transmissivitäten auf und die Grundwasserstände sind dort nicht genau bekannt. Im rheinnahen Grundwasserleiter liegen die Mittelwasserstände gemäss Isohypsenplan [24] zwischen 443.0 m ü.M. im Südteil und ca. 438.0 m ü.M. im Nordteil des Gebiets. Dies entspricht Flurabständen von rund 1.5 – 2.0 m; auf der höher gelegenen Fläche zwischen Rhein und Binnendamm betragen die Flurabstände rund 4 – 5 m. Die jährlichen Hochwasserstände liegen etwa 1 – 1.5 m über dem Mittelwasserstand; die Niedrigwasserstände rund 0.6 – 0.8 m darunter.

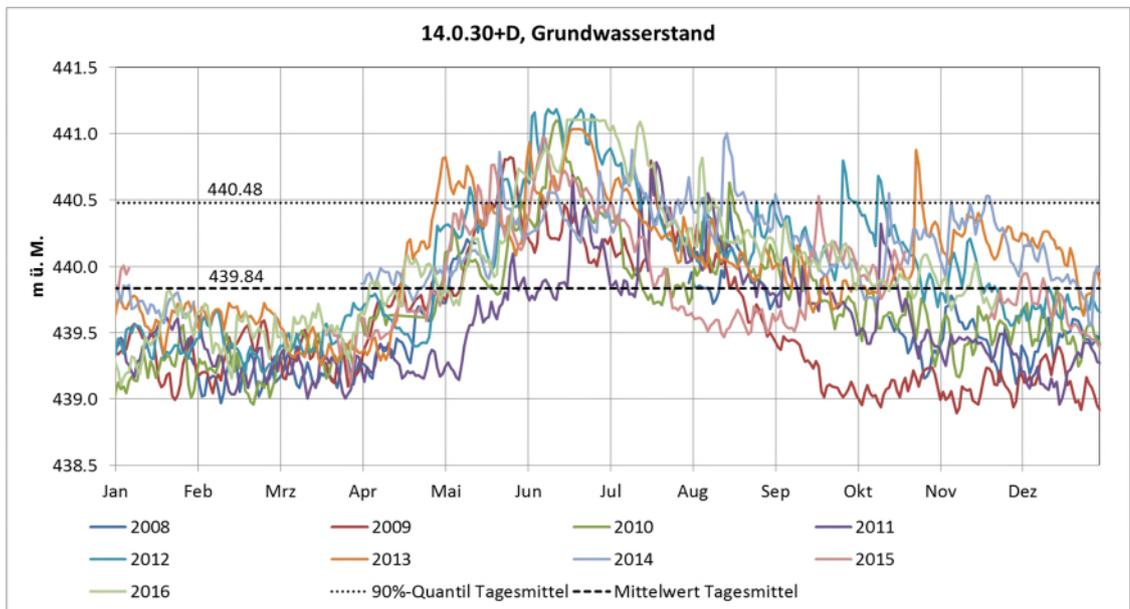
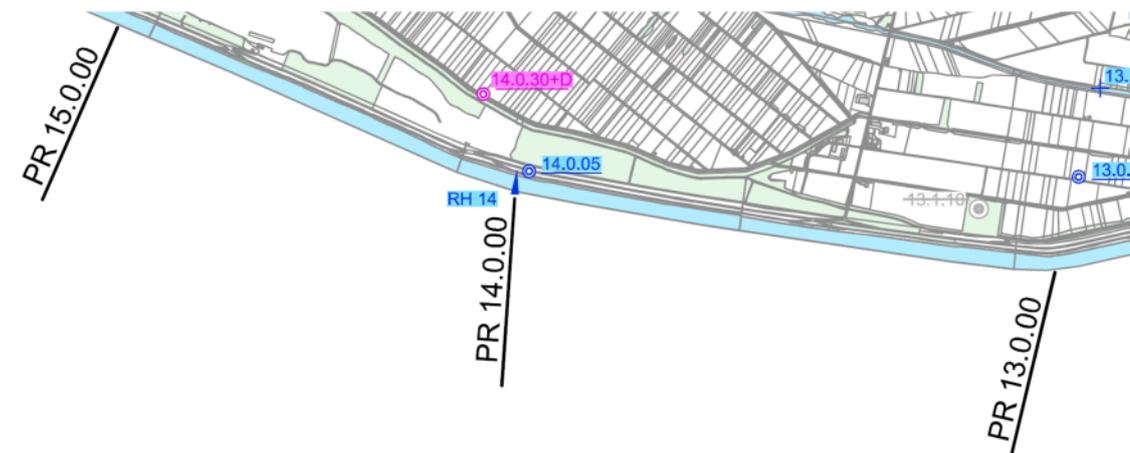


Abbildung 10f: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2016) bei der Messstelle 14.0.30+D in Schaan (Quelle: AU).

Gebiet Bendern – Ruggell, zwischen Profil 15.0 – 18.0

Der Mittelwasserstand liegt gemäss Isohypsenplan [24] zwischen 438.0 m ü.M. im Südteil und ca. 429.0 m ü.M. im Nordteil des Gebiets. Der Flurabstand beträgt bei diesem Grundwasserstand rund 1.5 – 2.5 m. Der jährliche Hochwasserstand ist in Rheinnähe etwa 1 – 1.5 m über dem Mittelwasserstand; dagegen ist in rheinfernen Gebieten mit weniger als 1 m Erhöhung zu rechnen. Der Niedrigwasserstand dürfte im Mittel rund 0.5 m unter dem Mittelwasserstand liegen.

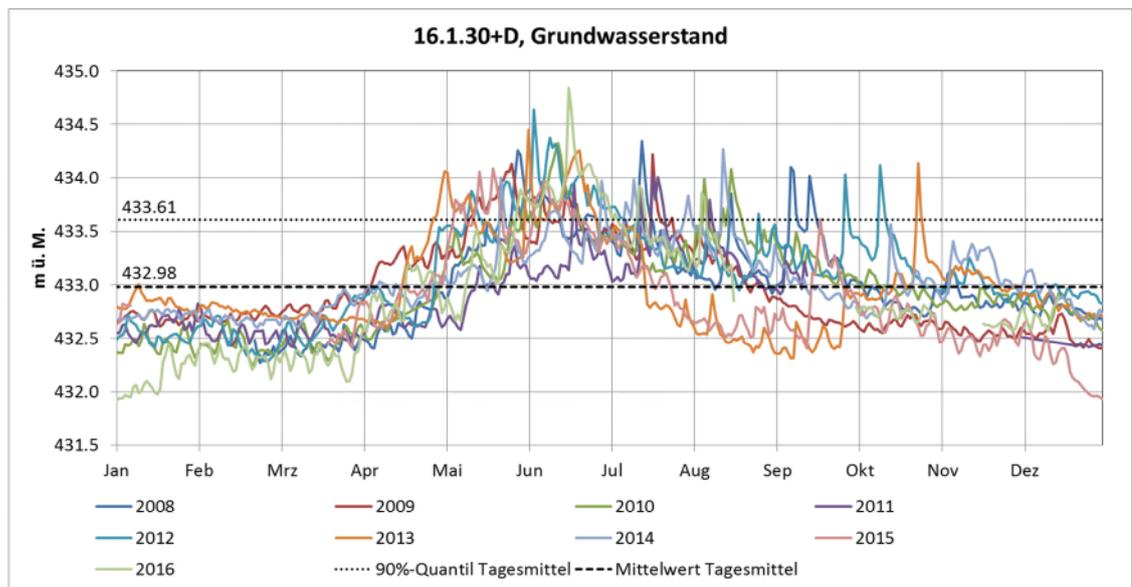
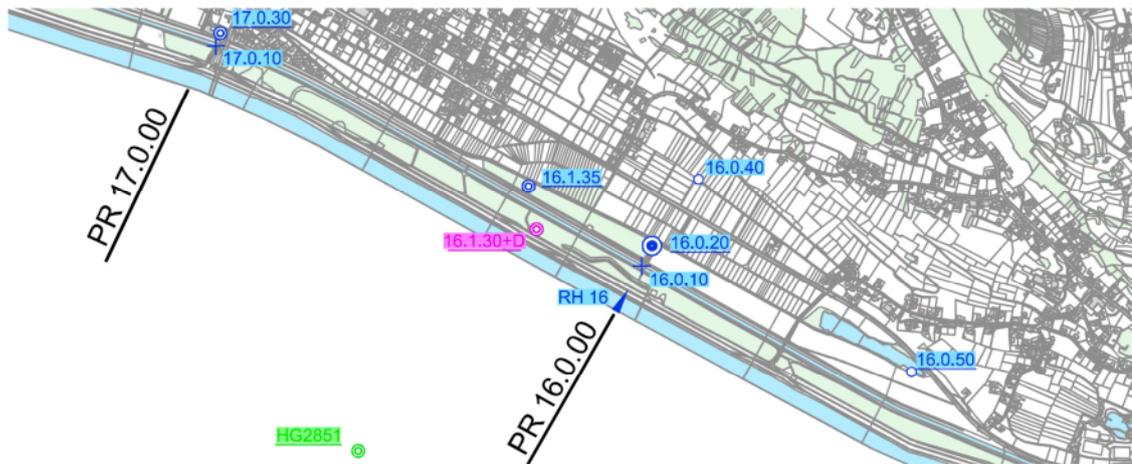


Abbildung 10g: Ganglinien des Grundwasserspiegels (2008 – 2016) bei der Messstelle 16.1.30+D in Schaan (Quelle: AU).

4.3.1.5 Grundwasserströmung

Die Grundwasserströmungsrichtung entspricht im Allgemeinen etwa dem Verlauf der Talachse beziehungsweise des Rheins. Im Detail bestehen jedoch relevante Abweichungen von dieser Richtung, welche massgeblich durch die hydraulischen Beziehungen zwischen den Oberflächengewässern – insbesondere des Rheins – und durch die Strukturen im Aufbau des Grundwasserleiters gesteuert sind (vgl. auch Kapitel 4.2.1.6). Der hydraulische Gradient gibt das Gefälle der Grundwasseroberfläche an. Im Südteil der Talebene zwischen Balzers und Vaduz betragen die Gradienten typischerweise zwischen 2‰ und 3‰. Im nördlich anschließenden Gebiet von Schaan bis Ruggell ist das Gefälle etwas geringer und die Gradienten liegen meist zwischen 1‰ und 2‰. Entgegen früherer Annahmen [40] gilt die Unterströmung des Rheins durch Grundwasser heute allgemein als gesichert. Belegt ist dies durch die beobachteten Grundwasserströmungsrichtungen zwischen dem Sarganserbecken und Balzers und die Grundwasserunterströmung des Rheingerinnes im Bereich der Eilhornschwelle, wo „echtes“ Grundwasser unmittelbar unter der Gerinnesohle für die Wiederbewässerung der Balzner-Giessen gefasst wird [88].

Im Folgenden werden die dominierenden Strömungsrichtungen bei mittlerem Grundwasserstand beschrieben. In **Balzers** weisen die Strömungsrichtungen generell gegen NE und werden erst im Gebiet Neugrüt nahe der Grenze zu Triesen zunehmend nach Norden abgelenkt, da dort der Grundwasserleiter auf liechtensteinischem Gebiet eingeengt wird und der Rhein nach NNW unterströmt wird. Weiter nördlich – im Gebiet von **Triesen bis Zentrum Vaduz** – dominiert eine nördliche Strömungsrichtung. Zu erwähnen ist das Gebiet zwischen Rhein und Binnenkanal, wo vom Rhein ausgehend eine leichte Ablenkung der Strömungen gegen NNE vorhanden ist, welche sich gegen Vaduz zunehmend akzentuiert. Im Zentrum von Vaduz wird der alluviale Grundwasserleiter durch den Schuttfächer buchtartig abgegrenzt; die Grundwasserisohypsen zeigen auf ein Umbiegen der Strömungen, was auf randliche Zuflüsse deuten könnte.

Zwischen Vaduz und **Schaan** sind die Strömungsrichtungen westlich und östlich des Binnenkanals stark abweichend: Auf der westlichen Seite zum Rhein hin dominieren Strömungsrichtungen von NNE bis NE. Auf der östlichen Seite sind hingegen Strömungen Richtung NW bis NNW überwiegend. Dieser Verhalt ist auf die Vorflutwirkung des Binnenkanals sowie der benachbarten Drainagekanäle zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.3.1.6).

Ab Profil 13.0 im Gebiet Schaan bis nach der ARA Bendern folgen die Strömungsrichtungen mehrheitlich dem Verlauf des Rheins (Richtung N bis NE). Im Gebiet von **Gamprin** und im Südteil von **Ruggell** sind dagegen vorwiegend vom Rheinverlauf wegweisende Strömungen Richtung NE zu erwarten. Im Zentrum von Ruggell deutet sich gemäss Grundwasserisohypsen [24] ein Umbiegen der Strömungen an. So ist am östlichen Rand des Grundwasserleiters, welcher am Übergang zu Hinterwasserablagerungen der Rietebene liegt, mit zunehmend nördlichen Strömungsrichtungen zu rechnen.

In Randbereichen des Grundwasserleiters, wo eine Zuströmung aus Schuttfächern erfolgt, werden die Strömungsrichtungen allgemein in Richtung Westen abgelenkt. Im Isohypsenplan des Mittelwasserstandes [24] sind diese Randbereiche nicht dargestellt. Bekannt ist, dass die

randliche Begrenzung des alluvialen Grundwasserleiters unter den Schuttfächer reichen kann, wie z.B. beim Schuttfächer der Mühleholzrüfe (vgl. Kapitel 4.3.1.2).

Die saisonale Dynamik der Wasserstände von Gewässern und der Lage des Grundwasserspiegels beeinflusst die Strömungsrichtungen im Grundwasserleiter. Bei Hochwasserständen findet in weiten Abschnitten der Talebene – wenn der Rhein bei zeitgleich hohen Abflüssen als Infiltrant wirkt – eine Ablenkung der Strömungsrichtungen gegen Nordosten statt. Betreffen dürfte dies insbesondere den Gebietsstreifen zwischen Rhein und Binnenkanal, im Abschnitt von Triesen über Vaduz bis etwa nach Schaan. Die Grundwasserisohypsen und die Strömungsrichtungen bei Niedrigwasserständen sind nicht im Detail bekannt. Es ist von einem gleichmässigeren Strömungsbild als bei mittleren und hohen Wasserständen auszugehen, wobei entlang dem Rhein eher parallele Richtungen vorherrschen.

4.3.1.6 Wechselwirkung zu den Oberflächengewässern

Im Gebiet des Grundwasserleiters der Talebene bestehen bedeutende Wechselwirkungen mit den Oberflächengewässern. Einerseits erfolgt eine Grundwasserneubildung durch Infiltration aus den Oberflächengewässern, wenn beim Gewässer ein höherer Wasserspiegel und eine durchlässige Gewässersohle mit Anbindung zum Grundwasserleiter vorliegen. Andererseits erfolgt eine Exfiltration resp. ein Grundwasserabfluss in ein Oberflächengewässer, wenn der Grundwasserspiegel höher liegt und eine Anbindung der Gewässersohle zum Grundwasserleiter besteht. In einem Fliessgewässer kann räumlich eine Abfolge von Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken vorliegen, welche sich zeitlich bei verschiedenen hydrologischen Zuständen der Abflüsse und Grundwasserstände verändert.

Bei mittleren Grundwasserständen wirkt der **Rhein** grösstenteils als Infiltrant. Einzig im Abschnitt südlich von Balzers (ca. Profil 4.0 bis Profil 6.0) ist eine Grundwasserexfiltration von Bedeutung. Im mittleren Abschnitt des Rheins (ab Triesen ca. Profil 8.0 bis Schaan ca. Profil 13.0) liegt der Rheinpegel zum Teil mehr als 1 m über dem Grundwasserspiegel und es ist in erster Linie mit einer perkolutiven Infiltration zu rechnen.

Der **Binnenkanal** wirkt im Gebiet Balzers tendenziell als Infiltrant. Ab Triesen ist zunehmend eine Grundwasserexfiltration vorhanden und der Binnenkanal wirkt als Vorfluter. Ausgeprägt ist diese Funktion im Abschnitt von Vaduz bis Schaan. Zwischen Schaan und Bendern befindet sich der Binnenkanal z.T. östlich, ausserhalb des Grundwasserleiters. In Gamprin und Ruggell ist bekannt, dass der Pegel des Binnenkanals über dem Grundwasserspiegel liegt, jedoch über die abgedichtete Sohle keine nennenswerte Infiltration ins Grundwasser stattfindet.

Weitere Oberflächengewässer mit Einfluss auf den Grundwasserleiter sind:

- Die **Balzner Giessen** werden mit rund 350 l/s ab der Fassung Äule-Häg dotiert (vor Sanierung 2012 rund 250 l/s). Bis zur Einmündung in den Binnenkanal verlieren sie mehr als 50% ihrer Abflussmenge; d.h. sie wirken als Infiltrant (mündliche Mitteilung Markus Beck).

- Der **Vaduzer Giessen** weist bei mittleren Grundwasserständen keine ausgeprägte Wechselwirkung zum Grundwasser auf. Bei hohen Grundwasserständen wirkt er dagegen als Vorfluter.
- Der **Mühlebach** in Gamprin – Ruggell wird im oberen Abschnitt als kaum auf den Grundwasserleiter wirksam betrachtet. Im unteren Abschnitt ab Ruggell tritt zunehmend eine Wirkung als Vorfluter auf; dies insbesondere bei hohen Grundwasserständen.
- Der **Spiersbach**, welcher auch durch den Mühlebach gespiesen wird, dürfte vorwiegend eine Vorflutwirkung aufweisen. Zu vermerken ist allerdings, dass er über weite Teile außerhalb (oberer Abschnitt) oder randlich (unterer Abschnitt) des Grundwasserleiters verläuft und somit vorwiegend Hinterwasserablagerungen drainiert.

Quantitative Schätzungen der Infiltrations- und Exfiltrationsbeiträge der Oberflächengewässer wurden beim Grundwassermodell Alpenrhein [43] dargestellt. Die Plausibilität der Ergebnisse dieser Modellierung müssen relativiert werden (vgl. Kapitel 4.3.1.7) können aber andererseits mangels verlässlicher Messdaten nicht auf einfache Weise überprüft werden. Eine Wasserbilanz mit Berücksichtigung von Zuflüssen und Abflüssen aus den Oberflächengewässern wird im folgenden Kapitel aufgeführt.

4.3.1.7 Grundwasserbilanz

Das Grundwasser unter der Liechtensteiner Talebene stammt aus der „echten“ Neubildung durch diffuse Versickerung von Niederschlagswasser, aus Zuflüssen aus zuströmseitig benachbarten Grundwasservorkommen und aus der Infiltration von Oberflächengewässern (vgl. Abb. 11). Im Zusammenhang mit der Bestimmung des thermischen Nutzungspotenzials im Talgrundwasserleiter des Liechtensteiner Rheintals wurde eine vereinfachte Teilbilanzierung des Grundwasserhaushalts erstellt (vgl. [26]), welche anhand der Daten der oberflächlichen Binnengewässer noch ergänzt wurde und in der Folge beschrieben wird:

Grundwasserneubildung in der Talebene

Als durchschnittliche Neubildungsrate durch Niederschläge in der Talebene wurde ein Minimalwert von etwa $9.5 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ ermittelt, was für die Liechtensteiner Talfläche mit etwa 36.5 km^2 Grundfläche eine Neubildung von insgesamt rund 350 l/s ergibt.

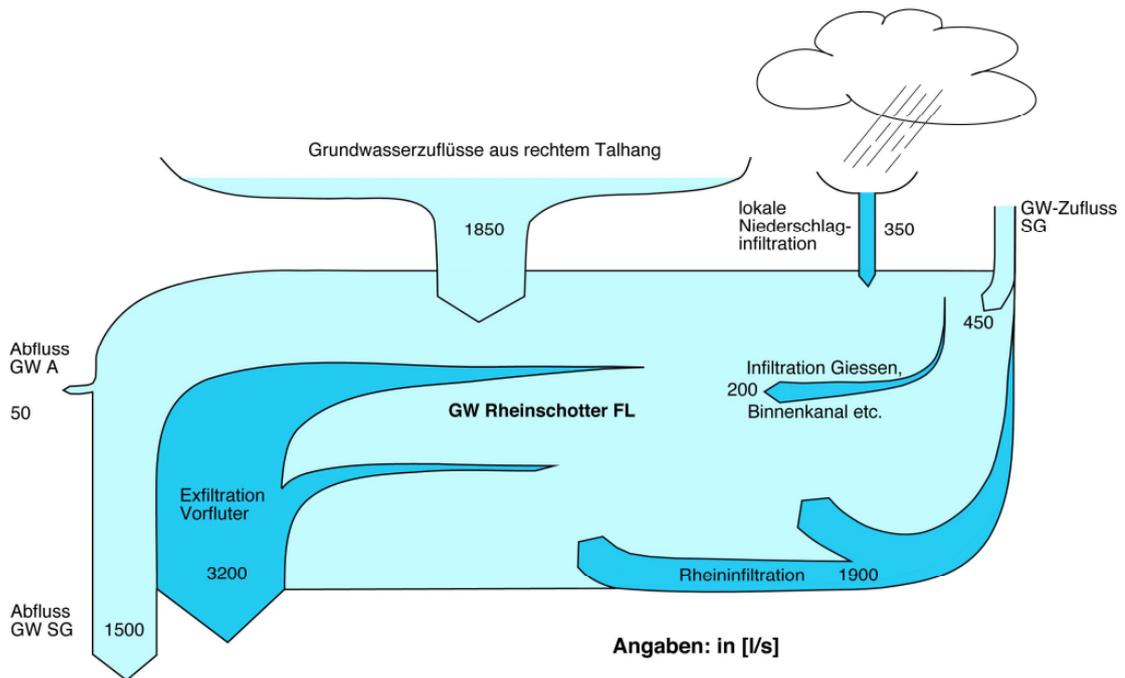


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Grundwasserbilanz in den Rheinschottern (Dr. Bernasconi AG, 2016).

Grundwasserzuzflüsse

Die unterirdischen Zuflüsse aus dem rheintalseitigen Hanggebiet und den benachbarten Grundwasserkörpern der Schuttfächer am östlichen Talrand in das Talgrundwasservorkommen (vgl. Kapitel 4.3.1) lassen sich gemäss der Bilanz auf mindestens 1'500 l/s (Abb. 11: 1'850 l/s) beziffern. An der zuströmseitigen Begrenzung der Liechtensteiner Talebene zwischen Ellhorn und Schollberg fliessen aus dem Grundwasservorkommen im Sarganserbecken unter dem Rhein mindestens rund 400 l/s in das Gebiet Neugüter – Äule in Balzers. Aus den Balzner-Giessen infiltrieren im Abschnitt Äule – Neugrüt etwa 200 l/s ins Grundwasser. Das Wasser der Giessen wird durch künstliche Bewässerung von ausserhalb des betrachteten Talabschnittes in das Bilanzierungsgebiet zugeführt. Diese Grundwasserzuzflüsse in den Talgrundwasserleiter sind demnach deutlich grösser als die lokale Grundwasserneubildung durch direkte Niederschlagsinfiltration in der Talebene.

Die Infiltration des Rheins spielt wahrscheinlich die bedeutendste Rolle bei der Speisung des Grundwassers, allerdings sind dazu keine verlässlichen Zahlen bekannt. Auch der Grundwasseraustausch unter dem Rhein zwischen dem schweizerischen und dem liechtensteinischen Teil des Grundwasserleiters ist nicht genau bekannt.

Grundwasserabflüsse

Der Grundwasserleiter nimmt an Mächtigkeit von Balzers bis Ruggell stetig ab wodurch insgesamt, über den ganzen Talabschnitt gesehen, eine Verringerung des Durchflussquerschnittes resultiert. Dieser Umstand hat zur Folge, dass das unterirdische Abflussvermögen flussabwärts tendenziell stetig abnimmt, und das überschüssige Grundwasser an die Oberfläche gedrängt wird und in die Vorfluter gelangt.

Der Liechtensteiner Binnenkanal und der Spiersbach bei Ruggell sind die im betrachteten Talabschnitt vorhandenen Vorfluter. Im Binnenkanal fliessen im Jahresmittel rund 4'900 l/s ab [62]. Der Spiersbach führt rund 500 l/s [89], wovon ein Teil aus der Dotierung vom Binnenkanal beim Gampriner Seeli stammt. Vom Oberflächenabfluss von insgesamt 5'400 l/s stammen etwa 150 l/s von den Balzner Giessen und 850 l/s aus dem Kraftwerk Samina d.h. von ausserhalb des rheintalseitigen Einzugsgebiets. Weitere rund 1'200 l/s stammen aus dem direkten Oberflächenabfluss aus den rheintalseitigen Einzugsgebieten. Der verbleibende Teil des Oberflächenabflusses von etwa 3'200 l/s stammt folglich aus der Grundwasser-Exfiltration des Rheinschotter-Grundwasserleiters. Darin sind allerdings auch die Anteile der Grundwasserentnahmen in Trinkwasserpumpwerken enthalten, welche in Form von Abwasser in den Vorflutern abfliessen. Die unterirdischen Abflüsse im Talquerschnitt unterhalb von Ruggell werden mit rund 25 bis 80 l/s beziffert. Eine deutlich grössere Menge dürfte seitlich unter dem Rhein in die westliche, schweizerische Talhälfte abfliessen.

Bilanzierung

In der Gesamtbetrachtung der Grundwasserbilanz bilden die Infiltration des Rheins und die Grundwasserunterströmung des Rheins die wichtigsten Unbekannten. Unter der theoretischen Annahme, dass der Austausch zwischen dem schweizerischen und liechtensteinischen Teil des Grundwasserkörpers ausgeglichen wäre, würden sich für die Grundwasserinfiltration aus dem Rhein etwa 800 l/s ergeben. Die hydrogeologischen Beobachtungen zum Grundwasserspiegel und zu den Fliessrichtungen, zur chemischen Wasserbeschaffenheit sowie zu den Grundwassertemperaturen zeigen allerdings klar, dass die Flussinfiltration in Liechtenstein abschnittsweise sehr gross ist. Schätzungsweise beträgt sie mehr als 1'900 l/s. Aus der Bilanzierung lässt sich folgern, dass zwischen Balzers und Ruggell in der Summe eine bedeutende Unterströmung des Rheins Richtung Westen zur Schweizer Seite hin von mindestens rund 1'500 l/s stattfindet.

Validierung der Bilanz

Für die beschriebene Bilanzierung gemäss [26] wurden stark vereinfachte Annahmen getroffen, die Ergebnisse dürften in ihrer Grössenordnung allerdings plausibel sein.

Tabelle 4.6: Gegenüberstellung der beschriebenen Wasserbilanz mit jener aus dem UVP Rhein-kraftwerke 1991 [40].

	Beschriebene Wasserbilanz		Wasserbilanz 1991	
	Zufluss	Abfluss	Zufluss	Abfluss
Oberflächengewässer Binnenkanal und Spiersbach				
	Zufluss	Abfluss	Zufluss	Abfluss
Oberflächenabfluss Hanggebiet	900 l/s		1'340 l/s	
Oberflächenabfluss Talgebiet	300 l/s		790 l/s	
Externer Zufluss Giessen Balzers	150 l/s		-	
Externer Zufluss Kraftwerk Samina	850 l/s		-	
Exfiltration von Grundwasser (FL)	3'200 l/s		2'920 l/s	
Exfiltration von Grundwasser aus III (Ö)	-		280 l/s	
Total Binnenkanal und Spiersbach	5'400 l/s	5'400 l/s	5'330 l/s	5'330 l/s
Grundwasser Liechtenstein				
	Zufluss / Neubildung	Abfluss	Zufluss / Neubildung	Abfluss
Direkte Versickerung Talebene	350 l/s		170 l/s	
Infiltration Balzner-Giessen	200 l/s		-	
Grundwasserzufluss Ellhorn-Schollberg	400 l/s		10 l/s	
Grundwasserzufluss Randgebiete	1'500 l/s		860 l/s	
Infiltration Rhein	2'300 l/s		1'880 l/s	
Infiltration von Grundwasser in Binnenkanal und Spiersbach aus III (Ö)	-		280 l/s	
Exfiltration in Binnenkanal von Grundwasser aus III (Ö)		-		280 l/s
Exfiltration in Binnenkanal und Spiersbach von Grundwasser (FL)		3'200 l/s		2'920 l/s
Grundwasserabfluss Ruggell-Bangs		50 l/s		-
Grundwasserabfluss Unterströmung Rhein nach CH		1'500 l/s		-
Total Grundwasser FL	4'750 l/s	4'750 l/s	3'200 l/s	3'200 l/s

Mengenangabe kursiv: grobe Schätzung für Bilanzierung

Eine direkte Validierung der Bilanz ist aufgrund fehlender Daten und genauer Kenntnisse insbesondere zur Regenwasserinfiltration und zum Grundwasserabfluss nicht möglich. Der Vergleich mit einer Wasserbilanz im Zusammenhang mit dem UVP Rheinkraftwerke 1991 [40] (vgl. Tabelle 4.6) zeigt Folgendes: Die Bilanzierung der gesamten Zu- und Abflüsse der Binnengewässer ergibt trotz anderer Annahmen ähnliche Resultate. Beim Grundwasser sind in der beschriebenen Bilanz deutlich höhere Zuflüsse von Randgebieten und von aussen eingesetzt worden, während die Infiltration des Rheins nicht stark abweicht. Dies resultiert in höheren Abflüssen welche einer Unterströmung des Rheins Richtung Schweiz zugeteilt werden.

4.3.1.8 Grundwasserbeschaffenheit

Die biologische Grundwasserbeschaffenheit ist aus hygienischer Sicht meist einwandfrei. Die langjährigen Erhebungen in den Liechtensteiner Pumpwerken geben zu keinen Beanstandungen Anlass (vgl. [14], [50] und [51]).

Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers im **Grundwasserleiter der Rheinschotter** wird massgeblich durch dessen Herkunft bestimmt; vor allem die Wechselwirkungen des Rheins mit dem Grundwasser sind dabei von Bedeutung. Aus den Grundlagenerhebungen der EAWAG in den Jahren ab 1965 [32] und den langjährigen Erhebungen in den Liechtensteiner Grundwasserpumpwerken [14] ist die allgemeine chemische Wasserbeschaffenheit gut bekannt. Projektbezogene Einzeluntersuchungen ergänzen diese Datenbasis.

Im direkten **Einflussbereich des Rheins** ist das Grundwasser mit einer Gesamthärte zwischen 15 und 25 °fH als mittelhart zu taxieren und weist einen mittleren Magnesiumgehalt auf (Calcium/Magnesium-Massenverhältnis 4.5 – 6 mg/mg). Die Karbonathärte liegt zwischen 9 und 18 °fH, der Sulfatgehalt schwankt zwischen 15 und 45 mg/l. Die Chlorid- und Nitratgehalte sind gering (Chlorid < 5 mg/l, Nitrat < 10 mg/l). Im Allgemeinen weist das Grundwasser eine hohe Sauerstoffsättigung auf (50 % – 70 %), reduzierte Spezies wie Ammonium, Nitrit oder gelöste Eisen- und Manganverbindungen sind nicht vorhanden. Im Talabschnitt zwischen Triesen und Schaan ist der direkte Einfluss des Rheinfiltrats auf den Grundwasserchemismus zwischen Rhein und Binnenkanal sehr ausgeprägt. In diesem Gebiet ist eine deutliche jährliche Schwankung der chemischen Wasserbeschaffenheit wie auch der Wassertemperatur (vgl. Kap. 4.2.1.9) festzustellen. Diese werden vom Ausmass der Speisung durch kühles und wenig stark mineralisiertes Rheinfiltrat geprägt. Diese Schwankung lässt sich am Beispiel der elektrischen Leitfähigkeit in Abbildung 12 erkennen: Die erhöhte Infiltration, bedingt durch den hohen Rheinpegel (Schneeschnmelze) lässt die elektrische Leitfähigkeit im Sommer auf Tiefstwerte absinken, danach steigt sie allmählich wieder an, um Höchstwerte im Winterhalbjahr zu verzeichnen. Mit zunehmendem Abstand vom Rhein erfolgt eine zeitliche Verzögerung und zugleich eine Abschwächung der Schwankungsamplitude.

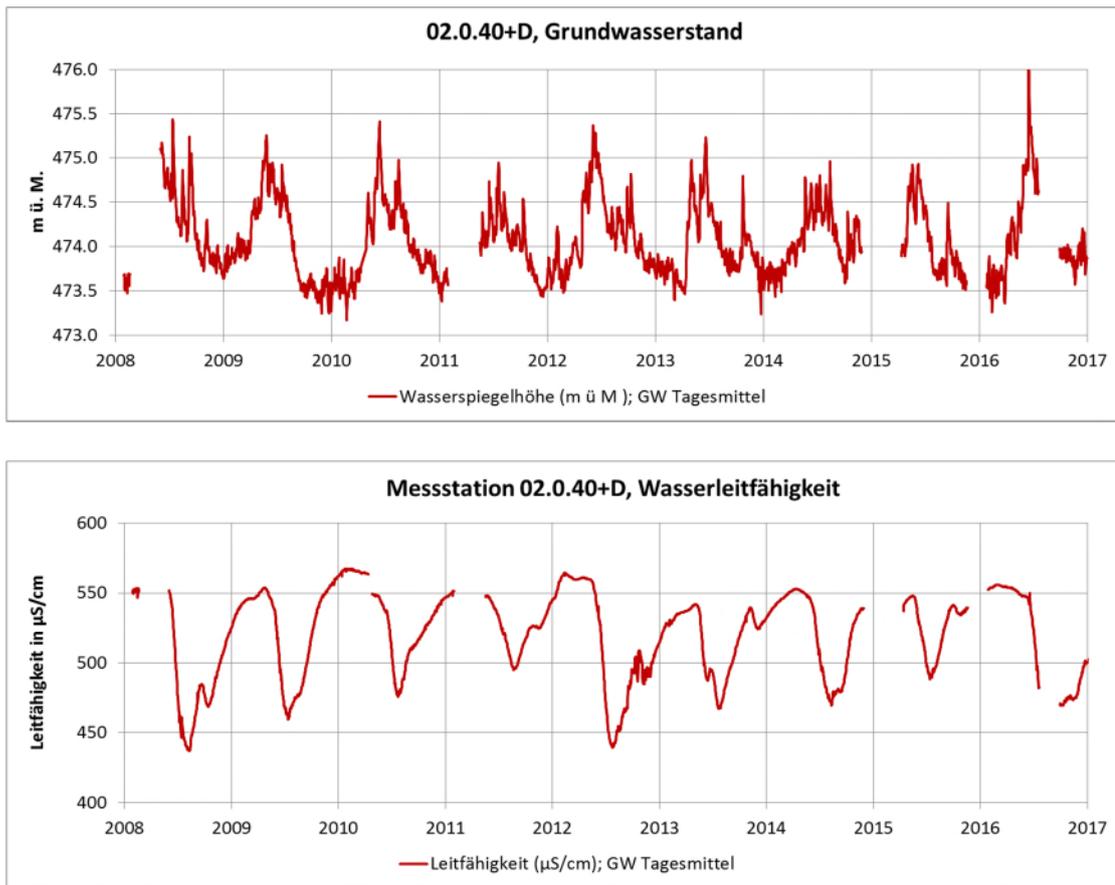


Abbildung 12: *Ganglinie des Grundwasserstandes und der elektrischen Leitfähigkeit (Abbildung der Gesamtmineralisation) am Beispiel der Messstelle 2.0.40 in Balzers (Quelle: AU).*

Auf Strecken wo der Rhein nicht stark infiltriert und generell **abseits des direkten Einflussgebiets des Rheins** wird die Wasserbeschaffenheit von den Verhältnissen entlang des Fließpfades des Grundwassers wesentlich beeinflusst. Tendenziell nimmt die Mineralisation des Grundwassers durch Lösungsprozesse im Grundwasserleiter zu. In den Randzonen wird die Durchströmung des Grundwasserleiters verlangsamt und der chemische Austausch zwischen Wasser und Gestein wird aufgrund der geringeren Durchlässigkeit oder dem Vorhandensein von feinkörnigerem Rüfeschuttmaterial oder von Hinterwasserablagerungen weiter begünstigt.

Am **östlichen Talrand** prägen gebietsweise die seitlichen Grundwasserzutritte – insbesondere aus Schuttfächern – die Grundwasserbeschaffenheit (vgl. Kap. 4.3.2.7). Allgemein weist das Wasser aus den Schuttfächern eine mässige bis hohe Sauerstoffsättigung auf. Besondere Verhältnisse bezüglich der Grundwasserbeschaffenheit bestehen im Abschnitt „Heilos – im Damm“ in Triesen. Die Wasserzutritte aus den Schuttfächern der Badtobel- und Lawenarüfe in Triesen unterscheiden sich vom Grundwasser der Talebene u.a. durch eine höhere Karbonathärte (ca. 25 °fH) und deutlich geringere Magnesium- und Sulfatgehalte [72]. Das seitlich aus dem Lawena-Schuttfächer zufließende Grundwasser prägt die Grundwasserbeschaffenheit auch unter der Talebene zwischen Rhein und Binnenkanal [83]. Wie weit abstromsei-

tig sich diese Zuflüsse im Grundwasserchemismus niederschlagen, ist allerdings nicht restlos geklärt: Auffallend ist die chemische Wasserbeschaffenheit im Pumpwerk „Swarovski“ in Triesen, welche mit geringen Sulfatgehalten und tendenziell geringen Magnesiumgehalten jener der zuströmseitigen Hangzuflüsse ähnlich ist [50].

In Vaduz ist das entlang vom Felsband zwischen Schwefel und Schloss in den Rheinschotter-Grundwasserleiter übertretende Felsgrundwasser sowie das aus den Schuttfächern der Mühleholz-, Quader- und Tidrüfe zufließende Grundwasser geprägt von hohen bis sehr hohen Gesamthärten und Sulfatgehalten. Das im Raum Vaduz-Schaan vom Talrand her zufließende Grundwasser breitet sich bis weit in die Talebene nördlich von Schaan aus und prägt unter anderem die Wasserbeschaffenheit des Wassers im Pumpwerk „Hilcona“ am Nordrand von Schaan, wo ungewöhnlich hohe Sulfatgehalte (>200 mg/l) und eine hohe Karbonathärte (ziemlich hart, 19 – 31 °fH) vorliegen. Die Zuflüsse aus dem Schuttfächer der Forstrüfe weisen ebenfalls erhöhte Sulfatgehalte (> 150 mg/l) auf.

In den **Rietgebieten** steht das Grundwasser in Kontakt mit organischem Material in den feinkörnigen Hinterwasserablagerungen. Gelöster Sauerstoff wird durch den Abbau von organischem Material chemisch umgesetzt, was zu Sauerstoffarmut und reduzierenden Verhältnissen im Wasser führt. Typisch ist das Auftreten von Ammonium und Nitrit sowie von gelösten Eisen- und Manganverbindungen. Damit geht eine Aufhärtung des Wassers einher; typischerweise liegt die Karbonathärte dieser Wässer im ziemlich harten bis harten Bereich (25 – 40 °fH). Das Grundwasser weist in den randlichen Gebieten, wo der Grundwasserleiter z.B. unter Hinterwasserablagerungen auskeilt, somit meist eine höhere Gesamtmineralisierung und Härte des Wassers auf; zudem oft eine geringere Sauerstoffsättigung.

Im Talabschnitt von Ruggell ist das Grundwasser ausserhalb des direkten Einflussbereiches des Rheins mittelhart bis ziemlich hart (Gesamthärte 22 – 30 °fH); sowohl die Karbonathärte (17 – 23 °fH) als auch die Sulfatgehalte (38 – 70 mg/l) sind gegenüber Rheinfiltrat-Grundwasser tendenziell erhöht. Der Grund dieser Anomalie ist bisher nicht bekannt, wobei Zuflüsse aus dem Fels der Talflanke dafür verantwortlich sein könnten.

Eine erste hydrochemische Karte mit der Darstellung von hydrochemischen Provinzen wurde 1976 in [32] erstellt. Die Grenzziehung der Gebiete mit geringer **Sauerstoffsättigung** und reduziertem Grundwasser ist 2009 in [27] anhand jüngerer Daten angepasst worden. Im Hinblick auf die Nutzung des Grundwassers für Trinkwasser- und Brauchwasserzwecke bilden die Sauerstoffsättigung und die damit verbundenen Redox-Bedingungen die ausschlaggebenden Faktoren. Sauerstoffarme Grundwasserverhältnisse liegen in den Rietgebieten von Balzers, in der ausgedehnten Talebene zwischen Schaan, Bendern und Nendlen und im Rietgebiet von Ruggell vor.

Über die Grundwasserbeschaffenheit in den tieferen Bereichen des Rheinschotter-Grundwasserleiters und der darunter folgenden Deltaablagerungen liegen im Allgemeinen keine genauen Kenntnisse vor. Es ist davon auszugehen, dass dort generell höhere Gesamthärten und etwas tiefere Sauerstoffsättigungen vorliegen.

Zeitliche Veränderungen und Variationen der Grundwasserströmungsverhältnisse schlagen sich auch in der Wasserbeschaffenheit nieder: Veränderungen der hydraulischen Verhältnisse im Grundwasser und den damit in Verbindung stehenden Oberflächengewässern führen zu veränderlichen Grundwasserströmungen und Verweilzeiten des Wassers im Grundwasserleiter. In Grenzbereichen, wo Grundwässer unterschiedlicher Beschaffenheit aufeinander treffen, können daher saisonale hydraulische Schwankungen zu unterschiedlichen Zuströmbedingungen und saisonal variabler Grundwasserbeschaffenheit führen. Dies kann unter anderem in den Talrandbereichen beobachtet werden, wo sich chemisch unterschiedliches Grundwasser aus seitlichen Schuttfächer-Zutritten und Rheinfiltrat-Grundwasser vertikal im Grundwasserleiter einschichten kann oder auch seitlich nebeneinander fliesst.

Bleibende hydraulische Veränderungen können demzufolge zu langfristigen Trends in der Grundwasserbeschaffenheit führen. Im ersten Ergänzungsbericht zu [32] konnten Veränderungen an der Gewässersohle im Rhein und die damit verbundene Abnahme der Rheininfiltration und der Gesamtdurchflussmenge mit folgenden Auswirkungen in Verbindung gebracht werden:

- Zunahme der Wasserhärte im Einflussbereich des Rheins bis zum Binnenkanal.
- Zunahme der reduzierten Spezies Ammonium, Nitrit sowie gelöste Eisen- und Manganverbindungen in den Rheinschottern, in Rheinnähe im Gebiet Bendern – Ruggell.

Die Daten über die chemische Grundwasserbeschaffenheit verdeutlichen, wie diese nicht dem einfachen, generellen Modell entsprechen, wonach die Gesamtmineralisation von Balzers bis Ruggell generell zunimmt, sondern von lokalen Verhältnissen der unterirdischen Grundwasserströmungen beeinflusst werden müssen (vgl. Tabelle 4.7). So weist zwar das Pumpwerk Oberau in Ruggell erwartungsgemäss die höchste Gesamthärte und erhöhte Sulfatgehalte auf, das Pumpwerk Rheinau in Balzers weist aber höhere Gesamtmineralisationen auf als die weiter stromabwärts gelegenen Pumpwerke Neugut und Wiesen.

Ebenso können Veränderungen der hydraulischen Bedingungen durch künstliche Wasserentnahmen die Grundwasserströmungen grossräumig beeinflussen und die Zuströmverhältnisse und allenfalls auch die Grundwasserbeschaffenheit bei den verschiedenen Grundwasserbeobachtungspunkten verändern. Jüngere Beobachtungen bezüglich Veränderungen der Wasserbeschaffenheit z.B. im Pumpwerk „Hilcona“ Schaan [14] dürften wahrscheinlich in Zusammenhang mit derartigen Veränderungen stehen. In dieser Grundwasserfassung sollen die Sulfat-Konzentrationen in den vergangenen Jahren zugenommen haben (mündliche Mitteilung Egon Hilbe), dieser Trend könnte durch erhöhte Pumpraten und der damit verbundenen Erweiterung des Einzugsgebietes in Richtung des Talhangs bedingt sein, wo mit stark sulfathaltigen Zuflüssen zu rechnen ist (vgl. Kapitel 4.3.1.8).

Tabelle 4.7: *Typische Mittelwerte ausgewählter Parameter der Wasserbeschaffenheit bei den Grundwasserpumpwerken Balzers, Schaan und Ruggell (2002 aus [14]).*

	Rheinau Balzers	Neugut Vaduz	Wiesen Schaan	Oberau Ruggell
Wassertemperatur	9.7	10.1	8.8	10.0
pH-Wert	7.9	8.2	8.2	8.0
Gesamthärte	24.0	15.3	14.3	27.4
Karbonathärte	19.7	11.4	10.5	20.4
Calcium	73.7	47.5	41.7	84.6
Magnesium	13.4	8.6	9.3	15.1
Ammonium	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Nitrit	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Nitrat	7.1	2.8	2.5	6.6
Chlorid	3.7	2.0	2.0	5.3
Sulfat	38.0	36.8	37.4	64.1

4.3.1.9 Grundwassertemperatur

Die Temperaturen des Grundwassers und des Untergrunds werden allgemein durch die Lufttemperatur an der Terrainoberfläche, die Temperatur des infiltrierenden Wassers und die Strömungsverhältnisse im Untergrund bestimmt. Die Wassertemperatur im Grundwasserleiter weist ein räumlich und zeitlich sehr komplexes Verhalten auf, da die Temperatur als Potenzialgrösse der Wärmeenergie im Gegensatz zu den wichtigsten chemischen Parametern keine zählbare Menge und kein konservatives Verhalten aufweist.

Die mittlere Grundwassertemperatur entspricht in erster Annäherung etwa der mittleren Lufttemperatur an der Oberfläche, welche in Vaduz etwa 10 °C beträgt (Normwert 1981 - 2010). Im Untergrund ist die Temperatur in den obersten 3 m bis ca. 10 m unter Terrainoberfläche meist saisonal durch die Lufttemperatur beeinflusst, wobei die Temperaturschwankungen mit zunehmender Tiefe gedämpft sind und zeitlich verzögert auftreten. Aber auch in Tiefenbereichen ausserhalb des direkten Oberflächeneinflusses ist die Temperaturganglinie im Grundwasser im Jahresverlauf in der Regel nicht konstant: Meist sind auch dort ausgeprägte saisonale Temperaturschwankungen erkennbar, wobei die Amplitude und das zeitliche Auftreten der saisonalen Maxima und Minima unterschiedlich sein können.

Die Grundwassertemperaturen werden seit 2008 in ausgewählten Messstellen mit Messsonden automatisch erfasst und als Messreihen aufgezeichnet [15] (vgl. Abb. 13a). Anlässlich der langjährigen Erhebungen zur chemischen Wasserbeschaffenheit in den Liechtensteiner

Grundwasserpumpwerken [14] sind auch regelmässige Temperaturmessungen durchgeführt worden. Punktuelle Erhebungen zur Grundwassertemperatur über kürzere Zeiträume ergänzen diese Datenbasis.

Allgemein liegen die im direkten **Einflussgebiet des Rheins** gemessenen Jahresmittel der Grundwassertemperaturen etwas tiefer als 10 °C und die saisonalen Amplituden können von 3 °C bis mehr als 6 °C betragen. Im Grundwasser in unmittelbarer Rheinnähe ist der zeitliche Temperaturverlauf direkt gekoppelt an die Infiltrationsverhältnisse und die Temperatur des Rheins. Die Temperaturminima treten einige Tage bis Wochen nach Einsetzen des alpinen Schneeschmelze-Hochwassers des Rheins etwa ab April auf. Die Temperaturmaxima treten im Jahresverlauf nach Ende der genannten Infiltration von kühlerem Rheinwasser, bedingt durch Infiltration von wärmerem Sommerhochwasser oder wärmerem Grundwasserzstrom in der Regel zwischen Spätsommer und Winter auf. Während der Temperaturverlauf in Rheinnähe ausgeprägte Spitzen aufweisen kann, ist er in abseits vom Rhein gelegenen Messstellen mit längeren Zuströmzeiten zunehmend gedämpft und weist eine glatte, sinusähnliche Ganglinie auf. Die saisonalen Temperaturmaxima und -minima treten abseits vom Rhein zunehmend verzögert auf und die Amplituden nehmen ab.

In der **Talebene** bei Balzers beträgt die mittlere Grundwassertemperatur etwa 8 bis 10 °C und die Schwankungsamplitude rund 2 bis 4 °C (siehe Abb. 13a). Im Abschnitt Heilos Balzers – Triesen liegen ebenfalls mittlere Temperaturen von 9 bis 10 °C vor, die saisonalen Amplituden sind mit etwa 1 bis 3 °C dagegen geringer. Unterhalb von Triesen, im Talabschnitt Vaduz – Schaan, wo der Rhein ganzjährig stark ins Grundwasser infiltriert, beträgt die mittlere Wassertemperatur 8 bis ca. 9.5 °C mit typischen saisonalen Schwankungen zwischen 7 und 11 °C (Extremwerte 5.5 bis 13 °C). Rheinnahe Messstellen weisen das Temperaturmaximum im Herbst auf; am Fuss der Rüfeschuttfächer sind die Maxima dagegen bis zu 6 Monate verzögert zu beobachten und die Amplituden sind eher geringer. Im Gebiet nördlich von Schaan bis Bendern bestehen wenige Kenntnisse aus langfristigen Temperaturmessungen; in Rheinnähe dürften die Temperaturverhältnisse vergleichbar sein wie im Abschnitt Vaduz – Schaan. Im Gebiet von Bendern bis Ruggell sind nur in Rheinnähe relativ tiefe Grundwassertemperaturen mit Mittelwerten unter 9 °C zu erwarten. Bereits beim etwas rheinfernem Pumpwerk Oberau sind die Temperaturen mit gemessenen Schwankungen zwischen ca. 9 und 11.5 °C erhöht. Im weiter östlichen und nordöstlichen Gebiet von Ruggell, ausserhalb des direkten Einflussbereichs des Rheins, liegen Grundwassertemperaturen noch etwas höher (Maximum bis über 14 °C).

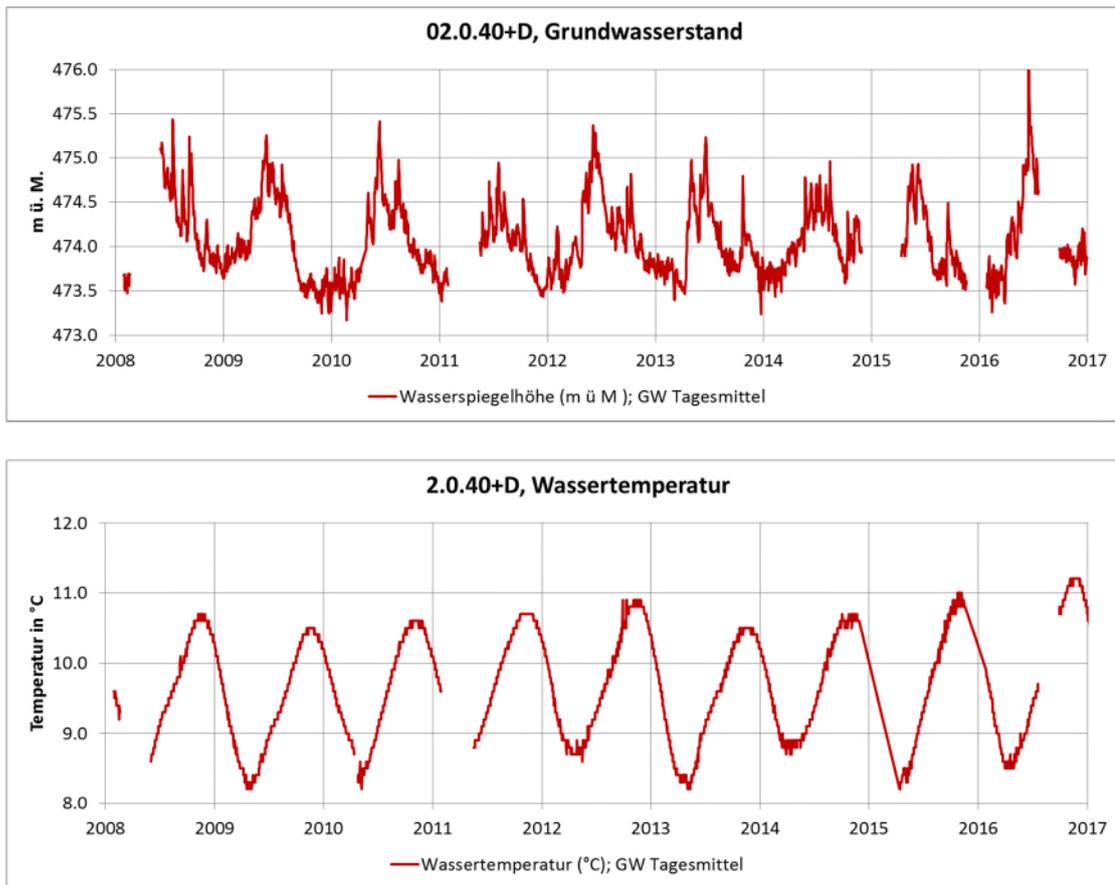


Abbildung 13a: Ganglinie des Grundwasserstandes und der Grundwassertemperaturen am Beispiel der Messstelle 2.0.40 (Balzers).

Nahe am **Talrand** liegt die mittlere Wassertemperatur oft über 10 °C mit Maximalwerten bis mehr als 14 °C. In den horizontal stark geschichteten, seitlichen Übergangsbereichen des Rheinschotter-Grundwasserleiters zu den Gebieten mit Hinterwasserablagerungen oder zum Talrand mit Schutfächern oder Fels sind in Temperatur-Vertikalprofilen oft ausgeprägte Einschichtungsphänomene von Wässern unterschiedlicher Temperatur festzustellen. Diese Wässer unterscheiden sich meist auch in der chemischen Wasserbeschaffenheit, was auf eine unterschiedliche Herkunft schliessen lässt (vgl. Abb. 13b). Dabei sind die lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten ausschlaggebend. So sind z.B. am Fuss des Schutfächers des Eichholtzobelbaches in Triesen und beim Mühleholz-Schutfächer in Vaduz Einschichtungen von wenig mineralisiertem, kühlerem Rheinfiltrat in der Tiefe bekannt, welche von wärmerem und stärker mineralisiertem hangseitigem Grundwasser überlagert werden. Saisonale Temperaturveränderungen sind auch in Übergangsbereichen, wo Grundwasser unterschiedlicher Herkunft aufeinander treffen bekannt. Ähnlich wie bei der Wasserbeschaffenheit können saisonale hydraulische Schwankungen zu unterschiedlichen Zuströmbedingungen und Veränderungen der Temperatur führen.

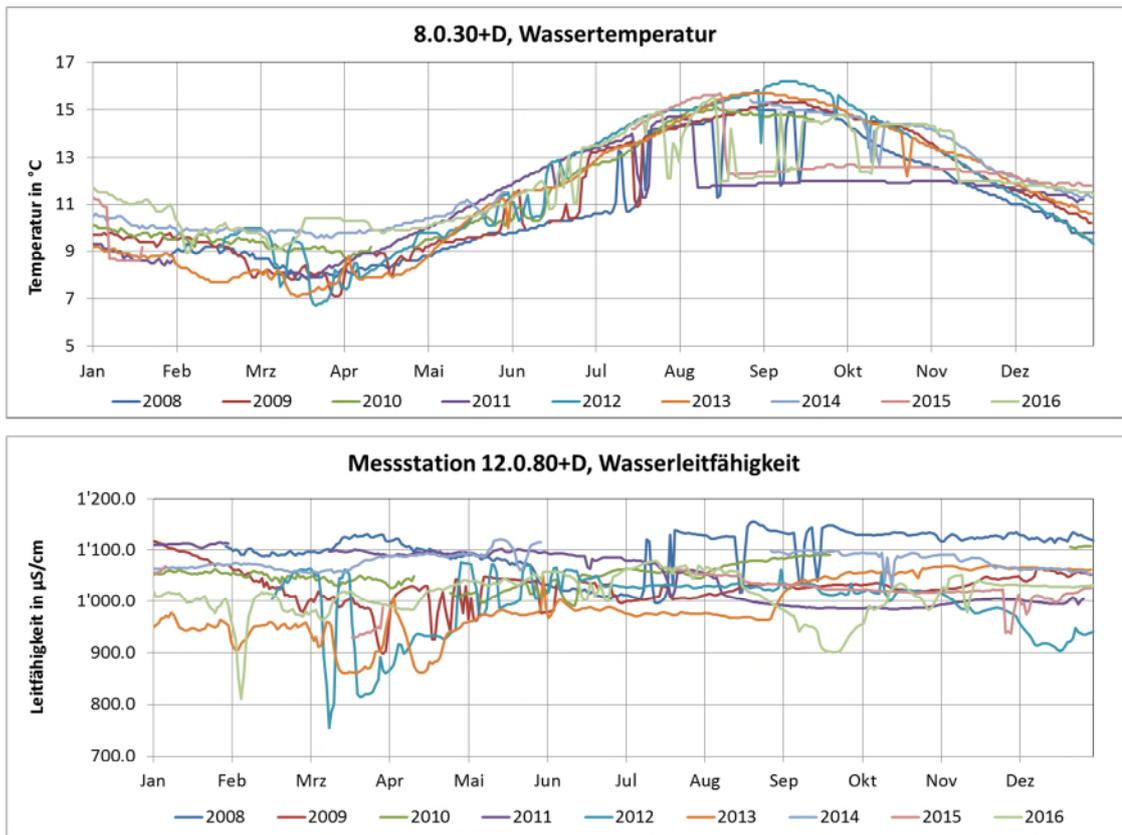


Abbildung 13b: Jahresganglinien der Grundwassertemperatur und Leitfähigkeit bei Messstelle 12.0.80 (Schaan). Es ist zu erkennen, dass die Messstelle von Wasser unterschiedlicher Herkunft geprägt wird.

Eine langfristige Veränderung der Grundwassertemperatur kann aus den Messdaten aus den Liechtensteiner Pumpwerken zwischen 1987 bis 2011 [14] zumindest vermutet werden. Demnach wäre im Grundwasser innert 24 Jahren eine Temperaturzunahme von etwa bis zu 0.8 °C zu verzeichnen. Allerdings deutet der Verlauf der meisten Messreihen darauf hin, dass die Datenbasis nicht homogen ist; insbesondere die neueren Messdaten nach 2003 bis 2005 weisen vermutlich systematische Abweichungen zur Vorperiode auf, welche auf externe Faktoren (Probenahmeprotokoll) etc. zurückzuführen sind.

4.3.2 Rheintalseitige Schutfächer

4.3.2.1 Aufbau

Die Schutfächer, welche von der östlichen Flanke des Rheintals in die Talebene reichen, stellen generell Grundwasserleiter mit heterogenem Aufbau und vorwiegend mässig guten Durchlässigkeiten dar.

Der Aufbau der Schutfächer ist durch die früheren Ablagerungsprozesse bedingt; es dominieren Murgangablagerungen mit schlecht sortiertem, feinkörnigem bis grobkörnigem Lo-

ckergesteinsmaterial. Typisch sind meist Kiese mit Steinen und unterschiedlich hohem Anteil an tonigem bis siltig-feinsandigem Material. Im Allgemeinen kann beobachtet werden, dass sich im oberen Teil des Schuttkegels ausgangs des Bachtobels aus der Steilstufe eher grobkörniges bis blockiges Material findet. Am Hangfuss können dagegen vermehrt Lagen auftreten, wo die groben Komponenten in der feinkörnigen Matrix einzeln vermengt sind.

Im **Schutfächer von Balzers** dominieren insgesamt grobkörnige Schichten mit Kies, Steinen und Blöcken. Am Hangfuss ist das Auftreten von grobkörnigen Lagen mit feinkörniger Grundmasse sowie auch häufigen kiesigen Silt- und Sandlagen bekannt, welche zumeist als Verzahnungen mit alluvialen Ablagerungen zu deuten sind.

Beim **Schutfächer der Lawena-Rüfe** sind bisher generell heterogene Verhältnisse dokumentiert worden. Es wechseln sich feinkornarme Kieslagen mit Steinen und Blöcken mit stark siltigen Kieslagen ab. Beim **Schutfächer der Badtobel-Rüfe** sind wegen der Flyschgesteine im Einzugsgebiet insgesamt eher feinkornreichere Rüfeschuttablagerungen zu erwarten.

Der **Schutfächer des Schindelholzaches** in Triesen weist generell einen eher hohen Anteil an feinkörniger Matrix auf und besteht zumeist aus stark siltigen Kiesen mit Steinen. Der **Schutfächer des Eichholzaches** besteht ebenfalls aus feinkornreichem Rüfeschuttmaterial.

Die grossen **Schutfächer von Vaduz und Schaan** (Mühleholz-, Quaderrüfe und Rüfenzüge von Schaan inkl. Forstrüfe) werden durch kiesige Ablagerungen dominiert, wobei diese zumeist in eine siltig-feinsandige Grundmasse eingebettet sind.

Bei den **Schutfächern der Nendler- und Maurer-Rüfen** treten wechselhafte Verhältnisse auf; es sind feinkörnige Schichten wie auch siltige Kiese mit Steinen zu erwarten.

4.3.2.2 Räumliche Ausdehnung

Die oberflächliche Ausdehnung der Schutfächer ist an ihrer Topografie ersichtlich. Die hangseitige Begrenzung der permanenten Wasserführung im Schutfächer, welche den Grundwasserleiter im engeren Sinne umfasst, ist dagegen aufgrund fehlender Aufschlussverhältnisse resp. Sondierungen in der Regel nicht genau bekannt. Talseitig grenzen die Schutfächer-Grundwasserleiter zwischen Triesen und Schaan an den Hauptgrundwasserleiter der Rheinschotter (vgl. 4.3.1.2). Der südliche Teil des Balzner Schutfächers geht talseitig ins Riet mit Hinterwasserablagerungen über.

Für die Schutfächer der Nendler- und Maurer-Rüfen kann die talseitige Begrenzung wie folgt beschrieben werden: Der Schutfächer der Nendler-Rüfe verzahnt sich am Hangfuss unterirdisch mit feinkörnigen Hinterwasserablagerungen. Im südlichen Teil kann eine Verbindung zu den im Talgebiet noch vorhandenen sandigen Ausläufern des Rheinschotter-Grundwasserleiters nicht ganz ausgeschlossen werden. Der Schutfächer der Maurer-Rüfe verzahnt sich talseits ebenfalls mit feinkörnigen Hinterwasserablagerungen; gegen Nordosten liegt er vermutlich Moränenablagerungen auf.

4.3.2.3 Durchlässigkeitsverhältnisse und Ergiebigkeit

Über die **Durchlässigkeiten** der Schuttfächerablagerungen bestehen nur beschränkte, lokale Kenntnisse aus punktuellen Messungen. Aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzung – in erster Linie abhängig vom Anteil der feinkörnigen Matrix – ist von einer recht grossen Bandbreite der Durchlässigkeiten auszugehen. Meist ist tendenziell mit höheren Durchlässigkeiten im Zentrum des Schuttfächers und mit niedrigeren Durchlässigkeiten am Fuss zu rechnen. Typische Profil-k-Werte von vorwiegend kiesigen Schuttfächerablagerungen liegen häufig zwischen $8 \times 10^{-5} - 8 \times 10^{-4}$ m/s. Niedrige k-Werte von weniger als 1×10^{-4} bis teils nur 1×10^{-5} m/s können in Lagen mit erhöhtem Feinanteil, insbesondere am Fuss der Schuttfächer auftreten.

Lokal erhöhte Durchlässigkeiten mit k-Werten bis knapp über 1×10^{-3} m/s sind z.B. im unteren Teil der Schuttfächer von Vaduz und Schaan dokumentiert, wobei diese Werte in der Regel schichtweise bestimmten Bereichs-k-Werten entsprechen. Auch im Schuttfächer der Lawenarüfe (Triesen) wurden schichtweise erhöhte k-Werte festgestellt. Gebietsweise bestehen in den Schuttfächern wechselnd durchlässige Schichtabfolgen; was bei gering durchlässigen Zwischenschichten zu gespannten Grundwasserverhältnissen führt.

Bei unterirdischen Verzahnungen der Schuttfächerablagerungen mit Hinterwasserablagerungen, wie z.B. am Hangfuss des Schuttfächers von Balzers oder der Nendler-/Maurer-Rüfe resultiert ein brüsker Abfall der Transmissivität (k-Werte der Hinterwasserablagerungen $< 1 \times 10^{-5}$ m/s); das Wasser innerhalb der Schuttfächerablagerungen wird zurückgestaut, was zu gespannten bis artesisch gespannten Verhältnissen führen kann.

Die **Wasserergiebigkeit** eines Grundwasserleiters kann mittels der Transmissivität beschrieben werden (vgl. Kap. 4.3.1.3). Dies benötigt ausreichende Kenntnisse der Durchlässigkeit und Mächtigkeit der grundwasserführenden Schichten. Im Gebiet der Schuttfächer liegen dazu nur punktuelle Datengrundlagen vor; lückenhaft sind insbesondere die Kenntnisse über die Grundwassermächtigkeit. Bisher bestehen keine systematischen, flächenhaften Darstellungen der Transmissivitäten der Schuttfächer; diese können derzeit nur ansatzweise und mit lokalen Beispielen beschrieben werden.

Am besten dokumentiert sind die Verhältnisse am Fusse des Schuttfächers von Schaan bei der Forstrüfe ([79] und [71]). Vom Fusse gegen die Hangseite nimmt die Transmissivität mit zunehmender Mächtigkeit des grundwasserführenden Teils des Schuttfächer-Körpers zu. Bei Annahme von k-Werten um 8×10^{-5} m/s ergeben sich am Fuss des Schuttkegels Transmissivitäten von weniger als 0.1×10^{-2} m²/s; hangseits können die Transmissivitäten in Gebieten mit Grundwassermächtigkeiten von über 50 m auf mehr als 0.4×10^{-2} m²/s geschätzt werden. Im übrigen Gebiet der Schuttfächer von Vaduz und Schaan ist mit ähnlichen Transmissivitäten zu rechnen. Im relativ zentral gelegenen Teil des Schuttfächers bei der Deponie "Im Rain" [73] können die Transmissivitäten näherungsweise auf 0.5 bis 1×10^{-2} m²/s bestimmt werden. Generell sind die höchsten Werte jeweils in hangseitigen Zonen mit dem grössten Tiefgang der Schuttfächer zu erwarten, wobei dort bisher keine vollständigen Datensätze zu k-Werten

und Grundwassermächtigkeiten vorliegen. Zu bemerken ist auch, dass in solchen Zonen in der Regel hohe Flurabstände von über 50 m vorliegen (vgl. Kapitel 4.2.2.4).

Trotz der bescheidenen Transmissivitäten, welche die Schuttfächer am Hangfuss bzw. am Übergang zu den Rheinschottern aufweisen, sind die Wassermengen, welche sie den Rheinschottern zufließen lassen, erheblich. Dies ist auf die grosse Kontaktfläche und den erhöhten Gradienten (vgl. Kapitel 4.3.2.4) des Grundwasserspiegels zurückzuführen (vgl. Wasserbilanz Kapitel 4.3.1.7).

Bei der Nendler- und bei der Maurer-Rüfe gibt es Hinweise, dass diese aufgrund der guten Transmissivität allenfalls günstige Voraussetzungen für eine Trinkwassernutzung bieten könnten [28].

4.3.2.4 Lage des Grundwasserspiegels, Grundwasserströmung

Generell bestehen nur wenige Daten zur Lage des Grundwasserspiegels; dabei handelt es sich um punktuelle Einzelmessungen im Rahmen von lokalen Untersuchungen (z.B. [71] und [72]). Die Kenntnisse über die Lage und zeitliche Schwankung des Grundwasserspiegels in den Schuttfächern sind daher beschränkt; regionalen Grundwasser-Isohypsenpläne sind nur in Einzelfällen und lediglich vom talseitigen Bereich vorhanden (vgl. [71] – [73]) und die gebräuchlichen mittleren, hohen und niedrigen Grundwasserstände sind im Allgemeinen ungenügend bekannt.

Es lassen sich vereinfacht zwei Randbedingungen unterscheiden, welche die Lage des Grundwasserspiegels im Schuttfächer wesentlich mitbestimmen: Im ersten Falle der unterirdischen Anbindung des Schuttfächer-Grundwasserleiters an den Rheinschotter-Grundwasserleiter, werden die Grundwasserspiegel über den Austausch mit diesem talseitigen Vorkommen hydraulisch angeglichen. Im zweiten Falle von stauenden Schichten am Fusse des Schuttfächers findet keine direkte Anbindung an den Rheinschotter-Grundwasserleiter statt und die Grundwasserspiegel im Schuttfächer sind weitgehend unabhängig vom Talgrundwasserleiter.

In beiden Fällen steigt die Geländeoberfläche jeweils hangseits deutlich steiler als die Oberfläche des Grundwasserspiegels an. Dies führt zu hohen Flurabständen in den zentralen und oberen Lagen der Schuttfächer, welche teilweise über 100 m betragen können.

Im Folgenden werden beispielhaft einzelne bekannte Situationen der Lage des Grundwasserspiegels beschrieben:

Der unterirdisch sich gegen den Rhein ausbreitende **Schuttfächer der Lawena-Rüfe** (Triesen) weist eine gute Anbindung an den Rheinschotter-Grundwasserleiter auf. Die Isohypsen am Fusse des Schuttfächers wurden bei Untersuchungen zur Deponie Säga [72] bestimmt. Die Grundwasserfliessrichtung ist im Rüfeschuttfächer ganzjährig Richtung WNW, d.h. parallel zum Hanggefälle orientiert. Der Gradient beträgt rund 8 – 9‰. Am Hangfuss im Übergangsbereich zum Rheinschotter-Grundwasserleiter schwenkt die Grundwasserfliessrichtung gegen NW ein und der Gradient wird zunehmend geringer. Die Schwankungen des Grundwas-

serspiegels zwischen relativem Hoch- und Niedrigwasserstand betragen im Schuttfächer rund 2 m (zwei Einzelmessungen 2008/2009 gemäss [72]).

Im **Schuttfächer von Vaduz** besteht ebenfalls eine hydraulische Anbindung an den Rheinschotter-Grundwasserleiter, welcher gegen Osten unter den Fuss des Schuttfächers reicht. Im Gebiet zwischen Mühleholz- und Quader-Rüfe wurden Grundwasserstand und Fliessrichtungen bei den Untersuchungen zur Deponie "Im Rain" erhoben [73]. Im Schuttfächer sind die Fliessrichtungen dort ungefähr hangparallel gegen W bis WNW gerichtet. Am Übergang zum Rheinschotter-Grundwasserleiter und somit rund 300 m vom Hangfuss entfernt, biegen die Fliessrichtungen in die nordwestliche Strömung des Talgrundwasserleiters ein. Der Flurabstand des Grundwasserspiegels beträgt bereits im genannten Übergangsbereich zum Rheinschotter-Grundwasserleiter rund 10 m und nimmt hangseits rasch zu; im unteren Bereich der Deponie Im Rain wurden Flurabstände von knapp über 70 m gemessen. Der mittlere Gradient im Schuttfächer beträgt rund 6‰.

Im **Schuttfächer von Schaan** besteht im Gebiet der **Forst-Rüfe** am Hangfuss keine direkte Anbindung an den Rheinschotter-Grundwasserleiter. Der Aufbau am Hangfuss ist gemäss den Untersuchungen zur Deponie Forst ([70] und [71]) von mehrheitlich gering durchlässigem Rüfeschutt geprägt, welche an feinkörnige Hinterwasserablagerungen angrenzen. Die Grundwasserführung im unteren Teil des Schuttfächers erfolgt vorwiegend über einzelne durchlässige Schichten, was lokal zu gespannten Verhältnissen führt. Die schlechten Durchlässigkeiten im Schuttfächerfuss ergeben eine Stausituation, welche einen "Sprung" zwischen dem Grundwasserspiegel der Talebene und dem Grundwasserspiegel im Schuttfächer bewirken. So sind am Fusse des Schuttfächers schon unterhalb der Feldkircher Strasse Grundwasserspiegel dokumentiert, welche rund 10 – 15 m über dem Grundwasserspiegel der Talebene liegen. Hangseits weist der Grundwasserspiegel resp. das Druckniveau in den gespannten Schichten ein Gefälle von nur rund 1% auf [71]; die Fliessrichtung ist etwa parallel zum Hanggefälle. Die Schwankungen des Druckniveaus sind nur ungefähr bekannt; es ist im Jahresverlauf mit 2 – 5 m zu rechnen.

Am Hangfuss der Schuttfächer der Nendler- und Maurer-Rüfe sind ebenfalls eher feinkörnige Rüfeschutttablagerungen und Stausituationen zu den talseitigen Hinterwasserablagerungen zu erwarten. Auch beim Schuttfächer von Balzers sind im Bereich von Verzahnungen mit feinkörnigen alluvialen Ablagerungen Stausituationen möglich. Der Flurabstand ist in diesen Hangfussgebieten in der Regel nur gering. Im Gebiet der Nendler- und Maurer-Rüfe bestehen z.T. unmittelbar am Hangfuss Hinweise auf artesisch gespannte Grundwasserverhältnisse.

4.3.2.5 Wechselwirkungen zu den Oberflächengewässern

Die Schuttfächer werden aufgrund ihrer geologischen Entstehungsgeschichte von Bach- und Rüfeschuttrinnen durchzogen, welche sich vom zentralen, meist engen Ausgangsbereich bei den Felsflanken über den Schuttfächer talwärts ausbreiten. Die heute noch aktiven und teilweise umgeleiteten Rinnen weisen Bäche auf, deren Wasserführung jedoch häufig nur temporär ist. Typisch für diese Rinnen ist eine Bachwasserinfiltration auf der Strecke des Schutt-

fächers. Eine solche Infiltration findet bei allen Schuttfächern statt und diese ist beim tiefliegenden Grundwasserspiegel praktisch unabhängig von den Grundwasserständen. Ausgenommen sind die künstlich kanalisierten Rinnen (-Abschnitte).

Einige Schuttfächer weisen entlang oder nahe dem Fuss verlaufende Oberflächengewässer auf, welche hydrogeologisch in Beziehung zum Schuttfächer stehen können. Zu einem grossen Teil handelt es sich dabei allerdings um Giessen oder Kanäle, welche hauptsächlich mit dem Rheinschotter-Grundwasserleiter in Wechselwirkung stehen (Beschrieb vgl. Kap. 4.3.1.6). Folgende Oberflächengewässer mit möglichen Beziehungen zum Schuttfächer-Grundwasserleiter sind zu nennen:

- Der Binnenkanal wirkt im Gebiet Balzers tendenziell als Infiltrant; wo er entlang dem nördlichen Rand des Schuttfächers von Balzers verläuft, sind wechselnde Beziehungen zum Schuttfächer-Grundwasserleiter zu erwarten. So kann bei hohen Grundwasserständen eine Vorflutwirkung mit Grundwasserexfiltration auftreten; bei tiefen Grundwasserständen und hohem Pegel im Kanal dagegen eine Infiltration.
- Beim Vaduzer Giessen, welcher am Südrand des Schuttfächers von Vaduz verläuft, sind die hydraulischen Beziehungen nicht im Detail bekannt. Es sind zumindest bei mittleren Grundwasserständen eher geringe Wechselwirkungen zwischen Giessen und Grundwasserleiter zu erwarten. Zu bemerken ist, dass dort die Rheinschotter unter den Schuttfächern reichen und den Hauptgrundwasserleiter darstellen, so dass der Schuttfächer-Grundwasserleiter im Fussbereich nur mit reduzierter Mächtigkeit vorhanden ist.
- In der Umgebung der Forst-Rüfe in Schaan entspringen am Fusse des Schuttfächers verschiedene Vorflutkanäle, welche von hangseitig aus dem Schuttfächer zufließendes Grundwasser gespiesen werden. Davon dürfte ein bedeutender Anteil aus diffusen Grundwasserzutritten aus dem Schuttfächer stammen.
- Am Fusse der Schuttfächer der Nendler- und Maurer-Rüfe bestehen ebenfalls Kanäle, welche zumeist als Vorfluter wirken und es ist mit diffusen Grundwasserzutritten aus den Schuttfächern zu rechnen.

4.3.2.6 Grundwasserneubildung, Zufluss und Abfluss

Die Abbildung 14 veranschaulicht schematisch die nachstehend behandelten Vorgänge. Das Grundwasser der Schuttfächer-Grundwasserleiter stammt aus der Neubildung durch diffuse Versickerung von Niederschlagswasser, sowie aus der Infiltration von Oberflächengewässern und aus Zuflüssen aus zuströmseitig benachbarten Grundwasservorkommen. Bei den letztgenannten handelt es sich im Allgemeinen um Felsgrundwasserleiter, welche die Schuttfächer unterirdisch speisen.

Die Abflüsse aus den Schuttfächern erfolgen praktisch vollständig unterirdisch in Richtung des Rheinschotter-Grundwasserleiters. In den Gebieten mit Stausituationen am Hangfuss resp. angrenzenden feinkörnigen Hinterwasserablagerungen in der Talebene sind Grundwasserübertritte in die Vorfluter möglich (vgl. Wechselwirkungen mit Gewässern in 4.3.2.5).

Im Rahmen der Bestimmung des thermischen Nutzungspotenzials im Talgrundwasserleiter des Liechtensteiner Rheintals wurde eine Teilbilanzierung des Grundwasserhaushalts erstellt (vgl. [26]), welche auch Angaben zur Grundwasserbilanz der Schuttfächer-Grundwasserleiter erlaubt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Für die Neubildung aus dem hangseitigen Einzugsgebiet wurde vereinfacht eine Summe verwendet, da jeweils keine Daten zu den Anteilen an unterirdischem Grundwasserzufluss und oberirdischer Quell- und Bachwasserinfiltration bestehen. Es handelt sich daher um relativ grobe Schätzungen, welche jedoch in der Grössenordnung zutreffen sollten.

Tabelle 4.8: Grundwasserneubildung in Schuttfächern, Schätzungen nach [26].

Schuttfächer	Fläche Schuttfächer	Q _i direkte Infiltration aus Niederschlag	∑ Zuflüsse via Grundwasser und Infiltration aus Quell- und Bachwasser
	km ²	l/s	l/s
Schuttfächer Balzers	1.5	30	60
Schuttfächergebiet Triesen	2.7	50	420
Schuttfächer Vaduz – Schaan	7.2	100	200
Schuttfächer Nendler- und Maurer-Rüfe	2.3	35	150
Total	13.7	215	830

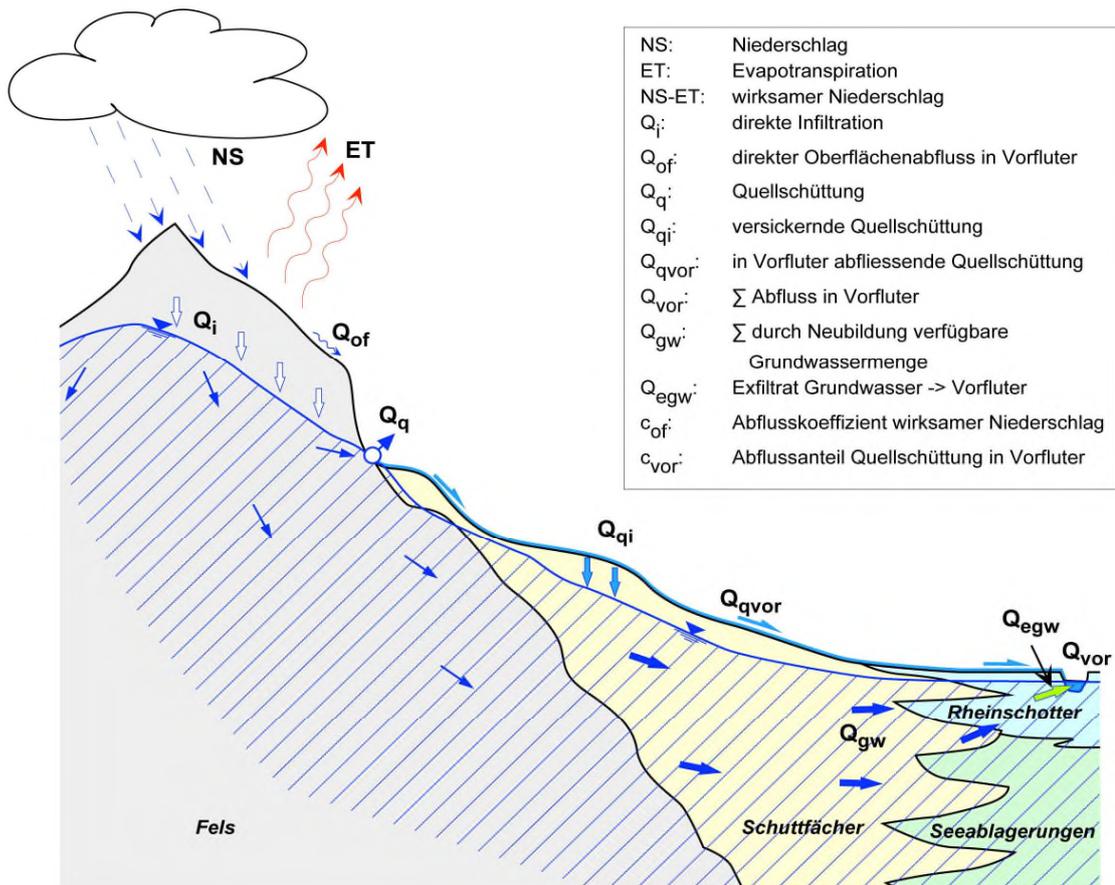


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Grundwasserneubildung, der Infiltration und der Exfiltration in Vorflutgewässer (Dr. Bernasconi AG, 2009 [26]).

4.3.2.7 Grundwasserbeschaffenheit und Temperatur

Das Grundwasser in den Schuttflächen-Grundwasserleitern wird in seiner **Beschaffenheit** geprägt durch die hangseitigen Zuflüsse und die jeweiligen Austauschprozesse im Lockergesteins-Grundwasserkörper. Die chemische Zusammensetzung widerspiegelt somit auch das geologische Einzugsgebiet der Schuttflächen; typisch sind z.B. harte Grundwassertypen bei Karbonatgesteinen und hohe Sulfatgehalte bei gipshaltigen Triasgesteinen im Einzugsgebiet resp. Schuttflächen. Im Allgemeinen weist das Wasser in den Schuttflächen-Grundwasserleitern eine mässige bis hohe Sauerstoffsättigung auf und reduzierte Spezies sind nicht vorhanden.

Die Kenntnisse über die Grundwasserbeschaffenheit in den Schuttflächen beschränken sich im Wesentlichen auf einzelne Untersuchungen im Rahmen der Abklärungen bei Deponiestandorten. Bei den im Folgenden beschriebenen Schuttflächen ist die Grundwasserbeschaffenheit zwar nicht flächendeckend bekannt, kann jedoch bereits relativ gut charakterisiert werden.

Beim **Schuttflächen der Lawena-Rüfe** besteht gebietsweise eine recht hohe Mineralisation des Wassers, was sich in der Härtestufe mittelhart bis ziemlich hart und einer Karbonathärte

von bis zu rund 25 °fH äussert [72]. Zu bemerken ist auch der relativ geringe Sulfatgehalt um 10 – 15 mg/l. Bei der nördlich anschliessenden Badtobel-Rüfe ist insgesamt mit ähnlichen Verhältnissen zu rechnen, wobei unter Berücksichtigung der Beschaffenheit der hangseitigen Quellen der Härtegrad eher geringer sein dürfte, der Sulfatgehalt dagegen höher.

Das Grundwasser im Schuttfächer von Vaduz und Schaan (**Mühleholz-, Quader- und Tidrüfe**) weist generell hohe bis sehr hohe Gesamthärten auf. Im Gebiet der Deponie Im Rain Vaduz wurden Gesamthärten von über 55 °fH gemessen; die Karbonathärte lag bei 18 °fH. Die Sulfatgehalte sind mit über 350 mg/l sehr hoch [73]. Bei der **Forst-Rüfe** im Gebiet der Deponie Forst ist die Gesamthärte etwas geringer, aber mit Werten über 43 °fH immer noch hoch [69]. Die Karbonathärte ist gegenüber den Werten des Gebiets Im Rain mit 21 – 34 °fH etwas erhöht, dagegen sind die Sulfatgehalte deutlich geringer (> 150 mg/l).

Bei den übrigen Schuttfächern von Balzers, Triesen und Nendeln/Mauren liegen keine Daten über die Beschaffenheit des Grundwassers vor.

Bezüglich der **Grundwassertemperaturen** in den Schuttfächern sind die Kenntnisse allgemein gering, da höchstens punktuelle Einzelmessungen und keine permanenten Aufzeichnungen des Jahresgangs vorliegen. Aufgrund von Einzelmessungen im Schuttfächer von Vaduz bis Schaan mit Werten zwischen 10.0 und 12.5 °C zeichnen sich zumindest etwas höhere Temperaturen ab, als im Rheinschotter-Grundwasserleiter.

4.3.3 Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs

4.3.3.1 Vorbemerkung

Die Kenntnisse über die glazialen Ablagerungen basieren weitgehend auf untierten Sondierungen und diversen im Gebiet erstellten Erdwärmesondenbohrungen; tiefere Kernbohrungen oder grundwasserspezifische Abklärungen fehlen dagegen bisher. Damit bestehen grundlegende Kenntnislücken über die hydrogeologischen Verhältnisse im Grundwasserkörper; das Vorhandensein eines Grundwasserleiters gilt jedoch nach heutigem Wissensstand als ausreichend gesichert.

4.3.3.2 Aufbau

Am Fusse des Schellenbergs bei Eschen und Mauren besteht eine Hügellandschaft, welche durch glaziale Ablagerungen gebildet wurde. Es handelt sich um relativ heterogene Ablagerungen, deren geologische Entstehungsgeschichte nicht abschliessend bekannt ist (vgl. 2.3.2.2). Die Abfolge weist oberflächennah bis in maximal etwa 20 – 30 m Tiefe häufig Schichten mit feinkornreicher, grundmoränenartiger Zusammensetzung von Silt- bis Blockfraktion auf. Darunter folgen meist feinkornarme, recht gut gerundete Kiese mit Sand ("glaziale Schotter"). Untergeordnet treten teilweise auch Sande mit Kies auf. Vereinfacht kann somit von einem Zweischichtmodell gesprochen werden, welches aus grundmoränenartiger Deckschicht und der Schotterabfolge besteht. Die Mächtigkeiten und das Auftreten der vorgängig genannten Schichten schwanken räumlich allerdings stark; so treten gebietsweise auch feinkörnige Siltschichten mit Kies in der "Schotterabfolge" auf. An der Basis der glazialen Ablagerungen folgen talseits feinkörnige Seeablagerungen, während die Abfolge hangseits vom Fels unterlagert wird.

4.3.3.3 Räumliche Ausdehnung

Oberflächlich können die glazialen Ablagerungen durch die typische Topografie der Hügelformen relativ gut abgegrenzt werden. So reichen die Ablagerungen hangseits am Schellenberg zwischen Eschen und Mauren etwa maximal bis auf Höhen von 540 – 550 m ü.M. Talseits bildet die Rietebene die oberflächliche Begrenzung, wobei die Abfolge vermutlich gegen Süden unter die feinkörnigen und sandigen Ablagerungen der Talebene reicht. Diese südliche Begrenzung ist bisher nicht genau dokumentiert. Die Mächtigkeit weist wie erwähnt starke Schwankungen auf. Die grösste Mächtigkeit von rund 100 m wurde bisher in Eschen am Ausläufer des Hügels von Guedega angetroffen.

Der Grundwasserleiter, welcher den permanent wasserführenden Teil des Lockergesteinskörpers der Schotterabfolge darstellt, kann mangels Daten nicht genau abgegrenzt werden. Talseits dürfte er zumindest bis unter die Ablagerungen der Rietebene reichen; hangseits ist die Begrenzung weitgehend unbekannt.

4.3.3.4 Durchlässigkeitsverhältnisse und Ergiebigkeit

Mangels fehlender Sondierungen mit Auswertungen von Pumpversuchsdaten liegen keine Daten über die Durchlässigkeitsverhältnisse im Grundwasserleiter vor. Als Schätzwerte für die Durchlässigkeiten der kiesigen Schichten (Schotter), kann bei mässigem Feinanteil von k-Werten zwischen 1×10^{-4} m/s bis 1×10^{-3} m/s ausgegangen werden. Bei Schotter mit geringem Feinanteil – welche im Grundwasserleiter zu vermuten sind – können die Durchlässigkeiten auch k-Werte deutlich über 1×10^{-3} m/s erreichen. In den grundmoränenartigen Deckschichten sind die Durchlässigkeiten im Allgemeinen nur gering.

Über die Ergiebigkeit des Grundwasserleiters bestehen bisher keine Kenntnisse. Aus den vorliegenden Erdwärmesondenprofilen lassen sich keine effektiven Grundwassermächtigkeiten bestimmen, es ergeben sich aber zumindest Hinweise auf Mächtigkeiten von einigen Zehnern Meter. Somit dürften lokal gute Ergiebigkeiten vorliegen.

4.3.3.5 Lage des Grundwasserspiegels, Grundwasserströmung

Über die Lage des Grundwasserspiegels und zur Grundwasserströmung bestehen keine gesicherten Kenntnisse. Gemäss der hydrogeologischen Situation ist davon auszugehen, dass die Grundwasserspiegel am Hangfuss etwa auf Höhe derjenigen der Rietebene liegen. Gegen die Hangseite ist mit einem Anstieg des Grundwasserspiegels zu rechnen, wobei sich aufgrund der unregelmässigen Hügelstrukturen schwankende Flurabstände ergeben.

4.3.3.6 Wechselwirkungen zu den Oberflächengewässern

Im fraglichen Hangfussgebiet bestehen nur einzelne, teils eingedolte Bäche. Es ist davon auszugehen, dass in den Bächen in erster Linie Oberflächenabfluss mit einer Entwässerung der schlecht durchlässigen oberflächennahen Schichten stattfindet. Die Bachwasserinfiltration ist sehr wahrscheinlich unbedeutend.

4.3.3.7 Grundwasserneubildung, Zufluss und Abfluss

Über die Grundwasserneubildung, die Zu- und Abflüsse bestehen bisher keine Kenntnisse. Von Interesse dürfte insbesondere die Frage sein, ob eine Neubildung über unterirdische Karstwasserzutritte aus höher liegenden Gebieten des Felsrückens des Schellenbergs erfolgt oder ob es sich eher um einen Grundwasserleiter mit geringer Neubildung und Wasserzirkulation handelt.

4.3.3.8 Grundwasserbeschaffenheit und Temperatur

Über die Beschaffenheit und Temperatur des Grundwassers im beschriebenen Grundwasserleiter liegt bisher nur eine punktuelle Messung vor, welche ziemlich hartes bis hartes Wasser und eine Temperatur von 13 °C anzeigt [66].

4.3.4 Lockergesteine im Sainatal und im Malbuntal

Aufgrund ihrer beschränkten Ausdehnung, der lokalen Bedeutung und der relativ geringen Datengrundlagen und Kenntnisse fällt die Beschreibung dieser Grundwasserleiter summarisch aus. Die wichtigsten Angaben werden im Folgenden aufgeführt.

Tabelle 4.9: Streubereich der Wasserbeschaffenheit der Quellen Rietern.

Wassertemperatur °C	4.5 – 7.4
pH-Wert	7.7 – 7.9
Gesamthärte	23.5 – 30.2 fr.H°
Karbonathärte	14.3 – 19.5 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	63 – 77
Magnesium (Mg) mg/l	18 – 28
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005 – 0.02
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	0.4 – 2.6
Nitrat (NO ₃) mg/l	0.8 – 2.0
Sulfat (SO ₄) mg/l	60 – 125

Tabelle 4.10: Streubereich der Wasserbeschaffenheit der Quellen Schneeflucht Malbun.

Wassertemperatur °C	4 – 8
pH-Wert	7.3 – 8.0
Gesamthärte	25.5 – 27.0 fr.H°
Karbonathärte	15.5 – 20.0 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	76 – 84
Magnesium (Mg) mg/l	13 – 18
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	1.0 – 3.0
Nitrat (NO ₃) mg/l	1.0 – 2.6
Sulfat (SO ₄) mg/l	60 – 100

Die kiesigen Ablagerungen, welche der Malbunbach, der Valünabach bzw. der Stegerbach im Bereich des Talgrundes abgelagert haben, können lokal Grundwasserkörper enthalten, diese sind jedoch quantitativ von eher untergeordneter Bedeutung. Es ist anzunehmen, dass die

Quellen Schneeflucht Malbun und die Quellen Rietern aus derartigen Schottervorkommen entspringen [59] und [64]. Weiter dürfte die ungefasste Quelle Älplebüchel aus dem Schotter des Valünabachs gespiesen werden.

Die Wasserbeschaffenheit dieser genutzten Quellen ist gut dokumentiert und zeigt eine einwandfreie Trinkwasserqualität. Das Wasser weist eine relativ hohe Gesamtmineralisation bei erhöhtem Sulfatgehalt auf (vgl. Tabellen 4.9 und 4.10).

4.3.5 Lockergesteine im rheintalseitigen Hanggebiet

Die Lockergesteine der östlichen Talflanke sind in ihrer Beschaffenheit äusserst heterogen, so sind die aus ihnen entspringenden Quellen entsprechend unterschiedlich. Die hydrogeologischen Eigenschaften sind in der Regel je nach Vorkommen individuell, so dass hier auf eine systematische Darstellung verzichtet wird. Als Ausnahme muss das Gebiet der Hangrutschung von Triesenberg sowie das Gebiet Planken-Maurerberg erwähnt werden, die von einer auffallend grossen Anzahl ergiebiger Quellen gekennzeichnet sind. Im Gebiet Triesenberg ist dieser Umstand mit grösster Wahrscheinlichkeit massgeblich dadurch bedingt, dass im oberen Teil des Rutschhanges namhafte unterirdische Zuflüsse aus dem Valünatal erfolgen (vgl. [75]). Ein grosser Teil dieser Quellen wird von den Wasserversorgungen der Gemeinden Triesen und Triesenberg genutzt. Die Wasserbeschaffenheit ist abgesehen von sporadischen bakteriellen Beeinträchtigungen chemisch einwandfrei (vgl. Tabelle 4.11).

Tabelle 4.11: Wasserbeschaffenheit im Gebiet Triesen/Triesenberg am Beispiel der Quelle Bim Brunna, Triesenberg.

Wassertemperatur °C	7.0 – 8.2
pH-Wert	8.0 – 8.1
Gesamthärte	21.0 – 22.0 fr.H°
Karbonathärte	18.3 – 18.6 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	46 – 50
Magnesium (Mg) mg/l	22 – 23
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	3.5 – 4.4
Nitrat (NO ₃) mg/l	3.0 – 3.3
Sulfat (SO ₄) mg/l	18.2 – 21.5

Im Gebiet Planken – Maurerberg sind insbesondere die ergiebige Quelle «Sissa Stä» sowie die Quellgruppe «Am Alpweg» zu erwähnen. Diese Quellen weisen sporadische bakterielle Beeinträchtigungen auf, die chemische Beschaffenheit gilt als einwandfrei (vgl. Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12: *Wasserbeschaffenheit im Gebiet Planken – Maurerberg am Beispiel der Quellgruppe «Am Alpweg», Analyse vom 11.10.1996 aus [85].*

Wassertemperatur °C	6.7 – 6.8
pH-Wert	8.0 – 8.4
Gesamthärte	16.5 – 17.1 fr.H°
Karbonathärte	14.9 – 15.4 fr.H°
Calcium (Ca) mg/l	46.8 – 48.4
Magnesium (Mg) mg/l	11.7 – 13
Ammonium (NH ₄ -N) mg/l	<0.005
Nitrit (NO ₂) mg/l	<0.005
Chlorid (Cl) mg/l	0.7 – 0.8
Nitrat (NO ₃) mg/l	4.8 – 5.0
Sulfat (SO ₄) mg/l	10.7 – 11.2

5. Die heutige Nutzung

5.1 Nutzungsarten

Die Grundwasservorkommen im Fürstentum Liechtenstein werden bereits heute verhältnismässig intensiv genutzt, die Nutzungsarten können wie folgt gegliedert werden:

- Trink- und Brauchwasser für Haushalte, Gewerbe und öffentlichen Verbrauch,
- Brauchwasser Industrie,
- Bewässerung,
- Thermische Nutzung.

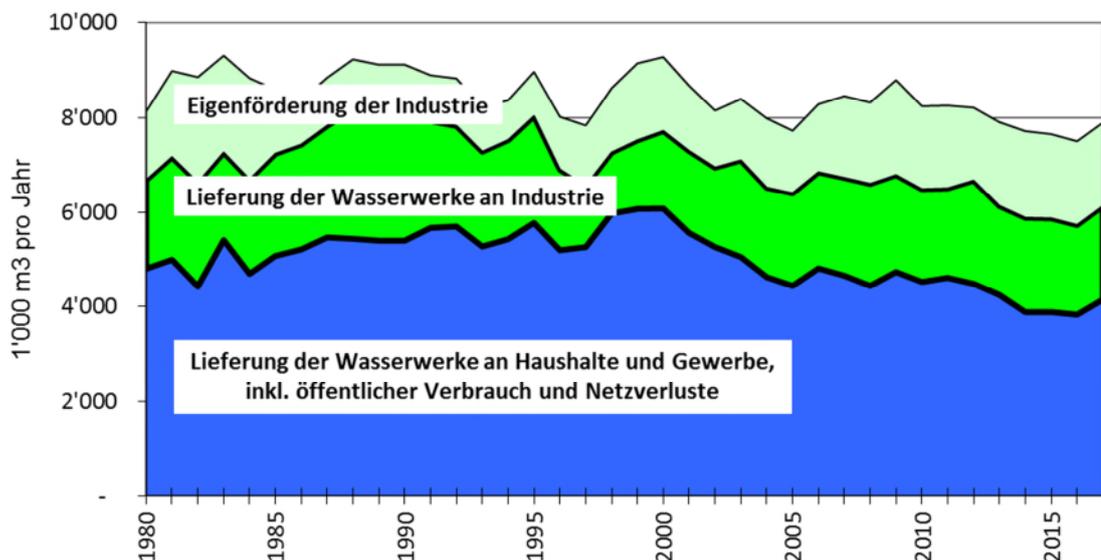


Abbildung 15a: Verbrauch an Trink- und Brauchwasser 1980 – 2016 in 1'000 Kubikmeter pro Jahr (Quelle: AU).

Die Statistik der Jahre 1980 bis 2016 zeigt, dass der Gesamtverbrauch annähernd stabil geblieben ist, wobei der Verbrauch der Haushalte gegenüber demjenigen der Industrie leicht abgenommen hat (vgl. Abb. 15a). Diese Entwicklung ist auf zum einen auf den Einsatz zunehmend wassersparender Geräte (insb. Spül- und Waschmaschinen) und zum anderen auf Anstrengungen zur Reduktion von Wasserverlusten im Verteilnetz zurückzuführen. Nicht erfasst ist der Wasserverbrauch für die Bewässerung, welcher erfahrungsgemäss in den letzten 10 Jahren deutlich zugenommen hat. Dazu kommt die thermische Nutzung, die jedoch separat zu betrachten ist, zumal im Regelfall das genutzte Grundwasser wieder dem Grundwasserleiter zurückgeführt wird und daher keine quantitative, sondern nur eine thermische Einwirkung auf das Grundwasser erfolgt. Die thermische Nutzung des Grundwassers wurde in einer eigenständigen Studie analysiert und Vorschläge für ihre Regelung ausgearbeitet [27]. Massnahmen, die im Bereich des planerischen Schutzes des Grundwassers wirken, werden in Kapitel 8 dargelegt. Die thermische Nutzung des Grundwassers hat in den letzten Jahren stark zugenommen (vgl. Abb. 15b)

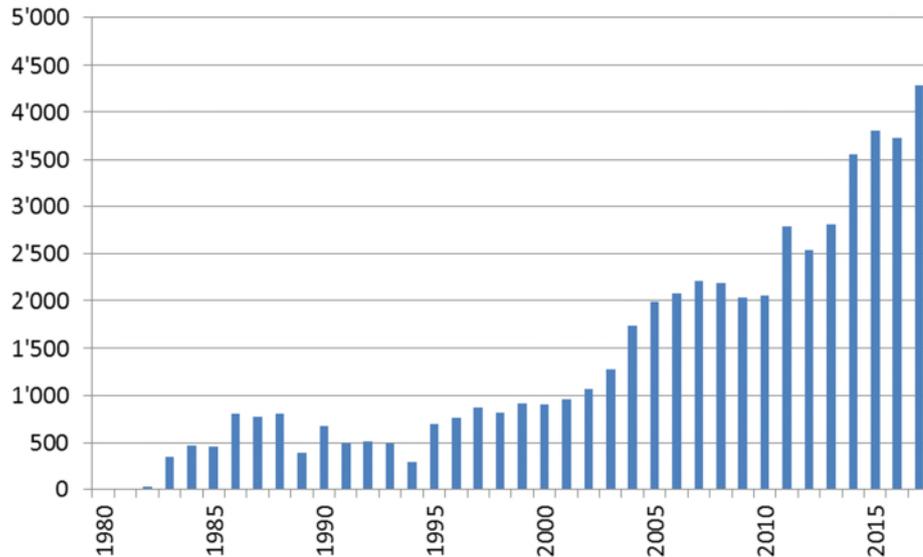


Abbildung 15b: Grundwassernutzung zum Betrieb von Wärmepumpen 1980 - 2017 in 1'000 Kubikmeter pro Jahr (Quelle: AU).

5.2 Deckung des Wasserbedarfs

Die wichtigsten Anlagen zur Deckung des Wasserbedarfs sind:

- Die Quelfassungen der Wasserwerke.
- Die Grundwasserpumpwerke der Wasserwerke.
- Die Grundwasserpumpwerke der Industrie.
- Die Grundwasserbrunnen und in Einzelfällen die Quelfassungen für die thermische Nutzung.

Dazu kommen kleine private Verbraucher mit eigenen Quell- oder Grundwasserfassungen, die jedoch mengenmässig unbedeutend ins Gewicht fallen und statistisch nicht erfasst sind. Die Deckung des Wasserbedarfes erfolgt etwa je hälftig aus Grund- und Quellwasser (vgl. Abb. 16).

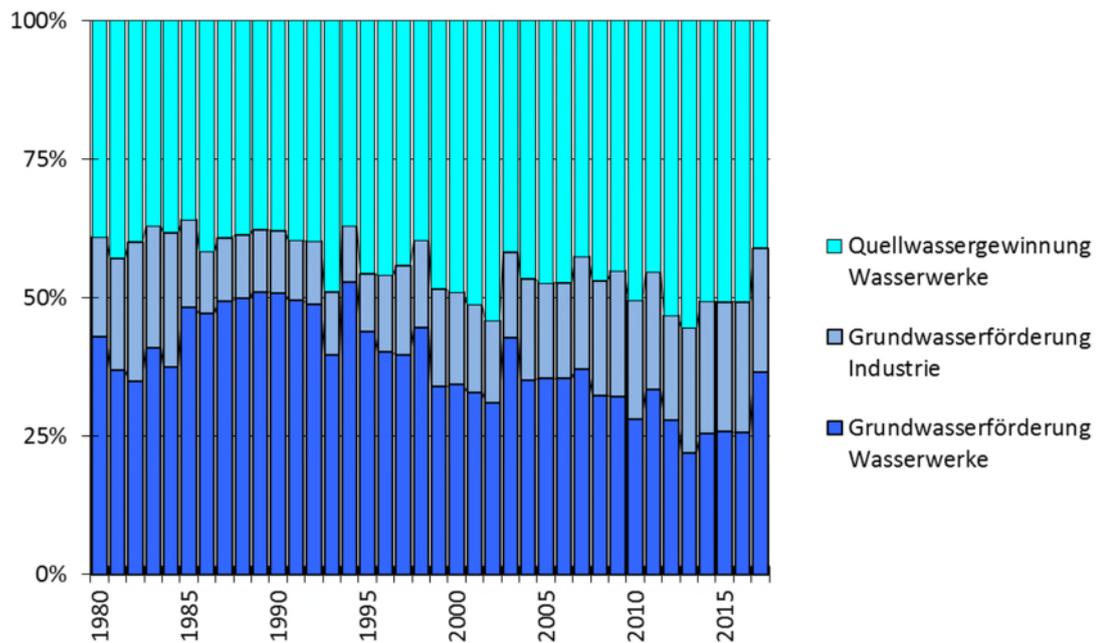


Abbildung 16: Deckung des Wasserverbrauchs der öffentlichen Wasserversorgung 1980–2016 (Quelle: AU).

Die Quellen haben den wesentlichen Vorteil, dass ihre Nutzung in der Regel quantitativ und ohne Energiebedarf erfolgen kann und sogar vereinzelt umgekehrt eine kombinierte energetische Nutzung ermöglicht. Ihr Ertrag ist aber den natürlichen, grossen jährlichen Schwankungen ihrer Austrittsmengen unterworfen. Die Grundwasserbrunnen haben dagegen den grossen Vorteil, dass sie aus ihrem grossen, natürlichen Reservoir schöpfen, die genutzten Mengen können deshalb dem effektiven Bedarf angepasst werden und bei entsprechender Brunnenleistung Bedarfsspitzen problemlos abdecken.

5.2.1 Grundwasserkörper im Fels

Die derzeitige Nutzung von Fels-Grundwasser erfolgt ausschliesslich über Quellfassungen, d.h. über die Nutzung von natürlichen, gravitativen Wasseraustritten. Nutzungen über Tiefenbohrungen mit Pumpbetrieb sind keine vorhanden.

Der grösste Teil der wirtschaftlich nutzbaren Quellvorkommen sind bereits genutzt. Ein namhaftes Potenzial zur Steigerung des Quellwasseranteils besteht theoretisch nur im Gebiet Triesenberg, wo einzelne grössere Quellen, aufgrund des bestehenden Gefahrenpotenzials nur für thermische Zwecke bzw. nicht für die Trinkwassernutzung benutzt werden können (z.B. Quellen Rietli und Jonaboda). Mehrere, meist ergiebige Quellen die aus der Formation der Lechtaldecke entstammen (vgl. Abschnitt 4.3.3.3) werden aufgrund ihrer ungünstigen chemischen Beschaffenheit nur energetisch genutzt (z.B. Spörry-Quellen) oder sind heute ungenutzt (z.B. Quadretscha-Quellen).

5.2.2 Grundwasserkörper in den Lockergesteinen

5.2.2.1 Talschotter Rheintal (Rheinschotter)

Der Grundwasserkörper in den Rheinschottern der Talebene ist bereits heute der wichtigste Lieferant für den Wasserverbrauch im Fürstentum Liechtenstein. Tabelle 5.1 liefert einen Überblick über die Fördermengen der 8 grössten Grundwasserpumpwerke der öffentlichen Wasserversorgung sowie der 6 bedeutendsten Grundwasserfassungen für die thermische Nutzung. Dazu kommen mehrere Grundwasserförderanlagen der in der Talebene angesiedelten Industrien (z.B. Swarovski in Triesen) oder betriebseigenen Brunnen von öffentlichen Werken (z.B. ARA Bendern).

Tabelle 5.1: Fördermenge der grössten Grundwasserpumpwerke für den Trink- bzw. Brauchwassergebrauch in Kubikmeter pro Jahr (Quelle: AU).

Name	Gemeinde	2012	2013	2014	2015	2016	2017
PW Rheinau	Balzers	111'000	71'000	134'000	110'000	71'000	175'000
PW Heilos	Balzers/Triesen	121'000	70'000	131'000	118'000	77'000	193'000
PW Neugut	Vaduz	66'000	8'000	21'000	11'000	11'000	28'000
PW Wiesen	Schaan/Vaduz	624'000	424'000	312'000	361'000	464'000	681'000
PW Unterau	Schaan	198'000	146'000	81'000	125'000	174'000	309'000
PW Oberau	Ruggell	972'000	1'034'000	1'303'000	1'091'000	735'000	994'000
Hoval AG	Vaduz	105'000	64'000	55'000	54'000	62'000	46'000
Hilcona AG	Schaan	1'392'000	1'477'000	1'562'000	1'535'000	1'498'000	1'526'000
ARA Bendern	Bendern	96'000	103'000	100'000	108'000	124'000	111'000
Gde. Gamprin	Gamprin	78'000	90'000	79'000	63'000	64'000	59'000
Übrige		52'000	45'000	42'000	28'000	29'000	31'000
TOTAL		3'815'000	3'532'000	3'820'000	3'604'000	3'309'000	4'153'000

Die Zusammenstellung zeigt einen deutlichen Anstieg im Jahr 2017 gegenüber den Vorjahren. Dies ist zum einen mit einem gestiegenen Trinkwasserverbrauch und andererseits auf eine geringere Verfügbarkeit von Quellwasser (Sanierung von Fassungen) zurückzuführen. Bei der thermischen Nutzung des Grundwassers muss zwischen den Anlagen, welche das genutzte Wasser wieder in die Rheinschotter zurückgeben und denjenigen, bei denen ausnahmsbedingt die Rückgabe in ein Oberflächengewässer erfolgt, unterschieden werden. In Bezug auf die mengenmässige Grundwasserbilanz sind nur Letztere relevant. Im heutigen Stand der Kenntnisse wird der gesamte, mittlere Grundwasserbezug aus den Rheinschottern mit ca. 150 l/s veranschlagt, was einem Anteil von weniger als 5% des gesamten Grundwasserstroms entspricht (vgl. Abschnitt 4.2.1.7). Die Rheinschotter beherbergen daher den Grundwasserkörper mit dem weitaus grössten Nutzungspotenzial für den zukünftigen Ausbau der Wasserversorgung im Fürstentum Liechtenstein. Im heutigen Stand der Kenntnisse kann das

effektive Ausbaupotenzial für die Trink- und Brauchwassernutzung nur grob auf schätzungsweise 500 l/s mittlere Dauerleistung quantifiziert werden, ohne dass daraus relevante Defizite in der gesamten Wasserbilanz zu befürchten wären. Die kurzfristigen, maximalen Fördermengen sind um ein mehrfaches höher. Verlässlichere Einschätzungen und insbesondere solche mit Blick auf eine nachhaltige quantitative Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen müssten allerdings auf ein möglichst realitätsnahes Grundwasser-Simulationsmodell abgestützt werden.



Foto 1: Trinkwasserversorgung: Innenansicht eines Grundwasserpumpwerks mit Brunnenchacht und Armaturen (Quelle: Dr. Bernasconi AG).



Foto 2: Thermische Nutzung: Installation für den Pumpversuch beim Neuerstellen eines Brunnens für die thermische Nutzung beim geplanten Neubau der FL Telecom in Vaduz (2011).

5.2.2.2 Rheintalseitige Schuttfächer

Die heutige Nutzung der Schuttfächer am rechten Rand der Talebene ist auf einige wenige Brunnenbohrungen für die thermische Nutzung beschränkt. In der Regel handelt es sich um Anlagen mit Wärmepumpen (d.h. reiner Wärmebezug), vereinzelt sind sie mit Kühlbetrieb im Sommer (d.h. saisonaler Wärmeeintrag) kombiniert. Bei allen uns bekannten Anlagen wird das genutzte Grundwasser vor Ort wieder versickert.

5.2.2.3 Glaziale Ablagerungen am Fusse des Schellenbergs

Bei diesem, erst jüngst entdeckten Grundwasserkörper bestehen noch keine direkten Nutzungen des Grundwassers. Hingegen wurden in den vergangenen Jahren bereits einige wenige Erdwärmesondenbohrungen abgeteuft, welche eine indirekte thermische Nutzung des Wasserkörpers bewirken.

5.2.2.4 Lockergesteine im Saminatal und Malbuntal

In den Lockergesteinen dieser Berggebiete sind heute zwei grössere Quellfassungen der öffentlichen Wasserversorgung in Betrieb (vgl. Tabelle 5.2). Grundwasserfassungen über Vertikalfilterbrunnen sind keine bekannt.

Tabelle 5.2: Grössere Quellfassungen in den Lockergesteinen des Saminatales und des Malbuntales mit Angabe der Lage und der Schüttung.

Quellfassung	Mittlere Koordinaten		Durchschnittliche Schüttung
	X	Y	
Rietern	2'761'630	1'221'275	120 l/Min.
Schneeflucht	2'763'870	1'219'900	2'400 l/Min.

5.2.3 Lockergesteine im rheintalseitigen Hanggebiet

Im rheintalseitigen Hanggebiet sind zahlreiche Quellen unterschiedlichster Ergiebigkeit zu verzeichnen, welche aus lokalen Lockergesteinsablagerungen entspringen. Obschon die hydrogeologischen Verhältnisse oft nicht bis ins letzte Detail bekannt sind, und teilweise auch mit Zuflüssen aus den darunterliegenden Formationen zu rechnen ist, werden sie in diesem Abschnitt behandelt. Die ergiebigsten, genutzten Quellen gehen aus der Tabelle 5.3 hervor.



Foto 3: Quellfassungen: Innenansicht der neu erstellten Quellfassung Bleika, Triesenberg.

Tabelle 5.3: Die ergiebigsten Quellen im rheintalseitigen Hanggebiet ([50], [51] und [75]).

Quellfassung	Mittlere Koordinaten		Durchschnittliche Schüttung ca.
	X	Y	
Triesenberg:			
Balischgquad	2'759'795	1'221'660	100 l/Min.
Bim Brunna	2'759'880	1'221'450	290 l/Min.
Bleika	2'759'980	1'221'095	720 l/Min.
Teufi	2'760'360	1'219'730	240 l/Min.
Rietli	2'759'675	1'220'935	600 l/Min.
Triesen:			
Langeperta	2'759'080	1'219'850	230 l/Min.
Badtobel	2'759'620	1'217'790	980 l/Min.
Litzenen	2'759'390	1'219'950	200 l/Min.
Tiefenwald	2'759'410	1'219'720	230 l/Min.
Guggerboden	2'760'610	1'219'050	875 l/Min.
St. Mamerten	2'759'100	21'19'670	850 l/Min.
Planken:			
Am Alpweg	2'760'620	1'227'950	740 l/Min.
Schwemmitobel	2'760'715	1'227'915	200 l/Min.
Wissa Stein	2'761'000	1'227'785	250 l/Min.

6. Datenerhebung und Datenpflege

6.1 Ziel und Zweck

Die Erhebung von Daten und wissenschaftlichen Angaben rund um die Grundwasserleiter und ihre Wasservorkommen ist insbesondere für folgende Aspekte von grosser Bedeutung:

- Erweiterung der Kenntnisse über die Geometrie der einzelnen Grundwasserkörper.
- Verbesserung des Verständnisses über die Funktionsweise und die Wechselwirkung der verschiedenen Grundwasserkörper.
- Dokumentation der variablen Parameter zum quantitativen und qualitativen Zustand des Grundwassers.
- Erfassung der Bandbreiten der Variablen wie Grundwasserstände, Temperatur, chemische Beschaffenheit und deren statistischen Auswertung.
- Erkennung von allfälligen Entwicklungen.
- Massnahmenplanung für eine nachhaltige Nutzung und für die Deckung künftiger Bedürfnisse.
- Konzeption des Vollzugs Grundwasserschutz (objektbezogen und planerisch).

Die Komplexität der natürlich gewachsenen Grundwasserkörper, die Vielfalt der relevanten quantitativen Parameter und nicht zuletzt die Zahl der mit der Datenerhebung beteiligten Akteure lässt die Erschwernisse dieser Aufgaben erkennen. Ziele der Datenerhebung und der Datenpflege sind:

- Definition der Daten von überregionalem, öffentlichem Interesse.
- Koordination der Datenerhebungen zur Vermeidung von Doppelspurigkeiten.
- Zentrale Sammlung, Aktualisierung und Sicherung der Daten von überregionalem, öffentlichem Interesse.
- Aufbereitung von ausgewählten Datensätzen zur Veröffentlichung.
- Validierung und Bereitstellung der Rohdaten für den öffentlichen Zugriff.

Bei der Datenerhebung ist insbesondere die systematische Erfassung aller hydrogeologisch relevanten Sondieraufschlüsse von zentraler Bedeutung. Insbesondere sind Bohrungen mit einer Bohrtiefe von mehr als 10 m bei gleichzeitigem Anbohren eines Grundwasserleiters relevant. Einerseits können damit neue Erkenntnisse gesichert werden und andererseits wird dadurch die Kontrolle über das Schicksal dieser Bohrlöcher (Gefahrenpotenzial) sichergestellt.



Foto 4: Grundwasserüberwachung: Typische Ausführung einer Grundwasserbeobachtungsstelle für die Messung des Wasserspiegels, Probenahme usw.

6.2 Messstellennetze

Mit dem Grundwassermonitoring wird die zeitliche Entwicklung der Menge und der Güte des Grundwassers erfasst. Dabei sind insbesondere allgemeine Parameter der Grundwasserbeschaffenheit wie Mineralisation, Sauerstoffgehalt und Temperatur zu berücksichtigen wie auch einzelne, besonders kritische Indikatoren mit einzubeziehen (z.B. ausgewählte Chemikalien, Pestizide usw.).

Derzeit bestehen im Fürstentum Liechtenstein zahlreiche Messstellen bei denen in unterschiedlichen Abständen unterschiedliche Variablen des Grundwasserzustandes erhoben werden. Nachstehend werden sie aufgelistet:

- Grundwasserbeobachtungsstellen des Amtes für Umwelt entlang den Profilen 1 bis 18.
- Grundwasserbrunnen der Wasserwerke der öffentlichen Wasserversorgung.
- Grundwasserbrunnen der Industrie.
- Grundwasserbrunnen für die thermische Nutzung.
- Quellen der öffentlichen Wasserversorgung.
- Private, gefasste Quellen.
- Ungefasste Quellen.
- Gemeindeeigene Messstellen.

6.3 Gemessene Parameter und Messintervalle

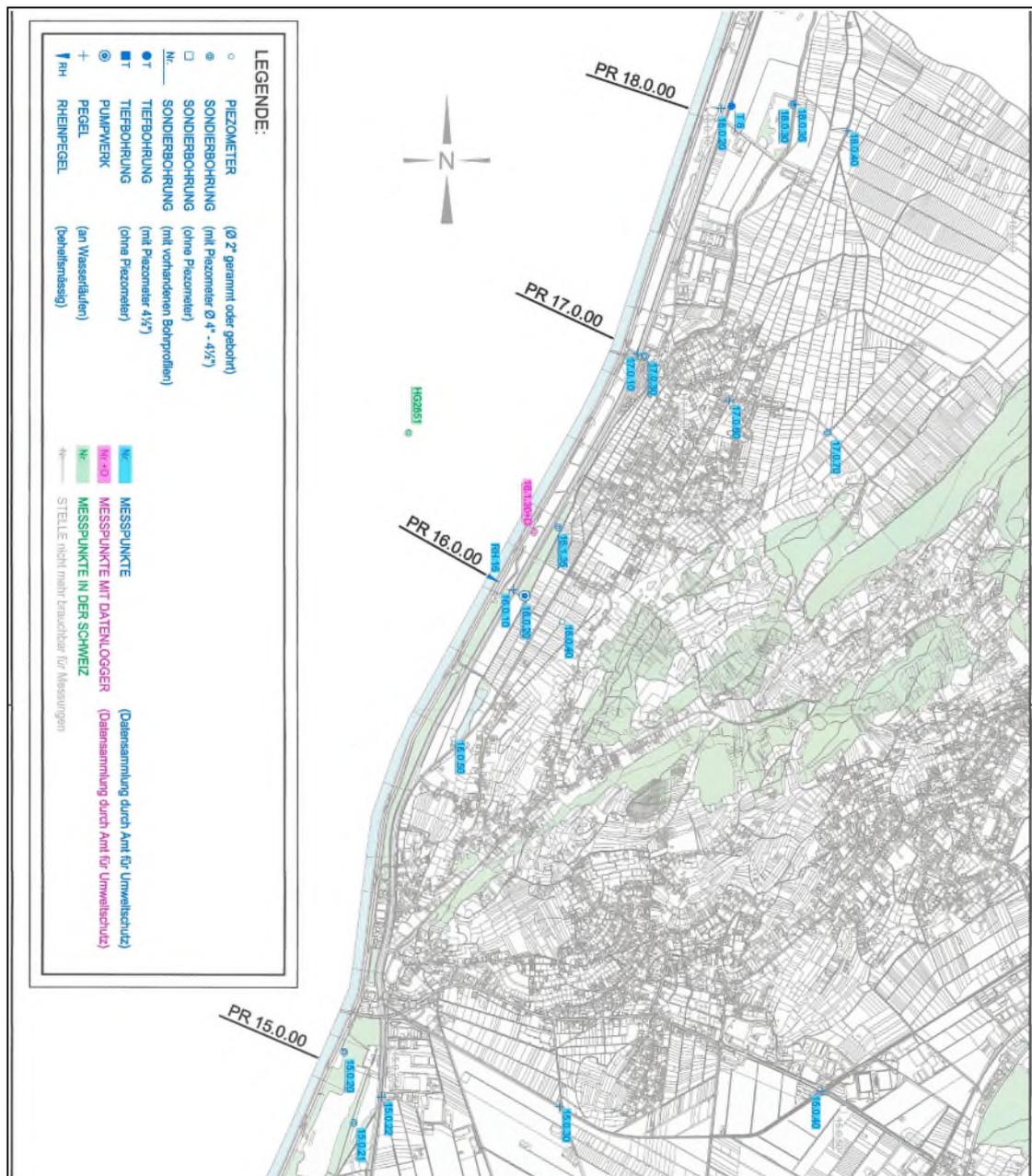


Abbildung 17: Ausschnitt aus dem Situationsplan mit den Grundwasserbeobachtungsstellen des Amtes für Umwelt FL.

Bei einem grossen Teil dieser Messstellen erfolgen systematische Messungen einzelner oder mehrerer Parameter, die in den meisten Fällen punktuell erhoben werden, z.T. aber auch kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet werden. Zu erwähnen sind:

- Kontinuierliche Messung des Grundwasserstandes, der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit in den Grundwasserbeobachtungsstellen:
 - T1, 2.0.40, T10, Balzers

- 6.012 (Triesen)
- 8.0.30 und 8.0.60 (Vaduz)
- 12.0.30, 12.0.80 und 14.0.30 (Schaan)
- 16.1.30 (Ruggell)
- Kontinuierliche Messung und Aufzeichnung des Wasserstandes z.T. mit Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit bei den Grundwasserbrunnen der öffentlichen Wasserversorgung.
- Kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Schüttung und z.T. weiterer Parameter (Temperatur, Trübung usw.) bei einzelnen grossen Quellen der öffentlichen Wasserversorgung.
- Kontinuierliche Messung des Wasserspiegels und der Wassertemperatur bei den grösseren Anlagen der thermischen Grundwassernutzung.
- Periodische Messungen des Grundwasserspiegels bei allen Messstellen des Amtes für Umwelt (vgl. Abb. 17, Wenaweser & Partner, [58]).
- Periodische Messungen der Quellschüttung und z.T. weiterer Parameter bei zahlreichen öffentlichen und privaten Quellen.
- Periodische Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit bei allen Grundwasser- und Quelfassungen der öffentlichen Wasserversorgung.
- Punktuelle Untersuchungen der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit der Überwachung von Deponien und Altablagerungsstandorten.



Foto 5: *Grundwasserüberwachung: Grundwasserbeobachtungsstelle mit eingebauter, automatischer Sonde für die kontinuierliche Aufzeichnung von Wasserstand, Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit.*

6.4 Auswertung / Nachführung

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgt derzeit unterschiedlich und z.T. objektbezogen. Systematisch ausgewertet und nachgeführt werden nur die vom Amt für Umwelt erhobenen Daten aus dem eigenen Messstellennetz sowie die Daten der Wasserbeschaffenheit der öffentlichen Grundwasserbrunnen. Weiter werden von Fall zu Fall Daten aus spezifischen Grundwassererhebungen z.B. bei Altablagerungen, bei grossen Bauvorhaben (Grundwasserabsenkungen) oder grösseren thermischen Nutzungen in objektbezogenen Berichten ausgewertet.



Foto 6: *Grundwasserüberwachung: Installation im Quellschacht zur automatischen Erfassung der Schüttung, der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit (Quelle Rietli, 2001).*



Foto 7: *Grundwasserüberwachung: Probenahme aus Grundwasserbeobachtungsstelle anhand einer mobilen Pumpe zur Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit (ehemalige Deponie Rheinau, Vaduz, 2009).*

7. Gefährdungen und Beeinträchtigungen

7.1 Art der möglichen Gefährdungen und Beeinträchtigungen

Das Grundwasser ist ein unverzichtbares Schutzgut, das sowohl in seiner verfügbaren Menge (quantitativ) wie auch in seiner Güte (qualitativ) gefährdet oder beeinträchtigt werden kann. Die Gefahrenmomente umfassen einerseits Eingriffe im eigentlichen Schutzgut wie z.B. die übermässige Grundwassernutzung oder das Einbringen von Verunreinigungen. Andererseits können Eingriffe, welche den Grundwasserleiter physisch beeinträchtigen, durch Minderung der Durchflusskapazität (Transmissivität) oder der Grundwassererneuerung, z.B. durch Veränderung der Infiltrations- und/oder der Vorfluterverhältnisse, ebenfalls nachteilige Folgen für das Grundwasserdargebot und die Wassergüte haben. Nachstehend werden die gängigsten und relevantesten potenziellen Gefährdungen und Beeinträchtigungen aufgeführt:

A. Menge

- Übernutzung, dauerhafte Entnahme von Grundwasser über dem natürlichen Erneuerungspotenzial gemäss Wasserbilanz.
- Eingriffe im Untergrund, die zu unkontrollierten Ausflüssen (Drainage) oder zu Verbindungen von Grundwasserkörper mit unterschiedlichem Potenzial (Kurzschlüsse) führen, Beispiele sind Tiefenbohrungen und/oder unterirdische Bauten wie Stollen und Tunnel.
- Eingriffe im Untergrund, welche die Porosität und/oder das Durchflussvermögen des Grundwasserleiters in relevantem Masse mindern.
- Nachteilige Veränderungen der natürlichen Randbedingungen der Wasserbilanz. Als relevante Grössen gelten insbesondere die randlichen Zu- und Abflüsse sowie eine allfällige Minderung der Speisung über die Meteorwasserinfiltration oder die Infiltration von Oberflächengewässern.

B. Güte

- Bakteriologische Verunreinigungen durch punktuelle/unfallbedingte Einträge (z.B. Leck in Kanalisation) oder diffuse Einträge durch übermässige/unsachgemässe Düngung.
- Akute, lokale, chemische Verunreinigung durch Öl- oder Chemieunfälle.
- Schleichende, chemische Verunreinigung durch die Versickerung von salzhaltigem Wasser (Winterdienst), durch die Auswaschung von überschüssigem Düngemittel und von persistenten Pflanzenschutzmitteln, Herbiziden usw.
- Einträge durch chemisch belastetes Sickerwasser aus belasteten Standorten.
- Diffuse und punktuelle Einträge von Wärme (z.B. über Untergeschosse von beheizten Bauten und Versickerung von erwärmtem Grundwasser aus thermischen Nutzungen).

7.2 Grundwasservorkommen im Fels

Grundwasservorkommen im Fels weisen in der Regel eine erhöhte Vulnerabilität auf, sowohl in quantitativer wie auch in qualitativer Hinsicht. Die quantitative Gefährdung ergibt sich grundsätzlich aus dem verhältnismässig geringen Speicherkoeffizient bzw. aus der bescheiden nutzbaren Porosität von Kluft- und Karst-Aquiferen: Eine bestimmte Entnahme von Grundwasser bewirkt in einem Fels-Grundwasserleiter eine deutlich grössere Absenkung des Grundwasserspiegels als diese in einem gleich grossen Lockergesteinsaquifer erzeugen würde. Die Hauptrisiken für quantitative Beeinträchtigungen des Grundwasserhaushaltes im Fels gehen von Eingriffen des Spezialtiefbaus aus, wie Tunnelbau und sonstige unterirdische Bauten (Kavernen, Stollen usw.), Tiefenbohrungen, weiter aus der Verringerung der Infiltration von Oberflächengewässern, z.B. durch Kraftwerkprojekte oder übermässige Nutzung (z.B. aus Pumpbrunnen im Fels).

Die qualitative Gefährdung wird durch den Umstand verschärft, dass Felsformationen oft direkt an der Oberfläche anstehend sind. In den meisten Fällen ist keine geschlossene natürliche, schlecht durchlässige Deckschicht vorhanden; allfällige Verunreinigungen können deshalb rasch ins Felsgrundwasser gelangen.

Weiter ungünstig sind die relativ grossen Fliessgeschwindigkeiten entlang von bevorzugten Fliesswegen wie offenen Klüften und Karstkanälen mit entsprechend geringem Selbstreinigungsvermögen. Dank der Tatsache, dass der grosse Teil der Fels-Grundwasserkörper im Berggebiet liegt, wo das Gefährdungspotenzial aufgrund der nur extensiven Nutzung entsprechend gering ist, kann das Risiko für massive Beeinträchtigungen als begrenzt eingestuft werden.

7.3 Grundwasservorkommen in den Lockergesteinen

7.3.1 Talschotter Rheintal (Rheinschotter)

7.3.1.1 Menge

Die grösste Gefährdung des Grundwasserhaushaltes innerhalb der Rheinschotter liegt bei Veränderungen, die zu Verringerungen der natürlichen Grundwasserspeisung führen könnten. Dem Speisungsanteil entsprechend, sind negative Veränderungen der Rheinfiltration und der seitlichen Zuflüsse als die grössten Gefahrenmomente zu bezeichnen. Konkrete Gefährdungen bedeuten insbesondere:

- Sämtliche Eingriffe und Veränderungen am Rheinlauf, welche zu einer Abnahme der Infiltrationsrate (Leakage) führen. Dazu gehören Absenkungen der Rheinsohle oder Eingriffe welche zur Verringerung der Durchlässigkeit des Untergrundes führen wie z.B. Injektionen, Rüttelverdichtungen oder Schlitzwände zur Ertüchtigung der Rheindämme oder solche, die eine dauerhafte Zunahme der Kolmation der Flusssohle verursachen (z.B. Staubecken).

- Bauliche Eingriffe unter dem mittleren Wasserspiegel, welche zu einer dauerhaften Abnahme des Durchflussvermögens führen, wie Untergeschosse, Pfählungen, Rüttelverdichtungen, Injektionen usw.
- Übermässige Grundwasserentnahme innerhalb der Liechtensteiner Talebene oder im Zuströmbereich entlang der linksufrigen Grenze.

7.3.1.2 Güte

Bedingt durch seine Lage in der Talebene, wo sich der grösste Teil der Siedlungen, der Industrien und der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung mit allen damit verbundenen Aktivitäten ansammeln, steht dieser Grundwasserkörper unter einem relativ grossen und mannigfaltigen Gefährdungspotenzial.

Die natürlich gewachsenen Deckschichten, bestehend aus der feinkörnigen Kolmatierungsschicht und der darüberliegenden Humusschicht, bescheren dem Talgrundwasser zwar grossflächig einen gewissen natürlichen Schutz, dieser ist jedoch nicht überall gegeben und nicht allen möglichen Verunreinigungsquellen gewachsen.

Nachstehend werden die wichtigsten Gefahren aufgeführt, die direkt oder indirekt zu relevanten Beeinträchtigungen der Grundwasserbeschaffenheit im Grundwasser der Talebene führen können:

- Verringerung der Grundwassererneuerung infolge verminderter Rhein-Infiltration: Das Rheinwasserinfiltrat ist von einer geringen Gesamthärte und einer hohen Sauerstoffsättigung gekennzeichnet. Es beschert dem Grundwasser in den Rheinschottern der Talebene, gerade in den von der Rheininfiltration geprägten Bereichen, eine hervorragende Trinkwasserqualität (vgl. Kapitel 4.3.1.8). Die Verringerung der Rheininfiltration hätte zur Folge, dass die Bereiche mit optimalen Trinkwassereigenschaften schrumpfen würden. Tendenziell müsste mit einer Zunahme der Grundwasserhärte und einer Abnahme der Sauerstoffsättigung bei den meisten Grundwasser-Pumpwerken gerechnet werden. Parallel dazu würden die Bereiche mit reduzierenden Merkmalen (Präsenz von Ammonium, Nitrit, gelöstes Eisen und Mangan) gegenüber heute zunehmen.
- Zerstörung der schützenden Deckschichten: Die Beseitigung und/oder die dauerhafte Zerstörung der natürlich gewachsenen Deckschichten durch Eingriffe des Tiefbaus inklusive Bohrungen, schwächt den natürlichen Schutz gegen das Eindringen von Schadstoffen ins darunterliegende Grundwasser.
- Grossflächige Einträge von Schadstoffen: Der Eintrag von löslichen, wassergefährdenden Stoffen z.B. durch die Belastung des Niederschlags mit Luft-Schadstoffen und über die Auswaschung solcher aus dem Boden oder aus befestigten Flächen (Meteorwasser-Versickerung) führen zu einer zunehmenden Beeinträchtigung der Grundwasserqualität. Obschon der heutige Zustand nicht besorgniserregend ist, zeigen einzelne Leitparameter, wie z.B. Nitrat (grösstenteils aus der Düngung) und Chlorid (Verwendung von Tausalz) eine langsame aber stetige Zunahme (vgl. Abb 18). Weitere problematische Stoffe aus der Luft und insbesondere aus Dachflächen, Strassen und der intensiven

landwirtschaftlichen Nutzung wie Herbizide und Pflanzenschutzmittel liegen im tiefen Spurenbereich, beherbergen jedoch zweifelsohne mittel- bis langfristig ein erhöhtes Gefährdungspotenzial.

- Punktuelle Einträge von wassergefährdenden Stoffen: Unter diesem Begriff sind Schadstoffeinträge, die sich z.B. aus Öl- oder Chemieunfällen, aus Lecks von Kanalisationen oder auf belasteten Standorten ergeben. Dieser Art von Gefährdungen ist gemeinsam, dass sie meistens von einem hohen Schadstoffpotenzial verursacht sind und dass sie örtlich begrenzt erfolgen. Aufgrund ihres unfallbedingten Eintretens sind sie aufsehenerregend, werden in ihrer Tragweite in der öffentlichen Wahrnehmung aber manchmal auch überbewertet. In der Regel können Sanierungsmassnahmen getroffen werden und nur in den seltensten Fällen (z.B. katastrophale Unfälle, verspätetes Eingreifen) gelangen grosse Schadstoffmengen tatsächlich bis ins Grundwasser.

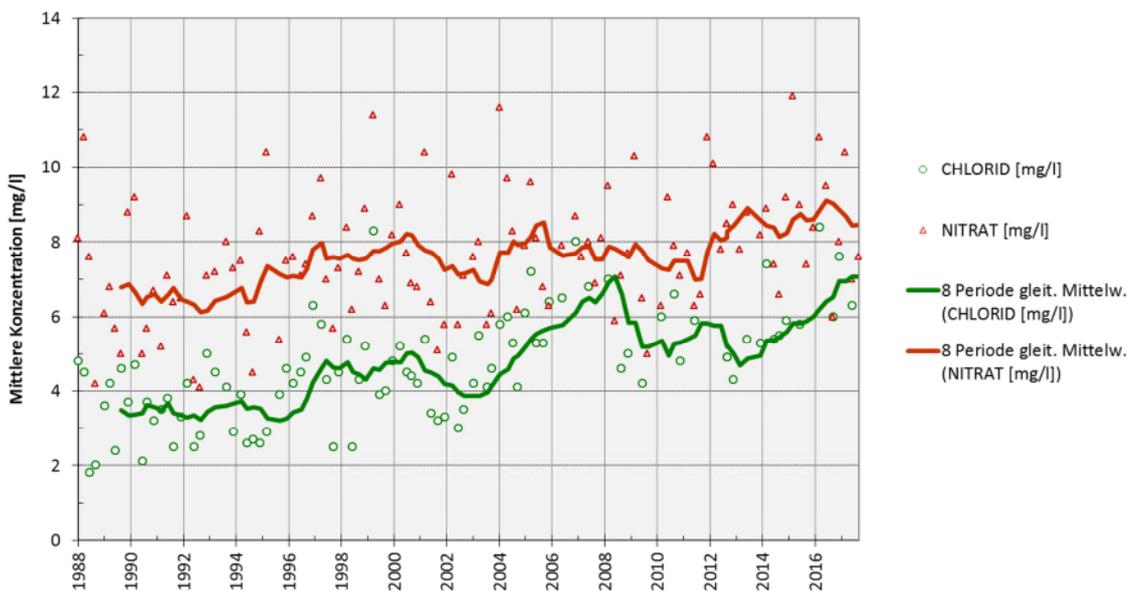


Abbildung 18: Trends in der Grundwasserbeschaffenheit: Ganглиnen der mittleren Konzentration von Chlorid und Nitrat im Grundwasser der Rheinebene am Beispiel des Pumpwerks Rheinau, Balzers (aus [14]).

7.3.2 Rheintalseitige Schuttfächer

Die rheintalseitigen Schuttfächer sind in quantitativer Hinsicht als eher wenig gefährdet einzustufen. Obschon die jeweiligen Wasserbilanzen weitgehend unbekannt sind, darf im heutigen Zustand von einem erheblichen Überschuss ausgegangen werden, welcher unterirdisch dem Talgrundwasser zufließt (vgl. Kap. 4.3.1.7). Die heutigen Nutzungen sind sehr bescheiden und oft rein thermisch, d.h. mit Rückgabe des genutzten Wassers. Als potenzielle Beeinträchtigungen des Grundwasserhaushalts sind hauptsächlich Verbauungen an den Rufen Gerinnen zu sehen, welche die heutigen namhaften Infiltrationsmengen reduzieren könnten.

Die Vulnerabilität gegenüber qualitativer Beeinträchtigung ist hingegen mässig bis hoch, zumal der natürliche Schutz eher bescheiden ist (Fehlen von wenig durchlässigen Deckschicht-

ten). In den oberen Lagen der Schuttfächer ist zwar der Flurabstand z.T. sehr gross, so dass potenzielle Verunreinigungen in ihrem Sickerweg durch die ungesättigte Zone teilweise abgebaut oder zurückgehalten werden können. In den tieferen Lagen, wo die potenziellen Gefahren aufgrund der teilweise dichten Besiedlung ähnlich gross sind wie in der Talebene, ist der Flurabstand deutlich geringer und der Schutzeffekt entfällt weitgehend.

7.3.3 Glaziale Ablagerungen am Fuss des Schellenbergs

Über diesen Grundwasserkörper ist bisher wenig bekannt, so dass auch eine Einschätzung deren Gefährdung nur aus theoretischer Hinsicht erfolgen kann.

Es ist grundsätzlich von einem gut abgeschotteten Wasservorkommen auszugehen, das mit grösster Wahrscheinlichkeit von einer relativ bescheidenen Grundwassererneuerung gekennzeichnet ist. Demzufolge dürfte die quantitative Gefährdung im Vordergrund stehen. Als Risiken gelten insbesondere Eingriffe des Tiefbaus bei denen Kurzschlüsse zu anderen Grundwasserkörpern geschaffen würden, so dass ein unkontrollierter Abfluss entstehen könnte. Weiter ist das Risiko für Übernutzungen als relativ hoch zu erachten.

Die grosse Überdeckung mit grundwasserstauenden Schichten schützt möglicherweise dieses Wasservorkommen optimal gegen anthropogene Verunreinigungen; daraus ergibt sich ein nur geringes Risiko für Beeinträchtigungen der chemisch-bakteriologischen Wasserqualität. Risiken gehen bisher ausschliesslich von der thermischen Nutzung aus (vgl. Kap. 5.3.3.); bei Erdwärmesondenbohrungen sind insbesondere bohrtechnische Risiken wie mangelhafte Abdichtung, Schaffung von unkontrollierten Wasserwegigkeiten usw. zu nennen (vgl. [29]).

7.3.4 Lockergesteine im Saminatal und Malbuntal

Im heutigen Zustand sind diese Wasservorkommen kaum beeinträchtigt; ein gewisses Gefahrenpotenzial ist jedoch durch die Siedlung, die Strasse (Verkehr) und die Freizeitaktivitäten (insbesondere Wintersportanlagen) gegeben. Die Risiken für quantitative Beeinträchtigungen lassen sich nur generell abhandeln, zumal die Randbedingungen der Wasserbilanz und insbesondere die verschiedenen Anteile der Speisung weitestgehend unbekannt sind. Veränderungen an den Bachläufen des Malbunbachs, des Valünabachs oder des Stegerbachs, welche relevante Veränderungen des Grundwasserspiegels und/oder der Infiltrations-/Exfiltrationsverhältnisse mit sich bringen können, sind mit erhöhtem Risiko behaftet. Beeinträchtigungen könnten sich insbesondere bei Absenkungen der Bachsohle, Verbauungen, Staubecken und namhafte Verringerungen der Wasserführung ergeben.

Die Wasservorkommen im Saminatal weisen einen geringen natürlichen Schutz gegen das Eindringen von wassergefährdenden Stoffen auf, weil die dortigen Deckschichten relativ gut durchlässig sind oder teilweise gar fehlen. Dank der dünnen Besiedelung und der extensiven Nutzung der Einzugsgebiete ist jedoch das Expositionsrisiko gesamthaft gesehen eher gering; punktuell können aber vom Strassenverkehr (z.B. Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen) oder von den Wintersportanlagen signifikante Beeinträchtigungsrisiken für die genutzten Vorkommen ausgehen.

8. Schutzmassnahmen

8.1 Planerischer Grundwasserschutz

Der planerische Schutz des Grundwassers bezweckt die langfristige Sicherstellung von Grundwasserressourcen für die heutige und für die zukünftige Wasserversorgung. Dieser Schutz wird sichergestellt durch die Bezeichnung der besonders gefährdeten Bereiche, sowie durch die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen (bestehende Fassungen) und der Grundwasserschutzareale (Flächen für künftige Trinkwasserfassungen). Diese Flächen werden auf der so genannten Gewässerschutzkarte dargestellt, es gelten abgestufte Schutzmassnahmen und Nutzungseinschränkungen.

Die gesetzliche Grundlage bildet das Gewässerschutzgesetz (GSchG) vom 15. Mai 2003, LR 814.20 [4]. Die Erarbeitung der Grundlagen des planerischen Grundwasserschutzes sind im Fürstentum Liechtenstein weitestgehend abgeschlossen (vgl. nachstehende Kapitel). Die Methodik und die Kriterien für die Erarbeitung der Grundlagen lehnen sich an die in den benachbarten Schweizer Kantonen angewendeten Praxis an bzw. stützen sich auf die Vorgaben der „Wegleitung Grundwasserschutz“ [1] und „Grundwasserschutzzonen bei Lockergesteinen“[2].

8.1.1 Die Gewässerschutzbereiche

Die Gewässerschutzbereiche wurden 2005 erarbeitet und sind in der Gewässerschutzkarte des Fürstentums Liechtenstein dargestellt¹ [28]. Im Fall des Fürstentums Liechtenstein beschränkt sich die Ausscheidung von Gewässerschutzbereichen auf die unterirdischen Gewässer (Gewässerschutzbereich A_u). Auf die Bezeichnung von Gewässerschutzbereichen für Oberflächengewässer (Gewässerschutzbereich A_o) wurde verzichtet. Auf der Karte sind lediglich die Abschnitte der Oberflächengewässer gekennzeichnet, entlang jener eine Infiltration von den Gewässern ins Grundwasser stattfinden kann (vgl. Abb. 20).

Der Gewässerschutzbereich A_u bezeichnet jene Gebiete, wo im Untergrund genutzte oder von ihrer Menge und Güte her für die Trinkwassernutzung potenziell geeignete Grundwasservorkommen vorhanden sind.

Um einen effektiven Schutz der Grundwasservorkommen zu ermöglichen, werden auch deren Randbereiche, aus denen Grundwasser zufliesst, dem Gewässerschutzbereich A_u zugeteilt. Im Fall von Lockergesteinsgrundwasserträgern werden seitlich jene Gebiete dem Bereich A_u zugeschlagen, die unterirdisch direkt in den Grundwasserträger entwässern. Bei Quellvorkommen umschliesst der Gewässerschutzbereich A_u das gesamte mutmassliche Quelleinzugsgebiet. Abstromseitig sowie seitlich von nutzbaren Grundwasservorkommen wird eine Pufferzone ebenfalls dem A_u -Bereich zugeteilt. Die Flächen, welche nicht dem Gewässerschutzbereich A_u zugeschlagen werden, werden als „übrige Bereiche“ (üB) bezeichnet. Die angewendete Systematik ist im Entscheidungsdiagramm in Abb. 19 dargelegt.

¹ Die Gewässerschutzbereiche können über das Geodatenportal der Liechtensteinischen Landesverwaltung abgerufen werden (<https://geodaten.llv.li/>)

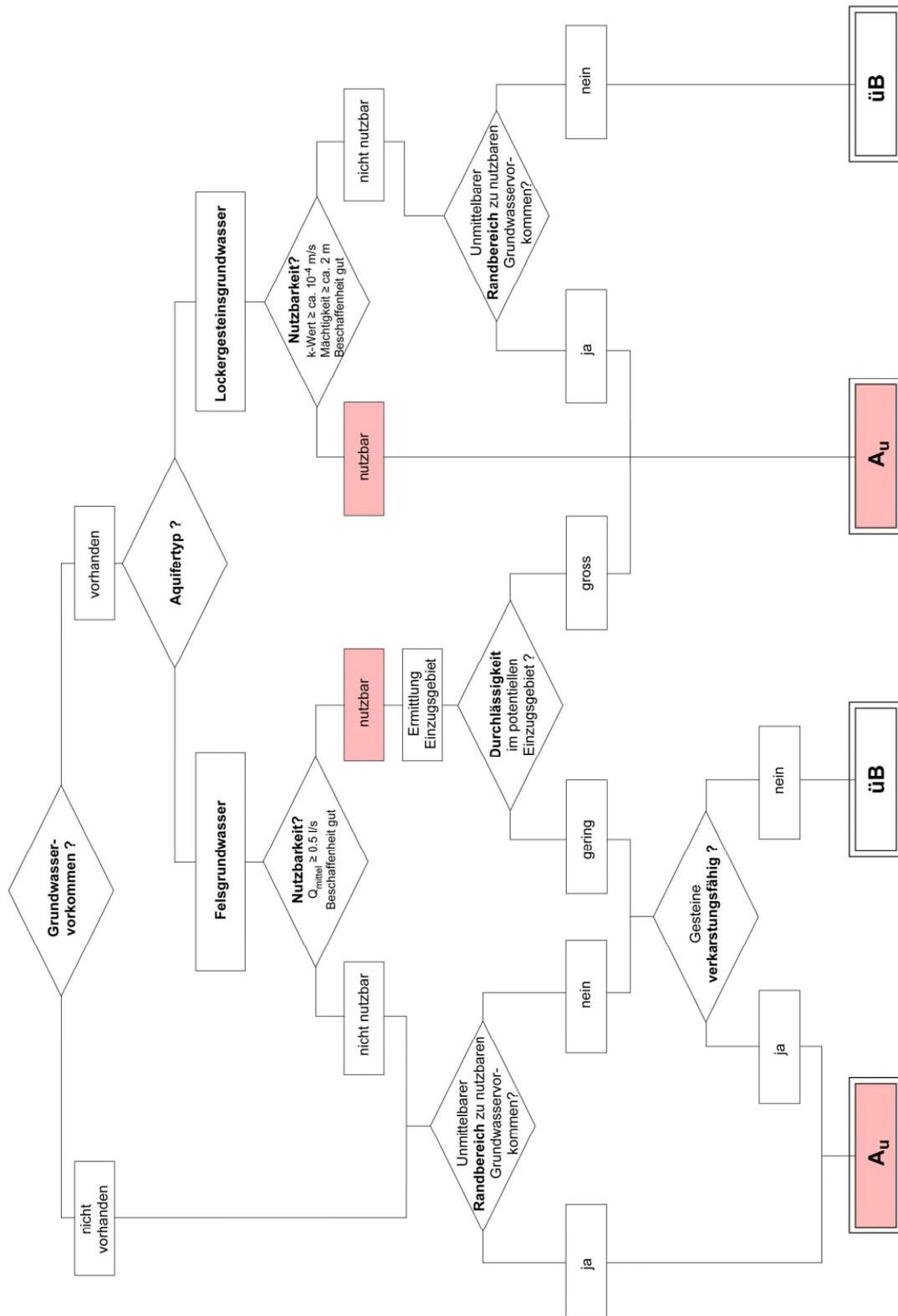


Abbildung 19: Entscheidungsdiagramm zur Ausscheidung des Gewässerschutzbereiches A_u (aus [28]).

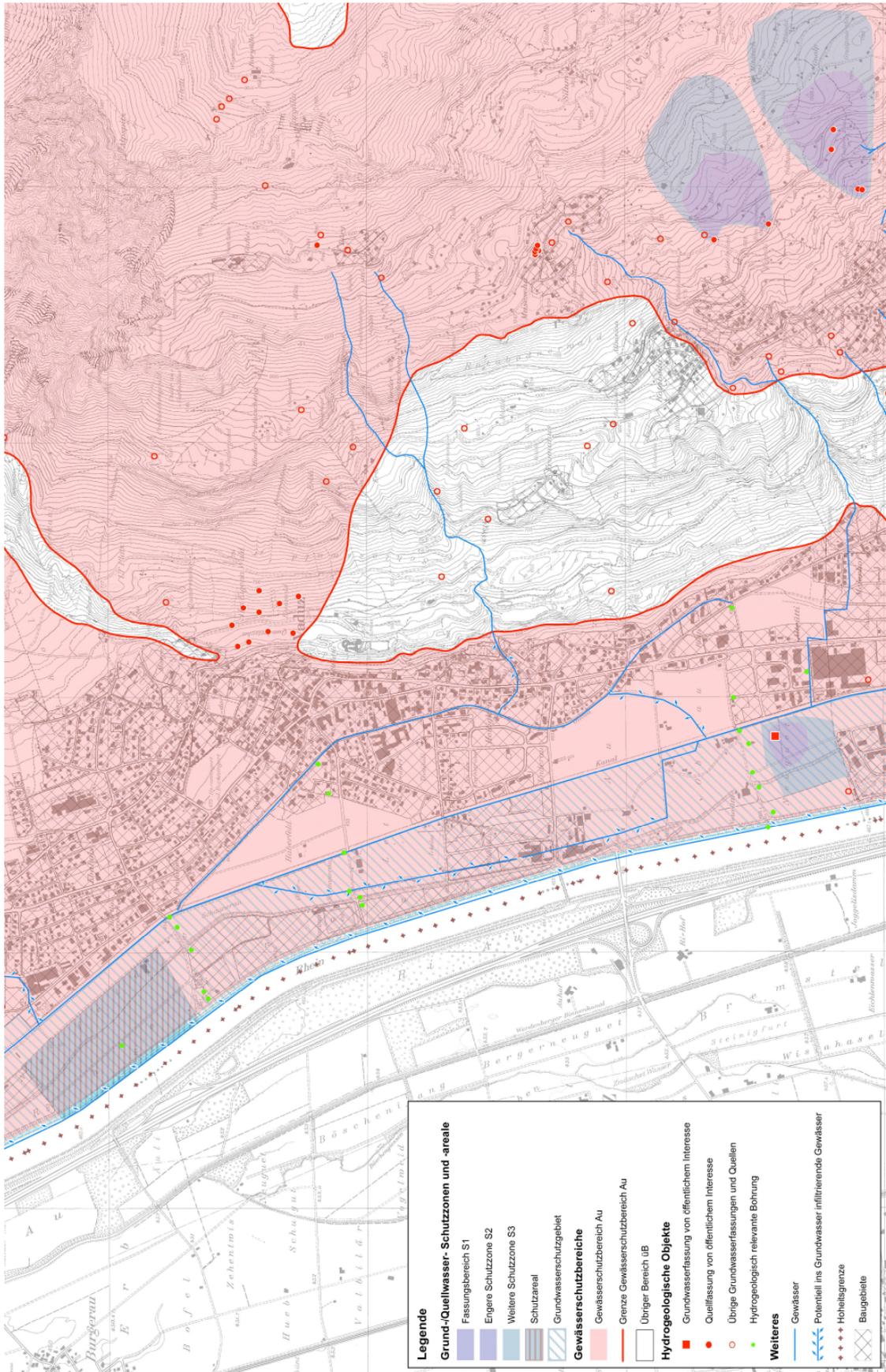


Abbildung 20: Ausschnitt im Bereich Vaduz aus der Gewässerschutzkarte des Fürstentums Liechtenstein (aus [28]).

8.1.2 Die Grundwasserschutzgebiete

Die Grundwasserschutzgebiete, auch „Wasserschutzgebiete“ genannt, sind in der Verordnung zum Schutze des Grundwassers vom 20. September 1988 [9] festgehalten. Sie umfassen das Gebiet entlang dem Rhein vom Ellhorn in Balzers bis zum Pumpwerk Unterau in Schaan sowie den Streifen zwischen Rhein und Landstrasse nördlich von Gamprin bis und mit Pumpwerk Oberau bei Ruggell. Die Wasserschutzgebiete umfassen die Flächen der Talebene entlang des Rheins, wo nachweislich der Grundwasserkörper nach Menge und Güte die besten Voraussetzungen für die Trinkwasserversorgung aufweist. Alle derzeit von der öffentlichen Wasserversorgung genutzten Grundwasserfassungen liegen innerhalb dieser Gebiete. Mit der Ausscheidung dieser Gebiete, welche zwei Jahrzehnte vor der Erstellung der Gewässerschutzkarte erfolgte, wurde frühzeitig der konkrete Schutz der besten Trinkwasserressourcen im Fürstentum Liechtenstein bezweckt. Innerhalb dieser Flächen sind „alle Vorkehrungen die der Menge und Güte der Grundwasservorkommen nachteilig sind oder die öffentliche Wasserversorgung gefährden können, verboten“ (vgl. [9]). Konkret dürfen innerhalb der Wasserschutzgebiete insbesondere keine Eingriffe und keine Bauten und Anlagen mit hohem Gefährdungspotenzial für das Grundwasser vorgenommen oder erstellt werden. Dies gilt insbesondere für Bauten und Anlagen mit Abwasseranfall und Anlagen mit flüssigen Kohlenwasserstoffen. Weiter dürfen generell keine Grabungen oder Sondierungen aller Art erstellt werden, die tiefer als 2 m unter das natürliche Terrain reichen. Der planerische Schutz wird mit dem grundsätzlichen Verbot, Bauzonen zu erweitern oder neue auszuscheiden, ergänzt.

8.1.3 Die Grundwasserschutzzonen

Die rechtliche Grundlage zur Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bilden Art. 24 und Art. 67 des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) vom 15. Mai 2003 [4].

Der Grundsatz, die Definitionen und Zielsetzungen sowie die fachlichen Anforderungen bei der Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen sind in der Wegleitung Grundwasserschutz [1] festgehalten. Nachstehend werden sie zusammenfassend dargelegt.

Grundwasserschutzzonen dienen dazu, Trinkwassergewinnungsanlagen und das Grundwasser unmittelbar vor seiner Nutzung als Trinkwasser vor Beeinträchtigungen zu schützen. Sie sind um die im öffentlichen Interesse liegenden Grundwasserfassungen auszuscheiden, d.h. um alle Fassungen, deren Wasser den Anforderungen der Lebensmittelgesetzgebung entsprechen muss, sowie um Grundwasser-Anreicherungsanlagen. Die Grundwasserschutzzonen sind das wichtigste Instrument des nutzungsorientierten planerischen Grundwasserschutzes [1].

Die Schutzzonen werden in folgende Teilzonen unterteilt:

- **Zone S1** Fassungsbereich
- **Zone S2** Engere Schutzzone
- **Zone S3** Weitere Schutzzone

Die Beschränkungen für bestimmte Nutzungsarten und Schutzmassnahmen für das Wasser nehmen in der Reihenfolge Zone S1, Zone S2, Zone S3 ab. Im Einzelfall kommt den Zonen S1, S2 und S3 einer Grundwasserschutzzone folgende Bedeutung zu:

Zone S1

Die Zone S1 soll gewährleisten, dass keinerlei Verunreinigungen in die Fassungsanlagen und deren unmittelbaren Umgebung gelangen oder diese durch Eingriffe beschädigt oder zerstört werden. In der Zone S1 besteht ein generelles Nutzungsverbot; alle Tätigkeiten, welche nicht der Wasserversorgung dienen, sind verboten.

Im Allgemeinen umfasst die Zone S1 einen Bereich von minimal 10 m um alle Elemente der Trinkwasserfassungsanlage. Bei Quelfassungen umfasst diese den Fassungsstrang mit Filterrohren mit evtl. Einbezug der Brunnenstube. Der Grenzabstand kann talseitig weniger als 10 m betragen; im bergseitigen Zuflussbereich kann dieser zum Schutz vor Einschwemmungen, bei Bedarf grösser sein.

Zone S2

Die Zone S2 soll gewährleisten, dass:

- keine Keime oder Viren in die Grundwasserfassung gelangen;
- das Grundwasser durch Grabungen und unterirdische Arbeiten nicht verunreinigt oder die natürliche Filterwirkung des Untergrundes nicht verringert wird;
- keine Schadstoffe rasch und in hoher Konzentration in die Fassung gelangen können;
- der Grundwasserfluss durch unterirdische Anlagen nicht behindert wird.

Zone S3

Die Zone S3 hat die Funktion einer Pufferzone zwischen der Zone S2 und dem umliegenden Gewässerschutzbereich A_u. In dieser Zone sind folgende Punkte massgebend:

- die Zone S3 soll ermöglichen, dass bei akuter Gefahr für die erforderlichen Interventions- oder Sanierungsmassnahmen genügend Zeit und Raum zur Verfügung steht;
- der Sickerweg von einer potenziellen Verunreinigung bis zur Fassung muss stets so gross sein, dass die Herabsetzung der Konzentration unerwünschter Stoffe durch Abbau oder Verdünnung auf ein unbedenkliches Mass mit grösster Sicherheit gewährleistet ist;
- durch Mengenbeschränkung ist dafür zu sorgen, dass mögliche Verunreinigungen nicht ein Ausmass annehmen können, welches ein beherrschen durch Sanierungsmassnahmen nicht mehr zulässt.

Tabelle 8.3: Ausweisung der Schutzzonen im FL (Stand Februar 2018, Quelle: Amt für Umwelt FL).

Schutzzone/Objekt	LGBl.-Nr.	Stand der Bearbeitung / Bemerkungen
Grundwasserpumpwerke (GWP)		
GWP Rheinau, Balzers	1996/049	
GWP Helios, Balzers/Triesen	1996/048	
Notbrunnen Swarovski, Triesen		Schutzzone mit beschränkter Wirkung geplant
GWP Neugut, Vaduz	2011/071	
GWP Wiesen, Schaan	2000/228	
GWP Unterau, Schaan	2000/227	
GWP Oberau, Ruggell	2014/188	Übergangsbestimmung wurde angepasst (LGBl.2015/69)
Quellfassungen		
Quellfassungen Wiesle, Balzers	(1.9.2009)	Schutzzonenreglement nach schweizerischem Recht
Quellfassungen Köpf, Balzers	2008/291	
Quellfassungen Badtobel, Triesen	2000/201	
Quellfassungen Litzenen, Triesen	2011/173	
Quellfassungen Balischguad und Bim Brunna, Triesenberg	2012/367	
Quellfassungen Bergwald, Triesenberg	2011/26	
Quellfassungen Bleika, Triesenberg	2011/124	
Quellfassungen Rietern, Steg	2011/072	
Quellfassungen Schneeflucht, Malbun	1994/3	
Quellfassungen Wisseler, Efiplanken, Tännlegarta und Rudabach, Schaan	2011/231	
Quellfassungen Am Alpweg, Wissa Stä, Egg und Sattel, Planken	1998/060	
Quellfassungen Maurerberg, Eschen/Gamprin	2000/053	
Quellfassungen Wasserchopf, Malbun	2012/120	

Im Sommer 2018 sind alle Grundwasserschutzzonen für die Fassung der öffentlichen Trinkwasserversorgung grösstenteils rechtskräftig ausgeschieden. Lediglich die Verordnung zum Notbrunnen Swarovski ist noch in Bearbeitung (vgl. Tabelle 8.3).

8.1.4 Die Grundwasserschutzareale

Grundwasserschutzareale sind speziell ausgeschiedene Gebiete, in welchen der Schutz des unterirdischen Gewässers im Hinblick auf eine künftige Grundwasserbewirtschaftung (Nutzung oder Anreicherung) vorsorglich sichergestellt werden soll. In diesen Arealen dürfen keine Bauten und Anlagen erstellt werden, welche die künftige Bewirtschaftung beeinträchtigen können (vgl. [1]).

Die Grundwasserschutzareale werden so bemessen, dass im Bedarfsfall eine zukünftige Grundwasserfassung oder –anreicherungsanlage zweckmässig platziert und die Grundwasserschutzzonen ordnungsgemäss ausgeschieden werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass am voraussichtlichen Fassungsstandort unterschiedliche Fassungsstypen in Frage kommen können, wie z.B. Vertikalfilterbrunnen, Horizontalfilterbrunnen oder Brunnenreihen, und dass diese je nach konzessionierter Entnahmemenge unterschiedlich grosse Schutz-zonen benötigen.

Die Ausscheidung von Grundwasserschutzarealen setzt also voraus, dass die hydrogeologischen Verhältnisse bekannt sind, und dass die Rahmenbedingungen für eine spätere konkrete Standortplanung für Trinkwasseranlagen günstig sind. Die erforderlichen hydrogeologischen Abklärungen müssen vor Ausscheidung des Grundwasserschutzareals getroffen werden. Es gelten sinngemäss die Bemessungskriterien für die Dimensionierung von Grundwasserschutz-zonen.

Derzeit sind im Fürstentum Liechtenstein 5 Grundwasserschutzareale mit der entsprechenden Verordnung rechtskräftig ausgeschieden (vgl. Tabelle 8.4).

Tabelle 8.4: *Planerischer Grundwasserschutz: Die Grundwasserschutzareale im Fürstentum Liechtenstein.*

Name	Gemeinde	LGBl.-Nr.
Äule-Neugüter	Balzers	2016/186
Rheinau	Balzers	1996/049
Im Damm	Triesen	2008/081
Neufeld	Vaduz	2011/070
Wiesen	Schaan	2000/228

8.2 Objektbezogene und nutzungsorientierte Grundwasserschutzmassnahmen

8.2.1 Einleitung

Abgeleitet vom planerischen Grundwasserschutz, namentlich von der Gewässerschutzkarte, werden insbesondere im Gewässerschutzbereich A₀ zahlreiche Schutzmassnahmen über den behördlichen Vollzug durchgesetzt. Die Leitlinien sind in den entsprechenden Wegleitungen [1] und Vollzugshilfe [3] vorgegeben. Nachstehend werden die wichtigsten Themenkreise mit den dazugehörigen Schutzmassnahmen aufgelistet. Im Bestreben, die Erschliessung und Nutzung von erneuerbaren Energiequellen zu fördern, erarbeitete das Amt für Umwelt u.a. neue Vollzugsinstrumente für die Bewilligung von thermischen Nutzungen, welche dem Schutz und der langfristigen Erhaltung des Grundwassers und der Trinkwasserreserven gebührend Rechnung tragen.

Das Amt für Umwelt ist die Vollzugsbehörde für alle nachstehend aufgeführten Grundwasserschutzmassnahmen.

8.2.2 Allgemeine Tätigkeiten und Nutzungen

Die Erstellung von Hochbauten und insbesondere von Tiefbauten beinhalten in der Regel Risiken für das Grundwasser. Dabei ist zwischen den Gefahren, welche mit dem eigentlichen Bauzustand und solchen, die vom Endzustand ausgehen, zu unterscheiden. Bereits 1995 liess das Amt für Umwelt eine Wegleitung „Bauen in den Grundwasserschutzgebieten“ erarbeiten [86]. Die Fragen um die Grundwasserhaltung wurden in einem separaten Merkblatt mit dazugehörigem Gesuchsformular geregelt. Mit der inzwischen in Kraft gesetzten Gewässerschutzkarte wurden auch alle Bestimmungen gemäss Wegleitung Grundwasserschutz [1] übernommen, womit die geläufigen Nutzungen und Tätigkeiten geregelt sind.

Der Schutz des Grundwassers von wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF) ist in der Verordnung vom 16. März 1999 [6] geregelt.

8.2.3 Thermische Grundwassernutzung

8.2.3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Bewilligungs- und Konzessionspflicht

Wassernutzungen unterstehen gemäss Wasserrechtsgesetz [10] der Konzessionspflicht. Von Eingriffen ins Grundwasser wie Grabarbeiten, Sondierungen, die Erstellung von Brunnenbauten usw. geht eine Gefährdung für die nutzbaren Grundwasservorkommen aus. Um Umweltschäden in Gebieten mit nutzbaren Grundwasservorkommen soweit möglich vermeiden zu können, sind Eingriffe ins Grundwasser gemäss Gewässerschutzgesetz [4] bewilligungspflichtig.

Grundwassertemperatur

Für die Festlegung der maximal zulässigen thermischen Veränderung des Grundwassers sieht die Gewässerschutzverordnung [8] ein Qualitätsziel für die Grundwassertemperatur von maximal 15 °C vor. Die Wegleitung Grundwasserschutz des BAFU [1] legt ergänzend einen Indikatorwert für eine übermässige Belastung des Grundwassers von maximal ± 3 °C Abweichung vom naturnahen Zustand fest.

Da Trinkwasser an Bezüger möglichst kühl abgegeben werden sollte, empfiehlt sich im Gewässerschutzbereich A_u nur möglichst geringe Wärmeeinträge zuzulassen. Langjährige Beobachtungen der Temperatur im regionalen Grundwasser-Vorfluter Liechtensteiner Binnenkanal zeigen auf, dass bereits heute eine Zunahme der Wassertemperatur festgestellt werden kann und dass das System Grundwasser – Vorfluter sensibel auf thermische Beeinträchtigungen reagiert. Die zehnjährigen Messreihen bei den Grundwassermessstellen deuten auch auf eine Zunahme der Grundwassertemperatur hin. Der beobachtete Trend dürfte zu einem grossen Teil auf die vorhandenen, in den Untergrund reichenden Bauten und Infrastrukturen und die Abgabe von Prozesswärme zurückzuführen sein.

Eine künstliche Erwärmung des Grundwassers muss grundsätzlich kritischer betrachtet werden als eine Abkühlung. Hinzu kommt, dass in Siedlungsnähe das Grundwasser infolge der Wärmeabgabe von z.B. Kellergeschossen, Abwasserleitungen und auch von befestigten Flächen bereits vorbelastet ist. Umgesetzt auf die Zulässigkeit von Temperaturveränderungen im Grundwasser kann gefolgert werden, dass die maximale Veränderung der Grundwassertemperatur für Wärmeentnahme weniger streng behandelt werden soll, als für Wärmeeinträge: Als Grenzwert gelten für die Abkühlung des Grundwasser maximal -3 °C und für die Erwärmung des Grundwassers maximal +1.5 °C. Diese Vorgaben sind von Rückgabeeanlagen in einer Distanz einzuhalten, wo eine weitgehende Durchmischung stattgefunden hat. In der unmittelbaren Nähe der Anlagen (< 100 m) sind in der Abströmfahne lokal ausnahmsweise auch grössere Temperaturveränderungen vertretbar. Am Punkt der Einleitung des thermisch genutzten Grundwassers in den Untergrund, sollte eine Temperatur von 4 °C nicht unterschritten und eine Temperatur von 20 °C nicht überschritten werden.

Wiedereinleitung

Die natürlichen Grundwasservorkommen dürfen durch die thermische Grundwassernutzung weder qualitativ noch quantitativ beeinträchtigt werden und die Störung der natürlichen Fliessverhältnisse soll durch die Anlagen auf einem absoluten Minimum gehalten werden. Thermisch verändertes Grundwasser soll daher in chemisch und hygienisch einwandfreier Qualität wieder in den Grundwasserträger zurückgegeben werden. Die Rückgabe des genutzten Grundwassers in den Untergrund kann über eine untiefe Versickerungsanlage in den ungesättigten Deckschichten oder über einen Rückgabebrunnen direkt in den Grundwasserträger erfolgen. Eine Ableitung in den Vorfluter kann ausnahmsweise in Gebieten geprüft werden, in welchen das Grundwasser unmittelbar abströmseitig ohnehin in die Vorflut exfiltriert oder wo aufgrund der chemischen Wasserbeschaffenheit eine Wiederversickerung weder möglich noch sinnvoll ist (vgl. [27]).

8.2.3.2 Karte der Zulässigkeit

Im Fürstentum Liechtenstein wird seit den 70er Jahren Grundwasser mittels Wärmepumpen thermisch genutzt. Seit dem Jahr 2000 hat die Nachfrage immer stärker zugenommen, wobei neu auch die Nutzung für Kühlzwecke in den Vordergrund getreten ist. Das Amt für Umwelt nahm dies zum Anlass eine Studie über das thermische Potenzial im Grundwasser in Auftrag zu geben [26] und anschliessend liess es neue Grundlagen für die Bewilligungspraxis erarbeiten [27]. Mit einfachen hydrogeologischen Methoden wurde eine Schätzung des natürlich vorhandenen thermischen Potenzials im Grundwassergebiet des Liechtensteiner Rheintals vorgenommen. Aufgrund der unvermeidbaren Unsicherheit wurden dabei wenig relevante Einflüsse vernachlässigt und bei relevanten Grössen konservative Annahmen getroffen. Daraus wurde ein Wärmepotenzial von rund 10 MW ermittelt. Das gewählte Vorgehen bei der Abschätzung des vorhandenen Potenzials bringt es mit sich, dass das effektiv vorhandene thermische Potenzial tendenziell eher unterschätzt wurde. Andererseits wird die Wärmenutzung über Wärmepumpen teilweise durch den Wärmeeintrag von Anlagen für die Kühlung über die langfristige Bilanz gesehen kompensiert. Die Nutzung für Kühlzwecke ist hydrogeologisch gesehen als die Problematischere für den Erhalt einer guten Grundwasserqualität einzustufen, zumal die dadurch dem Grundwasser zugeführte Wärme das Keimwachstum im Grundwasser begünstigt. Aus diesem Grund wurden für Kühlanlagen strengere Vorschriften erlassen, indem Veränderungen der Grundwassertemperatur nur halb so gross sein dürfen wie bei Wärmeentnahmen.

Die thermische Nutzung des Grundwassers wurde mit einer Karte der Zulässigkeit geregelt, die den unterschiedlichen Schutzbedarf des Grundwassers in den einzelnen Gebieten berücksichtigt (vgl. Abb. 22). Die Ausscheidung der Bereiche der Zulässigkeit auf der Karte wird vom Ziel des Grundwasserschutzes geleitet und stützt sich ab auf die Auswertung der bisher vorliegenden hydrogeologischen Kenntnisse über den Untergrundaufbau und die Grundwasserverhältnisse. Sie dient der Behörde als Vollzugshilfsmittel und stellt die einheitliche Regelung der Zulässigkeit sicher. Zusätzlich liefert sie für Anlagenplaner gewisse Planungshinweise (vgl. Abb. 21). Die Karte hat jedoch keine Verbindlichkeit bezüglich der Machbarkeit von Anlagen. Die Verantwortung und das diesbezügliche Risiko liegen klar bauseits und die notwendigen hydrogeologischen Abklärungen (Sondierungen, Pumpversuche usw.) müssen durch die Bauherrschaften getroffen werden. Diese Untersuchungen stellen die Voraussetzungen für die Zulassung dar. Das Liechtensteiner Talgebiet wird mit der Karte der Zulässigkeit für die thermische Grundwassernutzung in drei Zonen aufgeteilt:

- In den zentralen Grundwasser-Kerngebieten, welche grundsätzlich für die Trinkwassergewinnung aus dem Grundwasser geeignet sind, besteht ein **Verbot für thermische Grundwassernutzung (rote Zone)**. In diesem Gebiet darf das Grundwasser keinen direkten Risiken ausgesetzt werden, die aus einer thermischen Nutzung erwachsen. Die Verbotzone umfasst das Wasserschutzgebiet entlang dem Rhein gemäss [9] sowie die Grundwasser-Schutzzonen und Grundwasser-Schutzareale.
- Die Grundwasser-Kerngebiete in der Talebene, welche ausserhalb der Verbotzone liegen, sind meist gut geeignet für die thermische Nutzung des Grundwassers und weisen

ein beträchtliches Nutzungspotenzial auf. Ihr Schutzbedarf ist erhöht, da sie erstens durchwegs einem nutzbaren Grundwasservorkommen zugehören und zweitens zuströmseitig der, für die Trinkwasserversorgung freigehaltenen, Grundwasserkerngebiete liegen. Aufgrund ihrer zuströmseitigen Lage zu den Verbotszonen haben sie die Funktion einer Pufferzone zu erfüllen. Daher sind in dieser mittleren Zone **thermische Grundwassernutzungen nur stark eingeschränkt zulässig (orange Zone)**. Besondere Auflagen und Einschränkungen zielen hauptsächlich darauf ab, nur eine relativ kleine Anzahl von grösseren Anlagen mit einem hohen Ausbaustandard zuzulassen.

- In den Gebieten mit dem vergleichsweise geringsten Schutzbedarf für das Grundwasser ist die **thermische Grundwassernutzung unter Auflagen zulässig (grüne Zone)**. In diesen Gebieten gelten u.a. Einschränkungen bezüglich Mindestgrössen und Auflagen zur Ausführung und zum Betrieb der Anlagen.

Obwohl die vorliegende Karte in erster Linie der Regelung der Zulässigkeit von Anlagen dient, ist es sinnvoll, hydrogeologische Erkenntnisse zur Machbarkeit von Anlagen zur thermischen Grundwassernutzung, soweit diese bekannt sind, als Hinweise auf der Karte den Bauherrschaffen und den Planern von Anlagen zugänglich zu machen. Als gewässerschutzrelevant gilt insbesondere die Hinweis- und Gebotszone „Artesisch gespanntes Grundwasser“, wo die fachgerechte Erstellung von Entnahme- und Rückgabeebrunnen besondere technische Anforderungen stellt (vgl. [28]).

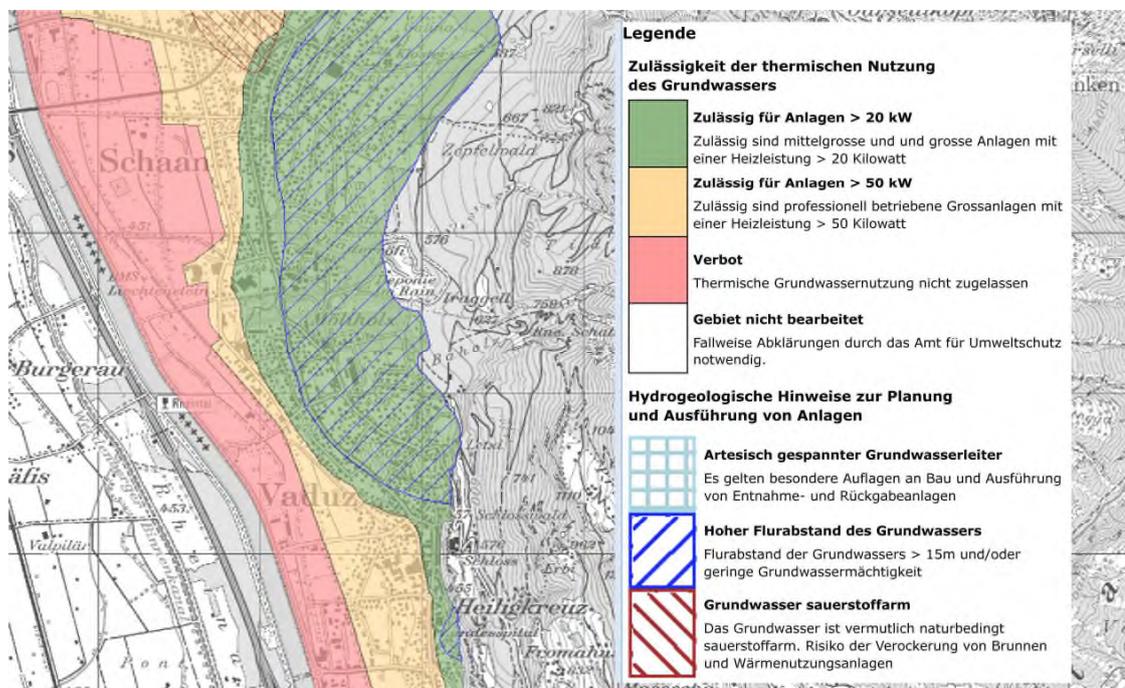


Abbildung 21: Ausschnitt aus der Karte der Zulässigkeit für die thermische Nutzung des Grundwassers.

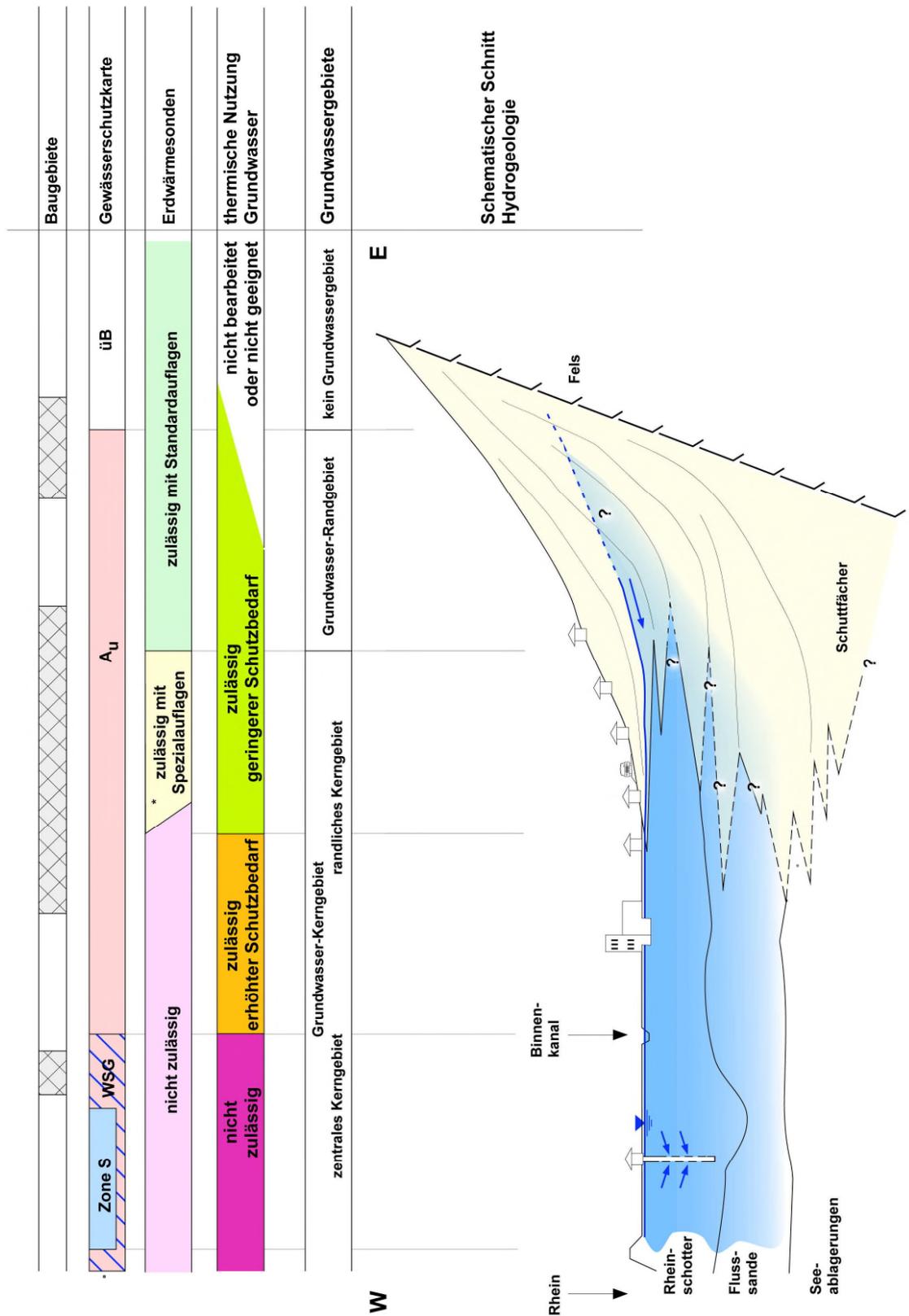


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Kriterien, die zur Ausscheidung der Bereiche der Zulässigkeit für die thermische Nutzung des Grundwassers herangezogen wurden (aus [27]).

8.2.4 Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind geschlossene Kreisläufe, die in einer Tiefenbohrung (in der Regel 80 bis 250 m) eingebaut werden um dem Untergrund die freie Erdwärme zu entziehen. Die entzogene Wärme wird dann über eine Wärmepumpe für die Beheizung von Wohnbauten genutzt. Diese alternative Beheizungsmöglichkeit hat in den vergangenen Jahrzehnten stark an Beliebtheit zugenommen. Da Erdwärmesonden jedoch ein nicht vernachlässigbares Gefährdungspotenzial für das Grundwasser bergen, drängte sich eine zeitgemässe Regelung auf. Zum einen können Erdwärmesonden die Grundwasserbeschaffenheit durch Verunreinigungen gefährden. Nebst der Verwendung von wassergefährdenden Stoffen bei der Erstellung und beim Betrieb von Erdwärmesonden, schaffen die Tiefbohrungen im Untergrund künstliche Wasserwegigkeiten, entlang welcher Schadstoffe, z.B. von der Oberfläche her, leicht in die Grundwasserspeicher gelangen können.

Aus heutiger Sicht gilt jedoch das Risiko, dass durch die Tiefbohrungen im Untergrund unerwünschte, künstliche hydraulische Verbindungen zwischen verschiedenen, getrennten Grundwasserbereichen geschaffen werden, als die Hauptgefährdung der nutzbaren Grundwasservorkommen: Bei übereinanderliegenden Grundwasserstockwerken wird beim Durchstoss der trennenden Stauerschicht ein möglicher Fliessweg vom Aquifer mit höherem Wasserdruck zu jenem mit geringerem Porenwasserdruck geschaffen, entlang dem Wasser unterschiedlicher Beschaffenheit vermischt werden. Dies stellt insbesondere eine nicht zu vernachlässigende Gefährdung der für die Trinkwasserversorgung wichtigen Grundwasservorkommen in den alluvialen Rheinschottern dar. Bei der Durchstossung von Stauerschichten oder beim Anbohren von artesisch gespannten Grundwasservorkommen ist nebst einer qualitativen Gefährdung zudem auch die mengenmässige Beeinträchtigung von bestehenden Wassernutzungen und Quellen zu beachten.

Das Konfliktpotenzial zwischen Erdwärmenutzung und Grundwasserschutz ist im Fürstentum Liechtenstein besonders akut: In den alluvialen Schottern der Rheinebene liegt ein Grundwasservorkommen von überregionaler Bedeutung. Diesem Schutzgut kommt erste Priorität zu, weil einerseits daraus bereits heute ein Grossteil des Trink- und Brauchwassers des Landes gefördert wird und weil es andererseits die Wasserreserven für künftige Generationen birgt. Die Schutzbestimmungen sind in den einschlägigen Gesetzestexten festgeschrieben ([4], [8] und [9]). Gerade in der Rheinebene im unmittelbaren Randbereich dieses Grundwasservorkommens befinden sich auch rund zwei Drittel der besiedelten Gebiete des Landes, von denen ein bedeutendes Gefährdungspotenzial für Grundwasser ausgeht. Naturgemäss konzentriert sich auch der Bedarf nach Erzeugung von Heizenergie und demnach der potenzielle Wunsch nach der Nutzung von Erdwärme auf diese Siedlungsgebiete.

Mit gewissen Einschränkungen bei der Zulassung von Erdwärmesonden-Bohrungen kann die Gefährdung der Grundwasservorkommen allgemein stark reduziert werden. Die Bewilligung von Erdwärmesonden ist heute entsprechend landesweit geregelt. Diese Regelung stellt auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Untergrund ab und wird den Ansprüchen des Grundwasserschutzes gerecht.

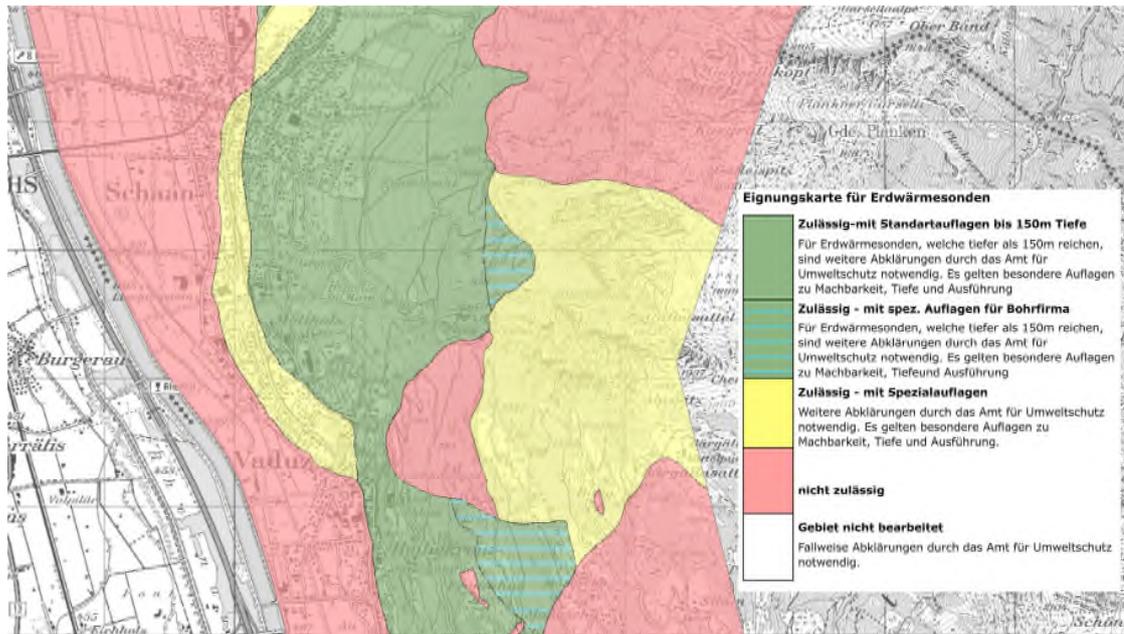


Abbildung 23: Ausschnitt aus der Eignungskarte für Erdwärmesonden.

Im Juli 2005 wurde im Auftrag des Amtes für Umweltschutz eine Eignungskarte für Erdwärmesonden ausgearbeitet [30]. Die Eignungskarte wurde per Regierungsbeschluss am 2. März 2006 in Kraft gesetzt. Nach den ersten Erfahrungen wurden die Karte und die Auflagen 2008 überarbeitet und bilden seither die Grundlage für die Bewilligungspraxis (vgl. Abb. 23). Mit diesem Instrument sollen potenziell bestehende Konflikte zwischen den Bestrebungen zur Förderung der Nutzung von Erdwärme als erneuerbarer Energieträger und den Bedürfnissen eines qualitativen und quantitativen Grundwasserschutzes möglichst klein gehalten werden. In Anbetracht der grossen Bedeutung der Grundwasserreserven als überregionaler Trinkwasserspeicher genießt der Schutz des Trinkwassers die höchste Priorität. Mit gewissen Einschränkungen bei der Zulassung von Erdwärmesonden kann die Gefährdung der Grundwasservorkommen allgemein stark reduziert werden, so dass eine sinnvolle thermische Nutzung des Untergrunds und ein angemessener Grundwasserschutz erreicht werden können.

Die Eignungskarte für Erdwärmesonden basiert in erster Linie auf der Grundwasserschutzkarte (vgl. Kapitel 8.1.1):

- „Rote Zone“

Erdwärmesonden sind in all jenen Gebieten **nicht zulässig**, wo diese nach dem heutigen Stand der Kenntnisse eine objektive Gefährdung der nutzbaren Grundwasservorkommen darstellen können. In Gebieten, wo die Erstellung oder der Betrieb ein Sicherheitsrisiko für die Anlage bzw. deren Umfeld bedeuten oder wo die Langlebigkeit der Sonde durch die im Untergrund herrschenden Verhältnisse gefährdet ist, muss ebenfalls von Erdwärmesonden abgesehen werden.

- **„Grüne Zone“**

In dieser Zone sind Erdwärmesonden bis maximal 150 m Tiefe ohne weitere hydrogeologische Abklärungen bewilligungsfähig. Es gelten allgemeine Standardauflagen bezüglich der Erstellung und Ausführung der Anlage. Für tiefere Anlagen sind vor der Erteilung einer Bewilligung zusätzliche Abklärungen über die Unbedenklichkeit der geplanten Anlage im Zusammenhang mit dem Grundwasserschutz sowie eine intensivere Begleitung der Arbeiten notwendig analog zum Vorgehen in der gelben Zone. Die hydrogeologischen Abklärungen zur Bewilligungsfähigkeit werden durch das Amt für Umwelt ausgeführt. Die hydrogeologische Begleitung der Bohr- und Einbauarbeiten und die Erstellung der Schlussdokumentation der erstellten Anlage liegen in der Verantwortlichkeit der Bauherrschaft.

- **„Gelbe Zone“**

Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen zur Erstellung und Planung von Anlagen in der grünen Zone gelten in der gelben Zone zusätzliche Auflagen. Vor dem Erteilen einer Bewilligung führt das Amt für Umwelt eine hydrogeologische Risikobetrachtung des Vorhabens im Rahmen einer hydrogeologischen Abklärung durch und erlässt fallweise besondere Auflagen. Die Spezialauflagen beinhalten in der Regel Einschränkungen zur maximal zulässigen Bohrtiefe, Anordnungen von Marschhalten während dem Bohrfortschritt sowie Vorschriften für spezielle Bohrmethoden, für spezielle Abdichtungsmassnahmen der Erdsondenbohrung und für das Vorhalten von speziellen Interventionsausrüstungen für besondere Vorkommnisse usw. Nebst der hydrogeologischen Begleitung durch den vom Bauherrn beauftragten Geologen begleitet und überwacht auch das Amt für Umwelt die Bohr- und Einbauarbeiten im Interesse der verstärkten Datensammlung und der Verifizierung der in der hydrogeologischen Abklärung identifizierten Risiken. Die im Auftrag der Bauherrschaft nach Abschluss der Arbeiten eingereichte hydrogeologische Schlussdokumentation wird vom Amt für Umwelt kontrolliert und hydrogeologisch ausgewertet.

Die Bewilligungspraxis richtet sich nach dem in Abb. 24 dargestellten Vorgehen.

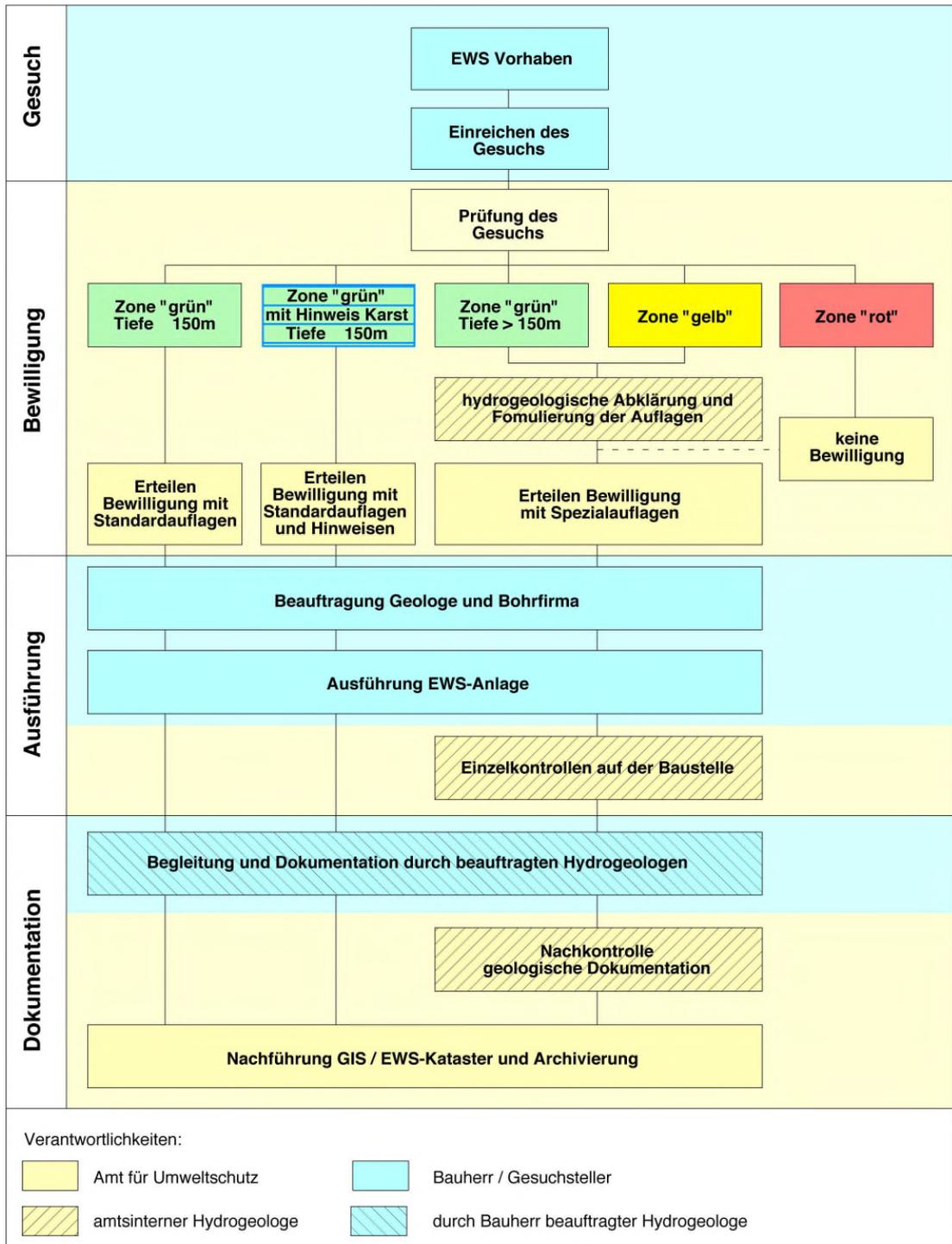


Abbildung 24: Erdwärmesonden: Schema zum Vorgehen bei Bewilligungsverfahren (aus [31]).

8.2.5 Belastete Standorte - Altlasten

Als belastete Standorte gelten Standorte, die als Folge von Ablagerung von Abfällen, von Unfällen oder durch besondere Nutzungen mit Schadstoffen belastet sind. Solche Belastungen können im Einzelfall eine erhebliche Gefahr für das Grundwasser darstellen, weil Schadstoffe austreten und sich im Grundwasser ausbreiten können, wo sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen für Mensch und Umwelt führen. Aus heutiger Sicht wird zwischen folgenden Standort-Typen unterschieden:

- Ablagerungsstandort
- Unfallstandort
- Betriebsstandort

Bereits 1971 erfolgte eine erste Erfassung der öffentlichen Deponien [16]. Ab 1998 veranlassete das AU die systematische Erhebung der Verdachtsflächen „Ablagerungsstandorte“. Mit dem Erlass des Umweltschutzgesetzes [5] und der Altlastenverordnung [7] wurde das AU mit der Erstellung des Katasters der belasteten Standorte (KbS) beauftragt und die Pflicht zur Sanierung und/oder zur Überwachung definiert (Art. 54, [7]). Das Projekt KbS wurde 2010 aufgenommen. 2018 sollen alle belasteten Standorte im Kataster aufgeführt sein und innert 10 Jahren soll untersucht sein, ob Schutzmassnahmen erforderlich sind.

Tabelle 8.5: Anzahl belastete Standorte unterteilt nach Standort-Typen (Stand 19.06.2018).

Standort-Typ	Anzahl belastete Standorte
Ablagerungsstandort	90 Stk.
Unfallstandort	13 Stk.
Betriebsstandort	58 Stk.

9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

9.1 Die Ressourcen für die künftigen Nutzungen

Im Fürstentum Liechtenstein sind sehr grosse Grundwasserressourcen vorhanden. Setzt man sie in ein Verhältnis zur Landesgrösse oder zur Bevölkerungsdichte, sind diese Ressourcen als überdurchschnittlich zu bezeichnen; dementsprechend ausreichend sind die Reserven für die zukünftigen Bedürfnisse. Die Grundwasserressourcen sind in einer Vielfalt von Grundwasserkörpern mit den unterschiedlichsten Eigenschaften verteilt. Die kleinen Vorkommen in den Fels-Formationen und in den Lockergesteinen am Hang- und im Berggebiet speisen in der Regel Quellen, wovon die grösseren in den meisten Fällen bereits gefasst und genutzt sind. Die Quellen sind aufgrund der wirtschaftlich vorteilhaften Nutzungsmöglichkeiten besonders interessante Wasser-Lieferanten; sie liefern heute rund die Hälfte des Trinkwasserverbrauchs. Gemäss heutigem Stand der Kenntnisse scheinen die Ressourcen dieser Grundwasserkörper weitgehend ausgeschöpft bzw. die Reserven sehr begrenzt zu sein. Es gibt jedoch Hinweise dafür, dass gerade die Felsformationen oder die glazialen Schotter in der Tiefe durchaus grössere Reserven aufweisen könnten als bisher bekannt. Obschon das effektive Ausmass dieser Reserven verhältnismässig bescheiden bleiben dürfte, muss beachtet werden, dass solche Vorkommen, dank der grossen Überlagerung mit nicht wasserführenden Schichten u.U. über einen sehr guten natürlichen Schutz verfügen.

Als die bedeutendste Ressource gilt zweifelsohne das Grundwasservorkommen in den Rheinschottern der Talebene. Das Talgrundwasser liefert heute die andere Hälfte des Trink- und Brauchwasserbedarfs, oder umgerechnet ca. 135 l/s im Jahresmittel, was nur ein Bruchteil der effektiven gesamten Ressource darstellt. Auf der Basis der aktuellen Kenntnisse betragen die totalen Reserven theoretisch bis zum 10-fachen der heutigen Nutzung (und unter der Annahme, dass bis zu 30% der Wasserbilanz genutzt werden könnte). Die realen Verhältnisse in der Talebene mit den bestehenden Bauten, Anlagen und den vielfältigen Tätigkeiten führen jedoch dazu, dass die für die Trinkwassernutzung freizuhaltenden Reserven auf Gebiete begrenzt werden müssen, die auch unter den erforderlichen planerischen Schutz (Schutzareale) gestellt werden können. Somit verringert sich das Potenzial für die künftige Nutzung von Trinkwasser innerhalb der rechtskräftigen Areale nach heutigem Stand der Kenntnisse auf die Grössenordnung von rund 400 – 500 l/s im Jahresmittel.

9.2 Gefahrenpotenziale und Schutzmassnahmen

Im Bericht sind die Gefahrenpotenziale für die jeweiligen Aquifere spezifisch dargelegt. Grundsätzlich sollten alle Tätigkeiten, ob Nutzungen oder direkte Eingriffe, welche die Grundwasservorkommen nach Menge oder Güte beeinträchtigen können, unterlassen werden. Bei der Gefährdung der Grundwassermengen sind alle Eingriffe, welche zu einer Verringerung der Wasserbilanz bzw. der Grundwasserressourcen führen könnten, genau zu prüfen und möglichst zu vermeiden. Gerade beim bedeutendsten bekannten Grundwasserkörper im

Fürstentum Liechtenstein, den Rheinschottern der Talebene, sollte der Grundwasserzufluss aus dem Sarganser Becken und ganz besonders die Rheininfiltration keine Schmälerung erfahren. Diese zwei Komponenten zusammen machen zwar nur die Hälfte des Speisungsanteils aus, sind jedoch entscheidend für die guten Trinkwasser-Eigenschaften im Grundwasser der Rheinebene, weil sie dem Grundwasserkörper weiches und sauerstoffreiches Wasser zuführen. Es ist davon auszugehen, dass die Rheininfiltration in den vergangenen Jahrzehnten seit etwa 1960, als Folge der Absenkung der Rheinsohle, bereits deutliche Einbussen erfahren hat, die sich u.a. durch eine Tendenz zu höheren Gesamthärten im Grundwasser bemerkbar gemacht hat.

Sämtliche Eingriffe, die zu einer weiteren Schmälerung der Rheininfiltration führen könnten, sind deshalb nicht nur mengenmässig, sondern auch qualitativ als schädlich für das Grundwasser der Liechtensteiner Rheinebene einzustufen. Ganz im Gegenteil müssten alle Massnahmen, welche mit einer Verstärkung der Rheininfiltration verbunden wären, begrüsst und gefördert werden. Im Vordergrund steht z.B. eine optimierte, gezielte Anhebung der Rheinsohle, allenfalls zusammen mit einer Verbreiterung zu einem natürlichen Flussbett mit einer dynamischeren und daher durchlässigeren Gewässersohle (Revitalisierung).

Die Gefahren von direkten Beeinträchtigungen der Grundwasserbeschaffenheit sind ebenfalls primär im Bereich der Talebene von grösster Bedeutung, zumal dort auch die Nutzungsdichte am grössten ist. Zur Risikominimierung gilt es diesbezüglich den planerischen Schutz und die dazugehörigen Massnahmen mit einem konsequenten Vollzug umzusetzen. Der planerische Schutz ist weitestgehend realisiert bzw. der geltenden Gesetzgebung angepasst. Wichtig ist, dass dieser planerische Schutz zukünftig nicht geschmälert wird.

Ein gewisser Nachholbedarf kann im Bereich des objektbezogenen und des nutzungsorientierten Grundwasserschutzes geortet werden. Diesbezüglich ist im Vollzug von Schutzmassnahmen bei Bauten und Anlagen der Schwerpunkt innerhalb der Wasserschutzgebiete und dem besonders gefährdeten Bereich A_u zu setzen. Ein besonderes Augenmerk gilt den Grabarbeiten (Verletzung der natürlichen Deckschichten) sowie allen Eingriffen, die unter den mittleren Grundwasserspiegel reichen. Ein aktualisiertes Monitoring hilft dabei, nachteilige Veränderungen der Grundwasserqualität rechtzeitig zu erkennen.

9.3 Kenntnislücken

Seit dem Bericht der EAWAG über die Grundwasserverhältnisse im Rheintal von 1976 [32] sind im ganzen Fürstentum Liechtenstein zahlreiche lokale Untersuchungen getätigt worden, aus denen mannigfaltige neue hydrogeologisch relevante Informationen hervorgegangen sind. Nebst unzähligen neuen Sondieraufschlüssen aus Baugrunduntersuchungen, Grundwasser- und Erdwärmesondenbohrungen, sind auch zahlreiche hydraulische Versuche, Wasseranalysen und Wasserspiegelmessungen durchgeführt worden. Diese wertvollen Daten sind jedoch bisher nur in untergeordneter Masse zusammengetragen und ausgewertet worden. Dies wurde nun mit vorliegendem Bericht nachgeholt. Es zeigt sich jedoch, dass mit gezielten Untersuchungen folgende Kenntnislücken noch geschlossen werden sollten:

- Seitliche Begrenzung der Rheinschotter entlang dem Talrand zwischen Triesen und Schaan bzw. Abgrenzung und Verzahnung der Schuttfächer mit den Rheinschottern sowie Durchlässigkeit und Ergiebigkeit des Grundwasserleiters im Verzahnungsbereich.
- Aufbau und Ausdehnung der glazialen Schotter am Fuss des Schellenbergs.
- Ergiebigkeit, Grundwasserbeschaffenheit und Grundwassertemperaturen innerhalb der Schuttfächer.

In einem ersten Schritt wäre eine Gesamtauswertung der hydrogeologisch relevanten Grundlagedaten hilfreich. So sollen die bestehenden Kenntnisse mit neueren hydrogeologisch relevanten Sondieraufschlüssen, wie z.B. aus Erdsondenbohrungen, ergänzt und ausgewertet werden. Diese neuen Auswertungen könnten die Grundlage für einen erweiterten Grundwasserbericht mit folgenden zusätzlichen Inhalten bilden:

- Umfassende Grundwasserkarte mit der Darstellung aller Grundwasserkörper und ihrer Umgrenzung.
- Aktualisierte Darstellung des Aufbaus des Grundwasserkörpers der Rheinschotter z.B. in Form von Profil-Darstellungen oder als dreidimensionales Modell.
- Aktuelle Karte der Transmissivitäten.
- Aktuelle Karte der Hydrochemie.
- Isohypsenpläne mit Darstellung des mittleren, des höchsten und des tiefsten Grundwasserspiegels.
- Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit und der Grundwassertemperatur bei ausgewählten Beobachtungsstellen.
- Numerische Modellierung für Aussagen zur Wasserbilanz und thermischen Grundwassernutzung.