

# Faktenblatt 8a

BLN 1601 Silberen

Thema:	BLN 1601 Silberen
Dokument Nr.	Faktenblatt 8a
betrifft Teilprojekt:	TP 4 Muota
Gesuchsunterlagen:	<p>Restwasserbericht Hauptbericht Kap. 6.9 (S. 58 f.), Kap. 7 (S. 60 ff.), Kap. 10 (S. 70 ff.); Restwasserbericht Fachbericht Landschaft Kap. 6 (S. 169 ff.); Fachbericht Gewässerökologie Kap. 24 (S. 468 ff.)</p> <p>UVB TP 4 Kap. 5.2.2 (S. 42), Kap. 5.4.1 (S. 51), Beilage 7.5-1: Fachbericht Oberflächengewässer (Kap. 8.3.11, Kap. 8.5.11, Anhang A.0, Anhang E)</p> <p>Technischer Bericht TP 4 Muota Kap. 7.4.6 (S. 36 f.)</p> <p>Massnahmenbericht - Methodik, Berechnung von Ersatzbedarf, Ausgleichsmassnahmenbeschreibung Massnahmen Nr. 10 (S. 88 ff.)</p> <p>Sanierungsbericht Schwall-Sunk Kap 6 (S. 146 ff.)</p> <p>Zusatzunterlage Landschaftliche Projektoptimierungen (April 2020)</p>
Anpassung Gesuchsunterlagen	Nein
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 5.15, 6.10, 6.11
Stn BAFU/ENHK:	BAFU Kap. 3.1 (S. 2 ff.), Kap. 3.4 (S. 7 ff.) ENHK
Vereinbarung mit USO:	nicht Gegenstand der Vereinbarung
Datum / Version	02.02.24

## 1. Ausgangslage

Pumpstation Muota (Sahli) (Tabelle Bezirk/Kanton Ziff. 5.15, 6.10)

Die ENHK hält im Gutachten zur Konzessionserneuerung und Sanierung Muotakraftwerke (31.01.2022) fest, dass die vorgeschlagene Restwassermenge gemäss Art. 31 - 33 GSchG exkl. Art 32 Bst. c GSchG (SNP) eine schwerwiegende Beeinträchtigung darstelle und dem Gebot der grösstmöglichen Schonung widerspreche (Art. 6 NHG).

Gemäss der 2. Materiellen Prüfung (Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe) vom Amt für Umwelt und Energie Kanton Schwyz (22.02.2022) ist die vorgeschlagene Restwassermenge gemäss Art. 31 - 33 GSchG exkl. Art 32 Bst. c GSchG (SNP) nicht bewilligungsfähig, da sie eine Abweichung vom Landschaftsbild von mehr als 15% während einzelnen Monaten verursache. Daher könne diese nicht als leichte Beeinträchtigung der Landschaft (BLN) beurteilt werden.

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt BAFU (08.07.2022) verweist das BAFU auf die kantonale Stellungnahme und die Anträge der ENHK.

Der Bezirk Schwyz hält fest, dass der Fachbericht Landschaft gemäss Bericht landschaftliche Optimierung (April 2020) zu ergänzen sei.

Im gemeinsamen Antrag an die Behörden sehen die ebs Energie AG und die Umweltschutzorganisationen den Rückbau der Fassung Pumpstation Muota (Sahli) (Ziff. 3.6) vor und die Festlegung der Restwassermenge gemäss Tabelle 1 wird beantragt (Ziff. 2.2), welche beim heutigen Standort der Pumpstation einzuhalten und zu messen ist (Massnahmenblatt 06 Rückbau Fassung Pumpstation Muota (Sahli)):

*Tabelle 1: neue Restwassermenge bei der Pumpstation Muota (Sahli) gemäss gemeinsamer Antrag ebs - NGOs (Ziff. 2.2)*

<b>Muota Pumpstation</b>	275	275	275	415	490	490	490	290	290	275	275	275
------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fassung Muota (Riedplätz): Mehrnutzung (Tabelle Bezirk/Kanton Ziff. 6.11)

Die ENHK hält im Gutachten zur Konzessionserneuerung und Sanierung Muotakraftwerke (31.01.2022) fest, dass die Mehrnutzung im Abschnitt Muota-Riedplätz zu einer schweren Beeinträchtigung führe und dem Gebot der grösstmöglichen Schonung des BLN-Gebiets widerspreche.

Gemäss der 2. Materiellen Prüfung (Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe) vom Amt für Umwelt und Energie Kanton Schwyz (22.02.2022) ist die Mehrnutzung in Verbindung mit der Teilabdichtung bewilligungsfähig (S. 11). Es wird eine Erfolgskontrolle der Ausgleichsmassnahme Riedplätz gefordert, in der aufgezeigt wird, dass durch die Abdichtung der Sohle die Anforderungen gemäss Art. 31-33 GSchG erfüllt sind (S. 29). Der Kanton Schwyz weist darauf hin, dass die Gewässerstrecken HA\_Muota\_10 bis HA\_Muota\_17 durch den Sunkabfluss des KW Hinterthal beeinflusst werden. Die beabsichtigten Mehrnutzungen gemäss SNP bei der Fassung Muota und der Fassung Hüribach reduzierten den Sunkabfluss in den

Abschnitten. Es sei zu begründen, wieso die Abschnitte in der ökologischen Bilanzierung nicht berücksichtigt werden. Der ökologischen Bilanzierung könne daher nicht zugestimmt werden (S. 30). Ausserdem müssen die ersten zwei Hochwasser pro Jahr während zwölf Stunden durchgeleitet werden (S. 30).

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt BAFU (08.07.2022) verweist das BAFU auf die Anträge der ENHK (Antrag 1). Ausserdem wird gefordert, weitere Abklärungen bezüglich Auswirkungen auf Karst-Wirbellosen-Fauna zu tätigen. Im Antrag 11 b wird gefordert, das Vorkommen endemischer Arten bei der Festlegung der Restwassermengen der Fassung Muota (Riedplätz) zu berücksichtigen sei. Die Restwassermenge sei ohne Ausnahme nach Art. 32c GSchG festzulegen. Eine Minderung der Restwassermenge soll erst zulässig sein, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Abdichtung den gewünschten Effekt zeigt und die endemischen Arten nicht gefährdet werden.

Gemäss Bezirk Schwyz ist auf den Antrag des BAFU bezüglich zusätzlichen Abklärungen betreffend endemische Arten nicht einzutreten. Es wird jedoch gefordert, dass die Ökopunkte überprüft und ggf. neu bewertet werden.

## 2. Beurteilung

### Pumpstation Muota (Sahli)

Die ebs Energie AG hat dargelegt, weshalb ihrer Auffassung nach die im Auflageprojekt vorgesehenen Restwassermengen die Anforderungen des BLN-Gebiets erfüllen und darauf hingewiesen, dass den Muotawerken nationale Bedeutung gemäss den einschlägigen Bestimmungen zukommt. Im Rahmen der Vergleichsgespräche wurde im Sinne einer gemeinsamen Lösung der Verzicht auf die Fassung Pumpstation Muota (Sahli) sowie eine entsprechende Erhöhung der Restwassermengen vorgesehen (vgl. oben Ziff. 1).

Aufgrund der Fassungsaufgabe und den angepassten Restwassermengen beim Standort Pumpstation (Herleitung Restwassermenge siehe Faktenblatt Restwasser) erhöht sich die Wasserführung im Gewässerabschnitt unterhalb der Pumpstation gegenüber dem Auflageprojekt aus dem Jahr 2021 erheblich. Durch den hohen Zufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet und aufstossendes Wasser aus dem Becken Sahli werden die Abflussmengen bei Fassungsaufgabe der Pumpstation die Anforderungen an die Landschaft erfüllen (Massnahmenblatt 06 Rückbau Fassung Pumpstation Muota (Sahli)). Die nach Art. 31-33 GSchG exkl. Art. 32 Bst. c GSchG (SNP) im Restwasserbericht (S. 59) hergeleiteten Restwassermengen werden mit den angepassten Restwassermengen immer übertroffen, die Saisonalität wird lediglich im Juni ganz knapp unterschritten (490 l/s statt 500 l/s). Die landschaftlichen Vorgaben Art. 33 Abs. 3 Bst. a (Fachbericht Landschaft, S. 163 und Restwasserbericht, S. 58) werden in jedem Monat um mind. 96 l/s übertroffen, in den meisten Monaten sogar deutlich mehr.

Bei tiefen Abflusswerten wirkt sich eine Abflusserhöhung stark positiv auf den landschaftlichen Eigenwert aus. Mit weiter zunehmendem Abfluss ab 300 l/s verbessert sich der landschaftliche Eigenwert dagegen nur noch geringfügig (Fachbericht Landschaft, S. 163). Die Restwassermengen in den Sommermonaten sind mit 604 l/s – 1244 l/s beim Beurteilungspunkt M7u

deutlich grösser als 300 l/s. Hinzu kommt, dass die Korrelationskurve (Abb. 1) nur Abflussmessungen bis 682 l/s berücksichtigt. Die Korrelation zwischen Abfluss und der landschaftlichen Beurteilung bei grösseren Abflusswerten unterliegt demzufolge einer gewissen Ungenauigkeit, obwohl gerade diese aufgrund der touristischen Relevanz im Sommer von Bedeutung wäre.

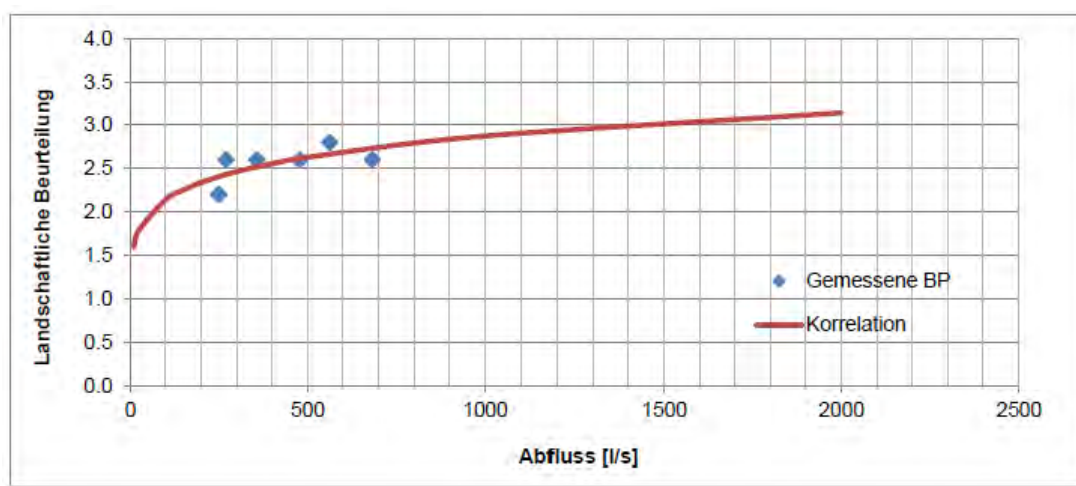


Abbildung 1: Korrelation zwischen den verschiedenen Abflüssen und ihren landschaftlichen Beurteilungen (Restwasserbericht Fachbericht Landschaft, S. 162)

Mit den im Rahmen des gemeinsamen Antrags angepassten Restwassermengen resultieren prozentuale Differenzen der Landschaftsbildqualität zwischen dem natürlichen Zustand und unter Restwasserbedingungen von 3-19% in den einzelnen Monaten und im Jahresdurchschnitt von 11% (Tab. 2).

Tabelle 2: Restwasserszenario für die Muota Pumpstation Sahli am relevanten Beurteilungspunkt (ersetzt entsprechende Spalten in Tab. 34 im Restwasserbericht Fachbericht Landschaft, S. 163)

	Natürlicher Zustand		Antrag ebs-NGO mit ZEG		
	Abfluss [l/s]	Bewertung []	Abfluss [l/s]	Bewertung []	Differenz [%]
Jan	415	2.6	345	2.5	3
Feb	394	2.6	338	2.5	3
Mrz	490	2.6	339	2.5	3
Apr	1728	3.1	512	2.6	14
Mai	4853	3.5	898	2.8	19
Jun	6480	3.7	1244	3.0	18
Jul	4141	3.4	888	2.8	17
Aug	2858	3.3	604	2.7	17
Sep	2241	3.2	540	2.7	15
Okt	1588	3.1	425	2.6	14
Nov	905	2.8	381	2.5	9
Dez	525	2.6	356	2.5	3
Ø	<b>2218</b>	<b>3</b>	<b>573</b>	<b>2.6</b>	<b>11</b>

Bei dieser prozentualen Differenz der Landschaftsbildqualität zwischen dem natürlichen Zustand und unter Restwasserbedingungen handelt es sich, wie im Restwasserbericht Landschaft

(S. 9-10) beschrieben, um Richtwerte, die aber im Einzelfall immer überprüft und gegebenenfalls aufgrund der Rahmenbedingungen angepasst werden müssen.

Gemäss Fachbericht Landschaft resultierte mit dem Auflageprojekt 2021 eine geringfügige Verschlechterung gegenüber des natürlichen Zustands (S. 163). Mit den erhöhten Restwassermengen wird die Differenz zum natürlichen Zustand verringert. Zu berücksichtigen ist dabei auch der sehr grosse Zufluss aus dem Zwischeneinzugsgebiet zwischen dem AGB Sahliboden und dem Beurteilungspunkt am Kraftwerk Bisisthal. Der Rückbau der Fassung Pumpstation hat zudem einen positiven Einfluss auf den Geschiebetrieb in der Muota und infolgedessen eine zukünftige Verbesserung der Kriterien für die landschaftliche Bewertung.

Grundsätzlich fällt die landschaftliche Bewertung auf dem flachen und morphologisch relativ eintönigen Beurteilungsabschnitt M7u bei geringen Restwassermengen in den Herbst- und Wintermonaten vergleichsweise gering aus, jedoch besitzt der Abschnitt aufgrund seiner touristischen Bedeutung im Sommer eine hohe Relevanz. Zur Beurteilung der Sommermonate wurde gutachterlich eine Bewertung gemäss Methode aus dem Restwasserbericht Landschaft vorgenommen. Diese zeigt eine Verbesserung in den Kriterien Weisswasseranteil, Akustik und teilweise der Vielfalt bei Restwasserbedingungen in den Sommermonaten gegenüber der Beurteilung aus dem Auflageprojekt 2021. Daraus resultiert von Mai bis August eine Abweichung zum natürlichen Zustand von rund 13% (Tabelle 3). Aufgrund der relativ einförmigen Morphologie, dem fehlenden Anspringen von Seitengewässern, des geringen Gefälles, wenig Weisswasser sowie Bachrauschen kommt es bei höheren Abflüssen zu keiner landschaftlichen Verbesserung. Deshalb fällt die Abweichung in den Sommermonaten nicht grösser aus.

*Tabelle 3: Gutachterliche landschaftliche Bewertung am Beurteilungspunkt M7u während der Sommerabflüsse zwischen Mai und August.*

Parameter	900 l/s	1'200 l/s	2'500-5'700 l/s
Gewässerkontinuum	4	4	4
Gewässerbreite	4	4	4
Weisswasser	1	1-2	2
Vielfalt	3	3	3
Akustik	2	2	2-3
Summe	14	14-15	15-16
<b>Bewertung (Summe/5)</b>	<b>2.8</b>	<b>2.8-3.0</b>	<b>3.0-3.2</b>
$\Delta_{\max} = 0.4/3.2 = 13\%$			

Für Gebiete ausserhalb des BLN-Gebiets gilt eine Differenz bis 25% als geringfügige Verschlechterung, innerhalb des BLN-Gebiets gilt der Richtwert bis 15% als geringfügige Verschlechterung. Entgegen der Formulierung im ENHK-Gutachten (31.01.2022) liegt die zu beurteilende Strecke zwischen Pumpstation und KW Bisisthal nicht im BLN-Gebiet, sondern die Grenze des BLN-Gebiets verläuft nur auf wenigen kurzen Strecken knapp in der Muota (Abb. 2). In Anbetracht des Grenzverlaufs sowie der Tatsache, dass es sich bei den 15% um einen Richtwert handelt und dieser lediglich während 4 Monaten leicht überschritten wird, kann gesamthaft von einer geringfügigen Verschlechterung ausgegangen werden. Es wird ange-

merkt, dass im Rahmen der Verhandlungen mit den Umweltschutzorganisationen die Restwassermengen gegenüber dem Auflageprojekt 2021 wesentlich erhöht wurden (inkl. Aufgabe und Rückbau der Fassung Pumpstation) was zu weiteren Energieverlusten führt. Das Gebot der grösstmöglichen Schonung wird mit dem Restwasservorschlag eingehalten. Mit Blick auf die Interessenabwägung kann zudem auf das bereits thematisierte nationale Nutzungsinteresse hingewiesen werden. Festgehalten werden kann schliesslich, dass mit der vorgesehenen Verschiebung der BLN-Grenze (S. 8-9 von diesem Faktenblatt), diese ohnehin gänzlich und weiter ausserhalb der Muota soll (Abb. 3-4).

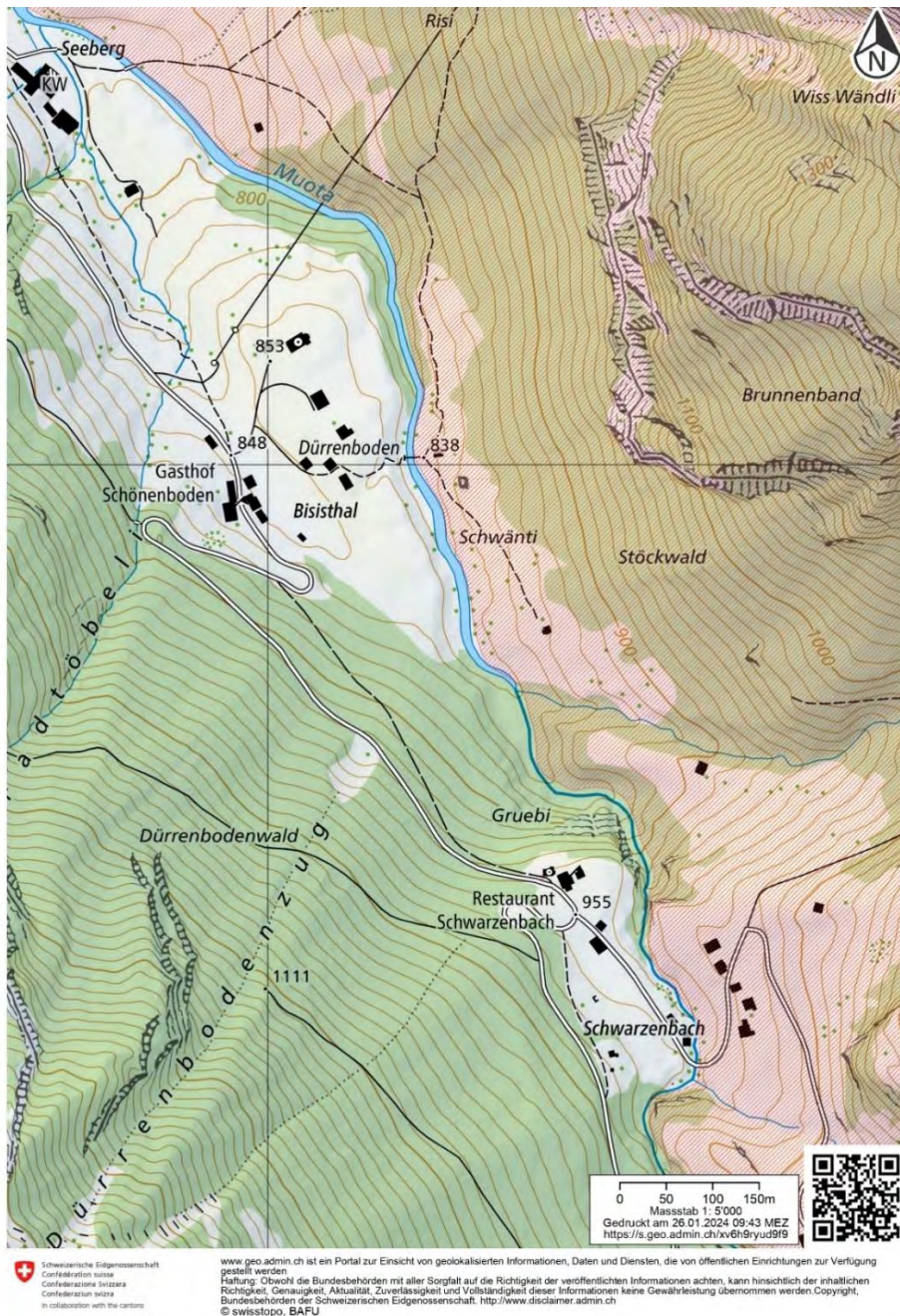


Abbildung 2: Kartenausschnitt der Gewässerstrecke zwischen Ahornberg und KW Bisisthal (BLN-Gebiet ist rot schraffiert)

## Fassung Muota (Riedplätz): Mehrnutzung

Etwa 1.5 km unterhalb der geplanten Teilabdichtung verengt sich das Muotatal und das oberhalb versickernde Wasser tritt dort wieder fast vollständig an die Oberfläche (Erkenntnisse aus Dotierversuchen 2012 & 2013). Auch werden mit der geplanten Teilabdichtung künftig zwei Drittel des heute versickernden Wassers nach wie vor in den Grundwasserkörper infiltrieren. Aus diesen Gründen wird eine wesentliche Beeinflussung der geplanten Teilabdichtung auf das Karstsystem oder sonstige Quellschüttungen ausgeschlossen. Auf Basis der Versickerungsergebnisse, welche im Rahmen des Restwasserberichts (Dotierversuche) hergeleitet wurden, können die Auswirkungen auf das Karstsystem räumlich sehr gut abgegrenzt werden. Auswirkungen auf das Karstsystem ausserhalb der Versickerungsstrecke sind nicht zu erwarten. Wie bereits erwähnt, stösst das im zur Abdichtung geplanten Abschnitt versickernde Wasser oberhalb des Herrgotts fast vollständig wieder auf. Eine Reduktion der Versickerung bewirkt also ebenfalls eine entsprechende Reduktion dieser Aufstösse. Das Wasser fliesst dem Abschnitt dann oberflächlich zu, d.h. unterhalb des Herrgotts verändert sich die hydrologische Situation gegenüber dem Zustand ohne Teilabdichtung nicht. Die Sickerwassermenge wird zudem um maximal 30% (ca. 200 l/s) der gesamten Sickerverluste (ca. 600 l/s) reduziert. Nach Umsetzung der Teilabdichtung wird die Veränderung der Versickerungsleistung im Rahmen eines Monitorings überprüft, damit ist die Forderung des Kanton Schwyz erfüllt und es ist innert kurzer Zeit nachweisbar, ob die Abdichtung die gewünschte Wirkung zeigt. Aus den oben genannten Gründen wird höchstens von einer leichten und nur sehr lokal (Versickerungsstrecke) auftretenden Beeinträchtigung der Karstdynamik ausgegangen (UVB TP4, Bericht landschaftliche Projektoptimierungen). Wenn entgegen den Annahmen allfällige nachteilige Effekte aufgrund der Teilabdichtung auftreten, können die Abdichtungsmassnahmen mit relativ geringem Aufwand und ohne bleibende Beeinträchtigungen rückgebaut werden (technischer Bericht, S. 36-37).

Auswirkungen auf Karst-Wirbellosen-Fauna: siehe Faktenblatt 8b Endemische Arten Hölloch

Neben der Teilabdichtung sind in der Restwasserstrecke unterhalb der Fassung Riedplätz weitere morphologische Aufwertungen geplant. Im oberen Teil wird das Gewässer neben Lenkbuhnen durch Instream-Massnahmen aufgewertet und die Ufer werden standortgerecht bepflanzt. Im Unterlauf wird die Muota grosszügig aufgeweitet, die Ufer werden abgeflacht und standortgerecht bepflanzt. Gegenüber heute (stark verbauter, begradigter Lauf und komplett fehlende Uferbestockung) stellt dies aus landschaftlicher Sicht eine sehr grosse Aufwertung dar (Bericht landschaftliche Projektoptimierungen). Diese Argumentation wird sowohl vom Kanton Schwyz (Materiellen Prüfung, Kap. 3.7, S. 11) als auch vom Bezirk Schwyz (Tabelle, Ziff. 6.11) geteilt.

Die Gewässerstrecken HA\_Muota\_10 bis HA\_Muota\_17 wurden bei der ökologischen Bilanzierung nicht berücksichtigt, da die Auswirkungen der geplanten Mehrnutzungen gemäss SNP bei der Fassung Muota und der Fassung Hüribach auf den Sunkabfluss des KW Hinterthal mit den betrieblichen Massnahmen der Schwall-Sunk Sanierung berücksichtigt und behoben werden (Fachbericht Gewässerökologie, Sanierungsbericht Schwall-Sunk).

Die Fassung Muota (Riedplätz) wird jährlich während der ersten beiden Hochwasser für jeweils 12 Stunden ausser Betrieb genommen (Restwasserbericht Fachbericht Hydrologie, S. 53; Gemeinsamer Antrag Ziff. 2.3).

### Vorgesehene Anpassung des Perimeters des BLN-Gebiets 1601 Silbernen

Das Auflageprojekt sowie die Vergleichslösung berücksichtigen das BLN-Gebiet Silbernen mit seinem heutigen Perimeter. Mit der Nutzungsplanung Silbernen-Jägern-Bödmeren plant das Amt für Wald und Natur vom Kanton Schwyz eine Perimeteranpassung des BLN-Gebietes Silbernen. Mit der geplanten Perimeteranpassung werden vor allem besiedelte Gebiete sowie Gebiete entlang der Muota entlassen (Abb. 3 und 4). Als Kompensation sollen neu siedlungsfreie Gebiete aufgenommen werden. Insgesamt wird das BLN-Gebiet mit den Anpassungen um 827 ha grösser. Das Umweltdepartement plant die zweite öffentliche Auflage der Nutzungsplanung mit dem angepassten BLN-Perimeter im Januar bis Februar 2024 (Präsentation und Protokoll Sitzung 25.01.23).

Mit dem verschobenen Perimeter wären sowohl die Pumpstation Muota (Sahli) als auch die Fassung Muota (Riedblätz) mit der vorliegend relevanten Restwasserstrecke nicht mehr im BLN-Gebiet und die Vorgaben an die Abweichung des Landschaftswerts werden eingehalten. Auch die Restwassermengen gemäss GSchG wären mit der neuen Ausgangslage in jedem Fall erfüllt. Ebenso wäre der Höchweidbach, das geplante Beruhigungsbecken bei Riedblätz sowie die gesamte Restwasserstrecke im Bisisthal nicht mehr im BLN-Gebiet.

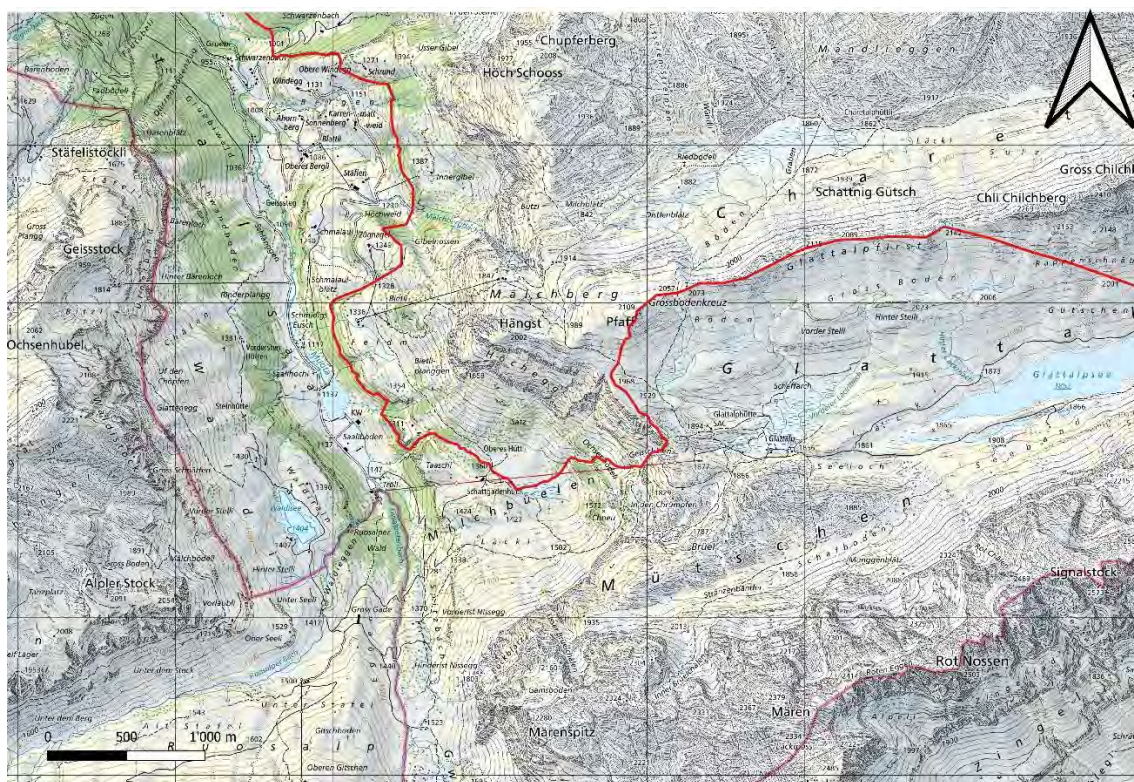


Abbildung 33: geplanter BLN-Perimeter – Teilbereich 1





Abbildung 4: geplanter BLN-Perimeter – Teilbereich 2

### 3. Schlussfolgerungen

Mit der Fassungsauflage und den angepassten Restwassermengen beim Standort Pumpstation erhöht sich die Wasserführung im Gewässerabschnitt unterhalb der Pumpstation Muota (Sahli) gegenüber dem Auflageprojekt erheblich. Die Anforderungen an die Landschaft inkl. Saisonalität werden erfüllt.

Eine wesentliche Beeinflussung durch die geplante Teilabdichtung bei Riedblätz auf das Karstsystem oder sonstige Quellschüttungen wird auf Basis der Dotierversuche ausgeschlossen. Durch diese können auch die Auswirkungen auf das Karstsystem räumlich sehr gut abgegrenzt werden. Eine Beeinflussung des Karstsystems ausserhalb der Versickerungsstrecke ist nicht zu erwarten. Nach Umsetzung der Teilabdichtung wird die Veränderung der Versickerungsleistung im Rahmen eines Monitorings überprüft, damit ist die Forderung des Kanton Schwyz erfüllt. Neben der Teilabdichtung sind in der Restwasserstrecke unterhalb der Fassung Riedplätz weitere morphologischen Aufwertungen geplant. Gegenüber heute (stark verbauter, begradigter Lauf und komplett fehlende Uferbestockung) stellt dies aus landschaftlicher Sicht eine sehr grosse Aufwertung dar. Diese Argumentation wird sowohl vom Kanton Schwyz als auch vom Bezirk Schwyz geteilt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem Restwasservorschlag aus dem gemeinsamen Antrag mit den USO die Restwasseranforderungen gemäss GSchG und die Vorgaben nach NHG unter Berücksichtigung der Anforderungen des heutigen BLN-Gebiets vollumfänglich erfüllt werden. Zudem kann darauf hingewiesen werden, dass mit dem verschobenen Perimeter sowohl die Pumpstation Muota (Sahli) als auch die Fassung Muota (Riedblätz) nicht mehr im BLN-Gebiet liegen und die oben erwähnten Anträge von BAFU und ENHK in diesem Fall hinfällig wären.

# Faktenblatt 8b

## Endemische Arten Hölloch

Thema:	Endemische Arten Hölloch
Dokument Nr.	Faktenblatt 8b
betrifft Teilprojekt:	TP 1 Glattalp, TP 4 Muota
Gesuchsunterlagen:	<p>Restwasserbericht Fachbericht Hydrologie Kap. 7.1.4 (S. 104 ff.); Restwasserbericht Fachbericht Gewässerökologie Kap. 23 (S. 405 ff.); Restwasserbericht Fachbericht SNP Kap. 3.2 (S. 7, S. 17 f.), Anhang G</p> <p>UVB TP 1 Kap. 5.2.1 (S. 32 ff.), Kap. 5.3 (S. 37 ff.), Kap. 7.4 (S. 67 ff.), Beilage 7.4-1: Fachbericht Grundwasser und Quellen</p> <p>UVB TP 4 Kap. 5.2.2 (S. 42), Kap. 7.5.4 (S. 77), Beilage 7.5-1: Fachbericht Oberflächengewässer und Grundwasser Kap. 8.3.11 (S. 206 ff.) Kap. 8.5.11 (S. 224 ff.), Anhang A.0</p> <p>Technischer Bericht TP 1 Glattalp Kap. 3.1 (S. 4), Kap. 4 (S. 10 ff.), Kap. 6.1 (S. 22), Kap. 6.9 – 6.16 (S. 37 ff.)</p> <p>Technischer Bericht TP 4 Muota Kap. 4.1.6 (S. 18), Kap. 7.4.6 (S. 36 f.)</p> <p>Massnahmenbericht – Methodik, Berechnung von Ersatzbedarf, Ausgleichsmassnahmenbeschreibung Massnahmen Nr. 10 (S. 88 ff.)</p>
Anpassung Gesuchsunterlagen	Nein
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 2.1, 5.17, 6.11, 8.1
Stn BAFU/ENHK:	BAFU Kap. 3.1 (S. 3 ff.), Kap. 3.4 (S. 16 f., Tabelle 4, S. 20, S. 25)
Vereinbarung mit USO:	Nicht Gegenstand der Vereinbarung
Datum / Version	08.02.24

## 1. Ausgangslage

Die Hauptversickerungsstellen im Glattalpsee sollen im Rahmen der geplanten Teilabdichtung mit Bentonitmatten in mehreren Etappen abgedichtet werden. Nach der Umsetzung der jeweiligen Bauetappe wird eine Erfolgskontrolle durchgeführt. Je nach Minderung der Sickerverluste sowie der Abflussentwicklung in den einzelnen, im Zuge des geplanten Monitorings überwachten Quellen, werden die Bauarbeiten beendet oder weitergeführt. Sollten die Teilabdichtungen wider Erwarten zu grossen Abflussreduktionen in den untersuchten Quellen führen, werden diese unwirksam gemacht (maschinelles Aufreissen der Teilabdichtung) (Faktenblatt 8f Teilabdichtung Glattalpsee).

Unterhalb der Fassung Riedblätz soll, basierend auf Art. 32 c GSchG, auf der rund 4 km langen Strecke in der Muota eine Mehrnutzung stattfinden. Diese findet in Kombination mit einer Teilabdichtung der Sohle im oberen Bereich der Ausgleichsmassnahme statt. Durch die Teilabdichtung werden Versickerungen minimiert und die Anforderungen an die freie Fischwanderung und den Lebensraum können mit geringeren Dotationen eingehalten werden (Fachbericht SNP).

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt (08.07.2022) werden die Anträge der ENHK betreffend Teilabdichtung Glattalpsee und dessen Auswirkung auf das BLN-Objekt 1601 Silberen gestützt, dies, um nebst dem Risiko einer schwerwiegenden Beeinträchtigung des BLN-Objektes auszuschliessen, auch irreversible Beeinträchtigungen der Erhaltung der Karst-Biodiversität im Gebiet zu verhindern. Es wird darauf hingewiesen, dass im Hölloch vor Kurzem drei neue Flohkrebsarten entdeckt wurden. Es sei beim Stand des aktuellen Wissens nicht zwingend davon auszugehen, dass diese drei Arten in einem anderen Höhlensystem existieren. Dementsprechend habe die Schweiz für die Erhaltung der Karst-Biodiversität im Hölloch-Gebiet selbst unabhängig des Standortes im BLN-Objekt eine globale Verantwortung.

Betreffend der Teilabdichtung Riedblätz wird in der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt (08.07.2022) im Antrag 11 g. gefordert, das Vorkommen endemischer Arten bei der Festlegung der Restwassermengen der Fassung Muota (Riedblätz) zu berücksichtigen. Die Restwassermenge sei ohne Ausnahme nach Art. 32 c GSchG festzulegen, eine Mindernutzung soll erst zulässig sein, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Abdichtungen den gewünschten Effekt zeigen und die endemischen Arten nicht gefährdet werden. Begründung: Gemäss Art. 9 BGF müssen günstige Lebensbedingungen für Wassertiere geschaffen werden, gemäss Art 3 GschG soll das Vorsorgeprinzip gelten.

## 2. Beurteilung

Für die Erhaltung der drei nachgewiesenen Arten im Hölloch besteht grundsätzlich eine grosse Verantwortung. Da seit rund 80 Jahren Restwasserbedingungen an der Muota herrschen, ist davon auszugehen, dass der Fortbestand dieser Arten durch die ebs Energie AG nicht gefährdet ist. Färbversuche haben zudem gezeigt, dass das Hölloch hydrologisch unabhängig zum Glattalpsee ist (UVB TP 1, Beilage 7.4-1).

Mit der Teilabdichtung Riedblätz wird erreicht, dass die Versickerung in dieser Strecke um ca. 200 l/s verringert wird. Ohne Abdichtung versickern ca. 600 l/s. Heute stossen 1.5 km unterhalb der geplanten Teilabdichtung 530 l/s wieder auf (Abb. 1). Auswirkungen auf das Karstsystem ausserhalb der Versickerungsstrecke sind somit kaum zu erwarten, denn ca. 90% des versickernden Wassers stösst relativ schnell wieder auf. Eine hydrologische Verbindung zwischen Riedblätz und Hölloch besteht zwar, jedoch haben Färbversuche gezeigt, dass die Beeinflussung des Wasserhaushaltes im Hölloch vom Gebiet Riedblätz aus, als vernachlässigbar eingestuft wird. Diese geringfügige hydrologische Verbindung besteht nur im Hochwasserfall und in diesem Fall nur zum westlichen Teil des Höllochs. Aufgrund des grossen Einzugsgebietes des Höllochs ist aber insbesondere im Hochwasserfall das in der Muota in diesem Teilbereich versickernde Wasser am gesamten Karstwasser als äusserst gering und damit vernachlässigbar einzustufen. Hinzu kommt, dass wegen der Teilabdichtung maximal lediglich 200 l/s weniger versickern würden und davon, wenn überhaupt, nur ein kleiner Teil zum Hölloch fließen würde, da der grösste Teil 1.5 km weiter unten in der Muota wieder aufstösst. (UVB TP 4, S. 77 und Beilage 7.5-1; Fachbericht Oberflächengewässer und Grundwasser, S. 208).

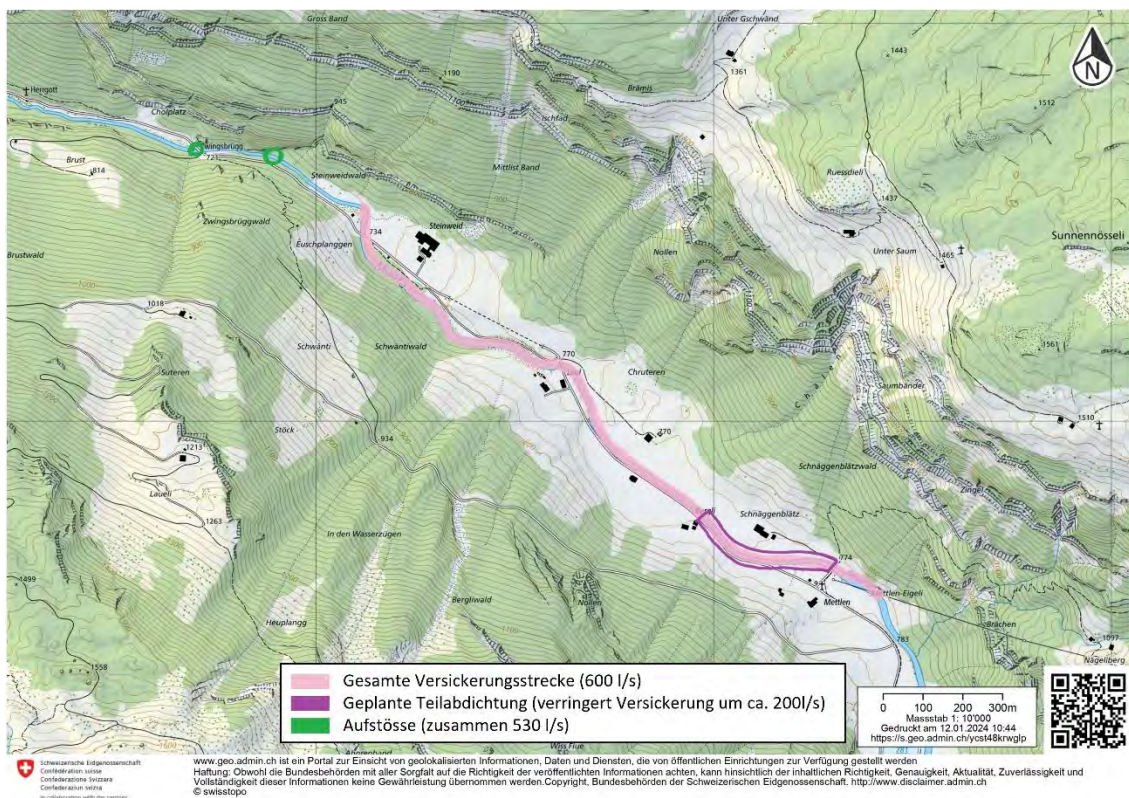


Abbildung 1: Situation der geplanten Teilabdichtung und der heutigen Versickerungen und Aufstössen.

Für eine Beurteilung der hydrologischen Verbindung zwischen der Muota und dem Hölloch wurden die Abflüsse der Restwasserstrecke bei Riedblätz in einer Dauerlinie ausgewertet (Abb. 2).

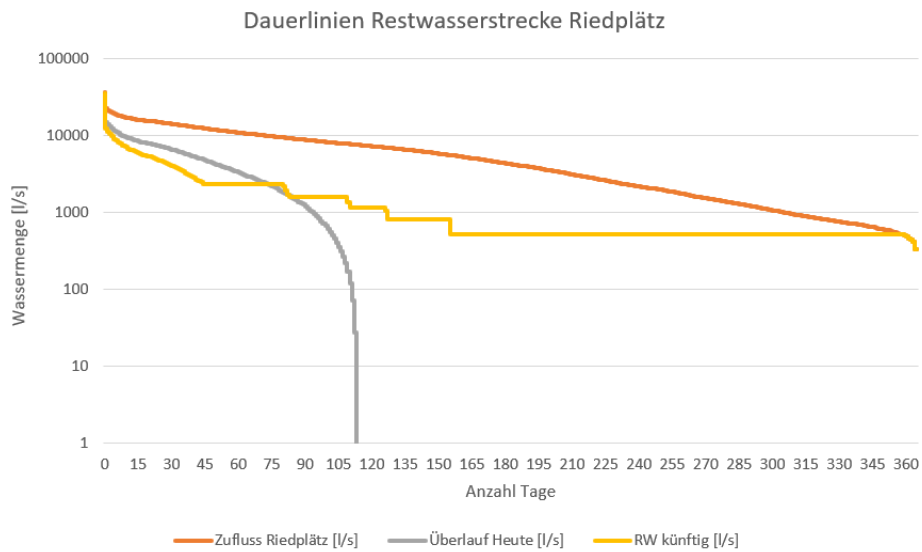


Abbildung 2: Dauerkurve der Abflüsse an der Restwasserstrecke Riedblätz über das gesamte Jahr.

Gemäss Restwasserbericht kann von einem Hochwasserereignis gesprochen werden, wenn der Abfluss mindestens  $3 \times MQ$  beträgt. Für diese Kenngrösse ( $Q^*$ ) werden rund  $24 \text{ m}^3/\text{s}$  angegeben (Restwasserbericht, Kap. 2.5, S. 12) und dürfte einem heftigen lokalen Regenereignis entsprechen. In Riedblätz wird dieser Schwellenwert im Durchschnitt lediglich einmal pro Jahr (0.3% der Zeit) überschritten (Abb. 3).

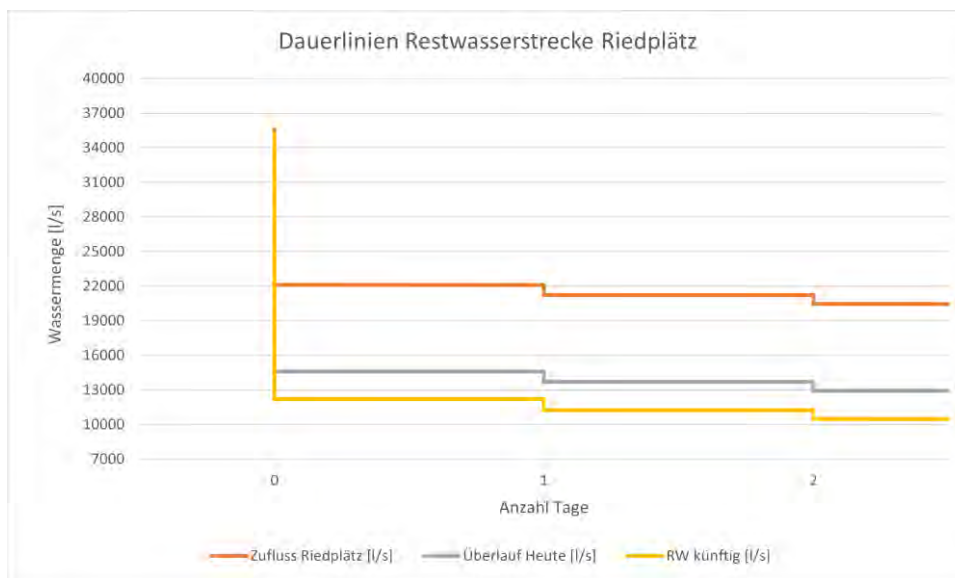


Abbildung 3: Dauerlinie der Restwasserstrecke Riedblätz für die drei Tage mit dem höchsten Abfluss.

Die maximale und sehr theoretische Minderung der Versickerung beträgt lediglich  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  (0.8% des Schwellenwerts). Aufgrund des sehr hohen Wasserstands bei solch einem Ereignis,

dürfte die Minderung der Versickerung noch deutlich tiefer ausfallen, da zu diesem Zeitpunkt der gesamte Grundwasserkörper gesättigt ist und die Muota über die Ufer tritt (Abb. 4). Dabei können neue Versickerungsmöglichkeiten anspringen. Während solchen Hochwasserereignissen dürfte der Zufluss und auch der Wasserstand im Hölloch aufgrund des generell sehr grossen Zuflusses aus dem grossen Einzugsgebiet sehr hoch sein.



*Abbildung 4: Riedblätz bei Hochwasser – Bild in Fliessrichtung der Muota (Haus links der Muota befindet sich am Ende der geplanten Teilabdichtung).*

Auf Empfehlung des BAFU erfolgte zudem eine Kontaktaufnahme mit Roman Alther von der Forschungsgruppe Altermatt (Eawag). Die endemischen Arten wurden auf verschiedenen Höhenstufen im Hölloch gefunden. Falls eine hydrologische Verbindung zum Versiegen einer Wasserquelle führen sollte, können gemäss Roman Alther negative Auswirkungen auf die Flohkrebse nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Aufgrund der oben aufgeführten Situation kann jedoch die hydrologische Verbindung als vernachlässigbar eingestuft werden und das Versiegen der Wasserquelle ausgeschlossen werden. Ein Monitoringkonzept über die Abdichtung der Restwasserstrecke berücksichtigt den Erfolg der Teilabdichtung und damit die Überprüfung der Wassertiefe zur Gewährleistung der freien Fischwanderung.

### 3. Schlussfolgerungen

Färbversuche haben gezeigt, dass das Hölloch hydrologisch unabhängig vom Glattalpsee ist.

Der Anteil an Wasser aus der Versickerungsstrecke Riedblätz am Wasserhaushalt des Höllochs wird als vernachlässigbar eingestuft, da eine hydrologische Verbindung zwischen der Muota bei der Restwasserstrecke Riedblätz und dem Hölloch nur 1x pro Jahr bei sehr starken Regenerenignissen (etwa 0.3% der Zeit) besteht. Die Verminderung eines möglichen Zuflusses von der Muota durch die Teilabdichtung in der Restwasserstrecke liegt somit im tiefen Promillebereich und findet genau dann statt, wenn dem Hölloch sowieso extrem grosse Wassermengen zufließen. Daher ist ein direkter Einfluss der Versickerung auf die Karsthydrologie des Höllochs und das Vorkommen der schützenswerten Arten auszuschliessen.

Ausserdem besteht eine bald 80-jährige Nutzung mit jährlich 250-tägigem Trockenfallen der Restwasserstrecke, welche das Überleben der endemischen Arten im Hölloch offensichtlich nicht nachhaltig beeinträchtigt hat. Der Kanton Schwyz beurteilt das geplante Monitoring denn auch als ausreichend, um mögliche Beeinflussungen oder Beeinträchtigungen auf Lebensräume zu erkennen. Der Bezirk fordert ein Nichteintreten auf den Antrag des BAFU. Die Abklärungen betreffend Karstfauna werden als unverhältnismässig beurteilt.

## Faktenblatt 8c

### Beruhigungsbecken und Sanierung Fischgängigkeit Riedblätz

Thema:	Beruhigungsbecken und Sanierung Fischgängigkeit Riedblätz
Dokument Nr.	Faktenblatt 8c
betrifft Teilprojekt:	TP 4 Muota
Gesuchsunterlagen:	UVB TP 4, Beilage 7.5-1: Fachbericht Oberflächengewässer und Grundwasser Sanierungsbericht Schwall-Sunk Kap. 7 (S. 233 ff.) Sanierungsbericht Schwall-Sunk Kap. 7 (S. 238 ff.); überarbeitete Version Umweltscreening Beruhigungsbecken Kap. 2 (S. 7 ff.) Sanierungsbericht Wiederherstellung Fischgängigkeit und Fischschutz (Massnahmenvorschläge – Zwischenbericht, 2018)
Anpassung Gesuchsunterlagen	Nein
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 3.3
Stn BAFU/ENHK:	BAFU Kap. Schwall-Sunk (S. 20 f., S. 24), ENHK
Vereinbarung mit USO:	nicht Gegenstand der Vereinbarung
Datum / Version	02.02.24



## 1. Ausgangslage

### a) Beruhigungsbecken Riedblätz gemäss öffentlicher Auflage

Im Rahmen der Schwall-Sunk Sanierung soll gemäss dem eingereichten Konzessionserneuerungsgesuch, dem Sanierungsbericht vom 21.07.2021 sowie der Sanierungsverfügung, Anhörungsversion vom 06.09.2021, mit der Variante Ia bei Riedblätz ein Ausleitkanal zwischen Wasserrückgabe KW Bisisthal und der Fassung Riedblätz sowie ein Beruhigungsbecken mit einem maximalen Volumen von 50'000 m<sup>3</sup> gebaut werden. Diese Anpassungen sind notwendig, um die wesentliche Beeinträchtigung durch Schwall-Sunk in der rund 900 m langen Schwallstrecke zu beheben. Der Ausleitkanal läuft auf der orographisch rechten Seite an einem Flachmoor vorbei. Sowohl Rückhaltebecken als auch Ausleitkanal (Rohrleitung) liegen im aktuellen Perimeter des BLN-Gebiets Silberer (Nr. 1601), welches durch seine Karstlandschaft, den Bödmerenwald und das Hölloch geprägt ist (Sanierungsbericht Schwall-Sunk). Grundsätzlich sieht der Gesetzgeber vor, dass beim Vorliegen eines nationalen Interesses, welches die Schutzziele eines BLN-Gebiets beeinträchtigt, eine Interessensabwägung möglich ist.

### b) Beurteilung durch die Fachbehörden

Die ENHK hält im Gutachten zur Konzessionserneuerung und Sanierung Muotakraftwerke (31.01.2022) fest, dass für eine abschliessende Beurteilung der vorgeschlagenen Massnahmen (siehe 1a) die Dokumente noch keine ausreichende Tiefe hinsichtlich der landschaftlichen Beurteilung aufweisen. Allerdings ist im verfahrenstechnischen Kontext (Variantenstudium Schwall-Sunk Sanierung, UVB 1. Stufe) eine entsprechende tiefergehende Abklärung grundsätzlich nicht vorgesehen und wird erst im Rahmen der Baubewilligung erfolgen. Im Rahmen eines umfangreichen Umweltscreenings konnten aber umweltbezogene No-Gos ausgeschlossen werden. Zudem ist davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit im Rahmen der Koordination verschiedener Schutzgebiete der heutige BLN-Perimeter so weit verschoben wird, so dass die unter 1a beschriebenen Massnahmen diesen nicht mehr tangieren würden. Unabhängig davon hält die ENHK fest, dass mit der als Bestvariante gewerteten Variante Ia die grösstmögliche Schonung des BLN-Objekte nach Art. 6 NHG nicht sichergestellt sei. Daher sollen die Varianten Ib und III ebenfalls weiterverfolgt werden.

In der 2. Materiellen Prüfung (Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe) schreibt das Amt für Umwelt und Energie Kanton Schwyz (22.02.2022), dass das geplante neue Beruhigungsbecken Riedblätz in einem separaten UVB (2. Stufe) abgehandelt werden wird. Dessen Beurteilung aus Sicht des Natur- und Landschaftsschutzes bleibe deshalb vorbehalten. Im Rahmen des rechtlichen Gehörs haben die kantonalen Behörden den Bau des Beckens als nicht kritisch eingestuft.

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt BAFU (08.07.2022) wird festgehalten, dass es im Bereich des Rückhaltebeckens Riedblätz noch Abklärungsbedarf hinsichtlich der Bewilligungsfähigkeit, insbesondere gemäss NHG gebe. Dementsprechend wird der Antrag Nr. 14 im Zusammenhang mit der Sanierung Schwall-Sunk gestellt, dass der Ausbau des Kraftwerks Bisisthal und das dafür notwendige Rückhaltebecken hinsichtlich Bewilligungsfähigkeit zu überprüfen und mit der allfälligen Schwall-Sunk Sanierung zu koordinieren seien.

c) Optimierte Sanierungslösung gemäss überarbeitetem Sanierungsbericht vom 29.07.2023

Im Rahmen der weiteren Abklärungen während laufendem Konzessionserneuerungsverfahren konnte die als Bestvariante bestimmte Variante 1a weiter optimiert werden. Im Rahmen der Landverhandlungen hat sich herausgestellt, dass eine Verschiebung des neuen Beckens besser umsetzbar sein wird. Am optimierten Standort lässt sich ein Speichervolumen von 38'000 m<sup>3</sup> anstelle der bisher geplanten 50'000 m<sup>3</sup> realisieren (Abb. 1). Zusammen mit dem bestehenden Becken ist dies eine Steigerung von rund +76%. Da der geplante Ausbau ebenfalls nicht, wie ursprünglich geplant, verdoppelt werden kann, stellt dieser Kompromiss eine gute Lösung und Optimierung dar. Zudem kann das Ziel der Energiespeichererhöhung und die Reduktion der betrieblichen Abhängigkeit der beiden Kraftwerke mit dieser Variante erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit ist auch mit dem optimierten Beckenstandort gegeben (überarbeiteter Sanierungsbericht Schwall-Sunk).

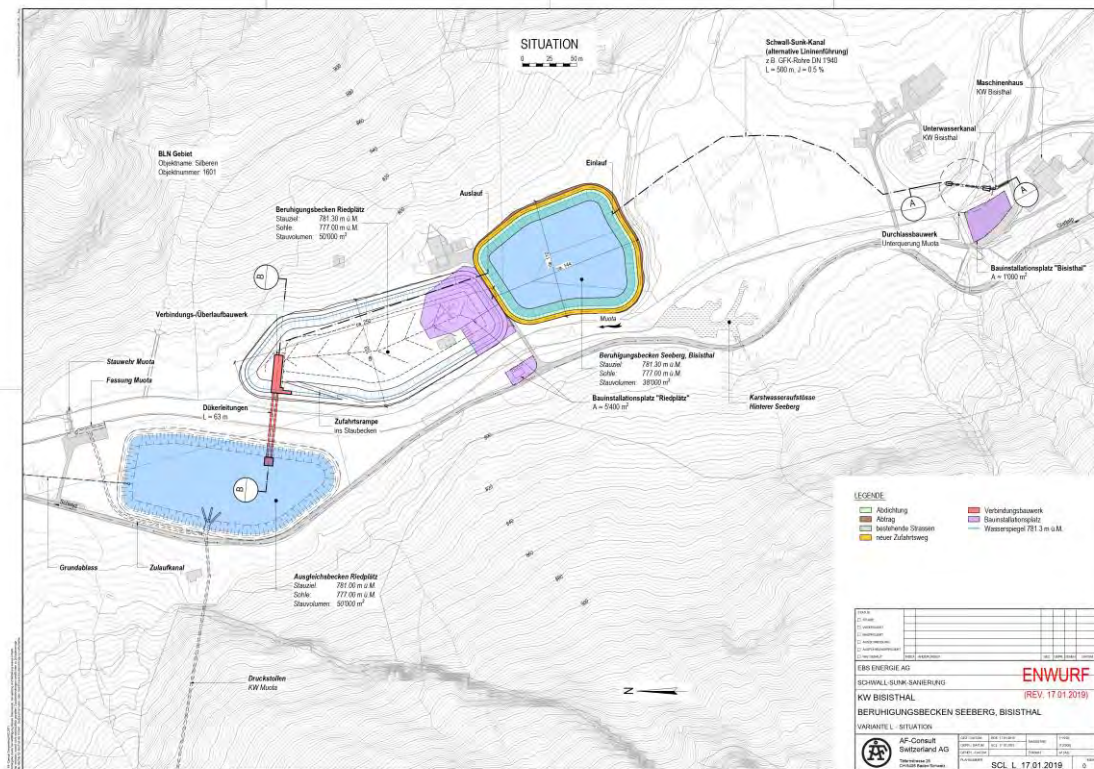


Abbildung 1: Ausgleichsbecken Riedblätz (bestehend), Beruhigungsbecken Riedblätz (alter Standort – wird nicht realisiert), Beruhigungsbecken Seeberg, Bisisthal (neuer Standort) mit unterirdischem Ausleitungskanal.

## 2. Beurteilung

### d) Koordination Konzessionserneuerungs- und Sanierungsverfahren

Aufgrund der konkreten Verhältnisse besteht ein Koordinationsbedarf zwischen Konzessionserneuerung und den Schwall-Sunk-Sanierungen, welcher in Absprache mit den zuständigen Behörden bestmöglich umgesetzt wurde. Diesem Umstand wurde bei den anspruchsvollen und

aufwändigen Abklärungen und Untersuchungen grösste Aufmerksamkeit geschenkt und Vorgehen und Verfahren wurden in enger Absprache mit den zuständigen Behörden festgelegt. Die Bestvarianten der Schwall-Sunk-Sanierungen wurden in das Konzessionsgesuch UVP 1. Stufe integriert. Der überarbeitete Sanierungsbericht bildet die Grundlage für die verbindliche Festlegung der Bestvariante für die Schwall-Sunk-Sanierung. Für das Beruhigungsbecken Riedblätz wird zudem in den Projektunterlagen und dem ebenfalls überarbeiteten «Umwelt-screening Beruhigungsbecken» dargelegt, dass die Umweltverträglichkeit bejaht werden kann, wie nachfolgend zusammenfassend nochmals dargelegt wird (e-j). Damit liegt eine Beurteilungstiefe vor, welche eine stufengerechte Beurteilung der Umweltverträglichkeit im Rahmen des Konzessionierungsverfahrens und der Sanierung Schwall-Sunk ermöglicht.

Die ebs Energie AG beantragt daher, dass zeitgleich die Bestvariante verbindlich festgelegt und die Umweltverträglichkeit des Ausgleichsbeckens auf Stufe Konzessionsverfahren im Grundsatz bestätigt wird. Für die Sanierungslösung mit Ausgleichsbecken wird in der Folge ein Bewilligungsdossier erarbeitet, in welchem die Abklärungen im Rahmen eines UVB auf Stufe Baubewilligung vertieft dargelegt werden.

#### e) Bemerkungen zur Bestimmung der Bestvariante für die Sanierung

Das Variantenstudium zeigte auf, dass die Variante Ia als Bestvariante zu bewerten ist. Die Alternativvarianten III (Ausleitungstollen), II: Speicherstollen und Ib (Ausleitungskanal) haben zwar in gewissen Bereichen geringere Auswirkungen auf das BLN-Gebiet, werden jedoch aufgrund der sehr sensiblen karsthydrologischen Verhältnisse linksufrig der Muota (Karstquelle Seebrunnen) als kaum realisierbar eingeschätzt. Ausserdem liegen die Kosten für diese Alternativvarianten sehr hoch und werden als unverhältnismässig beurteilt. Alle Sanierungsvarianten mit Direktableitung (Ia, Ib und III) führen in der Gesamtbewertung zu einem «sehr guten» Zustand im Hinblick auf alle Indikatoren der Vollzugshilfe Schwall-Sunk Massnahmen. Mit der Variante Ia lassen sich zudem auch weitergehende Beeinträchtigungen durch den geplanten Ausbau bei Bisisthal und den damit verbundenen erhöhten Wassermengen vollständig verhindern.

Der zusätzliche Speicherinhalt entspricht einer Batterie von rund 25'000 kWh, über die Kaskade KW Muota und KW Wernisberg gerechnet, welche im Vergleich zu Batterielösungen ohne weitere Umweltauswirkungen hinsichtlich Materialgewinnung, Herstellung und Entsorgung zur Verfügung stehen würde. Das Becken verbessert zudem die zeitliche Betriebsflexibilität der beiden Kraftwerke Bisisthal und Muota von heute 1.8 Stunden auf 2.5 Stunden (Betriebszeit ohne Beeinflussung vom ober- bzw. unterliegenden Kraftwerksbetrieb).

Damit die Ausleitungsvariante Ia als verhältnismässig eingestuft werden kann, beteiligt sich die ebs Energie mit einem namhaften Betrag an diesen Kosten (Kostenteiler in Absprache mit BAFU gemäss Sanierungsbericht Schwall-Sunk).

#### f) Auswirkungen des Beruhigungsbeckens Riedblätz: Übersicht

Das geplante Beruhigungsbecken Riedblätz führt in der Betriebsphase gemäss dem heutigen Planungs- und Datenstand in den meisten Umweltbereichen zu keinen relevanten Emissionen. Nicht der gesamte Aushub kann vor Ort verwendet werden. Daher wird ein Teil des Aushubmaterials in lokal vorhandenen Deponien abgelagert (Umwelt-screening Beruhigungsbecken).

Im Rahmen der Koordination zwischen Sanierung Schwall-Sunk und Konzessionserneuerung bietet die Bestvariante zudem ein grosses Synergiepotenzial, z.B. ermöglicht der Bau des Beckens eine kürzere Wasserleitung und auf den Bau eines Sandfangs kann bei der Fassung Riedblätz künftig verzichtet werden.

#### g) Auswirkungen auf Landschaft und Lebensräume

Mit den Grundeigentümern und den Umweltschutzorganisationen konnte hierzu bereits eine Lösung erarbeitet werden. Der Standort des Beckens stellt bezüglich Naturschutzanliegen keinen Konflikt dar. Durch die optimierte Linienführung des Zuleitungskanals wird der Eingriff in die Feuchtlebensräume auf ein Minimum reduziert. Ausserdem wird im Rahmen der weiteren Planung nach Möglichkeiten gesucht, das Beruhigungsbecken so auszugestalten, dass sich etwa randlich ökologisch wertvolle Lebensräume ausbilden können. Im Rahmen der Planung wurde den Vorgaben der Natur- und Heimatschutzgesetzgebung (NHG) Rechnung getragen. An der südlichen Beckenböschung bzw. entlang dem zum Hof führenden Strässchen wird eine Hecke mit standortgerechten Arten angepflanzt. Entlang der Muota schliesslich soll das Aufkommen einer Uferbestockung eingeleitet werden. Diese Aufwertungsmaßnahmen stehen im Zusammenhang mit der landschaftlichen Eingliederung des Beckens und gelten entsprechend als Massnahmen im Sinne von Art. 6 Abs. 1 NHG. Die detaillierten Projektauswirkungen im Bereich Flora, Fauna und Lebensräume werden im Rahmen der UVP mittels einer Bilanz dargestellt. Aufgrund der erfolgten Abklärungen ist ausgewiesen, dass der geschätzte Ersatzmassnahmenbedarf ausreichend abgedeckt werden kann. In Absprache mit dem Kanton Schwyz ist als Ersatz ein Beitrag an die Massnahmen Wildtierkorridor SZ06 vorgesehen (Umweltscreening Beruhigungsbecken). Gemäss Umweltscreening erfüllt das Projekt die Vorgaben von Art. 18 Abs. 1<sup>ter</sup> NHG nach Schonung, Wiederherstellung und Ersatz schutzwürdiger Lebensräume. Eine gesetzeskonforme Realisierung ist somit möglich.

Die im Objektblatt 1601 Silberer beschriebenen Schutzziele des BLN-Gebietes werden durch den Bau des Beruhigungsbeckens nicht gefährdet. Einerseits wurden für die Ablagerung des Aushubmaterials im Rahmen der Konzessionserneuerungen diverse Ablagerungsstandorte ausserhalb des BLN-Gebietes definiert. Sie werden jeweils bestmöglich in das Landschaftsbild integriert. Zudem schon die geplante Linienführung des Schwall-Sunk-Kanals die bestehenden Feuchtlebensräume und die kleinräumige Strukturvielfalt wird bestmöglich erhalten. Zur Beurteilung der Bauten und Anlagen wurde die BAFU-Methode Landschaftsästhetik angewendet. Bei der landschaftsästhetischen Beurteilung spielen sowohl die Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Einsehbarkeit des Gebiets bzw. des Gewässers und seine Bedeutung für Erholung / Tourismus wie auch der Schutzstatus der Landschaft eine Rolle. Gemäss dieser Methode führt die Kombination der Landschaftsbildqualität und den Projektauswirkungen beim Beruhigungsbecken Riedblätz im aktuellen Projektstand zu einer mittleren Erheblichkeit. Der Einfluss des BLN-Gebietes, in welchem das Beruhigungsbecken Riedblätz zum aktuellen Zeitpunkt liegt, ist gemäss der Beurteilungsmethode nur gering. Gemäss aktuellem Stand der Untersuchungen ist unter Einhaltung der im UVB definitiv zu formulierenden Massnahmen sowie der bereits geplanten Massnahmen (landschaftliche Eingliederung und Optimierung, ökologische Ersatzmassnahmen), eine gesetzeskonforme Realisierung des Beckens möglich (Umweltscreening Beruhigungsbecken, siehe auch Faktenblatt 8a BLN 1601 Silberer).

#### h) Nationales Interesse für Ausbau

Die Nutzung erneuerbarer Energien und ihr Ausbau sind von nationalem Interesse (Art. 12 Abs. 1 EnG) und die Muotakraftwerke sowie deren geplanter Ausbau erfüllen die Vorgaben bezüglich Grösse und Bedeutung gemäss Art. 12 Abs. 4 EnG i.V.m. Art. 8 EnV für Wasserkraftanlagen, womit das Nutzungsinteresse insbesondere demjenigen nach Art. 6 Abs. 2 NHG entspricht und als gleichrangig zu betrachten ist (Art. 12 Abs. 2 und 3 EnG). Sollte – entgegen der Auffassung der Gesuchstellerin – das Beruhigungsbecken als schwerer Eingriff beurteilt werden, ist eine Interessenabwägung grundsätzlich möglich, welche aufgrund des Gesagten zu Gunsten der vorgesehenen Nutzung und Schwall-Sunk-Sanierung ausfällt.

#### i) Künftiger Perimeter des BLN-Gebiets 1601 Silberen

Es ist überdies festzuhalten, dass das Beruhigungsbecken das BLN-Gebiet Silberen mit seinem heutigen Perimeter nur randlich betrifft bzw. auf dessen Grenze liegt. Im Rahmen der Nutzungsplanung Silbern-Jägern-Bödmeren wird der Kanton Schwyz in Absprache mit dem BAFU eine Perimeteranpassung des BLN-Gebietes Silberen (siehe Faktenblatt BLN) vornehmen. Im angepassten, künftigen Perimeter wird der Standort des Beruhigungsbeckens nicht mehr im BLN-Gebiet liegen.

#### j) Auswirkungen auf das Grund- und Oberflächenwasser

Das Beruhigungsbecken liegt im Grundwassergebiet und kann die Grundwasserdurchflusskapazität verändern, was – wie umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen zeigen – mit geeigneten Massnahmen kompensiert werden kann. Zur genaueren Definition dieser Massnahmen sind weitere Untersuchungen (Sondierungen, Grundwassermessstellen, usw.) am Laufen. Bezüglich den Oberflächengewässern ist eine Realisierung unter Einhaltung der noch zu formulierenden Massnahmen gesetzeskonform möglich (Umweltscreening Beruhigungsbecken).

### 3. Schlussfolgerungen

Gemäss den Unterlagen können für das geplante Beruhigungsbecken Riedblätz sogenannte «No-Gos» ausgeschlossen werden (Projektunterlagen, Sanierungsbericht, Umweltscreening Beruhigungsbecken). Die umweltverträgliche und gesetzeskonforme Machbarkeit ist stufengerecht ausgewiesen. In Bezug auf die landschaftlichen Auswirkungen kann insbesondere festgehalten werden, dass

- mit dem sorgfältigen und umfassenden Variantenstudium, den erfolgten Projektoptimierungen auf Stufe Konzessionsprojekt sowie den im Rahmen der weiteren Planungen zu berücksichtigenden Massnahmen unter den vorliegenden Rahmenbedingungen das Gebot der grösstmöglichen Schonung erfüllt wird,
- die eigentlichen Schutzziele des BLN-Gebiets 1601 Silberen nicht tangiert werden,
- und der Beckenstandort künftig nicht mehr im BLN-Perimeter liegen wird.

Im Rahmen der Vereinbarung mit den Umweltschutzverbänden und in Absprache mit Kanton und Bezirk wird der Ausbau (inkl. zusätzliches Becken Riedblätz) im Gesamtkontext von allen involvierten Parteien als notwendig erachtet. Mit der Ausleitung kann zudem eine bestmögliche Sanierung von Schwall und Sunk erzielt werden. Hinsichtlich Landbedarf sind die vorgeschlagenen Massnahmen realisierbar, da das Einverständnis der Grundeigentümer vorliegt.

#### 4. Sanierung Fischgängigkeit Fassung Riedblätz (Fischauf- und Abstieg)

Im Rahmen des Variantenstudiums zur Sanierung der Fischgängigkeit wurden im Jahr 2017 durch AF Consult, in Zusammenarbeit mit der Fachstelle Ökologie der KWO und AquaPlus, Massnahmen zur Sanierung der Fischgängigkeit nach damaligem Stand der Technik und Wissensstand erarbeitet. An der Fassung Riedblätz wurde als Bestvariante für den Fischaufstieg ein konventioneller Schlitzpass, für den Abstieg ein Horizontalrechen mit nahegelegtem Bypasskanal ausgewiesen. Die Linienführung in Bezug auf den Ein- und Ausstieg kann auch zum heutigen Zeitpunkt, unter Berücksichtigung der Kraftwerksdisposition, weiterhin als ideal beurteilt werden, jedoch haben sich durch die Aktualisierung des BAFU-Leitfadens zur Sanierung der Fischgängigkeit im Jahr 2022 die Mindestanforderungen u. A. an den lichten Stababstand verändert.

Die Ausgestaltung und Dimensionierung soll in der nächsten Projektphase (Vorprojekt, SIA-Phase 31) gemäss den zur Verfügung stehenden Restwassermengen und Mindestanforderungen an die standörtlichen Bemessungsgrundlagen geprüft werden. Aufgrund der noch frühen Projektphase (Variantenstudium) soll nach Rücksprache mit dem BAFU auf eine Überarbeitung des Variantenstudiums verzichtet werden. In der nächsten Projektphase sollen nachfolgende Punkte besonders berücksichtigt werden:

- Rechenanordnung (vertikal/horizontal) und Stababstand: Die definitive Rechenanordnung muss dabei die Strömungsverhältnisse, fischökologischen Anforderungen (zwischenzeitliche Aktualisierung BAFU-Leitfaden) sowie den Kraftwerksunterhalt berücksichtigen. Der Stababstand wird in der Detailplanung unter Berücksichtigung der Ausbauwassermenge und fischökologischen Anforderungen definiert. Voraussichtlich stellt ein Vertikalrechen die beste Variante dar, da anfallendes Geschwemmsel an diesem entnommen und behandelt werden kann.
- Dimensionierung der Fischaufstiegsanlage: Die FAH und FAbH sollen nach Stand der Technik realisiert werden. Die Beckendimensionierung sowie die Fliessgeschwindigkeiten werden im Vorprojekt entsprechend den Vorgaben überarbeitet.
- Wasserspiegelschwankungen im Oberwasser durch die veränderte Wasserkraftnutzung. Erste Abklärungen bestätigen, dass die vorgeschlagenen Bestvarianten durch die geringen Wasserspiegelschwankungen auch zukünftig realisiert werden könnten.
- Positionierung der Rückgabe: Gemäss den im Variantenstudium erstellten Plangrundlagen könnte der Überfall bei der Rückgabe von Fischen in das Unterwasser zur Blasenbildung und Desorientierung führen. Dies wird in der kommenden Projektphase unter Berücksichtigung des Stands der Technik zu Abstiegsbypässen und Überfallhöhen überarbeitet. Es wird ausserdem eine ausreichende Tosbeckentiefe im

Ausstiegsbereich gewährleistet. Die Nähe der FAbH-Rückgabe zum FAH-Einstieg dient der Optimierung der Auffindbarkeit von aufstiegswilligen Fischen.

- Umgang mit Geschwemmsel im Bypasskanal: Einem Verklausungsrisiko im Oberwasser von FAH-Ausstieg und FAbH-Einstieg soll durch technische oder Massnahmen sowie durch die regulären Unterhaltsarbeiten am Fassungsstandort vorgebeugt werden. Eine Verringerung des Geschwemmselaufkommens im Bypass könnte durch einen Vertikalrechen mit entsprechender Abfuhr des Geschwemmsels über die Rechenreinigungsmaschine gewährleistet werden. Es ist darauf zu achten, dass eventuelle Verklausungen nicht einen Schwall-Sunk in der Restwasserstrecke auslösen.
- Kurvenradien des Bypasskanals: Die Planunterlagen des Variantenstudiums sind bezüglich der skizzierten Auf- und Abstiegsmassnahme als Linienführung zu verstehen. In der nächsten Phase werden die technischen Vorgaben hinsichtlich Beckendimensionierung nach Stand der Technik auf ihre Machbarkeit überprüft und entsprechende Anpassungen vorgenommen. Enge Kurvenradien sind dabei zu vermeiden, um den verletzungsfreien Transport von Fischen in das Unterwasser zu gewährleisten.
- Finanzielle Verhältnismässigkeit der Sanierungsvariante.
- Umbau des Spülschützes und Tosbecken als Rückfallebene für den Fischabstieg, sofern sich beim Feinrechen und Bypasskanal in der nächsten Projektphase technische Limitationen herausstellen würden. Es soll geprüft werden, ob der Spülschütz durch bauliche Anpassungen als Fischabstiegs-Bypass genutzt werden kann. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob dies eine Anpassung der FAH-Massnahme bedingt (z.B. Fischlift). Für einen verletzungsfreien Fischabstieg müsste die Tosbeckentiefe beispielsweise durch ein Schlauchwehr erhöht werden. Am Standort kommt es an etwa 83 Tagen zu Wehrüberfall.

# Faktenblatt 8d

## Unterlauf Gigenbach

Thema:	Unterlauf Gigenbach
Dokument Nr.	Faktenblatt 8d
betrifft Teilprojekt:	TP 4 Muota
Gesuchsunterlagen:	Restwasserbericht Hauptbericht Kap. 6.7 (S. 55), Restwasserbericht Fachbericht Hydrologie Kap. 6.7 (S. 90 ff.), Restwasserbericht Fachbericht Gewässerökologie Kap. 19 (S. 314 ff.), Restwasserbericht Fachbericht SNP Kap. 3 (S. 4 ff.) UVB TP 4, Beilage 7.5-1: Fachbericht Oberflächengewässer und Grundwasser
Anpassung Gesuchsunterlagen	Nein
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 5.14
Stn BAFU/ENHK:	BAFU Kap. 3.4 Tabelle 3 (S. 14 ff.)
Vereinbarung mit USO:	nicht Gegenstand der Vereinbarung
Datum / Version	22.06.23



## 1. Ausgangslage

Der Gigenbach ist ein temporäres Gewässer (Restwasserbericht Fachbericht Hydrologie Kap. 6.7) und fällt gemäss GSchG Art. 29 nicht unter die Bestimmungen von GSchG Art. 29 ff. Es ist ganzjährig kein Restwasser gemäss Gewässerschutzgesetz zu dotieren. In einem partizipativen Prozess mit allen Beteiligten wurden im eingereichten Konzessionsgesuch jedoch die Restwassermengen bei der Fassung Gigenbach gemäss Tabelle 1 vorgeschlagen (Restwasserbericht Hauptbericht, Restwasserbericht Fachbericht SNP):

*Tabelle 1: Restwasserabgabe Fassung Gigenbach in l/s gemäss Restwasserbericht*

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Restwassermenge [l/s]	5	5	5	5	9	9	9	9	9	5	5	5

In der 2. Materiellen Prüfung (Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe) vom Amt für Umwelt und Energie Kanton Schwyz (22.02.2022) wird folgender Antrag gestellt: «Die Einhaltung der Restwasserbestimmungen gemäss Art. 31-33 GSchG für den Gigenbach sind erforderlich. Um die Anforderungen an seltene Lebensräume und -gemeinschaften des Makrozoobenthos zu erfüllen, ist eine Erhöhung der rechnerischen Restwassermengen gemäss Art. 31 Abs. 2 Bst. c GSchG angezeigt. Die Festlegung einer Restwassermenge gemäss Art. 31-32 GSchG im Restwasserbericht ist dementsprechend zu begründen oder zu überarbeiten. Aus Gewässerschutz- und fischereirechtlicher Sicht kann die Restwassermenge an der Fassung Gigenbach gemäss Art. 31-33 GSchG entsprechend Tabelle 16 unter Auflage genehmigt werden.»

*Tabelle 16: Restwasserabgabe ab Fassung Gigenbach in l/s*

Fassung Gigenbach	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Mindestrestwassermenge (Art. 31-32 GSchG)	Mindestrestwassermenge gemäss Art. 31 Abs. 2 Bst. c GSchG zu bestimmen											
Restwassermenge (Art. 33 GSchG)	5	5	5	5	9	9	9	9	9	5	5	5

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt (08.07.2022) wird im Antrag 10c folgendes gefordert: «Gutachterliche Einschätzung, ob es sich im Unterlauf des Gigenbach um ein Fischgewässer handelt. Gegebenenfalls muss ein Vorschlag zur Anpassung der Restwassermenge erarbeitet werden. Begründung: Eine wesentliche Einschränkung der Fischgängigkeit ist nach Art. 31 GSchG und Art. 9 BGF nicht zulässig.» Im Antrag 10d wird zusätzlich gefordert, dass «bei Nichtfischgewässern, wo aufgrund des Vorkommens geschützter Arten ein  $Q_{MzB}$  bestimmt wurde, ist, wo nicht bereits erfolgt, zu überprüfen, ob diese rechnerisch festgestellte Wassermenge den vorkommenden Arten ganzjährig ausreicht. Begründung: Nach Art. 9 BGF sind günstige Lebensbedingungen für Wassertiere zu schaffen.»

## 2. Beurteilung

### a) Gigenbach als Nichtfischgewässer

Der Gigenbach ist durch hohes Gefälle und Fliessgeschwindigkeiten geprägt und stellt durch die temporäre Wasserführung ( $Q_{347} = 0 \text{ l/s}$ ) kein Fischgewässer dar (Fachbericht Gewässerökologie). Gemäss Fachbericht Hydrologie fällt der Gigenbach in den Wintermonaten teils trocken und beeinträchtigt dadurch die Vernetzung mit der Muota, entsprechend ist auch der Unterlauf des Gigenbachs kein Fischgewässer. Der Gigenbach wird denn auch vom Kanton als Nicht-Fischgewässer ausgewiesen.

Im Februar 2023 fand eine Begehung des Unterlaufs vom Gigenbach statt, welche aufzeigen konnte, dass trotz wenig Wasser im steilen Bereich (Abb.1) der flache Gewässerabschnitt im Mündungsbereich (Abb. 2) vollständig trockenfällt (Standort Abb. 3). Daraus wird geschlossen, dass dieser Gewässerabschnitt auch trockenfällt, wenn das natürlicherweise temporäre Gewässer kein Wasser führt, was auch von den Behörden gestützt wird und entsprechend kann bestätigt werden, dass auch der Unterlauf des Gigenbachs kein Fischgewässer ist.



Abbildung 1: Standort 1, Steilstrecke Gigenbach (Blickrichtung flussab)



Abbildung 2: Standort 2, Mündung vom Gigenbach in die Muota (Blickrichtung flussauf)



Abbildung 3: Standort 1 und 2 der Fotodokumentation des Unterlaufs vom Gigenbach

b) Günstige Lebensbedingungen für Wassertiere gegeben

Gemäss Restwasserbericht Fachbericht Gewässerökologie (Kap. 19.4, S.316 ff.) wurde im Gigenbach eine Art der prioritären Liste gefunden (mässig: *Habroleptoides auberti*). Rote Listen Arten kamen nicht vor. Demzufolge erfolgt keine Erhöhung der rechnerischen Mindestrestwassermenge gemäss Art. 31 Abs. 2 Bst. c (seltene Lebensräume und -gemeinschaften).

Infolge der sehr kleinen Grösse sowie der erschwerten Zugänglichkeit des Gigenbachs erfolgte die Festlegung der Restwassermenge  $Q_{MZB}$  – wie in einem solchen Fall üblich – gutachterlich. Die dadurch festgelegte Restwassermenge ergibt im Winter wie im Sommer eine Restwassermenge von 5 l/s. Aufgrund der Restwassermenge sind vereinzelt höhere Fliessgeschwindigkeiten zu erwarten (Steinrinnen auf Fels, Wasserfall), die das Vorkommen der rheobionten Blephariceriden begünstigen.

### 3. Schlussfolgerungen

Der Gigenbach stellt durch die temporäre Wasserführung auch im Unterlauf kein Fischgewässer dar, was mit der bisherigen wissenschaftlichen Herleitung und der Begehung im Februar 2023 aufgezeigt werden kann. Im Rahmen der Gesuchserarbeitung erfolgte bereits eine gutachterliche Abklärung. Es bedarf daher keinen zusätzlichen Abklärungen.

Obwohl es sich um ein unter Art. 29 ff. GSchG fallendes, temporäres Nichtfischgewässer handelt, wurden in einem partizipativen Prozess Restwassermengen zwischen 5 und 9 l/s festgelegt, wobei auch das gutachterlich festgestellte  $Q_{MZB}$  von ganzjährig 5 l/s berücksichtigt wurde und die Lebensbedingungen damit gewährleistet sind. Es besteht kein Anlass, diese breit abgestützte Lösung in Frage zu stellen.

## Faktenblatt 8e

### Terrestrische Bilanz Glattalp

Thema:	Terrestrische Bilanz Glattalp
Dokument Nr.	Faktenblatt 8e
betrifft Teilprojekt:	TP 1 Glattalp
Gesuchsunterlagen:	UVB TP 1, Kap. 7.12 (S. 124)
Anpassung Gesuchsunterlagen	Ja (Tabelle 24 in UVB TP1 wurde angepasst)
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 8.11
Stn BAFU/ENHK:	
Vereinbarung mit USO:	nicht Gegenstand der Vereinbarung
Datum / Version	22.06.23

## 1. Ausgangslage

In der Einsprache gegen das Gesuch der ebs Energie AG um Konzessionserneuerung für die Nutzung der Wasserkraft (22.11.2021) weisen die Umweltschutzorganisationen darauf hin, dass die Punktzahl des Teilprojekts Glattalp in der Bilanz der baubedingten Eingriffe auf die terrestrischen Lebensräume (S. 124, Tabelle 24) nicht korrekt ist (2238 Punkte anstelle von 2133 Punkte).

Die Differenz von 105 Punkten entspricht dem Korrekturwert für die lange Regeneration an der Stelle "Randbereiche Installationsplatz und Verbreiterung Zufahrt bei Bergstation". Dieser Wert ist beim Übertrag aus der Bewertung in die Tabelle 24 des UVB (Version 30.06.2021) fälschlicherweise nicht mit eingeflossen.

Nachfolgend ist die überarbeitete Tabelle 24 (Version 28.02.2023) dargestellt und der Gesamtwert von 2238 Punkten korrekt aufsummiert.

	Veg.Typ / KW	m <sup>2</sup> tangiert	NHG Delarze NHG Delarze "verwandt"	Faktor	temp Verlust	def Ver- lust	Korrekturwert für lange Regeneration
Steinbachrinne							
	nichts NHG-relevantes da nur im Seebereich betoniert						
Abdichtungen							
	nichts NHG-relevantes über Seebereich						
Abbaustellen Ma- terial, über 1860müM							
	z. T. Feinschutt, optionale Abbaustelle Seeplanggen	5250	Feinschutt	0.7	nicht einbezo- gen *		nicht einbezogen
Baupiste über Seespiegel 1860 rechte Seite							
	nichts NHG-relevantes						
Baupiste über Seespiegel 1860 linke Seite							
	z. T. feucht	400	Caricetum nig- rae	1	400		200
	Ausweichstellen	180	Sesterion	0.7	126		63
Installations- plätze							
	z. T. feucht, Installationsplatz Seeband	2925	Caricetum nig- rae	1	2925		1462.5
	Installation Läckibach (Standort noch optimieren)	400	Caricetum nig- rae	1	400		200
	Randbereiche Installa- tionsplatz und Verbrei- terung Zufahrt bei Bergstation	300	Gebirgs-Mager- rasen	0.7	210		105
	Installationsplatz Tal- station und See- plangge						
Zwischenlager- plätze							
	z. T. feucht, Zwischen- lager West	415	Caricetum nig- rae	1	415		207.5
Baubahn	noch keine Angaben						
<b>Total TP Glattalp</b>					<b>-4'476</b>	<b>0</b>	<b>-2'238</b>

Tabelle 24: Bilanz der baubedingten Eingriffe auf die terrestrischen Lebensräume. Mit einer Fläche ausgewiesen werden nur NHG-relevante Lebensräume – \* nicht berücksichtigt, da optional

Nachfolgend ist die überarbeitete Tabelle 26 (Version 28.02.2023) dargestellt und der Korrekturwert für lange Regeneration entsprechend der Tabelle 24 angepasst.

	temp Verlust	staf Verlust	Korrekturwert für lange Regeneration	Verweis auf
Total Bau	0	0	-2'238	Tabelle 24
TOTAL Betrieb	0	-15'614	0	Tabelle 25
<b>Bilanz TP Glattalp gesamthaft</b>	<b>0</b>	<b>-15'614</b>	<b>-2'238</b>	

Tabelle 26: Gesamtbilanz der Bau- und Betriebseingriffe TP Glattalp

## 2. Beurteilung

Der Summenfehler in der Tabelle 24 wurde korrigiert: Die aufsummierten Korrekturwerte für lange Regeneration im TP Glattalp beläuft sich auf -2'238 Punkte. Die vorhandenen Massnahmen reichen aus, um das Defizit zu kompensieren.

## 3. Schlussfolgerungen

Die Tabelle 24 im Umweltverträglichkeitsbericht 1. Stufe zum Teilprojekt 1 Glattalp wurde am 28.02.2023 durch das Ingenieurbüro B+S aktualisiert. Ebenso wurde im Bericht die Tabelle 26 (Gesamtbilanz der Bau- und Betriebseingriffe TP Glattalp) angepasst.

# Faktenblatt 8f

## Teilabdichtung Glattalpsee

Thema:	Teilabdichtung Glattalpsee
Dokument Nr.	Faktenblatt 8f
betrifft Teilprojekt:	TP 1 Glattalp
Gesuchsunterlagen:	UVB TP 1 Kap. 5.2.1 (S. 32 ff.), Kap. 5.3 (S. 37 ff.), Kap. 7.4 (S. 67 ff.), Kap. 7.5 (S. 72 ff.), Kap. 7.13 (S. 133 ff.) Beilage 7.4-1: Fachbericht Grundwasser und Quellen Technischer Bericht TP 1 Kap. 3.1 (S. 4), Kap. 4 (S. 10 ff.), Kap. 6.1 (S. 22), Kap. 6.9 – 6.16 (S. 37 ff.) Bericht landschaftliche Projektoptimierungen
Anpassung Gesuchsunterlagen	Nein
Tabelle Bezirk/Kanton:	Ziff. 2.1
Stn BAFU/ENHK:	BAFU Kap. 3.1 (S. 3 f.), ENHK
Vereinbarung mit USO:	Ziff. 3.2
Datum / Version	19.09.23



## 1. Ausgangslage

Mit diversen geologischen Untersuchungen sind in den vergangenen Jahrzehnten die Hauptversickerungsstellen im Glattalpsee lokalisiert worden. Diese massgebenden Versickerungsstellen werden im Rahmen der geplanten Teilabdichtung mit Bentonitmatten abgedichtet. Von einer vollständigen Abdichtung des Seegrundes wird abgesehen. Durch die teilweise Abdichtung des Seegrundes werden eine Vielzahl, der seit dem Jahr 1952 kartierten Versickerungsstellen weiterhin aktiv bleiben, wodurch es im Glattalpsee auch zukünftig zu Versickerungsverlusten kommen wird. Die Teilabdichtung des Glattalpsees erfolgt etappenweise und aufgrund der klimatischen Bedingungen nur während ca. 4.5 Monaten (Juni bis Mitte Oktober) pro Jahr:

1. Installations- und Vorbereitungsarbeiten
2. Baujahr: Teilabdichtung 1.0;
4. Baujahr: Teilabdichtung 2.1 und 2.2;
5. Baujahr: Teilabdichtung 2.3;
7. Baujahr: Optionale Teilabdichtung 3.0.

Nach Umsetzung der jeweiligen Etappen wird eine Erfolgskontrolle durchgeführt. Je nach Minderung der Sickerungsverluste sowie der Abflussentwicklung in den einzelnen, im Zuge des geplanten Monitorings überwachten Quellen, werden die Bauarbeiten beendet oder weitergeführt. Sollten die Teilabdichtungen wider Erwarten zu grossen Abflussreduktionen in den untersuchten Quellen führen, werden diese unwirksam gemacht (maschinelles Aufreissen der Teilabdichtung). Das Monitoringprogramm sieht nach jeder der drei Bauetappen jeweils einen Bauunterbruch und eine Monitoringphase von 13 Monaten vor. Aufgrund der Ergebnisse aus dem Monitoring wird über die Weiterführung bzw. darüber, ob die Abdichtungsmassnahmen rückgängig gemacht werden, entschieden. Bei unklaren Resultaten des Monitorings wird die darauffolgende Bauetappe um ein Jahr verschoben. Die gesamte Bauphase erstreckt sich auf einen Zeitraum von sechs bis sieben Jahren, sofern keine Verlängerung der Monitoringphasen zwischen den Bauetappen nötig ist (Technischer Bericht TP1, UVB TP1, Bericht landschaftliche Projektoptimierung). Die Bauphase sollte aus Aspekten des Landschaftsschutzes sich zeitlich auf einen möglichst geringen Zeitraum ausdehnen.

Die ENHK hält im Gutachten zur Konzessionserneuerung und Sanierung Muotakraftwerke (31.01.2022) fest, dass mit dem vorgesehenen Monitoringkonzept nicht sichergestellt sei, dass infolge der Teilabdichtung des Glattalpsees möglicherweise auftretende Schüttungsreduktionen, Veränderungen der Abflusscharakteristik oder dauerhafte Trübungen innerhalb des BLN-Objekt liegende Quellen im Bisisthal – und somit eine schwere Beeinträchtigung der Werte des BLN-Schutzziels 3.6 – rechtzeitig verhindert werden können. Die ENHK stellt dementsprechend den Antrag, dass zwischen den einzelnen Etappen der Teilabdichtung jeweils mehrjährige Unterbrüche eingeplant werden, damit eine verlässliche Grundlage für die Beurteilung des Einflusses der Abdichtungsschritte auf die Quellen gewährleistet werden kann.

In der 2. Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Amt für Umwelt und Energie Kanton Schwyz (22.02.2022) wird im Kap. 3.4 (S. 8-9) die Auffassung der ENHK, dass die Beobachtungszeiträume zwischen den einzelnen Bauetappen knapp bemessen sind, zwar grundsätzlich geteilt. Es gelte jedoch ebenfalls die landschaftlichen Beeinträchtigungen, welche die rund dreimal längere Aufrechterhaltung der Baustelle auf der

Glattalp nach sich ziehen, zu berücksichtigen. Unter der Voraussetzung, dass die Messungen während dem ganzen Zeitraum der Bauphase und der anschliessenden Erfolgskontrolle kontinuierlich weitergeführt werden, dass bei unklaren Resultaten die nachfolgende Bauphase verschoben wird und Interventionen innerhalb der verschiedenen abgedichteten Bereiche jederzeit möglich bleiben, ist es aus Sicht des AWN nicht nötig, die Unterbrüche zwischen den Bauphasen grundsätzlich auf mehrere Jahre auszudehnen. Für den Fall jedoch, dass auch nach einer Verschiebung der darauffolgenden Bauphase um ein Jahr noch unklare Resultate vorliegen, sollen im Monitoringkonzept Unterbrüche von mehr als zwei Jahren nicht ausgeschlossen werden.

In der Materiellen Prüfung der Hauptuntersuchung 1. Stufe inkl. Pflichtenheft 2. Stufe vom Bundesamt für Umwelt BAFU (08.07.2022) wird der Antrag der ENHK unterstützt. Mit der Begründung eine schwerwiegende Beeinträchtigung des BLN-Objektes sowie eine irreversible Beeinträchtigung der Erhaltung der Karst-Biodiversität im Gebiet (Faktenblatt 8b Endemische Arten Hölloch) auszuschliessen.

Der Bezirk fordert mit Ziff. 2.1 in der Tabelle der Einspracheverhandlungen aufgrund der Sachlage und insbesondere der Beurteilung BAFU mehrjährige Unterbrüche zwischen den Bauetappen.

## 2. Ergänzende Massnahme zur Bauphase der Teilabdichtung

In der Vereinbarung bzw. gemeinsamen Antrag an die Behörden bezüglich der Konzessionserneuerung (inkl. SNP) und Sanierung Wasserkraft sehen die ebs Energie AG und die Umweltschutzorganisationen (Ziff. 3.2) eine unveränderte Bauetappierung gemäss den Gesuchsunterlagen vor. Zusätzlich zu den im Gesuch vorgesehenen Massnahmen sollen aber Vorkehrungen hinsichtlich Gestaltung der Materialabbaugebiete und der Durchführung des Monitorings vorgesehen werden. Die nötigen Materialabbaugebiete am Glattalpsee müssen so gestaltet werden, dass sie nach Beendigung der Bautätigkeit einen maximalen ökologischen Wert entfalten können. Es ist darauf zu achten, dass wertvolle Flachwasserzonen entstehen, welche auch temporär austrocknen (Ufervegetation, Wasserpflanzenvegetation, temporäre Teiche). Mögliche Einschränkungen aufgrund der topographischen Lage des Glattalpsees bleiben vorbehalten. Hinsichtlich Kostenschätzung, Umsetzungsplanung, Pflichtenheft für das Pflegekonzept und die Erfolgskontrolle (inkl. Nachbesserungspflicht, oder Erstellung allfälliger Ersatzhabitate) erfolgt noch eine Detailplanung in Absprache mit der Begleitgruppe. Am Ende jeder Monitoringphase soll zudem die Begleitgruppe gemäss Ziff. 5 im gemeinsamen Antrag über den Bauverlauf sowie die Messungen bzw. Erkenntnisse informiert werden und es werden gegebenenfalls erforderliche Massnahmen vorgeschlagen und das weitere Vorgehen bestimmt.

### 3. Beurteilung

Die Bauarbeiten sollten so kurz wie möglich gehalten werden, damit die Auswirkungen der Bauphase auf die Landschaft gemäss UVB TP 1 (Kap. 7.13) möglichst kurz bestehen. Die etappenweisen Abdichtungen können im Rahmen der Erfolgskontrolle regelmässig bewertet werden und das Monitoring ist auch dann sinnvoll, wenn der See nur soweit gefüllt ist, dass die Teilabdichtungen unter Wasser sind. Längerfristige Unterbrüche bei den Bauarbeiten, wie seitens ENHK und BAFU gefordert, sind daher nicht zielführend, da die möglichen Abflussschwankungen innerhalb der Bauphasen und aufgrund des Monitoringkonzeptes berücksichtigt werden können.

Durch die klimatischen Bedingungen können nur während gut vier Monaten Bauarbeiten stattfinden. Somit sind zwischen den Bauphasen knapp acht Monate, in denen nicht gebaut wird, sich der See im Frühling aufgrund der Schneeschmelze füllt und das Monitoring ausgeführt werden kann. Zwischen der ersten und zweiten Teilabdichtung sowie zwischen der dritten und optionalen vierten Teilabdichtung kommt zu diesen knapp acht Monaten ein ganzes Jahr Monitoringzeit hinzu. In diesen Monitoringphasen können zwei Seefüllungen ausgewertet werden (Technischer Bericht TP 1).

Ausserdem konnten aktuelle Auswertungen der bisherigen Messdaten von drei repräsentativen Quellgewässern mit nachgewiesener Verbindung zum Glattalpsee, einem Quellgewässer ohne Verbindung zum Glattalpsee und zwei Oberflächengewässer, die in den Glattalpsee münden, die bisherige Vermutung, dass die Quellgewässer stark vom Niederschlag abhängig sind, stützen. Einerseits konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Gewässer während dem Untersuchungszeitraum Abflussspitzen von wenigen Tagen nach grösseren Niederschlagsereignissen aufwiesen. Auch konnte mit der Untersuchung des Parameters Abfluss gezeigt werden, dass die Reaktionszeit und -intensität auf Niederschlagsereignisse aller untersuchten Gewässern ähnlich ausfielen. Zudem war der Zusammenhang zwischen Abfluss und Niederschlag zwischen Juli und Oktober (Ausschluss Einfluss Schnee[schmelze]) bei allen untersuchten Gewässern signifikant. Das stützt auch Resultate von früheren Untersuchungen im Gebiet vom Glattalpsee und Bisisthal, welche aussagten, dass die Gewässer stark von der Witterung abhängig sind (Müller, 2022, S. 27-39; UVB TP1, Beilage 7.4-1).

Die Auswertung der Abflusswerte der untersuchten Gewässer im Vergleich zur Füllmenge des Glattalpsees zeigte weitere Ergebnisse: Im Frühjahr 2020 stiegen die Abflusswerte der untersuchten Quellgewässer deutlich an und erst einige Tage später konnte ein Ansteigen des Seestands beobachtet werden. Diese Reihenfolge beobachtete auch AquaPlus im Untersuchungszeitraum von 2011 bis 2014 und vermutete, dass das auf die Schneeschmelze in tieferen Lagen zurückzuführen war. Der Schnee sowie die Schneeschmelze scheinen somit einen ebenso grossen Einfluss auf die untersuchten Gewässer zu haben wie der Niederschlag. Ausserdem ist als Reaktion auf Niederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr neben dem Abfluss der Gewässer auch der Glattalpsee mit einer zeitlichen Verzögerung gestiegen. Nach dem Anstieg des Glattalpsees konnte bei den Gewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum See kein erneuter klarer Abflussanstieg beobachtet werden. Diese Ergebnisse deuten ebenfalls darauf hin, dass der Abfluss der Quellgewässer stark vom Niederschlag und der Schneeschmelze abhängt und weniger vom Glattalpsee (Müller, 2022, S. 40-41; UVB TP1, Beilage 7.4-1).

#### 4. Schlussfolgerungen

Der Bauplan sieht für die 7 Baujahre mehrere Unterbrüche von jeweils bis zu knapp 20 Monaten vor. Das vorgesehene Monitoringkonzept dient für eine umfassende und permanente Dokumentation der Abflussverhältnisse, mit der eine sehr solide Beurteilungsgrundlage geschaffen wird. Auf der Basis der Monitoringergebnisse kann künftig entschieden werden, ob es zu Abflussreduktionen bei den Quellschüttungen kommt und ob in solchen Fällen längere Baustopps oder gar bestimmte Abdichtungen rückgängig gemacht werden müssen. Im zu erwartenden Fall, dass es zu keinen wesentlichen Reduktionen bei den Quellschüttungen kommt, können so die landschaftlichen Beeinträchtigungen durch eine sehr lange Bauzeit sehr stark reduziert werden. Die Verunreinigung durch Mikroplastik wird minimiert oder sofern technisch möglich sogar gänzlich verhindert, da soweit erhältlich kunststofffreies Material verwendet wird.

#### Beilagen:

- Müller, G. (2022). Untersuchung von Quell- und Oberflächengewässern im Bisistal und Glattalp als Grundlage für die Teilabdichtung Glattalpsee. Bachelorarbeit. ZHAW, Wädenswil.

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT  
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

## Untersuchung von Quell- und Oberflächengewässern im Bisistal und Glattalp als Grundlage für die Teilabdichtung Glattalpsee



Bachelorarbeit

von

Gianna Müller

Bachelorstudiengang 2019

Abgabetermin: 24.10.2022

Studienrichtung: Umweltingenieurwesen

**Vertraulich**

Fachkorrektoren:

Dr. Diego Tonolla  
ZHAW LSFM, IUNR  
Schloss  
8820 Wädenswil

Dr. Manuel Antonetti  
ZHAW LSFM, IUNR  
Schloss  
8820 Wädenswil

Dr. Steffen Schweizer  
Kraftwerke Oberhasli AG  
Grimselstrasse 19  
3862 Innertkirchen



### **Zitiervorschlag**

Müller, G. (2022). Untersuchung von Quell- und Oberflächengewässern im Bisistal und Glattalp als Grundlage für die Teilabdichtung Glattalpsee. Bachelorarbeit. ZHAW, Wädenswil.

### **Adresse Institut**

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Departement Life Sciences und Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen UNR, Grüental, 8820 Wädenswil, Schweiz.

### **Schlagworte**

Quelle, Quellgewässer, Oberflächengewässer, Karst, Karstsystem, Abfluss, Temperatur, Leitfähigkeit, Niederschlag, hydrologische Verbindung, Glattalpsee, Bisistal, Teilabdichtung

### **Titelbild**

Quelle vom Taaschibach im hinteren Bisistal (ebs Energie AG, 2011)

## **Zusammenfassung**

Durch Karstaufrüche im Seegrund des Glattalpsees versickert Wasser, von welchem diverse Quellen im hinteren Bisistal im Kanton Schwyz gespeist werden. Diese Quellen sind einzigartige Lebensräume, die den Übergang vom Grund- zum Oberflächenwasser bilden. Ausserdem sind die Quellen wichtig für die Trinkwasserversorgung in der Region. Um im Hinblick auf die geplante Teilabdichtung des Seegrunds ein besseres Systemverständnis der hydrologischen Verbindungen vom Glattalpsee mit den untersuchten Quellgewässern zu erhalten, wurden die von der ebs Energie AG zur Verfügung gestellten Messdaten von 2012 bis 2020 von zwei Oberflächengewässern, die in den Glattalpsee münden und fünf Quellgewässern im hinteren Bisistal ausgewertet und miteinander verglichen. Die Abflussdaten wurden statistisch ausgewertet sowie anhand deskriptiver Analysen zusammen mit dem Niederschlag und Seestand verglichen. Ausserdem wurde mittels Berücksichtigung der Parameter Abfluss, Leitfähigkeit und Wassertemperatur die Intensität und Dauer der Reaktion der Gewässer auf ausgewählte Niederschlagsereignisse untersucht. Es konnte aufgezeigt werden, dass die untersuchten Gewässer unterschiedlich auf ein Niederschlagsereignis reagierten. Diese Unterschiede liessen sich jedoch nur begrenzt auf die Gewässertypen – Oberflächengewässer oder Quellgewässer – zurückführen.

## **Abstract**

Water from the Lake Glattalp percolates through the permeable layer of karst in its lakebed and feeds various springs in the valley of Bisistal in Canton Schwyz. These springs are unique habitats that form the transition from groundwater to surface water and they are important for the drinking water supply in the region. The aim was to obtain a better understanding of the system of the hydrological connections from Lake Glattalp to the investigated springs regarding the planned partial sealing of the lakebed. Therefore, data from two surface waters and five springs was evaluated and compared. The data was measured from 2012 to 2020 and was provided by ebs Energie AG. Data from the discharge of the investigated waters were statistically evaluated. Moreover, the discharge data was, based on descriptive analyses, compared with precipitation and lake levels. In addition, the intensity and duration of the response of the springs and surface waters to precipitation events was investigated by considering the parameters discharge, conductivity and water temperature. It has been shown that the investigated water bodies reacted differently to the precipitation events. However, these differences could only to a limited extent be attributed to the type of water body - surface water or spring.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	
Abstract.....	
Inhaltsverzeichnis .....	
1 Einleitung .....	1
2 Material und Methoden .....	4
2.1 Untersuchungsgebiet .....	4
2.2 Datenaufbereitung und -analyse.....	10
2.2.1 Gegenüberstellung Abflussverhalten .....	11
2.2.2 Hauptkomponentenanalyse .....	12
2.2.3 Abhängigkeit der Abflusswerte vom Niederschlag .....	12
2.2.4 Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag.....	13
2.2.5 Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse .....	14
3 Resultate.....	16
3.1 Gegenüberstellung Abflussverhalten .....	16
3.2 Hauptkomponentenanalyse .....	19
3.3 Abhängigkeit der Abflusswerte vom Niederschlag .....	21
3.4 Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag.....	23
3.5 Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse .....	28
4 Diskussion.....	37
4.1 Methodik.....	37
4.2 Resultate .....	38
4.3 Fazit und Ausblick.....	43
5 Literaturverzeichnis.....	45
Abbildungsverzeichnis.....	48
Tabellenverzeichnis .....	51
Anhang .....	52



## 1 Einleitung

In der aktuellen Energiewende und einer möglichen drohenden Strommangellage, vor allem im Winter, gewinnt die inländische Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen zusätzlich an Bedeutung (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2022). Die Versorgung mit erneuerbarer Energie, welche unter anderem mit dem Ausbau der Wasserkraft angestrebt wird, ist wichtiger Bestandteil der Energiestrategie 2050 des Bundesrats (Bundesamt für Energie (BFE), 2022). Insbesondere soll die Versorgungssicherheit der Schweiz auch im Winter gestärkt und eine geringere Abhängigkeit von Stromimporten aus dem Ausland angestrebt werden (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2021). Diesen Zielen entspricht die geplante Teilabdichtung des Glattalpsees. Das Wasser des Glattalpsees wird mit dem Kraftwerk Sahli der ebs Energie AG für die Stromproduktion genutzt (B+S AG, 2021). Durch Karstaufrüche im Seegrund versickert Wasser, weswegen der See im Winter meist vollständig entleert ist und sich erst im Frühjahr mit einsetzender Schneeschmelze wieder füllt (AquaPlus, 2021a). Um die Versickerungen zu vermindern und eine Erhöhung der Stromproduktion im Winter zu erreichen, sollen im Rahmen der Konzessionserneuerung Teile der Seesohle nach Prioritäten und in Etappen mit Bentonitmatten abgedichtet werden, damit könnte die Stromproduktion um 8.6 Gigawattstunden pro Jahr (GWh/a) von heute 11.9 GWh/a auf zukünftig 20.5 GWh/a gesteigert werden (B+S AG, 2021). Das im Karstsystem versickernde Seewasser speist diverse Quellen im hinteren Bisistal im Kanton Schwyz (AquaPlus, 2021b). Einerseits sind Quellen wichtig für die Trinkwasserversorgung in der Region (AquaPlus, 2021b). Andererseits sind sie einzigartige Lebensräume, die den Übergang vom Grund- zum Oberflächenwasser bilden sowie eine Verbindung der aquatischen zur terrestrischen Umwelt darstellen (Gerecke et al., 2011). Quellen sind aufgrund ihrer komplexen Habitategenschaften oft artenreich und tragen stark zur lokalen und regionalen Biodiversität bei (Cantonati et al., 2012). Es gibt viele unterschiedliche Arten von Quellen, die sich zum Teil stark in der Verfügbarkeit von Nischen, der abiotischen Parameter oder ihrer Vernetzung unterscheiden (Küry et al., 2017). Trotz dieser Unterschiede haben Quelllebensräume als gemeinsame Eigenschaft, dass sie stabile Habitate darstellen, deren abiotischen Parameter, wie pH-Wert, Leitfähigkeit oder Wassertemperatur saisonal stabil sind, da das Quellwasser bevor es austritt einen gewissen Weg durch den Untergrund fließt (Cantonati et al., 2012). Diese kleinflächigen Lebensräume werden von vielen Organismen, auch speziell angepassten Quellbewohnern (Krenobionten) besiedelt, jedoch sind sie durch einen hohen Nutzungsdruck stark gefährdet (Lubini-Ferlin et al., 2014).

Die Untersuchung von Quellen als Lebensräume war lange kein bedeutendes Thema in der Forschung (Cantonati et al., 2012). In der Region vom Glattalpsee wurden zwar seit 1945 Quellen untersucht, jedoch hauptsächlich deren abiotischen Parameter und Ziel der

Untersuchungen war primär die Trinkwasserversorgung (Bögli, 1958; Winterhalter, 1948). Diese Untersuchungen gingen der ersten Teilabdichtung der bereits bekannten Versickerungstrichter des Glattalpsees im Jahr 1960 voraus (AquaPlus, 2021a). Unter anderem untersuchte Winterhalter (1948) mit Färbversuchen, ob und in welchem Ausmass das Wasser von den zwei bekannten Versickerungsstellen im Glattalpsee für den Quellabfluss im Bisistal verantwortlich ist. Er konnte hydrologische Verbindungen zu diversen Quellgewässern nachweisen, kam aber zum Schluss, dass das Seewasser nur einen geringen Teil der Quellschüttung ausmacht. Bögli (1958) führte zehn Jahre später Färbversuche durch und konnte bei weiteren Quellen eine hydrologische Verbindung zu den zwei bekannten Versickerungsstellen im Glattalpsee nachweisen, ähnlich wie bei Winterhalter war das Fazit dieser Untersuchung, dass nur ein kleiner Teil des Quellabflusses von den untersuchten Versickerungsstellen stammt.

Trotz der Teilabdichtung im Jahr 1960 treten heute je nach Wasserstand Sickerverluste von bis zu 700 l/s auf (B+S AG, 2021). Weshalb weitere Untersuchungen im Gebiet durchgeführt wurden, alle mit dem Ziel ein besseres Systemverständnis zu erhalten (Bögli, 1960, 1976; Loiseleur, 1978; Loiseleur et al., 1985). Neuere Untersuchungen von AquaPlus (2021b) zeigten ein ähnliches Bild, es konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass die Karstquellen in der nach Westen gerichteten Flanke des hinteren Bisistals (Taaschibach, Egelibach, Feldmoosbach, Höchweidbach und Schwarzenbach) wie auch in der Talsohle (Schwäntibrunnen und Hinter Seeberg) Wasser aus dem Glattalpsee führen. Eine Quellspeisung allein aus dem See ist hydrogeologisch betrachtet aber sehr unwahrscheinlich, denn einerseits konnte gezeigt werden, dass die Quellen stark witterungsabhängig sind und andererseits ist bei vielen Quellen nachgewiesen, dass sie noch von weiteren teilweise bekannten, teilweise unbekanntem Karstgängen gespeist werden (AquaPlus, 2021b). Mit diesen Untersuchungen sowie den Messdaten von sieben Gewässern im Untersuchungsgebiet als Grundlage werden mit vorliegender Bachelorarbeit folgende Hypothesen überprüft:

- 1) Die mit dem Glattalpsee hydrologisch verbundenen Quellen reagieren unterschiedlich hinsichtlich Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit auf ein Niederschlagsereignis im Vergleich zu Oberflächengewässern und Quellgewässern ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee.
- 2) Die mit dem Glattalpsee hydrologisch verbundenen Quellen reagieren mit einer unterschiedlichen zeitlichen Verzögerung auf ein Niederschlagsereignis als die Oberflächengewässer und Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee.

Um ein besseres Systemverständnis der hydrologischen Verbindungen vom Glattalpsee mit den untersuchten Quellgewässern zu erhalten, werden im Rahmen dieser Bachelorarbeit die

von der ebs Energie AG zur Verfügung gestellten Messdaten von 2012 bis 2020 der beiden Oberflächengewässer Steinibach und Hinterer Läckibach sowie der fünf Quellgewässer Schmallaubach, Taaschibach, Feldmoosbach, Höchstweidbach und Hinter Seeberg ausgewertet und miteinander verglichen.

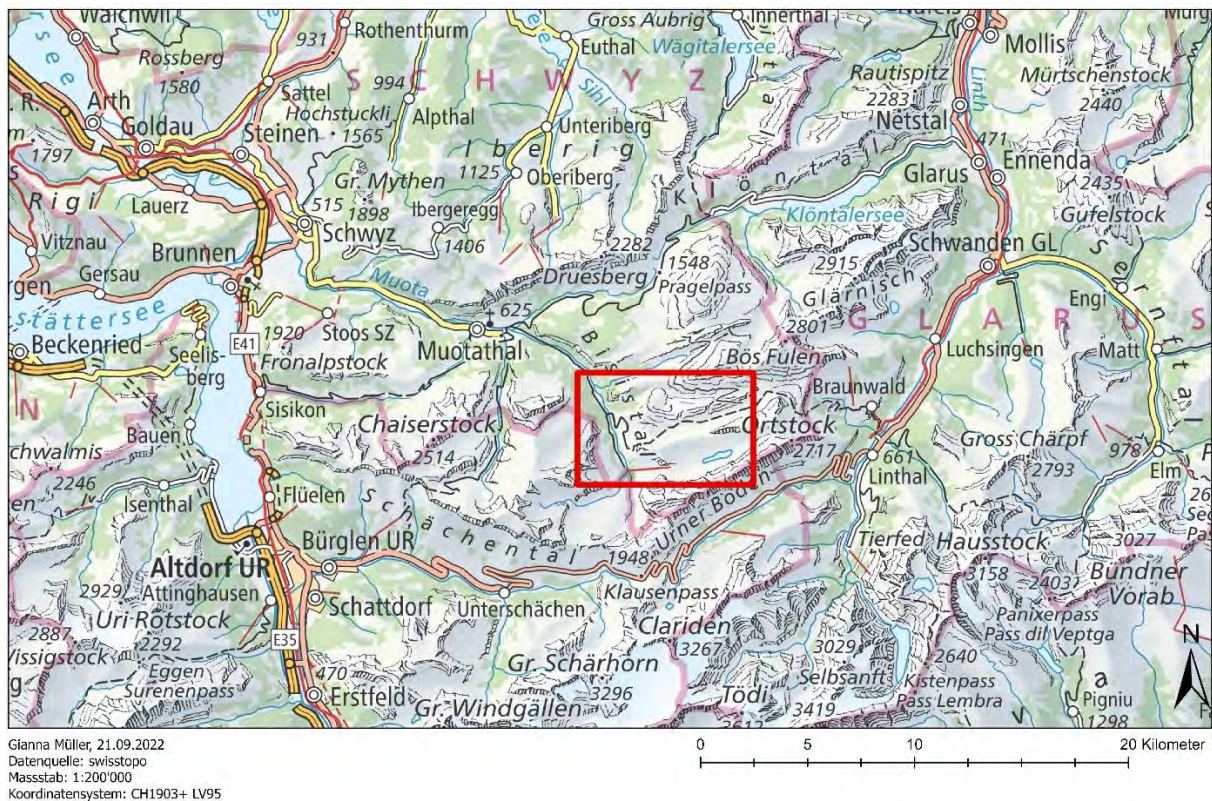
## 2 Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

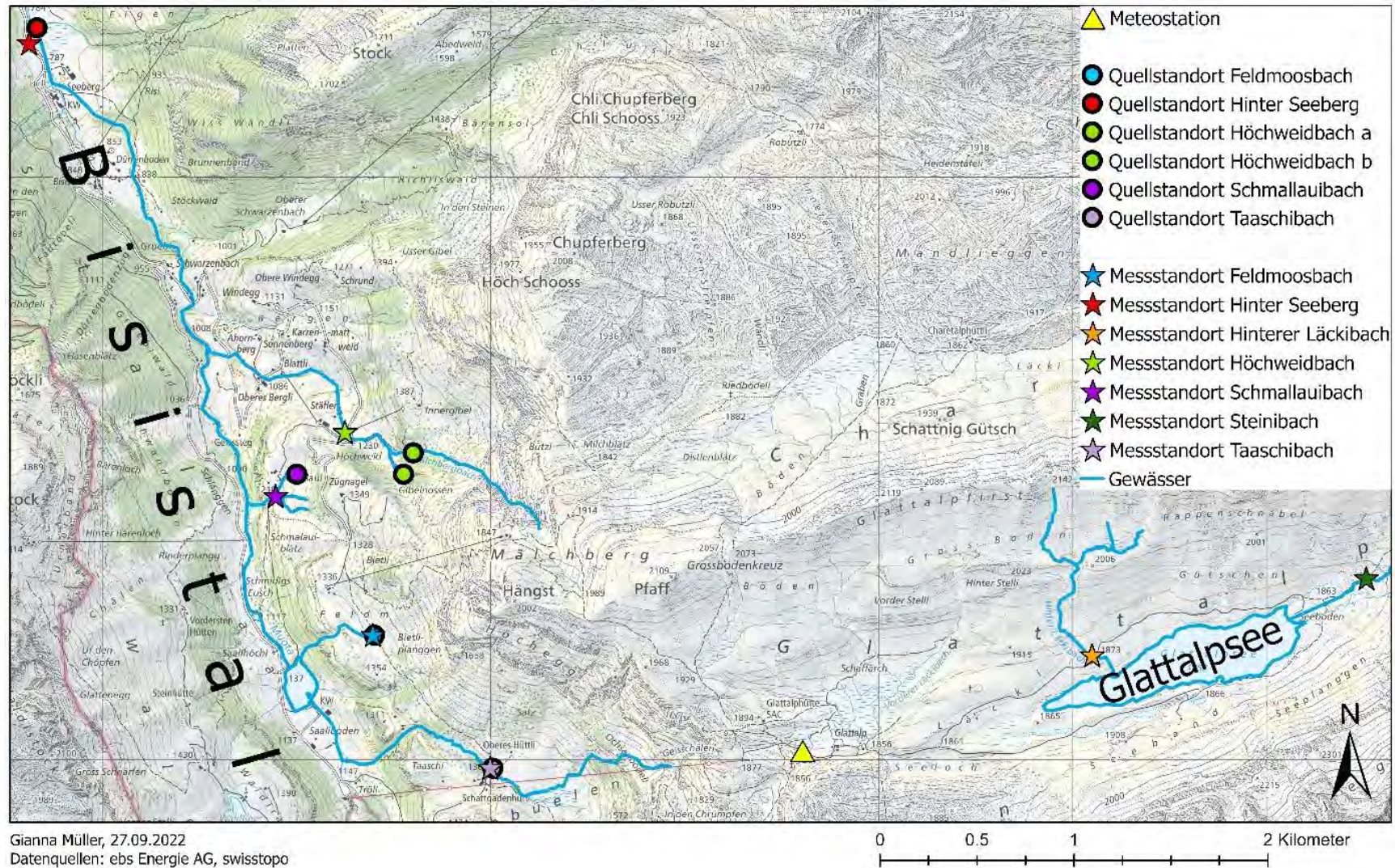
Der Glattalpsee befindet sich im Kanton Schwyz südöstlich vom Bisistal in der Gemeinde Muotathal (Abb. 1). Der Glattalpsee mit einem natürlichen Speichervolumen von gut 7 Mio. m<sup>3</sup> liegt in einem Karstgebiet in einer natürlichen Wanne (Bögli, 1976). Aufgrund der geomorphologischen Gegebenheiten treten je nach Wasserstand Sickerverluste von bis zu 700 l/s auf (B+S AG, 2021). Deswegen fällt der Glattalpsee im Winter auch natürlicher Weise häufig trocken und wird erst mit der Schneeschmelze im Frühling wieder aufgefüllt (B+S AG, 2021). Die Karstquellen in der nach Westen ausgerichteten Flanke des hinteren Bisistals und die der Talsohle führen teilweise Wasser aus dem Glattalpsee oder aus dem umliegenden Gebiet (AquaPlus, 2021b). Durch die Firma AquaPlus wurden die verschiedenen Quellen in mehrere Gruppen eingeteilt und je eines oder zwei repräsentative Quellgewässer ausgewählt. Eingeteilt wurden die verschiedenen Quellen anhand hydrologischer Ähnlichkeiten, welche durch Färbversuche, Messwerte von früheren Untersuchungen sowie Feldbegehungen festgestellt wurden, (AquaPlus, 2021b).

Fünf dieser repräsentativen Karstquellen im Bisistal sowie zwei Oberflächengewässer auf der Glattalp waren Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit (Abb. 2). Bei den Quellgewässern Taaschibach, Feldmoosbach, Höchweidbach sowie Hinter Seeberg wurde mit verschiedenen Untersuchungen und Feldbegehungen eine hydrologische Verbindung zum Glattalpsee festgestellt (Winterhalter, 1948; Bögli, 1958, 1960; AquaPlus, 2013, 2021b). Neben den nachweislich mit dem See verbundenen Quellen wurde das Quellgewässer Schmallaubach in den Untersuchungsperimeter aufgenommen. Bei dieser Quelle konnte bisher keine hydrologische Verbindung zum Glattalpsee nachgewiesen werden (AquaPlus, 2021b) und diente entsprechend als Vergleichsgewässer. Weitere Gewässer im Untersuchungsperimeter der vorliegenden Arbeit waren die beiden durch Niederschlag gespiesenen Bäche, Steinibach und Hinterer Läckibach, die in den Glattalpsee münden. Die Daten der beiden Oberflächengewässer wurden ausgewertet, um möglicherweise den direkten Einfluss von Niederschlagsereignissen auf die Gewässer zu sehen, im Gegensatz zu der erwarteten langsameren und gedämpften Reaktion der Quellgewässer. Im Folgenden wurden für diese Arbeit zwei Gruppen von Gewässern definiert: «Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (kurz: Gewässer mit Verbindung)» sowie «Gewässer ohne nachgewiesene oder vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (kurz: Gewässer ohne Verbindung)». Zur zweiten Gruppe wurden die Oberflächengewässer Steinibach und Hinterer Läckibach hinzugezählt, obwohl diese in den Glattalpsee münden und somit eigentlich hydrologisch verbunden sind. Es besteht jedoch keine Abhängigkeit vom Glattalpseewasser, da diese beiden Bäche oberhalb des Sees liegen und in den See münden.

Bei den fünf erwähnten Quellgewässern und den zwei Oberflächengewässern wurden durch die ebs Energie AG automatische Messstationen eingerichtet, die die Parameter Wasserpegel (Druck) [mmWS (Wasserstand in mm)], Wassertemperatur [°C] und Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] alle 30 min gemessen haben (AquaPlus, 2021b). Diese Messungen werden aktuell weitergeführt. Je nach Literatur und Karte werden die unterschiedlich benannt. Für diese Arbeit wurde dieselbe Benennung wie von AquaPlus (2021a, 2021b) verwendet.

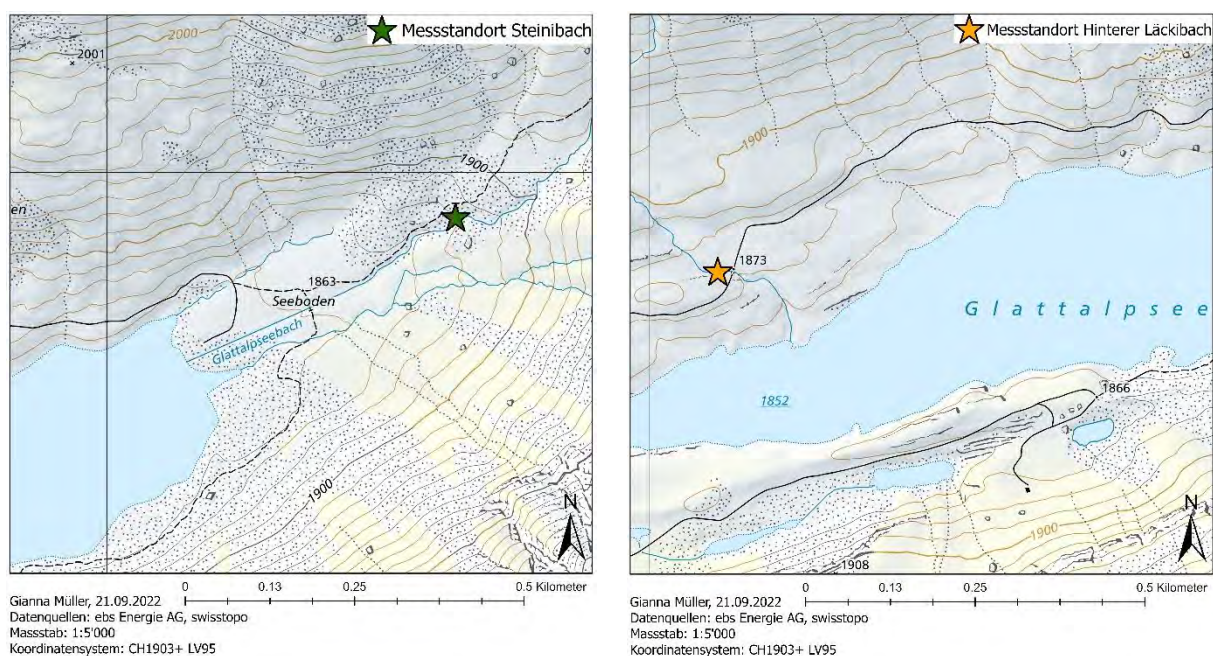


**Abbildung 1:** Gesamtübersichtskarte des Untersuchungsgebiets (roter Rahmen entspricht dem Kartenausschnitt von Abb. 2).

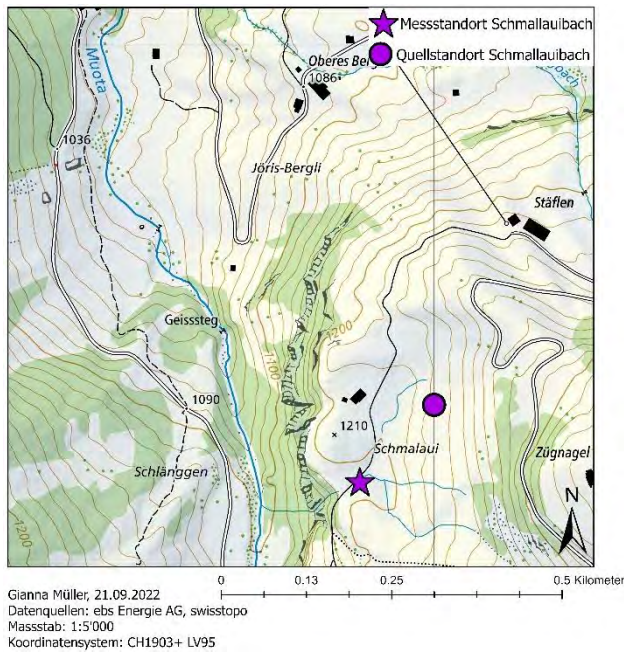


**Abbildung 2:** Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets. Standorte der Meteostation und der Quellen sowie deren Messstandorte im Untersuchungsgebiet. Farbcodierung gemäss Legende.

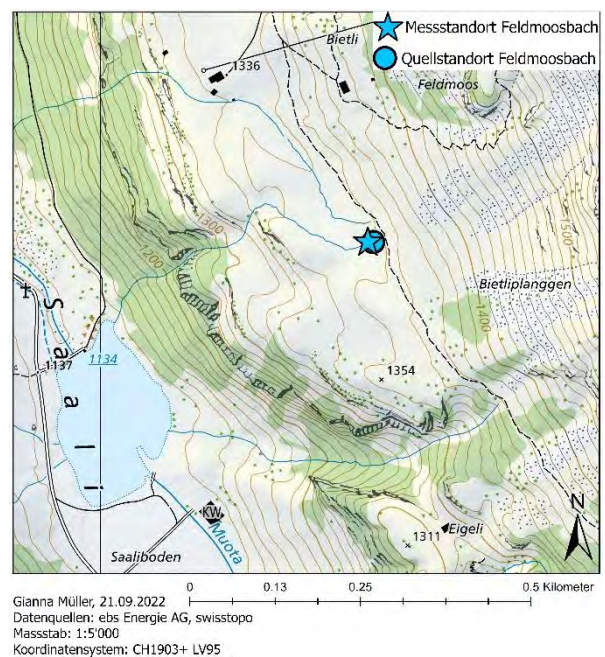
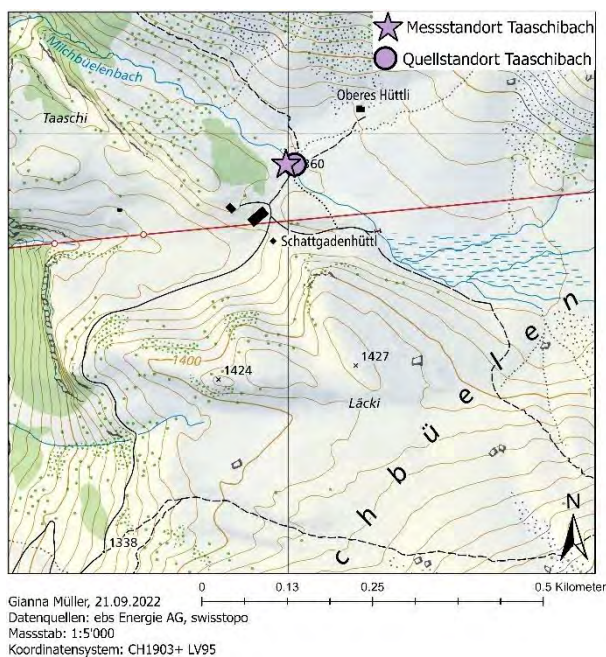
Die Messstandorte vom Steinibach und Hinterer Läckibach liegen beide rund 20 Höhenmeter über dem Glattalpsee (Abb. 3). Bei den Quellgewässern befinden sich die Messstandorte in unterschiedlicher Entfernung zu den effektiven Quellaustritten (Abb. 2, Tab. 1). Der Messstandort des Schmallaubachs ist gut 100 m in Fliessrichtung vom Quellstandort entfernt (Abb. 4). Die Quellen vom Taaschibach und vom Feldmoosbach wurden durch AquaPlus in dieselbe Quellgruppe eingeteilt (AquaPlus, 2021b). Bei diesen beiden Gewässern liegt der Messstandort nur wenige Meter unterhalb des jeweiligen Quellstandorts (Abb. 5). Der Höchstweidbach wird durch zwei repräsentative Quellen gespeisen, der dazugehörige Messstandort befindet sich unterhalb des Zusammenflusses der Bäche von Quellstandort a und b (Abb. 6). Beim Messstandort Höchstweidbach wurde durch die ebs Energie AG nur der Wasserpegel gemessen, die Parameter Leitfähigkeit und Wassertemperatur fehlten für die Auswertung (Tab. 1). Der Quellstandort Hinter Seeberg liegt als einziger in dieser Arbeit untersuchte Standort in der Talsohle, der dazugehörige Messstandort liegt knapp 100 m südwestlich des Quellaustritts (Abb. 7). Die Karstquelle Hinter Seeberg ist die grösste im Untersuchungsgebiet und wird sowohl von der linken als auch der rechten Talseite gespeisen (AquaPlus, 2021b). Bei Hinter Seeberg fehlte eine Pegel-Abfluss-Beziehung, deshalb lagen für die Auswertung dieser Quelle Pegel- statt Abflussdaten vor. Für die übrigen Gewässer wurden in früheren Untersuchungen Pegel-Abfluss-Beziehungen verwendet (AquaPlus, 2021b), diese wurden für diese Arbeit übernommen und die entsprechenden Abflusswerte [l/s] ausgewertet.



**Abbildung 3:** Übersichtskarte der Messstandorte der beiden oberhalb des Glattalpsee liegenden Bächen Steinibach (links) und Hinterer Läckibach (rechts).

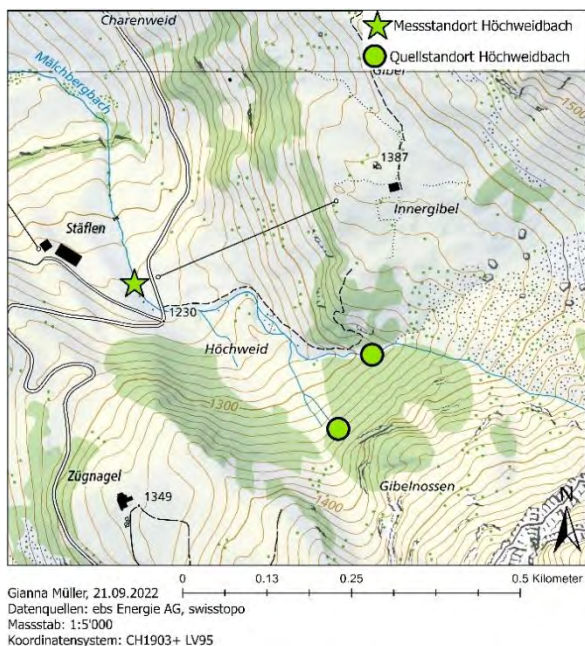


**Abbildung 4:** Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Schmallauibach, ein Quellgewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).

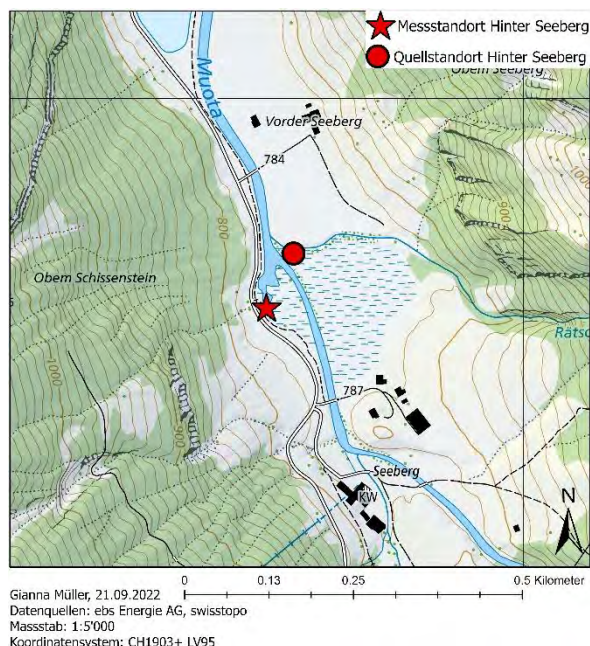


**Abbildung 5:** Übersichtskarte der Quell- und Messstandorte Taaschibach (links) und Feldmoosbach (rechts), Quellgewässer derselben Quellgruppe mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).





**Abbildung 6:** Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Höchweidbach, ein Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).



**Abbildung 7:** Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Hinter Seeberg, ein Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).

**Tabelle 1:** Quell- und Messstandorte mit Informationen zu Messdauer, gemessenen Parameter (Q: Abfluss, T: Wassertemperatur,  $\sigma$ : Leitfähigkeit), vermutete Verbindung zum Glattalpsee, Koordinaten und Meereshöhe (Daten von ebs Energie AG).

Bezeichnung	Messdauer	Gemessene Parameter	Verbindung Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b)	Koordinaten Quellstandort	Meereshöhe Quellstandort [m ü. M.]	Koordinaten Messstandort	Meereshöhe Messstandort [m ü. M.]	Mess-Methode (AquaPlus, 2021a)
Steinibach	2011-2022	Q, T, $\sigma$	Nein			2°712'514.5, 1°197'934.0	1'879	Drucksonde
Hinterer Läckibach	2012-2022	Q, T, $\sigma$	Nein			2°711'100.9, 1°197'537.3	1'872	Drucksonde/ Messüberfall
Schmallauibach	2011-2022	Q, T, $\sigma$	Nein	2°707'000.0, 1°198'470.1	1'223	2°706'891.3, 1°198'356.8	1'195	Drucksonde
Taaschibach	2012-2020	Q, T, $\sigma$	Ja	2°708'010.0, 1°196'955.2	1'359	2°707'997.3, 1°196'956.7	1'358	Drucksonde/ Messüberfall
Feldmoosbach	2011-2022	Q, T, $\sigma$	Ja	2°707'400.0, 1°197'640.2	1'347	2°707'392.4, 1°197'641.5	1'346	Drucksonde/ Messüberfall
Höchweidbach (Quelle a)	2010-2022	Q	Ja	2°707'600.0, 1°198'580.0	1'308	2°707'248.5, 1°198'686.7	1'220	Radar
(Quelle b)				2°707'550.0, 1°198'470.0				
Hinter Seeberg	2014-2022	Pegel, T, $\sigma$	Ja	2°705'660.0, 1°200'770.2	783	2°705'620.1, 1°200'690.4	783	Drucksonde

Neben den Daten der sieben Gewässer wurden Daten von der Meteostation Glattalp (Abb. 2) sowie Daten zum Seestand des Glattalpsees für diese Arbeit verwendet. Die manuelle Schnee- und Niederschlagsmessstation von MeteoSchweiz befindet sich westlich des Glattalpsees auf einer Höhe von 1858 m ü. M (MeteoSchweiz, 2018). Ausserdem wurden die von der ebs Energie AG am gleichen Standort gemessenen Lufttemperaturwerte für die Auswertung verwendet. Ebenfalls von der ebs Energie AG wurde die Seestandsmessung des Glattalpsees durchgeführt. Bei den Daten von 2012 bis 2019 handelte es sich um den Tagesmittelwert aus zwei unabhängigen Messsystemen (B+S AG, 2021). Einerseits hat die Messanlage der Firma Rittmeyer die Seehöhe in einer Auflösung von 5 cm gemessen. Diese Anlage wurde regelmässig kontrolliert und mittels einer Schwimmer-Messbandeinrichtung geeicht (B+S AG, 2021). Andererseits war eine Messsonde der Firma VEGA in Betrieb, welche den Seestand mit einer Auflösung von 1 cm gemessen hat. Ende 2019 wurde die Messsonde der Firma VEGA durch einen Laser ersetzt und ab 2020 wurde der Tagesmittelwert der Daten von der Messanlage Rittmeyer zusammen mit den Daten vom Laser für die Analyse verwendet. Die Werte wurden in m ü. M. angegeben (B+S AG, 2021). Alle untersuchten Daten (Gewässer, Glattalpsee, Meteo) stammten aus den Jahren 2012 bis 2020. Ausser vom Quellstandort Hinter Seeberg lagen die Daten erst ab 2014 für die Auswertung vor, da der Messstandort Hinter Seeberg erst im Jahr 2014 durch die ebs Energie AG eingerichtet wurde.

## 2.2 Datenaufbereitung und -analyse

Die halbstündlichen Messwerte von den Jahren 2012 bis 2020 wurden in Tagesmittelwerte (Seestand, Abfluss, Pegel, Temperatur und Leitfähigkeit) oder in Tagessumme (Niederschlag) zusammengefasst. Messfehler wurden nach folgenden, für diese Arbeit definierten, Regeln bereinigt:

- 1) Negative Leitfähigkeitswerte wurden zu 0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  geändert
- 2) Seestand: Ausreisser einzelner Tage ( $> 5$  m Unterschied zum Vortag und Folgetag) wurden zum Mittelwert des Vortages und Folgetages geändert
- 3) Wenn Wassertemperatur  $< 0$  °C, dann wurde der Abfluss zu 0 l/s geändert

Für die Datenaufbereitung und erste Analysen wurde Excel (Version 2202) verwendet. Zur statistischen Analyse wurde R (Version 4.2.1) in Kombination mit RStudio (Version 2022.07.0) verwendet. Das Signifikanzniveau aller statistischen Tests wurde auf  $\alpha = 5\%$  festgelegt. Für die PCA wurden die Packages «dplyr» und «lubridate» in RStudio verwendet und die Resultate der PCA wurden mit «ggbiplot» visualisiert. Alle anderen Ergebnisse wurden in RStudio mit Hilfe des Packages «plotly» visualisiert.

### 2.2.1 Gegenüberstellung Abflussverhalten

Für die Gegenüberstellung des Abflussverhaltens der einzelnen Gewässer wurden die Daten vom Steinibach, Hinterer Läckibach, Schmallauibach, Taaschibach, Feldmoosbach und Höchstweidbach von den Jahren 2012 bis 2020 verwendet. Für diese Gewässer waren Abflusswerte vorhanden, welche auf Pegel-Abflussbeziehungen aus früheren Untersuchungen (AquaPlus, 2021b) beruhen. Von den Abflusswerten wurden nur die Werte, die kleiner als das 95%-Perzentil waren, verwendet, um die Extremwerte bei der Analyse nicht zu berücksichtigen. Dafür wurde pro Gewässer über die Zeitperiode von 2012 bis 2020 das 95%-Perzentil berechnet und die darüber liegenden Werte für diese Analyse ausgeschlossen. Weiter wurden die Abflusswerte dieser sechs Gewässer mit dem Langzeit-Mittelwert (9 Jahre) des jeweiligen Gewässers normiert, womit eine Vergleichbarkeit der Abflusswerte der verschiedenen Gewässer möglich war. Die Normierung mit dem Langzeit-Mittelwert sowie das Ausschliessen der höchsten 5% wurde nur für diese Auswertung (Gegenüberstellung der Abflusswerte der verschiedenen Gewässer) sowie für eine der durchgeführten PCAs gemacht, da es sich nur bei diesen Auswertungen um direkte Vergleiche der verschiedenen Gewässer handelte.

Es wurden zum einen die beiden Oberflächengewässer Steinibach und Hinterer Läckibach, welche in den Glattalpsee münden, zusammen mit dem Quellgewässer Schmallauibach, bei dem keine hydrologische Verbindung zum See vermutet wurde, (z.B. AquaPlus, 2021b) dargestellt. Dafür wurden jeweils die Abflusswerte eines dieser drei Gewässer auf der x-Achse dargestellt und die anderen zwei auf der y-Achse. Das Ziel war herauszufinden, ob die Abflusswerte der Gewässer ohne vermutete Verbindung zum See sichtbare Ähnlichkeiten aufwiesen.

Zum anderen wurden die Abflusswerte der drei Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung (z.B. AquaPlus, 2021b) einander gegenübergestellt, dafür wurde jeweils ein Gewässer auf der x-Achse und die anderen beiden auf der y-Achse dargestellt, um zu überprüfen, ob die mit dem Glattalpsee verbundenen Quellgewässer ein ähnliches Abflussmuster aufwiesen.

Weiter wurde ein Quervergleich der Gewässer ohne Verbindung mit den Gewässern mit nachgewiesener Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) durchgeführt. Dafür wurden einerseits auf der x-Achse jeweils die Abflusswerte vom Taaschibach, Feldmoosbach oder Höchstweidbach dargestellt und auf der y-Achse alle Abflusswerte des Steinibachs, Hinterer Läckibachs und Schmallauibachs. Andererseits wurde die Gegenüberstellung umgekehrt durchgeführt. Dafür wurden die Abflusswerte der Gewässer mit Verbindung zum See auf der y-Achse dargestellt und jeweils ein Gewässer ohne vermutete Verbindung auf der x-Achse. Mit dieser Gegenüberstellung wurde abgeklärt, ob die Abflusswerte der Gewässer ohne

Verbindung mit denen der Gewässer mit Verbindung übereinstimmten (oder zumindest ähnlich waren) oder ob deutliche Unterschiede sichtbar waren.

Das übergeordnete Ziel dieser Auswertungen war es, einen ersten Überblick über das Abflussverhalten der untersuchten Gewässer zu erhalten und ob aufgrund dessen eine Gruppierung «Gewässer mit Verbindung zum See» resp. «Gewässer ohne Verbindung zum See» möglich ist.

### **2.2.2 Hauptkomponentenanalyse**

Für die Auswertung mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurden die Daten von 2012 bis 2020 von den Gewässern Steinibach, Hinterer Läckibach, Schmallauibach, Taaschibach und Feldmoosbach verwendet, da von diesen Gewässern Abfluss-, Temperatur- und Leitfähigkeitswerte vorhanden waren. In einem ersten Schritt wurden diese Tagesmittelwerte pro Gewässer mit dem Langzeit-Mittelwert (9 Jahre) normiert. Zur Identifizierung der Wirkfaktoren an den Gewässern wurde mit den normierten Daten eine PCA durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde eine weitere PCA mit den tatsächlichen Tagesmittelwerten (ohne Normierung) durchgeführt. Dieses Resultat sollte als Vergleich zum vorherigen dienen. Ziel der beiden durchgeführten Hauptkomponentenanalysen war, allgemeine Trends zu beschreiben und herauszufinden, welche Parameter wie stark ins Gewicht fallen sowie festzustellen, ob es Gewässer gibt, die ähnlich sind und entsprechend Gruppen gebildet werden könnten. Mittels PCA konnten die Gewässer in Abhängigkeit der drei untersuchten Variablen in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt werden, da die Variablen zu neuen Hauptkomponenten (PC) zusammengefasst wurden und von den drei resultierenden Hauptkomponenten nur die zwei mit der höchsten Aussagekraft dargestellt wurden.

### **2.2.3 Abhängigkeit der Abflusswerte vom Niederschlag**

Für die lineare Regression wurden Daten im Zeitraum von Juli bis Oktober in den Jahren 2012 bis 2020 verwendet, um Schnee und Schneeschmelze möglichst auszuschliessen. Es wurden die Tagesmittelwerte des Abflusses vom Steinibach, Hinterer Läckibach, Schmallauibach, Taaschibach, Feldmoosbach und Höchweidbach sowie des Pegels von Hinter Seeberg verwendet. Die Abflusswerte resp. Pegelwerte stellten bei der statistischen Analyse die abhängige Variable dar, die unabhängige Variable war die Tagessumme des Niederschlags. Die Niederschlagswerte waren für jede Auswertung dieselben, da es nur eine Messstation im Untersuchungsgebiet gab. Nebst der Trendgerade wurde der 95%-Konfidenzintervall dargestellt. Das Ziel dieser statistischen Analyse war es herauszufinden, wie stark der Abfluss resp. Pegel der untersuchten Gewässer vom Regen abhängig war.

### 2.2.4 Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag

Eine weitere qualitative Auswertung wurde mit den täglichen Mittelwerten der Abflussdaten vom Steinibach, Hinterer Läckibach, Schmallauibach, Taaschibach, Feldmoosbach und Höchweidbach sowie der Pegel­daten von Hinter Seeberg zusammen mit der Tagessumme vom Niederschlag und den Tagesmittelwerten vom Seestand durchgeführt. Hierfür wurden aufgrund der Datenlage die Werte der beiden Jahre 2017 und 2020 verwendet, da in diesen beiden Jahren bei keinem der Messstandorte eine Datenlücke bestand. Ausserdem war das Jahr 2017 mit einem Jahresniederschlag von 2520 mm niederschlagsreicher als der Langzeit-Mittelwert (9 Jahre) während der Untersuchungsperiode mit 2081 mm. Ebenfalls war der Mittelwert der täglichen Niederschlagssumme im Jahr 2017 und der Seestand zwei Meter höher als der Langzeit-Mittelwert (9 Jahre) (Tab. 2). Das Jahr 2020 war für das Untersuchungsgebiet ein eher durchschnittliches Jahr mit einem Jahresniederschlag von 2025 mm. Der mittlere Seestand und die mittlere Tagesniederschlagssumme wiesen 2020  ahnlliche Werte wie der Langzeit-Mittelwert (9 Jahre) auf, die mittlere Schneehöhe jedoch tiefere und die Lufttemperatur höhere (Tab. 2). Die Niederschlags- und Seestandswerte waren für alle Auswertungen dieselben. Für jedes der untersuchten Gewässer wurde auf der x-Achse das Datum dargestellt, auf den drei y-Achsen die Abfluss- resp. Pegelwerte, der Seestand und der Niederschlag. Neben der Analyse der in den Abbildungen dargestellten Werte, wurden die Daten zur Schneehöhe berücksichtigt, um festzustellen, ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fiel und die Auswirkungen der Schneeschmelze herauszulesen. Diese Auswertungen wurden gemacht, um zu sehen, ob und wie die Abflusswerte resp. Pegelwerte mit dem Niederschlag und Seestand zusammenhängen. Ausserdem wurde versucht festzustellen, ob es Unterschiede zwischen den Gewässern mit resp. ohne hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b) gibt oder ob Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Gewässern vorhanden sind. Beim Steinibach und Hinterer Läckibach wurde der Seestand nicht dargestellt, da die beiden Gewässer in den Glattalpsee münden und somit nicht vom Wasserstand des Sees abhängig sind.

**Tabelle 2:** Meteorologische Übersicht der Jahre 2017 und 2020 im Vergleich zum gesamten Untersuchungszeitraums (2012-2020) mit den Mittelwerten und Standardabweichung der Schneehöhe, Lufttemperatur, Niederschlag und Seestand.

	Mittelwert 2012-2020	Standardabweichung der Jahresmittelwerte 2012-2020	Mittelwert 2017	Mittelwert 2020
Niederschlag Tagessumme [mm]	5.70	0.61	6.90	5.53
Seestand [m �. M.]	1844.97	1.92	1846.99	1845.50
Lufttemperatur [�C]	0.97	0.66	0.68	1.45
Schneehöhe [cm]	101.96	29.00	88.12	74.97

### 2.2.5 Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse

Die zeitliche Komponente der für diese Arbeit aufgestellten Hypothesen wurden ausschliesslich qualitativ untersucht, es wurden keine statistischen Tests dazu durchgeführt. Im Untersuchungszeitraum von Juli bis Oktober in den Jahren 2012 bis 2020 wurden Niederschlagsereignisse ausgewählt, die folgende für diese Arbeit definierten Kriterien erfüllten:

- Mind. 3 Tage ohne Niederschlag vor dem Niederschlagsereignis
- 1-2 Tage mit Niederschlag (Niederschlagssumme  $\geq 5\text{mm}$ )
- Mind. 4 Tage ohne Niederschlag nach dem Niederschlagsereignis

Die fünf Ereignisse, die diese Kriterien erfüllten, wurden detailliert ausgewertet, um herauszufinden, wie die verschiedenen Gewässer auf ein einzelnes Niederschlagsereignis reagierten. Dafür wurden die Abfluss-, Wassertemperatur- und Leitfähigkeitswerte vom Steinibach, Hinterer Läckibach, Schmallauibach, Taaschibach, und Feldmoosbach verwendet. Vom Höchweidbach waren nur Abflussdaten vorhanden, folglich wurden nur diese ausgewertet. Bei Hinter Seeberg fehlte eine Pegel-Abfluss-Beziehung, daher wurden bei diesem Quellgewässer die Pegel-, Wassertemperatur- und Leitfähigkeitswerte für die Analyse verwendet. Folgende Kennwerte wurden den Daten für jedes Ereignis und für jedes Gewässer entnommen:

- Niederschlagssumme während 30 Tagen vor dem Ereignis
- Niederschlagssumme während den 1-2 Regentagen des Ereignisses
- Abflusspeak: Zeit in Tagen vom Start des Niederschlags bis zum Zeitpunkt des höchsten Abflusswerts (wenn es sich um ein Ereignis mit 2 Niederschlagstagen handelte und der Abflusspeak am 2. Niederschlagstag war, dann wurde der Wert von 0.5 Tage verwendet)
- Start Abflussanstieg: Zeit in Tagen vom Niederschlagsstart bis zum Zeitpunkt, wo ein Abflussanstieg sichtbar war
- Ende erhöhter Abfluss: Zeit in Tagen vom Niederschlagsende bis zum Zeitpunkt, an dem der Abflusswert kleiner als der Wert vom Vortag des Abflussanstiegsstarts war
- Intensität [-]: höchster Abflusswert infolge des Niederschlags (Peak) dividiert durch den Abflusswert vor dem Abflussanstieg
- Abflussvolumen [I]: (Abfluss \* Zeit), dafür wurden die Tagesmittelwerte des Abflusses ab Start des Anstieges bis der Abfluss wieder kleiner war als vor dem Anstieg jeweils pro Tag mal 86'400 s/d gerechnet und diese Werte addiert. Für Hinter Seeberg konnte kein Abflussvolumen berechnet werden, da nur die Pegelwerte [mmWS] für die Auswertung zur Verfügung standen. Das Abflussvolumen wurde in neun Klassen eingeteilt (Tab. 3), um die Leserlichkeit zu verbessern. Die Klassen wurden so erstellt, dass einerseits die verschiedenen Gewässer miteinander verglichen werden konnten.

Andererseits wurde bei der Klassierung auch sichergestellt, dass dasselbe Gewässer zumindest teilweise, je nach Ereignis, zu einer anderen Klasse gehörte damit die Reaktion eines einzelnen Gewässers auf die verschiedenen Niederschlagsereignisse miteinander verglichen werden konnte.

**Tabelle 3:** Klassen der Abflussvolumen [l] der sechs untersuchten Gewässer während den fünf ausgewählten Niederschlagsereignissen.

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Abfluss-	<	1'000'000	2'500'000	5'000'000	10'000'000	20'000'000	40'000'000	60'000'000	>
volumen	1'000'000	-	-	-	-	-	-	-	100'000'000
[l]		2'500'000	5'000'000	10'000'000	20'000'000	40'000'000	60'000'000	100'000'000	

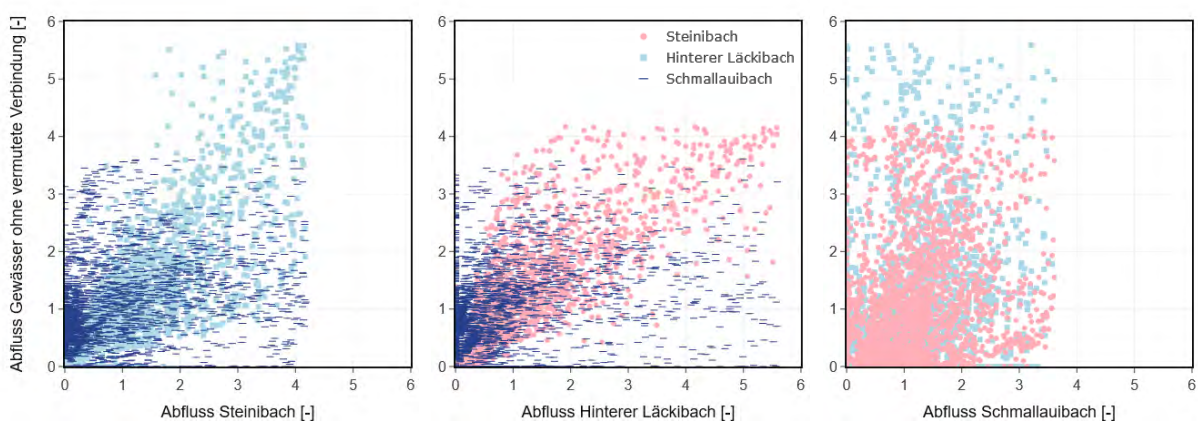
Die Kennwerte für jedes Gewässer wurden einerseits pro Ereignis und andererseits pro Gewässer (Anhang A) in einer Tabelle dargestellt. Bei den Kennwerten, bei denen ein Vergleich zum Vortag resp. Folgetag gemacht wurde, wurde für diese Arbeit festgelegt, dass sich die Werte um mind. 0.1 zum Vortag resp. Folgetag ändern mussten, um berücksichtigt zu werden. Die verschiedenen untersuchten Kennwerte dienten im Allgemeinen dazu, die beiden Hypothesen zu überprüfen. Dabei wurde die Niederschlagssumme der letzten 30 Tagen verwendet, um herauszufinden, ob es einen Einfluss auf die Reaktion der Gewässer hatte, wenn ein Niederschlagsereignis in einer regenreichen oder regenarmen Zeit untersucht wurde. Weiter diente die Niederschlagssumme während dem Ereignis selbst, der Detektion von unterschiedlichem Verhalten je nach Niederschlagsintensität. Um die Reaktion der Gewässer beschreiben zu können, wurden die verschiedenen Reaktionszeiten (Peak, Start und Ende) untersucht. Weiter wurde das Abflussvolumen und die Intensität untersucht, um neben der Reaktionszeit auch die Stärke der Reaktion quantifizieren zu können.

Von den untersuchten Gewässern wurde für jedes Ereignis Plots erstellt, in denen Abfluss-, Leitfähigkeits- und Wassertemperaturwerte während den untersuchten Tagen dargestellt wurden. Diese deskriptiven Auswertungen dienten der Überprüfung der ersten Hypothese, ob die Gewässer hinsichtlich Abfluss, Leitfähigkeit und Wassertemperatur unterschiedlich auf ein Niederschlagsereignis reagierten. Die gemessenen Parameter wurden für die Ereignisse 1 bis 3 in der Arbeit dargestellt und interpretiert. Bei den Ereignissen 4 und 5 wurde auf eine detaillierte Interpretation der Leitfähigkeits- und Wassertemperaturwerte der untersuchten Gewässer verzichtet, da keine zusätzlichen Schlüsse zur Reaktion der einzelnen Gewässer gezogen werden konnten. Die erstellten Abbildungen zu den Ereignissen 4 und 5, ebenso wie die des Höchweidbachs befinden sich im Anhang (Anhang B). Beim Höchweidbach wurden die Parameter Leitfähigkeit und Temperatur während der Untersuchungsperiode nicht gemessen, deshalb wurde auf die grafische Darstellung der Reaktion (nur Abflusswerte) dieses Gewässers verzichtet, da das Abflussverhalten bereits in tabellarischer Form dargestellt wurde.

### 3 Resultate

#### 3.1 Gegenüberstellung Abflussverhalten

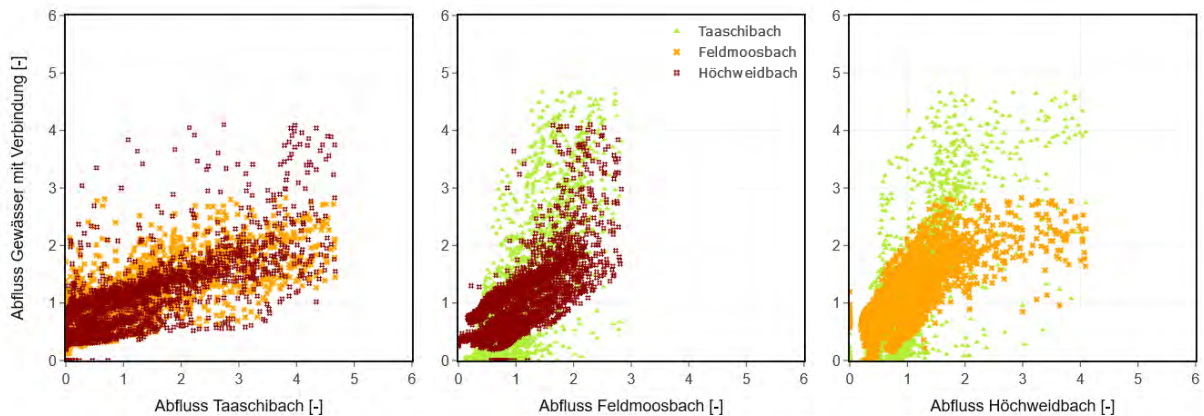
Die Abflusswerte der beiden Oberflächengewässer Steinibach und Hinterer Läckibach wiesen im Untersuchungszeitraum von 2012 bis 2020 starke Ähnlichkeiten auf (Abb. 8, links und Mitte). Der Schmallaubach als Quellgewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b) hatte nur geringe Ähnlichkeiten zu den Oberflächengewässern. Der Vergleich der normierten Abflusswerte zwischen Schmallaubach und den Oberflächengewässern zeigte ein diffuses Bild (Abb. 8).



**Abbildung 8:** Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b), dargestellt auf der x-Achse jeweils ein Gewässer, auf der y-Achse die anderen beiden Gewässer der Gruppe «ohne Verbindung».

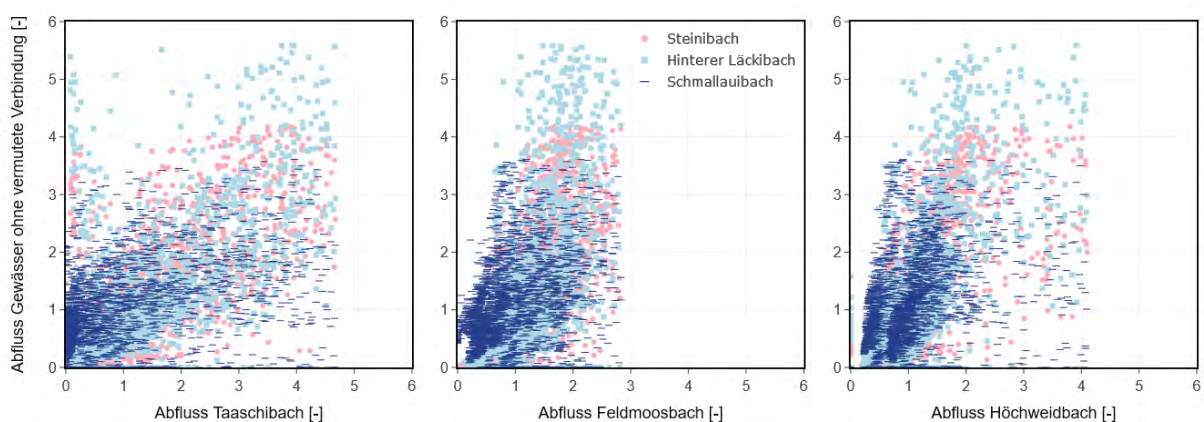
Der Vergleich der drei untersuchten Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b) (Abb. 9) zeigte ein ähnliches Muster der normierten Abflusswerte vom Feldmoosbach und Hächweidbach, der Hächweidbach hatte jedoch mehr einzelne hohe Abflusswerte. Der Feldmoosbach hatte bis zu einem Wert von 1.5 eher höhere normierte Abflusswerte als der Hächweidbach aber der Wertebereich des Feldmoosbachs reichte nur bis zu einem Wert von 3 und ist somit deutlich kleiner als die anderen untersuchten Gewässer. Auffällig war das Muster vom Hächweidbach im Vergleich zum Feldmoosbach (Abb. 9, Mitte) und umgekehrt (Abb. 9, rechts). Bei höheren Abflüssen, ungefähr ab einem Wert von 2, veränderte sich das Muster in beiden Fällen stark. Die Werte des Hächweidbachs stellten sich auf, die des Feldmoosbachs flachten ab. Das Abflussmuster des Taaschibachs passte besser zu dem des Feldmoosbachs als zu dem des Hächweidbachs (Abb. 9). Bei der Gegenüberstellung des Taaschibachs mit dem Feldmoosbach gab es weniger Ausreisser und die Werte lagen eher auf einer Geraden als im Vergleich mit dem Hächweidbach. Der Feldmoosbach hatte aber im Vergleich zum Taaschibach vor allem ab einem normierten Abflusswert von 1.5 deutlich tiefere Werte.





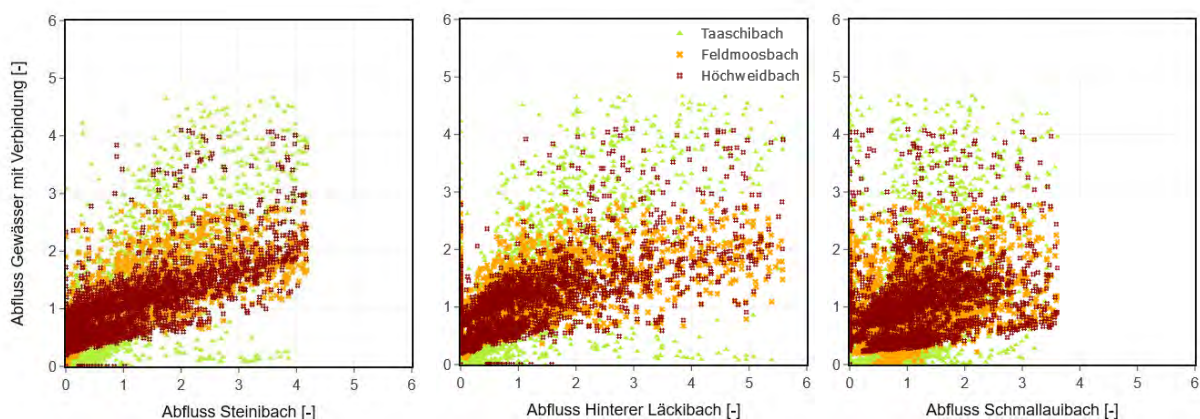
**Abbildung 9:** Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpine (z.B. AquaPlus, 2021b), dargestellt auf der x-Achse jeweils ein Gewässer, auf der y-Achse die anderen beiden Gewässer der Gruppe «mit Verbindung».

Beim Vergleich vom Steinibach, Hinterer Läckibach und Schmallauibach mit den Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpine (z.B. AquaPlus, 2021b) (Abb. 10), wurde ersichtlich, dass sich die normierten Abflusswerte mehrheitlich deutlich voneinander unterscheiden. Am wenigsten Streuung wiesen sie im Vergleich mit dem Feldmoosbach auf. Der Vergleich vom Schmallauibach und Höchweidbach zeigte, dass ein beachtlicher Teil der normierten Abflusswerte ein ähnliches Muster aufwies, es waren dennoch Ausreisser zu sehen. Ebenso wie bei der ersten Gegenüberstellung (Abb. 8) war in der Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten der Gewässer ohne vermutete Verbindung mit jeweils einem Gewässer mit Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) (Abb. 10) ersichtlich, dass sich der Steinibach und Hinterer Läckibach ähnlich verhielten, der Wertebereich des Steinibachs war jedoch höher als der des Hinterer Läckibachs.



**Abbildung 10:** Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung (y-Achse) und jeweils einem Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpine (x-Achse; z.B. AquaPlus, 2021b).

Der Vergleich der normierten Abflusswerte der Gewässer mit nachgewiesener Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b) mit den übrigen untersuchten Gewässern (Abb. 11) zeigte eine grössere Streuung als bei der alleinigen Gegenüberstellung der Gewässer mit Verbindung (Abb. 9). Dennoch war ersichtlich, dass das Abflussmuster des Feldmoosbachs und Höchstweidbachs viele Ähnlichkeiten aufwies (Abb. 11). Auffällig war ausserdem, dass der Taaschibach teilweise sehr tiefe genormte Abflusswerte hatte, während der Feldmoosbach und der Höchstweidbach deutlich höhere Werte aufwies.

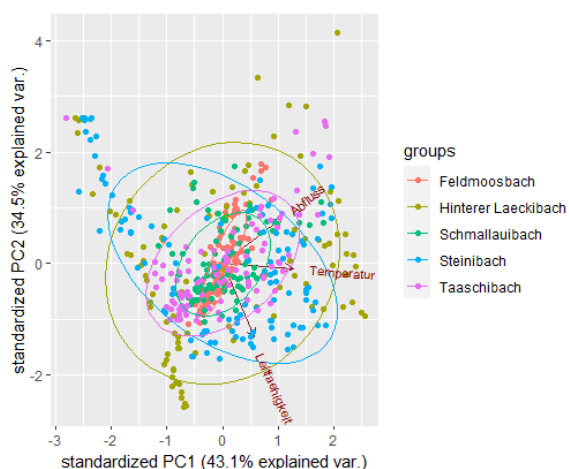


**Abbildung 11:** Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (y-Achse; z.B. AquaPlus, 2021b) und jeweils einem Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung (x-Achse).

Die Gegenüberstellungen der normierten Abflusswerte von 2012 bis 2020 zeigten am deutlichsten die Ähnlichkeiten zwischen Steinibach und Hinterer Läckibach, sowie zwischen Feldmoosbach und Höchstweidbach. Die normierten Abflusswerte des Taaschibachs passten trotz Unterschieden zu den beiden anderen Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b), dem Feldmoosbach und Höchstweidbach. Das Abflussmuster des Schmallaubachs, als Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum See passte weder zu den Oberflächengewässern noch zu den Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee.

### 3.2 Hauptkomponentenanalyse

Die zwei ersten Hauptkomponenten (PC1 und PC2) der Hauptkomponentenanalyse mit den Monatsmittelwerten der normierten Tagesmittelwerten von Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit erklärten zusammen 77.6% der Varianz (Abb. 12). Die dritte, nicht dargestellte, Hauptkomponente erklärte die übrigen 22.4% der Varianz. Die PC1 korrelierte stark positiv mit der Wassertemperatur der untersuchten Gewässer (Tab. 4). Die Leitfähigkeit korrelierte stark negativ mit der PC2. Der Abfluss liess sich nicht eindeutig einer PC zuordnen, die Faktorladungen für die drei Hauptkomponenten waren alle ähnlich gross. Die untersuchten Gewässer konnten aufgrund ihrer Unterschiede nur bedingt gruppiert werden, die Ellipsen der Gruppen überschnitten sich sehr stark. Der Steinibach und der Hinterer Läckibach, die beide in den Glattalpsee münden, wiesen die grösste Streuung der Werte auf. Die untersuchten Quellgewässer zeigten kleinere Ellipsen. Die Werte des Feldmoosbachs streuten bei der ersten (Abb. 12) ebenso wie bei der zweiten durchgeführten PCA (Abb. 13) am wenigsten. Die Werte des Hinterer Läckibachs, des Taaschibachs und des Schmallauibachs streuten alle am stärksten in die Richtung des Abflussvektors, die des Feldmoosbachs ebenfalls, jedoch waren diese etwas vertikaler verteilt. Die Werte des Steinibachs streuten im Vergleich zu den übrigen Untersuchungsgewässern eher in Richtung der Leitfähigkeit und Temperatur.



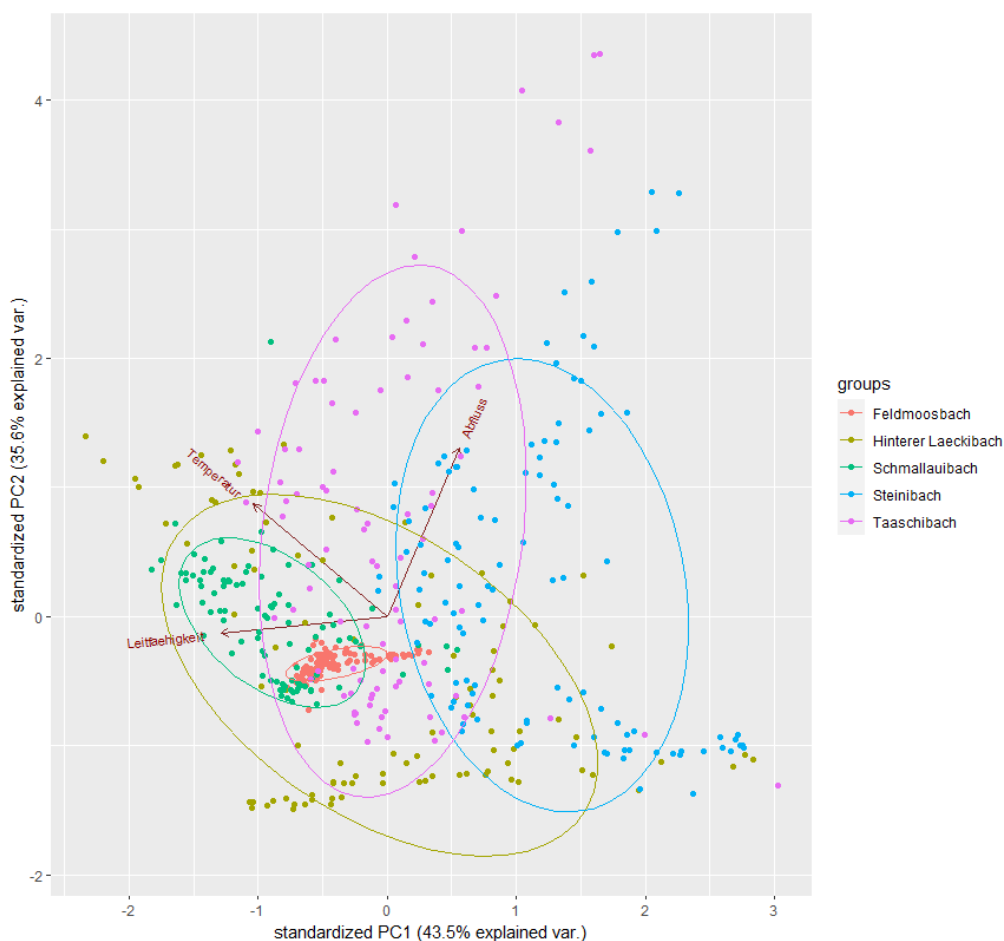
**Abbildung 12:** Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit normierten Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.

**Tabelle 4:** statistische Kennwerte der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit normierten Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.

	PC1	PC2	PC3
Standardabweichung	1.14	1.02	0.82
Faktorladung Temperatur	0.73	-0.06	0.69
Faktorladung Leitfähigkeit	0.33	-0.85	-0.41
Faktorladung Abfluss	0.61	0.52	-0.60

Die zwei ersten Hauptkomponenten (PC1 und PC2) der Hauptkomponentenanalyse mit den unveränderten Monatsmittelwerten von Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit erklärten zusammen 79.1% der Varianz (Abb. 13). Die dritte, nicht dargestellte, Hauptkomponente erklärte die übrigen 20.9% der Varianz. Die PC1 korrelierte stark negativ mit der Leitfähigkeit (Tab. 5). Der Abfluss korreliert am stärksten mit der PC2. Im Gegensatz zur ersten durchgeführten PCA, liess sich hier die Temperatur nicht eindeutig einer PC zuordnen. Die untersuchten Gewässer konnten aufgrund ihrer Unterschiede ebenfalls nur bedingt gruppiert

werden, die Ellipsen der Gruppen überschneiden sich. Es war nicht erkennbar, dass sich die Gewässer mit nachgewiesener Verbindung (Taaschibach und Feldmoosbach) (z.B. AquaPlus, 2021b) klar von den beiden Oberflächengewässern (Steinibach und Hinterer Läckibach) und dem Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum Glattalpsee (Schmallauibach) (z.B. AquaPlus, 2021b) abgrenzen liessen. Der Feldmoosbach und der Schmallauibach wiesen eine deutlich kleinere Streuung der Werte auf als die übrigen drei Gewässer. Der Steinibach und der Taaschibach streuten stärker in vertikale Richtung, was mit dem Abfluss (PC2) in Verbindung gebracht werden konnte. Die Werte des Feldmoosbachs streuten nur wenig, jedoch stark in die horizontale Richtung, was mit der Leitfähigkeit (PC1) korrelierte. Der Schmallauibach und Hinterer Läckibach streuten in Richtung der Temperatur und Leitfähigkeit.



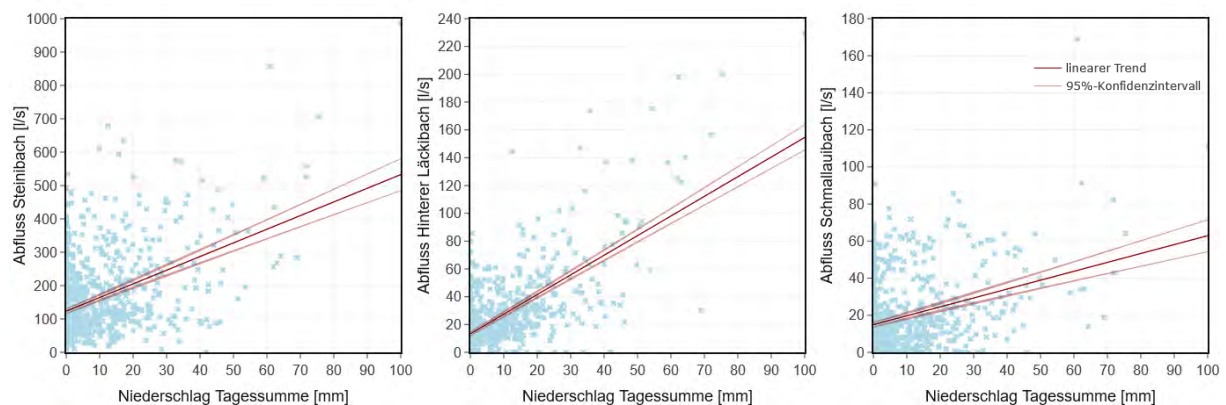
**Abbildung 13:** Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.

**Tabelle 5:** statistische Kennwerte der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.

	PC1	PC2	PC3
Standardabweichung	1.14	1.03	0.79
Faktorladung Temperatur	-0.60	0.55	0.59
Faktorladung Leitfähigkeit	-0.74	-0.08	-0.67
Faktorladung Abfluss	0.32	0.83	-0.46

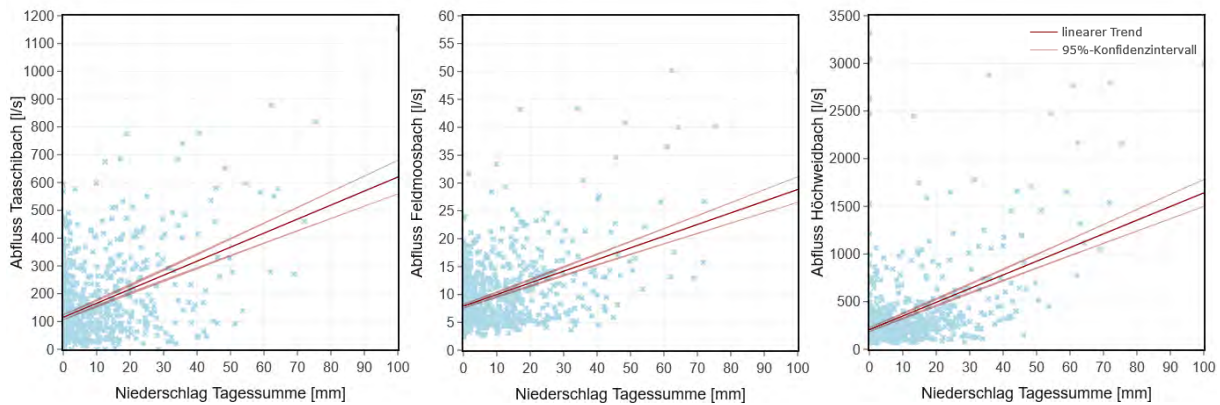
### 3.3 Abhängigkeit der Abflusswerte vom Niederschlag

Alle untersuchten Gewässer wiesen im Zeitraum von 2012 bis 2020 jeweils von Juli bis Oktober einen signifikanten Zusammenhang ( $p < 0.05$ ) zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Abfluss (resp. Pegel bei Hinter Seeberg) auf (Abb. 14-16, Tab. 6). Dieser Zusammenhang war bei den sieben untersuchten Gewässern jedoch nicht sehr stark ( $R^2$  zwischen 0.10 und 0.46). Die Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b) wiesen alle einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss in den Monaten Juli bis Oktober auf ( $R^2$  zwischen 0.2 und 0.24). Bei den übrigen Gewässern (Oberflächengewässer und Quellgewässer ohne vermutete Verbindung (z.B. AquaPlus, 2021b)) war die Streuung des Zusammenhangs grösser ( $R^2$  zwischen 0.1 und 0.46).

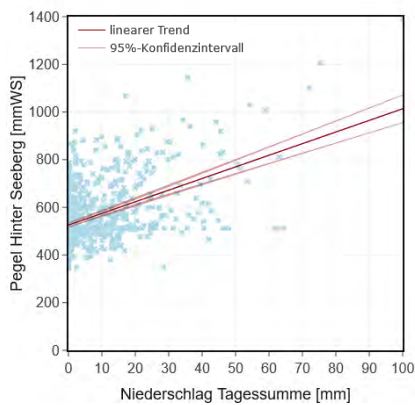


**Abbildung 14:** Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Abfluss der Gewässer ohne vermutete Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.

Obwohl bei jeder dieser Auswertungen die Daten bei niedrigeren Abflusswerten und kleinerer täglicher Niederschlagssumme gehäuft waren, war überall ein klar positiver Trend ersichtlich. Die Streuung sowie die Trendgeraden waren, abgesehen von der steileren Trendgerade vom Hinterer Läckibach, bei allen Gewässern sehr ähnlich und entsprechend waren keine klaren Unterschiede zwischen den Oberflächengewässern (Abb. 14, links, Mitte), dem Quellgewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (Abb. 14, rechts) und den Gewässern mit nachgewiesener Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) (Abb. 15, 16) erkennbar.



**Abbildung 15:** Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Abfluss der Gewässer mit nachgewiesener Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.



**Abbildung 16:** Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Pegel bei Hinter Seeberg (Verbindung zum Glattalpsee nachgewiesen; z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.

**Tabelle 6:** Statistische Kenngrößen (p-value, R<sup>2</sup>) der linearen Regression zwischen Tagesniederschlagssumme und Abfluss (resp. Pegel bei Hinter Seeberg) der Oberflächengewässer oberhalb des Glattalpsees (grün), Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum See (weiss) und Quellgewässer mit nachgewiesener Verbindung (blau) (z.B. AquaPlus, 2021b).

Gewässer	p-value	R <sup>2</sup>
Steinibach	< 2.2e <sup>-16</sup>	0.19
Hinterer Läckibach	< 2.2e <sup>-16</sup>	0.46
Schmallauibach	< 2.2e <sup>-16</sup>	0.10
Taaschibach	< 2.2e <sup>-16</sup>	0.20
Feldmoosbach	< 2.2e <sup>-16</sup>	0.21
H" data-bbox="521 512 871 648"/>		

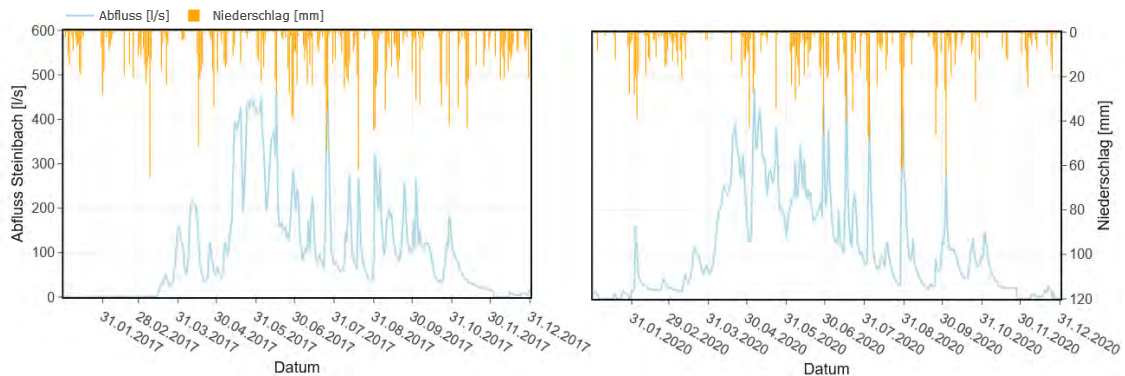
### **3.4 Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag**

Das Jahr 2017 war mit einem Jahresniederschlag von 2520 mm etwas niederschlagsreicher als das Jahr 2020 mit 2025 mm (Abb. 17-23). Im Winter fiel der Niederschlag als Schnee, in beiden Untersuchungsjahren war das bis Mitte März der Fall. Anschliessend folgte eine Zeit bis Ende April in der teilweise Schnee und teilweise Regen fiel. Ab Anfang Mai schmolz der Schnee, bis am 14.06.2017 resp. 27.05.2020 keine Schneedecke bei der Messtation mehr vorhanden war. Im Jahr 2017 schneite es am 23.10. das erste Mal intensiver, so dass der Schnee langfristig liegen blieb. Im Jahr 2020 schneite es ab Mitte September bis Mitte November mehrmals während ein paar Tagen, dieser Schnee schmolz jedoch wieder. Ab dem 18.11.2020 war eine bleibende Schneedecke zu verzeichnen. In der Zeitperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober 2020 gab es mehrere niederschlagsreiche Tage mit einer Tagessumme zwischen 40 und gut 60 mm. Im Jahr 2017 gab es ähnlich viele Tage mit einer Summe zwischen 40 und 60 mm Niederschlag, dies jedoch im Zeitraum von März bis November. Ausserdem wurden mehr mittlere Niederschlagsereignisse mit einer Tagessumme zwischen 20 und 40 mm aufgezeichnet als im Jahr 2020.

Die saisonalen Schwankungen des Seestands verhielten sich in den beiden untersuchten Jahren ähnlich (Abb. 19-23). Zu Beginn des Jahres sank der Seestand bis Ende März, anschliessend war sowohl 2017 als auch 2020 ein starker Anstieg sichtbar, welcher Ende Mai 2020 resp. Mitte Juni 2017 abflachte. In den Sommermonaten von 2017 wies der Glattalpsee kleinere Schwankungen um den Wert 1855 m ü. M. auf, ehe er ab September kontinuierlich auf eine Höhe von 1847 m ü. M. Ende Jahr sank. Im Jahr 2020 stieg der Seestand weniger hoch, er blieb von Ende Mai bis Anfang August auf einem ähnlichen Niveau von ca. 1852 m ü. M., verzeichnete aber auch während dieser Zeit kleinere Schwankungen. Von August bis Ende Dezember sank der Seestand, jedoch mit je einem kleineren Peak im September und Oktober. Ende Jahr war der Seestand mit 1840 m ü. M. deutlich tiefer als im Jahr 2017. Viele der kurzzeitigen Seestandserhöhungen traten sowohl 2017 als auch 2020 direkt nach grösseren Niederschlagsereignissen auf.

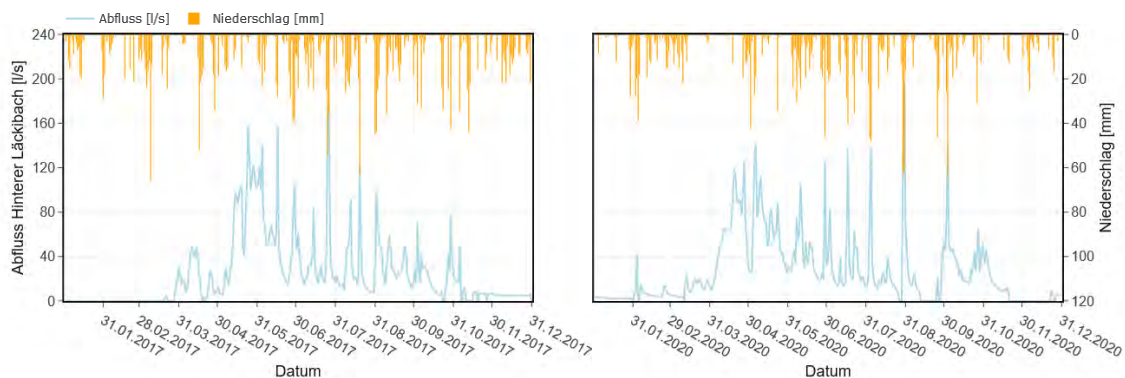
Der in den Glattalpsee mündende Steinibach (Abb. 17) reagierte auf die meisten grösseren Niederschlagsereignisse mit einem Anstieg des Abflusses. Zu Beginn des Jahres 2017 reagierte der Abfluss bei mehreren Schneefällen überhaupt nicht, wohingegen im Jahr 2020 bereits Anfang Februar eine Abflusserhöhung sichtbar war bei einem Niederschlag über mehrere Tage, bei dem teilweise Lufttemperaturen über 0°C gemessen wurden. Mit definitiv einsetzender Schneeschmelze führte der Steinibach ab dem Monat April sowohl 2017 als auch 2020 mehr Wasser, trotz fehlendem Niederschlag. In den Monaten Mai bis Juli war der Abflussdurchschnitt am höchsten und der Steinibach reagierte bis Ende September mit einem erhöhten Abfluss unmittelbar nach Regentagen, dies jedoch unterschiedlich stark. Im Herbst

war nach einem Niederschlagsereignis nicht immer eine Reaktion sichtbar. Im Dezember führte der Steinibach sehr wenig bis kein Wasser und reagierte kaum auf Niederschlagsereignisse.



**Abbildung 17:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme und der Abflusswerte des Steinibachs für die Jahre 2017 und 2020.

Ebenso wie der Steinibach reagierte der Hinterer Läckibach (Abb. 18) im Jahr 2017 zu Beginn des Jahres nicht auf Niederschlagsereignisse, im Jahr 2020 hingegen war eine leichte Erhöhung des Abflusses Anfang Februar zu beobachten. Im April und Mai während der Schneeschmelze führte der Hinterer Läckibach in beiden untersuchten Jahren viel Wasser, was nicht auf einzelne Niederschlagsereignisse zurückzuführen war. In den Monaten Juni bis Oktober stieg der Abfluss nach Regentagen an, vor allem bei einer Tagesniederschlagsmenge von mehr als 40 mm war die Reaktion deutlich sichtbar. Ab Mitte November, wo der Niederschlag als Schnee liegen blieb, war der Abfluss des Hinterer Läckibachs sehr klein bis gar nicht vorhanden.

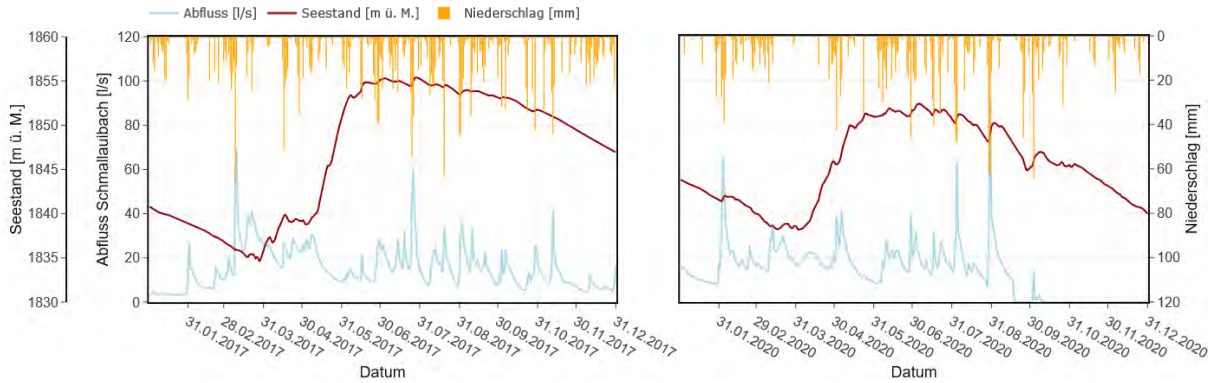


**Abbildung 18:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme und der Abflusswerte des Hinterer Läckibachs für die Jahre 2017 und 2020.

Anfang März 2017 und Anfang Februar 2020, als der Glattalensee einen tiefen Wasserstand aufwies, reagierte der Schmallaubach (Abb. 19) mit einem erhöhten Abfluss nach grösseren Regenereignissen. Vergleichbar hohe Abflüsse ( $> 60$  l/s) waren nur Ende Juni 2017 sowie Anfang und Ende Juli 2020 zu beobachten, als der Seestand hoch lag. Während der restlichen untersuchten Zeitperiode wies der Schmallaubach trotz ähnlich intensiven Regenereignissen

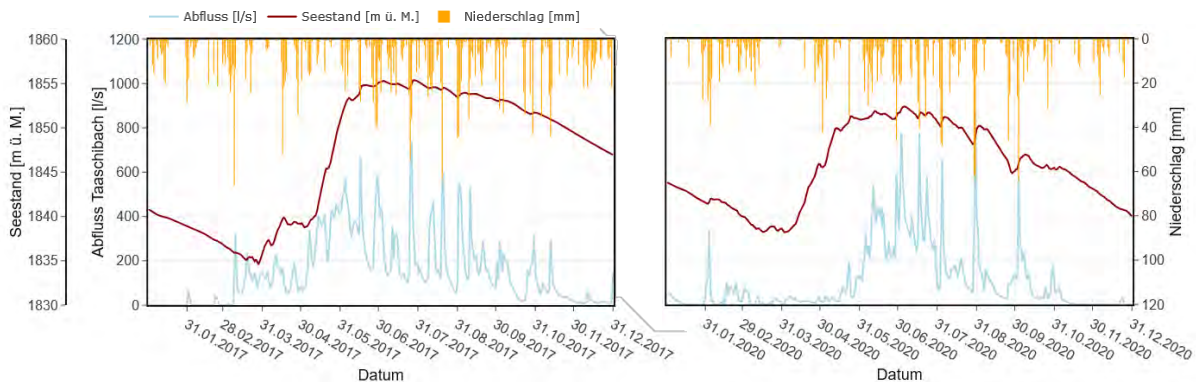


keine Abflussspitzen in diesem Ausmass auf. Kleinere Anstiege des Abflusses traten dennoch im Jahr 2017 zwischen Ende Juni und Anfang November und im Jahr 2020 zwischen Anfang Mai und Anfang September nach Tagen mit Niederschlag auf. Ein Einfluss des Seestands auf den Abfluss des Schmallaubachs konnte nicht erkannt werden.



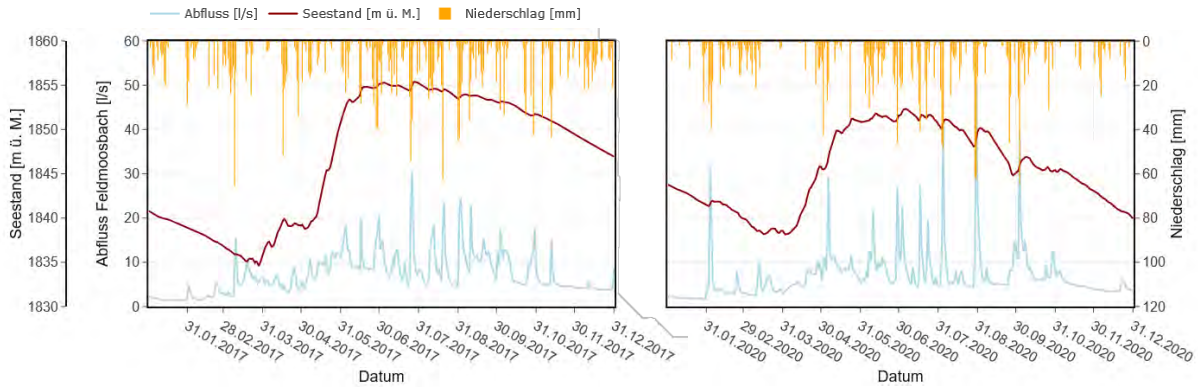
**Abbildung 19:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Schmallaubachs für die Jahre 2017 und 2020.

Über die ganze Untersuchungsperiode zeigte der Taaschibach (Abb. 20) starke Abflussschwankungen und er reagierte fast bei jedem starken Niederschlag mit einem erhöhten Abfluss. Die Reaktion auf Niederschlagsereignisse war unabhängig vom Seestand. Im Vergleich zum Schmallaubach reagierte der Taaschibach stärker und häufiger auf Niederschlagsereignisse.



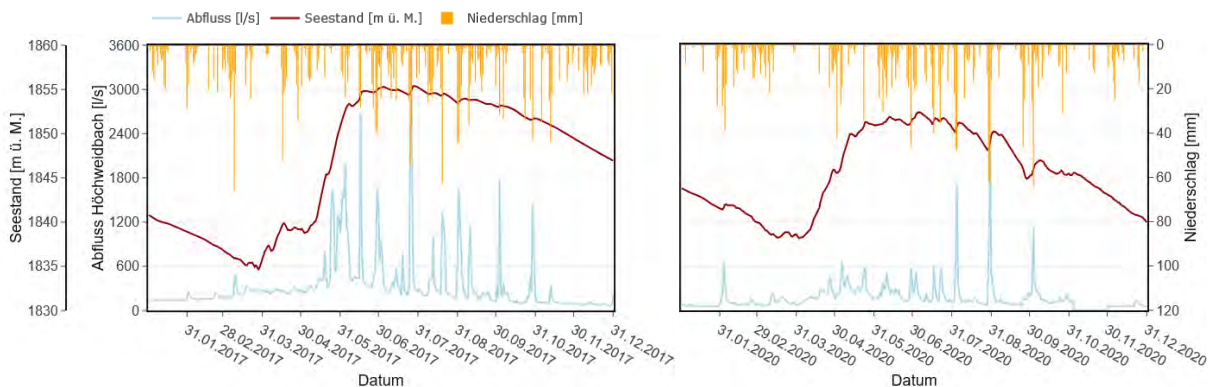
**Abbildung 20:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Taaschibachs für die Jahre 2017 und 2020.

Der Feldmoosbach (Abb. 21) hatte einen sehr viel kleineren Abfluss als der Taaschibach, aber reagierte sehr ähnlich wie der Taaschibach auf Niederschlagsereignisse. Im Unterschied zum Taaschibach fiel der Feldmoosbach während den beiden Untersuchungs Jahren jedoch nie trocken.



**Abbildung 21:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Feldmoosbachs für die Jahre 2017 und 2020.

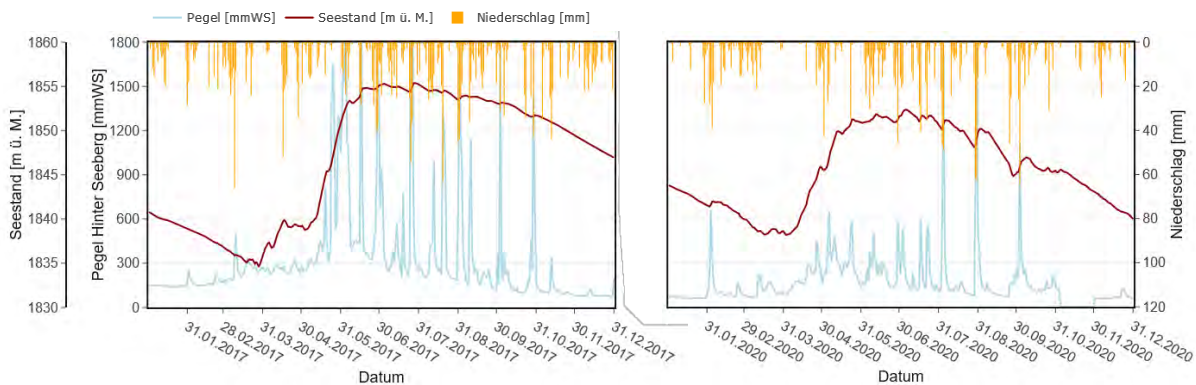
Die Reaktion des H<sub>o</sub>chweidbachs (Abb. 22) auf Niederschlagsereignisse war zu Beginn der beiden untersuchten Jahre noch geringer als bei den anderen Quellgewässern. Allgemein reagierte der H<sub>o</sub>chweidbach auffallend unterschiedlich stark auf niederschlagsreiche Tage. Im Sommer 2017 wies das Gewässer viele Abflussspitzen auf, im Mai und Anfang Juni noch unabhängig vom Niederschlag, in den darauffolgenden Monaten jeweils unmittelbar nach starkem Niederschlag. Im Gegensatz dazu war der Abfluss im Jahr 2020 konstanter, nur Anfang und Ende August sowie Anfang Oktober war ein stark erhöhter Abfluss bei viel Niederschlag sichtbar. Zu Beginn des Jahres 2017 stieg der Abfluss des H<sub>o</sub>chweidbachs stetig, obwohl der Seestand abnahm. Im Fr $\ddot{u}$ hling 2017 und 2020 war gleichzeitig mit der Erh $\ddot{o}$ hung des Seestands ein Abflussanstieg sichtbar. Auffallend war, dass die grossen Abflussspitzen w $\ddot{a}$ hrend einer k $\ddot{u}$ rzeren Zeitperiode als bei den  $\ddot{u}$ brigen untersuchten Gew $\ddot{a}$ ssern und nur bei hohem Seestand auftraten.



**Abbildung 22:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des H<sub>o</sub>chweidbachs für die Jahre 2017 und 2020.

Im Unterschied zu den bisher beschriebenen Gewässern wurden bei Hinter Seeberg (Abb. 23) die Pegelwerte in mm Wasserstand untersucht anstelle der die Abflusswerte, da eine Pegel-Abfluss-Beziehung fehlte. Daher ist ein direkter Vergleich mit den anderen Gewässern nur sehr eingeschränkt möglich. Im Jahr 2017 waren im Allgemeinen höhere Pegelwerte sowie

mehr und grössere Spitzen zu beobachten als im Jahr 2020. Die Niederschlagsstage im April und Mai 2017 lösten keinen unmittelbaren Pegelanstieg aus. Dieser stieg erst Ende Mai sehr stark an. In den folgenden Monaten reagierte die Quelle bei Hinter Seeberg mit einem starken Pegelanstieg direkt nach jedem Niederschlagsereignis. Ab November wurde die Reaktion deutlich kleiner. Im Jahr 2020 war der Pegelstand gleichmässiger, die grössten Spitzen waren nach starken Niederschlägen Anfang und Ende August sowie Anfang Oktober bei mittlerem bis hohem Seestand. Anfang Februar 2020 war ein weiterer hoher Pegelstand nach einem Niederschlagsereignis zu verzeichnen, der Seestand war zu diesem Zeitpunkt verhältnismässig tief.



**Abbildung 23:** Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Pegelwerte bei Hinter Seeberg für die Jahre 2017 und 2020.

Zusammenfassend schienen die beiden Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet stärker auf die Schneeschmelze zu reagieren, der Abflussanstieg im Frühling war ausgeprägter als bei den untersuchten Quellgewässern. Ausserdem war der Abfluss sowohl beim Steinibach als auch beim Hinterer Läckibach in beiden Untersuchungs Jahren über mehrere Tage bis Wochen vom März bis Juli für das jeweilige Gewässer extrem hoch. In den übrigen Monaten waren Abflussspitzen von wenigen Tagen sichtbar, wie sie in den meisten Quellgewässern auch zu beobachten waren.

### 3.5 Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse

Es wurden fünf Niederschlagsereignisse anhand verschiedener Kennwerte zu Dauer und Intensität für die Analyse der Reaktion der Gewässer ausgewählt (Tab. 7). Die fünf ausgewählten Niederschlagsereignisse wiesen nach mindestens 4 trockenen Tagen während einem bis zwei Tagen eine Niederschlagssumme von mindestens 5 mm auf. Die Niederschlagssumme während Ereignis 1 war mit 43.5 mm die deutlich grösste, gefolgt von den Ereignissen 2, 3 und 4 mit einer Summe zwischen 12.4 mm und 15.6 mm. Während Ereignis 5 fiel mit 5.6 mm am wenigsten Niederschlag. Die Niederschlagssumme in den 30 Tagen vor den ausgewählten Ereignissen reichte von 76.5 mm bis 244.4 mm. Aufgrund der Niederschlagssumme während den Ereignissen und der Niederschlagssumme der jeweiligen 30 Tagen davor wurden verschiedene Vergleiche hinsichtlich Dauer und Intensität der Reaktion der untersuchten Gewässer während den einzelnen Ereignissen gemacht. Die Reaktionen auf die Ereignisse 1 und 2 wurden miteinander verglichen, da die 30-Tage-Summe ähnlich hoch war, jedoch während dem Ereignis 1 deutlich mehr Niederschlag fiel als während dem Ereignis 2. Weiter wurden die Ereignisse 2 und 3 miteinander verglichen, welche einen ähnlich starken Niederschlag aufwiesen, die 30 Tage vor dem Ereignis 2 waren jedoch deutlich niederschlagsreicher als die vor dem Ereignis 3. Das Ereignis 4 wurde mit den vorangehenden Ereignissen verglichen. Die Niederschlagssumme während dem Ereignis 4 war ähnlich hoch, wie während den Ereignissen 2 und 3. Vor dem Ereignis 4 fiel weniger Niederschlag als bei Ereignis 1 und 2 jedoch mehr als bei Ereignis 3. Das Ereignis 5 verzeichnete am wenigsten Niederschlag während dem Ereignis, die Niederschlagssumme in den 30 Tagen vorher liegt im Vergleich mit den anderen Ereignissen im mittleren Bereich.

**Tabelle 7:** Details der ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Zeitraum	Niederschlagstag(e)	Niederschlagssumme [mm]	Niederschlagssumme in vorangehenden 30 Tagen [mm]
Ereignis 1	14.08.-23.08.2013	18.08.-19.08.2013	43.5	244.4
Ereignis 2	20.08.-31.08.2015	24.08.-25.08.2015	15.6	203.9
Ereignis 3	23.10.-03.11.2015	28.10.-29.10.2015	12.4	76.5
Ereignis 4	06.09.-15.09.2016	10.09.2016	15.1	170.6
Ereignis 5	16.07.-26.07.2019	20.07.-21.07.2019	5.6	131.7

Für den Standort Hinter Seeberg fehlten die Daten bei Ereignis 1, da die Messstation erst später eingerichtet wurde. Die Niederschlagssumme war bei Ereignis 1 mit 43.5 mm am grössten. Bei allen untersuchten Quellgewässern (Schmallauibach, Taaschibach, Feldmoosbach, und Höchweidbach) begann der Abfluss bei Ereignis 1 (Tab. 8) nach einem Tag zu steigen. Der Abflusspeak wurde beim Hinterer Läckibach und Schmallauibach am ersten Niederschlagstag erreicht. Bei den übrigen untersuchten Gewässern dauerte es einen Tag länger. Der Abfluss des Taaschibachs und Höchweidbachs war vier Tage nach

Niederschlagsende wieder auf gleichem Niveau wie vor dem Abflussanstieg. Bei den anderen untersuchten Gewässern dauerte es länger als vier Tage.

Die grösste Intensität auf den Niederschlag während Ereignis 1 wies der Hinterer Läckibach mit einem Werte von 5.1 auf, gefolgt vom Taaschibach und Steinibach. Der Schmallauibach reagierte mit einem Wert von 1.7 am schwächsten. Das Abflussvolumen war beim Höchstweidbach gefolgt vom Steinibach und Taaschibach am grössten. Der Schmallauibach und Hinterer Läckibach hatten das zweitkleinste Abflussvolumen und der Feldmoosbach das kleinste. Das Abflussvolumen konnte jedoch nur beim Taaschibach und Höchstweidbach definitiv bestimmt werden. Bei den übrigen Gewässern war der Abfluss vor Ende der Untersuchungsperiode nicht wieder kleiner als vor dem eintretenden Niederschlag und deshalb war das genaue Volumen unklar.

**Tabelle 8:** Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 1 (14.08.-23.08.13) mit einer Niederschlagssumme von 43.5 mm.

	Abflusspeak [Tage]	Start Abflussanstieg [Tage]	Abfluss $\leq$ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Steinibach	1.5	0	4+	3.3	8+
Hinterer Läckibach	0.5	0	4+	5.1	4+
Schmallauibach	0.5	1	4+	1.7	4+
Taaschibach	1.5	1	4	4.0	7
Feldmoosbach	1.5	1	4+	2.6	3+
Höchstweidbach	1.5	1	4	2.2	9
Hinter Seeberg	-	-	-	-	-

Während dem Ereignis 2 fiel 15.6 mm Regen. Bei allen untersuchten Gewässern begann der Abfluss resp. Pegel bei Hinter Seeberg bei Ereignis 2 (Tab 9) nach einem Tag zu steigen und der Peak wurde am ersten Niederschlagstag erreicht. Die Abflusswerte waren je nach Gewässer nach 1 bis 3 Tagen wieder kleiner als vor dem Abflussanstieg.

Der Hinterer Läckibach reagierte erneut am stärksten, jedoch mit einem Wert von 1.8, wieder gefolgt vom Steinibach und Taaschibach. Die anderen Gewässer hatten nur eine geringe Intensität mit Werten zwischen 1.1 und 1.2. Während dem Ereignis 2 wies der Höchstweidbach wiederum das grösste Abflussvolumen auf, gefolgt vom Steinibach und Taaschibach. Der Feldmoosbach hatte das kleinste Abflussvolumen.

**Tabelle 9:** Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 2 (20.08.-31.08.15) mit einer Niederschlagssumme von 15.6 mm.

	Abflusspeak [Tage] *	Start Abflussanstieg [Tage] *	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage] *	Intensität [-] *	Klasse Abflussvolumen
Steinibach	0.5	1	2	1.6	6
Hinterer Läckibach	0.5	1	1	1.8	2
Schmallauibach	0.5	1	1	1.2	2
Taaschibach	0.5	1	2	1.4	5
Feldmoosbach	0.5	1	2	1.1	1
Höchweidbach	0.5	1	3	1.1	7
Hinter Seeberg	0.5	1	3	1.2	-

\*Pegel statt Abfluss

Die Niederschlagssumme während dem Ereignis 3 betrug 12.4 mm. Bei Ereignis 3 (Tab. 10) begann der Abfluss beim Hinterer Läckibach, Schmallauibach, und Taaschibach, bereits am ersten Niederschlagstag zu steigen bei den restlichen Gewässern erst nach einem Tag. Der Peak trat bei allen sieben Gewässern am zweiten Niederschlagstag ein. Der Abfluss resp. Pegel bei Hinter Seeberg sank bei den meisten Gewässern nach drei Tagen wieder auf das Niveau wie vor dem Niederschlagsereignis. Beim Feldmoosbach dauerte dies vier und beim Schmallauibach länger als fünf Tage.

Der Hinterer Läckibach und der Taaschibach reagierten mit einer Intensität von 2.1 am stärksten auf den Niederschlag bei Ereignis 3. Vor dem Niederschlag führte der Schmallauibach kein Wasser, der Abflusspeak betrug 6.6 l/s, was eine nicht definierbare Steigerung des Abflusses bedeutete. Die übrigen Gewässer wiesen eine Intensität zwischen 1.1 und 1.3 auf. Die Reihenfolge vom grössten zum kleinsten Abflussvolumen ist bei Ereignis 3 die gleiche wie bei den Ereignissen 1 und 2.

**Tabelle 10:** Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 3 (28.10.-29.10.15) mit einer Niederschlagssumme von 12.4 mm.

	Abflusspeak [Tage] *	Start Abflussanstieg [Tage] *	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage] *	Intensität [-] *	Klasse Abflussvolumen
Steinibach	0.5	1	3	1.3	5
Hinterer Läckibach	0.5	0	3	2.1	3
Schmallauibach	0.5	0	5+	- <sup>1</sup>	3+
Taaschibach	0.5	0	3	2.1	4
Feldmoosbach	0.5	1	4	1.1	1
Höchweidbach	0.5	1	3	1.1	7
Hinter Seeberg	0.5	1	3	1.1	-

\*Pegel statt Abfluss

<sup>1</sup> vor dem Abflussanstieg auf 6.6 l/s, führte der Schmallauibach kein Wasser (0 l/s), deshalb war die Intensität nicht definierbar

Bei Ereignis 4 betrug die Niederschlagssumme 15.1 mm. Diese fiel im Unterschied zu den anderen untersuchten Ereignissen während einem Tag. Der Abfluss begann bei den meisten untersuchten Gewässern einen Tag nach dem Niederschlagstag von Ereignis 4 (Tab. 11) zu

steigen. Die Ausnahmen bildeten der Hinterer Läckibach, bei dem der Anstieg einen Tag früher begann und der Schmallauibach, bei dem kein Abflussanstieg sichtbar war. Der Abflusspeak war bei allen sieben Gewässern am selben Tag wie der Abfluss zu steigen begann. Bei den vier Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (Taaschibach, Feldmoosbach, Höchweidbach und Hinter Seeberg) (z.B. AquaPlus, 2021b) sank der Abfluss zwei Tage nach dem Niederschlagstag wieder auf ein tieferes Niveau als vor dem Regen. Beim Steinibach war dies erst drei Tage nach dem Regen der Fall, beim Hinterer Läckibach hingegen bereits am Folgetag des Niederschlags.

Der Taaschibach reagierte mit einer Intensität von 1.6 am stärksten auf den Niederschlag während dem Ereignis 4, gefolgt vom Steinibach mit 1.3. Die Intensität des Hinterer Läckibachs ist mit 1.1 schwächer und deutlich tiefer als bei den vorherigen Ereignissen. Die Reihenfolge der Abflussvolumen-Klassen ist erneut dieselbe wie bei den bereits beschriebenen Ereignissen, mit dem Unterschied, dass beim Ereignis 4 der Steinibach zusammen mit dem Höchweidbach in dieselbe Klasse fiel.

**Tabelle 11:** Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 4 (06.09.-15.09.16) mit einer Niederschlagssumme von 15.1 mm.

	Abflusspeak [Tage] *	Start Abflussanstieg [Tage] *	Abfluss $\leq$ Abfluss vor Ereignis [Tage] *	Intensität [-] *	Klasse Abflussvolumen
Steinibach	1	1	3	1.3	6
Hinterer Läckibach	0	0	1	1.1	2
Schmallauibach	-	-	-		-
Taaschibach	1	1	2	1.6	5
Feldmoosbach	1	1	2	1.1	1
Höchweidbach	1	1	2	1.0	6
Hinter Seeberg	1	1	2	1.0	-

\*Pegel statt Abfluss

Das Ereignis 5 wies mit 5.6 mm verglichen mit den übrigen Niederschlagsereignissen die deutlich kleinste Niederschlagssumme auf. Ausser beim Taaschibach und Steinibach konnten während dem Ereignis 5 (Tab. 12) keine Trends aus den untersuchten Daten herausgelesen werden. Beim Schmallauibach fehlten aufgrund eines Defekts an der Messsonde die Daten während dieser Zeit. Beim Hinterer Läckibach, Feldmoosbach, Höchweidbach und bei Hinter Seeberg war kein Mindestunterschied von 0.1 zum Vortag resp. Folgetag auszumachen.

Der Taaschibach reagierte auf das Ereignis 5 mit einer Intensität von 2.3 ähnlich stark wie auf das Ereignis 3. Der Steinibach hingegen reagierte äusserst schwach. Ausserdem wurde bei Ereignis 5 auf die Berechnung des Abflussvolumens verzichtet, da die Abflusswerte weder beim Steinibach noch beim Taaschibach bis zum Ende der Untersuchungsperiode einen kleineren Wert anzeigten als vor dem Ereignis.

**Tabelle 12:** Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 5 (16.07.-26.07.19) mit einer Niederschlagssumme von 5.6 mm.

	Abflusspeak [Tage]	Start Abflussanstieg [Tage]	Abfluss $\leq$ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]
Steinibach	0.5 / 3.5	1	5+	1.0
Hinterer Läckibach	-	-	-	
Schmallauibach	-	-	-	
Taaschibach	1.5	0	5+	2.3
Feldmoosbach	-	-	-	
Höchweidbach	-	-	-	
Hinter Seeberg	-	-	-	

Zusammenfassend fiel auf, dass bei allen untersuchten Ereignissen und Gewässern der Abfluss nach ähnlicher Zeit zu steigen begann. Es war jedoch kein einheitliches Muster zu beobachten, dass es immer bei denselben Gewässern etwas länger dauerte. Der Abflusspeak wurde bei Ereignis 1 mit der grössten Niederschlagssumme von 43.5 mm im Vergleich zu den übrigen Ereignissen mehrheitlich einen Tag später erreicht. Ausserdem waren die Dauer und Intensität der Reaktion auf Ereignis 1 länger und stärker als auf die anderen Ereignisse.

Der Vergleich zwischen Ereignis 2, welches während einer regenreichen Zeit auftrat (203.9 mm) und Ereignis 3, das auf deutlich trockenere 30 Tage (76.5 mm) folgte, zeigte kleine Unterschiede trotz ähnlicher Niederschlagssumme während den beiden Ereignissen (15.6, resp. 12.4 mm). Der Abfluss begann bei allen untersuchten Gewässern nach dem ersten Niederschlagstag vom Ereignis 2 zu steigen. Beim Ereignis 3 war es weniger einheitlich, beim Hinterer Läckibach, Schmallauibach, und Taaschibach begann der Abfluss bereits am ersten Niederschlagstag zu steigen, bei den restlichen Gewässern erst nach einem Tag. Der Abfluss sank beim Ereignis 2 in kürzerer Zeit wieder auf das Niveau wie vor dem Niederschlagsereignis als beim Ereignis 3. Der Vergleich der Intensitäten zeigte beim Ereignis 3 mehrheitlich höhere Werte.

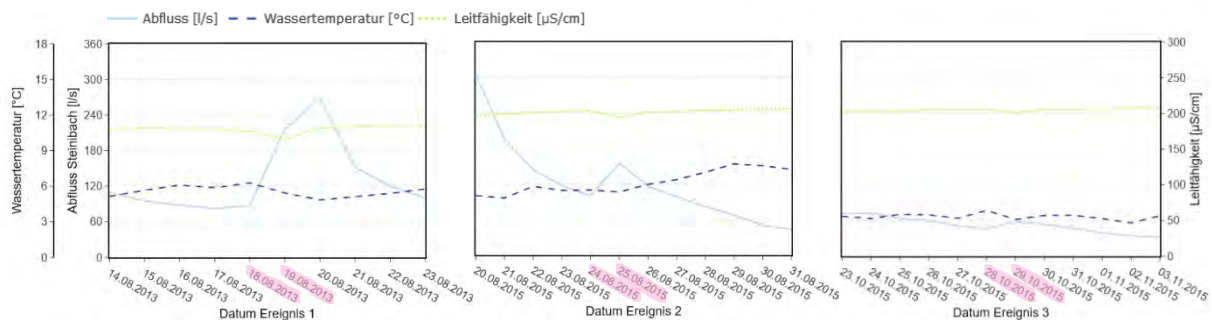
Die Niederschlagssumme während dem Ereignis 4 (15.1 mm) war ähnlich hoch, wie während den Ereignissen 2 und 3. Vor dem Ereignis 4 fiel weniger Niederschlag (170.6 mm) als bei Ereignis 1 und 2 jedoch mehr als bei Ereignis 3. Allgemein ist die Reaktion auf den Niederschlag während dem Ereignis 4 der untersuchten Gewässer von kürzerer Dauer als bei den Ereignissen 1 und 3 und ähnlich wie bei Ereignis 2.

Der Vergleich mit dem Ereignis 5 konnte zeigen, dass ein kleines Niederschlagsereignis (5.6 mm) bei den meisten Gewässern keine Reaktion auslöste.



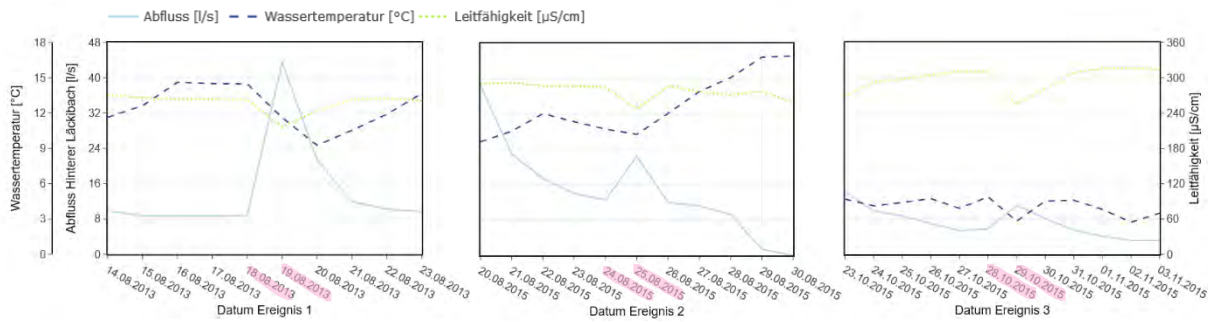
Aufgrund der Vergleiche der Reaktion auf die fünf ausgewählten Niederschlagsereignisse wurden die Ereignisse 1, 2 und 3 detaillierter ausgewertet, in dem neben Abflusswerten auch Temperatur- und Leitfähigkeitswerte der untersuchten Gewässer berücksichtigt wurden.

Die Abflusserhöhung des Steinibachs (Abb. 24) war bei den drei Ereignissen jeweils am zweiten Niederschlagstag sichtbar, bei Ereignis 2 und 3 stellte das zugleich den Abflusspeak von 156 l/s resp. 58 l/s dar. Bei Ereignis 1 hingegen stieg der Abfluss des Steinibachs am ersten niederschlagsfreien Tag (20.08.2013) weiter an, bis der Peak von 269 l/s erreicht wurde. Die Leitfähigkeit verhielt sich weniger auffällig, sie sank jeweils am zweiten Niederschlagstag leicht, bevor sie wieder ähnliche Werte annahm wie vor den Tagen mit Niederschlag. Die Wassertemperatur des Steinibachs zeigte kein einheitliches Muster. Beim Ereignis 1 nahm die Temperatur mit eintretendem Niederschlag ab und nahm zeitgleich mit der Abnahme des Abflusses zu. Bei Ereignis 2 und 3 waren Veränderungen der Temperatur sichtbar, jedoch nicht klar auf die Niederschlagstage zurückzuführen.



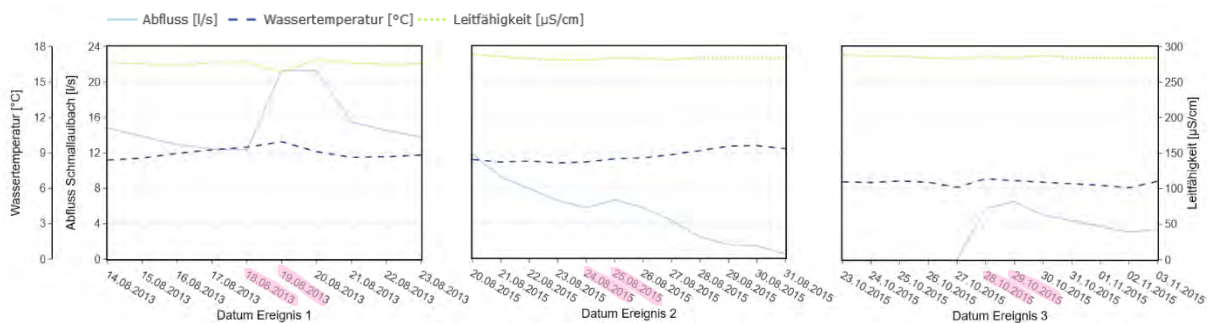
**Abbildung 24:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Steinibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

Der Abflusspeak war beim Hinterer Läckibach (Abb. 25) bei allen drei beobachteten Ereignissen am zweiten Niederschlagstag sichtbar, bei Ereignis 1 war der Peak mit 44 l/s am grössten im Vergleich zu 22 l/s bei Ereignis 2 und 11 l/s bei Ereignis 3. Nach den Tagen mit Niederschlag sank der Abfluss jeweils innerhalb von einem bis zwei Tagen auf ein ähnliches Niveau wie vorher. Die Leitfähigkeit nahm bei allen drei Ereignissen am Tag 2 mit Niederschlag deutlich ab und nach einem bis zwei Tagen waren die Werte wieder ähnlich wie vorher. Die Wassertemperatur nahm bei Ereignis 1 zeitgleich mit der Leitfähigkeitsabnahme und der Abflusszunahme deutlich ab. Die Angleichung an die Werte wie vor dem Niederschlag startete bei der Temperatur einen Tag später als bei den anderen Parametern. Bei Ereignis 2 war ebenfalls eine Temperaturabnahme sichtbar, diese startete jedoch bereits vor dem Niederschlagsereignis. Nach dem Niederschlag vom 25.08.2015 war eine starke Temperaturzunahme zusammen mit einer Abnahme des Abflusses zu beobachten. Beim dritten Niederschlagsereignis fiel die Minimaltemperatur mit dem Abflusspeak und der tiefsten Leitfähigkeit zeitlich zusammen.



**Abbildung 25:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Hinterer Läckibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. Hinweis: die Skala der Leitfähigkeit unterscheidet sich zu den übrigen Gewässern.

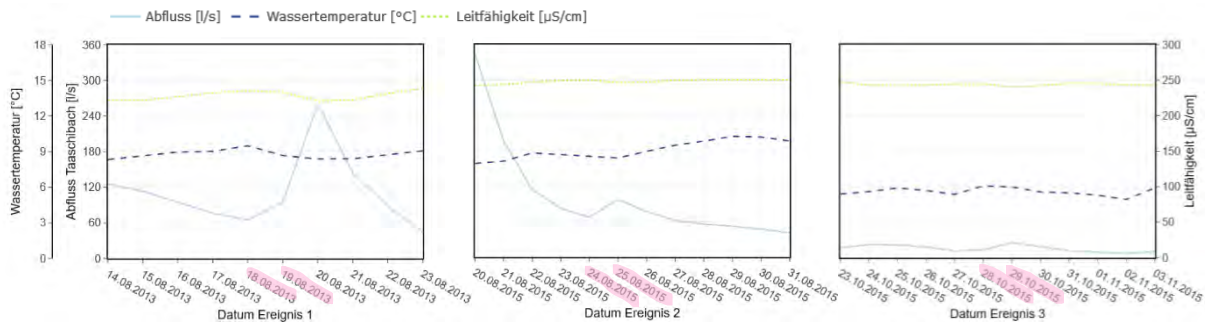
Der Abflusspeak des Schmallauibachs (Abb. 26) war bei allen drei Ereignissen jeweils am zweiten Tag mit Niederschlag. Bei Ereignis 1 hielt das hohe Niveau des Abflusses (21 l/s) noch einen zweiten Tag an, bevor es wieder zu sinken begann. Bei Ereignis 3 stieg der Abfluss von 0 l/s auf knapp 6 l/s am ersten Niederschlagstag. Das ist das einzige Gewässer, welches bei einem der drei untersuchten Niederschlagsereignisse bereits mit dem ersten Niederschlagstag eine deutliche Abflusserhöhung zeigte. Bei der Leitfähigkeit war nur bei Ereignis 1 eine Reaktion sichtbar. Sie nahm am zweiten Niederschlagstag ab und stieg schnell wieder auf ähnliche Höhe an wie davor. Ebenfalls beim Ereignis 1 nahm die Temperatur stetig leicht zu, bis sie nach dem Niederschlag abnahm. Bei Ereignis 2 war ebenfalls eine stetige Temperaturzunahme zu beobachten, welche an den Niederschlagstagen jedoch nicht unterbrochen wurde. Ein Tag vor dem Niederschlag bei Ereignis 3 nahm die Temperatur leicht ab, bevor sie mit einsetzendem Niederschlag wieder ähnliche Werte annahm wie zuvor.



**Abbildung 26:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Schmallauibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

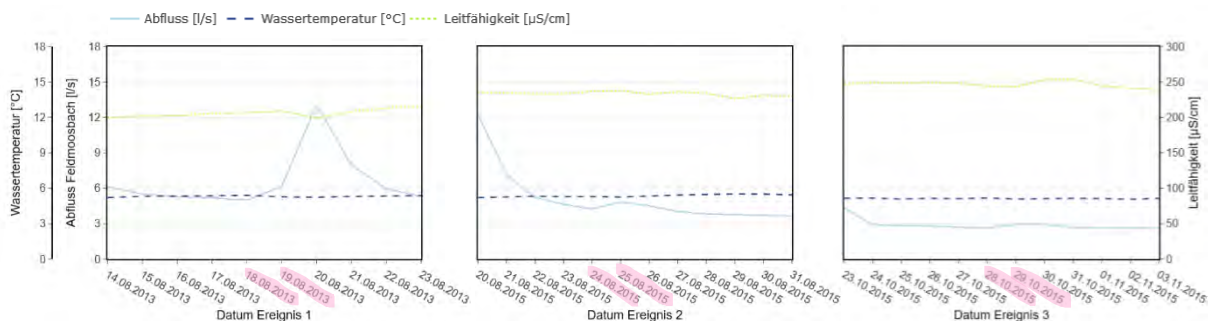
Der Taaschibach (Abb. 27) reagierte ebenfalls mit einer jeweils unterschiedlich starken Abflusserhöhung auf die Niederschlagsereignisse. Diese Reaktion war bei Ereignis 1 die grösste und dessen Peak von 260 l/s war einen Tag nach dem Niederschlag. Bei den anderen Ereignissen war der Peak mit 97 l/s resp. 25 l/s kleiner und einen Tag früher. Mit

zunehmendem Abfluss war bei den Ereignissen 1 bis 3 eine leichte Temperatur- und Leitfähigkeitsabnahme zu beobachten, diese bewegten sich jedoch alle in einem Bereich, in welchem auch vor und nach dem Niederschlag Werte zu beobachten waren.



**Abbildung 27:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Taaschibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

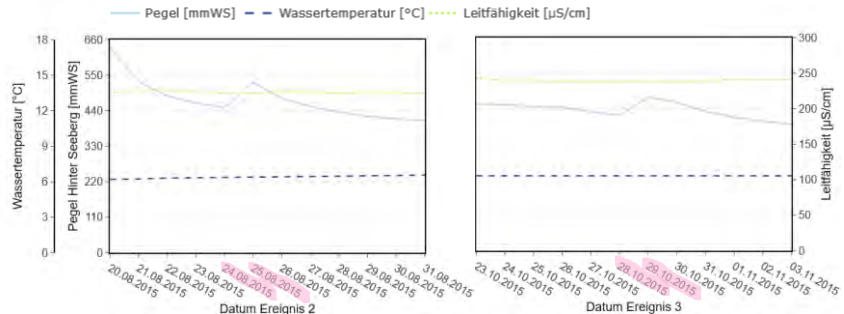
Der Feldmoosbach (Abb. 28) reagierte im Vergleich zu den übrigen Gewässern weniger deutlich auf den Niederschlag. Einzig bei Ereignis 1 war ebenfalls am ersten Tag nach dem Niederschlag ein deutlicher Abflusspeak mit 13 l/s sichtbar. Bei den anderen beiden Ereignissen stieg der Abfluss mit dem Niederschlag nur leicht auf 5 l/s resp. 3 l/s an. Im Vergleich zum ähnlichen Verhalten des Taaschibachs reagierte der Feldmoosbach noch weniger stark. Bei Ereignis 1 und 3 war gleichzeitige Abflusszunahme eine Abnahme der Leitfähigkeit sichtbar. Die Wassertemperatur vom Feldmoosbach veränderte sich bei keinem der Niederschlagsereignisse.



**Abbildung 28:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Feldmoosbach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

Die Messungen bei Hinter Seeberg begannen erst im Jahr 2014, deshalb fehlten die Daten während dem Ereignis 1. Ausserdem handelte es sich im Unterschied zu den anderen Gewässern um Pegel- statt Abflusswerte, weshalb ein Quervergleich zwischen Hinter Seeberg und den anderen Gewässern nur bedingt möglich war. Der Pegel bei Hinter Seeberg (Abb. 29) erreichte sowohl bei Ereignis 2 als auch bei Ereignis 3 am zweiten Niederschlagstag den Peak mit 529 mmWS resp. 477 mmWS. Nach diesem Tag sank der Pegel bei beiden Ereignissen

wieder. Das Muster der Pegelschwankungen waren somit gleich wie das der Abflusswerte der anderen Gewässer bei Ereignis 2 und 3. Bei der Leitfähigkeit und der Wassertemperatur war keine Reaktion während oder nach dem Niederschlag sichtbar.



**Abbildung 29:** Reaktion (Pegel, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) von Hinter Seeberg auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

Auf den grössten Niederschlag (Ereignis 1) reagierten alle Gewässer mit einer deutlichen Abflusserhöhung. Eine Veränderung der Leitfähigkeits- und Temperaturwerte sowie eine allgemeine Reaktion auf die Ereignisse 2 und 3 war bei den meisten Gewässern weniger deutlich. Bei den beiden Oberflächengewässern Steinibach und Hinterer Läckibach war die Veränderung der Leitfähigkeit stärker als bei den Quellgewässern. Bei den meisten Gewässern war die Abflusserhöhung bei Ereignis 2 stärker als bei Ereignis 3. Beim Feldmoosbach war die Abflusserhöhung bei Ereignis 3 kaum sichtbar. Der Schmallaubach reagierte als einziges Gewässer mit einer stärkeren Abflusserhöhung auf Ereignis 3 als auf Ereignis 2. Bei Ereignis 1 war bei fast allen Gewässern eine Abnahme der Leitfähigkeits- und Temperaturwerte sichtbar. Ausser beim Feldmoosbach war keine Änderung der Temperatur zu beobachten. Der Hinterer Läckibach reagierte als einziges Gewässer mit einer – im Vergleich zu den anderen Gewässern – starken Leitfähigkeitsabnahme bei allen drei Ereignissen. Eine Leitfähigkeitsabnahme war ausserdem beim Steinibach bei jedem untersuchten Ereignis zu beobachten. Die übrigen Gewässer reagierten bei den Ereignissen 2 und 3 mit keiner, nur sehr schwachen oder nicht klar auf das Niederschlagsereignis zurückzuführende Veränderung der Leitfähigkeit. Bei der Temperaturveränderung aufgrund des Niederschlags verhielten sich die Gewässer ähnlich wie bei der Leitfähigkeit. Der Hinterer Läckibach reagierte bei allen Ereignissen mit einer Temperaturabnahme. Die Reaktion der anderen Gewässer war entweder nicht vorhanden, nur sehr schwach oder nicht klar auf den Niederschlag zurückzuführen.

## 4 Diskussion

### 4.1 Methodik

Der Vergleich der sieben untersuchten Gewässer wurde durch die uneinheitliche Datenlage erschwert. Einerseits wurden die automatischen Messgeräte nicht alle zur gleichen Zeit installiert, was zu einer unterschiedlich langen Untersuchungszeit der einzelnen Gewässer führte. Andererseits bestanden zum Teil Datenlücken aufgrund Ausfalls der Messgeräte während bis zu elf Monaten. Das führte dazu, dass die Vergleichbarkeit nicht bei allen Auswertungen vollständig gegeben war. Bastiancich et al. (2022) hatten in ihrer Studie im Piemont (NW Italien) ähnliche Probleme. Sie verwendeten für die untersuchte Reaktion von 28 Quellen auf verschiedene meteorologische Parameter ebenfalls nicht selbst erhobene Daten. Sie wirkten dieser Unsicherheit entgegen, indem sie die Kontinuität und Vollständigkeit der übernommenen Daten berechneten und so für die einzelnen Quellen und Parameter die Datenqualität quantifizieren konnten (Bastiancich et al., 2022).

Ausserdem gab es im Untersuchungsgebiet der vorliegenden Bachelorarbeit nur eine Messstelle der meteorologischen Parameter, welche bis zu 5.5 km Entfernung und einen maximalen Höhenunterschied von 1'000 Höhenmeter zum am weitesten entfernten Quellstandort Hinter Seeberg aufwies. Ein dichteres Messnetz hätte kleinräumige Unterschiede wesentlich detaillierter beschrieben. In diesem Fall wäre es möglich gewesen, eine Analyse der Wassertemperatur und Abflussgrösse in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und Schneehöhe durchzuführen. In anderen Untersuchungen, die ebenfalls den Zusammenhang von meteorologischen Parametern, wie Niederschlag, Schneehöhe oder Lufttemperatur, und dem Verhalten von Quellgewässern (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) analysierten, hatten ähnlich grosse Distanzen zwischen Meteostationen und Quellstandorten (Bastiancich et al., 2022; Völkl & Eybl, 2019). Für die deskriptive Analyse vom Verhalten der Quellen anhand von Ganglinien des Quellabflusses, der täglichen Niederschläge und des Seestands (oder in anderen Untersuchungen Schneehöhe) scheinen tägliche Mittelwerte resp. Tagessummen des Niederschlags ausreichend zu sein (AquaPlus, 2021b; Bastiancich et al., 2022; Völkl & Eybl, 2019). Für die Analyse der Parameter Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit als unmittelbare Reaktion der Gewässer auf die in dieser Arbeit untersuchten Niederschlagsereignisse hätte die Verwendung von halbstündlichen Messwerten vermutlich genauere Aussagen erlaubt. Die Auswertung mit den täglichen Mittelwerten zeigte bei vielen Gewässern eine ähnlich schnelle Reaktion. Aufgrund der geringen Anzahl an untersuchten Niederschlagsereignissen ist deren Repräsentativität für die gesamte Untersuchungsperiode eingeschränkt. Mit einer Anpassung der Auswahlkriterien oder dem Erstellen von neuen Kriterien hätte die Anzahl Niederschlagsereignisse erhöht werden können – allerdings auf Kosten der Signalstärke, resp. der Eindeutigkeit eines Niederschlagsignals.

## 4.2 Resultate

### Gegenüberstellung Abflussverhalten

In den Resultaten dieser deskriptiven Auswertung waren Signale sichtbar. Unter anderem, dass das Muster der normierten Abflusswerte vom Steinibach und Hinterer Läckibach die deutlichsten Ähnlichkeiten aufwies. Der Taaschibach und der Feldmoosbach wurden von AquaPlus (2021b) in dieselbe Quellgruppe eingeteilt. Diese Ähnlichkeit konnte mit dieser Arbeit nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die normierten Abflusswerte vom Feldmoosbach und Höchweidbach schienen ähnlicher zu sein. Das Abflussmuster des Schmallauibachs, als Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) passte weder zu den Oberflächengewässern noch zu den Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee. Abschliessend kann gesagt werden, dass die Resultate auf eine Gruppierung «Oberflächengewässer» und «Quellgewässer» hindeuten, jedoch eine klare Gruppierung anhand dieser Auswertung nicht gemacht werden kann. Die normierten Abflusswerte aller untersuchten Gewässer hatten trotz gewissen Ähnlichkeiten jeweils ein eigenes Muster. Das sah man ebenfalls in den Resultaten vom Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag, dass die Abflusswerte der verschiedenen Gewässer nicht immer zur exakt gleichen Zeit hoch resp. tief waren.

### Hauptkomponentenanalyse

Die beiden durchgeführten Hauptkomponentenanalysen (PCA) zeigten keine eindeutig zu interpretierenden Resultate. Weder das Ziel zu sagen, welche Parameter einen besonders starken Einfluss haben, noch das Ziel die untersuchten Gewässer zu gruppieren, konnten klar erreicht werden. Einzig die Streuung, welche unterschiedlich gross war und in unterschiedliche Richtung zeigte, deutete auf Unterschiede zwischen den Gewässern hin. So konnte mittels der ersten durchgeführten PCA aufgezeigt werden, dass die beiden Oberflächengewässer Steinibach und Hinterer Läckibach eine grössere Streuung aufwiesen als die Quellgewässer. Der Hinterer Läckibach wies dabei die grösste Streuung in Richtung Abflussvektors auf, das entspricht dem Resultat der Gegenüberstellung des Abflussverhaltens, bei welchem der Hinterer Läckibach ebenfalls die grössten normierten Abflusswerte aufwies. Der Steinibach streute ähnlich stark wie die Quellgewässer in Richtung des Abflussvektors, jedoch viel stärker in Richtung der Temperatur und Leitfähigkeit als diese. Die Ellipsen der untersuchten Gewässer überschritten sich auch in der zweiten mit den effektiven Abflusswerten durchgeführten PCA stark. Der Steinibach und der Taaschibach streuten am stärksten in Richtung des Abflussvektors. Obwohl bei dieser PCA ebenfalls monatliche Mittelwerte im Unterschied zu allen übrigen Auswertungen verwendet wurden, entsprach die starke Streuung der Abflusswerte vom Steinibach und Taaschibach dem Resultat des Vergleichs Abfluss – Seestand – Niederschlag. Bei welchem die beiden Gewässer den grössten Bereich von

Abflusswerten, der mit der PCA untersuchten Gewässer, aufwies (Steinibach: 0 – 510 l/s, Taaschibach: 0 – 840 l/s). Die undeutlichen Resultate könnten entstanden sein, weil nur die drei Parameter Abfluss, Leitfähigkeit und Wassertemperatur verwendet wurden. Goertzen und Eggers führten in ihrer Untersuchung ebenfalls eine PCA mit Umweltvariablen durch, um die Wirkfaktoren an den Gewässern zu identifizieren (2017). Es wurden dafür jedoch deutlich mehr Parameter verwendet. Als Resultat erhielten sie entsprechend mehr als die drei in dieser Arbeit erhaltenen Hauptkomponenten (PCs). Für die folglich detaillierter mögliche Interpretation der Resultate wurden die sechs aussagekräftigsten PCs verwendet (Goertzen & Eggers, 2017). Schlussendlich konnte mit dieser Auswertung ebenfalls aufgezeigt werden, dass sich die Gewässer hinsichtlich Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit unterschiedlich, jedoch nicht total verschieden, verhielten. Die stärkere Streuung der Werte von den beiden Oberflächengewässern bei der ersten durchgeführten PCA deutete schwach auf eine Gruppierung «Oberflächengewässer» und «Quellgewässer» hin.

### **Abhängigkeit der Abflusswerte vom Niederschlag**

Die statistische Analyse des Zusammenhangs von Abflusswerten und meteorologischen Parameter (Lufttemperatur oder Niederschlag) wurde auch in anderen Karstgebieten durchgeführt (Bastiancich et al., 2022; Fiorillo & Doglioni, 2010). Anstatt eine lineare Regressionsanalyse wurde bei diesen Untersuchungen eine Kreuzkorrelationsanalyse angewendet, welche im Vergleich zur Regressionsanalyse neben der Korrelation auch die Zeitverschiebung der beiden untersuchten Variablen aufzeigt. Die mögliche Zeitverschiebung zwischen Niederschlag und Abfluss konnte die in dieser Bachelorarbeit durchgeführte lineare Regressionsanalyse nicht berücksichtigen. Möglicherweise ist das neben der Trägheit des Systems ein Grund für den grösstenteils schwachen Zusammenhang. Der Zusammenhang war nicht stark, jedoch hochsignifikant, was Resultate von früheren Untersuchungen im Gebiet vom Glattalpsee und Bisistal, welche aussagten, dass die Gewässer stark von der Witterung abhängig sind (AquaPlus, 2021b; Winterhalter, 1948), unterstützt. Auch Untersuchungen in anderen Gebieten belegten, dass die Abflussdynamik von Karstquellen stark niederschlagsabhängig ist (Bastiancich et al., 2022; Dematteis et al., 1997; Schürch et al., 2004; Völkl & Eybl, 2019).

Trotz hochsignifikantem Resultat zeigte diese Auswertung, dass der Niederschlag als alleiniger Parameter nicht ausreicht, um eine Vorhersage vom Abfluss der untersuchten Gewässer zu machen. Andere Untersuchungen kamen ebenfalls zu diesem Schluss, begründeten dies aber vor allem durch die Schneeschmelze im Frühling, dass in dieser Zeit der Abfluss stärker durch die Schneeschmelze beeinflusst werde als durch den Niederschlag (Bastiancich et al., 2022; Völkl & Eybl, 2019). Jedoch wurden bei der vorliegenden Arbeit nur die Daten von Juli – Oktober verwendet, um den Einfluss der Schneeschmelze möglichst

auszuschliessen. Obwohl die Daten nur bis Oktober analysiert wurden, um neben der Schneeschmelze den Schneefall ebenfalls nicht zu berücksichtigen, gab es während der untersuchten Zeit einige Tage im Oktober, in denen bereits Schnee fiel. Der Niederschlag in Form von Schnee fliesst weder sofort oberflächlich ab, noch versickert er während dem Niederschlag (Rohrer & Lang, 1992). Dies führt dazu, dass der Niederschlag keinen unmittelbaren Einfluss auf den Abfluss resp. Pegel der Quellgewässer hat, was zum schwachen Zusammenhang beigetragen haben könnte. Ein bereits oben erwähnter Grund für den schwachen Zusammenhang könnte ausserdem die verzögerte Reaktion des Abflussanstiegs und je nach Niederschlagsereignis und Gewässer länger anhaltender erhöhter Abfluss nach dem Niederschlagsende sein. Auch Untersuchungen von Karstquellen im Dachsteinmassiv (Völkl & Eybl, 2019) oder in der Nähe von Stuttgart (Goldscheider et al., 2003) konnten zeigen, dass Abflusswerte nach einem Niederschlagsereignis unterschiedlich lange erhöht blieben.

Mittels der linearen Regressionsanalyse konnte keine der aufgestellten Hypothesen beantwortet werden. Eine Gruppierung aufgrund dieser statistischen Auswertung war ebenfalls nicht möglich, da ausser der Hinterer Läckibach ( $R^2 = 0.46$ ) und der Schmallaubach ( $R^2 = 0.10$ ) alle Gewässer einen sehr ähnlichen Zusammenhang ( $R^2$  von 0.19 bis 0.24) zwischen Niederschlag und Abfluss resp. Pegel aufwiesen.

### **Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag**

In den Wintermonaten war der Abfluss bei den untersuchten Gewässern resp. der Pegel bei Hinter Seeberg deutlich tiefer als während dem restlichen Jahr und Abflussspitzen waren viel seltener. Das könnte daran liegen, dass in dieser Zeit der Niederschlag in Form von Schnee fällt und somit nicht oder nur ein geringer Teil im Karstgebiet versickert und entsprechend nicht zu einer Abflusserhöhung führen kann (Malard et al., 2015). Das Verhalten der Gewässer veränderte sich im Frühling mit einsetzender Schneeschmelze. Besonders im April 2020 war eine längere sehr niederschlagsarme Zeit, dennoch stieg der Abfluss resp. der Pegel bei Hinter Seeberg deutlich an. Der Taaschibach bildete jedoch eine Ausnahme, denn bei ihm stieg der Abfluss während dieser Zeit nicht an. Der Seestand mit dem Minimum Ende März begann ebenfalls im April 2020 zu steigen, jedoch einige Tage nachdem der Abfluss der untersuchten Quellgewässer zu steigen begann. Diese Reihenfolge beobachtete auch AquaPlus (2021b) im Untersuchungszeitraum von 2011 bis 2014 und vermutete, dass das auf die Schneeschmelze in tieferen Lagen zurückzuführen war. Der Schnee sowie die Schneeschmelze scheinen somit einen ebenso grossen Einfluss auf die untersuchten Gewässer zu haben wie der Niederschlag. Das konnte auch in anderen Untersuchungen im Gebiet (AquaPlus, 2021b) aber auch in anderen Karstgebieten (Bastiancich et al., 2022; Völkl & Eybl, 2019) gezeigt werden.



Die beiden Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet scheinen stärker auf die Schneeschmelze zu reagieren als die untersuchten Quellgewässer. Das könnte daran liegen, dass der Karstkörper, durch den das geschmolzene Wasser fliesst, bevor es bei den Quellen ankommt, dämpfend wirkt. Ausserdem ist in Karstgebieten Wasser gespeichert, was für eine stetigere Wasserversorgung bei den Quellgewässern sorgen könnte (Dematteis et al., 1997; Goldscheider et al., 2003). Der Steinibach und Hinterer Läckibach als Oberflächengewässer werden hingegen hauptsächlich von oberflächlich abfliessendem Wasser gespiesen (Malard et al., 2015).

Als Reaktion auf Niederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr ist neben dem Abfluss der Gewässer auch der Glattalpsee mit einer zeitlichen Verzögerung gestiegen. Nach dem Anstieg des Glattalpsees konnte bei den Gewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) kein erneuter klarer Abflussanstieg beobachtet werden. Abschliessend kann gesagt werden, dass alle Gewässer mit einer Abflusserhöhung auf Niederschlagsereignisse reagieren, jedoch nicht alle Gewässer mit gleicher Intensität und Regelmässigkeit. Das bedeutet, dass mit dieser deskriptiven Auswertung nur die erste aufgestellte Hypothese bedingt beantwortet werden konnte, indem ersichtlich war, dass sich das Abflussmuster der Oberflächengewässer von dem der Quellgewässer unterschieden hat.

### **Reaktion auf Niederschlagsereignisse**

Die Reaktion auf das erste Niederschlagsereignis (18.-19.08.2013) mit der grössten Niederschlagssumme von 43.5 mm fiel bei allen untersuchten Gewässern am stärksten aus und dauerte am längsten. Ausserdem folgten die Reaktionen aller untersuchten Gewässer auf das Ereignis 1 einem ähnlichen Muster: abnehmende Leitfähigkeit und Wassertemperatur mit Abflusszunahme, wobei die Wassertemperatur teilweise mit wenigen Tagen Verzögerung reagierte. Dieses Muster ist für viele Karstquellen typisch (Vökl & Eybl, 2019).

Die Resultate vom Vergleich des ersten Niederschlagsereignisses mit den übrigen Ereignissen mit einer deutlichen kleineren Niederschlagssumme (15.6 mm bei Ereignis 2, 12.4 mm bei Ereignis 3, 15.1 mm bei Ereignis 4 und 5.6 mm bei Ereignis 5) deuten darauf hin, dass je grösser die Niederschlagssumme ist, desto stärker die Reaktion der Gewässer. Neben der tabellarischen Auswertung der fünf ausgewählten Ereignisse, stützte die grafische Darstellung der ersten drei Ereignisse diese Aussage ebenfalls. Diese zeigte, je grösser die Niederschlagssumme war, desto höher die Abflusswerte und entsprechend deutlicher waren die Abflusspeaks sichtbar. Ausserdem wurde der Vergleich von Ereignis 2 (24. - 25.08.2015) mit Ereignis 3 (28. - 29.10.2015) durchgeführt, um herauszufinden, ob die Niederschlagssumme in den 30 Tagen vor dem Ereignis (als indirekter Messwert für den Füllgrad des Karstspeichers) einen Einfluss auf die Reaktion der Gewässer haben könnte. Das Ereignis 2 folgte auf eine niederschlagsreiche Zeit, das Ereignis 3 hingegen auf eine

trockenere. Die einzigen Indizien, welche auf einen möglichen Einfluss der Niederschlagssumme in den vorhergehenden 30 Tagen hindeuten, sind erstens, dass beim Taaschibach und Schmallauibach bei Ereignis 3 ein schnellerer Anstieg des Abflusses beobachtet werden konnte als bei Ereignis 2. Bei den anderen Quellgewässern verlief der Anstieg bei den beiden Ereignissen gleich schnell. Zweitens dauerte es beim Ereignis 3 länger bis die Abflusswerte des Schmallauibachs, Taaschibachs und Feldmoosbachs wieder auf gleichem Niveau wie vor dem Niederschlag waren. Die teilweise schnellere und länger anhaltende Reaktion bei Ereignis 3 könnte daran liegen, dass die Abflusswerte der Quellgewässer beim Ereignis 2 bereits vor dem Niederschlag aufgrund der vorangehenden Niederschläge auf einem höheren Niveau waren als bei Ereignis 3. Darauf zurückzuführen sind vermutlich auch die mehrheitlich höheren Intensitäten beim Ereignis 3 im Vergleich zum Ereignis 2. Bei den Parametern Leitfähigkeit und Wassertemperatur der Quellgewässer war beim Vergleich dieser beiden Ereignisse kein einheitliches Muster zu erkennen. Daraus lässt sich schliessen, dass die Niederschlagsmenge während den Ereignissen den grösseren Einfluss auf die Reaktion hatte als der Füllgrad des Karstspeichers, welcher indirekt mit der Niederschlagssumme der vorhergehenden 30 Tagen gemessen wurde, denn die Unterschiede zwischen Ereignis 1 und 2 waren deutlicher als die Unterschiede zwischen Ereignis 2 und 3.

Beim Ereignis 1 war in der Reaktionszeit der Gewässer ein klarer Unterschied zwischen den Oberflächengewässern und den Quellgewässern sichtbar. Der Abfluss der Oberflächengewässer stieg am selben Tag wie es zu regnen begann, die Quellgewässer reagierten erst einen Tag später mit einem erhöhten Abfluss. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Regenwasser im Einzugsgebiet der Quellen zuerst versickert und den Weg durch den Karstkörper durchläuft, bevor es an den Quellstandorten austritt (Malard et al., 2015). Diese unterirdischen hydrologischen Wege, einerseits vom Glattalpsee zu den Quellen des Taaschibachs, Feldmoosbachs, Höchweidbachs und Hinter Seeberg (AquaPlus, 2013; Bögli, 1958, 1960; Winterhalter, 1948) und andererseits vom umliegenden Karstgebiet zu ebendiesen Quellen (Loiseleur, 1978; Loiseleur et al., 1985; Winterhalter, 1948) wurde mehrmals mittels Färbversuchen nachgewiesen. Das Durchführen von Färbversuchen ist in Karstgebieten eine auch in jüngerer Zeit noch angewandte Untersuchungsmethode, welche als effektive Methode zur systematischen Beschreibung des Einzugsgebiets von Quellen sowie als Grundlage für weitere Untersuchungen dient (Malard et al., 2015; Meus et al., 2006). In den Färbversuchen im Untersuchungsgebiet wurde die Zeit von der Eingabe des Färbmittels bis zur Detektion bei den Quellstandorten gemessen (Winterhalter, 1948). Beim Taaschibach und Hinter Seeberg dauerte es mit 18 – 32 Stunden länger bis die Farbe vom Glattalpsee bei den Quellen ankam als beim Feldmoosbach und Höchweidbach mit 14 – 25 Stunden (Winterhalter, 1948). Der Vergleich dieser Daten mit der Reaktionszeit, auf die in der

vorliegenden Arbeit ausgewählten Niederschlagsereignisse, konnte diesen Trend nicht bestätigen. Das liegt vermutlich vor allem daran, dass in dieser Arbeit Tagesmittelwerte verwendet wurden und so eine Detektion, von einem Unterschied von einigen Stunden nicht möglich ist.

Mit der tabellarischen und grafischen Auswertung der Reaktion der Gewässer auf ausgewählte Niederschlagsereignisse konnten die beiden aufgestellten Hypothesen nicht klar beantwortet werden. Einzig die stärkere Veränderung der Leitfähigkeit bei den Oberflächengewässern als bei den Quellgewässern stützt einen Teil der ersten Hypothese und der Abflussanstieg bei Ereignis 1, welcher bei den Oberflächengewässern einen Tag früher einsetzte als bei den Quellgewässern, stützt die zweite Hypothese. Der Schmallauibach als Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum Glattalpsee konnte aufgrund der Resultate nicht klar von den Quellgewässern mit nachgewiesener Verbindung (z.B. AquaPlus, 2021b) abgegrenzt werden.

### **4.3 Fazit und Ausblick**

In der vorliegenden Arbeit wurden die Messdaten von vier Quellgewässern mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b), von einem Quellgewässer ohne nachgewiesene Verbindung sowie von zwei Oberflächengewässern, die in den Glattalpsee mündeten, ausgewertet. Diese Auswertung der Messwerte zwischen 2012 und 2020 konnte aufzeigen, dass die untersuchten Gewässer unterschiedlich auf ein Niederschlagsereignis reagierten. Es konnte jedoch nur bedingt nachgewiesen werden, dass die mit dem Glattalpsee verbundenen Quellen unterschiedlich reagierten im Vergleich zu Oberflächengewässern und Quellgewässern ohne vermutete Verbindung. Die Resultate der Gegenüberstellung des Abflussverhaltens und die der Hauptkomponentenanalyse deuteten auf einen Unterschied zwischen den Quellgewässern und den Oberflächengewässern hin. Die lineare Regressionsanalyse konnte keinen klaren Unterschied aufzeigen. Der Vergleich Abfluss – Seestand – Niederschlag konnte klarer aufzeigen, dass sich das Abflussmuster der Oberflächengewässer von dem der Quellgewässer unterschied. Die Auswertung der Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse konnte hinsichtlich Unterschiede der Parameter Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit von den Quellgewässern und Oberflächengewässern lediglich aufzeigen, dass die Oberflächengewässer eine stärkere Veränderung der Leitfähigkeit aufwiesen als die Quellgewässer. Ausserdem konnte der Vergleich aufzeigen, dass der Abflussanstieg bei Ereignis 1 bei den Oberflächengewässern einen Tag früher einsetzte als bei den Quellgewässern. Allerdings konnte mit den Auswertungen in der vorliegenden Arbeit kein Unterschied zwischen den Quellgewässern mit hydrologischer Verbindung (z.B. AquaPlus, 2021b) und dem Quellgewässer ohne vermutete Verbindung nachgewiesen werden. Somit konnten Unterschiede zwischen den untersuchten Gewässern

klar nachgewiesen werden, diese Unterschiede liessen sich jedoch nur begrenzt auf die Gruppen «Quellgewässer mit Verbindung», «Quellgewässer ohne Verbindung» oder «Oberflächengewässer» zurückführen. Entsprechend konnten die beiden aufgestellten Hypothesen nur teilweise bestätigt werden.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Überblick der Gewässer im Untersuchungsgebiet, indem das Abflussverhalten allgemein sowie die Reaktion dieser Gewässer hinsichtlich Abfluss, Temperatur und Leitfähigkeit auf Niederschlagsereignisse sowie die zeitliche Verzögerung dieser Reaktion untersucht wurde. In weiterführenden Untersuchungen oder Datenauswertungen in der Region des Glattalpsees könnten für ausgewählte Auswertungen halbstündliche Messwerte verwendet werden, um genauere Aussagen zu ermöglichen. Ausserdem wäre es hinsichtlich der geplanten Teilabdichtung des Glattalpsees interessant die Streuung der langjährig gemessenen Abflusswerte der Quellgewässer zu analysieren, um monatliche Tiefstwerte zu bestimmen und damit kritische Abflussmengen, die nach der erfolgten Teilabdichtung nicht unterschritten werden dürfen, herzuleiten. Insbesondere die Bauphase der Teilabdichtung betreffend wäre es nützlich, Messwerte der Quellgewässer zum Parameter Trübung zu haben. Es wäre demnach erforderlich, diese Messungen vor geplantem Baubeginn durchzuführen, dass Vergleichswerte für die möglicherweise erhöhte Trübung während der Bauphase bereits bekannt wären.

## 5 Literaturverzeichnis

- AquaPlus. (2013). Konzessionserneuerung Muota-Kraftwerke: Vorgehenskonzept „Grundwasser und Quellen“. UVB HU 1. Stufe. S. 24.
- AquaPlus. (2021a). Muotakraftwerke Restwasserbericht. Fachbericht Hydrologie. Im Auftrag der ebs Energie AG. S. 123, Anhang.
- AquaPlus. (2021b). Muotakraftwerke UVB Teilprojekt 1, KW Glattalp. Fachbericht Grundwasser und Quellen. Im Auftrag der ebs Energie AG. S. 71, Anhang.
- B+S AG. (2021). Konzessionserneuerung Muota Kraftwerke—Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) 1. Stufe mit Pflichtenheft UVB 2. Stufe—Teilprojekt 1 Glattalp. Im Auftrag der ebs Energie AG. S. 169, Anhang.
- Bastiancich, L., Lasagna, M., Mancini, S., Falco, M., & De Luca, D. A. (2022). Temperature and discharge variations in natural mineral water springs due to climate variability: A case study in the Piedmont Alps (NW Italy). *Environmental Geochemistry and Health*, 44(7), S. 1971–1994. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00864-8>
- Bögli, A. (1958). Die hydrologischen Beziehungen zwischen Glattalpsee und Schwarzenbachquellen. Bericht über die Untersuchungen vom Februar 1958. Gutachten im Auftrag ebs.
- Bögli, A. (1960). Karsthydrographische Untersuchungen im Muotatal. *Regio Basiliensis*, 1(2), S. 68–79.
- Bögli, A. (1976). Karsthydrographische Studien im Einzugsgebiete der Muota.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2022). Auf in eine nachhaltige Zukunft. BFE-Magazin energieaplus - Energiemagazin des Bundesamtes für Energie. Abgerufen am 07.10.22 von <https://energieaplus.com/2022/07/08/auf-in-eine-nachhaltige-zukunft/>
- Cantonati, M., Füreder, L., Gerecke, R., Jüttner, I., & Cox, E. J. (2012). Crenic habitats, hotspots for freshwater biodiversity conservation: Toward an understanding of their ecology. *Freshwater Science*, 31(2), S. 463–480. <https://doi.org/10.1899/11-111.1>
- Dematteis, A., Hesske, S., Parriaux, A., & Tacher, L. (1997). Tafel 8.4 Haupttypen der Grundwasserleiter. In *Hydrologischer Atlas der Schweiz*.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK). (2021). Bundesrat verabschiedet Botschaft zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Medienmitteilung. Abgerufen am 07.10.22 von <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/medien/medienmitteilungen.msg-id-84018.html>

- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK). (2022). Energie: Stärkung der Versorgungssicherheit. Abgerufen am 07.10.22 von <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/energieversorgungssicherheit-ukraine-krieg.html>
- Fiorillo, F., & Doglioni, A. (2010). The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy). *Hydrogeology Journal*, 18(8), S. 1881–1895. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0666-1>
- Gerecke, R., Cantonati, M., Spitale, D., Stur, E., & Wiedenbrug, S. (2011). The challenges of long-term ecological research in springs in the northern and southern Alps: Indicator groups, habitat diversity, and medium-term change. *Journal of Limnology*, 70(1), S. 168–187. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2011.s1.168>
- Goertzen, D., & Eggers, T. O. (2017). Urbane Fließgewässer. Potenzial, Einflussfaktoren und Managementempfehlungen zur Förderung aquatischer Biodiversität in Städten. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 49(6), S. 188–194.
- Goldscheider, N., Hötzl, H., Käss, W., & Ufrecht, W. (2003). Combined tracer tests in the karst aquifer of the artesian mineral springs of Stuttgart, Germany. *Environmental Geology*, 43(8), S. 922–929. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0714-9>
- Küry, D., Lubini, V., & Stucki, P. (2017). Temperature patterns and factors governing thermal response in high elevation springs of the Swiss Central Alps. *Hydrobiologia*, 793(1), S. 185–197. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2918-0>
- Loiseleur, B. (1978). Campagne de coloration dans les préalpes de Schwyz. *Stalactite*, 28(1), S. 13–21.
- Loiseleur, B., Storti, J.-P., & Brocard, G. (1985). Recherches sur un karst haut-alpin: La Charetalp. *Stalactite*, 35(1), S. 3–19.
- Lubini-Ferlin, V., Stucki, P., Vincentini, H., & Küry, D. (2014). Ökologische Bewertung von Quell-Lebensräumen in der Schweiz. Entwurf für ein strukturelles und faunistisches Verfahren. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU.
- Malard, A., Jeannin, P.-Y., Vouillamoz, J., & Weber, E. (2015). An integrated approach for catchment delineation and conduit-network modeling in karst aquifers: Application to a site in the Swiss tabular Jura. *Hydrogeology Journal*, 23(7), S. 1341–1357. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1287-5>

- MeteoSchweiz. (2018). Manuelle Niederschlagsmessstation Glattalp. Messwerte. Abgerufen am 28.09.22 von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/messwerte.html?param=messnetz-manuell&station=GLT&chart=day>
- Meus, P., Käss, W., & Schnegg, P.-A. (2006). Background and detection of fluorescent tracers in karst groundwater.
- Rohrer, M., & Lang, H. (1992). Tafel 3.3 Wasseräquivalent der Schneedecke. In Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- Schürch, M., Egger, C., & Kozel, R. (2004). Tafel 8.5 Beobachtung von Grundwasserstand und Quellschüttung. In Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- Völkl, G., & Eybl, J. (2019). Künstliche und natürliche Markierungen des Karstwassers am Beispiel des Dachsteinmassivs. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 71(1–2), S. 51–65. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0536-y>
- Winterhalter, R. U. (1948). Glattalpsee. Schlussbericht über die geologischen Untersuchungen am Glattalpsee. S. 56.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtübersichtskarte des Untersuchungsgebiets (roter Rahmen entspricht dem Kartenausschnitt von Abb. 2).	5
Abbildung 2: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets. Standorte der Meteostation und der Quellen sowie deren Messstandorte im Untersuchungsgebiet.	6
Abbildung 3: Übersichtskarte der Messstandorte der beiden oberhalb des Glattalpsee liegenden Bächen Steinibach (links) und Hinterer Läckibach (rechts).	7
Abbildung 4: Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Schmallauibach, ein Quellgewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).	8
Abbildung 5: Übersichtskarte der Quell- und Messstandorte Taaschibach (links) und Feldmoosbach (rechts), Quellgewässer derselben Quellgruppe mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).	8
Abbildung 6: Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Höchweidbach, ein Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).	9
Abbildung 7: Übersichtskarte des Quell- und Messstandorts Hinter Seeberg, ein Quellgewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b).	9
Abbildung 8: Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b), dargestellt auf der x-Achse jeweils ein Gewässer, auf der y-Achse die anderen beiden Gewässer der Gruppe «ohne Verbindung».	16
Abbildung 9: Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (z.B. AquaPlus, 2021b), dargestellt auf der x-Achse jeweils ein Gewässer, auf der y-Achse die anderen beiden Gewässer der Gruppe «mit Verbindung».	17
Abbildung 10: Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung (y-Achse) und jeweils einem Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (x-Achse; z.B. AquaPlus, 2021b).	17
Abbildung 11: Gegenüberstellung der genormten Abflussdaten von 2012 – 2020 der Gewässer mit nachgewiesener hydrologischer Verbindung zum Glattalpsee (y-Achse; z.B. AquaPlus, 2021b) und jeweils einem Gewässer ohne vermutete hydrologische Verbindung (x-Achse).	18
Abbildung 12: Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit normierten Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.	19
Abbildung 13: Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.	20
Abbildung 14: Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Abfluss der Gewässer ohne vermutete Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.	21
Abbildung 15: Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Abfluss der Gewässer mit nachgewiesener Verbindung zum See (z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.	22



Abbildung 16: Lineare Regression zwischen der Tagesniederschlagssumme und dem Pegel bei Hinter Seeberg (Verbindung zum Glattalensee nachgewiesen; z.B. AquaPlus, 2021b) von 2012 – 2020 jeweils von Juli – Oktober.....	22
Abbildung 17: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme und der Abflusswerte des Steinibachs für die Jahre 2017 und 2020.....	24
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme und der Abflusswerte des Hinterer Läckibachs für die Jahre 2017 und 2020. ....	24
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Schmallauibachs für die Jahre 2017 und 2020. ....	25
Abbildung 20: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Taaschibachs für die Jahre 2017 und 2020. ....	25
Abbildung 21: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Feldmoosbachs für die Jahre 2017 und 2020. ....	26
Abbildung 22: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Abflusswerte des Hächweidbachs für die Jahre 2017 und 2020. ....	26
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Tagesniederschlagssumme, des Seestands und der Pegelwerte bei Hinter Seeberg für die Jahre 2017 und 2020. ....	27
Abbildung 24: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Steinibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.....	33
Abbildung 25: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Hinterer Läckibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. Hinweis: die Skala der Leitfähigkeit unterscheidet sich zu den übrigen Gewässern. ....	34
Abbildung 26: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Schmallauibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.....	34
Abbildung 27: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Taaschibach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.....	35
Abbildung 28: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Feldmoosbach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.....	35
Abbildung 29: Reaktion (Pegel, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) von Hinter Seeberg auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.....	36

Abbildung 30: Reaktion (Abfluss) vom Höchweidbach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	55
Abbildung 31: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Steinibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	55
Abbildung 32: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Hinterer Läckibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. Hinweis: die Skala der Leitfähigkeit unterscheidet sich zu den übrigen Gewässern. ....	56
Abbildung 33: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Schmallauibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	56
Abbildung 34: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Taaschibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	57
Abbildung 35: Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Feldmoosbach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	57
Abbildung 36: Reaktion (Abfluss) vom Höchweidbach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	58
Abbildung 37: Reaktion (Pegel, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) von Hinter Seeberg auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. ....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Quell- und Messstandorte mit Informationen zu Messdauer, gemessenen Parameter (Q: Abfluss, T: Wassertemperatur, $\sigma$ : Leitfähigkeit), vermutete Verbindung zum Glattalpsee, Koordinaten und Meereshöhe (Daten von ebs Energie AG).....	9
Tabelle 2: Meteorologische Übersicht der Jahre 2017 und 2020 im Vergleich zum gesamten Untersuchungszeitraums (2012-2020) mit den Mittelwerten und Standardabweichung der Schneehöhe, Lufttemperatur, Niederschlag und Seestand. ....	13
Tabelle 3: Klassen der Abflussvolumen [I] der sechs untersuchten Gewässer während den fünf ausgewählten Niederschlagsereignissen.....	15
Tabelle 4: statistische Kennwerte der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit normierten Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020. ....	19
Tabelle 5: statistische Kennwerte der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit Monatsmittelwerten von Abfluss, Leitfähigkeit und Temperatur von 2012 – 2020.....	20
Tabelle 6: Statistische Kenngrößen (p-value, $R^2$ ) der linearen Regression zwischen Tagesniederschlagssumme und Abfluss (resp. Pegel bei Hinter Seeberg) der Oberflächengewässer oberhalb des Glattalpsees (grün), Quellgewässer ohne vermutete Verbindung zum See (weiss) und Quellgewässer mit nachgewiesener Verbindung (blau) (z.B. AquaPlus, 2021b). ....	22
Tabelle 7: Details der ausgewählten Niederschlagsereignisse.....	28
Tabelle 8: Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 1 (14.08.-23.08.13) mit einer Niederschlagssumme von 43.5 mm. ....	29
Tabelle 9: Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 2 (20.08.-31.08.15) mit einer Niederschlagssumme von 15.6 mm. ....	30
Tabelle 10: Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 3 (28.10.-29.10.15) mit einer Niederschlagssumme von 12.4 mm. ....	30
Tabelle 11: Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 4 (06.09.-15.09.16) mit einer Niederschlagssumme von 15.1 mm. ....	31
Tabelle 12: Reaktionszeit und -intensität der Untersuchungsgewässer auf Ereignis 5 (16.07.-26.07.19) mit einer Niederschlagssumme von 5.6 mm. ....	32
Tabelle 13: Reaktion vom Steinibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse. ....	53
Tabelle 14: Reaktion vom Hinterer Läckibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.....	53
Tabelle 15: Reaktion vom Schmallauibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse. ....	53
Tabelle 16: Reaktion vom Taaschibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.....	53
Tabelle 17: Reaktion vom Feldmoosbach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse. ....	54
Tabelle 18: Reaktion vom Höchweidbach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse. ....	54
Tabelle 19: Reaktion von Hinter Seeberg auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.....	54

## **Anhang**

**Anhang A:** Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse – Tabellen mit Reaktion auf die 5 Niederschlagsereignisse nach Gewässer aufgeführt

**Anhang B:** Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse – zusätzliche Plots

## Anhang A: Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse – Tabellen mit Reaktion auf die 5 Niederschlagsereignisse nach Gewässer aufgeführt

**Tabelle 13:** Reaktion vom Steinibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Abflusspeak [Tage]	Start [Tage]	Abflussanstieg	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	1.5	0		4+	3.3	8+
Ereignis2	0.5	1		2	1.6	6
Ereignis3	0.5	1		3	1.3	5
Ereignis4	1	1		3	1.3	6
Ereignis5	0.5 / 3.5	1		5+	1.0	-

**Tabelle 14:** Reaktion vom Hinterer Läckibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Abflusspeak [Tage]	Start [Tage]	Abflussanstieg	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	0.5	0		4+	5.1	4+
Ereignis2	0.5	1		1	1.8	2
Ereignis3	0.5	0		3	2.1	3
Ereignis4	0	0		1	1.1	2
Ereignis5	-	-		-	-	-

**Tabelle 15:** Reaktion vom Schmallaubach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Abflusspeak [Tage]	Start [Tage]	Abflussanstieg	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	0.5	1		4+	1.7	4+
Ereignis2	0.5	1		1	1.2	2
Ereignis3	0.5	0		5+	- <sup>1</sup>	3+
Ereignis4	-	-		-	-	-
Ereignis5	-	-		-	-	-

<sup>1</sup> vor dem Abflussanstieg auf 6.6 l/s, führte der Schmallaubach kein Wasser (0 l/s), deshalb wurde die Intensität nicht berechnet

**Tabelle 16:** Reaktion vom Taaschibach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Abflusspeak [Tage]	Start [Tage]	Abflussanstieg	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	1.5	1		4	4.0	7
Ereignis2	0.5	1		2	1.4	5
Ereignis3	0.5	0		3	2.1	4
Ereignis4	1	1		2	1.6	5
Ereignis5	1.5	0		5+	2.3	-

**Tabelle 17:** Reaktion vom Feldmoosbach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Abflusspeak [Tage]	Start Abflussanstieg [Tage]	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	1.5	1	4+	2.6	3+
Ereignis2	0.5	1	2	1.1	1
Ereignis3	0.5	1	4	1.1	1
Ereignis4	1	1	2	1.1	1
Ereignis5	-	-	-	-	-

**Tabelle 18:** Reaktion vom Höchstweidbach auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

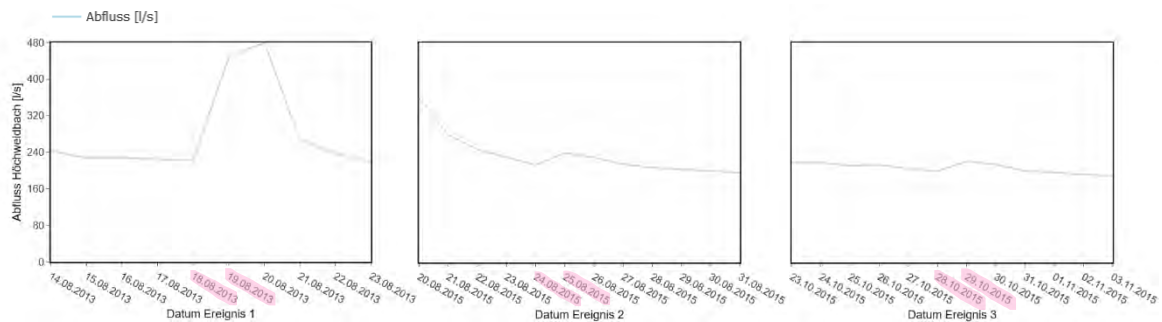
	Abflusspeak [Tage]	Start Abflussanstieg [Tage]	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]	Klasse Abflussvolumen
Ereignis1	1.5	1	4	2.2	9
Ereignis2	0.5	1	3	1.1	7
Ereignis3	0.5	1	3	1.1	7
Ereignis4	1	1	2	1.0	6
Ereignis5	-	-	-	-	-

**Tabelle 19:** Reaktion von Hinter Seeberg auf die ausgewählten Niederschlagsereignisse.

	Pegelpeak [Tage]	Start Pegelanstieg [Tage]	Abfluss ≤ Abfluss vor Ereignis [Tage]	Intensität [-]
Ereignis1	-	-	-	-
Ereignis2	0.5	1	3	1.2
Ereignis3	0.5	1	3	1.1
Ereignis4	1	1	2	1.0
Ereignis5	-	-	-	-

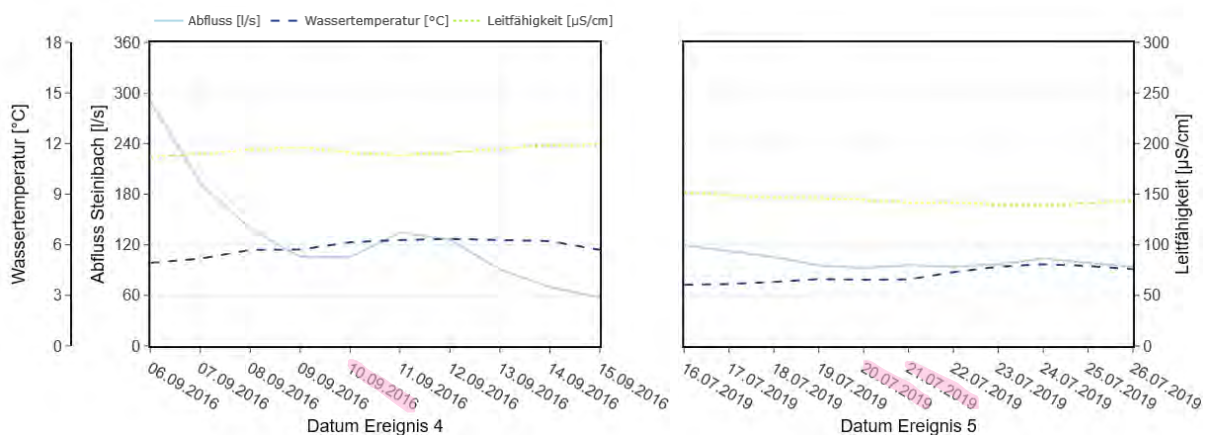
## Anhang B: Reaktion auf ausgewählte Niederschlagsereignisse – zusätzliche Plots

### Ereignisse 1 bis 3

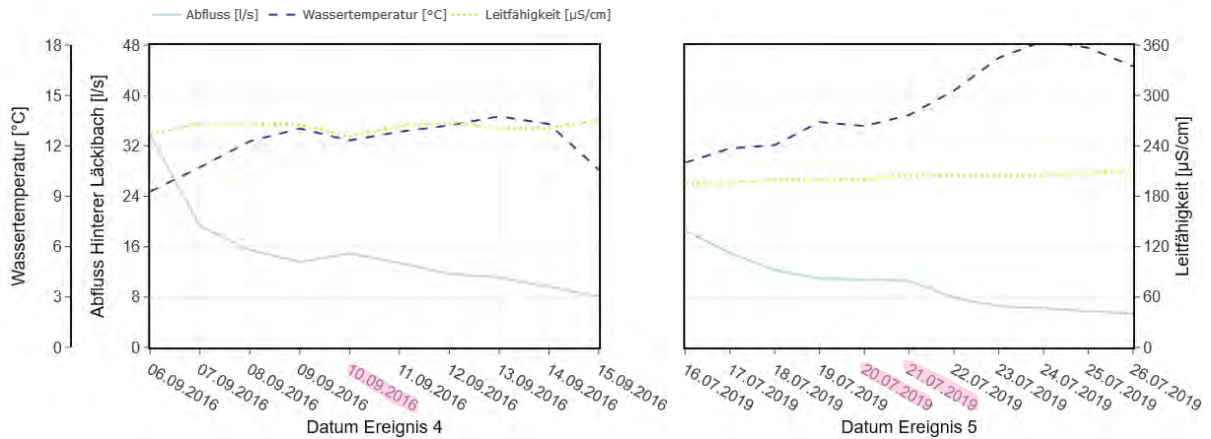


**Abbildung 30:** Reaktion (Abfluss) vom Höchstweidbach auf Niederschlagsereignis 1 (Niederschlagssumme = 43.5 mm), Ereignis 2 (Niederschlagssumme = 15.6 mm) und Ereignis 3 (Niederschlagssumme = 12.4 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

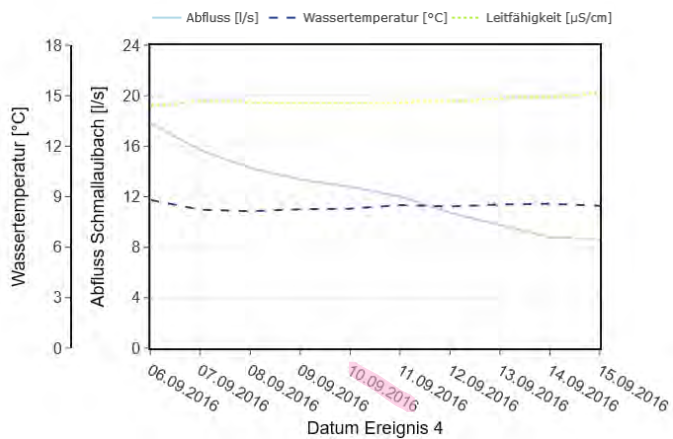
### Ereignisse 4 und 5



**Abbildung 31:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Steinibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.

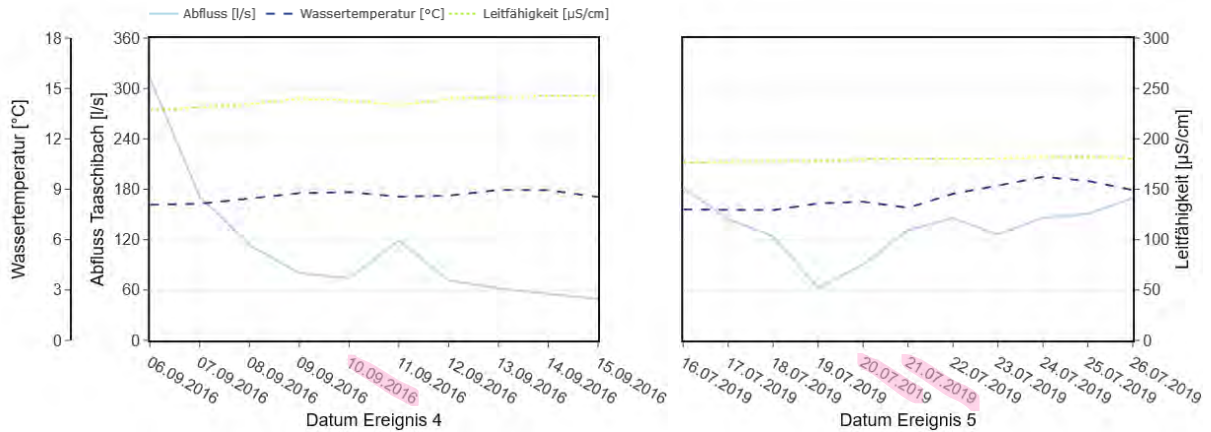


**Abbildung 32:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Hinterer Läckibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert. Hinweis: die Skala der Leitfähigkeit unterscheidet sich zu den übrigen Gewässern.

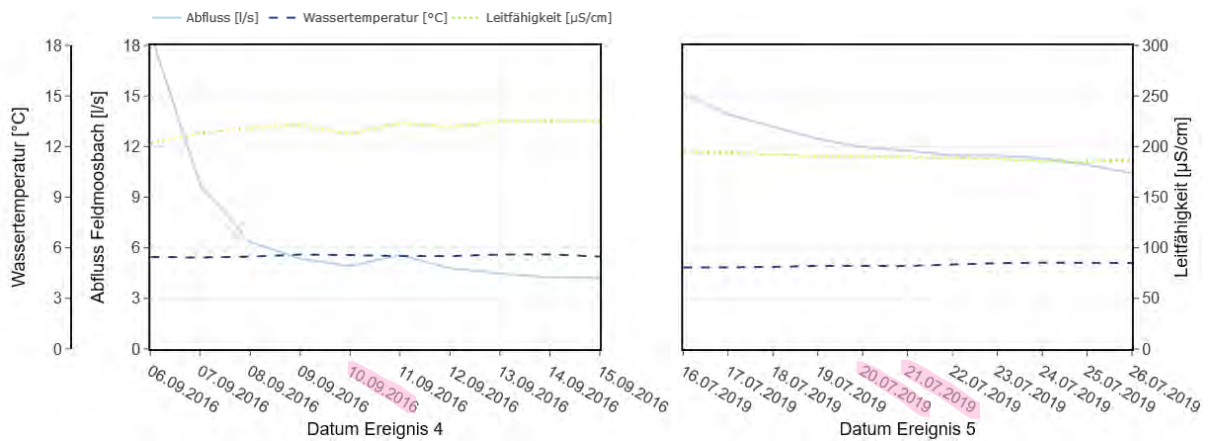


**Abbildung 33:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Schmallaubach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm), Regentage rosa markiert.

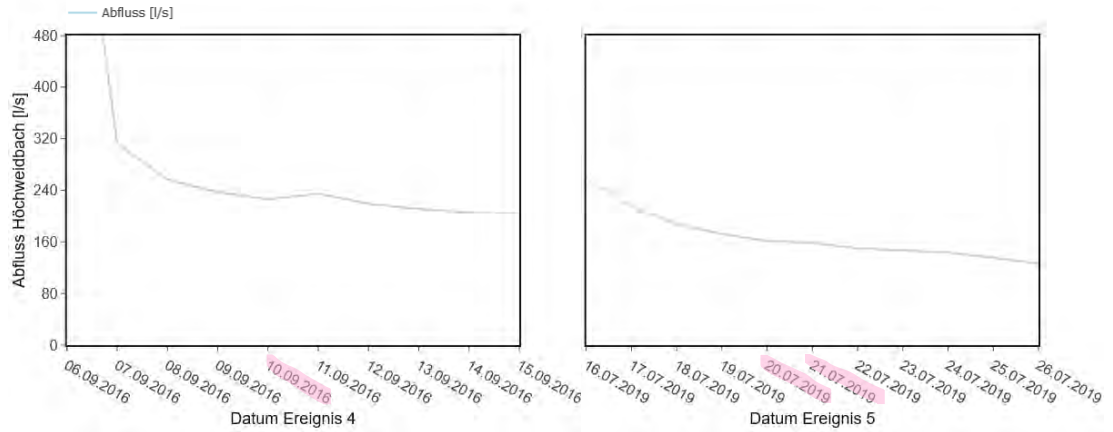




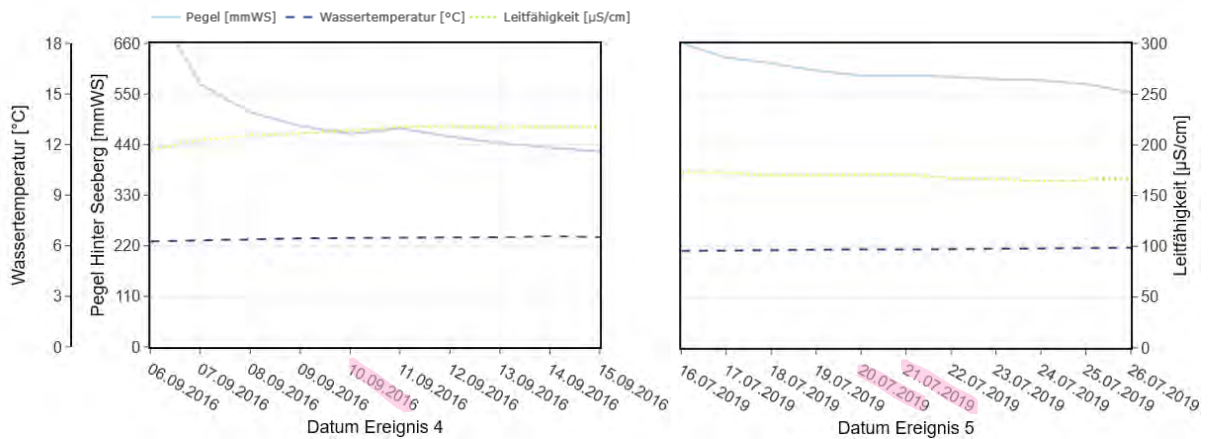
**Abbildung 34:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Taaschibach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.



**Abbildung 35:** Reaktion (Abfluss, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) vom Feldmoosbach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.



**Abbildung 36:** Reaktion (Abfluss) vom Höchweidbach auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.



**Abbildung 37:** Reaktion (Pegel, Wassertemperatur und Leitfähigkeit) von Hinter Seeberg auf Niederschlagsereignis 4 (Niederschlagssumme = 15.1 mm) und Ereignis 5 (Niederschlagssumme = 5.6 mm), Regentage in der x-Achse rosa markiert.