KELLERHALS + HAEFELI AG
GEOLOGEN | BERN STANS

Ingenieurgeologie
Hydrogeologie
Abbau und Deponie
Naturgefahren
Altlasten und Boden

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

Bern, 5. Februar 2021
GO/BÖ/rj 11389B210127

KELLERHALS
+HAEFELI AG
Kapellenstrasse 22 · 3011 Bern
Tel. 031 521 16 00 · bern@k-h.ch
Bahnhofplatz 1a · 6370 Stans
Tel. 041 612 05 25 · stans@k-h.ch

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Kellerhals + Haefeli AG, Geologen, Kapellenstrasse 22, CH-3011 Bern

Autoren: Julien Gobat, Dieter Böhi

Begleitung BAFU: Martin Barben, Petra Schmocker-Fackel, Marc Schürch

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. Einleitung 1

2. Verwendete Unterlagen 2

3. Ausgeführte Arbeiten 4

4. Geologisch-hydrogeologische Klassifikation 5

4.1. Vorgeschlagene Geologie- und Hydrogeologieklassen 5

4.2. Klassifikationsgüte 7

4.3. Klassifikation der HUG Messstellen 7

5. Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit dem Darcy-Gesetz 8

5.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter 8

5.1.1. Räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters (Durchflussfläche F) 9

5.1.2. Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters (k-Wert) 9

5.1.3. Hydraulischer Gradient (i) 10

5.2. Kluftgrundwasserleiter 10

5.2.1. Kontinuumsansatz 12

5.2.2. Kluftansatz 17

5.3. Kluft- / Porengrundwasserleiter 19

5.3.1. Kontinuumsansatz 20

5.3.2. Kluftansatz 21

5.4. Zeitliche Variabilität der Parameter 21

5.5. Genauigkeit der Berechnung 22

5.5.1. Lineare Fehlerfortpflanzung 22

5.5.2. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von Durchflussflächen 22

5.5.3. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von k-Werten 23

5.5.4. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von hydraulischen Gradienten 24

5.5.5. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von Feldmessungen 25

5.6. Verfeinerung der Methode - numerische Grundwassermodellierung 25

5.6.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter 25

5.6.2. Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter) 26

6. Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit Tracerversuchen 27

6.1. Natürlicher Gradient Tracerversuch (klassischer Versuch) 28

6.2. Borehole dilution Test 31

6.3. Tracerversuch im Fliessgewässer zur Messung des Abflusses 34

6.4. Zeitliche Variabilität der Parameter 39

6.5. Genauigkeit der Berechnung 39

7. Aschätzung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit einem synthetischen numerischen Modell 40

8. Vorgehen bei Aquitarden 42

9. Vorgehen bei Aquicluden 42

10. Fallbeispiele 43

10.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter - Messstation 2603 Ilfis, Langnau 43

10.1.1. Allgemeine hydrogeologische Situation 43

10.1.2. Durchflussfläche F 44

10.1.3. k-Wert 46

10.1.4. Hydraulischer Gradient i 48

10.1.5. Unterirdischer Abfluss 49

10.2. Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter) 49

11. Vorgehensvorschlag bei neuen Messstellen inkl. Kostenschätzung 50

12. Schlussfolgerungen und Empfehlungen 53

ANHANGVERZEICHNIS

Anhang 1: Klassifikation der HUG Messstellen (Notizen)

Anhang 2: Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter - Grundwasserexfiltration

Anhang 3: Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter - Flusswasserinfiltration

Anhang 4: Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter - Perkolierende Flusswasserinfiltration

Anhang 5: Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter - Grundwasserexfiltration

Anhang 6: Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter - Flusswasserinfiltration

Anhang 7: Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter - Perkolierende Flusswasserinfiltration

Anhang 8: Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter - Grundwasserexfiltration

Anhang 9: Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter - Flusswasserinfiltration

Anhang 10: Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter - Perkolierende Flusswasserinfiltration

BEILAGENVERZEICHNIS

Beilage 1: Vertikales Querprofil Messstelle 2603 Ilfis 1:1'000 / 1:100

Präambel:

Dieses Gutachten wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt zum Zweck der Bearbeitung des Pilotprojekts über die hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen (Erarbeiten einer hydrogeologischen Klassifikation, Entwicklung von Methoden für die Bestimmung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge, Anwendungsbeispiele) erstellt. Die vorgenannten Angaben und Folgerungen beziehen sich somit ausschliesslich auf das vorliegende Projekt. Bedeutende Änderungen des Projekts bedingen eine Neubeurteilung. Wird das Gutachten zudem für andere Zwecke verwendet, wird jede Haftung abgelehnt. Die Haftung wird auch gegenüber anderen Personen als den Auftraggebern vollumfänglich abgelehnt.

Bei den im Bericht gemachten Angaben handelt es sich um eine Interpretation der bis anhin von diesem Grundstück bzw. Standort bekannten Daten und Fakten. Sollten im Laufe der Planung bzw. der Ausführung des Bauvorhabens zusätzliche Informationen gewonnen werden, so müssen die gemachten Modellangaben überprüft und falls notwendig angepasst werden. Aus diesem Grund ist die Begleitung der Projektierungs- und Ausführungsarbeiten durch einen Geologen sehr zu empfehlen.

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

1. Einleitung

Die Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt (BAFU) betreibt ein Basismessnetz, welches heute rund 260 Messstationen an Oberflächengewässern umfasst. Der Abfluss von Fliessgewässern wird an etwa 200 Stationen gemessen. Darunter gehören 41 Stationen zu den hydrologischen Untersuchungsgebieten (HUG).

Für die Erstellung einer Wasserbilanz über das Einzugsgebiet eines Fliessgewässers ist die Kenntnis des Abflusses von zentraler Bedeutung. Bei den meisten einfachen Bilanzbetrachtungen wird von den Komponenten Niederschlag, Abfluss und Verdunstung der Abfluss als das zuverlässigste Element angesehen. Die Verdunstung bildet oftmals das Restglied. Neben der Ermittlung des Gebietsniederschlags kann es aber auch bei der Bestimmung des Abflusses erschwerende Bedingungen geben.

An den Abflussmessstationen wird der oberirdische Anteil des Wassers, welches ein gegebenes Einzugsgebiet verlässt, erfasst. Der unterirdische Anteil, welcher unterhalb des Fliessgewässers das Einzugsgebiet als Grundwasser verlässt, kann an den Abflussmessstationen nicht erfasst werden. In gewissen Fällen kann dies z.B. zu einer Verfälschung der Einzugsgebietswasserbilanz führen.

Dieser mögliche Grundwasseranteil hängt bei gleichbleibendem Aufbau des Untergrundes von der Grösse eines Fliessgewässers ab und spielt deshalb bei kleineren und mittleren Flüssen eine umso wichtigere Rolle. Aus diesem Grund wurde der Fokus im vorliegenden Projekt auf kleine und mittlere Einzugsgebiete gesetzt. Das Pilotprojekt beschränkt sich deshalb auf die HUG-Messstationen. Zudem wurden auch keine Karsteinzugsgebiete im Rahmen des Projekts behandelt.

Weiter spielen die hydrogeologischen Bedingungen eine massgebende Rolle für den Wasseranteil, welcher als Grundwasser an einer hydrologischen Messstation vorbeifliesst. Deshalb wurde in einem ersten Schritt eine Klassifikation der einzelnen Messstellen erarbeitet. Basierend auf geologischen, tektonischen, hydrologischen und hydrogeologischen Kriterien wurden verschiedene hydrogeologische Klassen erarbeitet. Die Klassifikation wurde an den HUG-Messstationen erprobt.

Für jede Klasse wurden in einem zweiten Schritt Methoden entwickelt und beschrieben, welche es erlauben, den Anteil an Grundwasser, welches an der Fliessgewässermessstelle vorbeifliesst, zu quantifizieren. Für jede Methode wurden auch die Genauigkeit und der zu betreibende Aufwand beurteilt. Die Methoden wurden als Beispiel an einer HUG Messstelle getestet, wenn dazu genügend bestehende Daten vorhanden waren.

Die ausgeführten Arbeiten basieren auf unserer Offerte vom 21. Juni 2019 und dem darauf basierenden Vertrag mit dem Bundesamt für Umwelt.

2. Verwendete Unterlagen

[1] Kellerhals + Haefeli AG (2020): Erneuerung der Grundwasserfassung Moos, Langnau i.E. Hydrogeologisches Gutachten. Bericht-Nr. 10488 vom 5. März 2020.

[2] Geotest (2019): Davos, Fallstudie Geothermieprojekt. Auswertung und Beurteilung angewandter Methoden zur Prospektion, Erschliessung und Nutzung. Bericht-Nr. 2618075.1 vom 29. November 2019.

[3] Essouayed E., Annable M.D., Momtbrun M. und Atteia O. (2019): An innovative tool for groundwater velocity measurement compared with other tools in laboratory and field tests. Journal of Hydrology X 2, 2019.

[4] Amt für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern (2016): Grundwassermodell Emmental. Technische Dokumentation. Ausgabe November 2016.

[5] Welch L. A. und Allen D. M. (2012): Consistency of groundwater flow patterns in mountainous topography: Implications for valley bottom water replenishment and for defining groundwater flow boundaries. Water Resources Research, Vol. 48, 17. Mai 2012.

[6] Gleeson T., Smith L., Moosdorf N., Hartmann J., Dürr H. H., Manning A. H., van Beek L. P. H. und Jellinek A. M. (2011): Mapping permeability over the surface of the Earth. Geophysical Research Letters, Vol. 38, 21. Januar 2011.

[7] Gleeson T. und Manning A. H. (2008): Regional groundwater flow in mountainous terrain: Three-dimensional simulations of topographic and hydrogeologic controls. Water Resources Research, Vol. 44, Oktober 2008.

[8] Todd D. K. und Mays L. W. (2005): Groundwater Hydrology, 3. Ausgabe, 2005.

[9] Langguth H.-R. und Voigt R. (2004): Hydrogeologische Methoden, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

[10] BUWAL (2003): Ausscheidung von Grundwasserschutzzonen bei Kluft-Grundwasserleitern. Praxishilfe des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft, 2003.

[11] Dr. Heinrich Jäckli AG (2003): Grundwasserfassung Chalberweidli, Einsiedeln - Gross / SZ. Kurzbericht über den Markierversuch vom November 2003. Bericht vom 15. Dezember 2003.

[12] Dr. Heinrich Jäckli AG (2003): Grundwasserfassung Chalberweidli, Einsiedeln - Gross / SZ. Markierversuch vom Juli 2003 und Vorschlag für Schutzzonenausscheidung. Bericht vom 30. September 2003.

[13] Fitts C. R. (2002): Groundwater Science, 2002.

[14] Niederberger B. (2000): Strukturen und Metamorphose der oberen Val Grono (Südliche Adula). Teil 2. Diplomarbeit von 2000.

[15] WEA (1997): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. Nutzungs-, Schutz- und Überwachungskonzept für die Grundwasserleiter des obersten Emmentals, zwischen Emmenmatt, Langnau und Eggiwil. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern. Synthesebericht von 1997.

[16] National Research Council (1996): Rock Fractures and Fluid Flow. Contemporary Understanding and Applications. The National Academies Press, Washington, D.C., 1996.

[17] Baumer A. (1995): Begutachtung der hydrogeologischen Beeinflussung der Stauanlage Carmena durch den Bau des Ceneribasistunnels. Hydrogeologischer Bericht. Bericht-Nr. 159521.01 vom November 1995.

[18] WEA (1993): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. Hydrogeologie Truebtal. Bericht von 1993.

[19] Kellerhals + Haefeli AG (1991): Schutzareal Moos, Langnau. Bericht-Nr. 1533 vom 29. November 1991.

[20] Odilo Schmid (1990): Quellschutzzonen der Gemeinde Oberwald. Hydrogeologischer Bericht Nr. 541 vom 25. Juni 1990.

[21] Cabinet Jamier et Vial (1989): Analyse tectonique de la région de Davos pour un projet d'implantation d'un forage géothermique. Bericht-Nr. 113788 vom 1. Januar 1989.

[22] Kellerhals + Haefeli AG (1987): Hallen- und Freibadanlage Langnau i.E. Grundwasserentnahme für Wärmepumpe. Bericht-Nr. 1227 vom 22. Dezember 1987.

[23] Dr. Ulrich P. Büchi (1985): Davos. Pilot-Projekt Geothermik. Bericht-Nr. 1844 vom 15. Januar 1985.

[24] Hölting, B. (1980): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1980.

[25] Freeze R. A. und Cherry J. A. (1979): Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1979.

[26] De-Carli M. und Gygax F. (1977): Comune di Lavertezzo. Zone di protezione delle captazioni. Relazione tecnica. Studio d'ingegneria consulenze Marco De-Carli. Bericht von 1977.

[27] Richter W. und Lillich W. (1975): Abriss der Hydrogeologie, Stuttgart, 1975.

[28] Busch K.-F. und Luckner L. (1973): Geohydraulik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, Leipzig, 1973.

[29] Klein H.-H. (1971): Geologische Aufnahme der Strasse M. di Vif - Val di Roggiasca. Diplomarbeit von 1971.

[30] Geotechnisches Institut AG (1970): Unterführung Güterstrasse, Langnau i.E. - Strassenkorrektion T 10. Vorbericht zu den Grundwasserverhältnissen. Bericht-Nr. 1283 vom 2. Juli 1970.

[31] Thurner A. (1967): Hydrogeologie, 1967.

[32] Dal Versco E. (1967): Impianto Verzasca Diga. Geologia. Relazione finale. Studio d'ingegneria Ing. Dott. Lombardi e Ing. Gellera. Bericht vom Juli 1967.

[33] ETH (1964): Kraftwerk Verzasca. Untersuchungen über die Sicherheit des Staubeckens Vogorno. Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau. Erdbauabteilung. Bericht-Nr. 1777 A/1 vom 23. September 1964.

[34] Cadisch J. (1957): Geologischer Bericht über die Sperrstelle La Rösa, am Berninapass, Graubünden. Erstattet an die Kraftwerke Brusio A.G. in Poschiavo. Bericht vom 22. März 1957.

[35] Knecht H. und Süsstrunk A. (1956): Bericht über seismische Sondierungen bei La Rösa für die Kraftwerke Brusio A.-G. Bericht-Nr. 1047 vom 20. Dezember 1956.

[36] Cadisch J. (1953): Geologischer Rapport über Staumöglichkeiten im Oberengadin. Zweiter Rapport über Staumöglichkeiten im Oberengadin, erstattet an das Bauamt des Kantons Graubünden in Chur. Bericht vom 5. Oktober 1953.

[37] Gagnebin E. (1940): Etude géologique du tunnel du Riederhorn sur Brigue (Valais). Bericht vom 14. April 1940.

[38] Swisstopo (map.geo.admin.ch):
- HUG Messstationen
- HUG Hydro. Untersuchungsgebiete
- Markierversuche
- Geocover

[39] Geoportal des Kantons Bern:
- Geologische Grundlagendaten
- Grundwasserkarte

3. Ausgeführte Arbeiten

- Zusammenstellen der vorhandenen Unterlagen im Bereich der HUG Messstellen
- Beschreibung der geologischen, tektonischen, hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in der näheren Umgebung aller HUG Messstellen
- Erarbeitung geologischer und hydrogeologischer Klassen
- Klassifikation jeder HUG Messstelle (Zuordnung einer Klasse)
- Vorstellung des Klassifikationsvorschlags (Sitzung vom 31. Oktober 2019)
- Erarbeitung einer ersten Methode für die Berechnung des Grundwasserabflusses
- Vorstellung der Methode (Sitzung vom 12.03.2020)
- Testen der ersten Methode an einem Fallbeispiel
- Erarbeitung weiterer Methoden für die Berechnung des Grundwasserabflusses (Verwendung von Tracerversuchen)
- Zusammenstellen von zusätzlichen Unterlagen (Tracerversuchsgutachten) für das Testen der weiteren Methoden
- Vorstellung der weiteren Methoden und eines Fallbeispiels (Sitzung vom 03.12.2020)
- Schlussberichterstattung

4. Geologisch-hydrogeologische Klassifikation

4.1. Vorgeschlagene Geologie- und Hydrogeologieklassen

Die vorgeschlagene Klassifikation der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse an den Abflussmessstellen kann der Abbildung 1 entnommen werden. Die Zahlen entsprechen den geologischen Klassen (12 Klassen). Die Farben entsprechen den hydrogeologischen Klassen (6 Klassen).

Aus geologischer Sicht muss unterschieden werden, ob ein gegebenes Fliessgewässer im Bereich der Abflussmessstelle bzw. flussaufwärts davon auf Felsgestein oder Lockergestein fliesst.

Sowohl der felsige Untergrund als auch Lockergesteine können sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen und können deshalb aus hydrogeologischer Sicht in Grundwasserleiter (durchlässige Gesteine), Aquitarde (semi-permeable Gesteine, Übergang zwischen Grundwasserleiter und Grundwasserstauer) und Aquiclude (undurchlässige Gesteine, Grundwasserstauer) unterteilt werden.

In Lockergesteinen erfolgt die Grundwasserzirkulation innerhalb untereinander verbundener Hohlräume zwischen den Gesteinskomponenten (effektive Porosität). Die Durchlässigkeit eines Lockergesteins kann dabei direkt anhand der Korngrössenzusammensetzung abgeschätzt werden.

Kiesiges und sandiges Material (z.B. Schotter) weist i.d.R. eine gute Durchlässigkeit auf und kann als grundwasserleitend betrachtet werden. Siltiges Material (z.B. gewisse Moränen) weist meist eine stark reduzierte Durchlässigkeit auf und kann in solchen Fällen als Aquitard betrachtet werden. Die Durchlässigkeit hängt vor allem vom Anteil Sand und Kies ab. Toniges Material weist i.d.R. eine derart geringe Durchlässigkeit auf, dass es im Rahmen des vorliegenden Pilotprojekts als undurchlässig bzw. als Aquiclud betrachtet werden kann.

Auch im Fels kann Grundwasser innerhalb zusammenhängender Hohlräume zwischen einzelnen Gesteinskomponenten (effektive Porosität) zirkulieren. Die Zerklüftung und die Verkarstung von Fels können aber weitere Hohlräume bilden, welche die Grundwasserzirkulation massgebend beeinflussen können. Aus diesem Grund muss bei felsigem Untergrund unterschieden werden, ob der Fels zerklüftet, porös und zerklüftet, oder verkarstet ist. Die Unterteilung kann anhand der lithologischen Beschreibung erfolgen.

Kristalline Felsformationen können i.d.R. zerklüftet sein. Die Porosität und die Verkarstung solcher Formationen können aber vernachlässigt werden. Sedimentäre Felsformationen (Molasse, Flysch) können porös sein. Die Porosität hängt von der Korngrössenzusammensetzung und vom Zementationsgrad ab. Als porös können insbesondere schlecht zementierte Sandsteine und Konglomerate betrachtet werden. Sedimentäre Felsformationen können auch zerklüftet sein. Ausser bei kalk-, sowie bei gips- und anhydrithaltigen Formationen spielt die Verkarstung aber eher eine untergeordnete Rolle. Wenn Verkarstungserscheinungen in einer Formation beobachtet werden, spielen die Porosität und die Zerklüftung der Formation für die Grundwasserzirkulation i.d.R. eine untergeordnete Rolle.

Für jede der oben beschriebenen möglichen Grundwasserzirkulationen im Fels muss abgeschätzt werden, wie stark die möglichen Hohlräume tatsächlich ausgebildet sind bzw. wie durchlässig der Fels ist. Diesbezüglich können hydrologische, tektonische und geomorphologische Beobachtungen beigezogen werden. Wenn aus einer gegebenen Formation Quellen entspringen, muss angenommen werden, dass die Durchlässigkeit dieser Formation gross genug ist, um eine Grundwasserzirkulation zu erlauben. Dementsprechend sollte die Formation als Grundwasserleiter eingestuft werden (geologische Klassen 4, 7 und 10).

Wenn es in einer Formation Hinweise auf eine Zerklüftung (Vorhandensein typischer, tektonischer Merkmale wie Brüche, tektonisierte Zonen, Verwerfungen, etc.) gibt aber keine Quellen vorhanden sind, sollte die Formation als Aquitard betrachtet werden (Klassen 5 und 8). Gleichermassen sollte für verkarstungsfähige Formationen aus denen keine Quellen entspringen, abgeklärt werden, ob oberflächliche Verkarstungserscheinungen (typische, geomorphologische Merkmale wie Dolinen, Karrenfelder, Schlucklöcher, etc.) vorhanden sind. Wenn es oberflächliche Hinweise auf eine Verkarstung gibt, sollte die Formation ebenfalls als Aquitard betrachtet werden (Klasse 11), andernfalls als Grundwasserstauer (Klasse 12).

Wenn es weder Quellen noch Hinweise auf die Bildung von Hohlräumen (Zerklüftung oder Verkarstung) gibt, kann die entsprechende Formation als Aquiclud betrachtet werden (Klassen 6, 9 und 12).

Aus hydrogeologischer Sicht müssen die diversen Grundwasserleitertypen (Lockergesteinsgrundwasserleiter, blau; Kluftgrundwasserleiter, orange; Kluft- / Porengrundwasserleiter, violett; Karstgrundwasserleiter, rot) voneinander unterschieden werden. Die Aquitard- (grün) und Aquicludtypen (grau) können aber zu je einer hydrogeologischen Klasse zusammengefasst werden. Die Karstgrundwasserleiter werden der Vollständigkeit halber als Klasse weitergeführt. Aufgrund der Komplexität der unterirdischen Fliesswege in Karstsystemen sollen Sie im Rahmen des vorliegenden Pilotprojekts aber nicht weiter bearbeitet werden.

				Hydrogeologie		
				Grundwasserleiter	Aquitard	Aquiclud
Geologie	Lockergestein			1	2	3
	Fels	Potentiell zerklüftet	Quellen vorhanden	4		
			Zerklüftung vorhanden, keine Quellen		5	
			Keine Zerklüftung, keine Quellen			6
		Potentiell zerklüftet und porös	Quellen vorhanden	7		
			Zerklüftung, Porosität vorhanden, keine Quellen		8	
			Keine Zerklüftung, keine Quellen			9
		Potentiell verkarstet	Quellen vorhanden	10		
			Verkarstungserscheinungen vorhanden, keine Quellen		11	
			Keine Verkarstungserscheinungen, keine Quellen			12

Abbildung 1: Klassifikation der geologischen (Zahlen) und hydrogeologischen (Farben)Verhältnisse.

4.2. Klassifikationsgüte

Im Verlauf der Zuordnung einer Klasse, werden verschiedene, bestehende geologische Unterlagen wie Gutachten, Karten oder Bohrungen zusammengestellt. Anhand dieser Unterlagen sollen die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich einer Abflussmessstelle beschrieben und einer Klasse gemäss Abbildung 1 zugeordnet werden. Je nach Menge und Güte der vorhandenen Unterlagen ist die Klassenzuordnung mehr oder weniger eindeutig bzw. sicher. Für jede Abflussmessstelle, die einer geologischen / hydrogeologischen Klasse zugeordnet wird, sollte auch immer abgeschätzt werden, wie gut bzw. wie sicher sie der gegebenen Klasse zugeteilt werden kann.

Diesbezüglich wurden drei "Güteklassen" entwickelt, welche hauptsächlich von der Art der verwendeten Unterlagen abhängig sind. Es wurde folgender Vorschlag erarbeitet:

- Güte A: Klassenzuordnung anhand geologischer Karten und zusätzlicher, aussagekräftiger Bohrungen in der näheren Umgebung einer Abflussmessstelle
- Güte B: Klassenzuordnung anhand geologischer Karten und zusätzlicher Karten mit von der Geologie / Hydrogeologie abhängigem Inhalt (Grundwasserkarten, Gewässerschutzkarten, Versickerungskarten, etc.)
- Güte C: Klassenzuordnung nur anhand geologischer Karten

Die Güte ist aber auch abhängig von der Komplexität der geologischen/hydrogeologischen Verhältnisse. Bei einfachen Verhältnissen kann auch alleine anhand der geologischen Karte eine hohe Güte (A) erreicht werden. Bei einem hohen Komplexitätsgrad ist dagegen eine deutlich grössere Anzahl an Daten notwendig, um die Güte A gewährleisten zu können.

Je nach Komplexitätsgrad sollten die Daten auch mehr oder weniger nahe bei der Messstelle erhoben worden sein. Bei einfachen Verhältnissen reichen oft bereits weiter entfernte Bohrungen für eine Klassifikation mit hoher Güte (A). Bei komplexen Verhältnissen ist es in den meisten Fällen nötig, Daten von sehr nahe der Messstelle zu haben, damit die Klassifikation mit der Güte A erfolgen kann.

4.3. Klassifikation der HUG Messstellen

Damit die in den obenstehenden Kapiteln vorgestellte Klassifikation erprobt werden kann, wurde sie an den 41 Abflussmessstellen der hydrologischen Untersuchungsgebiete (HUG) angewendet.

Die detaillierten, geologischen Beschreibungen zu jeder einzelnen Messstelle und die dazugehörige, vorgeschlagene Klasse und Güte können der Tabelle im Anhang 1 entnommen werden. Teilweise können die Messstellen auch mehreren Klassen angehören. Wenn dabei vermutet wird, dass eine Klasse nur eine untergeordnete Rolle spielt, so ist sie in Klammern angegeben. Fragezeichen weisen auf eine unsichere Klassenzuordnung hin. In solchen Fällen müssten zusätzliche Daten erhoben werden, um die offenen Fragen zu klären.

Folgende Liste zeigt, wie viele Messstellen nach heutigem Wissensstand einer gegebenen Klasse angehören:

- Lockergesteinsgrundwasserleiter (blau): 21 Messstellen
- Kluftgrundwasserleiter (orange): 7 Messstellen
- Kluft- / Porengrundwasserleiter (violett): 5 Messstellen
- Karstgrundwasserleiter (rot): 1 Messstellen
- Aquitarde (grün): 4 Messstellen
- Aquiclude (grau): 3 Messstellen

Bezüglich Klassifikationsgüte gibt die folgende Liste einen Überblick über die Anzahl Messstellen pro Güteklasse:

- Güte A: 11 Messstellen
- Güte B: 10 Messstellen
- Güte C: 20 Messstellen

5. Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit dem Darcy-Gesetz

5.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter

Damit in einem Lockergesteinsgrundwasserleiter die unterirdisch an einer oberflächlichen Abflussmessstation vorbeifliessende Grundwassermenge geschätzt bzw. berechnet werden kann, sind folgende Informationen notwendig:

- Räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters (Durchflussfläche F) auf einem Querprofil senkrecht zu der Abflussmessstelle
- Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters (k-Wert)
- Hydraulischer Gradient (i)

Gemäss dem Darcy-Gesetz (1) kann der unterirdische Abfluss Q durch die Multiplikation der obenerwähnten Parameter berechnet werden:

$$Q = k \cdot i \cdot F \quad (1)$$

Die Bestimmung dieser drei massgebenden Parameter wird untenstehend kurz erläutert. Die Parameter sind graphisch auf schematischen Längs- und Querschnitten in den Anhängen 2 bis 4 dargestellt.

5.1.1. Räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters (Durchflussfläche F)

Um die räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters in einem Querprofil senkrecht zum Fliessgewässer im Bereich der Abflussmessstelle zu bestimmen, sollte ein geologisches Querprofil konstruiert werden. Der Grundwasserstauer muss klar identifiziert sein. Unter Umständen können auch verschiedene Formationen bzw. Gesteine als Grundwasserstauer wirken (z.B. Seetone und Mergel) und der Grundwasserleiter kann verzahnt sein oder einen Stockwerksaufbau aufweisen. Die Tiefe des Grundwasserstauers sollte anhand von vorhandenen Sondierungen (Bohrungen, Baggerschlitze, etc.) und/oder anhand bereits existierenden Isohypsenkarten des Grundwasserstauers bestimmt und auf das gesamte Querprofil inter- bzw. extrapoliert werden.

Zusätzlich zu der Lage des Grundwasserstauers muss für die Berechnung der Durchflussfläche im Bereich des Querprofils auch die Lage des Grundwasserspiegels bekannt sein. Dazu muss eine Grundwasserspiegelisohypsenkarte beigezogen werden. Um eine zuverlässige Isohypsenkarte zeichnen zu können, sind Grundwasserspiegelmessungen an mehreren Punkten (Grundwassermessstellen) im Zu- und Abstrombereich des betrachteten Querprofils nötig.

Die gesättigte Grundwasserleiterfläche bzw. die Durchflussfläche F entspricht der Fläche zwischen dem Grundwasserstauer und dem Grundwasserspiegel. Die Lage des Grundwasserstauers ist gegeben und ändert sich nicht. Die Lage des Grundwasserspiegels ist dagegen zeitlich variabel und hängt vom Grundwasserstand ab. Aus diesem Grund ist auch die Durchflussfläche F zeitlich variabel.

Das Vorhandensein von feinkörnigen, schlecht durchlässigen Deckschichten über dem Grundwasserleiter sollte ebenfalls abgeklärt werden. Wenn der Grundwasserspiegel in solchen Deckschichten liegt (gespannter Spiegel) entspricht die Durchflussfläche F der Fläche zwischen der Unterkante der schlecht durchlässigen Deckschichten und dem Grundwasserstauer. Wenn der Grundwasserspiegel konstant bleibt, d.h. bei allen Grundwasserständen bis in diese undurchlässigen Deckschichten reicht, so ist die Durchflussfläche nicht mehr zeitlich variabel.

Wenn mehrere Fliessgewässer über dem gleichen Grundwasserleiter fliessen (siehe z.B. Goldach, HUG Messstelle 2308), muss der Grundwasserspiegel über den gesamten Grundwasserleiter bestimmt werden. Anhand der Grundwasserisohypsen und der Staueroberfläche sollte das unterirdische Einzugsgebiet der Flüsse, welches nicht unbedingt mit dem oberirdischen, topographischen Einzugsgebiet übereinstimmt, definiert werden. Die laterale Ausdehnung der Durchflussfläche F sollte dabei für die einzelnen Flüsse durch die Grundwasserscheiden abgegrenzt werden (unterirdisches Einzugsgebiet).

5.1.2. Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters (k-Wert)

Die hydraulische Leitfähigkeit bzw. der k-Wert hängt direkt von der Korngrössenzusammensetzung des Grundwasserleiters ab. Zahlreiche Felduntersuchungen (Pumpversuche, Slug-Tests, Versickerungsversuche, Markierversuche, etc.) erlauben, die hydraulische Leitfähigkeit eines Grundwasserleiters zu bestimmen. Soweit solche Messungen für einen bestimmten Grundwas-

serleiter vorhanden sind, sollten möglichst die lokalen k-Werte verwendet werden. Sollten für einen gegebenen Grundwasserleiter keine k-Werte vorliegen, kann anhand der Lockergesteinsbeschreibung ein Literaturwert beigezogen werden (siehe z.B. [8]).

Auf dem in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Querprofil können innerhalb des Grundwasserleiters auch verschiedene Lockergesteine mit unterschiedlichen k-Werten ausgeschieden werden. In einem solchen Fall sollte anschliessend ein gemittelter, über die Flächen gewichteter k-Wert berechnet werden.

5.1.3. Hydraulischer Gradient (i)

Der hydraulische Gradient entspricht dem Gefälle des Grundwasserspiegels. Er kann direkt aus einer Isohypsenkarte des Grundwasserspiegels herausgelesen werden (siehe untenstehende Formel (2)). Der hydraulische Gradient sollte senkrecht zum betrachteten Querprofil ermittelt werden. Wenn keine Isohypsenkarten vorhanden sind, werden mindestens 3 Grundwassermessstellen gebraucht um einen hydraulischen Gradienten zu berechnen.

Der hydraulische Gradient wird i.d.R. gemäss folgender Formel (2) berechnet:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2)$$

ΔL entspricht der horizontalen Entfernung zwischen zwei Isohypsen, senkrecht zum betrachteten Profil. ΔH entspricht der Differenz des Grundwasserstandes (Höhendifferenz) entlang der Distanz ΔL.

5.2. Kluftgrundwasserleiter

Bei einem Kluftgrundwasserleiter erfolgt die Grundwasserzirkulation entlang untereinander Verbundener Klüfte d.h. entlang zweidimensionaler, flächiger Hohlräume, welche ein Gestein zerschneiden (z.B. Spalten, Fugen, etc.). Die Grundwasserzirkulation im Fels selber kann bei solchen Grundwasserleitern vernachlässigt werden.

Bei einem Kluftgrundwasserleiter sollte in einem ersten Schritt die Heterogenität des Untergrundes beurteilt werden. Wenn ein Kluftnetz dicht genug ist und die Klüfte genügend Verbindungen untereinander aufweisen (siehe schematische Darstellung auf Abbildung 2), damit sie sich wie Poren verhalten, kann das Darcy-Gesetz (1) für die Berechnung des Durchflusses beigezogen werden ([25], [27]) und es können entsprechende Methoden wie für die Lockergesteinsdurchflussberechnungen verwendet werden. Dies gilt aber nur für homogene und schwach heterogene Kluftgrundwasserleiter. In diesem Fall kann der k-Wert mittels Pumpversuch, ähnlich wie bei einem Lockergesteinsgrundwasserleiter, bestimmt werden. Wenn der Kluftgrundwasserleiter dagegen sehr heterogen ausgebildet ist und vereinzelte, stark durchlässige Klüfte den Grundwasserfluss massgeblich bestimmen (siehe schematische Darstellung auf Abbildung 3), kann der

Kluftgrundwasserleiter nicht gleich wie ein Lockergesteinsgrundwasserleiter behandelt werden ([10], [25]).

Für die Unterscheidung von schwach und stark heterogenen Kluftgrundwasserleitern können Schüttungs- und Feldparameterdaten (Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Trübung, etc.) von Quellen beigezogen werden. Des Weiteren können auch strukturgeologische und tektonische Aufnahmen (detaillierte Beschreibung der Trennflächen) oder Resultate aus Markierversuchen dabei helfen, die Heterogenität eines Kluftgrundwasserleiters zu beurteilen ([10]).

Für einen homogenen oder schwach heterogenen Kluftgrundwasserleiter kann der unterirdische Abfluss Q gemäss dem Darcy-Gesetz (1) analog zu einem Lockergesteinsgrundwasserleiter folgendermassen berechnet werden (3) (Kontinuumsansatz, siehe Kapitel 5.2.1):

$$Q = k \cdot i \cdot F \quad (3)$$

Bei einem stark heterogenen Kluftgrundwasserleiter sollte dagegen die Wasserführung einzelner Klüfte betrachtet werden (Kluftansatz, siehe Kapitel 5.2.2).

Folgende Symbole und Beziehungen werden in den im Folgenden angegebenen Formeln verwendet:

- Erdbeschleunigung: g
- Fliessgeschwindigkeit: v
- Dichte von Wasser: ρ_w
- Dynamische Zähigkeit*: μ
- Kinematische Zähigkeit*: $\upsilon = \mu/\rho_w$
- Tiefe/Länge der Kluft unter GW-Spiegel: w
- Kluftöffnung: b
- Mittlerer Kluftabstand: B
- Anzahl Klüfte pro Längeneinheit: N
- Hydraulischer Durchmesser: $D_h = 2b$
- Absolute Rauigkeit: d = Breite der Unregelmässigkeiten der Kluftwand (vgl. Abbildung 4)
- Relative Rauigkeit: $d_{rel.} = d/D_h$
- Reynoldszahl: $Re = D_h v/\upsilon = 2bv/\upsilon$
- Widerstandsbeiwert: λ
- Standrohrspiegelgefälle: $\partial h/\partial r$
- Hydraulischer Gradient: i
- k-Wert Kluftfüllung: k_F

*= Viskosität

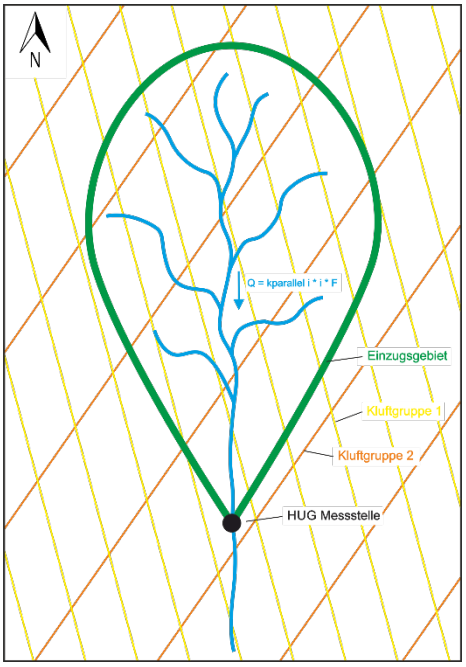


Abbildung 2: schematische Darstellung eines regelmässigen, homogenen Kluftnetzes mit zwei Kluftgruppen (gelb und orange).

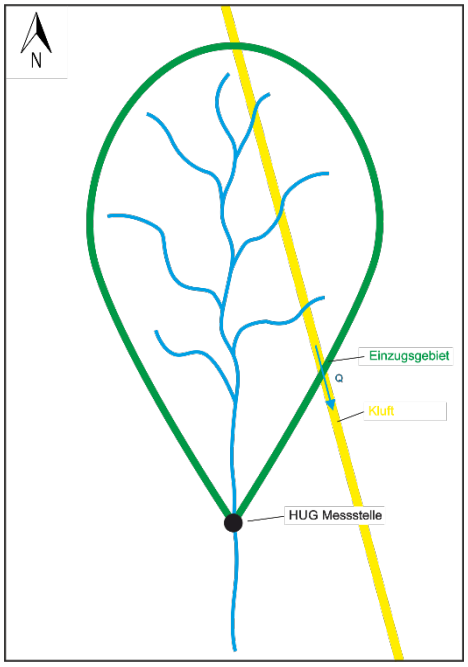


Abbildung 3: schematische Darstellung einer heterogenen Zerklüftung mit einer einzigen Kluft (gelb), welche den Grundwasserfluss Q bestimmt.

5.2.1. Kontinuumsansatz

Die Untersuchung einzelner Klüfte macht nur Sinn, wenn der Einfluss einzelner Klüfte auf den Grundwasserdurchfluss grösser ist, als der für den Kontinuumsansatz bestimmte Modellfehler. Bei allen anderen Fragestellungen sollte der sogenannte Kontinuumsansatz gewählt werden. Dabei werden nicht mehr einzelne Klüfte betrachtet, sondern das Felsvolumen wird als Kontinuum mit einer gewissen homogenen hydraulischen Leitfähigkeit angesehen ([13]). Der Grundwasserfluss unterhalb eines Fliessgewässers kann dann mit dem Darcy-Gesetz (1) gemäss folgender Formel berechnet werden:

$$Q = k \cdot i \cdot F \ (entspricht\ 1\ und\ 3)$$

Die für die Berechnung benötigten Eingabeparameter werden untenstehend kurz erläutert. Auf den schematischen Skizzen in den Anhängen 5 bis 7 sind die Parameter graphisch dargestellt.

5.2.1.1. Räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters (Durchflussfläche F)

Die räumliche Ausdehnung eines Kluftgrundwasserleiters hängt von tektonischen und strukturgeologischen Kriterien ab. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters hängt unter anderem von der Tiefgründigkeit der spröden Deformation des Felsens ab. Die Grenze zwischen dem zerklüfteten und dem gesunden Fels sollte in jedem einzelnen Fall anhand von Bohrungen oder/und anhand anderer Erkundungsmethoden (z.B. Geophysik) bestimmt werden. Dabei gilt zu beachten, dass gemäss [31] Klüfte bis in Tiefen von mehreren km wasserführend sein können.

Wenn eine gegebene Felsformation vollständig zerklüftet ist (d.h. es ist kein gesunder Fels vorhanden), wird der Kluftgrundwasserleiter durch den Grundwasserstauer (undurchlässige Formation, z.B. Mergel oder Tonstein) begrenzt.

In jedem Fall sollte auf der Höhe der Abflussmessstelle ein geologisch-strukturgeologisches Querprofil erstellt werden.

Des Weiteren hängt die Durchflussfläche F auch von der Lage des Grundwasserspiegels ab. Bei Kluftgrundwasserleitern ist es möglich, dass das oberflächliche Einzugsgebiet nicht mit dem unterirdischen übereinstimmt. Die Durchflussfläche sollte, wenn möglich, anhand des unterirdischen Einzugsgebietes, welches durch die Grundwasserscheide (und nicht die topographische Wasserscheide) gegeben ist, bestimmt werden (siehe Anhang 5).

5.2.1.2. Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters (k-Wert)

Die Durchlässigkeit eines Kluftgrundwasserleiters hängt in erster Linie von der Anzahl an Kluftgruppen und von der Anzahl an Klüften in jeder Gruppe (Kluftdichte), sowie von der Länge, der Ausdehnung, der Öffnung und der Verbundenheit der Klüfte ab.

Der k-Wert homogener und schwach heterogener Kluftgrundwasserleiter, für die das Darcy-Gesetz Gültigkeit hat, kann - ähnlich wie bei einem Lockergesteinsgrundwasserleiter - mittels Pumpversuch bestimmt werden. Bei geringen Durchlässigkeiten kann das Wasser dabei, anstatt aus der Bohrung gepumpt zu werden, auch in die Bohrung eingespeist werden. Bei sehr geringen Durchlässigkeiten werden eher Slug- oder Pulse-Teste durchgeführt.

In Felsbohrungen werden oft auch Verpressversuche durchgeführt (sog. Lugeon Tests). Dabei wird Wasser unter Druck in eine durch Packer isolierte Teilstrecke der Bohrung gepresst. Das Resultat ergibt einen Wert in der Einheit "Lugeon". Es gibt zwar keine allgemein gültige Umrechnungsformel, um Lugeon Werte in k-Werte umzuwandeln, unter gewissen Annahmen kann aber aus der Verpressungsrate des Lugeon Tests durchaus ein k-Wert berechnet werden. Es ist dabei aber wichtig, die lokalen, geologischen Verhältnisse zu kennen (siehe [9]).

Alternativ kann die hydraulische Leitfähigkeit eines Kluftgrundwasserleiters auch durch eine detaillierte Beschreibung der Klüfte berechnet werden. Die hydraulische Leitfähigkeit kann für ein Netz parallel verlaufender Klüfte z.B. durch detaillierte Feldaufnahmen sowie mit der untenstehenden Formel (4) abgeschätzt werden. In einem solchen System ist die hydraulische Leitfähigkeit abhängig von der Anzahl und der Öffnung der Klüfte, und kann anhand folgender Formel (4) berechnet werden ([13]):

$$K_x = \frac{\rho_w g N b^3}{12\mu} \quad (4)$$

Die oben angegebene Formel (4) liefert einen k-Wert, welcher für den Grundwasserfluss parallel zur Kluftausrichtung gültig ist.

Klüfte mit grosser Rauigkeit führen dazu, dass die Wasserströmung darin nicht mehr kluftparallel verläuft. Dies beeinflusst den k-Wert. Weitere Einflüsse sind laminares oder turbulentes Fliessen sowie die hydraulische Rauigkeit. Auch für diese Fälle kann ein k-Wert berechnet werden, falls diese Parameter ebenfalls beschrieben werden können ([28]).

Basierend auf der relativen Rauigkeit und der Reynoldszahl können in Abhängigkeit der Kluftmorphologie und der Fliessgeschwindigkeit verschiedene Fliessverhalten (laminar / turbulent; parallel / nicht parallel; hydraulisch glatt / rau) unterschieden werden. Die Grenzwerte für den Übergang von einem Fliessverhalten zum anderen können der Abbildung 4 entnommen werden. Für jeden der Bereiche (I) bis (V) können k-Werte berechnet werden. Die jeweiligen Formeln sind in der Tabelle 1 enthalten und stammen aus [28].

Die in der Tabelle 1 angegebenen Berechnungsformeln ergeben einen k-Wert, welcher jeweils in der Richtung parallel zu den Klüften gültig ist. Senkrecht zu einer gegebenen Kluft findet keine Grundwasserzirkulation statt (undurchlässiger Fels, k = 0).

Ein Kluftnetz besteht in der Regel aus mehreren Kluftgruppen (Set von Klüften gleicher Orientierung). Für jede vorhandene Kluftgruppe sollte ein k-Wert berechnet werden. Für die Berechnung des unterirdischen Grundwasserabflusses wird der k-Wert parallel zu der Grundwasserfliessrichtung, welche durch den hydraulischen Gradienten gegeben ist, benötigt. Der k-Werte jeder einzelner Kluftgruppe muss dazu auf die Grundwasserfliessrichtungsachse projiziert werden. Die projizierten k-Werte können dann addiert werden. Alternativ kann auch ein dreidimensionaler k-Wert Tensor gebildet werden.

Tabelle 1: Formeln für die k-Wert Berechnung anhand einer detaillierten Beschreibung des Kluftnetzes gemäss [28].

Bereich	**k-Wert parallel zu den Klüften**
(I)	$k = \frac{g}{12 \cdot \upsilon} \cdot \frac{b^3}{B}$ (5)
(II)	$k = \frac{1}{B} \cdot \left[\frac{g}{0.079} \cdot \left(\frac{2}{\upsilon}\right)^{0.25} \cdot b^3\right]^{\frac{4}{7}} \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)^{-\frac{3}{7}}$ (6)
(III)	$k = \frac{1}{B} \cdot \left[4 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{3.7}{\frac{d}{D_h}}\right)\right] \cdot b^{1.5} \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)^{-0.5}$ (7)
(IV)	$(a)\ k = \frac{g \cdot b^3}{12 \cdot \upsilon \cdot B} \cdot \frac{1}{\left[1 + 17 \cdot \left(\frac{d}{D_h}\right)^{1.5}\right]}$ (8) oder $(b)\ k = \frac{g \cdot b^3}{12 \cdot \upsilon \cdot B} \cdot \frac{1}{\left[1 + 8.8 \cdot \left(\frac{d}{D_h}\right)^{1.5}\right]}$ (9)
(V)	$(a)\ k = \frac{b^{1.5}}{B} \cdot \left(5.1 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{1.24}{\frac{d}{D_h}}\right)\right) \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)^{-0.5}$ (10) oder $(b)\ k = \frac{b^{1.5}}{B} \cdot \left(4 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{1.9}{\frac{d}{D_h}}\right)\right) \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)^{-0.5}$ (11)
Gefüllte Klüfte	$k = \frac{b}{B} \cdot k_F$ (12)

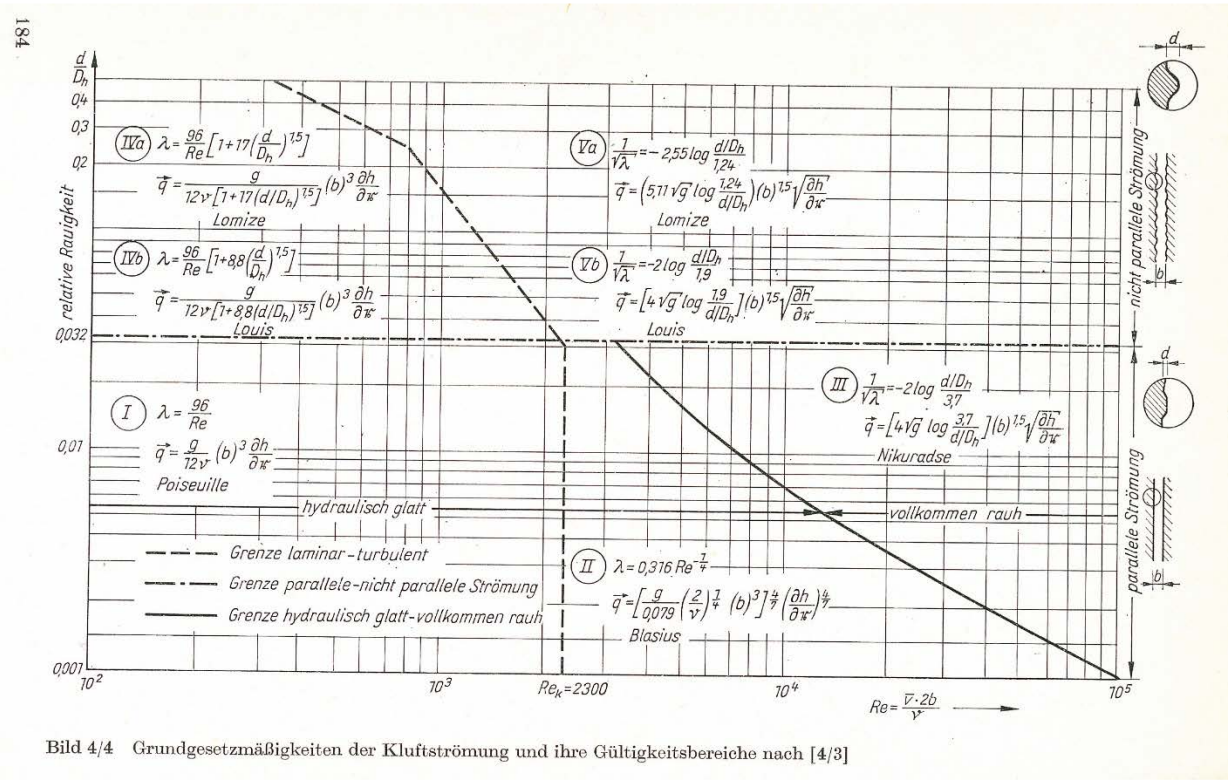


Abbildung 4: Übergänge von laminarem zu turbulentem, von parallelem zu nicht parallelem und von glatt zu rauem Fliessen innerhalb einer Kluft gemäss [28].

5.2.1.3. Hydraulischer Gradient (i)

Der hydraulische Gradient entspricht auch bei einem Kluftgrundwasserleiter dem Gefälle des Grundwasserspiegels und könnte direkt aus einer Isohypsenkarte des Grundwasserspiegels bestimmt werden. Kluftgrundwasserleiter wurden oft deutlich weniger intensiv untersucht als Lockergesteinsgrundwasserleiter. Deshalb sind Grundwasserspiegelisohypsenkarten von Kluftgrundwasserleitern sehr selten vorhanden. Beim Fehlen einer Isohypsenkarte kann der hydraulische Gradient auch durch Grundwasserspiegelmessungen bestimmt werden. Dazu müssen mindestens 3 Grundwasserspiegelmessstellen vorhanden sein, welche nicht kollinear sind. Die Grundwasserspiegelmessstellen sollten möglichst sowohl im Zu- als auch im Abstrombereich der Oberflächenmessstelle vorhanden sein. Wenn immer möglich, sollte versucht werden, die Grundwasserspiegelmessungen über die gesamte Ausdehnung des Grundwasserleiters im Bereich der Oberflächengewässermessstelle zu interpolieren. Dazu sind aber meist mehr als 3 Grundwassermessstellen nötig.

5.2.2. Kluftansatz

Bei der Betrachtung einzelner Klüfte sollte deren Lage, Ausdehnung und Öffnung bekannt sein. Dazu sind eine Detailkartierung sowie zusätzliche geophysikalische Erkundungen notwendig. Auch Bohrungen, welche die Kluft anschneiden, können hilfreiche Informationen liefern. Der Bohrkern muss allerdings im Raum richtig orientiert werden können. In solchen Bohrungen können Bohrlochscanneraufnahmen weitere Informationen über die Klüftung liefern. Bohrlochscanneraufnahmen liefern die genaue räumliche Orientierung des Bohrlochs und der Trennflächen (Schichtflächen, Kluftflächen, Karströhren etc.) in der Bohrlochwand.

Der unterirdische Abfluss einer einzelnen, glatten Kluft mit konstanter Öffnung ist gegeben durch ([13]):

$$Q = \frac{\rho_w \cdot g \cdot b^3 \cdot w}{12 \cdot \mu} \cdot i \quad (13)$$

Die oben erwähnte Formel (13) für den Wasserfluss durch eine einzelne Kluft ist nur gültig bei laminarem Fliessen des Wassers. Bei turbulentem Fliessen ist der Abfluss nicht mehr proportional zum hydraulischen Gradient ([13]).

Die Beurteilung der Art des Fliessens erfolgt über die Reynoldszahl und die relative Rauigkeit gemäss Abbildung 4 ([28]). In Abhängigkeit des vorhandenen Fliessverhaltens kann der unterirdische Abfluss Q durch die entsprechende Kluft mit den in Tabelle 2 zusammengefassten Formeln berechnet werden.

Tabelle 2: Berechnungsformeln für den Abfluss durch eine einzelne Kluft. Leicht modifiziert gemäss [28].

Bereich	Unterirdischer Abfluss durch einzelne Kluft
(I)	$$Q = \frac{g}{12 \cdot \upsilon} \cdot b^3 \cdot w \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right) \quad (14)$$
(II)	$$Q = \left[\frac{g}{0.079} \cdot \left(\frac{2}{\upsilon}\right)^{0.25} \cdot b^3\right]^{\frac{4}{7}} \cdot w \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)^{\frac{4}{7}} \quad (15)$$
(III)	$$Q = \left[4 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{3.7}{\frac{d}{D_h}}\right)\right] \cdot b^{1.5} \cdot w \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)} \quad (16)$$
(IV)	$$(a)\ Q = \frac{g \cdot b^3}{12 \cdot \upsilon \cdot [1 + 17 \cdot (d/D_h)^{1.5}]} \cdot w \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right) \quad (17)$$ oder $$(b)\ Q = \frac{g \cdot b^3}{12 \cdot \upsilon \cdot [1 + 8.8 \cdot (d/D_h)^{1.5}]} \cdot w \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right) \quad (18)$$
(V)	$$(a)\ Q = \left(5.11 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{1.24}{\frac{d}{D_h}}\right)\right) \cdot b^{1.5} \cdot w \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)} \quad (19)$$ oder $$(b)\ Q = \left(4 \cdot \sqrt{g} \cdot log\left(\frac{1.9}{\frac{d}{D_h}}\right)\right) \cdot b^{1.5} \cdot w \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta h}{\delta r}\right)} \quad (20)$$
Gefüllte Kluft	$$Q = b \cdot w \cdot k_F \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta r}\right) \quad (21)$$

Bei einem Kluftgrundwasserleiter kann angenommen werden, dass der Fels selber undurchlässig ist. Beim Vorhandensein von ein paar grossen, sehr stark durchlässigen Klüften, wird die Richtung des Grundwasserflusses deshalb durch die Orientierung der Klüfte bestimmt. Als Folge davon kann der unterirdische Grundwasserfluss nicht mehr auf einem Querprofil auf Höhe der HUG Messstelle betrachtet werden. Die unterirdisch aus dem Einzugsgebiet einer HUG Messstelle abfliessende Grundwassermenge muss an der Stelle betrachtet werden, wo die Klüfte die Grenze des Einzugsgebiets kreuzen bzw. dieses "verlassen".

Bei der in diesem Kapitel beschriebenen Betrachtung gilt zu beachten, dass je mehr der unterirdische Grundwasserfluss durch grosse, einzelne Klüfte bestimmt wird, desto mehr entspricht das Verhalten des Systems einem Karstgrundwasserleiter mit einzelnen grossen Hohlräumen. Solche Systeme sind dann sehr komplex und werden im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht weiter untersucht.

5.3. Kluft- / Porengrundwasserleiter

Bei einem Kluft- / Porengrundwasserleiter erfolgt die Grundwasserzirkulation sowohl entlang von zweidimensionalen Klüften als auch im porösen Fels. Es handelt sich um eine Mischform zwischen einem Porengrundwasserleiter (wie z.B. Lockergesteinsgrundwasserleitern) und einem reinen Kluftgrundwasserleiter.

Wie bei einem Kluftgrundwasserleiter, kann der unterirdische Abfluss auch bei einem Kluft- / Porengrundwasserleiter entweder über den Kontinuumsansatz oder über den Kluftansatz berechnet werden. Für die Wahl des richtigeren Ansatzes, sollte die Heterogenität des Systems beurteilt werden.

Wenn der Grundwasserleiter homogen oder nur schwach heterogen ist und die Grundwasserzirkulation hauptsächlich in den Poren des Felsens und den miteinander verbundenen, regelmässig verteilten Klüften erfolgt, dann sollte der Kontinuumsansatz gewählt werden. Der Kluft- / Porengrundwasserleiter verhält sich dann aus hydrogeologischer Sicht ähnlich wie ein Lockergesteinsgrundwasserleiter und die entsprechenden Berechnungsmethoden, basierend auf dem Darcy-Gesetz (1, 3), können angewendet werden.

Wenn der Grundwasserleiter dagegen stark heterogen ist und die Grundwasserzirkulation hauptsächlich in sehr unregelmässig verteilten, stark durchlässigen Klüften erfolgt, dann sollte der Kluftansatz gewählt werden.

5.3.1. Kontinuumsansatz

Wenn der Kluft- / Porengrundwasserleiter ähnlich wie ein Lockergesteinsgrundwasserleiter funktioniert, kann der unterirdische Abfluss gemäss der folgenden Formel (Darcy-Gesetz) berechnet werden:

$$Q = k \cdot i \cdot F \quad (1{,}3)$$

Die in der Formel benötigten Parameter werden untenstehend kurz erläutert und sind in den Anhängen 8 bis 10 schematisch dargestellt.

5.3.1.1. Räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters (Durchflussfläche F)

Bei einem Kluft- / Porengrundwasserleiter erfolgt die Grundwasserzirkulation nicht nur entlang von Klüften sondern auch in den untereinander verbundenen Poren des intakten Felsens. Der Grundwasserleiter wird also nicht durch die Tiefgründigkeit der Zerklüftung sondern durch den Kontakt zu einer undurchlässigen Felsformation begrenzt. Es sollte deshalb auf Höhe der HUG Messstelle ein geologisch-strukturgeologisches Querprofil erstellt werden.

Des Weiteren hängt die Durchflussfläche F auch von der Lage des Grundwasserspiegels ab. Der Grundwasserspiegel sollte deshalb mit genügender Genauigkeit inter- bez. extrapoliert werden können.

Ähnlich wie bei Kluftgrundwasserleitern ist es auch bei Kluft- / Porengrundwasserleitern möglich, dass das oberflächliche, topographische Einzugsgebiet nicht mit dem unterirdischen übereinstimmt. Für die Bestimmung der Durchflussfläche sollte, wenn möglich, das unterirdische Einzugsgebiet, welches durch die Grundwasserscheide gegeben ist, verwendet werden (vgl. Anhänge 8 bis 10).

5.3.1.2. Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters (k-Wert)

Wenn ein Kluft- / Porengrundwasserleiter nicht vollständig, d.h. bis an dessen Basis, zerklüftet ist, wird die Durchlässigkeit in den oberen, zerklüfteten Bereichen grösser sein als in den unteren, unzerklüfteten Bereichen. Auf dem im Kapitel 5.3.1.1 beschriebenen Querprofil können deshalb auch verschiedene Zonen mit unterschiedlichen k-Werten ausgeschieden werden. In einem solchen Fall sollte anschliessend ein gemittelter, über die Flächen gewichteter k-Wert berechnet werden.

Die Spanbreite der in der Literatur angegebenen, typischen k-Werte von Kluft- / Porengrundwasserleitern ist meist sehr gross. In [8] werden für Sandsteine z.B. k-Werte zwischen 10^{-11} m/s und 10^{-7} m/s angegeben. Damit die Berechnungen mit einer genügenden Genauigkeit (siehe auch Kapitel 5.5) ausgeführt werden können, sollten deshalb keine Literaturwerte verwendet werden. Die lokalen k-Werte sollten mittels Feldversuchen (z.B. Pumpversuch, Lugeon-Test) vor Ort bestimmt werden. Der k-Wert eines Kluft- / Porengrundwasserleiters hängt nicht nur von den Klüften

sondern auch von der Durchlässigkeit des gesunden, porösen Felsens ab. Deshalb kann der k-Wert im Gegensatz zu reinen Kluftgrundwasserleitern auch nicht anhand einer detaillierten Beschreibung der Klüfte berechnet werden.

5.3.1.3. Hydraulischer Gradient (i)

Der hydraulische Gradient entspricht dem Gefälle des Grundwasserspiegels und kann, wenn vorhanden, einer Isohypsenkarte entnommen werden. Ohne Isohypsenkarte sind für die Berechnung des hydraulischen Gradienten Grundwasserspiegelmessungen in mehreren (mindestens 3 nicht kollinearen) Messstellen sowohl oberhalb als auch unterhalb des Standorts der Oberflächengewässermessstelle nötig. Damit der Gradient mit einer genügend grossen Genauigkeit bestimmt werden kann, sollte der Grundwasserspiegel möglichst über den gesamten Grundwasserleiter im Bereich der Oberflächengewässermessstation interpoliert werden können.

5.3.2. Kluftansatz

Wenn die Grundwasserzirkulation hauptsächlich entlang einzelner Klüfte mit einer sehr hohen Durchlässigkeit erfolgt, kann die Porenzirkulation im gesunden Fels vernachlässigt werden und der unterirdische Abfluss kann mit der im Kapitel 5.2.2 beschriebenen Methode berechnet werden.

5.4. Zeitliche Variabilität der Parameter

Von den in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 beschriebenen Parametern sind der hydraulische Gradient und der Grundwasserstand zeitlich variabel. Die Ausstattung von ein paar Grundwassermessstellen (Piezometer, Bohrungen) mit Drucksonden, welche den Grundwasserspiegel kontinuierlich aufzeichnen, erlaubt sowohl die Durchflussfläche F (abhängig vom Grundwasserstand) als auch den hydraulischen Gradient kontinuierlich zu erfassen. Verschiedene hydrologischen Situationen (Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser) sowie saisonale Schwankungen können dadurch erfasst werden.

Wenn bei einem Kluft- oder einem Kluft- / Porengrundwasserleiter der Kluftansatz (Kapitel 5.2.2 und 5.3.2) verwendet wird, so sind die wassergesättigte Tiefe der Kluft (w) und der hydraulische Gradient (i bzw. $\delta h/\delta r$) zeitlich variabel. Auch in einem solchen Fall könnte die zeitliche Entwicklung dieser beiden Parameter mittels Drucksonden, welche den Grundwasserstand in der Kluft kontinuierlich aufzeichnen, erfasst werden. Es gilt aber zu beachten, dass die Reynoldszahl von der Fliessgeschwindigkeit und deshalb auch vom hydraulischen Gradient abhängig ist. Es ist deshalb möglich, dass der Abfluss durch die Kluft, je nach dem in welchem Bereich von Abbildung 4 man sich befindet, mit unterschiedlichen Formeln der Tabelle 2 berechnet werden muss.

5.5. Genauigkeit der Berechnung

5.5.1. Lineare Fehlerfortpflanzung

Die Genauigkeit des berechneten, unterirdischen Abflusses Q, hängt direkt von der Genauigkeit ab, mit welcher die für die Berechnung benötigten Parameter bestimmt worden sind. Die Genauigkeit kann mit der linearen Fehlerfortpflanzung bestimmt werden. Dabei entspricht der Fehler δf einer beliebigen Funktion f(x, y, z, …) der Summe der partiellen Ableitungen, multipliziert mit dem Fehler der jeweiligen Variable (δx, δy, δz, …). Als Formel ausgedrückt:

$$\delta f = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| \delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| \delta y + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right| \delta z + \cdots$$

Bei der Verwendung des Darcy-Gesetzes werden die Parameter k, i und F als Eingabegrössen benötigt. Die Genauigkeit des Abflusses δQ berechnet sich mit der oben erwähnten linearen Fehlerfortpflanzung anhand der Genauigkeiten der einzelnen Parameter/Eingabegrössen (δk, δi und δF) gemäss folgender Formel:

$$\delta Q = i \cdot F \cdot \delta k + k \cdot F \cdot \delta i + k \cdot i \cdot \delta F \quad (22)$$

Diese Formel ist jedoch nur gültig, wenn die Fehler (δk, δi, δF) im Vergleich zu den betrachteten Grössen (k, i, F) klein sind. Die Genauigkeit der einzelnen Parameter/Eingabegrössen (δk, δi, δF) hängt sehr stark davon ab, wie sie berechnet bzw. erhoben worden sind. Sie muss in jedem einzelnen Fall neu beurteilt werden. Neben der Bestimmungsmethode, spielt dabei auch die Datenmenge eine wesentliche Rolle. Eine Durchflussfläche kann z.B. anhand zahlreicher Bohrungen deutlich genauer bestimmt werden als wenn nur wenige Bohrprofile vorliegen.

Wenn die Fehler der Parameter im Vergleich zu der Grösse selber gross sind, kann die oben erwähnte Formel der linearen Fehlerfortpflanzung nicht verwendet werden. Damit die Genauigkeit in solchen Fällen dennoch grob abgeschätzt werden kann, empfehlen wir, den kleinst-, sowie den grösstmöglichen Abfluss zu berechnen, indem Q sowohl mit den minimalen als auch mit den maximalen Werten für k, i und F berechnet wird.

Wenn bei einem Kluft- oder bei einem Kluft- / Porengrundwasserleiter der Kluftansatz verwendet wird, so sollte für die aus der Tabelle 2 gemäss Abbildung 4 gewählte Formel die partielle Ableitung von jedem Parameter berechnet werden. Wie oben beschrieben, ergibt sich die Genauigkeit der Berechnung des unterirdischen Abflusses Q anschliessend durch Aufsummieren der einzelnen partiellen Ableitungen, multipliziert mit dem Fehler der jeweiligen Variablen.

5.5.2. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von Durchflussflächen

Um eine einigermassen zuverlässige Durchflussfläche zeichnen zu können, muss pro 50 bis 100 m Länge mindestens eine Bohrung, welche den Grundwasserstauer erbohrt hat, auf der Profilspur (betrachteter Querschnitt) liegen oder darauf projiziert werden können. Zusätzliche geophysikalische Messungen können die Interpolation der Grundwasserstaueroberfläche zwischen

den Bohrungen erleichtern. Unter den obenerwähnten Bedingungen, kann die Staueroberfläche schätzungsweise mit einer Genauigkeit von +/- 2.5 m angegeben werden. Die Genauigkeit und die benötigte Anzahl Bohrungen hängt aber auch stark von der Komplexität der geologischen Verhältnisse ab und sollte in jedem einzelnen Fall neu beurteilt werden.

Die Durchflussfläche ist des Weiteren vom Grundwasserspiegel abhängig. Wenn die Grundwassermessstellen regelmässig auf der Fläche des Grundwasserleiters in einem Raster von 50 x 50 m bis 100 x 100 m verteilt sind, dürfte der Grundwasserspiegel mit einer Genauigkeit von ca. +/- 0.1 m bestimmt bzw. interpoliert werden können.

Die Durchflussfläche F entlang der gewählten Profilspur ergibt sich durch das Subtrahieren der Grundwasserstauerhöhe von der Grundwasserspiegelhöhe. Der Fehler beträgt somit bei der oben angegebenen Zielgenauigkeit +/- 2.6 m pro Meter Profilspur in horizontaler Richtung. Die Genauigkeit einer Durchflussfläche mit horizontaler Länge L_F kann also mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\delta F = \pm 2.6 \cdot L_F \quad (23)$$

Wenn die Durchflussfläche mit bestehenden Isohypsenkarten des Grundwasserspiegels und des Grundwasserstauers berechnet wird (siehe z.B. Kapitel 10.1.2 bzw. [39]), so kann die Genauigkeit der Berechnung durch den Vergleich der Isohypsenkarten mit tatsächlich bekannten Werten abgeschätzt werden (falls die bekannten Werte nicht für die Interpolation verwendet worden sind oder falls die Interpolation eine Variation auch bei den Messwerten erlaubt; andernfalls geht das nicht, da die Messwerte bei der Interpolation als unveränderlich übernommen werden). Die Kote des Grundwasserstauers ist zum Beispiel in Sondierungen, welche diesen erreicht haben, genau bekannt. Für solche Sondierungen kann die Abweichung der Kote auf der Grundwasserstauerisohypsenkarte zu der tatsächlichen Kote in der Sondierung berechnet werden. Wenn mehrere Sondierungen den Grundwasserstauer erreicht haben, kann mit der quadratischen Fehlerberechnung eine allgemeine Genauigkeit der Grundwasserstauerisohypsenkarte (Interpolationsfehler) bestimmt werden. Das gleiche Vorgehen kann auch für die Abschätzung der Genauigkeit der Grundwasserspiegelisohypsenkarte angewendet werden. Dazu müssen aber die tatsächlichen Grundwasserspiegelkoten in den Sondierungen/Messstellen, welche für die Interpolation der Grundwasserspiegelisohypsen verwendet wurden, bekannt sein. Sind die Genauigkeiten der Grundwasserstauer- und der Grundwasserspiegelisohypsenkarte bekannt, kann anschliessend auch die Genauigkeit der Durchflussfläche berechnet werden.

5.5.3. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von k-Werten

Wenn für Lockergesteinsgrundwasserleiter anhand der lithologischen Beschreibungen k-Werte aus der Literatur gewählt werden, liegt die Genauigkeit meist im Bereich von ca. δk = +/- 10·k. Die Spanbreite der k-Werte für Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter) sind in der Literatur meist sogar noch deutlich grösser. In [8] werden z.B. für zerklüftete, magmatische und metamorphe Felsgesteine k-Werte von ca. 10^{-8} m/s bis 10^{-3} m/s angegeben. Dies führt dazu, dass k-Werte aus der Literatur für spezifische Berechnungsfälle schlecht brauchbar sind.

Die Spanbreite der Werte ist in vielen Fällen so gross, dass die lineare Fehlerfortpflanzung einen unrealistisch grossen Gesamtfehler ergibt.

Statistische Auswertungen mit einer Vielzahl an k-Werten aus kalibrierten, grossräumigen Grundwassermodellen wurden in [6] durchgeführt. Die Studie zeigt, dass die k-Werte in der Regel eine log-Normalverteilung aufweisen und die Standartabweichungen 1 bis 2.5 Grössenordnungen betragen. Selbst mit einer solchen statistischen Auswertung bleibt die Spanbreite möglicher k-Werte für einen gegebenen Felsgrundwasserleiter also sehr gross. Eine wertvolle Schlussfolgerung dieser Studie ist zudem, dass die k-Werte, mit Ausnahme von denjenigen für Karbonatgesteine, Skalenunabhängig sind.

Feldversuche und -aufnahmen zur Erkundung eines spezifischen Grundwasserleiters liefern in der Regel deutlich genauere k-Werte. Die k-Werte sollten deshalb möglichst aus solchen Versuche (z.B. Pumpversuch, Lugeon-Test) oder aus tektonischen/strukturellen Detailaufnahmen (Kluftnetzbeschreibung) stammen. Aus einem Langzeitpumpversuch mit konstanter Absenkung kann der k-Wert zum Beispiel mit einer Genauigkeit von schätzungsweise ca. $\delta k = +/- 0.1 \cdot k$ bis $+/- 0.5 \cdot k$ berechnet werden. Diese Überlegungen dürften auch für einen fein verästelten Kluftgrundwasserleiter gelten. Bei Vorhandensein grösserer Klüfte kann es dagegen auf kurzer Strecke zu stark variierenden Gefällen des Grundwassers kommen, was den Fehler stark beeinflussen dürfte.

Gemäss Angaben der Solexperts AG (Pierrick Altwegg) hängt die Genauigkeit eines Pumpversuchs, eines Slug- oder Pulsetests vom Modell, welches für die Interpretation der Daten verwendet wird, ab. Diese Versuche können jedoch ziemlich gut kontrolliert werden und es ist relativ einfach ersichtlich, ob ein gültiges Modell gewählt wurde. Wenn das nicht der Fall ist, können die Daten mit einem anderen, besser geeigneten Modell neu interpretiert werden. Die Genauigkeit des Lugeon-Tests ist oft weniger gut, weil der Versuch weniger stark kontrolliert werden kann. Allgemein hängt die Genauigkeit des Resultats der oben erwähnten Versuche auch von der Versuchsdauer ab. Je mehr Zeit für den Versuch zur Verfügung steht, umso genauer wird das Resultat. Des Weiteren hängt die Genauigkeit auch von der Qualität der Bohrung selber ab. Anhand der verwendeten Modelle kann in gewissen Fällen auch eine qualitative Fehlerabschätzung durchgeführt werden. Die Genauigkeit hängt aber sehr stark von der Interpretation ab.

5.5.4. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von hydraulischen Gradienten

Die Genauigkeit des hydraulischen Gradienten δi hängt von der Genauigkeit der Parameter ΔH und ΔL ab und errechnet sich gemäss der linearen Fehlerfortpflanzung aus:

$$\delta \mathrm{i} = \frac{1}{\Delta \mathrm{L}} \, \delta \Delta \mathrm{H} + \frac{\Delta H}{\Delta L^2} \, \delta \Delta \mathrm{L} \; (24)$$

Die Genauigkeit des hydraulischen Gradienten hängt dabei sehr stark vom ersten Term der oben angegebenen Formel, d.h. von $\delta \Delta H$, ab. Die Formel zeigt also, wie wichtig es ist, die Grundwasserspiegel mit einer genügend grossen Genauigkeit über den Grundwasserleiter interpolieren zu können, insbesondere bei einem geringen d.h. flachen hydraulischen Gradienten. Dazu sind

meist zahlreiche Grundwassermessstellen nötig. Die Mindestanzahl von 3 nicht kollinearen Messstellen für die Berechnung eines hydraulischen Gradienten i ermöglicht nur eine grobe, noch nicht sehr genaue Schätzung von i.

5.5.5. Allgemeine Überlegung zu der Genauigkeit von Feldmessungen

Allgemein kann erwartet werden, dass Feldmessungen mit folgender Genauigkeit ausgeführt werden:

- Nivellement von Grundwassermessstellen: +/- 1 cm
- Grundwasserspiegel bzw. -stände in Grundwassermessstellen: +/- 1 cm
- Lage der Grundwassermessstellen (X- / Y-Koordinate): +/- 10 cm – Teilweise nur +/- 1 m

5.6. Verfeinerung der Methode - numerische Grundwassermodellierung

Wenn eine ausreichend grosse Datenmenge vorhanden ist, kann für einen gegebenen Grundwasserleiter auch ein numerisches Grundwassermodell (z.B. finite Elemente oder finite Differenzen) erstellt werden, um die Grundwassermenge, welche an der Oberflächengewässermessstation vorbei fliesst, zu bestimmen. Das Vorgehen für Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter) ist leicht anders als für Lockergesteinsgrundwasserleiter. Aus diesem Grund wird die Modellierung der beiden Grundwasserleitertypen untenstehend separat kurz beschrieben.

Es gilt dabei zu beachten, dass die Resultate eines Grundwassermodells nicht unbedingt genauer sind, als die in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 beschriebenen "Handberechnungen". In gewissen Fällen werden solche Handrechnungen sogar für die Kalibration von numerischen Grundwassermodellen verwendet. Ein solches Verfahren wurde z.B. für das Grundwassermodell Emmental ([4]) des Amts für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern verwendet.

Der Nutzen eines numerischen Grundwassermodells ist vor allem die Möglichkeit, Prognosen bezüglich einer Veränderung der Randbedingungen (z.B. weniger Niederschlag) zu erstellen. Des Weiteren ist es mit einem solchen Modell auch möglich, die verschiedenen Randbedingungen zeitlich variabel ins Modell einzubauen und damit jeweils direkt einen unterirdischen Abfluss zu berechnen (kontinuierliche "Aufzeichnung" des unterirdischen Abflusses). Für die Erstellung und die Kalibration eines instationären, numerischen Grundwassermodells braucht es allerdings ziemlich viele Daten.

5.6.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter

In den meisten Fällen sollte ein horizontales 2D Modell genügend gute Ergebnisse liefern, so dass auf eine 3D Modellierung verzichtet werden kann. Bei der Erstellung des Modells, müssen

die diversen Randbedingungen (laterale Begrenzung des Grundwasserleiters, Fliessgewässer, Grundwasserfassungen, etc.) eingebaut werden. Wenn mehrere Messpunkte vorliegen (z.B. für den k-Wert), so können diese über das Modell inter- bzw. extrapoliert werden.

In der Regel werden für die Kalibration des Modells Stichtagmessungen der Grundwasserstände in einer Vielzahl von Grundwassermessstellen benötigt. Die hydraulischen Leitfähigkeiten werden dann solange verändert, bis die Grundwasserstände richtig reproduziert bzw. modelliert werden können. Neben den k-Werten sollte bei der Modelleichung auch die Grundwasser/Fliessgewässer Interaktion kalibriert bzw. angepasst werden.

Mit den meisten Software-Berechnungsmodellen können auch Profile erstellt werden, entlang deren die durchfliessende Grundwassermenge automatisch berechnet wird. Ein solches Profil sollte für die Berechnung des unterirdischen Abflusses quer zum Fliessgewässer und auf Höhe der Abflussmessstelle über die gesamte Modellbreite erstellt werden.

5.6.2. Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter)

Bei einem Felsgrundwasserleiter sollte für die Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge - im Gegensatz zu den Lockergesteinsgrundwasserleitern - ein 3D Modell verwendet werden. In einem ersten Schritt sollte ein geologisches 3D Modell über das gesamte Einzugsgebiet erstellt werden. Damit die Schichtgrenzen im Modell möglichst genau reproduziert werden, sollten alle vorhandenen geologischen Daten (Schichtgrenzen, Schichtfallen, usw.) aus Karten, Profilen und Bohrungen in das Modell integriert werden.

Das geologische Modell kann dann in ein numerisches Grundwassermodell (z.B. finite Elemente oder finite Differenzen) umgewandelt werden, damit darin die Grundwasserzirkulation simuliert werden kann. Die diversen Randbedingungen (laterale Begrenzung des Grundwasserleiters, Fliessgewässer, Grundwasserfassungen, etc.) müssen auch hier in das Grundwassermodell eingebaut werden. Wenn mehrere Messpunkte vorliegen (z.B. für den k-Wert), so können diese über das Modell inter- bzw. extrapoliert werden.

In der Regel werden für die Kalibration des Modells - wie beim Lockergesteinsgrundwasserleiter - Stichtagmessungen der Grundwasserstände in einer Vielzahl von Grundwassermessstellen benötigt. Die hydraulischen Leitfähigkeiten werden dann solange verändert, bis die Grundwasserstände richtig reproduziert bzw. modelliert werden können. Auch hier sollte bei der Modelleichung neben den k-Werten auch die Grundwasser/Fliessgewässer Interaktion kalibriert bzw. angepasst werden.

Wie bei den Lockergesteinsgrundwasserleitern sollte anschliessend ein Profil quer zum Fliessgewässer und auf Höhe der Abflussmessstelle über die gesamte Modellbreite erstellt werden. Entlang eines solchen Profils kann die durchfliessende Grundwassermenge mit den meisten Software-Berechnungsmodellen automatisch berechnet werden.

6. Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit Tracerversuchen

Für die im Kapitel 5 beschriebenen Methoden werden sowohl der k-Wert als auch der hydraulische Gradient für die Berechnung des unterirdischen Abflusses benötigt. Diese beiden Eingabeparameter sind meistens nur dann bekannt, wenn ein Grundwasserleiter bereits intensiv untersucht wurde. In vielen Fällen - insbesondere bei Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleitern - sind diese Parameter nicht bekannt und müssten durch intensive Felduntersuchungen (Erstellen von Bohrungen, Durchführung von Pumpversuchen, etc.) erhoben werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine Methode vorgestellt, welche eine Berechnung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit weniger Daten bzw. mit einfacheren Felduntersuchungen ermöglichen soll. Unabhängig vom Grundwasserleitertyp wird vorgeschlagen, dazu auf Tracerversuche zurückzugreifen.

Tracerversuche können durchgeführt werden, um die unterirdischen Fliesswege zu eruieren und ermöglichen unter gewissen Bedingungen, den sogenannten "Darcy Fluss" (q) zu bestimmen, ohne den k-Wert und den hydraulischen Gradienten zu kennen. Der Darcy Fluss (25) entspricht dem Produkt von k-Wert und hydraulischem Gradient:

$$q = k \cdot i \ (25)$$

Der unterirdische Abfluss Q ergibt sich gemäss dem Darcy-Gesetz durch die Multiplikation von q mit der Durchflussfläche F (26):

$$Q = q \cdot F \ (26)$$

Es gibt eine Vielzahl an Tracerversuchsanordnungen, welche je nach Problemstellung für die Berechnung des Darcy Flusses beigezogen werden können. In den untenstehenden Kapiteln werden verschiedene Tracerversuche vorgestellt, welche für die Ermittlung des unterirdischen Abflusses nützlich sein können.

Damit die untenstehenden Tracermethoden an einem Fallbeispiel hätten getestet werden können, wurden die Resultate verschiedener Tracerversuche im Zuströmbereich von HUG Messstellen eingeholt. Die Standorte von ehemaligen Tracerversuchen können in [38] abgefragt werden. Details zu den Tracerversuchen, wie z.B. der verwendete Tracer, die Eingabemenge und das Eingabemilieu, können bei der Koordinationsstelle für Markierversuche des BAFU (InfoTracer) eingeholt werden. Die für einen Versuch verantwortliche Stelle (Büro, Universität, etc.) und die verantwortliche Person werden ebenfalls angegeben. Um die Resultate der Versuche zu bekommen, muss mit der zuständigen Stelle/Person Kontakt aufgenommen werden. Dies wurde für folgende HUG Messstellen gemacht:

- 2308 Goldach
- 2343 Langeten
- 2349 Breggia
- 2414 Rietholzbach
- 2126 Murg
- 2635 Grossbach

Die Tracerversuche im Zuströmbereich der oben erwähnten Messstationen wurden mehrheitlich im Rahmen von Pumpversuchen durchgeführt. Die Grundwasserfliessverhältnisse wurden also durch den Pumpvorgang beeinträchtigt und entsprechen deshalb nicht den natürlich vorkommenden Verhältnissen. Aus diesem Grund konnten die Resultate der Tracerversuche nicht für die Berechnung des unterirdischen Abflusses verwendet werden.

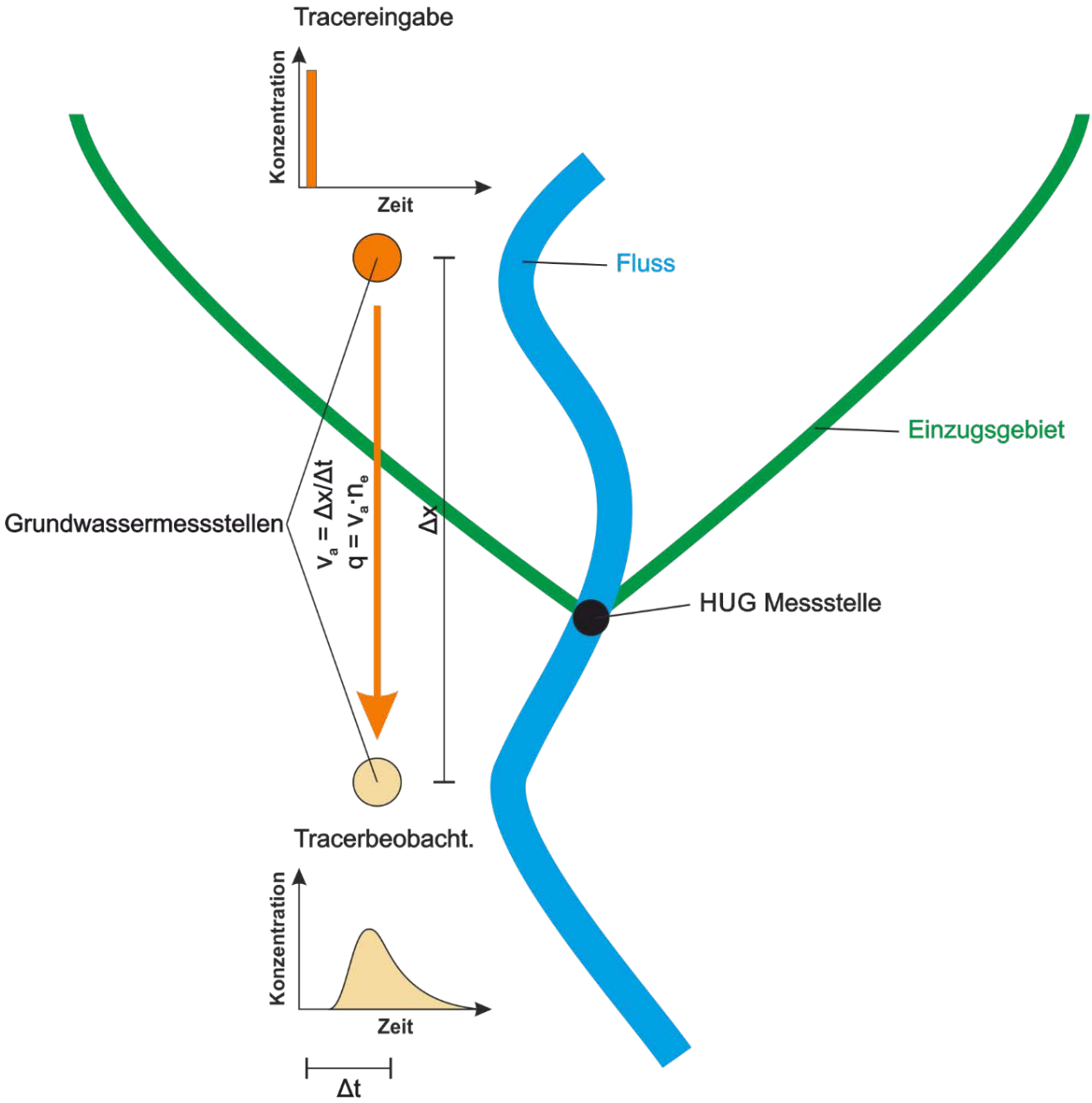
Wir empfehlen deshalb auch, die unten aufgeführten Methoden an einem bereits gut erkundeten Grundwasserleiter zu testen und mit einer anderen Berechnungsmethode (z.B. gemäss Kapitel 5) zu vergleichen. Der Vergleich sollte insbesondere auch aufzeigen, wie genau die unterirdische Abflussmenge mit lokalen Tracerversuchen berechnet werden kann. Dazu ist jedoch die Durchführung von speziell für die Aufgabenstellung dimensionierten Tracerversuchen (für die Fragestellung korrekte Versuchsanordnung) notwendig.

6.1. Natürlicher Gradient Tracerversuch (klassischer Versuch)

Bei einem klassischen natürlichen Gradient Tracerversuch wird ein Tracer (Salz, fluoreszierender Tracer, etc.) in eine Eingabemessstelle eingespeist. Dessen Ankunft wird anschliessend an einer Beobachtungsmessstelle im Abstrom verfolgt. Anhand der Tracerdurchgangskurve (Ganglinie) kann die Abstandsgeschwindigkeit v_a (tatsächliche Geschwindigkeit des fliessenden Grundwassers) berechnet werden. Wenn zusätzlich auch die effektive Porosität n_e des Grundwasserleiters bekannt ist, errechnet sich der Darcy Fluss nach folgender Formel (27) ([24]):

$$q = v_a \cdot n_e \quad (27)$$

Dabei soll v_a die natürlichen Grundwasserverhältnisse abbilden (keine anthropogenen Einflüsse wie Pumpvorgang in Brunnen, Grundwasseranreicherung, etc.). Die Verbindungslinie zwischen Eingabe- und Beobachtungsmessstelle soll möglichst senkrecht zum Profil, entlang welchem der unterirdische Abfluss berechnet werden soll, liegen. Im Idealfall soll sich die HUG Messstelle zwischen Eingabe- und Beobachtungsmessstelle befinden. Das Vorgehen ist auf Abbildung 5 schematisch dargestellt.



Legende:

v_a = Abstandsgeschwindigkeit
q = Darcy Fluss
n_e = Effektive Porosität
Δx = Abstand zwischen Eingabe- und Beobachtungsmessstelle
Δt = Zeit zwischen Eingabe und Ankunft des Tracers

Abbildung 5: Schematische Darstellung eines klassischen Tracerversuchs (natürlicher Gradient).

Die effektive Porosität bzw. der Speicherkoeffizient kann anhand der Daten (zeitliche Veränderung der Absenkung) eines instationären Pumpversuchs (keine stabile Absenkung) berechnet werden. Typische Werte können auch der Literatur entnommen werden (siehe z.B. [25])

Eine weitere Möglichkeit, welche jedoch lediglich eine Grössenordnung von n_e liefert, ist die Verwendung und Auswertung von Quellschüttungen oder Abflussdaten von Fliessgewässern. Dabei wird die Trockenwetterkurve verwendet (gemäss Verfahren von Maillet (1905) in [24] oder [27]). Die Abnahme der Quellschüttung oder des Abflusses eines Fliessgewässers wird gemäss diesem Verfahren mit einem exponentiellen Verlauf angenähert (28):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (28)$$

Mit:
- Q_0 = maximale Schüttung oder Abfluss zur Zeit t_0
- Q_t = Schüttung oder Abfluss zur Zeit t
- t = Zeit zwischen Q_0 und Q_t
- α = Quellen- oder Gebietsspezifische Konstante ("Austrocknungskonstante")

Die Konstante α berechnet sich nach Umformen der oben angegebenen Formel mit:

$$\alpha = \frac{log_{10}(Q_0) - log_{10}(Q_t)}{t \cdot log_{10}(e)} \quad (29)$$

Die Konstante α ist ein quellen- bzw. flussspezifischer Parameter, welcher für jedes Einzugsgebiet separat und gleichzeitig besonders exakt bestimmt werden muss. Dazu sind mehrere Schüttungs- bzw. Abflussmessungen notwendig. Anhand dieser Messungen kann α graphisch bestimmt werden (vgl. [24] und [27]). Der Wert α ist vom Speichervolumen des Grundwasserleiters abhängig und kann beigezogen werden, um die zu einem gegebenen Zeitpunkt noch abflussfähige Grundwassermenge bzw. der Grundwasservorrat (Q_s) abzuschätzen ([24]):

$$Q_s = \frac{Q_1}{\alpha} \quad (30)$$

Q_1 entspricht dabei der Quellschüttung bzw. dem Abfluss zum Zeitpunkt, an welchem der Grundwasservorrat abgeschätzt werden soll. Wenn zusätzlich die Geometrie des Grundwasserleiters, insbesondere das wassergesättigte Grundwasserleitervolumen (bzw. das Grundwasserköpervolumen) V_e, welches von der Quelle oder vom Fluss entwässert wird, bekannt ist, kann die effektive Porosität mit folgender Formel abgeschätzt werden ([24]):

$$n_e = \frac{Q_s}{V_e} \quad (31)$$

Das oben beschriebene Verfahren liefert aber nur eine grobe Schätzung der Porosität. Der resultierende Wert sollte kritisch betrachtet und durch zusätzliche Untersuchungen bestätigt bzw. genauer bestimmt werden.

Der natürliche Gradient Tracerversuch ist in Kluftgrundwasserleitern schwieriger durchzuführen als in Lockergesteinsgrundwasserleitern. Dadurch, dass sich der Tracer im Kluftnetz oft sehr heterogen verteilt, kann es sein, dass der Tracer zu einem grossen Anteil oder sogar vollständig neben der Beobachtungsmessstelle vorbeifliesst. Dieses Risiko besteht selbst bei der Verwendung von mehreren Beobachtungsmessstellen (Netz) im Abstrom der Eingabemessstelle. Zudem ist es bei wenig durchlässigen Kluftgrundwasserleitern auch schwierig, Proben aus der Beobachtungsmessstelle zu entnehmen, ohne die in-situ Fliessbedingungen zu stören (z.B. durch die Veränderung des Grundwasserdruckspiegels durch den Pumpvorgang). Ein weiteres Problem ist in solchen Fällen die Verdünnung der Tracerlösung (Reduktion der Konzentration) durch Grundwasser, welches vor der Ankunft des Tracers bereits in der Beobachtungsmessstelle vorhanden ist ([16]). Die Versuchsanordnung sollte deshalb vorsichtig gewählt und der Versuch korrekt dimensioniert werden.

Um das Risiko, dass der Tracer unbemerkt an der Beobachtungsmessstelle vorbeifliesst, zu reduzieren, sollten die Eingabe- und die Beobachtungsmessstelle möglichst nahe beieinander liegen, unabhängig vom Grundwasserleitertyp.

Die Vorteile dieser Methode sind jedoch, dass im Idealfall nur zwei Grundwassermessstellen benötigt werden und dass der hydraulische Gradient und der k-Wert für die Berechnung nicht bekannt sein müssen. Es gilt aber zu beachten, dass dafür die nutzbare Porosität bekannt sein muss.

6.2. Borehole dilution Test

Anhand des sogenannten borehole dilution Tests kann der Darcy Fluss direkt in einer Bohrung bzw. in einem Brunnen bestimmt werden, ohne dass dafür der k-Wert oder der hydraulische Gradient bekannt sein müssen.

Bei diesem Testverfahren wird nur eine Messstelle (Bohrung, Brunnen) gebraucht. Ein Tracer (Salz, fluoreszierender Tracer, etc.) wird in derselben Messstelle eingespeist und beobachtet. Der Tracer wird homogen über die gesamte Länge der Bohrung verteilt. Zusammen mit dem natürlich durch die Bohrung fliessenden Grundwasserfluss wird der Tracer anschliessend aus der Bohrung wegtransportiert. Die Abnahme der Tracerkonzentration C kann mit dem Darcy Fluss q korreliert werden. Das Vorgehen ist u.a. in [24] sowie in [27] erläutert und ist auf Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Für die Berechnung werden folgende Grössen verwendet:

- C_0 = Anfangskonzentration des Tracers
- C_t = Konzentration des Tracers zur Zeit t
- r = Brunnenradius
- h = Wassersäule im Brunnen
- V_{Br} = Wasservolumen im Brunnen* = $\pi \cdot r^2 \cdot h$
- F_{Br} = Längsschnittfläche des Brunnenfilters* = $2 \cdot r \cdot h$
- Q_{Br} = Volumenstrom durch den Brunnen
- q = Darcy Fluss
- t = Zeit
- $\frac{dc}{dt}$ = Abnahme der Tracerkonzentration mit der Zeit

*__Annahme:__ Brunnen bis über den Grundwasserspiegel vollständig verfiltert

Die zeitliche Konzentrationsabnahme im Brunnen ist gegeben durch:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{C_0}{V_{Br}} \cdot Q$$

Nach Umformen, kann der Volumenstrom durch den Brunnen mit folgender Formel angegeben werden:

$$Q = \frac{V_{Br}}{dt} \cdot \frac{dc}{C_0} \quad (32)$$

Durch integrieren erhält man folgende Gleichung:

$$Q = \frac{V_{Br}}{t} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right)$$

Der Darcy Fluss ist gegeben durch:

$$q = \frac{Q}{F_{Br}} = \frac{V_{Br}}{F_{Br} \cdot t} \cdot ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = \frac{\pi \cdot r}{2 \cdot t} \cdot ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) \quad (33)$$

Wenn der Hohlraum zwischen der Bohrlochwand und dem Brunnen mit Filterkies verfüllt wurde, so ist die Ausströmung aus dem Brunnen meist nicht gleichmässig isotrop. Sie wird durch den Filterwiderstand und das Filterkies beeinflusst. Aus diesem Grund sollte ein Korrekturfaktor α, welcher den Filterwiderstand berücksichtigt, in die oben angegebene Formel eingefügt werden ([24]):

$$q = \frac{\pi \cdot r}{2 \cdot t \cdot \alpha} \cdot ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) \quad (34)$$

Der Korrekturfaktor ist gemäss [24] gegeben durch:

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_{f2}}{k_{f1}} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad (35)$$

Mit folgenden Grössen:

- r_1 = Innendurchmesser des Filters
- r_2 = Aussendurchmesser des Filters
- k_{f1} = Durchlässigkeit des Filters
- k_{f2} = Durchlässigkeit des Grundwasserleiters

Damit die Methode angewendet werden kann, sollten in der Bohrung möglichst keine vertikalen Strömungen vorhanden sein. Wenn vertikale Strömungen beobachtet werden (z.B. durch einen vorgängig durchgeführten Flowmeter Test), sollte der borehole dilution Test mit Hilfe von Packern (Isolation kurzer Teilstrecken) durchgeführt werden. Insbesondere in Kluftgrundwasserleitern ist es meisten notwendig, mit Packern zu arbeiten.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist, dass in der Regel keine Information über die Richtung von q gewonnen werden kann. Es kann also nicht ermittelt werden, in welche Richtung das Grundwasser fliesst. Eine Ausnahme bilden radioaktive Tracer. Nachdem der radioaktive Tracer aus dem Brunnen bzw. der Bohrung geflossen ist, kann eine Richtungssonde, deren Öffnung um 360° gedreht werden kann, eingeführt werden. Die Richtung, in welcher die maximale radioaktive Strahlung gemessen wird, entspricht der Fliessrichtung des Grundwassers ([27]). Des Weiteren werden auch laufend neue Messgeräte/Methoden entwickelt, welche z.T. ermöglichen auch mit anderen Tracern eine Fliessrichtung zu bestimmen (siehe z.B. [3]). Ob diese Methoden auch ausserhalb der Forschung - in der Praxis - angeboten werden, müsste näher abgeklärt werden.

Die Methode weist aber folgende Vorteile auf:

- es wird nur eine Grundwassermessstelle benötigt
- es besteht kein Risiko, dass der Tracer an der Beobachtungsmessstelle vorbeifliesst
- der hydraulische Gradient und der k-Wert müssen nicht bekannt sein
- es kann ein Tiefenprofil der q Werte erstellt werden

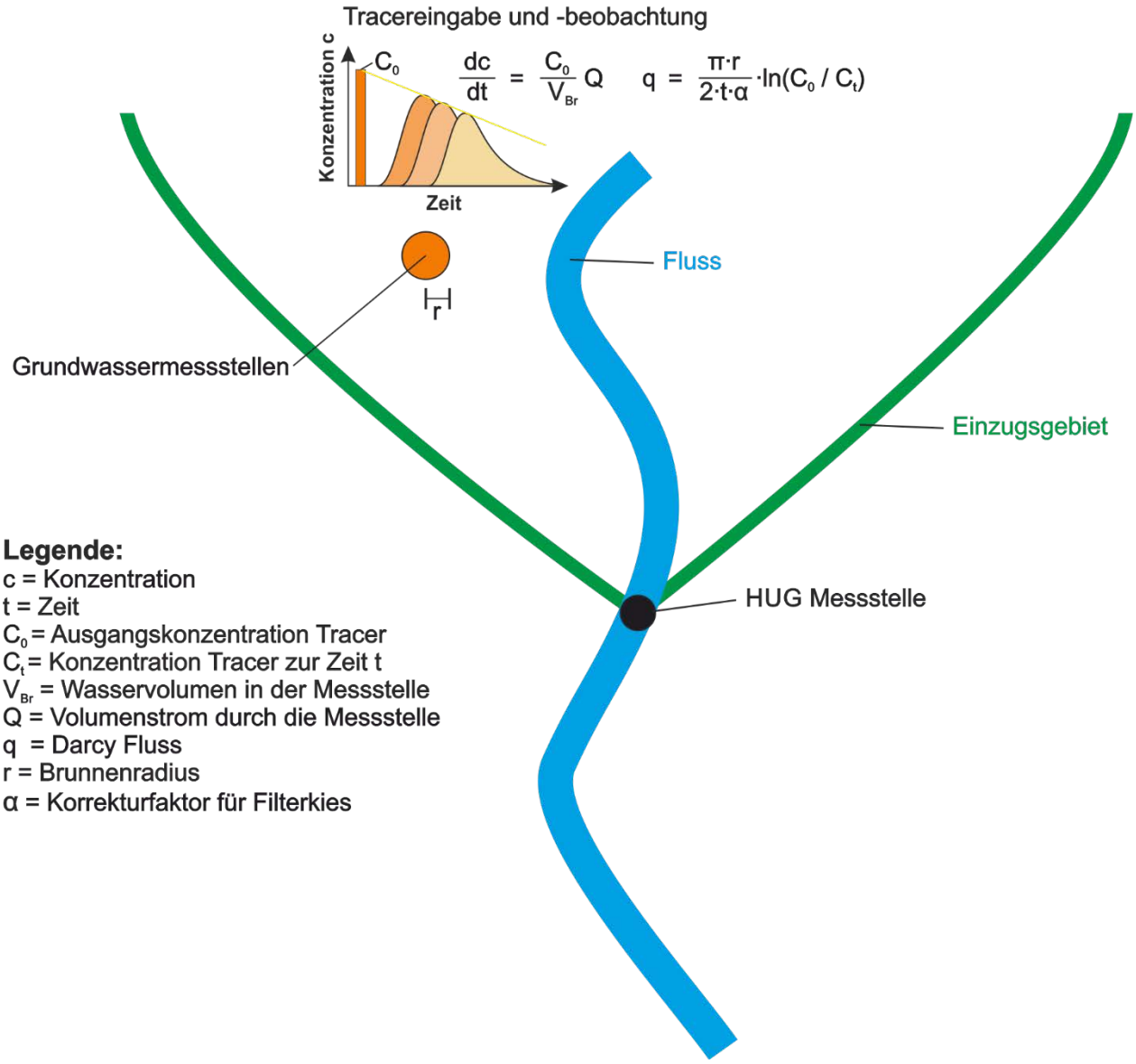


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines borehole dilution Tests.

6.3. Tracerversuch im Fliessgewässer zur Messung des Abflusses

In gewissen Fällen fliesst das Oberflächengewässer erst knapp oberhalb der Oberflächengewässermessstelle teilweise im Grundwasserleiter. Als Beispiele können die HUG Messstellen 2112 (Sitter in Appenzell), 2607 (Goneri in Oberwald) oder 2612 (Riale di Pincascia in Lavertezzo) betrachtet werden. In allen drei Fällen fliesst der Fluss oberhalb der Messstelle auf einer kurzen

Distanz über Lockergesteine, welche als Hauptgrundwasserleiter betrachtet werden. Weiter flussaufwärts fliesst das Gewässer jedoch auf felsigem Grund mit einer deutlich geringeren Durchlässigkeit.

In solchen Fällen kann angenommen werden, dass sämtliches Grundwasser im Lockergesteinsgrundwasserleiter durch die Infiltration von Flusswasser gebildet wurde. Eine Grundwasserneubildung durch die Infiltration der Niederschläge kann aufgrund der geringen Fläche des Lockergesteinsgrundwasserleiters oberhalb der Oberflächengewässermessstelle vernachlässigt werden. Die unterirdisch neben der Oberflächengewässermessstelle abfliessende Grundwassermenge entspricht also in etwa dem Wasserverlust des Fliessgewässers entlang der Strecke, auf welcher es über die Lockergesteine bzw. den Grundwasserleiter fliesst.

Die Flusswasserverluste können mit Hilfe eines Tracerversuchs im Fliessgewässer selber gemessen werden. Die Tracereingabe sollte oberhalb des Lockergesteinsgrundwasserleiters, im Bereich, wo die Flusssohle auf Fels liegt, erfolgen. Beim Kontakt zwischen Lockergestein und Fels (bzw. zwischen Grundwasserleiter und -stauer) sollte der Tracer homogen im Flusswasser verteilt sein. Es ist daher auf eine gute Durchmischung zu achten. Die eingegebene Tracermasse M_0 muss exakt bekannt sein. Der zeitliche Verlauf der Tracerkonzentration (Ganglinie mit einem Konzentrationspeak) sollte anschliessend flussabwärts an einem Beobachtungspunkt gemessen werden. Als Beobachtungspunkt eignet sich entweder der Kontakt zwischen Lockergestein und Fels oder die Oberflächengewässermessstelle (z.B. eine HUG Messstelle).

Wenn die Messung beim Kontakt zwischen Lockergestein und Fels stattfindet und angenommen werden kann, dass in den Fels kein Wasser aus dem Fliessgewässer infiltriert, so kann aus der Tracerdurchgangskurve der Abfluss des Fliessgewässers an diesem Beobachtungspunkt, $Q_{Beob.}$, berechnet werden. Dabei muss die Tracerkonzentration über die Zeit integriert werden. Anschliessend wird die eingegebene Tracermasse M_0 durch die über die Zeit integrierte zeitabhängige Tracerkonzentration geteilt. So kann der Abfluss im Fliessgewässer ($Q_{Beob.}$) berechnet werden. Wenn Salz (NaCl) als Tracer verwendet wird, ist diese Methode auch als "Salzverdünnungsmethode" bekannt. Der Wasserverlust (Q) entspricht dann der Differenz zwischen dem Abfluss an der Oberflächengewässer / HUG Messstelle (Q_{HUG}) und dem Abfluss am Beobachtungspunkt ($Q_{Beob.}$) bzw. $Q = Q_{Beob.} - Q_{HUG}$. Dieser Wasserverlust fliesst unterirdisch an der Oberflächengewässer- / HUG Messstelle vorbei. Die Berechnung ist auch gültig, wenn es zwischen dem Kontakt Grundwasserleiter / -stauer (d.h. dem Bestimmungsort von $Q_{Beob.}$) und der Oberflächengewässer bzw. HUG Messstelle zu einer Grundwasserexfiltration kommt. Dieses in den Fluss zurückfliessende Grundwasser wird an der Oberflächengewässer oder HUG Messstelle erfasst und beeinflusst die Berechnung deshalb nicht. Das Vorgehen ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

Wenn die Messung auf Höhe der Oberflächengewässer / HUG Messstelle erfolgt, kann aus der Tracerdurchgangskurve die Tracermasse M_{HUG}, welche an der Messstelle vorbeifliesst, berechnet werden. Dazu wird die Tracerkonzentration über die Zeit integriert und mit dem an der Oberflächengewässer / HUG Messstelle gemessenen Abfluss multipliziert. Wenn das Fliessgewässer zwischen Eingabe- und Beobachtungspunkt Wasser verliert ist $M_0 > M_{HUG}$. Die an der Oberflächengewässer / HUG Messstelle abfliessende Wassermenge entspricht dem Verhältnis von M_{HUG}

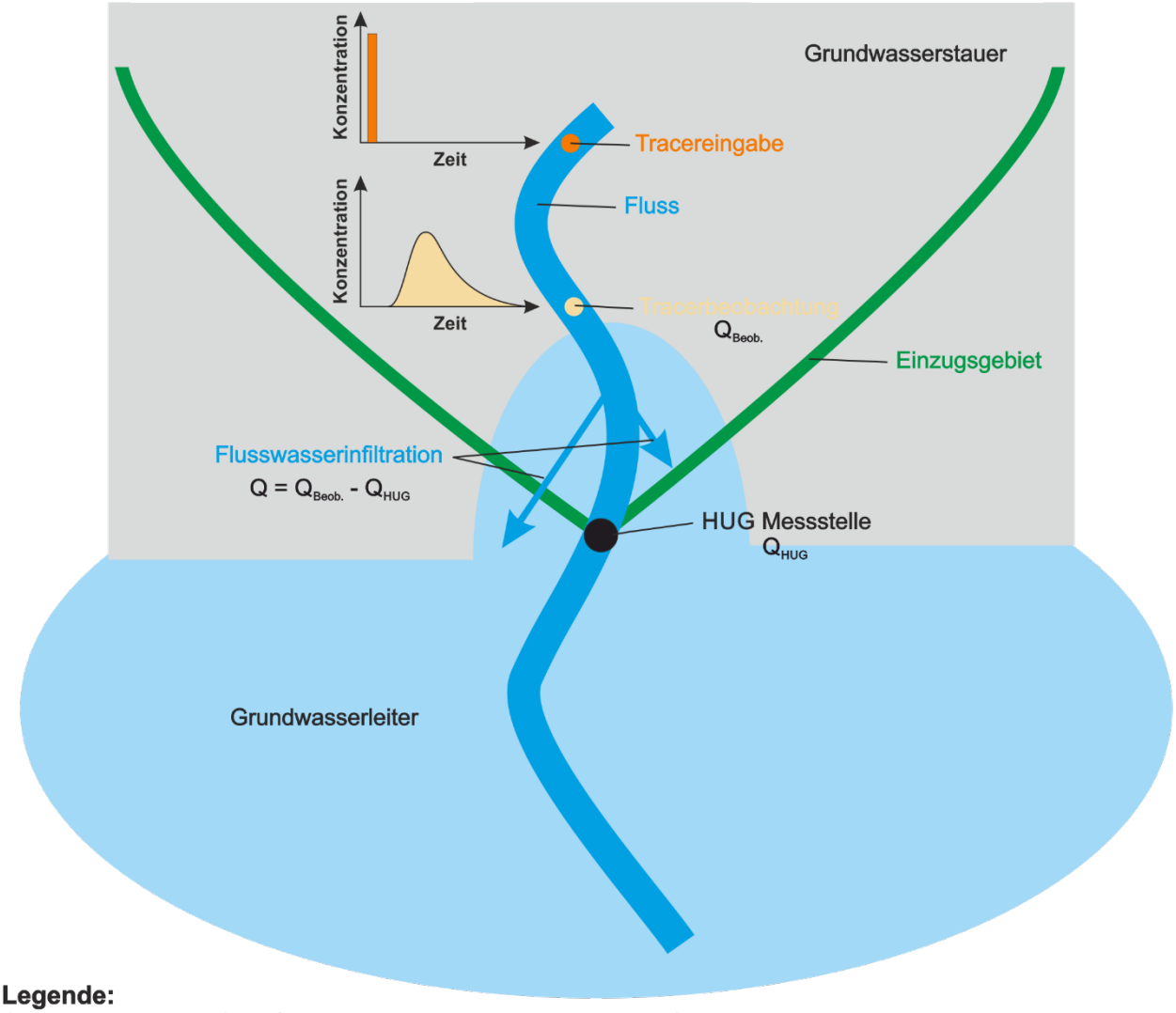
zu M_0, multipliziert mit dem Abfluss Q_0 beim Kontakt vom Grundwasserleiter zum Grundwasserstauer d.h. $Q_{HUG} = (M_{HUG}/M_0)\cdot Q_0$. Für die Berechnung des Flusswasserverlustes Q muss des Weiteren berücksichtigt werden, dass $Q_0 = Q_{HUG} + Q$. Der Wasserverlust des Flusses, Q, welcher der unterirdisch an der Oberflächengewässer- bzw. HUG-Messstelle vorbeifliessenden Grundwassermenge entspricht, kann gemäss Formel (36) berechnet werden.

$$Q = \frac{M_0}{M_{HUG}} \cdot Q_{HUG} - Q_{HUG} \quad (36)$$

Auf Abbildung 8 ist das Vorgehen schematisch dargestellt. Auch in dem Fall, kann es entlang der Strecke zwischen dem Übergang vom Grundwasserleiter zum Grundwasserstauer und der Oberflächengewässer- bzw. HUG Messstelle zu einer Grundwasserexfiltration kommen. Dieser Prozess hat keinen Einfluss auf die Berechnung, sofern die Tracerkonzentration im Fluss so lange gemessen wird, bis die gesamte Tracermenge, welche zusammen mit der Grundwasserexfiltration wieder zurück in den Fluss fliesst, erfasst wird. Diese Bedingung sollte aber in jedem einzelnen Fall kritisch überprüft werden.

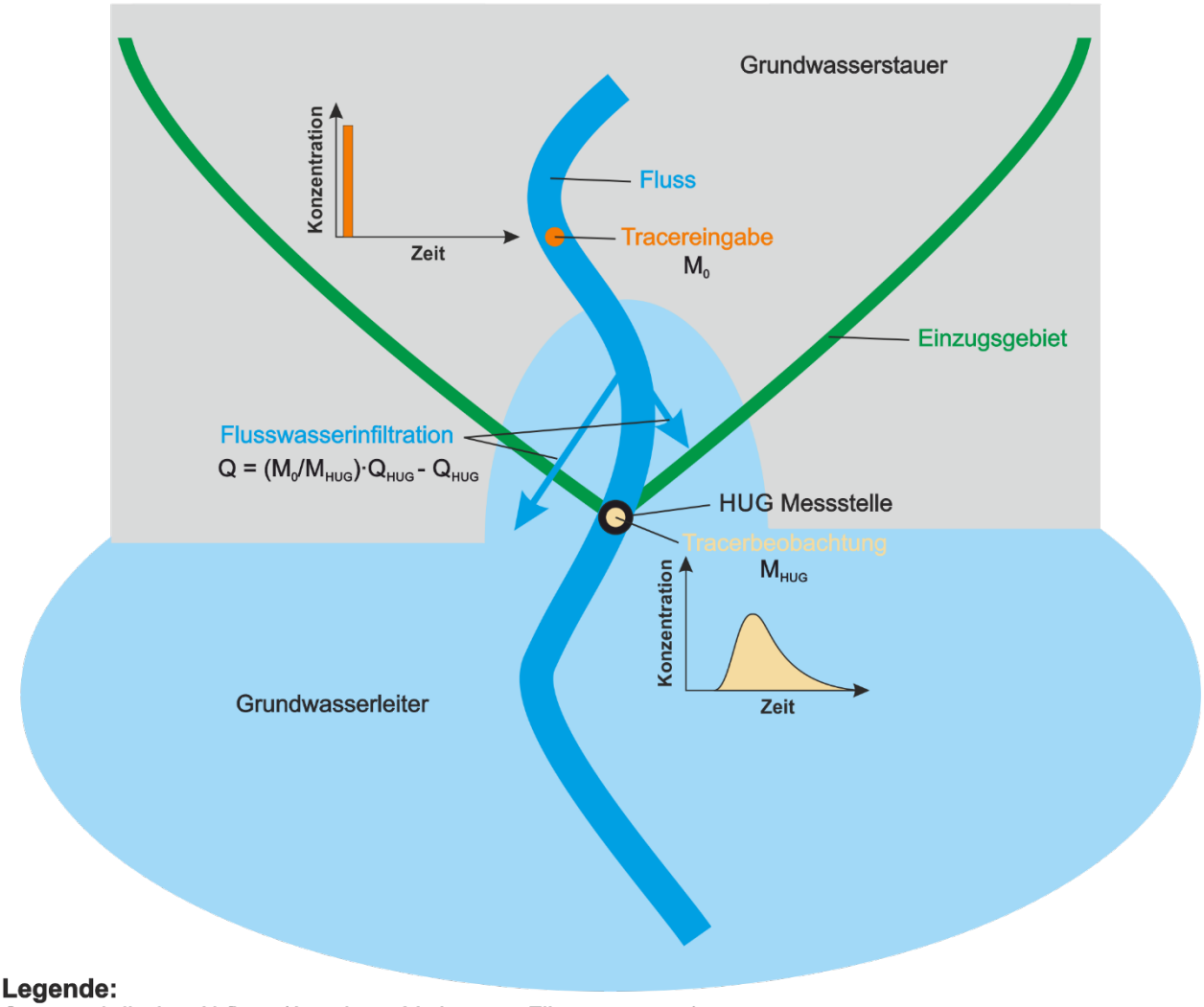
In den beiden oben beschriebenen Fällen muss darauf geachtet werden, dass der Tracer beim Kontakt zwischen Lockergestein und Fels homogen im Fliessgewässer verteilt ist.

Nur bei der HUG Messstelle 2112 wurde gemäss [38] ein Tracerversuch oberhalb der Messstelle im Fliessgewässer durchgeführt. Leider liegt die Eingabestelle ca. 3 km flussaufwärts der HUG Messstelle und der Fluss interagiert auf dieser Strecke mit dem angrenzenden Lockergesteinsgrundwasserleiter. Aus diesem Grund kann dieser Versuch für die Anwendung der Methode nicht verwendet werden.



Legende:
Q = unterirdischer Abfluss (Annahme: Verlust aus Fliessgewässer)
$Q_{Beob.}$ = Abfluss beim Übergang von Grundwasserstauer zu -leiter
Q_{HUG} = Abfluss an der Oberflächengewässer / HUG Messstelle

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Abflussmessung in einem Fliessgewässer, z.B. mit der Salzverdünnungsmethode, für die Berechnung der Wasserveluste oberhalb einer Oberflächengewässermessstelle.



Legende:
Q = unterirdischer Abfluss (Annahme: Verlust aus Fliessgewässer)
Q_{HUG} = Abfluss an der Oberflächengewässer / HUG Messstelle
M_0 = Eingegebene Tracermasse
M_{HUG} = An der Oberflächengewässer / HUG Messstelle vorbeigeflossene Tracermasse

Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Tracerversuchs in einem Fliessgewässer für die Berechnung der an einer Oberflächengewässermessstelle vorbeifliessenden Tracermenge und der Berechnung der Flusswasserinfiltration.

6.4. Zeitliche Variabilität der Parameter

Der Darcy Fluss q hängt vom zeitlich variablen hydraulischen Gradient ab und ist daher selber auch zeitlich variabel. Zudem ist auch die Durchflussfläche F zeitlich variabel (Methoden aus den Kapiteln 6.1 und 6.2).

Wenn der Grundwasserfluss durch die Infiltration von Flusswasser bestimmt wird (Methode aus Kapitel 6.3), muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass die Wasserverluste des Fliessgewässers abhängig vom Fluss- und vom Grundwasserstand sind und daher ebenfalls eine zeitliche Variabilität aufweisen.

Die oben beschriebenen Tracerversuche widerspiegeln die hydrologischen Bedingungen (z.B. Hoch-, Mittel- oder Niedrigwasserstand) zum Zeitpunkt der Durchführung des Tracerversuchs. Wenn der Abfluss unter anderen Bedingungen bekannt sein muss, sollte der entsprechende Tracerversuch unter diesen Bedingungen wiederholt werden.

6.5. Genauigkeit der Berechnung

Die Genauigkeit δQ der Berechnung des unterirdischen Abflusses mit den Tracermethoden aus den Kapiteln 6.1 und 6.2 kann gemäss der linearen Fehlerfortpflanzung wie folgt bestimmt werden:

$$\delta Q = F \cdot \delta q + q \cdot \delta F \quad (37)$$

Dabei ist δq die Genauigkeit des Darcy Flusses q und δF die Genauigkeit der Durchflussfläche F. Bezüglich der Genauigkeit der Durchflussfläche gelten die gleichen Überlegungen wie für die Berechnungen mit dem Darcy-Gesetz (vgl. Kapitel 5.5.2).

Die Genauigkeit δq, mit welcher der Darcy Fluss lokal bestimmt werden kann, hängt von der Genauigkeit, mit welcher die einzelnen Parameter für dessen Berechnung gemessen werden können, ab. Die Genauigkeit δq kann ebenfalls mit der linearen Fehlerfortpflanzung (vgl. Kapitel 5.5.1) berechnet werden, in dem die partiellen Ableitungen der Formeln in den Kapiteln 6.1 und 6.2 erstellt werden.

Für die Methoden aus den Kapiteln 6.1 und 6.2 wird der ermittelte q Wert anschliessend auf das gesamte Querprofil bzw. auf die gesamte Durchflussfläche F extrapoliert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der q Wert nur an der Stelle, an welcher er gemessen wurde, exakt bekannt ist. Mit zunehmender Entfernung von dieser Stelle wird die Genauigkeit bzw. δq zusätzlich von einem Extrapolationsfehler überlagert. Dieser Extrapolationsfehler dürfte umso grösser sein, je weiter entfernt q extrapoliert wird. Eine Möglichkeit, diesen Extrapolationsfehler zu berücksichtigen, besteht darin, die Genauigkeit δq mit zunehmender Distanz des Bestimmungsortes von q zu erhöhen (z.B. könnte δq linear mit der Entfernung zum Bestimmungsort zunehmen).

Diese Überlegungen zeigen, dass die Tracermethoden, bei denen ein lokaler q Wert grossräumig extrapoliert wird, vermutlich weniger genaue Berechnungen des unterirdischen Abflusses erlauben als die Berechnungen mit dem Darcy-Gesetz. Dies dürfte insbesondere der Fall sein, wenn für die Berechnungen mit dem Darcy-Gesetz eine Grundwasserspiegelisohypsenkarte mit Angaben zu der räumlichen Variabilität des hydraulischen Gradienten, sowie verschiedene k-Wert Bestimmungen zur Verfügung stehen.

Wenn der unterirdische Abfluss durch Tracerversuche im Fliessgewässer (Kapitel 6.3) berechnet wird, hängt die Genauigkeit der Berechnung (δQ) davon ab, mit welcher Genauigkeit die für die Berechnung benötigten Parameter gemessen werden können.

Für die erste Methode (sog. "Salzverdünnungsmethode") gilt:

$$\delta Q = \delta Q_{Beob.} + \delta Q_{HUG} \quad (38)$$

Für die zweite Methode gilt:

$$\delta Q = \left(\frac{M_0}{M_{HUG}} - 1\right) \cdot \delta Q_{HUG} + \frac{Q_{HUG}}{M_{HUG}} \cdot \delta M_0 + \frac{M_0 \cdot Q_{HUG}}{M_{HUG}^2} \cdot \delta M_{HUG} \quad (39)$$

Die Genauigkeit, mit welcher die einzelnen Parameter erhoben/gemessen werden d.h. δQ_{HUG}, $\delta Q_{Beob.}$, δM_{HUG}, und δM_0 sollte in jedem einzelnen Fall neu beurteilt werden. In der Regel dürfte M_0 ziemlich genau gemessen werden können. Die Genauigkeit von $Q_{Beob.}$ hängt von M_0 ab und die Genauigkeit von M_{HUG} hängt von Q_{HUG} ab. Zudem spielt in beiden Fällen auch die Genauigkeit, mit welcher die Tracerkonzentrationen im Fliessgewässer gemessen werden können, eine Rolle. Weiter hängt die Genauigkeit beider Methoden davon ab, wie genau die Versuchsbedingungen (Grundwasser stammt nur aus dem Fluss, etc.) eingehalten werden können.

7. Aschätzung der unterirdisch abfliessenden Wassermenge mit einem synthetischen numerischen Modell

Damit bei einer sehr geringen geologischen/hydrogeologischen Datenmenge dennoch ein gewisser unterirdischer Abfluss abgeschätzt werden kann, könnte ein synthetisches, numerisches 3D Modell erstellt werden. Der geologische Untergrund wird dabei nicht realitätsgetreu nachgebildet, sondern sehr vereinfacht ("synthetisch") dargestellt. Das Vorgehen ist von den Studien [5] und [7], welche die Grundwasserflüsse im Gebirge untersucht haben, inspiriert. Diese Methode ist daher vor allem für Oberflächengewässermessstationen in Gebirgsregionen mit geringer Datengrundlage anwendbar. Die Methode eignet sich deshalb vor allem für Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter). Für Lockergesteinsgrundwasserleiter ist die Methode nicht geeignet.

Die Ausdehnung des numerischen 3D Modells soll das gesamte Einzugsgebiet der Oberflächengewässermessstelle inkl. der angrenzenden Seitentäler beinhalten. Anhand eines Digitalen Höhenmodells kann hierzu die Topographie simuliert werden. An der topographischen Oberfläche

sollten die Randbedingungen so gewählt werden, dass sowohl eine Infiltration der Niederschläge wie auch eine Exfiltration von Grundwasser (wenn der Grundwasserspiegel die Topographie schneidet) möglich sind.

Der Untergrund wird sehr vereinfacht dargestellt. Entweder wird ein homogener Aufbau (insbesondere mit einem homogenen k-Wert) gewählt, oder es wird eine vereinfachte Heterogenität berücksichtigt, indem z.B. ein oberflächennahes, homogenes Volumen und ein tieferliegendes homogenes Volumen eingebaut werden. Dem oberflächennahen Volumen wird ein leicht höherer k-Wert zugeordnet, weil davon ausgegangen wird, dass der Fels oberflächennah stärker zerklüftet ist, als in tieferliegenden Bereichen. Die Tiefe dieses oberflächennahen Volumens mit einer höheren Durchlässigkeit und die k-Werte selber können variiert werden. Durch die Veränderung der Tiefe des oberflächennahen Volumens wird auch die unterirdisch abfliessende Grundwassermenge verändert. Beim Erstellen dieses vereinfachten geologischen Modelles sollen bekannte Daten (z.B. geologische und/oder hydrogeologische Karte) und allgemeine Eigenschaften der angetroffenen geologischen Schichten mitberücksichtigt werden.

Der Niederschlagsanteil, welcher in den Untergrund infiltriert, wird als Eingabegrösse verwendet. Es soll eine durchschnittliche, jährliche Infiltrationsmenge verwendet werden. Es gilt zu beachten, dass saisonale Effekte wie das Zurückhalten von Niederschlag als Schnee und die Schneeschmelze dadurch vernachlässigt werden. Bei Messstationen, deren Einzugsgebiet permanent mit Schnee oder Eis bedeckte Flächen enthält, kann die Methode vermutlich nur bedingt angewendet werden.

Das Modell wird anschliessend instationär betrieben und mit der fortschreitenden Zeit füllt sich der Grundwasserleiter mit dem infiltrierenden Niederschlagswasser. An den Stellen, wo der Grundwasserspiegel die Topographie schneidet bilden sich mit der Zeit Oberflächenabflüsse.

Die k-Werte und die Tiefe der Zone mit der höheren Durchlässigkeit werden so lange variiert, bis die perennierenden Fliessgewässer am richtigen Ort entspringen. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die perennierenden Fliessgewässer an der Stelle liegen bzw. entspringen, wo sie ständig durch Grundwasserexfiltration gespeist werden (d.h. sie entsprechen den Skizzen in den Anhängen 5 und 8). Diese Annahme soll in jedem spezifischen Fall kritisch überprüft werden, denn auch bei Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleitern sind Flusswasserinfiltrationen möglich (vgl. Anhänge 6/7 und 9/10). Anschliessend soll versucht werden, den mittleren, jährlichen Abfluss der Fliessgewässer möglichst genau zu reproduzieren.

Es geht also um eine Art "rückwärts Modellierung" der k-Werte und um deren Zonierung (Tiefe der oberflächennahen Zone mit höherem k-Wert). Die Parameter werden so lange variiert, bis die perennierenden Fliessgewässer am richtigen Ort liegen. Für Szenarien, welche diese Bedingungen erfüllen, kann dann der Grundwasserfluss im Bereich der Oberflächengewässermessstelle berechnet werden.

Es geht dabei nicht mehr darum, anhand der vorhandenen Daten einen gegebenen, mehr oder weniger genau berechenbaren unterirdischen Abfluss zu bestimmen (ursprüngliche Frage- bzw.

Aufgabenstellung). Das Problem kann mehrere Lösungen haben und somit eine Vielzahl möglicher Grundwasserflüsse bei verschiedenen realistischen k-Werten und k-Wert Zonierungen liefern. Durch Zusatzrandbedingungen wie einem bekannten, korrekt zu modellierenden Oberflächenabfluss, können die möglichen Lösungen aber weiter eingeschränkt werden.

Es handelt sich um eine starke Vereinfachung der Realität und die Untergrundsverhältnisse werden allein durch Beobachtungen an der Oberfläche eingeschränkt. Es findet keine Kalibration mit geologischen Daten statt. Aus diesem Grund sollte der mit dieser Methode berechnete unterirdische Abfluss mit Vorsicht verwendet werden. Die Methode liefert eher eine mögliche Grössenordnung für den unterirdischen Abfluss als einen exakten Wert. Zudem ist davon auszugehen, dass mehrere verschiedene k-Werte und k-Wert Zonierungen die oberirdischen Bedingungen korrekt reproduzieren können.

Es gilt zu beachten, dass bei diesem Vorgehen mit den gleichen Eingabegrössen wie für die Wasserbilanz, d.h. mit den Niederschlägen und dem Abfluss, gearbeitet wird. Man muss z.B. auch hier bestimmen, wie der Niederschlag in Evapotranspiration, in Oberflächenabfluss und in Grundwasserneubildung anteilsmässig übergeht.

8. Vorgehen bei Aquitarden

Beim Vorhandensein eines Aquitards sollte von Fall zu Fall mit den in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Methoden abgeschätzt werden, wie gross ein möglicher, unterirdischer Wasserabfluss sein kann. Liegt dieser in der gleichen Grössenordnung wie die Genauigkeit der Oberflächenabflussmessung, kann er vernachlässigt werden. Ansonsten, sollte der unterirdische Abfluss in Abhängigkeit des vorhandenen Grundwasserleitertyps gemäss den Kapiteln 5 und/oder 6 berechnet werden.

9. Vorgehen bei Aquicluden

Wenn das Fliessgewässer im Bereich einer Abflussmessstelle und flussaufwärts von dieser auf einem Aquiclud liegt, kann davon ausgegangen werden, dass sämtliches Wasser des Einzugsgebiets an der Abflussmessstelle im Fliessgewässer erfasst wird. In diesem Fall dürfte im Bereich der Oberflächengewässermessstelle also praktisch kein Wasser unterirdisch abfliessen.

10. Fallbeispiele

10.1. Lockergesteinsgrundwasserleiter - Messstation 2603 Ilfis, Langnau

10.1.1. Allgemeine hydrogeologische Situation

Die HUG Messstation 2603 an der Ilfis liegt im Osten von Langnau i.E., im Gebiet "Moos". Die Ilfis fliesst im Bereich der Messstation am nördlichen Rand der mit Alluvionen verfüllten Talsohle. Die alluvialen, quartären Sedimente bauen einen Lockergesteinsgrundwasserleiter auf. Die Alluvionen wurden vermutlich direkt auf dem erodierten, burdigalischen Molassefels, welcher aus hydrogeologischer Sicht als Grundwasserstauer wirkt, abgelagert.

Die Ausdehnung des Grundwasserleiters kann dem Geoportal des Kantons Bern ([39]) entnommen werden und ist auf Abbildung 9 in blauer und gelber Farbe dargestellt. Die verschiedenen Blautöne stellen unterschiedliche Grundwassermächtigkeiten dar. Gelb bedeutet ein Grundwasserrandgebiet. In der Talmitte wird die grösste Grundwassermächtigkeit (dunkelblau) beobachtet. Zu den Talrändern hin nimmt die Grundwassermächtigkeit ab (hellere Blautöne). Die blauen Linien stellen die Grundwasserspiegelisohypsen (mit Kote in m ü. M.) bei einem mittleren Grundwasserstand dar. Das Grundwasser fliesst generell etwa von Osten nach Westen. Die roten Linien entsprechen den Isohypsen des Grundwasserstauers (mit Kote in m. ü. M.). Der Grundwasserstauer bildet eine Art Trog, dessen tiefster Punkt im Bereich des Hallenbads von Langnau liegt. Von diesem tiefsten Punkt aus steigt die Staueroberfläche relativ steil in nördlicher Richtung und deutlich flacher in südlicher Richtung an.

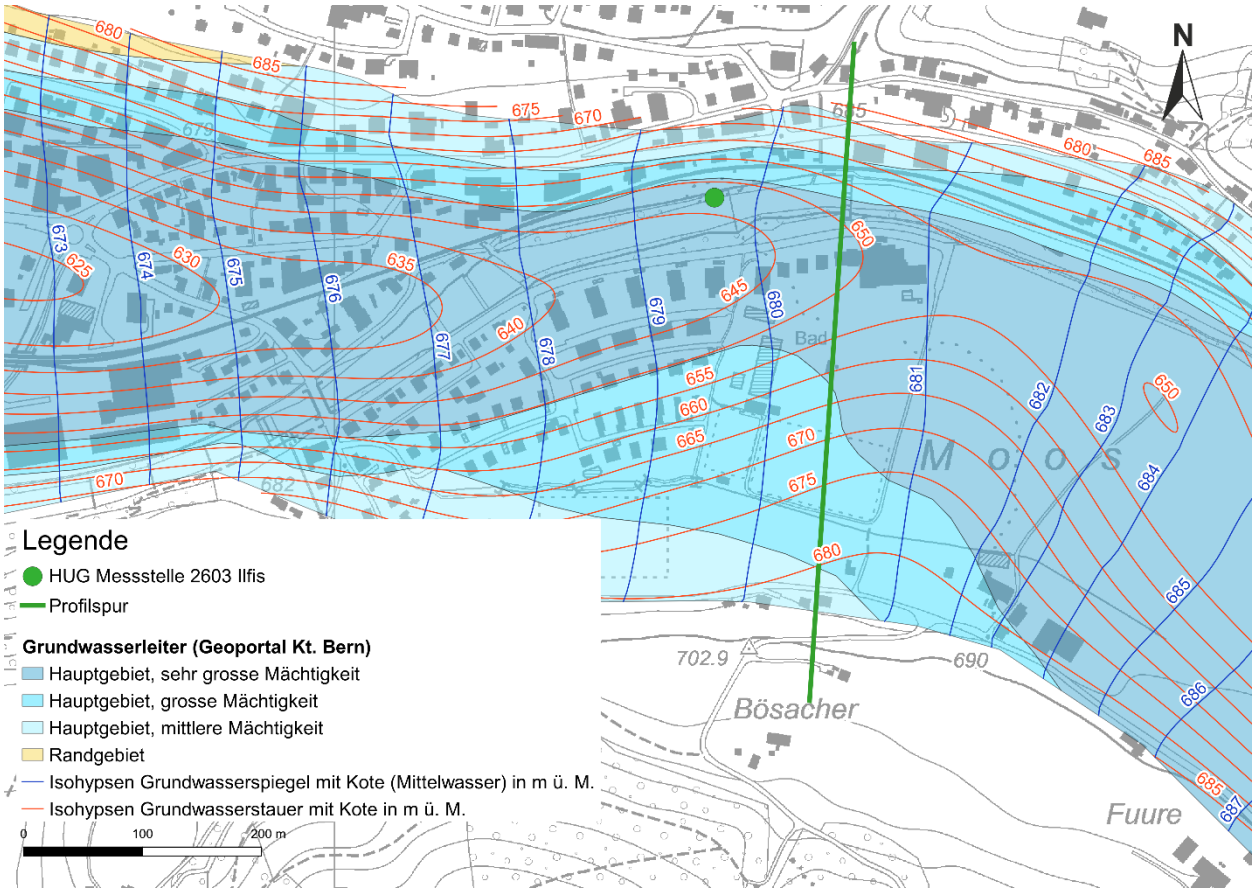


Abbildung 9: Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons Bern.

10.1.2. Durchflussfläche F

Die gesättigte Durchflussfläche F wurde anhand der Grundwasserstauerisohypsenkarte sowie des mittleren Grundwasserspiegels von [39] in einem vertikalen Querprofil berechnet. Das Profil ist auf Beilage 1 dargestellt. Die Lage der Profilspur kann der Abbildung 9 entnommen werden.

Der mittlere Grundwasserspiegel liegt im Profil etwa auf Kote 680.5 m ü. M. In [19] wurden im Bereich des Profils, und insbesondere in dessen Zustrombereich, zahlreiche Rammsondierungen für den Aufbau eines Grundwassermessstellennetzes abgeteuft. Das Messstellennetz wurde in [1] durch zusätzliche Rammsondierungen ergänzt. Anhand der Schlagzahl kann die Mächtigkeit der feinkörnigen Deckschicht abgeschätzt werden. Die Rammprofile weisen i.d.R. auf eine 1 bis 2 m mächtige Deckschicht hin.

Gemäss [19] und [22] liegt der mittlere Grundwasserspiegel 2.5 bis 3 m unter Terrain. Im Bereich der Schwimmbadanlage, wo künstliche Aufschüttungen vorgenommen worden sind, liegt er ca. 3 bis 5 m unter Terrain. Bei extremen Hochwasserereignissen (HQ_{50-100}) dürfte der Grundwasserspiegel gemäss [1] im Zustrom des betrachteten Profils auf 1 - 1.5 m unter Terrain ansteigen und

käme somit kurzzeitig in die Deckschichten zu liegen. Unter normalen Bedingungen kann aber von einem freien, ungespannten Grundwasserspiegel ausgegangen werden.

Um die mögliche zeitliche Variation von F abzuschätzen, wurden kontinuierlich aufgezeichnete Grundwasserstände in einer neuen Messstelle (künftige Grundwassermessstelle des Kantons Bern (AWA)) auf dem Areal der Stämpfli AG an der Güterstrasse 5, in Langnau beigezogen (ca. 1.1 km im Abstrombereich des Profils). Von April 2018 bis März 2020 wurden an dieser Messstelle bereits provisorisch Grundwasserstandsdaten erhoben. Während dieser Beobachtungsdauer wurden folgende Grundwasserspiegel registriert:

- Minimaler Grundwasserstand: 665.88 m ü. M.
- Mittlerer Grundwasserstand: 666.51 m ü. M.
- Maximaler Grundwasserstand: 666.92 m ü. M.

Die Schwankungen bezüglich Mittelwasserstand betragen also + 0.41 m und - 0.63 m.

In [1] wurden kontinuierliche Grundwasserspiegelmessungen in einer Bohrung (RB1: siehe Abbildung 10), welche etwa 265 m oberhalb des Profils in dessen Zuströmbereich liegt, von Mai 2018 bis Juli 2019 durchgeführt. Über diese Beobachtungsperiode wurden folgende Grundwasserspiegel gemessen:

- Minimaler Grundwasserstand: 682.25 m ü. M.
- Mittlerer Grundwasserstand: 683.13 m ü. M.
- Maximaler Grundwasserstand: 684.06 m ü. M.

An dieser Messstelle betragen die Schwankungen bezüglich Mittelwasserstand + 0.93 m und - 0.88 m

Werden die Grundwasserspiegelschwankungen an den beiden oben erwähnten Messstandorte für die Schwankungen im Profilbereich beigezogen, so können etwa folgende Koten, basierend auf der zeitlichen Variation des Grundwasserspiegels, angenommen werden:

- Minimaler Grundwasserstand: 679.7 m ü. M.
- Mittlerer Grundwasserstand (aus [39]): 680.5 m ü. M.
- Maximaler Grundwasserstand: 681.2 m ü. M.

Dabei gilt zu beachten, dass extreme aber kurzzeitige Ereignisse, wie der modellierte Grundwasserstand für ein HQ_{50-100} Hochwasser der Ilfis, nicht berücksichtigt wurden.

Für die verschiedenen Wasserstände ergeben sich folgende Durchflussflächen:

- Minimaler Grundwasserstand: 6'450 m^2
- Mittlerer Grundwasserstand: 6'774 m^2
- Maximaler Grundwasserstand: 7'080 m^2

Um den Fehler von F zu erfassen, wurden Bohrungen, welche den Grundwasserstauer erbohrt haben, beigezogen. Es wurden insgesamt 18 Bohrungen (aus [39]) verwendet, welche bis ca. 1 km stromabwärts und 2 km stromaufwärts des Profils liegen. An jedem Bohrstandort war die Kote des Grundwasserstauers in der Bohrung bekannt. Zudem war an jedem Standort auch die Kote gemäss Grundwasserstauerkarte bekannt. An jedem Bohrstandort konnte also die Abweichung zwischen der Kote der Grundwasserstauerkarte und der Kote des Grundwasserstauers in der entsprechenden Bohrungen gemessen werden. Mit Hilfe der quadratischen Fehlerberechnung konnte mit den oben beschriebenen Abweichungen eine "Genauigkeit" bzw. ein Fehler der Grundwasserstauerkarte von +/- 2.6 m berechnet werden.

Des Weiteren muss auch der Fehler der Kote des Grundwasserspiegels berücksichtigt werden. Da im Bereich des Profils ein ziemlich dichtes Grundwassermessstellennetz besteht, kann von einer Genauigkeit von +/- 0.1 m ausgegangen werden. Pro m Profil beträgt der Fehler von der Durchflussfläche F also +/- 2.7 m. Der Fehler kann also näherungsweise berechnet werden, indem dieser "Fehler pro m" mit der Länge des Grundwasserspiegels auf dem Profil multipliziert wird. Es handelt sich um eine Annäherung, welche an der Stelle, wo der Grundwasserspiegel den Grundwasserstauer schneidet (randliche Begrenzung des Grundwasserleiters) nicht exakt richtig ist, für die Betrachtungen in der vorliegenden Studie jedoch ausreicht.

Die oben berechneten Durchflussflächen können daher mit folgender Genauigkeit angegeben werden:

- Minimaler Grundwasserstand: 6'453 m^2 +/- 1'072 m^2
- Mittlerer Grundwasserstand: 6'776 m^2 +/- 1'197 m^2
- Maximaler Grundwasserstand: 7'082 m^2 +/- 1'210 m^2

10.1.3. k-Wert

In [19] wird im Bereich des Profils eine Zusammenstellung verschiedener Untersuchungen im Zuströmbereich der HUG Messstelle 2603, im Rahmen welcher ein k-Wert bestimmt worden ist, angegeben. Anhand von Pumpversuchen wurde in folgenden Grundwassermessstellen, welche nahe am gewählten Profil liegen (Lage: siehe Abbildung 10), ein k-Wert bestimmt:

- Wärmepumpe Schwimmbad: $k = 5.3 \cdot 10^{-3}$ m/s
- Grundwasserfassung Moos: $k = 3.1 \cdot 10^{-3}$ m/s
- Sondierbohrung RB1: $k = 3.5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Im Abstrombereich der HUG Messstelle wurde der k-Wert auch im Bereich der Unterführung der Güterstrasse (Lage: siehe Abbildung 10) anhand eines Pumpversuchs ermittelt ([30]). Es wurde folgender Wert errechnet:

- Pumpenschacht Unterführung Güterstr.: $k = 3 \cdot 10^{-3}$ m/s

Zusätzlich wird in [30] ein früherer Pumpversuch im Gebiet Moos (d.h. im Bereich des Profils bzw. der Grundwasserfassung und des Schwimmbads, die genaue Lage ist aber nicht bekannt) erwähnt. Es wurde folgender Wert ermittelt:

- Pumpversuch Moos: $k = 2.5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Es kann also von einem k-Wert von 2.5 bis $5.3 \cdot 10^{-3}$ m/s ausgegangen werden. Als Vergleich kann der mittlere k-Wert, welcher im Grundwassermodell des Amts für Wasser und Abfall (AWA) des Kantons Bern verwendet wurde, beigezogen werden. Gemäss der technischen Dokumentation ([4]) liegt das Profil in einer Zone, wo der k-Wert auf $2.8 \cdot 10^{-3}$ m/s festgelegt wurde.

Es handelt sich um typische k-Werte für Lockergesteine (Kiese, sandig, teilweise siltig, z.T. mit Steinen), wie sie in den Bohrprofilen beschrieben werden. Die k-Werte werden sowohl in [19] als auch in [30] ohne Fehlerangabe angegeben. Da auch nicht angegeben wird, wie bzw. mit welcher Genauigkeit die Daten erhoben wurden, kann im Nachhinein kein Fehler mehr berechnet werden. Die Streuung der oben angegebenen Werte ist vermutlich auf lokale Unterschiede im geologischen Aufbau des Grundwasserleiters zurückzuführen. Die k-Werte wurden deshalb im Nahbereich der Abflussmessstation und des betrachteten Profils über den gesamten Grundwasserleiter mit der Kriging Methode interpoliert. Die Interpolation der bekannten k-Werte ergab eine Verteilung, welche die geologischen Verhältnisse (Ablagerungsmilieu der Lockergesteine) nicht bzw. schlecht widerspiegelte. Deshalb wurden verschiedene Hilfspunkte mit fiktiven, aber auf den geologischen Gegebenheiten beruhenden k-Werten bei der Interpolation mitberücksichtigt. Die dadurch erhaltene Verteilung der k-Werte entspricht besser den geologischen Verhältnissen. Sie kann der Abbildung 10 entnommen werden. Das Profil wurde in 8 k-Wert Zonen unterteilt. In jeder Zone wurde ein konstanter k-Wert angenommen. Für die Fehlerberechnung wurde davon ausgegangen, dass der k-Wert in jeder Zone einen Fehler von 10 % aufweist.

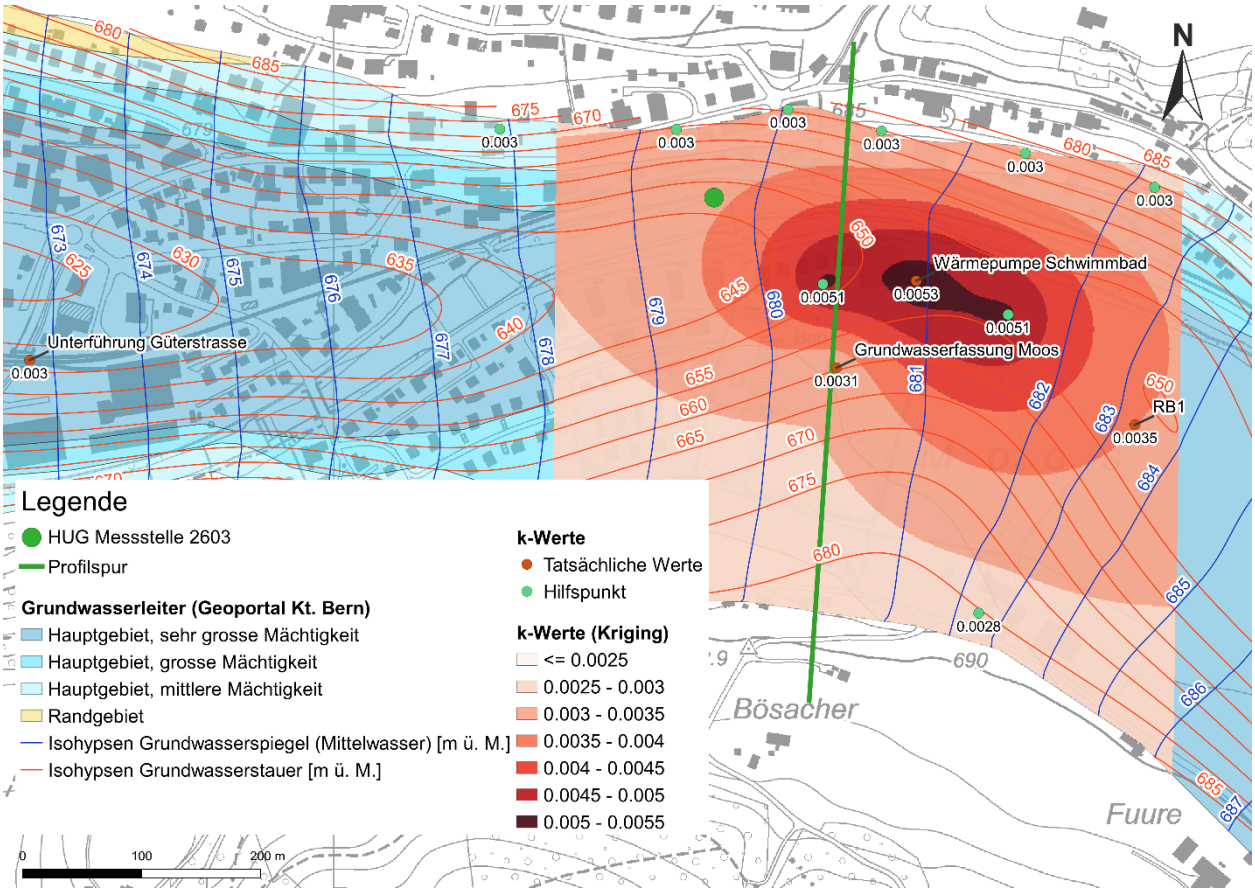


Abbildung 10: Interpolation (Kriging) der k-Werte.

10.1.4. Hydraulischer Gradient i

Der hydraulische Gradient beträgt gemäss Grundwasserkarte des Kantons Bern ([39]) bei einem mittleren Grundwasserstand ca. 0.7 bis 0.8 % (räumliche Unterschiede). Gemäss [1] werden in den zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen jeweils ähnliche Schwankungen beobachtet, so dass sich der hydraulische Gradient mit der Zu- oder Abnahme des Grundwasserspiegels nicht gross verändern dürfte. Für die Abflussberechnungen beim maximalen und beim minimalen Grundwasserstand wurde deshalb ebenfalls der hydraulische Gradient bei mittleren Grundwasserspiegelverhältnissen verwendet.

Damit der Fehler von i berechnet werden kann, wurde davon ausgegangen, dass die Kote des Grundwasserspiegels mit einer Genauigkeit von +/- 0.1 m auf der Isohypsenkarte angegeben ist. Die Messung der Distanz zwischen zwei Isohypsen kann in einem GIS Programm mit einer Genauigkeit von ca. +/- 0.5 m erfolgen (Ungenauigkeit der Strichdicke). Dementsprechend können

die Gradienten gemäss Fehlerfortpflanzung (siehe Kapitel 5.5.4) etwa mit folgender Genauigkeit angegeben werden:

- Minimaler Gradient: I_{min} = 0.7 +/- 0.07 %
- Maximaler Gradient: I_{max} = 0.8 +/- 0.08 %

Für jede k-Wert Zone (Kapitel 10.1.3) wurde ein eigener hydraulischer Gradient berechnet. Es wurde dabei angenommen, dass der hydraulische Gradient mit einem Fehler von 10 % (siehe oben) angegeben werden kann.

10.1.5. Unterirdischer Abfluss

Aus den oben angegebenen Werten können die unterirdischen Abflüsse, welche in Tabelle 3 zusammengefasst sind, berechnet werden. Die Berechnung erfolgt für jede k-Wert Zone separat. Das Aufsummieren über alle Zonen ergibt dann den gesamten unterirdischen Abfluss Q.

Tabelle 3: Unterirdische an der Messstation 2603 Ilfis vorbeifliessende Wassermenge bei minimalem, mittlerem und maximalem Grundwasserstand.

	Unterirdischer Abfluss Q
Minimaler Grundwasserstand	180 +/- 63 l/s
Mittlerer Grundwasserstand	188 +/- 68 l/s
Maximaler Grundwasserstand	196 +/- 70 l/s

Die Unterschiede zwischen minimalem, mittlerem und maximalem Grundwasserstand sind im vorliegenden Fall deutlich geringer als der Berechnungsfehler.

Die Berechnungen können mit ehemaligen Untersuchungen, bei welchen ebenfalls ein unterirdischer Abfluss berechnet wurde, verglichen werden.

- Schwimmbad Langnau ([22]): Unterirdischer Abfluss: 133 - 200 l/s
- Unterführung Güterstrasse ([30]): Unterirdischer Abfluss: 200 l/s
- Hydrogeologie oberstes Emmental ([15]): Unterirdischer Abfluss: 459 l/s

Unsere eigenen Berechnungen liegen ziemlich gut innerhalb des Wertebereichs, welcher aufgrund dieser ehemaligen Untersuchungen bestimmt worden ist.

10.2. Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter)

Für Felsgrundwasserleiter konnten die entwickelten Methoden nicht anhand eines Fallbeispiels dargestellt werden, weil die bestehenden und uns zur Verfügung stehenden Unterlagen dafür nicht ausgereicht haben. Felsgrundwasserleiter wurden allgemein deutlich weniger intensiv untersucht als Lockergesteinsgrundwasserleiter.

In gewissen Fällen wurden zwar Bohrungen in einem Felsgrundwasserleiter durchgeführt (siehe z.B. Messstation 2369 Mentue). Es liegen aber zu wenig Grundwasserspiegelmessungen vor, um einen hydraulischen Gradient und eine Durchflussfläche zu berechnen.
Auch für die k-Werte konnten nur wenige, einzelne Herleitungen gefunden werden (siehe z.B. [21], wo im Raum Davos bzw. im Bereich der Messstation 2327 Dischmabach k-Werte anhand der Beschreibung von Kluftnetzen bestimmt worden sind).

Bei folgenden Messstellen wurde versucht, die vorgeschlagenen Methoden an einem Fallbeispiel darzustellen:

- 2327 Dischmabach
- 2369 Mentue
- 2343 Langeten
- 2319 Ova da Cluozza
- 2326 Poschiavino
- 2161 Massa
- 2244 Krummbach

Bei keiner dieser Messstellen wurden jedoch genügend Daten für die Durchführung der Berechnungen vorgefunden. Bei Felsgrundwasserleitern ist deshalb allgemein damit zu rechnen, dass für die Berechnung des unterirdischen Abflusses zusätzliche Untersuchungen (Bohrungen, Grundwasserspiegelmessungen, Pumpversuche, Tracerversuche, etc.) benötigt werden. Die vorhandenen Unterlagen werden in den meisten Fällen für die Berechnung nicht ausreichen.

11. Vorgehensvorschlag bei neuen Messstellen inkl. Kostenschätzung

Für die Bestimmung des unterirdischen Abflusses an einer bestimmten, vorgegebenen Oberflächengewässermessstation (HUG oder andere) empfehlen wir ein mehrphasiges Vorgehen. Der Entscheidungsweg kann dem Flussidagramm in Abbildung 11 entnommen werden. Die einzelnen Schritte können wie folgt kommentiert werden:

Phase A: Klassifikation der Messstelle:
In einer ersten Phase wird die Messstelle gemäss dem im Kapitel 4.1 beschriebenen Vorgehen einer geologischen und einer hydrogeologischen Klasse zugeordnet. Hierzu müssen alle zur Verfügung stehenden geologischen Informationen (geologische Karten, Bohrungen, Grundwasserdaten, geologische Berichte, Diplomarbeiten, etc.) berücksichtigt werden.

Diese erste Phase soll auch aufzeigen, ob gemäss den Methoden aus den Kapiteln 5 oder/und 6 bereits genügend Daten für die Berechnung der an der Messstation vorbeifliessenden Grundwassermenge vorhanden sind. Wenn die bestehenden Unterlagen für die Berechnung ausreichen, wie z.B. bei der Ilfis (Kapitel 10.1), kann Phase B direkt ausgelöst werden.

Ansonsten sollten die zusätzlichen Untersuchungen, welche für die Berechnung notwendig sind, in dieser ersten Phase bereits definiert werden und in einem Pflichtenheft inkl. Kostenschätzung zusammengefasst werden.

Kosten Phase A (Datenzusammenstellung und erste Auswertung, aber keine neu erzeugten Daten): 2'000.- bis 5'000.-

Zwischenphase: zusätzliche, spezifische Untersuchungen:

Falls Phase A zeigt, dass Zuwenig Daten für die Berechnung des Grundwasserflusses unterhalb der Oberflächengewässermessstation vorhanden sind, ist die Durchführung zusätzlicher Untersuchungen bzw. die bessere Erkundung des Grundwasserleiters notwendig. Die Untersuchungen sollten spezifisch für einen gegebenen Standort ausgewählt werden.

Denkbar sind folgende Untersuchungen:

- Erweiterung des Grundwassermessstellennetzes durch gerammte Piezometer
- Erweiterung des Grundwassermessstellennetzes durch Bohrungen
- Zusätzliche Grundwasserspiegelmessungen
- Durchführung von Pumpversuchen (Kurz- oder Langzeitversuch)
- Durchführung von Tracerversuchen

Kosten der Zwischenphase: die genauen Kosten können nicht im Voraus geschätzt werden, da standortspezifische Untersuchungen notwendig sind und da erst nach der Durchführung von Phase A ersichtlich wird, welche Daten für die Berechnung des unterirdischen Abflusses (Phase B) noch erhoben werden müssen. Ein genaues Pflichtenheft für die zusätzlichen Untersuchungen, inkl. Kostenschätzung muss im Rahmen von Phase A erarbeitet werden.

Die folgenden Angaben können für eine grobe Kostenschätzung verwendet werden:

- 1 Rammpiezometer bis 5 m Tiefe (Rabatt bei mehreren Rammungen gleichzeitig):	ca. 3'000.-
- 1 Bohrung bis 30 m Tiefe (Rabatt bei mehreren Bohrungen gleichzeitig):	ca. 30'000.-
- 1 Grundwasserspiegelmesskampagne mit 15 Messstellen:	ca. 2'000.-
- 1 Kurzpumpversuch:	ca. 8'000.-
- 1 Tracerversuch*:	ca. 5'000.- bis 15'000.-

*abhängig vom Typ und von der Anzahl Beobachtungsmessstellen

Alternative: Abschätzung mit synthetischen numerischen Modellen
In Fällen, bei denen Phase A zeigt, dass für die Berechnung des unterirdischen Abflusses mit dem Darcy-Gesetz oder mit Tracermethoden nicht genügend Daten vorhanden sind, wo aber der unterirdische Abfluss nicht exakt bestimmt werden muss, kann als Alternative versucht werden,

den Abfluss mit einem synthetischen numerischen Modell grob abzuschätzen (vgl. Kapitel 7). Dies sollte insbesondere bei Messstationen im Gebirge, welche über einem Felsgrundwasserleiter liegen, machbar sein. Die Modellierungsresultate sollen in einem Bericht dargestellt und zusammengefasst werden. Für Oberflächengewässermessstationen im Bereich von Lockergesteinsgrundwasserleitern eignet sich die Methode nicht.

Kosten Alternative (Erstellung synthetisches numerisches Modell): ca. 20'000.- bis 25‘000.-

Phase B: Berechnung des unterirdischen Abflusses

Phase B kann ausgelöst werden, wenn aus Phase A oder durch zusätzliche Untersuchungen während der Zwischenphase genügend Daten für die Berechnung des unterirdischen Abflusses zusammengestellt werden konnten. Die Berechnung des unterirdischen Abflusses gemäss den Methoden in den Kapiteln 5 und/oder 6 sollte von einer Fehlerrechnung begleitet werden.

Wenn genügend Daten vorhanden sind könnte alternativ zu den Handrechnungen gemäss Kapiteln 5 und/oder 6 auch ein kalibriertes hydrogeologisches Modell (vgl. Kapitel 5.6) erstellt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass dazu in den allermeisten Fällen intensive Zusatzuntersuchungen in der Zwischenphase notwendig sein werden.

Kosten Phase B: Berechnung unterirdischer Abfluss mit Handrechnungen: 3'000.- bis 6'000.-
Berechnung unterirdischer Abfluss mit einem kalibrierten, numerischen Grundwassermodell: ca. 20'000.-

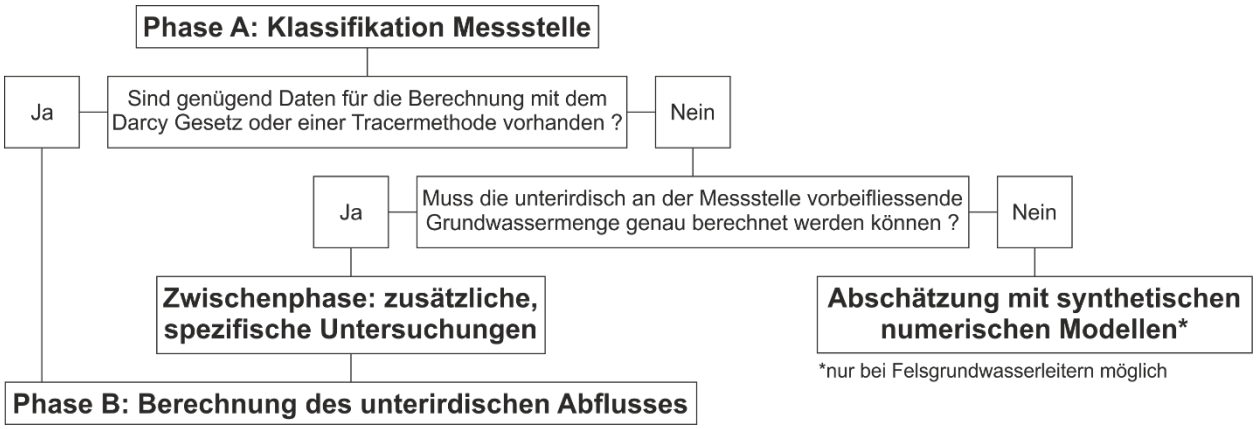


Abbildung 11: Entscheidungsdiagramm (Flussdiagramm) für das Vorgehen bei einer neuen Messstelle.

12. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Bei Oberflächengewässermessstellen, welche im Bereich eines im Detail erkundeten Grundwasserleiters liegen, kann der unterirdische Abfluss mit dem Darcy-Gesetz relativ präzise berechnet werden. Dies sollte nebst der Messstation 2603 Ilfis (Kapitel 10.1) auch bei folgenden Messstellen machbar sein:

- 2308 Goldach
- 2179 Sense
- 2471 Murg

Für die Anwendung des Darcy-Gesetzes muss der hydraulische Gradient bekannt sein. Dazu braucht es mindestens 3 Grundwassermessstellen. In Fällen, wo der Grundwasserleiter bisher zu wenig erkundet worden ist, kann das Darcy-Gesetz aufgrund der ungenügenden Datengrundlagen nicht angewendet werden. Tracerversuche könnten in solchen Fällen als erste grobe Abschätzung des unterirdischen Abflusses durchgeführt werden. Dazu müssen die notwendigen Messstellen aber vorhanden sein oder erstellt werden. Die Versuchsanordnung muss speziell für die Berechnung des unterirdischen Abflusses konzipiert werden. Zudem empfehlen wir, die vorgeschlagenen Tracermethoden vorerst an einem gut erkundeten Grundwasserleiter zu testen.

Als Alternative zu einem Tracerversuch können auch weitere Untersuchungen wie Bohrungen, Rammungen, Baggerschlitze und Piezometermessungen durchgeführt werden, um genügend Daten für die Berechnung mit dem Darcy-Gesetz zu erzeugen.

Wenn zu wenig Daten für die Anwendung des Darcy-Gesetzes vorliegen und die Erhebung zusätzlicher Daten oder die Durchführung zusätzlicher Versuche, wie Tracerversuche, nicht gewünscht ist, so kann bei einem Felsgrundwasserleiter (Kluft- und Kluft- / Porengrundwasserleiter) mit einem synthetischen numerischen Modell versucht werden, den unterirdischen Abfluss abzuschätzen. Wir empfehlen aber, dieses Vorgehen vorerst an einem gut bekannten Standort zu testen.

KELLERHALS + HAEFELI AG

Dr. D. Böhi J. Gobat

Sachbearbeiter: Julien Gobat, MSc Hydrogeologe
Dieter Böhi, Dr. phil. II Geologe

Bern, 5. Februar 2021
GO/BÖ/rj 11389B210127

Anhang 1

Klassifikation der HUG Messstellen (Notizen)

Anhang 1

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2159 Gürbe	Die Messstelle 2159 Gürbe liegt im Bereich der Mündung des Gürbetals ins Aaretal. Die Messstelle ist auf dem Geocover von map.geo.admin.ch umgeben von Alluvionen, welche auf der Grundwasserkarte des Kantons Bern ca. 170 m stromaufwärts der Messstelle einen Lockergesteinsgrundwasserleiter bilden. Die Messstelle 2159 liegt jedoch ausserhalb dieses Grundwasservorkommens (siehe Grundwasserkarte des Kantons Bern). Zwei Bohrungen ca. 140 m östlich und 250 m westlich der Messstelle 2159 weisen auf das Vorhandensein von siltig-tonigen Ablagerungen, mit einer erfahrungsgemäss sehr geringen Durchlässigkeit hin. Im Bereich der Messstelle dürfte der Untergrund also nicht durch kiesige Alluvionen, sondern durch feinkörnige, undurchlässige Ablagerungen aufgebaut sein.	3	A
2179 Sense	Die Messstelle 2179 Sense steht zwar linksufrig auf dem Fels der Unteren Süsswassermolasse (USM: Konglomerat, Sandstein, undifferenziert, Mergelstein). Rechtsufrig grenzen jedoch Alluvionen an die Sense, welche einen Lockergesteinsgrundwasserleiter aufbauen (siehe Grundwasserkarte des Kantons Bern). Bohrungen, welche ca. 70 bis 90 m nord-östlich der Messstelle abgeteuft worden sind, bestätigen, dass es sich bei den Alluvionen um gut durchlässige Senseschotter handelt. Die Grundwasserisohypsen auf dem Geoportal des Kantons Bern (Grundwasserkarte) weisen flussaufwärts der Messstelle auf eine Exfiltration von Sensewasser ins Grundwasser hin. In der näheren Umgebung der Messstelle gibt es zwar keine Hinweise auf eine Zerklüftung der USM (gemäss Geocover; map.geo.admin.ch). Es entspringen aber zahlreiche Quellen aus dem USM Fels, so dass auch eine Grundwasserzirkulation im Fels angenommen werden muss. Bezüglich Wassermenge, welche an der Messstelle vorbei fliesst, spielt der Fels (USM) im Vergleich zu den Lockergesteinen (Senseschotter) jedoch eine untergeordnete Rolle.	1 / (7)	A
2251 Rotenbach	Bei der Messstelle 2251 Rotenbach liegt das Gewässer gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) vollständig auf glazigenen Sedimenten (Niederterrasse, vermutlich aus kiesigen Lockergesteinen bestehend). Auch entlang eines Profils senkrecht zum Fluss im Bereich der Messstelle kommen praktisch nur glazigene Sedimente vor. Weiter flussaufwärts im Einzugsgebiet kommt der Gurnigelflysch (Flyschsandstein, Grauwacke und Mergel), welcher möglicherweise einen Kluftgrundwasserleiter bildet, vor. Die glazigenen Sedimente liegen auf dem Flysch. Es ist daher möglich, dass ein Teil des Niederschlags in den Flysch infiltriert und unter den glazigenen Sedimente an der Messstelle 2251 vorbei fliesst. Dennoch wird angenommen, dass die Grundwasserzirkulationen im Lockergestein wichtiger bzw. bedeutend grösser sind als im Fels (Flysch). Dementsprechend wird die Messstelle der Klasse 1 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten in diesem Gebiet vorhanden.	1	C
2232 Allenbach	Bei der Messstelle 2232 Allenbach grenzt das Gewässer gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) beidufrig an Tonstein, Eisensandstein und Spatkalk (Bommerstein-Formation). Angrenzend an diese Formation liegt rechtsufrig Moränenmaterial und linksufrig Hangschutt. Im Einzugsgebiet sind z.T. auch Verkarstungsfähige Gesteine vorhanden, so dass ein Teil des Niederschlags unterirdisch in verschiedene Richtungen abfliessen könnte. Es gibt zwar nur wenige Aufschlüsse der Bommerstein-Formation. Wo die Formation oberflächlich beobachtet werden kann, gibt es jedoch keine Hinweise auf eine Zerklüftung und es sind auch keine Quelle, welche daraus entspringen würden, auf dem Geocover vermerkt. Aus diesem Grund wurde die Messstelle der Klasse 6 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten in der näheren Umgebung der Messstelle vorhanden.	6	C
2369 Mentue	Im Bereich der Messstelle 2369 Mentue fliesst das Gewässer beidufrig auf dem Fels der Oberen Meeresmolasse (OMM: Glaukonitsandstein, Muschelsandstein, Konglomerat) gemäss Geocover (map.geo.admin.ch). Alluvionen kommen zwar auch vor, aber sie keilen oberhalb bzw. flussaufwärts der Messstelle aus. Das gesamte Grundwasser, welches in den Alluvionen fliesst, dürfte somit wieder in den Bach exfiltrieren, da es durch die OMM gestaut wird. Die OMM bildet vermutlich einen Kluft- / Porengrundwasserleiter. Wie tief das Grundwasser in diesen Kluft- / Porengrundwasserleiter hineindringt ist nicht bekannt. Die räumliche Begrenzung dieses Grundwasserleiters und die Bestimmung des Grundwasserstauers ist unklar. Innerhalb des Einzugsgebiets kommen Molassequellen (z.B. oberhalb der Messstelle 2369), welche z.T. für die Beschaffung von Trinkwasser genutzt werden (siehe Geoportal Kanton Wadt), vor. Da aus der OMM in der näheren Umgebung der Messstelle diverse Quellen entspringen, kann eine Grundwasserzirkulation im Fels angenommen werden und die Messstelle wurde der Klasse 7 zugeordnet. Ca. 40 m süd-östlich der Messstelle ist eine Bohrung (YN21) vorhanden. Der OMM Fels wurde darin in einer Tiefe von 3.3 m erreicht (RQD Fels: 80 %). Unmittelbar nördlich der Messstelle grenzt die sogenannte *Molasse Grise de Lausanne* (Untere Süsswassermolasse - USM II - Schlammstein, Sandstein, Mergelstein) an die oben beschriebene Obere Meeresmolasse. Aufgrund der lithologischen Beschreibung, wirkt die Molasse grise de Lausanne wahrscheinlich als Grundwasserstauer. In La Mauguettaz wurden Erdsondenbohrungen darin abgeteuft. Die Beschreibung des angetroffenen Felses lässt eine geringe Durchlässigkeit vermuten (siehe Bohrprofile). Die Molasse grise de Lausanne staut das Grundwasser in der OMM vermutlich zurück. Dadurch könnte ein Teil des Grundwassers aus der OMM wieder ins Fliessgewässer (Mentue) exfiltrieren.	7	A
2610 Scheult	Im Bereich der Messstelle 2610 Scheult sind beidufrig des Fliessgewässers Alluvionen aufgeschlossen (vgl. Geocover, map.geo.admin.ch). Solche Alluvionen können einen Lockergesteinsgrundwasserleiter bilden. Auf dem Geoportal des Kantons Jura sind Baggerschlitze ca. 270 m östlich-nord-östlich der Messstelle vorhanden. Sie weisen auf einen kiesigen Aufbau des Untergrunds, mit einer siltig-tonigen Matrix und vielen Blöcken, hin. Dieses Material ist wasserführend (es wurden z.T. Wasserzutritte in den Baggerschlitzen beobachtet). Diese Beobachtung dürfte die Einteilung als Lockergesteinsgrundwasserleiter (Klasse 1) bestätigen. Ein weiteres Piezometer (P2/24) liegt sehr nahe an der Messstelle und zeigt, dass Grundwasser in diesem Gebiet vorhanden ist. Ca. 240 m östlich der Messstelle wurde ein weiterer Baggerschlitz abgeteuft (S3/24), welcher ebenfalls den kiesigen Aufbau des Untergrundes bestätigt. Nebenbemerkung: es kommen im Einzugsgebiet auch verkarstungsfähige Formationen vor. Im Nahbereich der Messstelle erfolgt die Grundwasserzirkulation aber hauptsächlich in den Lockergesteinsablagerungen.	1	A
2262 Berninabach	Im Bereich der Messstelle 2262 Berninabach grenzen gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) beidufrig Bachschuttkegel und Schwemmfächer an das Gewässer. Flussaufwärts kommen auch Alluvionen vor. Die oben beschriebenen Ablagerungsprozesse führen meistens zu der Ausbildung grobkörniger Lockergesteine. Solche grobkörnigen Lockergesteine stellen in der Regel einen Grundwasserleiter dar. Die Lockergesteine liegen vermutlich auf Kalkalkaligranit und Granodiorit (Err-, Julier- und Bernina-Granit, vgl. Geocover, map.geo.admin.ch), die höchsten geklüftet sein können und für die Grundwasserzirkulationen im Untergrund - im Vergleich zu der Lockergesteinsbedeckung - vermutlich eine untergeordnete Rolle spielen. Deshalb wurde die Messstelle der Klasse 1 zugeordnet. Erdwärmesondenbohrungen sind in diesem Bereich vorhanden aber es gibt gemäss Aussage des Kantons Graubünden dazu keine Bohrprofile. Es sind keine weiteren Bohrungen in der Nähe der Messstelle vorhanden. Seismische Profile deuten bei der Sperrstelle Resgia, südlich von Pontresina, auf 20 - 30 m mächtige Schuttbildungen über der Felsoberfläche (siehe [36]).	1	C

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2256 Rosegbach	Im Bereich der Messstelle 2256 Rosegbach liegt das Fliessgewässer auf Ablagerungen von lokaler Moräne und von Kalkalkaligranit / Granodiorit und Diorit (vgl. Geocover, map.geo.admin.ch). Alluvionen kommen flussaufwärts vor, keilen aber vor dem Standort der Messstelle aus. Moränen können erfahrungsgemäss sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen, sie bilden aber meistens keine ausgedehnten, gut durchlässigen Grundwasserleiter. Deshalb wurde die Messstelle der Klasse 2 zugeordnet. In einer Entfernung von ca. 1.5 bis 3.5 km süd-westlich der Messstelle gibt es Hinweise auf eine Zerklüftung (Brüche) der oben erwähnten Felsformationen (siehe Geocover). Der Rosegbach fliesst jedoch nur auf einer kurzen Distanz auf dem möglicherweise zerklüfteten Fels. Im Bereich wo das Fliessgewässer mit dem Fels in Kontakt steht, sind keine Brüche verzeichnet. Deshalb spielt der Grundwasserfluss im Fels, wenn überhaupt, vermutlich nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zum Grundwasserfluss in den Lockergesteinen (Moräne). Es entspringen gemäss Geocover auch keine Quellen aus den erwähnten Felsformationen. Da aber Anzeichen einer Zerklüftung vorhanden sind, wären Grundwasserzirkulation im Fels potentiell möglich. Deshalb wurde die Klasse 5 auch aufgeführt. Es ist eine Erdwärmesondenbohrung im Bereich der Messstelle vorhanden. Gemäss Auskunft des Kantons Graubünden gibt es aber kein Bohrprofil dazu. Eine Kernborhung wurde ca. 500 m nördlich der Messstelle erstellt. Die Bohrung liegt auf dem Geocover zwar innerhalb der Moränenablagerungen, auf dem Bohrprofil wurde aber Bachschutt beschrieben. Vermutlich liegt die Bohrung deshalb zu weit entfernt, um brauchbare Informationen über den Untergrund im Bereich der Messstelle 2256 zu liefern.	2 / (5)	C
2282 Sperbelgraben	Die Messstelle 2282 Sperbelgraben ist gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) von der Napf-Formation (Schlammstein, Konglomerat, Arkose) - z.T. mit einer geringen Lockergesteinsüberdeckung - umgeben. Es gibt auf dem Geocover zwar keine Hinweise auf eine Zerklüftung des Molassefels. Eine Quelle liegt jedoch im Umkreis von 1 km um die Messstelle. Sie entspringt aus der Lockergesteinsbedeckung über der Napf-Formation. In einer Entfernung von ca. 2.2 bis 2.4 km nördlich der Messselle liegen aber auch Quellen, die auf dem Geocover direkt aus der Napf-Formation entspringen. Diese Beobachtungen deutet darauf hin, dass eine Grundwasserzirkulation im Lockergestein und im Fels vorhanden ist. Da im Bereich der Messstelle 2282 gemäss Geocover die Napf-Formation direkt an das Fliessgewässer grenzt, wird vor allem eine Grundwasserzirkulation im porösen und zerklüfteten Fels vermuetet und die Messstellle wurde der Klasse 7 zugeordnet. Die Lockergesteinsbedeckung grenzt nicht bis an das Filessgewässer. Deshalb wurde die Klasse 1 nur der Vollständigkeit halber erwähnt (siehe auch [18]). Es sind keine Bohrungen in der näheren Umgebung vorhanden.	7 / (1) ?	C
2366 Poschiavino	Die Messstelle 2366 Poschiavino ist vollständig vom Kristallin der Stretta-Masse (im Allgemeinen Orthogneise mit z.T. Quarzporphyrgängen) umgeben (vgl. Geocover, map.geo.admin.ch). Das Torfmoor im Oberstrom keilt vor der Messstelle aus. Es gibt keine Hinweise auf eine Zerklüftung des Kristallins der Stretta-Masse und es entspringen daraus auch keine Quellen gemäss Geocover. Deshalb ist die Grundwasserzirkulation darin vermutlich gering bis fehlend. Es sind Bohrdaten beim Staudam Campasc vorhanden. Darin durchgeführte Wasserabpressversuch zeugen von der geringen Durchlässigkeit des Felses (0.3 - 4.6 l/min bei 3 ATU und einer Versuchsdauer von 5 Minuten). Gemäss seismischer Untersuchungen (siehe [35]) wird die Gesteinsqualität des Gneises als ziemlich gut beschrieben. Die sichtbaren Klüfte und Verwitterungszonen dürften nur sehr oberflächlich sein. Im geologischen Bericht über die Sperrstelle La Rösa ([34]) werden zwei Kluftsysteme beschrieben. Die Spalten dürften in der Tiefe jedoch weitgehend geschlossen sein. Da Klüfte somit vorhanden sind, aber diese entweder geschlossen oder untief sind, wird die Messstelle der Klasse 5 zugeordnet. Eine Zerklüftung des Kristallins wird auch in [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] angegeben.	5	B
2304 Ova da Fuorn	Das Flussbett des Ova da Fuorn liegt im Bereich der Messstelle 2304 auf Buntsandstein und den Campilerschichten, die aber z.T. von Bachschuttkegeln und trockenen Schuttkegeln / Gehängeschutt überdeckt werden (Geocover, map.geo.admin.ch). Solche Lockergesteine sind in der Regel grobkörnig und erlauben eine Grundwasserzirkulation. Die Messstelle wird deshalb der Klasse 1 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten vorhanden.	1	C
2617 Rom	Bei der Messstelle 2617 Rom fliesst das Gewässer auf Bachschutt (siehe Geocover, map.geo.admin.ch). Stromaufwärts kommen Alluvialböden vor, welche aber vor der Messstelle auskeilen. Diese Lockergesteine wurden entweder auf Moräne oder dem kristallinen Fels abgelagert. Die Erdsondenbohrung Nr. 213847 oder Nr. 211152 liegen nahe an der Messstelle. Gemäss Auskunft des Kt. Graubünden, gibt es aber keine Bohrprofile für diese zwei Erdsondenbohrungen. Zwei Bohrungen mit Bohrprofilen liegen ca. 865 m südlich der Messstelle, im Bereich des Fliessgewässers. Obwohl sie weit entfernt sind von der Messstelle, bestätigen sie, dass der Untergrund aus durchlässigen Lockergesteinen besteht (Kiessand). Die Messstelle wird deshalb der Klasse 1 zugeordnet. Ähnliche Überlegungen sind auch in [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] enthalten.	1	A
2263 Chamuerabach	Am Standort der Messstelle 2263 grenzt der Bach linksufrig an kataklastischen Hornblendegneis und rechtsufrig an Moräne. Das Gebiet wurde tektonisch stark beansprucht. Es sind zahlreiche Brüche, Verwerfungen und Überschiebungen vorhanden (Geocover, map.geo.admin.ch). Eine Zerklüftung des Felses muss deshalb angenommen werden. Aus der Moräne entspringen z.T. Quellen, was darauf hinweist, dass sie eine gewisse Durchlässigkeit hat (Aquitard, Klasse 2). Flussabwärts folgt Bachschutt, der jedoch erst unterhalb der Messstelle vorkommt. Flussaufwärts keilen die Alluvialböden vor der Messstelle aus, der Fluss liegt grössten Teils auf Manganschiefer (Kössner Schichten). Aus den beschriebenen Felsformationen entspringen innerhalb der entsprechenden Auf- bzw. Überschiebungen keine Quellen gemäss Geocover (deshalb auch Klasse 5). Die Erdsondenbohrungen Nr. 213996 und Nr. 215206 liegen nahe an der Messstelle. Gemäss Auskunft des Kt. Graubünden, gibt es aber keine Bohrprofile für diese zwei Erdsondenbohrungen. Ansonsten gibt es keine Bohrungen in diesem Gebiet.	2 und 5	C
2319 Ova da Cluozza	Die Messstelle 2319 Ova da Cluozza liegt vollständig auf Mischgneis mit vorwiegend oder wesentlichem Anteil an Orthomaterial. Es gibt keine Hinweise auf eine Zerklüftung dieser Einheit und es entspringen keine Quellen daraus auf dem Geocover (map.geo.admin.ch). Deshalb ist eine mögliche Grundwasserzirkulation vermutlich beschränkt oder abwesend. Deshalb wurde die Messstelle der Klasse 6 zugeordnet. Zudem handelt es sich um metamorphe Gesteine. Die Brüche und Klüfte können bei der metamorphen Überprägung geheilt bzw. geschlossen worden sein. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. In [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] wird eine geringe Durchlässigkeit in Klüften angenommen.	6	C
2327 Dischmabach	Bei der Messstelle 2327 Dischmabach ist das Gewässer gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) vollständig umgeben von Biotit- / Plagioklasgneis (Silvretta-Decke). Es gibt auf dem Geocover nur wenige Hinweise auf eine Zerklüftung dieser Felsformation. Ca. 700 m nord-westlich von der Messstelle entspringt eine Quelle aus einer Sackungsmasse in dieser Formation. Ca. 3.8 km nord-östlich entspringen mehrere gefasste Quellen direkt aus dieser Formation. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass eine gewisse Grundwasserzirkulation in dieser Formation vorhanden sein kann. Die Messstelle wurde deshalb in Klasse 4 eingeteilt. Rezente Alluvionen keilen vor der Messstelle aus und die Bachschuttkegel reichen nicht bis zum Fliessgewässer. Flussaufwärts grenzt Amphibolit (Silvretta-Decke) an den Gneis. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. Gemäss [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] ist eine Klüftung zwar vorhanden, aufrund der Höhenlage spielt sie jedoch eine untergeordnete Rolle für das Entweichen von Wasser)	4	C

Anhang 1

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2430 Rein da Sumvitg	Das Fliessgewässer liegt im Bereich der Messstelle 2430 Rein da Sumvitg gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) beidufrig auf dem Medel-Granit der Gotthard-Decke (Granit, Orthogneis). Es sind Brüche in dieser Formation auf dem Geocover eingezeichnet. Es entspringen aber keine Quellen daraus. Aus diesem Grund wurde die Messstelle der Klasse 5 zugeordnet. Bachschutt und Hangschutt grenzen zwar an diese Formation an, erreichen das Fliessgewässer aber nicht. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. Gemäss [EInzugsgebietskenngrössen der HUG] sind die Graniten des Gotthard-Massivs zwar zerklüftet, aber es dürften nur minimale Undurchlässigkeitsprobleme vorkommen, was ein weiterer Hinweis für Klasse 5 liefert.	5	C
2347 Riale di Roggiasca	Die Messstelle 2347 Riale di Roggiasca liegt gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) am Kontakt von Amphibolit zu Migmatite. Das Fliessgewässer fliesst ca. senkrecht zu diesem Kontakt. Im Einzugsgebiet selber gibt es zwar keine Hinweise auf eine Zerklüftung dieser Formationen. Ca. 400 m nördlich der Messstelle kommt aber ein Bruch vor. Im Einzugsgebiet selber entspringen zwar auch keine Quellen aus diesen Formationen, ca. 4 km westlich von der Messstelle sind jedoch mehrere Quellen, welche daraus entspringen, auf dem Geocover vermerkt. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass eine gewisse Grundwasserzirkulation im Fels möglich ist und die Messstelle wurde daher in Klasse 4 eingestuft. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. In [14] werden zwei Kluftsysteme in der Aduladecke an der Cima dello Stagn und am Sass de la Vaca beschrieben, in denen z.T. meteorisches Wasser bis in meherere km Tiefe versickert ist und anschliessend wieder an der Oberfläche zu Tage gekommen ist. Vermutlich handelt es sich um Abschiebungen mit einer Extension in Ost-West Richtung. Diese Beobachtungen sind jedoch mit Vorsicht zu interpertieren, weil die Messstelle 2347 und deren Einzugsgebiet gemäss [29] in der Zone von Belinzona und nicht in der Aduladecke liegen. In [29] wurden aber auch Klüfte im Bereich der Messstelle kartiert (Streichen und Fallen, keine Angaben zu Kluftöffnung).	4	C
2206 Melera	Die Messstelle 2206 Melera liegt am Kontakt zwischen der tonalen Serie (tonale Schiefer: Amphibolit, Paragneis, Granat-Glimmergneis) oberhalb der Messstelle und Moräne unterhalb der Messstelle. Flussaufwärts kommt auch der Melirolo-Augengneis (Augengneis, Granodiorit) vor. Tonalite können geklüftet sein und weisen eine variable Durchlässigkeit auf. Auch der Augengneis kann zerklüftet sein. Östlich der Messstelle (z.B. 2.6 km; ausserhalb des Einzugsgebiets) kommen in den Tonaliten Quellen vor. Deshalb wurde die Messstelle der Klasse 4 zugeordnet. In [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] wird erwähnt, dass das Gebiet in eine sehr steile Talflanke eingeschnitten ist und deshalb mit einem tief liegenden GW-Spiegel mit hohem Gefälle und bedeutendem unterirdischem Abfluss zu rechnen ist. In [17] wird ein geologisches Profil angegeben, welches durch das Becken des Staudamms von Carmena verläuft. Es wurden auch Schieferungsflächen und Klufsysteme kartiert. Die Kluftöffnung wurde aber nicht aufgenommen, so dass kein k-Wert daraus berechnet werden kann. Das hydrolgeologische Verhalten der Strukturen (durchlässige oder undurchlässig Störzonen) wird im Bericht nicht abschliessend beurteilt.	4	C
2349 Breggia	Rechtsufrig der Messstelle 2349 Breggia grenzen gemäss Geocover künstliche Auffüllungen und Aufschüttungen an das Fliessgewässer. Deren Durchlässigkeit ist nicht bekannt. Linksufrig grenzen Konglomerate und Sandsteine an die Breggia. Etwa 20 m stromaufwärts der Messstelle stehen jedoch auch rezente Alluvionen (vorwiegend Schotter) an. Weiter stromaufwärts kommen zudem auch glazifluviale Ablagerungen, Mergel und Kalke vor. Bohrungen, welche ca. 120 m stromaufwärts der Messstelle abgeteuft wurden, bestätigen, dass kiesige Lockergesteine über dem Konglomerat abgelagert worden sind. Aus den Konglomeraten wird ebenfalls Wasser gefasst (siehe z.B. Schutzzonenbericht). Es ist schwierig zu beurteilen, ob die Grundwasserzirkulation im Fels oder im Lockergestein bedeutender ist. Vemutlich müssen beide Arten von Zirkulationen berücksichtigt werden. Wasserverluste in den Alluvionen werden auch in [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] erwähnt.	1 / 7	A
2612 Riale di Pincascia	Oberhalb der Messstelle 2619 Riale di Pincascia grenzt der Fluss rechtsufrig auf einer Distanz von ca. 35 m an einen Bachschuttkegel (Geocover, map.geo.admin.ch). Entlang dieser Distanz sind Wasserverluste in den erfahrungsgemäss gut durchlässigen Bachschuttablagerungen zu erwarten. Deshalb wurde die Messstelle in Klasse 1 eingestuft. Linksufrig stehen Gneise und Amphibolite an. In der Nähe der Messstelle steht das Fliessgewässer nicht in Kontakt mit glazialen Ablagerungen. Auf den südlichen Kartenblätter gibt es auf dem Geocover Hinweise auf eine Zerklüftung der Felsformationen und auf Quellen. Es liegt zudem auch ein Schutzzonendossier für zwei Kluftquellen ([26]) vor, welche ca. 1.15 km nördlich der Messstelle liegen. Es scheint also auch eine gewisse Grundwasserzirkulation im Fels vorhanden zu sein (Klasse 4). Die Grundwasserzirkulation im Fels spielt aber im Vergleich zu derjenigen im Lockergestein vemutlich eine untergeordnete Rolle.	1 / (4)	C
2605 Verzasca	Die Messstelle 2605 Verzasca liegt vollständig bzw. beidufrig auf granitischem Zweiglimmergneis. Ca. 400 m stromaufwärts der Messstelle liegt das Bachbett auf Gneisen und Amphiboliten. Es gibt gewisse Hinweise auf eine Zerklüftung der Felsformationen, insbesondere auf den südlichen Kartenblätter (Geocover, map.geo.admin.ch). Dort werden auch ein paar Quellen angegeben, z.B. ca. 1.1 km und 1.6 km südlich der Messstelle. Etwa 2 km nördlich der Messstelle liegen die gefassten Quellen der Wasservesorgung von Lavertezzo (siehe [26]). Es handelt sich um Kluftquellen und die Messstelle wurde deshalb der Klasse 4 zugeordnet. In einem Bericht von 1964 der ETH ([33]) wird in Zusammenhang mit der Sicherheit des Staubeckens von Vogorno erwähnt, dass aufgrund der steil stehenden Felsflanken keine tiefgehenden Längskl üftungen entlang des Tals vorhanden sind. Im geolgischen Schlussbericht über die Staumauer [32] geht man von einer 5 bis 7 m mächtigen, oberflächlichen Verwitterung des Felses (siehe fessurazione valiva) aus. In den Galerien wurde jedoch nur lokal Tropfwasser beobachtet. Der intakte Fels ist weitgehend undurchlässig (siehe Kapitel permeabilita delle rocce). Das Staubecken ist ziemlich dicht, obwohl Verrwerfungen darin vorhanden sind. In der Galerie für die Transportleitung wurden jedoch Wasserzuflüsse beobachtet.	4	B
2356 Riale di Calneggia	Bei der Messstelle 2356 Riale di Calneggia liegt das Fliessgewässer gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) zwar linksufrig auf dem Fels (dunkler Biotitgranodioritgneis mit Augen), rechtsufrig grenzt es jedoch an Gerhängeschutt und Trockenschuttkegel an. Ca. 120 m flussaufwärts der Messstelle liegt das Bachbett sogar vollständig im Gehängeschutt / Trockenschuttkegel. Zahlreiche Quellen zeugen von der guten Durchlässigkeit dieser Lockergesteine. Die Messstelle wurde deshalb der Klasse 1 zugeteilt. Im Fels gibt es gewisse Hinweise auf eine Zerklüftung aber keine Quellen (gemäss Geocover). Die Klasse 5 wurde deshalb auch aufgeführt. Die Grundwasserzirkulation im Fels spielt im Vergleich zu derjenigen im Lockergestein aber vermutlich nur eine untergeordnete Rolle. Es sind keine Bohrdaten in diesem Gebiet vorhanden.	1 / (5)	C

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2112 Sitter	Im Bereich der Messstelle 2112 Sitter grenzen linksufrig Niederterrassen (Moräne) und rechtsufrig Alluvionen an das Fliessgewässer an (Geocover, map.geo.admin.ch). Die Alluvionen dürften eine gute, das Moränenmaterial eine mässig bis gute Durchlässigkeit aufweisen. Die Messstelle liegt ca. 40 m unterhalb des Kontakts zwischen den Alluvionen und der Unteren Süsswassermolasse (USM: Süsswasserkalke/Mergelsteine/Sandsteine). Entlang dieser Strecke sind Wasserverluste in den Alluvionen möglich und die Messstelle wurde aus diesem Grund der Klasse 1 zugeordnet. Die Moräne dürfte eine geringer Durchlässigkeit als die Alluvionen haben, was eine Einteilung der Messstelle in Klasse 2 ergeben würde. Oberhalb des Kontakts liegt das Gewässer vollständig auf der USM. Die flussaufwärts gelgenen Alluvionen keilen aus. Auf der Geoportal des Kantons AI ist ein Grundwasservorkommen geringer Mächtigkeit (0 - 2 m) ca. 30 m nördlich der Messstelle ausgeschieden. Eine Erdwärmesondenbohrungen wurden an folgenden Koordinaten abgeteuft: 749'086 / 244'320. Darin wurde aber nur die Moräne und keine Alluvionen erschlossen (siehe Bohrprotokoll). Es sind keine weiteren Bohrungen vorhanden, welche Auskunft über die Alluvionen geben würden. Der Fels der USM kann porös, geklüftet und verkarstet sein. Zahlreiche Dolinen (z.B. 1.5 km und 1.85 km südwestlich der Messstelle) sind Zeugen von Verkarstungsprozessen. Eine Quelle entspringt ca. 7.15 km östlich der Messstelle aus dieser Formation. Deshalb wurde auch die Klasse 10 aufgeführt.	1 / (2) / (10?)	B
2308 Goldach	Im Bereich der Messstelle 2308 Goldach grenzen beidufrig Bachschuttablagerungen an das Fliessgewässer gemäss Geocover (map.geo.admin.ch). Flussaufwärts grenzen auch Alluvionen und Moräne an das Gewässer. Der Bodensee liegt nur 425 m flussabwärts der Messstelle. Die Messstelle liegt im Bereich eines breiten Schuttkegels, der zum See hin ein Delta aufbaut. Es wird schwierig sein, ein Querschnitt des Grundwasserleiters zu definieren. Insbesondere ist die seitliche Begrenzung des unterirdischen Einzugsgebiets (entspricht nicht dem oberflächlichen Einzugsgebiet) schwierig zu bestimmen. Auf der Grundwasserkarte des Kantons St-Gallen (rechtsufrig) ist ein Grundwasservorkommen sehr grosser Mächtigkeit (> 20 m) in diesem Bereich vorhanden und die Karte weist auf eine Exfiltration von Flusswasser ins Grundwasser hin. Bohrungen und die dazugehörigen Gutachten bestätigen das Vorhandensein eines Lockergesteinsgrundwasserleiters (Klasse 1). Im Zuströmbereich der Messstelle (ca. 200 bis 500 m oberhalb der Messstelle) wurden Kiesgruben betrieben, welche anschliessend mit Aushub- und Ausbruchbruchmaterial, Bauschutt sowie in geringen Mengen auch Kehricht und Gewerbe-/Industrieabfälle wieder verfüllt wurden. Die Durchlässigkeit dieses Materials dürfte sehr unterschiedlich von derjenigen des eigentlichen Grundwasserleiters sein.	1	A
2374 Necker	Im Bereich der Messstelle 2374 Necker grenzen rechtsufrig Alluvionen und linksufrig die Obere Süsswassermolasse (OSM: Süsswasserkalke, Mergelsteine, Sandsteine) an das Fliessgewässer (Geocover, map.geo.admin.ch). Unterhalb der Messstelle (ca. 20 m) grenzt beidufrig die OSM an das Gewässer. Gemäss Geocover grenzt das Flussbett unmittelbar oberhalb der Messstelle rechtsufrig an Alluvionen. In diesem Bereich sind Wasserverluste in den Alluvionen möglich. Auf der Grundwasserkarte des Kantons St-Gallen ist ein geringmächtiges Grundwasservorkommen (0 - 2 m) in diesem Bereich ausgeschieden. Obwohl keine Hinweise auf eine Zerklüftung der OSM auf dem Geocover angegeben werden, entspringen viele Quellen aus dieser Formation. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass eine gewisse Grundwasserzirkulation im Molassefels vorhanden ist. Die Messstelle wird deshalb als "1" / "7" klassiert. Vermutlich dominiert aber die Grundwasserzirkulation im Lockergestein. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. Gemäss [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] werden die geringmächtigen Alluvionen bei der Messstation durch ein Nagelfluband unterbrochen, was unterirdische Wasserverluste ausschliesst. Das stimmt jedoch nicht überein mit dem Geocover, wo Alluvionen über dem Nagelfluhband abgelagert worden sind.	1 und 7	B
2414 Rietholzbach	Das Fliessgewässer liegt vom Bereich der Messstelle 2414 Rietholzbach bis in eine Distanz von ca. 350 bis 380 m flussaufwärts vollständig auf Mergelstein. In dieser Distanz findet der Übergang zu Sandstein/Konglomerat/Mergelstein statt (vgl. Geocover, map.geo.admin.ch). Es gibt keine Hinweise auf eine Zerklüftung der Gesteine auf dem Geocover, es sind aber einige Quellen im Mergelstein angegeben, welche meistens an Konglomeratbänke gebunden sind. Solche Konglomeratbänke sind entlang der oberen 350 m flussaufwärts der Messstelle nicht ausgeschieden. Eine Quelle entspringt jedoch direkt aus dem Mergelstein ca. 615 m östlich der Messstelle, etwa auf der gleichen Höhe. Deshalb wird die Messstelle trotzdem der Klasse 4 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. Gemäss [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] wird ein potentieller Wasserverlust durch den erhöhten hydraulischen Gradienten begünstigt und könnte selbst bei engen Klüften und speziell bei Niedrigwasser verhälnismässig grosse Bedeutung erlangen. Diese Schlussfolgerung wurde jedoch anhand der vereinfachten geotechnischen Karte der Schweiz (1:200'000), auf welcher keine Unterteilung in Mergelstein und Sandstein/Konglomerat/Mergelstein vorgenommen wurde, hergeleitet. Deshalb sollte diese Aussage mit Vorsicht interpretiert werden. Nichts desto trotz bestätigt sie, dass eine gewisse Grundwasserzirkulation im Fels möglich ist.	4	C
2126 Murg	Die Messstelle 2126 Murg ist gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) vollständig umgeben von Schotter/Alluvionen. Moränen grenzen an diese Schotter an. Es gibt oberhalb und unterhalb der Messstelle Bohrungen. In der im Abstrom liegenden Bohrung wurden bis in eine Tiefe von 2 m Deckschichten und Alluvionen, welche trocken waren, angetroffen. Darunter folgt Moränenmaterial, in dem ein Grundwasserspiegel gemessen werden konnte. In der Bohrung stromaufwärts wurde der Übergang von Deckschicht/Alluvion zu der Oberen Süsswassermolasse in einer Tiefe von 1.8 m angetroffen. Der Grundwasserspiegel lag in einer Tiefe von 1.3 m. Die unteren 50 cm der Deckschichten/Alluvionen waren also mit Grundwasser gesättigt. Da Kies bzw. Alluvionen stromaufwärts und stromabwärts der Messstelle vorhanden sind, wird die Messstelle der Klasse 1 zugeordnet, obwohl die Kiese stromabwärts trocken waren. Je nach Wasserstand können sich die hydrogeologischen Verhältnisse verändern, was zu einer grösseren, wassergesättigten Mächtigkeit fürhen kann. Da auch in der Moräne Grundwasser angetroffen wurde, wird auch auf Klasse 2 hingewiesen. Es wird aber angenommen, dass der Grundwasserfluss in den Alluvionen bedeutener ist als in der Moräne. Es sind weitere Bohrdaten stromaufwärts vorhanden. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Thurgau ist ein Grundwasservorkommen mit einer Mächtigkeit von 2 m im Bereich der Messstelle ausgeschieden. Gemäss [Einzugsgebietskenngrössen der HUG] kann der Fluss in Trockenperioden vollständig versiegen, was ein weiterer Hinweis für einen Grundwasserfluss in den Alluvionen liefert.	1 / (2)	B
2300 Minster	Die Messstelle 2300 Minster liegt vollständig in Lockergesteinen, welche auf dem Geocover (map.geo.admin.ch) nicht weiter differenziert werden. Das entsprechende Blatt des geologischen Atlas existiert noch nicht. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Schwyz liegt die Messstelle in einem Gebiet geringer Durchlässigkeit. Auf der Gewässerschutzkarte ist jedoch eine Grundwasserfassung (Sodbrunnen) im Bereich der ARA, ca. 135 m flussaufwärts der Messstelle, ausgeschieden. Deshalb wird die Messstelle trotzdem der Klasse 1 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten vorhanden.	1	B

Anhang 1

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2635 Grossbach	Das Fliessgewässer liegt im Bereich der Messstelle 2635 Grossbach und stromaufwärts auf Bachschutt und Lockergesteinen (Geocover, map.geo.admin.ch). An diese Einheiten grenzen z.T. Rutschmassen, Hangschutt und Schotter (Niederterrasse). Die räumliche Ausdehnung des Lockergesteinsgrundwasserleiters wird schwierig zu definieren sein (Querprofil). Auf der Grundwasserkarte des Kantons Schwyz liegt die Messstelle zwischen zwei Grundwassergebiete geringer Durchlässigkeit. Auf der Gewässerschutzkarte sind sowohl oberhalb als auch unterhalb der Messstelle in der Talsohle Trinkwasserfassungen eingetragen. Die Schutzzonenabklärungen für die flussaufwärts gelegene Fassung Chalberweidli ([11], [12]), weisen auf einen Grundwasserstockwerkbau hin. Deshalb wird die Messstelle trotdem der Klasse 1 zugeordnet. Es sind keine Bohrdaten vorhanden.	1	B
2609 Alp	Im Bereich der Messstelle 2609 Alp liegt das Bachbett auf einem schmalen, links und rechts anstehenden Alluvionen Band gemäss Geocover (map.geo.admin.ch). Auf der Grundwasserkarte des Kantons Schwyz ist kein Grundwasservorkommen in diesem Bereich ausgeschieden. Auf der Gewässerschutzkarte liegt das Gebiet im Bereich A0. An das schmale Alluvionenband grenzen Moräne oder die Subalpine Molasse (Konglomerat, Mergelstein, Kalksandstein). Aus der subalpinen Molasse entspringen z.B. 1.5 km süd-westlich zahlreiche Quellen, welche darauf schliessen lassen, dass eine Grundwasserzirkulation im Fels stattfindet, obwohl keine Hinweise auf eine Zerklüftung des Felses auf dem Geocover vorhanden sind. Es sind keine Bohrdaten vorhanden. Aufgrund des Vorhandenseins von Quellen, welche aus der Subalpinen Molasse entspringen, wird die Messstelle in Klasse 7 eingestuft. Da auch im schmalen Alluvionenband ein Grundwasserfluss möglich ist, wird auch Klasse 1 aufgeführt. Es wird aber vermutet, dass der Grundwasserfluss im Lockergestein, aufgrund der geringen Ausdehnung des Alluvionenbands, gering ist.	7 / (1)	C
2604 Biber	Im Bereich der Messstelle 2604 Biber, liegt das Bachbett in Bachschutt und Alluvionen. In einem Querprofil senkrecht zum Fluss im Bereich der Messstelle kommen auch glazifluviatile Schotter, ein Rutschgebiet, Sumpf sowie die granitische Molasse (Siltstein, Glimmersandstein, Mergelstein) gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) vor. Es sind Bohrungen in der Nähe der Messstelle vorhanden. Über das Geoportal hat man aber keinen Zugriff auf die Bohrprofile. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Schwyz ist kein Grundwasservorkommen im Bereich der Messstelle ausgeschieden. Da die beschriebenen Lockergesteine aber eine gute Durchlässigkeit vermuten lassen, wird die Messstelle trotzdem der Klasse 1 zugeordnet.	1	C
2299 Alpbach	Stromaufwärts der Messstelle 2299 Alpbach liegt das Bachbett entlang einer Strecke von ca. 190 m auf Hangschutt und Sturzablagerungen (Geocover, map.geo.admin.ch). Gemäss Geoportal des Kantons Uri entpsringen Quellen aus diesem Material oberhalb der Messstelle. Auf der Grundwasserschutzzonenkarte des Kt. Uri liegt die Messstelle in einer Schutzzone S2, obwohl auf der Grundwasserkarte kein Grundwasservorkommen in diesem Bereich ausgeschieden ist. Auf der Gewässerschutzkarte, liegt dieses Gebiet im Bereich A0. Flussaufwärts der Hangschuttablagerungen grenzen auch Moräne und der Erstfeld-Gneiskomplex (Orthogneis, Paragneis, Migmatit) an das Gewässer. Auf einem Querprofil, etwa senkrecht zu der Achse des Fliessgewässers kommen auf der linken Talseite auch verkarstungsfähige Formationen auf (Sedimentbedeckung des Aar-Massivs: Quinten-Formation, etc.). Im Erstfelder-Gneiskomplex können Klüfte, die eine Wasserzirkulation erlauben, vorkommen. Da das Bachbett im Bereich der Messstelle auf erfahrungsgemäss gut durchlässigen Lockergesteinen liegt, wird die Messstelle aber der Klasse 1 zugeordnet. Es sind auf dem Geoportal keine Bohrungen in diesem Gebiet angegeben.	1	C
2607 Goneri	Im Bereich der Messstelle 2607 Goneri liegt das Bachbett gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) vollständig auf Bachschuttablagerungen, in denen ein Grundwasserfluss möglich ist. Aus diesem Grund wurde die Messstelle der Klasse 1 zugewiesen. Ca. 120 m flussaufwärt liegt das Bachbett auf einer Strecke von etwa 140 m auf Moräne, weiter flussaufwärts folgen Orthogneis und Zweiglimmergneise sowie der Val-Nalps Gneiskomplex (Serpentinit, Gneis, Amphibolit). Es gibt auf dem Geocover keine Hinweise auf eine Zerklüftung der Felsformationen und es werden keine Quellen vermerkt (siehe Geocover). Gemäss Schutzzonenbericht der Quellen der Wasservesorgung Oberwald ([20]) kommen aber Kluftquellen vor und die Grundwasserzirkulation im Fels spielt auch eine gewisse Rolle. Daher wird auch auf Klasse 4 verwiesen. Auf der Gewässerschutzkarte des Kantons Wallis liegt die Messstelle und das Gebiet flussaufwärts im Bereich Au von Lockergesteinen. Es muss also mit einem Grundwasserfluss in den Lockergesteinen gerechnet werden. Eine Bohrung und ein Baggerschlitz wurden ca. 135 m nord-östlich der Messstelle, im Bereich der Moränenablagerungen ausgeführt. Im Baggerschlitz wurden Wasserzutritte beobachtet, in der Bohrung dagegen nicht. Die Lockergesteine (Bachschutt und verschwemmte Moräne) reichen in der Bohrung bis in eine Tiefe von 14.7 m und bestätigen die Klassifikation als Lockergesteinsgrundwasserleiter bzw. die Einteilung in Klasse 1.	1 / (4)	B
2276 Grosstalbach	Flussaufwärts der Messstelle 2276 Grosstalbach liegt das Bachbett auf einer Distanz von gut 200 m auf dem verkarstungsfähigen Kieselkalk (Geocover, map.geo.admin.ch). Ca. 6 km nord-östlich der Messstelle (d.h. ausserhalb des Einzugsgebiets, auf der andere Seite des Vierwaldstätter Sees) entspringen Quellen aus dem Kieselkalk. Es gibt auch Hinweise auf eine Zerklüftung der Felsformationen (u.a. auch des Kieselkalks). An den Kieselkalk grenzen Hangschutt und gemischter Schutt. In einem Querprofil oberhalb der Messstelle tretten auch weitere verkarstungsfähige Formationen (Schrattenkalk, Seewen-Fromation, etc.) auf. Aufgrund des Vorhandenseins diverser verkarstungsfähiger Einheiten, wird die Messstelle in Klasse 10 eingestuft. Die Zerklüftung deutet ebenfalls auf Klasse 5 hin. Es wird aber vermutet, dass sie eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu der Verkarstung spielt. Um genauere Aussagen zu äussern und die tatsächlich relevanten Prozesse zu identifizieren wären zusätzliche Abklärungen notwendig. Es werden keine Bohrungen in der Nähe der Messstelle angegeben.	10 / (5)	C
2608 Sellenbodenbach	Das Bett des Fliessgewässers liegt im Bereich der Messstelle 2608 Sellenbodenbach auf Alluvionen gemäss Geocover (map.geo.admin.ch). Flussaufwärts folgt Bachschutt. Diese Gesteine wurden vermutlich über dem Fels der Oberen Süsswassermolasse (Konglomerat, Mergelstein, Süsswasserkalk) abgelagert. Möglich ist auch eine Ablagerung auf Moräne. Es gibt keine Hinweise auf eine Zerklüftung des Molassefelses und auch praktisch keine Quellen die daraus entspringen. Die Grundwasserzirkulation im Fels dürfte vernachlässigbar sein. Gemäss Grundwasserkarte des Kantons Luzern, liegt die Messstelle selber sowie der Bereich des Flusses oberhalb der Messstelle in einem Grundwasservorkommen mit einer Mächtigkeit von 0 - 5 m. Es muss also mit einem Grundwasserfluss in den Lockergesteinen gerechnet werden und die Messstelle kann in Klasse 1 eingeteilt werden. Es sind keine Bohrdaten in diesem Gebiet vorhanden.	1	B

Anhang 1

Messstelle	Beschreibung	Klasse	Güte Klass.
2244 Krummbach	Im Bereich der Messstelle 2244 Krummbach liegt das Bachbett gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) in kristallinem Felsgestein (Berisal Decke: Amphibolit, Paragneis, Glimmerschiefer), in einer tektonisierten Zone. Aus diesem Grund muss mit einer Zerklüftung gerechnet werden. In einer Distanz von ca. 6 km (ausserhalb des Eingzugsgebiets) entspringt eine Quelle aus dem Kristallin. Daher muss mit einer Grundwasserzirkulation im Fels gerechnet werden und die Messstelle wurde in Klasse 4 eingestuft. Drei Bohrungen wurde ca. 100 m östlich der Messstelle erstellt. Die Bohrkernaufnahmen bestätigen, dass der Fels zerklüftet und verschiefert ist. Drei weitere Bohrungen wurde ca. 1.15 km nord, nord-östlich der Messstelle erstellt. Auch diese Bohrungen zeigen, dass im Fels z.T. zahlreiche Trennflächen vorhanden sind. Der k-Wert für den Fels wird in der Bohrung SB02 mit 9.75 E-6 m/s angegeben. Es gibt auf dem Geocover zudem ein grosser Bruch, der etwa von Norden nach Süden durch das gesamte Einzugsgebiet der Messstelle verläuft. Auf der Gewässerschutzkarte des Kantons Wallis liegt das Flussbett im Bereich der Messstelle im Bereich Au für Lockergesteine. Vielleicht ist daher eine geringe Lockergesteinsbedeckung über dem Fels vorhanden. Deshalb wurde auch Klasse 1 als Möglichkeit aufgeführt. Es sind diesbezüglich aber keine Bohrdaten vorhanden. Um das Vorhandensein von Lockergesteinen zu bestätigen wären Detailkartierungen notwendig.	4 / (1 ?)	A
2161 Massa	Das Flussbett liegt im Bereich der Messstelle 2161 Massa und flussaufwärts davon vollständig auf kristallinem Felsgestein (hauptsächlich Gärsthorn-Gneiskomplex: Augengneis, Orthogneis). Es gibt Hinweise auf eine Zerklüftung der Felsformationen sowie Quellen die daraus entspringen (z.B. ca. 600 m süd-östlich von der Messstelle). Aus diesem Grund wurde die Messstelle der Klasse 4 zugeordnet. Auf dem Geoportal des Kantons Wallis (Gewässerschutzkarte) sind sogar mehrere Quellen angegeben. Diese Beobachtungen weisen auf eine Grundwasserzirkulation im Fels hin. Auf der Gewässerschutzkarte des Kantons Wallis liegen die Messstelle und das Flussbett flussaufwärts im Bereich üB. Bohrdaten von Erdwärmesondenbohrungen in Belalp und Riederalp bis in 50 - 90 m Tiefe bestätigen, dass der Fels stark geschichtet und geklüftet sein kann. Ein geologisches Gutachten über den Riederhorn Stollen ([37]) bestätigt, dass in den Gneisformationen starke Wasserzutritte (bis zu 200 l/s) entlang von Klüften vorkommen können.	4	A
2283 Rappengraben	Die Messstelle 2283 Rappengraben liegt auf dem Geocover (map.geo.admin.ch) auf dem Kontakt zwischen der anstehenden Napf-Formation (flussaufwärts) und einer geringmächtigen Lockergesteinsüberdeckung der Napf-Formation (flussabwärts). Die Napf-Formation besteht aus Schlammstein, Konglomerat und Arkose. Es gibt zwar keine Hinweise auf eine Zerklüftung des Molassefelses (Geocover), es sind aber mehrere Quellen in der näheren Umgebung vorhanden. Sie entspringen meistens aus der Lockergesteinsdecke, z.T. aber auch direkt aus der Napf-Formation. Diese Beobachtung bedeutet, dass eine Grundwasserzirkulation in der Lockergesteinsbedeckung (Klasse 1 ?) und im Fels (Klasse 7) angenommen werden muss. Vermutlich dominiert aber die Grundwasserzirkulation im Fels, weshalb die Messstelle Hauptsächlich der Klasse 7 (dominierende Klasse) zugeordnet wurde. Es sind keine Bohrungen in der Umgebung der Messstelle vorhanden.	7 / (1) ?	C
2343 Langeten	Das Bachbett liegt gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) im Bereich der Messstelle 2343 Langeten vollständig in der St-Gallen Formation (Schlammstein, Sandstein, Konglomerat). An diese Formation grenzen glazifluviale Schotter an. Vermutlich entwässern diese jedoch in die Langeten, da diese den Basisabfluss darstellt (Drainage der Schotter). Es gibt zwar keine Hinweise auf eine Zerklüftung der St-Gallen Formation, diverse Quelle (z.B. im Steinbruch, 500 m östlich der Messstelle oder ca. 1.2 km östlich-süd-östlich der Messstelle) entspringen aber daraus. Sie weisen auf eine Grundwasserzirkulation im Fels hin und aus diesem Grund wurde die Messstelle in Klasse 7 eingeteilt. Etwa 640 m flussaufwärts der Messstelle, hat es drei Erdsondenbohrungen, in denen Grundwasser in der Molasse vorgefunden wurde. Weitere Bohrungen sind in Huttwil vorhanden.	7	A
2471 Murg	Das Bachbett grenzt im Bereich der Messstelle 2471 Murg beidufrig an Alluvionen an (Geocover, map.geo.admin.ch). Die Untere Süsswassermolasse (USM: Süsswasserkalke, Sandstein, Mergelstein) ist nur stellenweise aufgeschlossen. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Bern liegt das Flussbett etwa auf der Grenze zwischen einem vermuteten Grundwasserhauptgebiet mittlerer Mächtigkeit zu einem vermuteten Randgebiet. Das Fliessgewässer kreuzt dann zumindest teilweise dieses Hauptgebiet, bevor es die Messstelle 2471 erreicht. In diesem Hauptgebiet wurden keine Bohrungen abgeteuft. Dennoch zeigt die Grundwasserkarte des Kt. Bern, dass mit dem Vorhandensein eines Lockergesteinsgrundwasserleiters gerechnet werden muss, weshalb die Messstelle in Klasse 1 eingestuft wurde. Bei der Murgbrücke, in einer Distanz von ca. 600 m flussabwärts der Messstelle, wurde eine Bohrung neben der Murg abgeteuft. Unter 2 m mächtigen Deckschichten, folgt direkt die USM. In diesem Bereich scheint das Grundwasservorkommen in den Lockergesteinen auszukeilen. Die Bohrung liegt jedoch ausserhalb des obenerwähnten Grundwasservorkommens und liefert keine Informationen über die geologischen Verhältnisse im Bereich der Messstelle 2471 selber. Oberhalb der Messstelle fliesst zudem auch der Brunnbach im obenbeschriebenen Grundwassergebiet. Der Brunnbach fliest noch oberhalb der Messstelle in die Murg und gehört deshalb auch zu deren Einzugsgebiet. Auf dem Geoportal des Kantons Solothurn sind keine Bohrdaten in diesem Gebiet vorhanden. Auch auf dem Geoportal des Kantons Argau sind keine Bohrdaten in diesem Gebiet vorhanden. Bei der Murgbrücke wird eine Bohrung für den Murgtunnel angegeben. Sie ist 31.6 m tief und wurde vermutlich in den Molassefels abgeteuft. Aufgrund deren Lage (Koordinaten: 2'629'684 / 1'234'076) liefert die Bohrung vermutlich keine Informationen über den vermuteten Lockergesteinsgrundwasserleiter in der Talsohle. Das Bohrprofil kann nicht abgerufen werden. Auf der Grundwasserkarte des Kantons Aargau ist kein Vorkommen ausgeschieden.	1	B
2603 Ilfis	Die Messstelle 2603 Ilfis ist gemäss Geocover (map.geo.admin.ch) umgeben von Alluvionen. Diese werden süd-östlich der Messstelle von der Gemeinde Langnau für die Trinkwassergewinnung mittels eines Vertikalfilterbrunnens genutzt. Die Napf-Formation (Schlammstein, Konglomerat, Arkose) und die Schüpferegg-Nagelfluh (Schlammstein, Konglomerat, Sandstein) stehen seitlich des Ilfistals an. Mehrere Bohrungen bestätigen das Vorhandensein eines Lockergesteinsgrundwasserleiters. Die Messstelle sollte deshalb in Klasse 1 eingeteilt werden. Die Messstelle 2603 Ilfis wurde als Fallbeispiel für die Berechnung des unterirdischen Abflusses verwendet.	1	A

Anhang 2

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

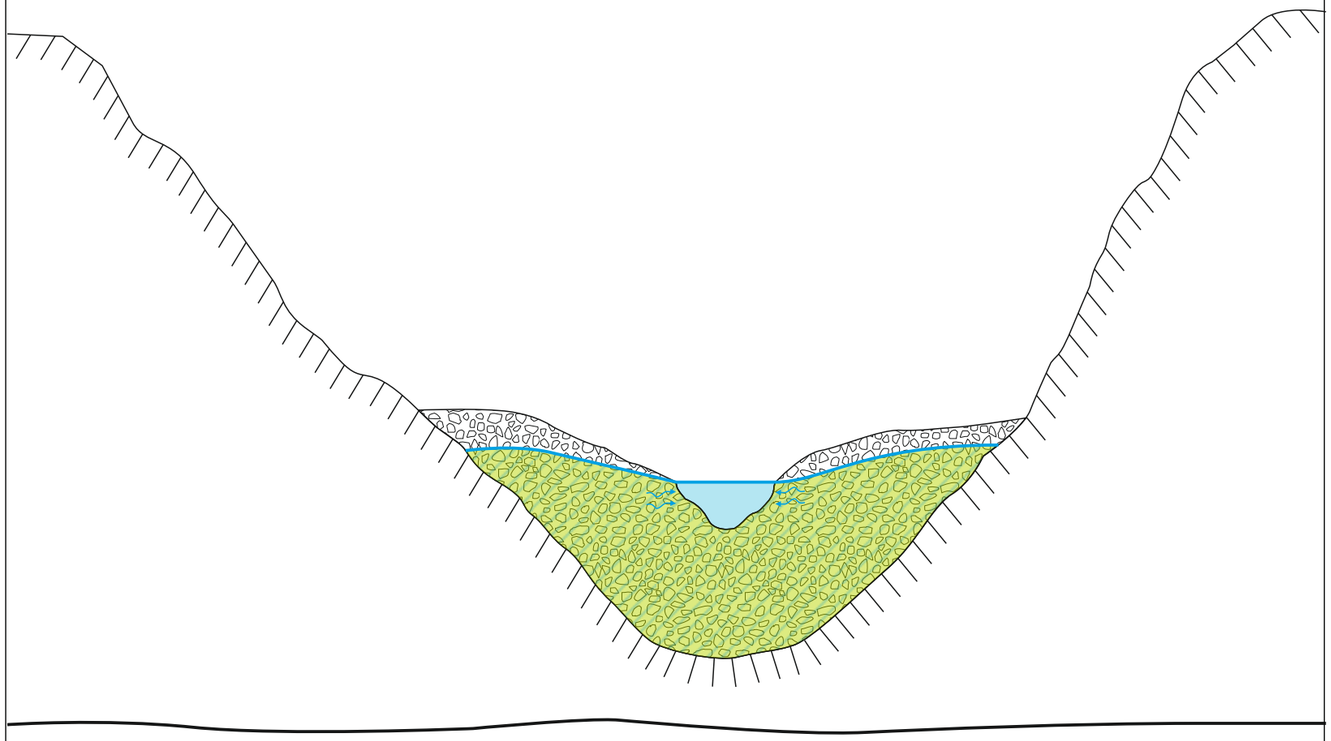
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

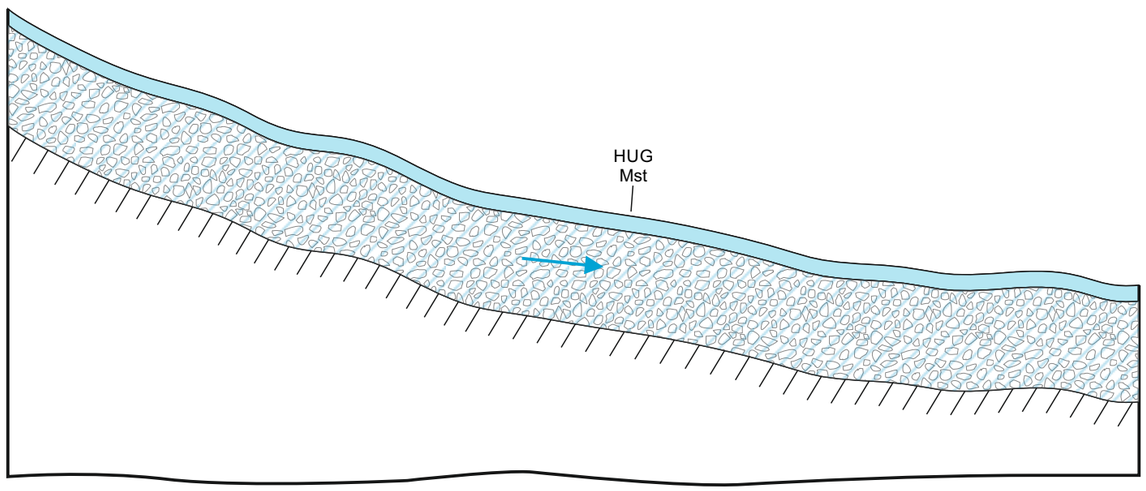
Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Lockergestein
- Grundwasserstauer
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 2	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 3

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

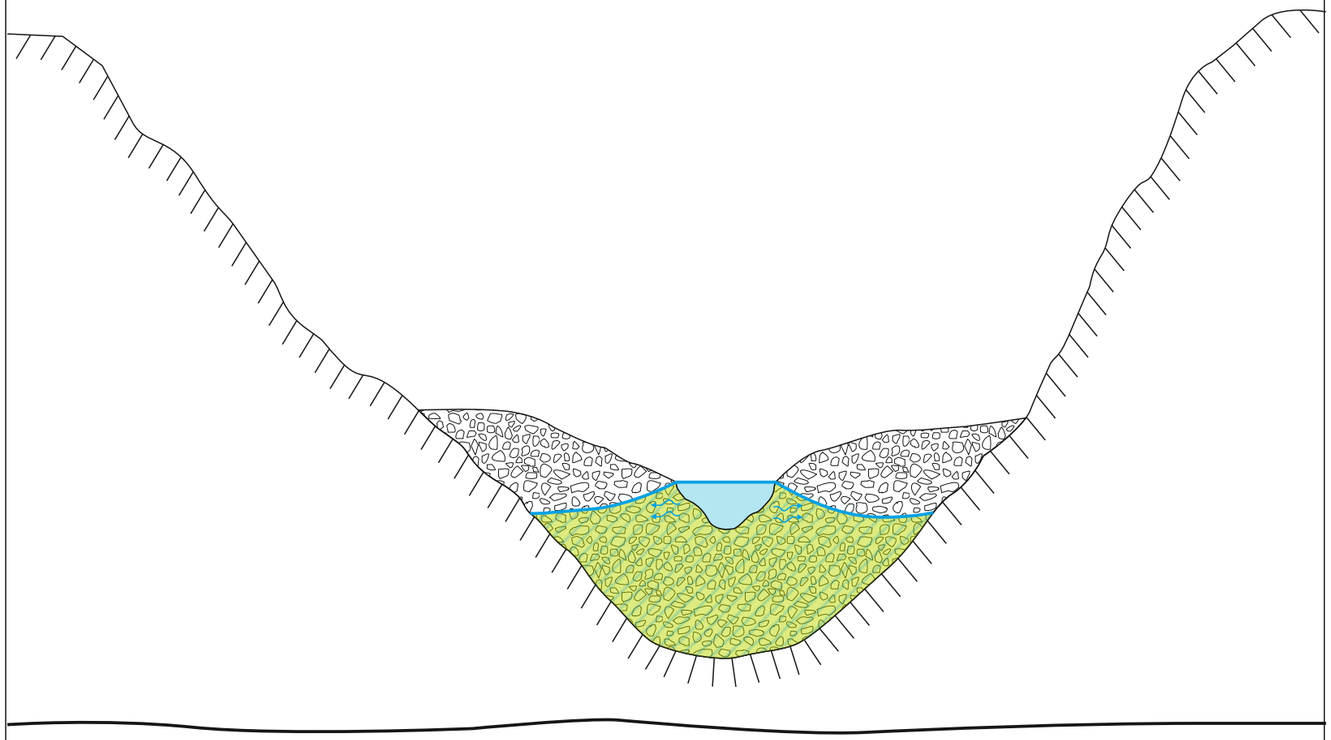
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

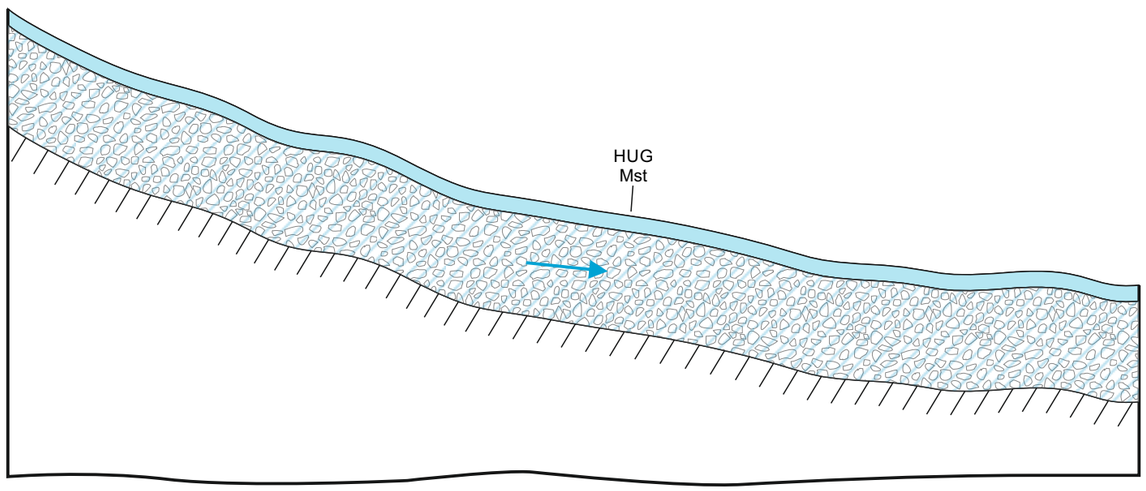
Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Lockergestein
- Grundwasserstauer
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 3	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 4

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

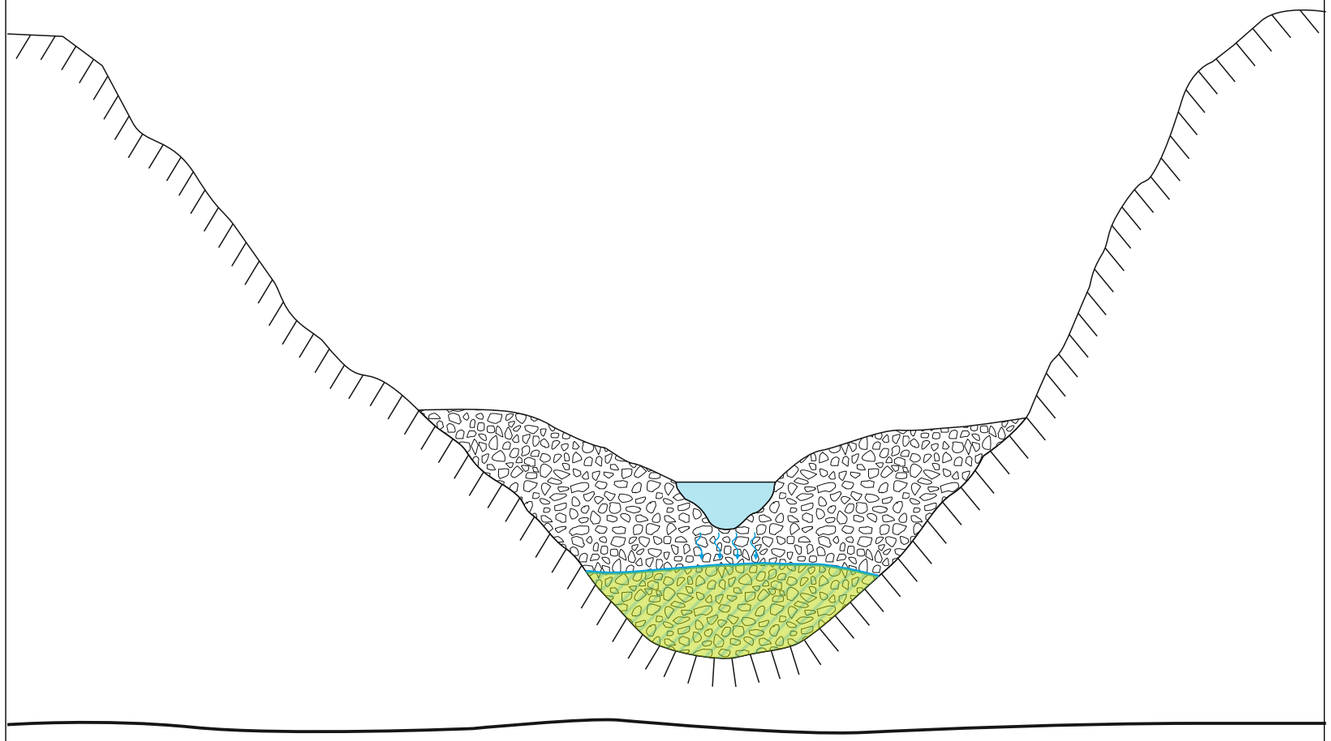
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

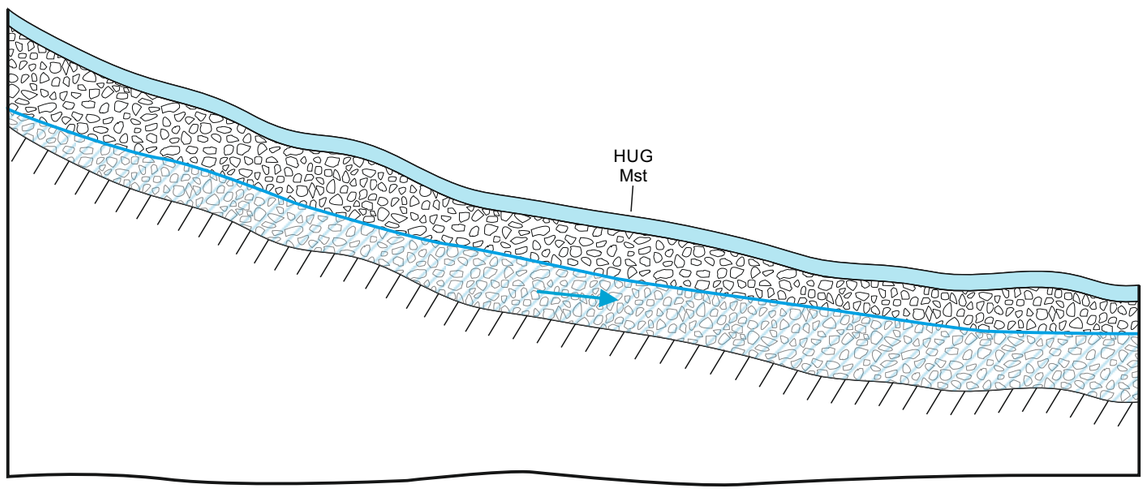
Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Lockergesteinsgrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Legende

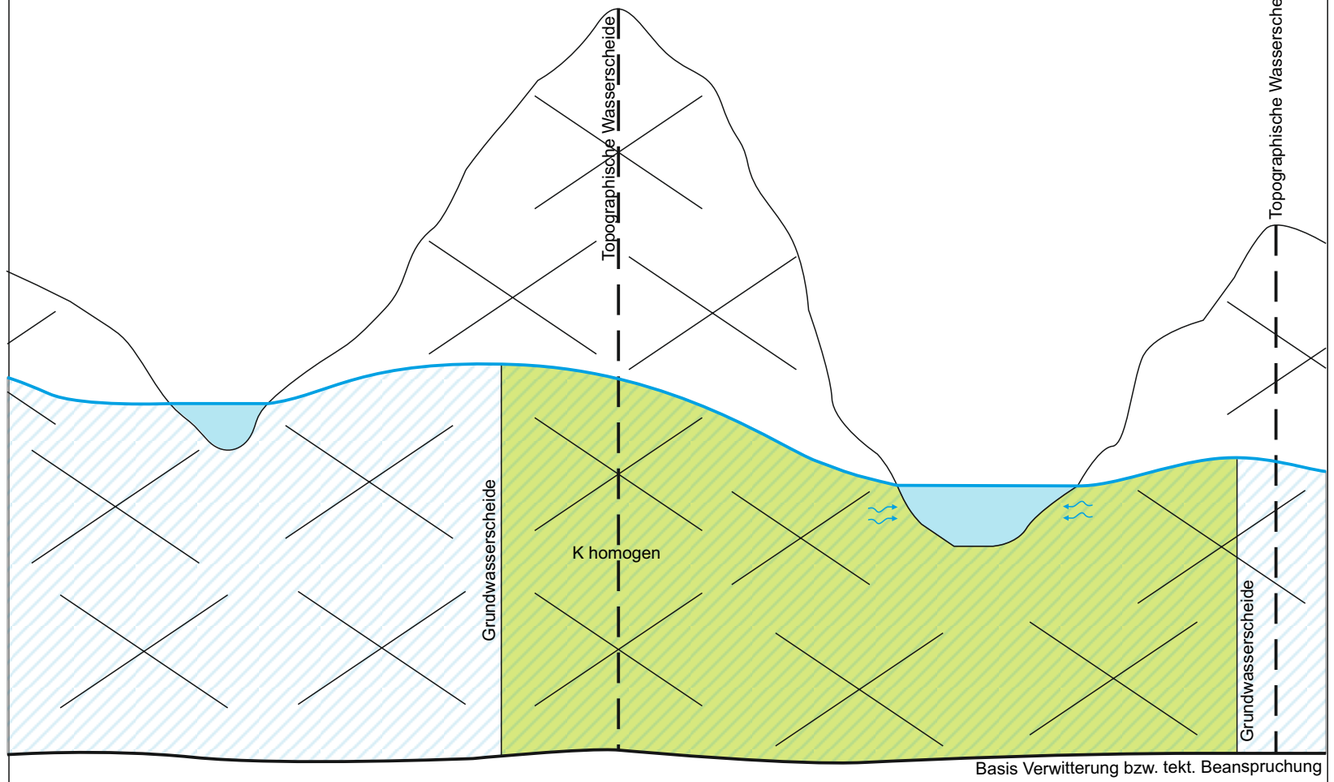
- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Lockergestein
- Grundwasserstauer
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 4	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

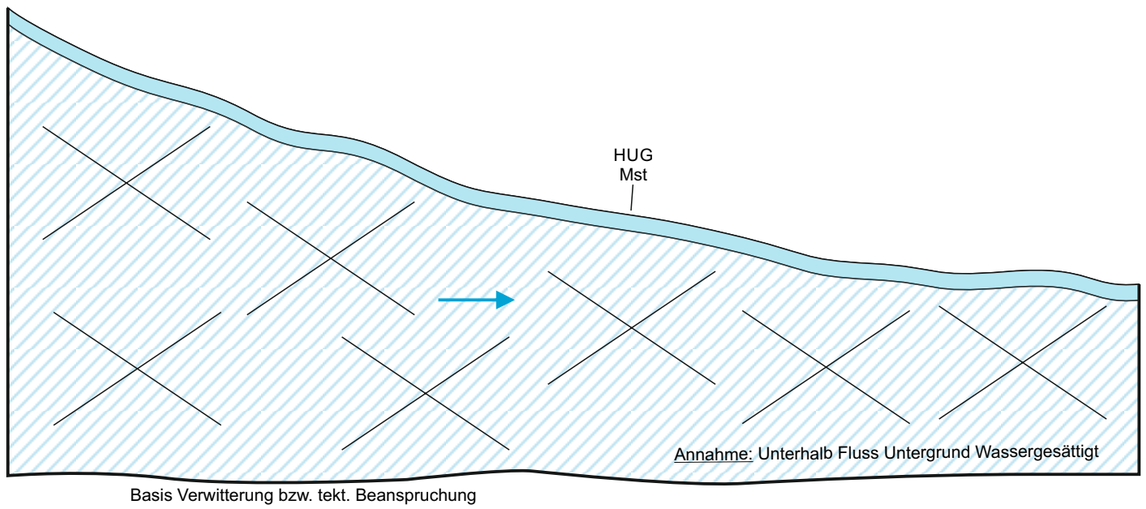
Anhang 5

Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

Legende

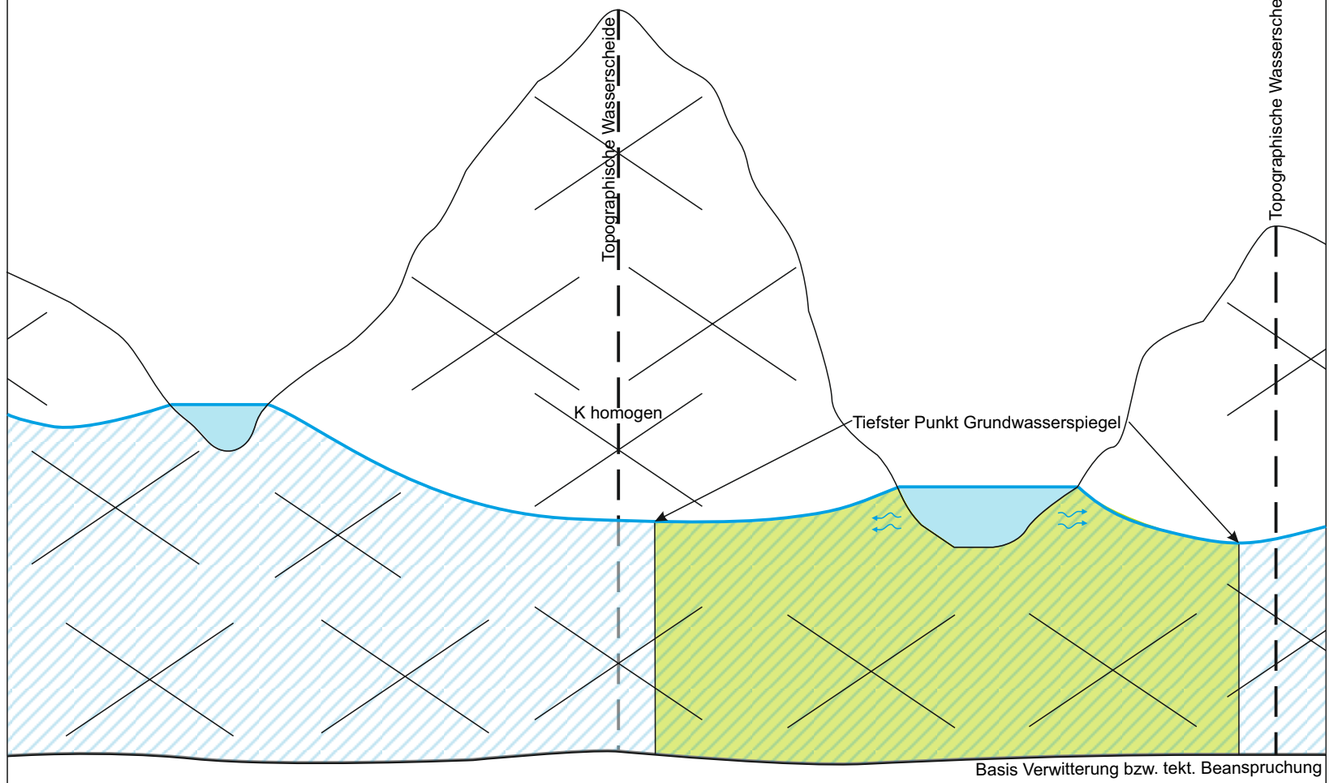
- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 5	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

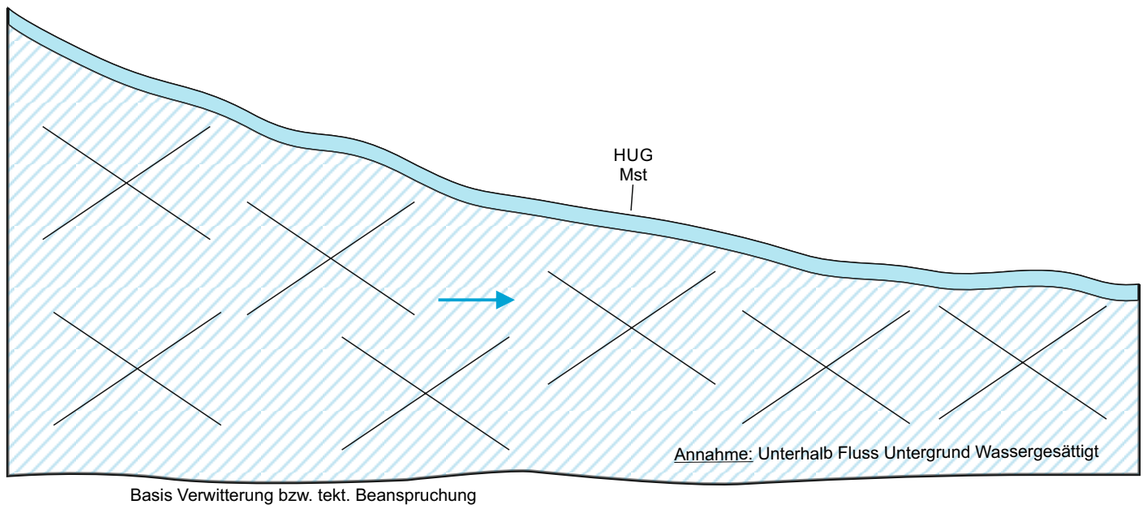
Anhang 6

Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

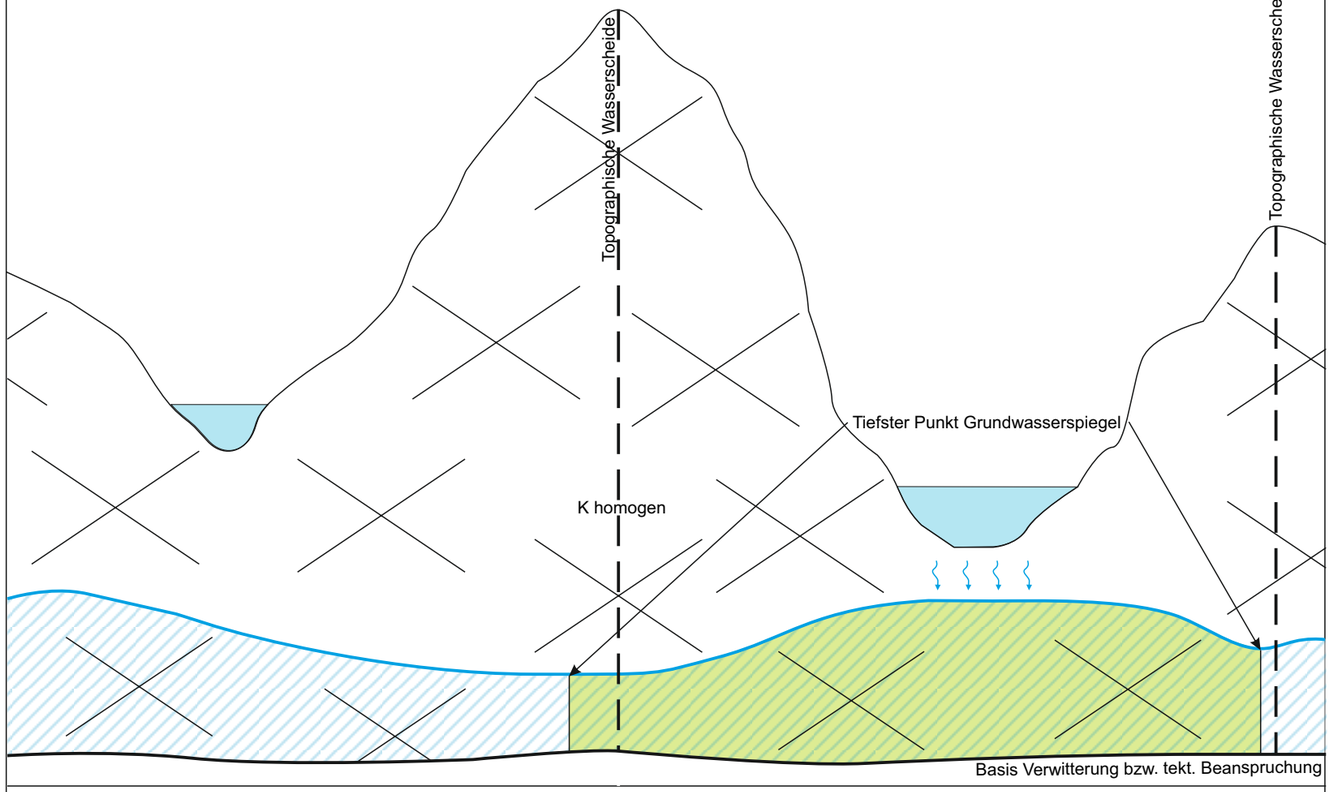
KELLERHALS + HAEFELI AG
GEOLOGEN | BERN STANS

Auftrags-Nr.: 11389	**Anhang-Nr.:** 6	**Format:** A3
Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 7

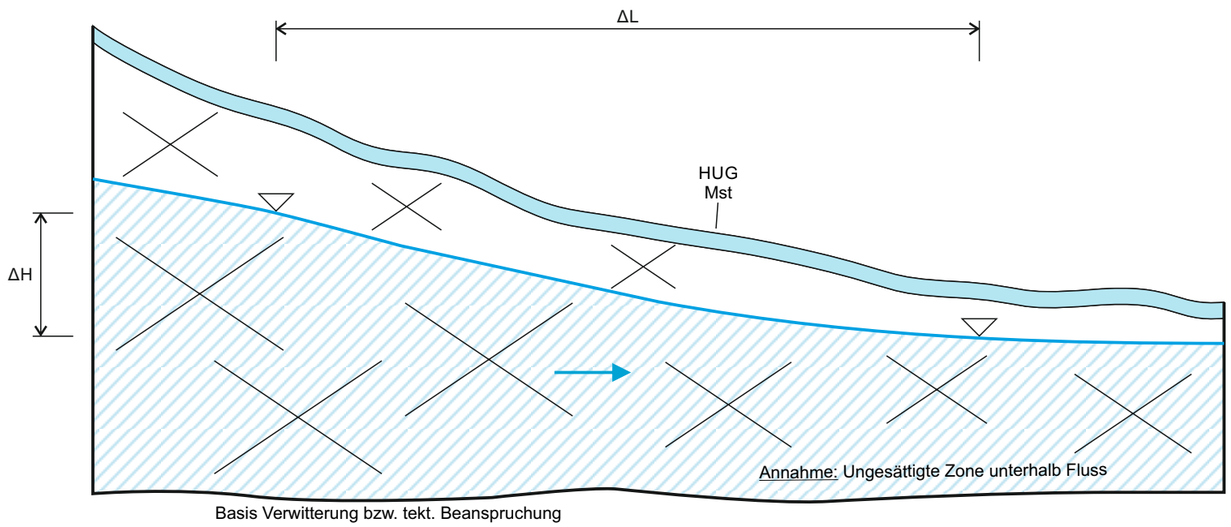
Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:

Hydraulischer Gradient $i = \frac{\Delta H}{\Delta L}$



Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Kluftgrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 7	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 8

Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

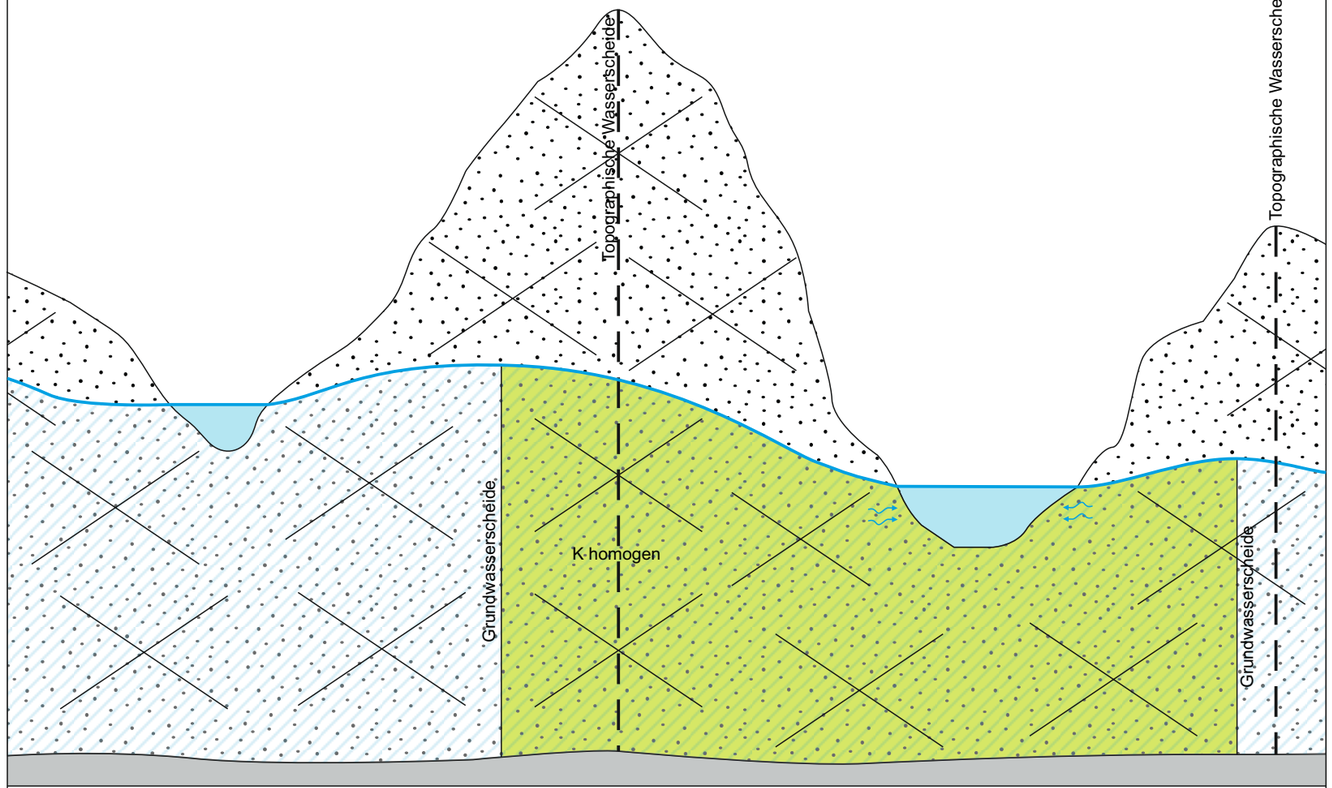
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

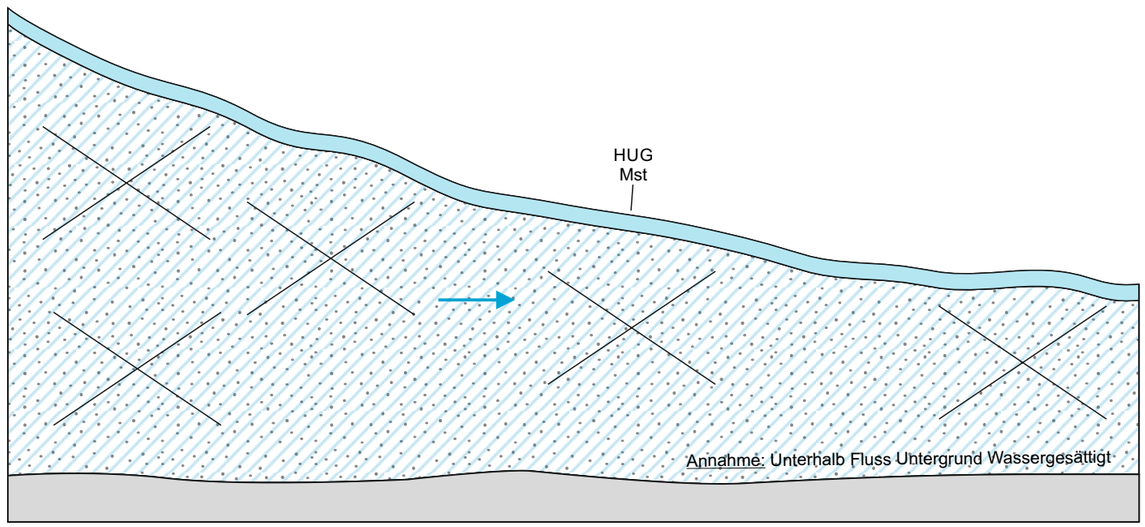
Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Grundwasserexfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Poröser Fels
- Grundwasserstauer (undurchlässige Formation)
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 8	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 9

Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

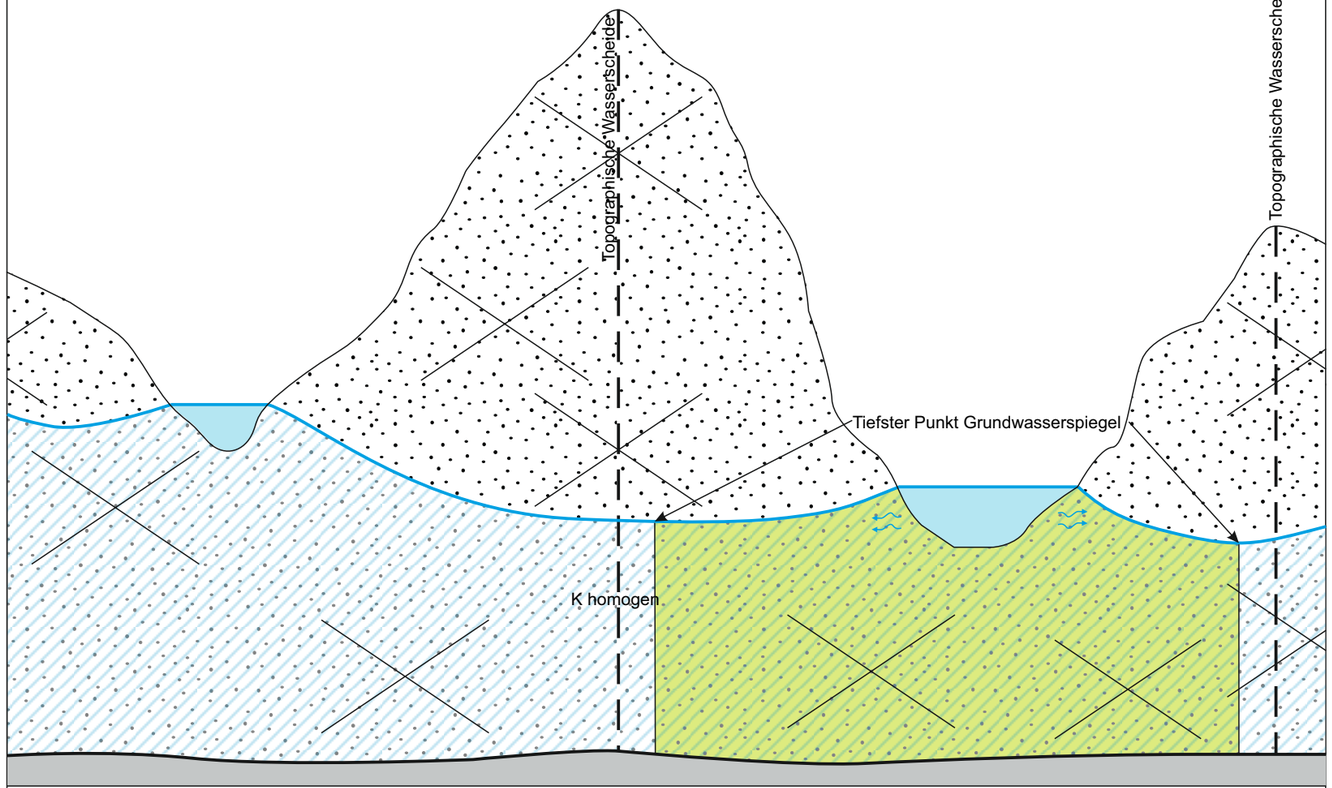
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

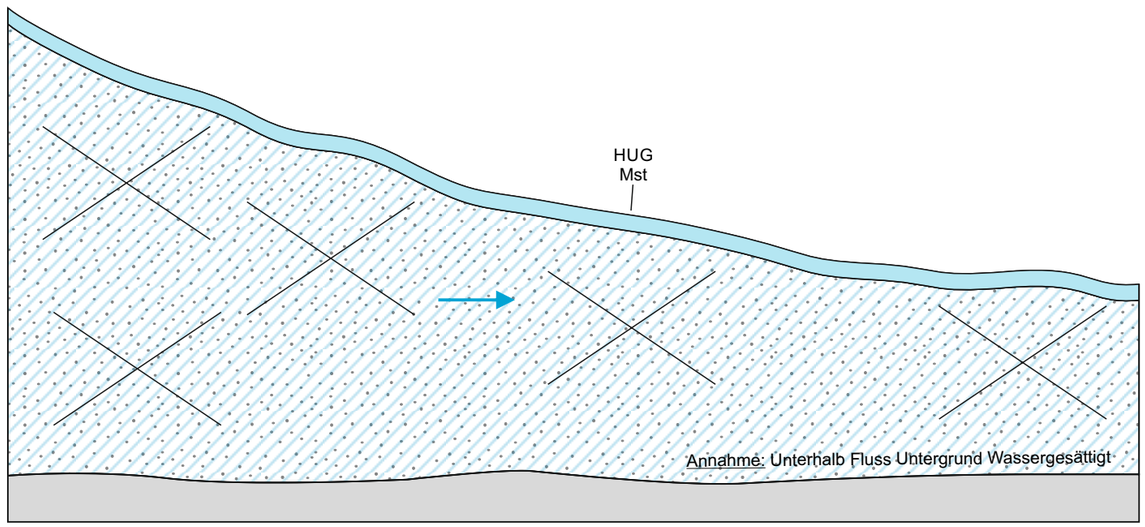
Schlussbericht Pilotprojekt

Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:



Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Poröser Fels
- Grundwasserstauer (undurchlässige Formation)
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 9	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		

Anhang 10

Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

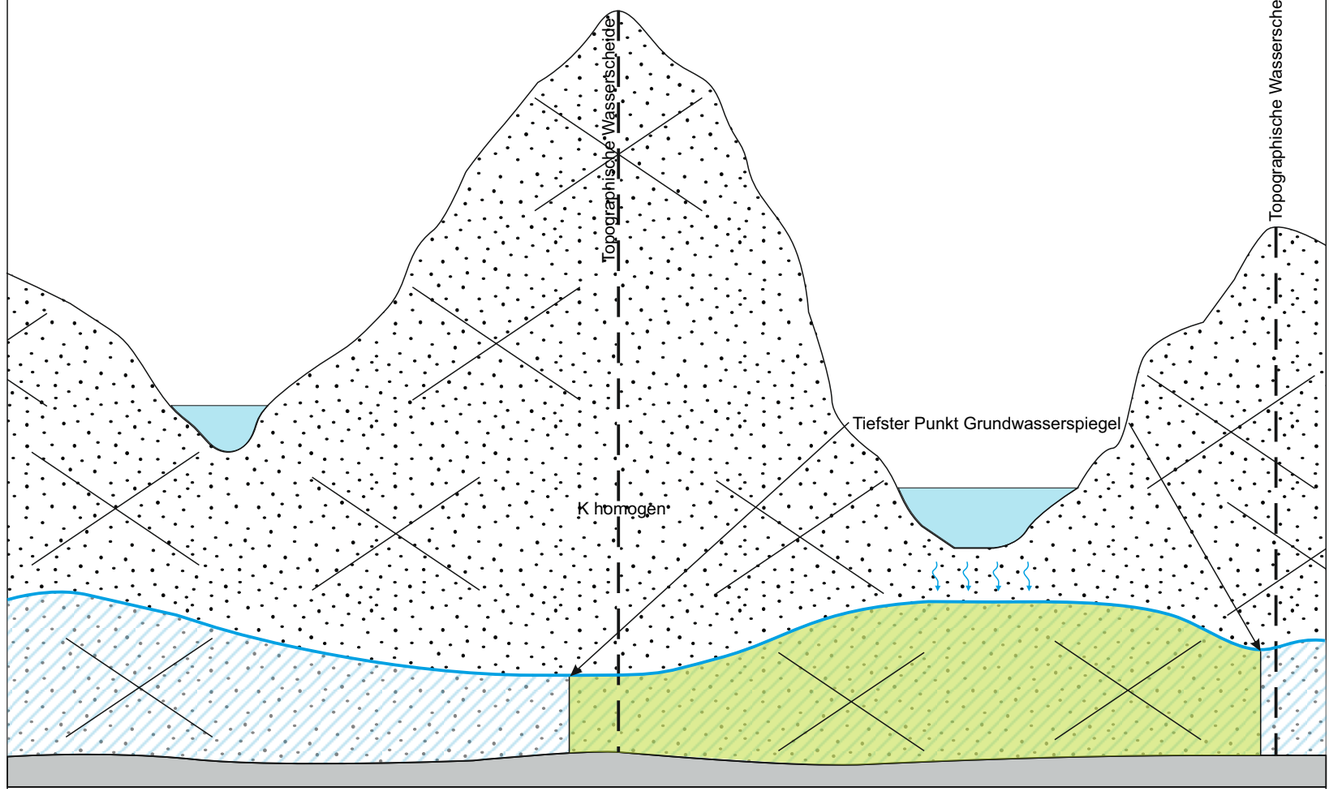
Bundesamt für Umwelt

Hydrogeologische Situation bei Abflussmessstationen

Schlussbericht Pilotprojekt

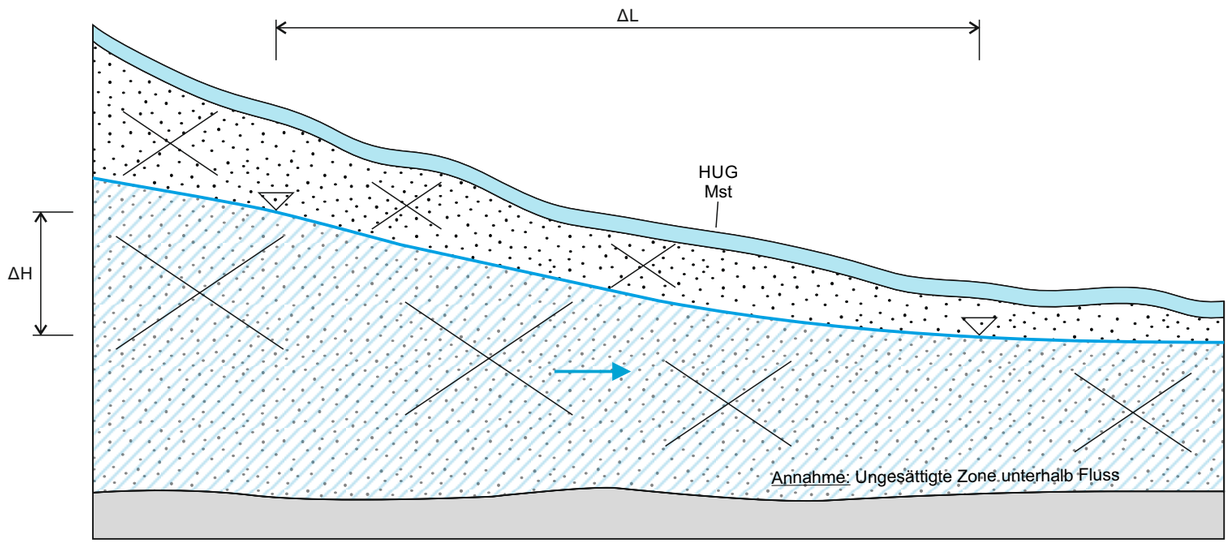
Prinzipskizze Kluft- / Porengrundwasserleiter Perkolierende Flusswasserinfiltration

Querschnitt:



Längschnitt:

Hydraulischer Gradient $i = \frac{\Delta H}{\Delta L}$



Legende

- Gesättigte Durchflussfläche F
- Fluss
- Gesättigter Grundwasserleiter
- Poröser Fels
- Grundwasserstauer (undurchlässige Formation)
- Kluft
- Grundwasserspiegel
- Grundwasserfliessrichtung

KELLERHALS + HAEFELI AG GEOLOGEN | BERN STANS	**Auftrags-Nr.:** 11389	**Anhang-Nr.:** 10	**Format:** A3
	Datum: 23. Januar 2021	**Gez.:** nb	**Kontr.:** go
	Datei: W:\11389_Hydrogeologie_Abflussmessstationen_BAFU\10_Corel\Prinzipskizzen.cdr		