

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU

Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern in der Schweiz: Ökologische Auswirkungen

Angela Thür, Astrid Bjørnsen Gurung, Manfred Stähli



2. Dezember 2020

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Auftragnehmerin: WSL

AutorInnen: Angela Thür, Astrid Björnsen Gurung und Manfred Stähli

Begleitung BAFU: Petra Schmocker-Fackel, Fabia Hüsler und Edith Oosenbrug

Begleitgruppe: Martin Barben (BAFU), Jan Béguin (BLW), Guido Federer (BFE), Rolf Gurtner (BAFU), Bernhard Hohl (BFE), Roland Hohmann (BAFU), Christian Holzgang (BAFU), Andreas Inderwildi (BAFU), Andreas Knutti (BAFU), Philipp Röser (BAFU), Carlo Scapozza (BAFU), Ulrich Sieber (BAFU), Markus Thommen (BAFU)

Titelbild: Grimsensee und Räterichsbodensee mit Grimsel Hospiz (Foto: Angela Thür)

Inhalt

1	Hintergrund.....	4
2	Definitionen	4
2.1	Mehrwecknutzung von Wasserspeichern.....	4
2.2	Mehrweckspeicher.....	4
2.3	Speichertypen und Nutzungen.....	5
2.4	Gewässerraum	5
3	Systembeschreibung «Mehrweckspeicher».....	5
4	Ökologische Auswirkungen der Regulierung und des Neubaus von Wasserspeichern.....	6
4.1	Übersicht der Literatur und Fallstudien.....	6
4.2	Schlüsselfaktoren im System Mehrweckspeicher	9
4.2.1	Wassertemperatur	9
4.2.2	Pegelschwankungen.....	10
4.3	Fallstudien	11
4.3.1	Bielersee	11
4.3.2	Neuenburgersee.....	12
4.3.3	Lago Maggiore	12
4.3.4	Sihlsee	12
4.3.5	Lago di Poschiavo und Lago Bianco.....	13
4.3.6	Grimmsee und Oberaarsee	14
4.3.7	Neubau eines Speichers.....	14
4.3.8	Talsperreerhöhung.....	15
4.3.9	Bewässerungsteiche.....	16
4.3.10	Beschneigungsteiche	17
4.3.11	Fliessgewässer.....	17
4.4	Fazit Literatur	18
5	Typisierung Mehrweckspeicher: morphologischer Kasten.....	18
6	Ökologische Auswirkungen von Mehrweckspeichertypen.....	20
6.1	Typ A – Mittellandsee	22
6.2	Typ B – Pumpspeicher	23
6.3	Typ C – Fliessgewässer.....	26
6.4	Typ D – Neubau eines Speichers.....	27
6.5	Typ E – Talsperreerhöhung	28
6.6	Typ F – Bewässerungsteich	29
6.7	Typ G – Beschneigungsteich.....	30
6.8	Fazit Speichertypen.....	31
6.9	Chancen.....	31
7	Fazit und Ausblick	32
8	Danksagung.....	32
9	Literatur.....	34

1 Hintergrund

Der vorliegende Bericht ist Teil des CH2018-Hydro-Projekts «Wasserspeicher», welches die Bedeutung von natürlichen und künstlichen Speichern zur Minderung zukünftiger Wasserknappheit in der Schweiz ermittelte. Der zweite Teil des Projektes befasste sich mit der Fragestellung nach dem nachhaltig nutzbaren Potenzial der Wasserspeicher unter Berücksichtigung der Ökologie, des Landschaftsschutzes, der Nutzungskonkurrenz, der Kosten, der rechtlichen Randbedingungen sowie der Gouvernanz. Dieser Bericht lotet den Handlungsspielraum für eine verstärkte Mehrzwecknutzung der Wasserspeicher unter Berücksichtigung der Ökologie aus. Insbesondere beantwortet er die folgenden Fragen:

- a. Welche positiven wie auch negativen Auswirkungen hat eine veränderte oder verstärkte Mehrzwecknutzung von bestehenden, natürlichen und künstlichen Speichern auf die Ökologie des betroffenen Gewässerraums, auch unterhalb des Speichers?
- b. Welches wären die wichtigsten ökologischen Auswirkungen von neuen, künstlichen Speichern im periglazialen Gebiet, resp. im Mittelland?

Zur Bearbeitung der Fragen wurden in einem ersten Schritt Literatur über existierende Fallstudien gesammelt und ausgewertet sowie zahlreiche ExpertInnen-Interviews durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Konzeptvorschläge wurden am 11. Juni 2020 in einem ExpertInnen-Workshop diskutiert und danach weiterentwickelt.

Kapitel 2 definiert die verwendeten Begriffe, Kapitel 3 beschreibt das System «Mehrzweckspeicher» mit allen zu berücksichtigenden Faktoren, Kapitel 4 stellt die vorhandene Literatur inklusive Fallbeispielen vor, Kapitel 5 präsentiert eine Generalisierung der Mehrzweckspeicher in sieben Typen, Kapitel 6 verknüpft die sieben Typen mit der Literatur und Kapitel 7 befasst sich mit weiterführenden Forschungsfragen, stellt einen möglichen Ansatz vor und zieht das Fazit.

2 Definitionen

2.1 Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern

In der Schweiz stellt die Mehrzwecknutzung von bestehenden und neuen Speichern eine mögliche Klimaanpassungsmassnahme für langandauernde Trockenperioden dar. Damit erlangte das Thema in den letzten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit. Ein natürlicher See kann beispielsweise für die Trinkwasserversorgung, die landwirtschaftliche Bewässerung sowie für Kühlzwecke genutzt werden. Das Reservoir eines Speicherkraftwerkes kann nebst der Energiegewinnung auch für Freizeitaktivitäten, für die Entnahme von Löschwasser und für den Hochwasserschutz zur Verfügung stehen. Für die Mehrzwecknutzung kommen sowohl künstliche Speicher als auch natürliche Seen infrage.

2.2 Mehrzweckspeicher

Wird ein See oder ein künstlicher Wasserspeicher für mehrere Zwecke genutzt, spricht man von einem Mehrzweckspeicher. Diese unterscheiden sich durch zahlreiche Eigenschaften wie z.B. der Höhenlage, ihrer Regulierungsart oder der Grösse. So vielfältig wie die Wasserspeicher und die damit verbundenen Nutzungen sind auch deren Auswirkungen auf verschiedene Bereiche der Ökologie. Pauschale Aussagen zu den ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern werden daher kaum möglich sein. Das Thema bedarf einer differenzierteren Betrachtung.

Der Diskurs um eine griffige Definition für den Begriff «Mehrzweckspeicher» ist relativ jung. Im Zusammenhang mit Wasserkraft wurden Mehrzweckspeicher wie folgt beschrieben: «Multipurpose hydropower reservoirs are designed and/or operated to provide services beyond electricity generation, such as water supply, flood and drought management, irrigation, navigation, fisheries, environmental services and recreational activities, etc.» (Branche, 2015, p. 8).

Kellner und Weingartner (2018) setzen Mehrzweckspeicher in Bezug zu klimabedingten Anpassungsmassnahmen für die Schweiz. Sie sehen mögliche Nutzungen in der Energieerzeugung, in Systemdienstleistungen, im Sedimentrückhalt, im Hochwasserschutz, in der Beschneigung und der Bewässerung, für Trinkwasser und Löschwasser, für die thermische Nutzung, für die Speisung von Oberflächengewässern in lang andauernden Trockenperioden sowie in der Schaffung von touristischen Zonen.

Die Praxis von mehrzweckgenutzten Speichern ist eigentlich gar nicht neu, wie Beispiele aus dem Wallis und dem Graubünden zeigen. Im Graubünden werden Wasserkraftspeicher, zusätzlich zur Stromproduktion, verbreitet auch für die Fischerei, den Tourismus sowie zur Bewässerung genutzt (Roth, 2019). Im Wallis wird die Nutzung kleiner Speicher häufig kombiniert für die Beschneigung, für Löschwasser und Tränkewasser für Vieh. Grössere Speicher hingegen kommen für die Energieproduktion, Restwasser, Bewässerung, Löschwasser und für den Hochwasserschutz zum Einsatz (Maurer, 2020). Auch die natürlichen Seen der Schweiz werden seit jeher für unterschiedlichste Zwecke genutzt.

2.3 Speichertypen und Nutzungen

Die folgende Auflistung nennt verschiedene, miteinander kombinierbare Speichertypen (siehe Kapitel 6) und Nutzungen:

Speichertypen: Speicherkraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke, Laufwasserkraftwerke, natürliche Seen (reguliert und nicht reguliert), Beschneigungsteiche, Bewässerungsteiche, Trinkwasserspeicher, neue Speicher (z.B. Gletscherseen) und Ausbau Speicher (z.B. Talsperreenerhöhungen). Auch Fliessgewässer werden in die Betrachtung aufgenommen, weil sie oft mehrfach genutzt werden (siehe Kapitel 4.3.11). Grundwasser als Speichertyp wird hier nicht näher untersucht.

Nutzungen: Energieversorgung (Energieproduktion durch Wasserkraft; Energiespeicherung durch Wasserrückhalt und Umlagerung von Wind- und Sonnenenergie), landwirtschaftliche Bewässerung, Bewässerung Golfplatz, Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz, Schifffahrt, Gütertransport, Tourismus, Naherholung, Ökologie, Löschwasser, Geschiebe- und Sedimentrückhalt, technische Beschneigung, Photovoltaik (PV-Module schwimmend auf Gewässeroberfläche oder befestigt an Staumauer), Speisung Oberflächengewässer während Trockenperioden (saisonaler Wasserrückhalt), Fischerei, Fischzucht, Tränkewasser für Vieh, Regulierung Mückenaufkommen (Mückengrenze), thermische Nutzung (Heizen und Kühlen), Abwasseraufnahme, Hygiene.

2.4 Gewässerraum

Der Gewässerraum ist für Flüsse und Seen unterschiedlich definiert. Bei Flüssen umfasst der Gewässerraum sowohl die natürliche Gerinnesohle wie auch den Uferbereich (BPUK et al., 2019). Für stehende Gewässer bezeichnet der Gewässerraum den vom See beeinflussten Uferbereich. Der Gewässerraum steht dem Gewässer also zur Verfügung und gewährleistet insbesondere den Schutz von Hochwasser sowie natürliche Funktionen, zum Beispiel als Lebens- und Erholungsraum.

Im vorliegenden Bericht bezieht sich die Analyse der ökologischen Auswirkungen verstärkter Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern folglich sowohl auf den Wasserspeicher und den entsprechenden Gewässerraum, wie auch auf den Gewässerraum des Unterlaufs. Das Grundwasser wird nicht berücksichtigt.

3 Systembeschreibung «Mehrzweckspeicher»

Das System «Mehrzweckspeicher» kann örtlich in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Naheliegend ist die Betrachtung des *Speichers*, d.h. des Wasserkörpers und des Gewässerraums um den Speichersee herum. Nicht minder wichtig ist aber auch der *Unterlauf*, der Gewässerraum unterhalb des Speichers, der mit diesem über den Abfluss verbunden ist und eine grosse Fläche einnehmen kann.

Um das System «Mehrzweckspeicher» besser fassbar zu machen und zu Aussagen über dessen ökologischen Auswirkungen zu gelangen, sollten mindestens folgende Faktoren und ihre Unterfaktoren berücksichtigt werden: der Standort des Speichers, der oben- und unterliegende Gewässertyp, die vorhandene Infrastruktur, das Management des Speichers und die Nutzungen (Abbildung 1).

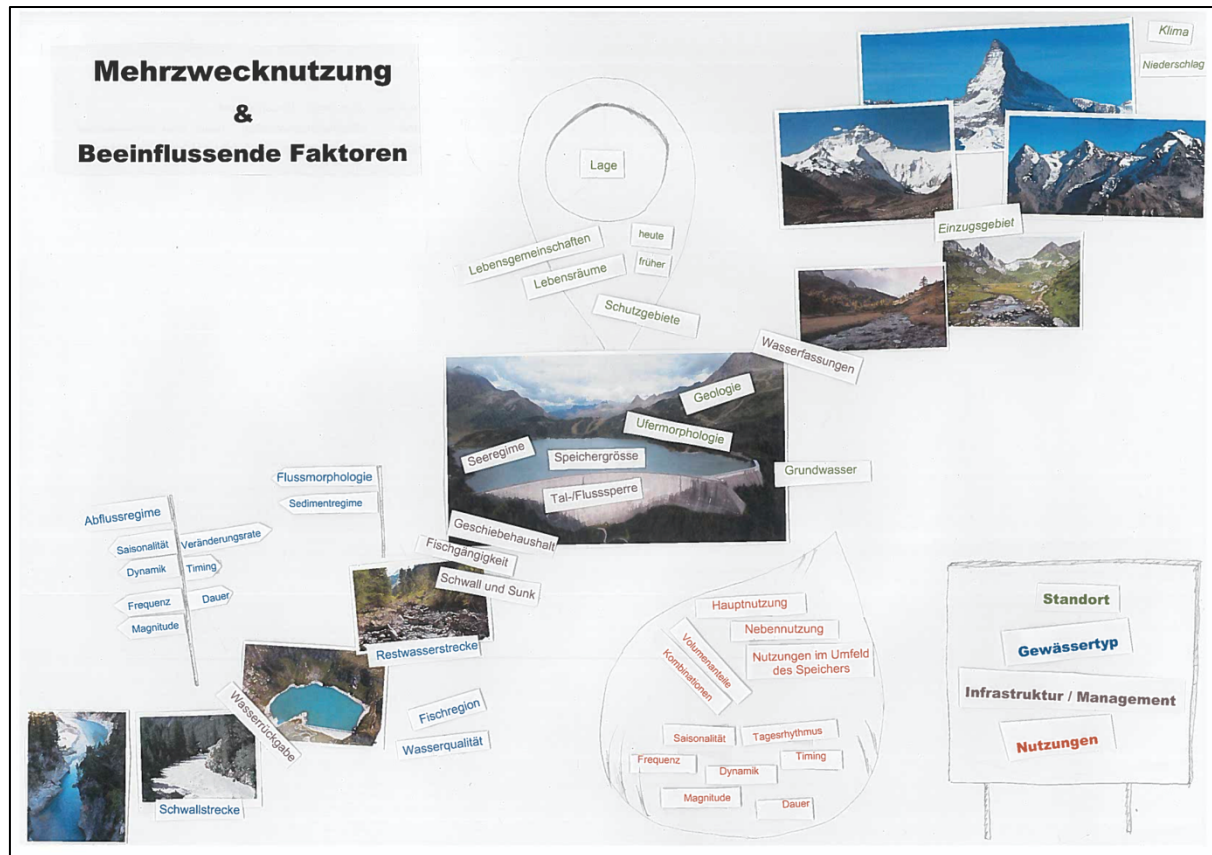


Abbildung 1: Standort, Gewässertyp, vorhandene Infrastruktur und Nutzungen sind wichtig für die Beschreibung des Mehrzweckspeicher-Systems. Sowohl Ober- wie auch Unterlauf müssen für die Einschätzung der ökologischen Auswirkungen zwingend in Betracht gezogen werden.

Im ExpertInnen-Workshop vom 11. Juni 2020 wurden die Faktoren nach Wichtigkeit gewichtet. Dabei wurde die Betrachtung des natürlichen Abflussregimes als am wichtigsten eingestuft, darauf folgten die Grösse des Speichers, das Volumen der Nutzungen und die Saisonalität der Nutzungen. Zudem wurde für sehr wichtig befunden, die Haupt- und die Nebennutzungen eines Speichers zu definieren, da dies bezüglich der Menge und der Saisonalität des Wasserverbrauchs aussagekräftig wäre.

4 Ökologische Auswirkungen der Regulierung und des Neubaus von Wasserspeichern

4.1 Übersicht der Literatur und Fallstudien

Kapitel 4 stellt die Erkenntnisse zu den ökologischen Auswirkungen der Regulierung und des Neubaus von Wasserspeichern allgemein dar. Zu den ökologischen Auswirkungen der Mehrzwecknutzung haben wir in unserer Literatursuche keine belastbaren, publizierten Studien und Ergebnisse gefunden. Daher greift dieses Kapitel hauptsächlich auf Fallstudien und Literatur zu den ökologischen Auswirkungen einzelner Nutzungen von Wasserspeichern zurück (Abbildung 2), nicht aber auf die Auswirkungen einer kombinierten Nutzung.

Die folgende Karte und die Tabellen zeigen die Ergebnisse dieser breit angesetzten Literaturrecherche. Es wurden ökologische Auswirkungen von Speichern unterschiedlicher Arten und Grössen im Mittelland, in den Voralpen sowie in den Alpen gefunden. Auf die Auswirkungen der Wasserkraftnutzung auf den Unterlauf (Schwall und Sunk, Restwasser, etc.) wurde bewusst nicht eingegangen, da es dazu schon ein breites Wissen gibt.



Abbildung 2: Geographische Lage der Wasserspeicher, zu denen Informationen über ökologischen Auswirkungen vorliegen.

Tabelle 1: Gewässer zu denen Literatur zu den ökologischen Auswirkungen vorliegt.

Gewässer	Literatur
Beschneieungsteich,Ahornsee (Tirol, AT)	(Mountaintalk, 2016)
Bewässerungsteich Jucker Farm	(Jucker Farm AG, 2015)
Bewässerungsteiche, Trams (Tirol, Österreich)	(Glaser et al., 2003)
Bielersee	(Fuhrer et al., 2019)
Grimselsee	(Bonalumi et al., 2011; Loser, 2012; Schweizer et al., 2012)
Klöntalersee	(Sollberger et al., 2017)
Lac de la Gruyère	(Etat de Fribourg, 2020)
Lac de Moiry	(Fuchs et al., 2019)
Lac de Neuchâtel	(Baudraz, 2018)
Lago Bianco	(Bonalumi et al., 2012; Bonalumi & Schmid, 2011)
Lago di Livigno, Spöl	(Rey et al., 2002)
Lago Maggiore	(Fenocchi et al., 2017; SRF, 2019; Swissinfo, 2019)
Lago di Poschiavo	(Bonalumi et al., 2012; Bonalumi & Schmid, 2011; Seehausen & Michel, 2015)
Lai da Marmorera	(Fuchs et al., 2019)
Oberaarsee	(Bonalumi et al., 2011)
Rhône	(Meier & Wüest, 2004)
Sihlsee	(Kobler et al., 2018, 2019; Kobler & Schmid, 2019)
Stausee Mattmark, Vispa	(Maurer, 2020)
Triftsee	(Schweizer et al., 2019)
Zürichsee	(Schmid & Köster, 2016)

Tabelle 2: Literatur zu verschiedenen Nutzungsoptionen und -Kategorien (horizontal) und möglichen Auswirkungen (vertikal).

		Anpassung Wehreglement (See)	Anpassung WK-Konzessionen (Wasserkraftspeicher)	Konzessionen an Nutzergruppen	Trinkwasser aus Fließgewässer	Ausbau Speicherkapazität (Talsperrenerrhöhung)	Neubau Speicher	Fließgewässer	schweizweit	Modellierung	Experiment	international
Wasserquantität	Pegelschwankungen	01, 20, 48	04			142				25	25, 27	26
	Abflussschwankungen						11	42				
	Hochwasser	01						37, 43				
	Niedrigwasser	09						09	09			
Wasserqualität	Wasserqualität											08
	Wassertemperatur	44, 17	04, 31, 32, 02		18		11	06, 24, 38	39			21, 22
	Trübung		04, 02, 03				14					
	Nährstoffe		31, 32									
	Sauerstoff		04, 32				29					133
	Schichtung	17	04, 31, 03									
	Eisbedeckung		04, 31, 32, 33									
Geschiebetransport	Geschiebetransport						11					
Ökosystem	Ökosystem	36				19, 45, 16	13, 15, 41, 28	36	36			28, 12, 34
Fauna	Fauna			23								
	Fische	10					14	07, 24		07	25, 27	26
Flora	Flora			23			40					
	Moor	01	35			30, 47						
	Sumpf	01, 48										
Atmosphäre	Lufttemperatur		39					39				
	Klimagasemissionen		46									
Diverse	Folie						05, 29					

Tabelle 3: Legende zu Tabelle 2.

Literatur	Gewässer/Gebiet/Art
01 Baudraz (2018)	Neuenburgersee
02 Bonalumi et al. (2011)	Grimsensee
03 Bonalumi & Schmid (2011)	Lago di Poschiavo, Lago Bianco
04 Bonalumi et al. (2012)	Lago di Poschiavo, Lago Bianco
05 Bryner et al. (2020)	Bewässerungsteiche, Folie
06 Cardenas et al. (2014)	Urbach, BE
07 Carraro et al. (2017)	Wigger (LU, SO, AG)
08 Delpla et al. (2009)	Review
09 Dübendorfer et al. (2019)	Trockenheit Schweiz 2018
10 Eawag, 2015	Valposchiavo, Engadin
11 Ehrbar et al. (2018, 2019)	Schweizer Gletscher
12 ECPN (2010)	Kleingewässer, international
13 Farinotti et al. (2016)	schweizweit/Alpen
14 Eppenberger-Media GmbH 2020)	Bewässerungsteiche
15 Farinotti et al. (2019)	Neubau von Speichern, international
16 Felix et al. (2020)	Moiry (VS), Marmorera (GR)
17 Fenocchi et al. (2017)	Lago Maggiore
18 Fenrich (2018)	internationale Fallstudien

19 Fuchs et al. (2019)	Moiry (VS), Marmorera (GR)
20 Fuhrer et al. (2019)	Bielersee
21 Gaudard et al. (2017)	Stechlinsee, Norddeutschland
22 Gaudard et al. (2018)	Overview
23 Glaser et al. (2003)	Tramser Bewässerungsteiche
24 Hari et al. (2006)	25 Schweizer Flüsse
25 Hirsch et al. (2016)	Modellierung, Experiment
26 Hirsch et al. (2017)	Review
27 Hirsch (2019)	Experiment
28 Hodson et al. (2015)	Review
29 Jucker Farm AG (2015)	Bewässerungsteich
30 Keystone (2019)	Grimsensee
31 Kobler et al. (2018)	Sihlsee
32 Kobler et al. (2019)	Sihlsee
33 Kobler & Schmid (2019)	Sihlsee
34 Koschorreck et al. (2020)	Ökosystemdienstleistung künstlicher Gewässer
35 Loser (2012)	Grimsensee
36 Lubini et al. (2012)	Gefährdete Arten der Schweiz
37 Maurer (2020)	Vispa (Stausee Mattmark)
38 Meier & Wüest (2004)	Rhône
39 Michel et al. (2020)	52 Schweizer Einzugsgebiete
40 Mountaintalk (2016)	Beschneigungsteich Ahornsee
41 Nemergut et al (2007)	Peru
42 Person et al. (2014)	oberes Aareinzugsgebiet
43 Rey et al. (2002)	Spöl (Lago di Livigno)
44 Schmid, M., & Köster, O. (2016)	Zürichsee
45 Schweizer et al. (2012)	Oberhasli
46 Sollberger et al. (2017)	Klöntalersee
47 SRF (2020)	Grimsensee
48 swissinfo (2019)	Lago Maggiore
49 Yvon-Durocher et al. (2010)	Modell und Experiment

4.2 Schlüsselfaktoren im System Mehrzweckspeicher

Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten Zusammenhänge zwischen der Nutzung eines Gewässers und den davon betroffenen physikalischen, biochemischen und ökologischen Prozessen, die kaskadisch miteinander verbunden sind. Im Laufe der Recherchen für diese Arbeit wurde zunehmend klar, dass das «Ökosystem Mehrzweckspeicher» im Zusammenspiel mit den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten nicht allgemein beschrieben werden kann, sondern stark von den spezifischen Standortfaktoren (Kapitel 3) und dem Umfang der Nutzungen abhängen. Zu den Schlüsselfaktoren gehören Wassertemperatur (Kapitel 4.2.1) und Pegelschwankungen (Kapitel 4.2.2), die unterstehend, eingehend beschrieben werden.

4.2.1 Wassertemperatur

Die Wassertemperatur von Oberflächengewässern wird durch den Abfluss, den Niederschlag, die Lufttemperatur und flussaufwärts gelegene Seen bestimmt. Der Klimawandel hat eine Erwärmung der Lufttemperatur sowie veränderte Abflüsse und Niederschläge zur Folge, was auch die Wassertemperatur von Flüssen und Seen beeinflusst. In der Schweiz hat die Wassertemperatur in Flüssen in den letzten 40 Jahren (1979-2018) um ca. 0.33 °C pro Jahrzehnt zugenommen (Michel et al., 2020). Alpine Bäche sind von der Erwärmung weniger stark betroffen als Flüsse im Mittelland. Obwohl die Lufttemperatur auch in den Alpen steigt, nimmt die Wassertemperatur alpiner Bäche

vergleichsweise weniger stark zu, weil die Schnee- und Gletscherschmelze ausgleichend wirkt. Dies gilt jedoch nur solange noch Schnee und Eis vorhanden sind. Ähnlich verhält es sich für Einzugsgebiete mit Speicherseen mit intensivem Schwallbetrieb. Diese sind ebenfalls weniger stark betroffen, da das kalte Tiefenwasser, welches in den Unterlauf abgelassen wird, einen ausgleichenden Effekt auf die Wassertemperatur im unterliegenden Fließgewässer hat (Michel et al., 2020). Im Gegensatz dazu verstärken Seen in allen Höhenlagen den Anstieg der Wassertemperatur in den unterliegenden Gewässern. Durch die Verweildauer im See, wird das Wasser über längere Zeit der wärmeren Lufttemperatur ausgesetzt und gleicht sich dieser an. Dies hat zur Folge, dass die kühlende Wirkung von alpinen Bächen durch den Transport von kühlerem Wasser in eine wärmere Umgebung verloren geht, sobald der Abfluss durch einen See bzw. Wasserspeicher unterbrochen wird (Michel et al., 2020). Nebst der Exposition an der Luft, wird das Wasser auch der Sonneneinstrahlung ausgesetzt und dadurch zusätzlich aufgewärmt. Ein Wasserspeicher kann die direkte Umgebung somit sogar aufwärmen (Schmid & Köster, 2016). Dementsprechend haben auch hoch gelegene Bäche, wenn sie unterhalb von natürlichen oder künstlichen Wasserspeichern liegen, in der Regel eine höhere Wassertemperatur als solche ohne dazwischenliegende Seen. Der Klimawandel verursacht aber nicht nur einen langsamen, stetigen Anstieg der Wassertemperatur, sondern in heißen und trockenen Sommern auch kurzfristige, rasche Anstiege. Solche Ereignisse werden weiter zunehmen (NCCS, 2018) und sind für die Ökologie besonders problematisch, da die für aquatische Organismen kritischen Schwellenwerte von über 15 und über 25 °C folglich häufiger und über längere Zeiträume erreicht werden (Michel et al., 2020). Die Mehrzwecknutzung eines Gewässers kann diese Problematik verschärfen. Gleichzeitig werden dadurch auch Nutzungen eingeschränkt.

Wie bereits angedeutete, wirkt sich die Erwärmung der Wassertemperatur kritisch auf die Ökologie aus. Denn die Wassertemperatur beeinflusst nicht nur die Wasserqualität massgeblich (Delpla et al., 2009), sondern ebenfalls die Stoffwechselaktivität von Wasserorganismen beeinflusst sowie die biochemischen Kreisläufe dieses Lebensraums (z.B. gelöster Sauerstoff oder Kohlenstoff) (Yvon-Durocher et al., 2010). Viele Organismen leben bereits nahe an ihrer thermischen Obergrenze (Gaudard et al., 2017, 2018). Übersteigt die Wassertemperatur über wenige Wochen hinweg mehr als 15 °C, fängt ein Parasit in Lachsfischen an zu wuchern, was zu einer Nierenerkrankung führt. Ab 25 °C sterben diese Fischarten, weil es für ihren Organismus zu warm wird (Carraro et al., 2016, 2017; Hari et al., 2006).

4.2.2 Pegelschwankungen

Mehrzweckspeicher, die zur Wasserkraftproduktion genutzt werden, beeinflussen Ökosysteme am stärksten durch die unnatürlich starken Pegelschwankungen. Diese beeinträchtigen z.B. das Wachstum bodenlebender Algen im Uferbereich, welche einen wichtigen Grundbaustein der Nahrungskette darstellen (siehe Abbildung 3). Vor allem in alpinen, nährstoffarmen Speichern sind Algen für die Produktion von Biomasse und somit für die Funktion des ganzen Lebensraumes essentiell (Hirsch, 2019; Hirsch et al., 2016, 2017). In einem Experiment zeigte Hirsch (2019), dass der von Pegelschwankungen betroffene Uferbereich substantiell weniger Primärproduktion aufweist, als ein nicht regulierter. Im obersten Bereich, der am längsten trockenfällt, war die Reduktion besonders deutlich. Zudem stellte er auch in dem permanent überschwemmten Bereich eine Abnahme der Primärproduktion fest. Der Verlust von Primärproduktion lässt Fische schlechter wachsen und führt zu einer generellen Abnahme des Nährstatus eines Speichers (Hirsch, 2019).

Darüber hinaus führen Pegelschwankungen zu einer unnatürlichen Erosion des Ufers indem sie die Sedimente des Uferbereichs auflockern, was zu einem erhöhten Anteil an Schwebstoffen im Wasser bis hin zu trüben Seen führen kann. Fische können sich zwar mit den Pegelschwankungen mitbewegen, aber vielen Arten dient die Uferzone als Futter-, Laich- oder Aufzuchtgrund. Durch die Pegelschwankungen kann dieser Lebensraum, infolge eines sinkenden Pegels oder eines Verlusts an Nährstoffen, unzugänglich gemacht werden. Dies verändert die Räuber-Beute-Dynamik im Nahrungsnetz sowie das konkurrierende Verhalten unter Organismen, z.B. Fischen.

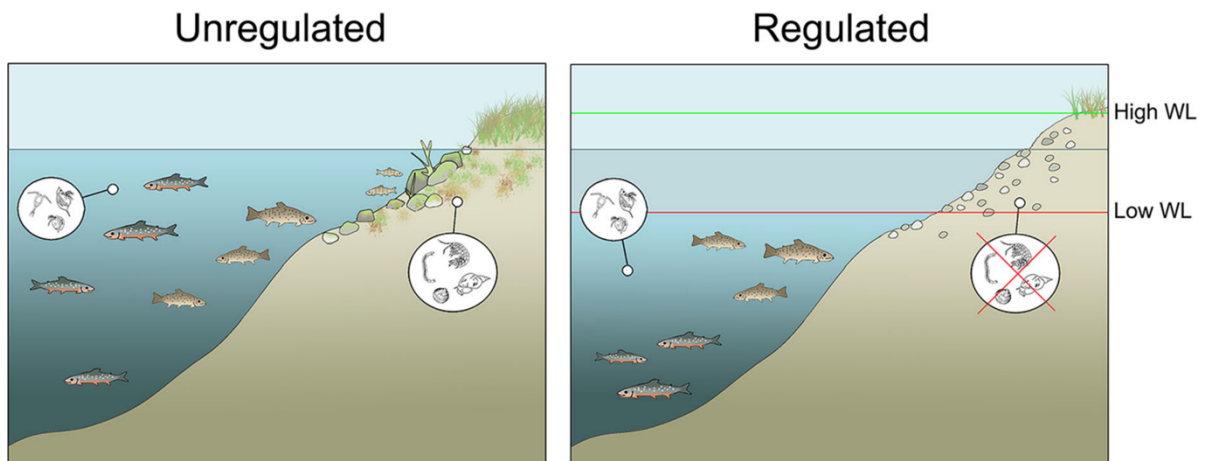


Abbildung 3: Auswirkungen der Wasserstandsregulierung auf den Uferbereich eines Wasserkraftspeichers (Hirsch et al., 2017).

In künstlichen Speichern sind Ökosysteme höheren Frequenzen und Amplituden von Pegelschwankungen ausgesetzt und werden dadurch stärker in Mitleidenschaft gezogen. Pegelschwankungen beeinflussen auch die Temperaturdynamik, biochemische Prozesse und Nährstoffgehalte (Hirsch, 2019; Hirsch et al., 2016, 2017). Es liegt auf der Hand, dass die ökologischen Auswirkungen von Pegelschwankungen auf einen Speicher sehr komplex und fallspezifisch sind. Um eine zuverlässige Aussage machen zu können, müssen Amplitude, Zeitpunkt, Häufigkeit und Änderungsrate der Pegelschwankungen sowie Morphometrie, Geologie und Lebensgemeinschaften des Speichers berücksichtigt werden (Hirsch et al., 2017). Studien, die diese Zusammenhänge untersuchen, liegen bisher noch nicht vor.

Pegelschwankungen *per se* müssen nicht negativ sein, wie Beispiele des Bielersees (Kapitel 4.3.1) und des Neuenburgersees zeigen (Kapitel 4.3.2). Im Gegenteil, gewisse Pegelschwankungen sind für die Ökologie eines natürlichen Sees oder eines künstlichen Speichers mit naturnahem Ökosystem sehr bedeutend, auch was die Vielfalt des Lebensraumes und der Organismen betrifft (Baudraz, 2018; Fuhrer et al., 2019). Die Beispiele des Lago Maggiore (Kapitel 4.3.3), des Sihlsees (Kapitel 4.3.4), des Lago di Poschiavo (Kapitel 4.3.5) und des Grimselsees/Oberaarsees (Kapitel 4.3.6) machen nicht nur die sehr hohe Komplexität der Zusammenhänge deutlich, sondern auch, dass es bei jedem zusätzlichen Eingriff Gewinner und Verlierer geben wird, die eine sorgfältige Interessensabwägung notwendig machen.

4.3 Fallstudien

4.3.1 Bielersee

Im Bielersee (429 m.ü.M.), einem natürlichen, regulierten See, haben die Seespiegelschwankungen durch die Juragewässerkorrekturen laufend abgenommen, die zugunsten der landwirtschaftlichen Nutzung des umliegenden Landes und des Hochwasserschutzes vorgenommen wurde. Die baulichen Massnahmen regulierten den Abfluss, senkten den Seespiegel und grenzten die Seespiegelschwankungen ein, indem die Hochwasserstände gesenkt und die Niedrigwasserstände erhöht wurden. Dadurch hat sich die Überflutungsdauer höher gelegenen Gebiete verkürzt und die Grundwasserdynamik, welche für den moortypischen Wasserhaushalt entscheidend ist, verändert. Dies beeinflusst seither das Niedermoor «Heidenweg», das für seltene Tiere und Pflanzen von grosser Bedeutung ist. Zwischen 1976 und 2017 veränderten sich 21% der Vegetationsfläche. Artenreiche Pfeifengraswiesen nahmen auf Kosten von Kleinseggenrieden deutlich zu, bultige Grosseggengriede nahmen hingegen ab. Die Zunahme der Pfeifengraswiesen ist positiv zu betrachten, die Abnahme der Grosseggengriede jedoch negativ. Der Verbuschung konnte dank regelmässiger Bewirtschaftung

entgegengewirkt werden. Trotz grosser Veränderungen blieb das Niedermoor im untersuchten Zeitraum gut erhalten, unter anderem auch wegen der fachgerechten Pflege (Fuhrer et al., 2019).

Seespiegelschwankungen sind oft mit dem Grundwasser verknüpft. Am Bielersee nahmen Grundwasserschwankungen seit 1940 durch bauliche Massnahmen und gesteuerte Abflussregulierung nach und nach ab. Dadurch reduzierte sich auch die Überflutungsdauer der Schutzgebiete, was eine Artenverschiebung und Abnahme von artenreichen Gebieten zur Folge hat (Fuhrer et al., 2019).

4.3.2 Neuenburgersee

Auch am Neuenburgersee (429 m.ü.M.), ebenfalls ein natürlicher, regulierter See, beeinflussen die Juragewässerkorrekturen den Lebensraum bis heute. Die Seespiegelschwankungen gingen zurück und wurden saisonal verschoben. Vor allem die Amplituden der Schwankungen nach oben und nach unten wurden stark geglättet. Die Folgen davon sind eine beschleunigte Ufererosion, eine zunehmende Verbuschung sowie fehlende Niedrigwasser. Diese Prozesse bedrohen auch das Moor der Grande Cariçaie am Südwestufer des Neuenburgersees, das zwischen See und Wald liegt. Durch die eingeschränkten Pegelschwankungen trifft das Wasser das ganze Jahr über auf denselben Uferbereich. Dieser erodiert stärker als unter höheren Pegelschwankungen. Sandbänke verschwinden und der Wald gewinnt durch die Verbuschung an Land; auf Kosten des Moores. Als bedeutender Lebensraum für zahlreiche Arten ist die Ufererosion und die Verbuschung für das Moor sehr problematisch, insbesondere weil die Grande Cariçaie für den Erhalt dieser Arten verantwortlich ist. Einzig der Rückgang von extremen Überschwemmungen ist positiv für die Natur (Baudraz, 2018).

4.3.3 Lago Maggiore

Der Lago Maggiore (193 m.ü.M.) gehört zu den vielseitigsten genutzten Seen der Schweiz. Er wird u.a. zur Energieproduktion, Bewässerung, Ökologie, Tourismus, Schifffahrt (Gütertransport), Fischerei, Freizeit genutzt. Seit 2015 testet Italien, auf deren Gebiet das Wehr liegt, das den Lago Maggiore reguliert, eine Erhöhung des Seespiegels für die zusätzliche Speicherung von Bewässerungswasser für die Po-Ebene. Die Stadt Pavia und italienische Umwelt- und Fischereiverbände sowie Schweizer Akteure sind aus unterschiedlichen Gründen dagegen. Pavia liegt an der Konfluenz von Po und Ticino und möchte vielmehr einen tiefen Seepegel für den Hochwasserschutz, ebenso die Seeanlieger in Italien und der Schweiz. Naturschützer in Italien wollen den Ticino renaturieren und das Regulierungssystem naturnah gestalten. In der Schweiz gefährdet der Pegelanstieg das Ökosystem der Sumpflandschaft Bolle di Magadino in der Schweiz, ein wichtiges Gebiet für den Vogelschutz. Bei steigendem Wasserstand werde der Sumpf überschwemmt und unzählige Insekten, für die das Gebiet Brutstätte ist, würden weggeschwemmt. Dies habe direkten Einfluss auf die Zugvögel, die im Frühling in der Ebene Halt machen und sich an den Insekten für den Alpenflug stärken (SRF, 2019; Swissinfo, 2019). Ein erhöhter Pegel habe auch Auswirkungen auf die Uferökologie des Sees, vor allem im Bereich der Deltas, da dort das Ufer sehr flach ist. Wenn diese Gebiete überschwemmt würden, erwärmt sich das seichte Wasser stärker als natürlicherweise (Interview mit Naturwissenschaftler, 06.04.2020).

4.3.4 Sihlsee

Der Sihlsee (889 m.ü.M.) ist ein künstlicher Mehrzweckspeicher, der für die Produktion von Wasserkraft gebaut wurde. Er ist ein aussergewöhnlicher Speicher, da nebst dem Pumpspeicherbetrieb zahlreiche weitere Nutzungen, wie Naherholung (z.B. Schwimmen), Mückengrenze, Hochwasserschutz und Schifffahrt, vorhanden sind (SBB, 2016). Druckleitungen verbinden den Sihlsee mit dem unterliegenden Zürichsee. Sie ermöglichen die Produktion und Speicherung von Strom über ein Pumpspeicherkraftwerk. Das turbinierete Wasser fliesst in den Zürichsee und kann wieder in den Sihlsee hochgepumpt werden. Durch den Pumpbetrieb wird nicht nur Wasser zwischen den beiden Speichern ausgetauscht, sondern auch Tiefenwasser aus dem oberen Speicher entnommen. Im Rahmen der Neukonzessionierung des Sihlsees untersuchten Kobler et al. (2018, 2019) und Kobler & Schmid (2019) die Auswirkungen des geplanten Ausbaus, welcher schlussendlich nicht umgesetzt wurde. Die in der Studie identifizierten Auswirkungen betreffen hauptsächlich den oberen, kleineren Sihlsee. Die Auswirkungen auf den Zürichsee wären gering. Der Wasseraustausch zwischen dem oberen und dem

unteren Speicher verändere die saisonale Dynamik der Wassertemperatur, der Stratifikation (Schichtung), der Nährstoffe und der Eisbedeckung im oberen Speicher erheblich. Der verstärkte Pumpbetrieb erhöhe die Wassertemperatur des Hypolimnions (unterste Wasserschicht eines Sees, siehe Abbildung 4) des oberen Speichers im Sommer um ca. 2° C, während die Veränderung der Wassertemperatur im unteren Speicher aufgrund von Reibungsverlusten weniger relevant sei. Weil die Stratifikation im oberen Speicher in ihrer Stärke und Dauer abnehme, habe dies Folgen für den gelösten Sauerstoff sowie die Nährstoffe. Die Tiefenwasserentnahme schwäche die Stärke der Sommerschichtung und verkürze diese um 1.5 Monate. Dadurch werde die Sauerstoffverfügbarkeit im Hypolimnion erhöht und die Akkumulation von Nährstoffen reduziert. Die Eisbedeckung im oberen Speicher werde in der Dauer und Dicke stark verringert. Nicht zu vergessen bei einem intensivierten Pumpbetrieb seien auch die verstärkten Seepegelschwankungen im oberen Speicher (Kobler et al.,

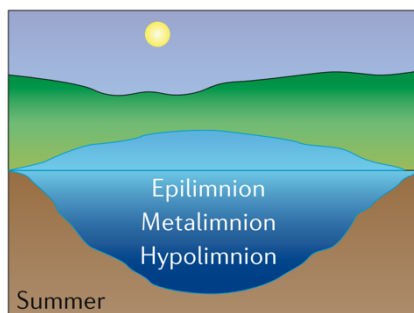


Abbildung 4: Schichtung eines dimiktischen Sees im Sommer (Woolway et al., 2020).

2018; Kobler & Schmid, 2019). Die Arbeiten machen deutlich, dass der Ort des Auslasses, bzw. Einlasses des Wassers, bestimmend ist für das Ausmass der Auswirkungen auf die Temperatur, Schichtung und die Nährstoffe. Würde das Wasser oberflächlich abfliessen, fände keine Erwärmung, sondern eine erhebliche Abkühlung des Hypolimnions von ca. 10 °C statt. Die Schichtung würde verstärkt und die Menge gelösten Sauerstoffes würde reduziert. Die Autoren schliessen daraus, dass im Sihlsee die Auswirkungen des Aus- und Einlassortes des Pumpspeicherbetriebs, hier im Hypolimnion, entscheidender sind, als die Pumpspeicherung selbst (Kobler et al., 2018).

Unklar ist, wie sich ein verstärkter Pumpbetrieb unter Extrembedingungen, z.B. in einem trockenen und heissen Sommer wie im Jahr 2018, auf die Ökologie der beiden Speicher auswirkt. Es wäre vorstellbar, dass die Auswirkungen auf den Zürichsee in einer Situation, wo der Pegel des Zürichsees schon tief ist, plötzlich bedeutend werden, selbst wenn sie in den vorliegenden Studien als gering eingestuft werden.

4.3.5 Lago di Poschiavo und Lago Bianco

Das Val Poschiavo ist für die Trinkwasserversorgung, für Bewässerungswasser sowie für weitere Wassernutzungen, wie der Schifffahrt und der Fischerei, vom Lago di Poschiavo und seinen Zuflüssen abhängig. Vor allem aber für die Energieproduktion ist der Lago di Poschiavo essentiell. Wasser wird im natürlichen See gespeichert und weiter unten im Tal turbinert. Zur Förderung erneuerbarer Energien wurde untersucht, wie man den Lago di Poschiavo (962 m.ü.M.) mit dem oberhalb auf dem Berninapass gelegenen Lago Bianco (2234 m.ü.M.) zu einem Pumpspeicherkraftwerk verbinden könnte. Das Projekt wurde zwar bewilligt, aber bis heute nicht umgesetzt. Der Lago Bianco liegt in einem teilweise vergletscherten Einzugsgebiet und ist darum trüb, während der Lago di Poschiavo viel klarer ist. Ein potentieller Pumpspeicherbetrieb würde die Schichtung, Temperatur, Trübung und Eisbedeckung beider Speicher beeinflussen. Aus ökologischer Sicht betrifft dies vor allem den unteren Speicher, da dort Schichtung und Temperatur deutlich von den natürlichen Schwankungen abweichen würden. Die Sommerschichtung verlängere sich um etwa zwei Wochen durch eine früher beginnende Schichtung im Frühling, was starke Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Phyto- und Zooplanktons haben könne. Die Temperatur beider Speicher steige an, insbesondere aber die Temperatur des Hypolimnions im unteren Speicher; diese nehme gegen Ende Sommer bis um 4 °C zu. Die Erwärmung werde verursacht durch den Wasseraustausch zwischen den beiden Speichern, durch das Aussetzen von Tiefenwasser des unteren Speichers an der Atmosphäre im oberen, seichteren Speicher sowie der Reibungswärme aus dem Pumpspeichersystem. In heissen und trockenen Jahren verstärke sich der Effekt, da sich das Wasser im oberen Speicher noch stärker aufwärmen könne. Dadurch werde im oberen Speicher die Dauer der Eisbedeckung verkürzt sowie die Dicke reduziert (Bonalumi et al., 2012; Bonalumi & Schmid, 2011). Im unteren natürlichen Speicher beeinträchtigt die erwärmte Wasserschicht den typischen Aufenthaltsort von Seesaiblingen, was sich auf die Populationsgrösse

auswirken könne (Seehausen & Michel, 2015). Auch werde der untere Speicher trüber und der obere klarer, weil der Wasseraustausch zwischen den Speichern Partikel vom oberen in den unteren Speicher befördere, wo sich diese während der Sommerschichtung im oberen Hypolimnion ansammelten und die Lichtverfügbarkeit in der Oberflächenschicht verringerten. In der Oberflächenschicht wird dadurch die euphotische Tiefe, in der Photosynthese möglich ist, reduziert, was negative Auswirkungen auf die Primärproduktion hat. Die verminderte Sicht beeinträchtigt jagende Fische. Zudem gehe der Pumpspeicherbetrieb mit einer erheblichen Schwankung des Seespiegels einher (Bonalumi et al., 2012), was unter anderem für die Forellen ein Nachteil ist, da sie sich gerne in den untiefen, ufernahen Zonen des Sees aufhalten (Seehausen & Michel, 2015). Ein Vorteil des geplanten Pumpspeicherkraftwerks für die Ökologie wäre einzig die Reduktion von Schwall und Sunk im Fluss Poschiavino, dem Unterlauf des Lago Biancos, wo heute das turbinierete Wasser in den Bach geleitet wird. Bei einem Pumpbetrieb würde das turbinierete Wasser direkt in den Lago di Poschiavo geleitet (Bonalumi et al., 2012).

4.3.6 Grimselsee und Oberaarsee

Im Grimselgebiet wurde der seit einigen Jahrzehnten bestehende Pumpspeicherbetrieb zwischen dem Oberaarsee (2303 m.ü.M.) und dem Grimselsee (1909 m.ü.M.) auf die Temperatur und die Verteilung von Schwebstoffen untersucht. Der Grimselsee ist stark von Gletschern beeinflusst, ist deshalb sehr trüb und wärmt sich durch Sonneneinstrahlung kaum auf. Das Einzugsgebiet des Oberaarsees ist weniger von Gletschern beeinflusst. Das Wasser ist klarer und die deshalb erhöhte Wassertemperatur im Sommer führt zu einer Schichtung. Der intensive Pumpbetrieb gleicht die Schwebstoffkonzentration der beiden Speicher weitgehend aus, vor allem im Winter, wenn die externen Zuflüsse ausbleiben. Die veränderte Schwebstoffverteilung beeinflusst die Lichtdurchlässigkeit und somit auch die Oberflächenwassertemperatur und die Schichtung. Dies wirkt sich auf die Temperatur und Schwebstoffkonzentration im Unterlauf aus, was entscheidend für weitere Nutzungen sein kann. Diese Auswirkungen könnten reduziert werden, indem Abfluss aus dem oberen, klareren Speicher entnommen und dem Unterlauf zugeführt würde (Bonalumi et al., 2011).

Für den Ausbau der Wasserkraft wollen die Kraftwerke Oberhasli (KWO) schon seit den 1980er Jahren die Staumauer des Grimselsees erhöhen (Schweizer et al., 2012). Im Gletschervorfeld des sich zurückziehenden Unteraargletschers befinden sich jedoch jahrhundertalte Arven und Moorflächen sowie ein vielfältiges und dynamisches Gletschervorfeld. Diese Auenlandschaft wäre durch den Moorschutz-Artikel in der Bundesverfassung und durch das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) geschützt. Vor diesem Hintergrund wurden alle Projekte vor Gericht angefochten, obwohl der Moorschutz-Artikel gar keine Interessenabwägung zwischen Moorschutz und anderen Interessen, wie der Energieversorgung zulässt (Loser, 2012). Im letzten Urteil wurde der Ausbau des Stausees vorläufig gestoppt, mit der Begründung, dass es dafür einer Grundlage im kantonalen Richtplan bedürfe. In diesem Richtplan müsse zwischen Naturschutz und Energieversorgung abgewogen werden. Das Bundesgericht bestätigt aber den Entscheid des Berner Verwaltungsgerichtes von 2019, dass das Grimsel-Projekt wegen dem Ausbau erneuerbarer Energien von nationalem Interesse sei (Keystone SDA, 2019; SRF, 2020).

4.3.7 Neubau eines Speichers

Der Neubau von Mehrzweckspeichern in alpinen Gebieten ist interessant für die Produktion von Wasserkraft, für den Hochwasserschutz und auch zur saisonalen Wasserspeicherung um abschmelzende Gletscher zu ersetzen (Ehrbar et al., 2018, 2019; Farinotti et al., 2016).

Farinotti et al. (2016, 2019) befassten sich mit dem Speicherpotential von Gebieten, die im Verlaufe dieses Jahrhunderts eisfrei werden, für die mögliche Nutzung zur Wasserspeicherung und für die Wasserkraft. Sie diskutieren die ökologischen Auswirkungen eines Neubaus von alpinen Speichern nicht explizit, weisen aber darauf hin, dass kürzlich eisfrei gewordene Gletschervorfelder kahl, nicht bewachsen, relativ einfach in ihrer Ökosystemstruktur seien und keine etablierte Landnutzung aufweisen (Hodson et al., 2015; Nemergut et al., 2007). Zudem könnten vielerorts Seen natürlich

entstehen (Haeberli et al., 2016). Aus diesen Gründen werden die ökologischen Auswirkungen eines Neubaus in einem solchen Gebiet als eher begrenzt eingeschätzt. Auch hätte ein Eingriff im Oberlauf nur minimale Auswirkungen auf die Durchgängigkeit eines Flusses, d.h. nur der oberste, kurze Abschnitt wäre beeinträchtigt. Will man den Effekt, den Gletscher im hydrologischen Kreislauf haben, künstlich aufrechterhalten, so die Argumentation, wären die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen geringer, würde der Speicher hoch oben in den Bergen anstatt in tiefer liegenden, üblicherweise bewachsenen und bewohnten, Tälern gebaut (Farinotti et al., 2016, 2019). Zur Eignungsbewertung der Standorte für die Nutzungen wurden ökologische, technische und wirtschaftliche Faktoren miteinbezogen. Die ökologischen Faktoren beinhalten die Präsenz von UNESCO-Welterbestätten, das Vorhandensein von anderweitig geschützten Gebieten und die Dichte bedrohter Arten (Farinotti et al., 2019).

Auch Ehrbar et al. (2018, 2019) untersuchten das Wasserkraftpotential in Gletscherrückzugsgebieten. Sie bewerteten den Ausbau bestehender sowie den Neubau von Wasserkraftanlagen anhand von Kriterien aus Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft. Die Umweltkriterien berücksichtigen unter anderem Restwassermengen, die Geschiebedurchgängigkeit und die Schwallbeeinflussung durch Abfluss- und Temperaturschwankungen. Die gesellschaftlichen Kriterien beziehen sich auch auf Schutzgebiete. Die Analyse zeigt, dass die aus technischer Sicht am besten geeignete Standorte, so die Analyse, liegen oft in Schutzgebieten und kommen deshalb nicht in Frage (Ehrbar et al., 2018, 2019).

Der Neubau eines Speichers stellt immer einen markanten Eingriff in die Natur dar, weil bestehende Lebensräume (terrestrisch, amphibisch, aquatisch) zerstört und Fließgewässer in ein Stillgewässer umgewandelt werden (Fenrich, 2018). Ein Neubau unterbricht die Kontinuität des Flusslaufs und verhindert eine Vernetzung von Habitaten für Pflanzen und Tiere. Neue Lebensräume entstehen durch den Neubau nur beschränkt, insbesondere bei stark schwankendem Seespiegel (Email mit Flussbauer, 27.03.2020). Trotzdem könnten zukünftige Projekte einen ökologischen Mehrwert schaffen, indem sie den Speicher sowie den Unterlauf so gestalten, dass vielfältige Habitats entstehen. Zum Beispiel könnten unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten berücksichtigt, Inseln geschaffen und Strände entlang des Flusslaufs aufgeschüttet werden (Interview mit Ökohydrologe, 23.03.2020).

Beim Neubau eines alpinen Speichers gilt es zwingend auch das Temperaturregime von Speicher und Unterlauf zu beachten. Wird ein Bach oder Fluss durch einen Speicher ersetzt, entfällt die kühlende Wirkung auf die Umgebung (Kapitel 4.2.1). Fließt das Wasser oberflächlich aus dem Speicher, wird auch die Wassertemperatur im Unterlauf erwärmt. Dies ist oft der Fall, wenn Speicher für die Bewässerung oder Trinkwasser genutzt werden (Fenrich, 2018). Wird ein Speicher jedoch für die Wasserkraftproduktion verwendet, wird Wasser vom tiefsten Punkt des Speichers entnommen und wirkt daher im Sommer kühlend und im Winter wärmend. Über das Jahr hinaus ist die Bilanz auf den Unterlauf leicht kühlend. Durch einen Speicher wird somit nicht nur Wasser vom Sommer für den Winter gespeichert, sondern auch Wärmeenergie vom Sommerhalbjahr ins Winterhalbjahr übertragen (Meier & Wüest, 2004). Solche Effekte haben schwerwiegende Konsequenzen für die aquatischen Organismen, welche es bei erweiterten Nutzungen zu berücksichtigen gilt.

4.3.8 Talsperrenerhöhung

Da der Neubau von Speichern einen grossen Eingriff in die Natur darstellt, werden in Mitteleuropa nur noch wenige Talsperren gebaut. Eine bedeutende Alternative stellt die Erhöhung von bestehenden Sperrungen dar, gerade auch für die Schweiz. Die Staumauern Mauvoisin, Luzzzone und Vieux Emossons wurden bereits erhöht (Felix et al., 2020; Fuchs et al., 2019).

Auch bei der Sperrrenerhöhung sollte die Ökologie berücksichtigt werden, da damit der Uferbereich unter Wasser gesetzt wird. So gilt es abzuklären, ob schützenswerte Gebiete im Überflutungsbereich liegen. Wäre ein Hochmoor, Flachmoor oder eine Moorlandschaft von nationaler Bedeutung betroffen, kann eine Sperrrenerhöhung aufgrund des Artikels 18a des Bundesgesetzes über den Natur- und Heimatschutz (NHG) nicht in Betracht gezogen werden. In diesem Fall dürfen «keine Bauten und

Anlagen errichtet und keine Bodenveränderungen vorgenommen werden» (Verordnung über den Schutz der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung (Hochmoorverordnung), 1991, p. 2). Bei einer geschützten Aue, einem geschützten Gletschervorfeld sowie bei einer Beeinträchtigung andere Schutzgebiete muss eine Erhöhung jeweils fallspezifisch abgewogen werden. Die oben genannten Faktoren wurden auch in der Potenzialbewertung von Talsperrenerhöhungen in der Schweiz miteinbezogen, welche die Staumauern Moiry im Kanton Wallis und Marmorera im Graubünden als geeignet einstufen (Felix et al., 2020; Fuchs et al., 2019).

4.3.9 Bewässerungsteiche

Bewässerungsteiche boomen. Heisse und trockene Sommer häufen sich und mit ihnen die Wasserknappheit in der landwirtschaftlichen Bewässerung. Deshalb bauen Bauern, vor allem Obst- und Beerenproduzenten, zunehmend eigene Wasserversorgungen in Form von Teichen (Eppenberger-Media GmbH, 2020). Damit speichern sie Oberflächen- und Niederschlagswasser für Trockenphasen. Doch Bewässerungsteiche in den Alpen sind nicht neu. In niederschlagsarmen Gebieten wurden sie schon seit jeher gebaut, beispielsweise auf der Trams bei Landeck (Tirol, Österreich). Die Trams ist eine Mittelgebirgsterrasse (900-1100 m.ü.M.), die von historischen Bewässerungs-, Speicherteichen und -tümpeln geprägt ist. Die Region ist als inneralpines Trockental mit dem Unterengadin vergleichbar. Die Kleingewässer wurden ursprünglich zur Bewässerung der Wiesen genutzt, da aufgrund der Lage in einem durchschnittlichen Jahr nicht genügend Niederschlag für eine ausreichende Heuernte fiel. Heute werden sie hauptsächlich als Naherholungsraum, im Sommer zum Baden und als Fisch- oder Zierteiche genutzt. Nur in Trockenzeiten werden die Wiesen der Trams noch bewässert (Glaser et al., 2003). Glaser et al. (2003) untersuchten die Bedeutung dieser Teiche und Tümpel für die Diversität und die Verteilung und von Libellen, Amphibien (Erdkröte, Grasfrosch, Bergmolch) und Ringelnattern. Die Analyse zeigte, dass das Gebiet für Libellen als ein besonders wertvolles Gebiet einzustufen ist. Auch das Auftreten einiger Pflanzenarten an und in den Teichen gilt naturschutzfachlich als besonders bedeutend. Die Laichpopulationen der Erdkröte und des Grasfrosches sind im überregionalen Vergleich gross. Zudem verfügt das Gebiet über eine vitale Ringelnatterpopulation. Die Diversität und die Verteilung des Bergmolchs entspricht dem lokal zu erwartenden Artenpool. Die wichtigsten Faktoren für die Libellen- und Amphibienverteilung sind die Vegetationsparameter (Schwimmblatt-, Verlandungs- und Makrophytenzone) sowie die Gewässergrösse (Fläche) (Glaser et al., 2003).

Durch den europaweiten, starken Verlust von dynamischen Auenlandschaften und ausgedehnten Moor- und Sumpfgebieten, kommt nicht nur Bewässerungsteichen, sondern auch anderen künstlichen Speicherteichen wie Viehtränken, Fisch- und Löschteichen eine besondere Bedeutung zu. Denn sie dienen als Ersatzlebensräume für die Lebensgemeinschaften von Kleingewässern (Glaser et al., 2003). Ausserdem sind stehende Kleingewässer Biodiversitäts-Hotspots und bieten Lebensraum für zahlreiche seltene und bedrohte Arten (EPCN, 2010). Aus diesem Grund ist eine naturnahe Gestaltung dieser Gewässer essentiell.

Werden heute Bewässerungsteichen angelegt, wird zur Abdichtung eine Folie verwendet. Besteht diese Folie aus PVC, können durch die Sonneneinstrahlung gesundheitsschädliche Weichmacher ausgelöst werden. Auch die Produktion sowie das Recycling von PVC sind problematisch, da bei der Verbrennung giftige Stoffe freigesetzt werden. Bessere, aber teurere Varianten sind Folien aus PE, EPDM oder LDPE (Hubertus Beutler GmbH, 2018). Weiter rät auch der Waadtländer Regierungsrat von künstlichen Wasserrückhaltevorrichtungen auf Bergweiden ab, da die dafür verwendeten Materialien (z.B. Polymere) zu neuen Problemen führen könnten (Bryner et al., 2020). Zudem stellen die Teiche eine Ertrinkungsgefahr für Lebewesen dar, da die glatte Folie das Aussteigen verhindert. Abhilfe schaffen können ein Zaun, der um den Teich angebracht wird, und ein Netz, das auf die Folie gelegt wird und den Tieren ermöglicht sich festzuhalten und auszusteigen (Jucker Farm AG, 2015).

Um die Wasserqualität von Bewässerungsteichen zu halten, ist ein Volumen von mindestens 1000m² und eine Tiefe von 4m erforderlich. Bei dieser Tiefe ist ein natürlicher Sauerstoffaustausch auch ohne Pumpe möglich. Dies erlaubt Kleinlebewesen, wie z.B. Fröschen, aus dem Teich ihren Lebensraum zu

machen. Es wird empfohlen, auf Fische zu verzichten und nur niedrige Pflanzen am Ufer zu pflanzen, um den Eintrag von Laub zu verhindern. Ausserdem können Gülleneinträge in den Teich zu unerwünschten Algen führen, die das Wasser für eine direkte Anwendung an den Pflanzen ungeeignet machen (Eppenberger-Media GmbH, 2020; Jucker Farm AG, 2015).

Eine Mehrzwecknutzung der modernen Bewässerungsteiche ist eingeschränkt. Der Zaun sowie die Lage verunmöglichen viele Nutzungen wie die Naherholung oder die Wasserkraft, welche auf Gefälle angewiesen ist (Kellner & Weingartner, 2018). Wie bereits erwähnt, wird von Fischzucht abgeraten. Nichtsdestotrotz findet sich im oberen Fricktal ein Beispiel, wo in einem Bewässerungsteich die Paarung zweier Lachse erreicht wurde (Bözbergblog, 2018). Ausserdem könnten die Teiche als Löschwasser eingesetzt werden.

4.3.10 Beschneigungsteiche

Beschneigungsteiche erlebten in den letzten Jahrzehnten eine starke Zunahme. Ausbleibende Schneefälle und Wärmeeinbrüche kombiniert mit dem Anspruch von perfekten Pistenverhältnissen die ganze Wintersaison über, veranlassen Bergbahnbetreiber zu verstärkter künstlicher Beschneigung. Vermehrt sammeln sie dafür während des Sommers Wasser in künstlichen Teichen, um den hohen Wasserverbrauch im Winter zu decken. 2015 gab es in der Schweiz 80 realisierte und 18 geplante Speicherseen, die für die künstliche Beschneigung genutzt werden (Iseli, 2015). Zum gleichen Zeitpunkt gab es in Österreich 400, die Hälfte davon in Tirol (Mountaintalk, 2016).

Beschneigungsteiche sind zur Abdichtung ebenfalls auf künstliche Folien angewiesen und haben entsprechend ähnliche ökologischen Auswirkungen wie Bewässerungsteiche (Kapitel 4.3.9). Eine zuverlässige Abdichtung ist für Beschneigungsteiche besonders wichtig, weil in Hängen, wo sie gebaut werden, durchsickerndes Wasser die Stabilität des Damms und somit unterliegende Lebensräume gefährden würde. Um die Folie zu schützen, können darunter eine Drainagematte und darüber ein Vlies gelegt werden. Beide verhindern, dass die Folie leicht beschädigt wird. Zudem sorgt die Drainagematte dafür, dass das Wasser allfälliger undichter Stellen nicht in den Damm sickert. Das Vlies erlaubt eine Kiesauflage, die den Teich natürlich aussehen lässt (Mountain Manager, 2006).

Im Gegensatz zu den abgeäunten Bewässerungsteichen, besteht bei Beschneigungsteichen ein Bestreben zur Mehrzwecknutzung. Viele wurden mit Spazierwegen und Sitzgelegenheiten zur Naherholung aufgewertet. Baden ist oft untersagt, da Abdichtungen und Filteranlagen beschädigt werden können. In Österreich gibt es einige Bergbahnbetreiber, die im Sommer die Speicherseen als Badeseen nutzen wollen. Der Ahornsee in Söll (Tirol, Österreich) ist ein solcher doppelgenutzter See (ca. 700 m.ü.M.). Er ist in eine offene Speicherwasserfläche, einen bepflanzten Regenerationsbereich und in einen Badebereich unterteilt, was die ökologische Stabilität und die Wasserqualität gewährleisten soll (Mountaintalk, 2016). Der bepflanzte Regenerationsbereich stellt einen Mehrwert für die Ökologie dar, denn die lichtdurchfluteten, wärmeren Uferzonen sind grundsätzlich dicht und artenreich besiedelt. Sie bieten Lebensraum z.B. für Libellen und Röhrichte (Lubini et al., 2012). Weiter sind Beschneigungsteiche auch für die Wasserkraftgewinnung, die Fischerei und als Löschwasser geeignet. Weniger nützlich sind sie für die Bewässerung, da die umliegenden Alpweiden meist nicht bewässert werden und bewässerte Flächen zu weit weg liegen (Kellner & Weingartner, 2018).

Ansonsten ist über die ökologischen Auswirkungen von Beschneigungsteichen bislang wenig bekannt. Es liegen keine Studien vor, die sich vertieft mit dem Thema auseinandersetzen. Wahrscheinlich ist aber, dass die grössten ökologischen Auswirkungen von Beschneigungsteichen nicht von den Teichen selbst, sondern von der Beschneigung ausgeht. Neben dem hohen Wasserverbrauch weist die künstliche Beschneigung einen hohen Energiebedarf auf, mit möglichen Auswirkungen auf Vegetation, Boden, Tiere und aquatische Ökosysteme (Doering & Hamberger, 2007; Staiger, 2008; Teich et al., 2007).

4.3.11 Fliessgewässer

Nebst Stillgewässern spielen auch Fliessgewässer eine wichtige Rolle als Mehrzweckspeicher, obwohl sie nicht unter die engere Kategorie der «Wasserspeicher» fallen. Unzählige Nutzungen, wie

Bewässerung, Abwasseraufnahme und thermische Nutzung finden an Bächen und Flüssen statt. Das Wasser steht in diesem «Speicher» zwar nicht still, spielt aber gerade deshalb eine grosse Rolle, weil es Orte ohne stehende Gewässer versorgt. Im Trockensommer 2018 entnahmen viele Bauern ihr zusätzliches Bewässerungswasser aus nahegelegenen Bächen und Flüssen. Einschränkungen und sogar Verbote mussten ausgesprochen werden, um die Ökologie zu schützen. Während langer Trockenperioden ist die Ökologie von Fliessgewässern wegen ihres relativ geringen Pegels und dem lokal kleinen Wasservolumens besonders anfällig. Verbrauchende Nutzungen, wie z.B. die Entnahme für die Bewässerung, verstärken die Niedrigwassersituation erheblich und schränken dadurch auch andere Nutzungen ein. Tiefe Wasserstände erschweren das Einleiten von Klärwasser, da dieses nur noch ungenügend verdünnt werden kann (Dübendorfer et al., 2019). Zudem erhöht das Niedrigwasser die Wassertemperatur zusätzlich (Fenrich, 2018), was wiederum Nutzungen wie das Kühlen von Industrie, Gebäuden und Kernkraftwerken einschränkt. Besonders gefährdet sind Seitenbäche und Nebenflüsse sowie Restwasserstrecken, die weniger Wasser führen als Hauptbäche oder -flüsse (Casanova, 2016). Zum Schutz der Gewässer ist ab einer Wassertemperatur von 25 °C die Wärmeabgabe (z.B. von Kernkraftwerken) verboten (Gewässerschutzverordnung (GSchV), 1998). Die genannten Probleme treten auch bei Stillgewässern auf, je nach Grösse mehr oder weniger gravierend.

4.4 Fazit Literatur

Die hier präsentierte Literatur macht deutlich, dass es bisher keine systematische Erhebung der kombinierten ökologischen Auswirkungen von Mehrzwecknutzung gibt. Keine einzige Untersuchung behandelt dieses Thema explizit. Obwohl viele Einzelbeispiele über die ökologischen Auswirkungen einzelner Nutzungen von Wasserspeichern vorliegen, sind diese schwer vergleichbar, da sich die Speicher und deren Nutzungen, und somit auch die ökologischen Auswirkungen, stark unterscheiden. Einzig die Studien zum Bieler- und des Neuenburgersee sind vergleichbar, weil die Seen ähnliche Rahmenbedingungen haben und beide Studien auf die Uferökologie fokussieren.

Zu den Seen im Mittelland ist Literatur zu den Auswirkungen eines veränderten Seespiegels auf die Uferökologie vorhanden. Pumpspeicher wurden bisher hauptsächlich auf Temperatur, Trübung und Schichtung untersucht, ohne eine Verknüpfung mit der aquatischen oder amphibischen Ökologie herzustellen. Die Studien zum Neubau von Speichern und zu Talsperreenerhöhungen streifen die Ökologie am Rande, in konzeptioneller Form von Bewertungssystemen zum Neu- und Ausbau von Speichern. Auch zu Bewässerungs- und Beschneidungsteichen ist wenig zu den Auswirkungen auf die Ökologie vorhanden.

Koschorrek et al. (2020) untersuchten die ökologischen und sozialen Dienstleistungen von künstlichen Wasserkörpern in Europa (Bewässerungsgräben, Fischteiche, Wehre, Bewässerungskanäle, Fischleitern und Pumpspeicherreservoir). Auch sie kamen zum Schluss, dass die Funktionsweise und die Rolle dieser aquatischen Ökosysteme nur unzureichend verstanden und angesichts ihrer ökologischen und gesellschaftlichen Bedeutung zu wenig untersucht seien. Insbesondere die Effekte von Pumpspeicherreservoirs seien bisher nie systematisch analysiert worden (Koschorreck et al., 2020).

5 Typisierung Mehrzweckspeicher: morphologischer Kasten

Kapitel 4 hat die Vielfalt an Mehrzweckspeichern sowie die zahlreichen positiven und negativen ökologischen Auswirkungen aufgezeigt. Selbst wenn damit deutlich wurde, dass für die neue oder erweiterte Mehrzwecknutzung eines Speichersystems die spezifischen ökologischen Rahmenbedingungen in jedem Fall sorgfältig analysiert und gegeneinander abgewogen werden müssen, soll in Kapitel 5 der Versuch einer Generalisierung unternommen werden. In einem ersten Schritt soll dazu eine Typisierung der Mehrzweckspeicher vorgenommen werden, womit sich die Komplexität der Fallbeispiele reduzieren und besser fassen lässt. Da die ökologischen Auswirkungen verschiedener Nutzungen eines Mehrzweckspeichers zusammenhängen und sich gegenseitig oft beeinflussen, wird in Kapitel 6 eine systemische Betrachtung der Wechselwirkungen vorgeschlagen.

Anhand der sieben Speichertypen soll in einem weiteren Schritt ausgelotet werden, ob damit eine weitere Generalisierung von Aussagen zu den ökologischen Auswirkungen möglich ist.

Die in Kapitel 3 dargestellten Faktoren, welche die Mehrzwecknutzung beeinflussen, können auch für eine Typisierung der Wasserspeicher herangezogen werden. Eine solche Typisierung kann hilfreich sein, um Gemeinsamkeiten oder Muster zu erkennen oder mögliche Zusammenhänge aufzuzeigen. In Anlehnung an den «morphologischen Kasten» von Fritz Zwicky (1966) wird hier ein Set von Kriterien und deren Ausprägungen zur Beschreibung verschiedener Speichertypen vorgeschlagen. Der morphologische Kasten war ursprünglich als Instrument zur Innovationsförderung gedacht. Er dient der systematischen und neutralen Betrachtung komplexer Systeme. Mittels einer zweidimensionalen Matrix werden verschiedene Optionen umfassend dargestellt, um auf dieser Grundlage den besten Entscheid zu fällen, respektive die beste Option zu wählen. Hier wurde der morphologische Kasten dazu verwendet, um die in der Schweiz vorhandenen Speichertypen mit möglichst wenigen, aber aussagekräftigen Kriterien zu beschreiben, wie z.B. mit der Lage oder Grösse (siehe Abbildung 5), um damit die Vielfalt auf wenige Speichertypen zu reduzieren. Eine erste Variante des morphologischen Kastens wurde im ExpertInnen-Workshop vom 11. Juni 2020 diskutiert und in der Folge leicht angepasst.

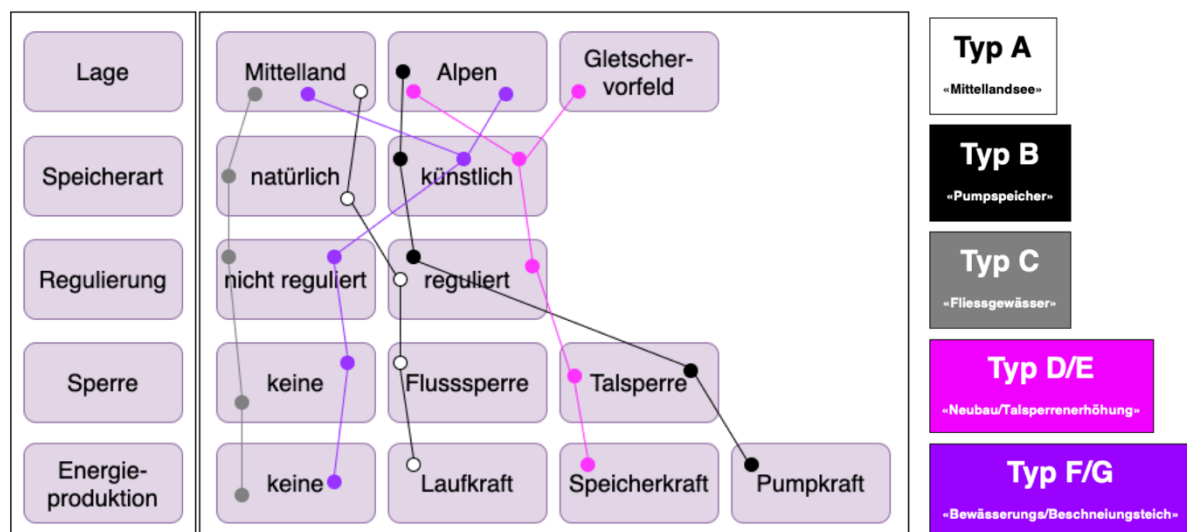


Abbildung 5: Der «morphologische Kasten» stellt ein Set von Kriterien (vertikal) und deren Ausprägungen (horizontal) dar, die verschiedene Wasserspeicher beschreiben und für eine Typisierung solcher herangezogen werden können. Die Typen A-G beschreiben unterschiedliche, in der Schweiz vorkommende Mehrzweckspeicherformen.

Aus den möglichen Varianten in Abbildung 5 lassen sich sieben Wasserspeichertypen ableiten:

Typ A beschreibt einen grossen, natürlichen Speicher im Mittelland, der reguliert ist und zu Beginn des Unterlaufs über eine Flusssperre verfügt, wo mit Laufkraft Energie produziert wird. Beispiel: Zürichsee.

Typ B ist ein mittelgrosser, künstlicher Speicher in den Alpen, der reguliert wird, über eine Talsperre verfügt und über ein Pumpspeicherwerk Energie produziert. Beispiel: Grimselsee.

Typ C bezeichnet ein Fließgewässer, welches nicht als klassischer «Wasserspeicher» definiert wird. Ein Vergleich des Kriteriums «Grösse» mit Stillgewässern ist schwierig und wird deshalb nicht gemacht. Dieser Typ liegt häufig im Mittelland, ist natürlich, nicht reguliert, besitzt keine Sperre sowie keine Energieproduktion.

Typ D und **E** stehen für künstliche, regulierte Speicher mittlerer Grösse im Gletschervorfeld und in den Alpen, die über eine Talsperre und Energieproduktion mit Speicherkraft verfügen. Das Gletschervorfeld bezeichnet ein Gebiet, das kürzlich eisfrei wurde oder es in absehbarer Zeit wird. Bei beiden Typen handelt es sich um neue Speicher. Typ D wird in diesem Gebiet komplett neu gebaut und Typ E bezieht

sich auf Talsperrenenerhöhungen. Da sich die Typen D und E nur über ihre Lage unterscheiden, werden sie hier zusammen betrachtet. Beispiel: Trift und Vieux Emossons.

Typ F und G bezeichnen kleine, künstliche Speicher, die im Mittelland als Bewässerungsteiche und in den Alpen als Beschneigungsteiche zum Einsatz kommen. Meist sind sie nicht reguliert, verfügen über keine Sperre und auch keine Energieproduktion. Sie gehören zu den neuen Speichern. Wiederum unterscheiden sie sich nur durch ihre Lage, weshalb sie hier zusammengefasst werden.



Abbildung 6: Aus dem morphologischen Kasten (Abbildung 5) abgeleitete Speichertypen A-G.

Diese Speichertypen bilden die Vielfalt der Wasserspeicher in der Schweiz gut ab und dienen hier als Arbeitsinstrument zur Reduktion der Komplexität. Das Modell könnte durch zusätzliche Typen erweitert, detaillierter dargestellt und auch anders kategorisiert werden (z.B. Speicher in Karstgebieten).

Diese Typisierung bildet die Basis für die nachfolgende Betrachtung der ökologischen Auswirkungen. Um dem Ziel der Vereinfachung gerecht zu werden, begrenzten wir die Kriterien, die im morphologischen Kasten aufgeführt werden auf 6. Weitere Kriterien wären zum Beispiel: Wasserfassung, Ausleitung, Restwasserstrecke, Schwallstrecke, Fallhöhe, Auf- und Abstieg.

6 Ökologische Auswirkungen von Mehrzweckspeichertypen

Die ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern sind mindestens so vielfältig wie sämtliche Kombinationen von Speichertypen und Nutzungen. Sie können positiv oder negativ für die Umwelt sein, oder auch beides. Zum Beispiel kann der Hochwasserschutz negativ für die Umwelt sein, wenn im unterliegenden Gewässer keine Abflussdynamik mehr auftritt, die für die Entstehung neuer Kiesbänke oder Auenwälder wichtig wäre. Die Verhinderung von Hochwasserabflüssen kann aber auch positiv sein, wenn extreme Hochwasser sich häufen und Habitate zerstören (siehe Kapitel 4.3.2).

Da die ökologischen Auswirkungen verschiedener Nutzungen eines Mehrzweckspeichers müssen, wie vorgängig erwähnt, systemisch betrachtet werden (Abbildung 7). Ökologische Auswirkungen können sich kumulieren, sich gegenseitig verstärken, verringern oder aufheben. Wie eine solche Situation konkret aussieht, ist situationsspezifisch und abhängig von den einzelnen Nutzungen, deren Kombinationen und dem Nutzvolumen. Aus diesem Grund sollte unbedingt auch auf Fallbeispiele eingegangen werden. Eine weitere Herausforderung stellt die Abgrenzung der ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern gegenüber den ökologischen Auswirkungen von einfach genutzten Speichern dar.

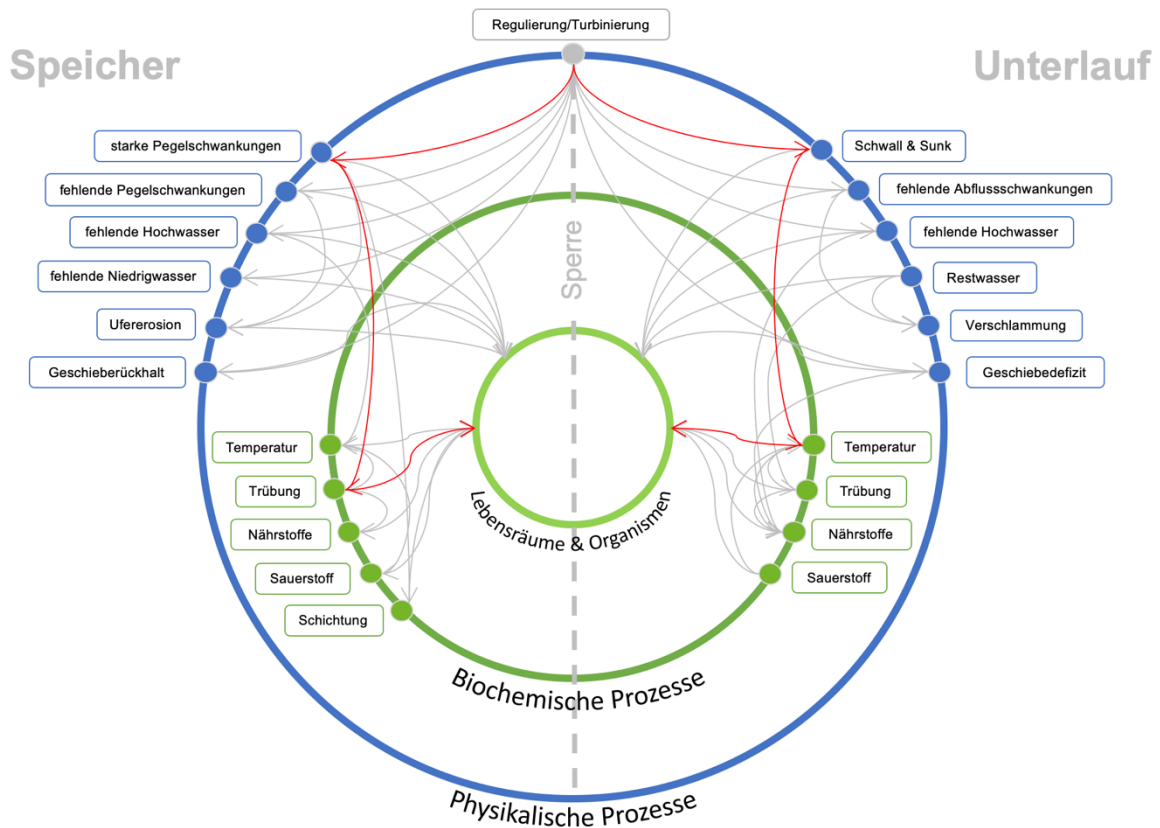


Abbildung 7: «Ökologischer Wirkungskreis»: Ökologische Auswirkungen, die durch die Mehrzwecknutzung in Wasserspeichern (links) und deren Unterläufen (rechts) auftreten. Viele Auswirkungen sind kaskadisch miteinander verknüpft. Welche ökologischen Auswirkungen von grosser Relevanz sind, hängt vom Volumen des Speichers und den fallspezifischen Nutzungen ab. Beispiel eines Wirkungspfades (rot): Die Wasserkraftnutzung verstärkt im Speicher die Pegelschwankungen, welche die Trübung und dadurch die Lebensräume und Organismen des Speichers beeinflussen. Im Unterlauf erzeugt die Nutzung Schwall und Sunk, was sich auf die Wassertemperatur und somit die Lebensräume und Organismen auswirkt.

Basierend auf dem «ökologischen Wirkungskreis» (Abbildung 7) werden in den folgenden Unterkapiteln die Speichertypen A-G auf die ökologischen Auswirkungen analysiert. Dazu werden die kritischen Punkte aus den einzelnen Fallbeispielen den jeweiligen Typen zugeordnet und graphisch sowie schriftlich dargestellt. Die abgebildeten Parameter, welche die Ökologie eines Speichers oder dessen Unterlauf beeinflussen, entsprechen der vorhandenen Literatur und erheben dementsprechend keinen Anspruch auf die vollständige Darstellung sämtlicher ökologischer Prozesse.

6.2 Typ B – Pumpspeicher

Die ökologischen Auswirkungen von Typ B, dem Pumpspeicher, sind je nach Fallbeispiel sehr unterschiedlich, weshalb sie im Folgenden separat dargestellt werden. Gemeinsam ist den Pumpspeichern, dass sich die Nutzung in der Regel nur auf den oberen und den unteren Speicher auswirkt, nicht aber auf den Unterlauf. Eine Ausnahme ist das Beispiel Grimsel. Zudem wurden in allen Fällen hauptsächlich die Wechselwirkungen zwischen den physikalischen und biochemischen Prozessen untersucht. Analysen der Auswirkungen auf die Lebensräume und Organismen fehlen weitgehend, mit Ausnahme des Lago di Poschiavo.

Im Beispiel Sihlsee – Zürichsee betreffen die ökologischen Auswirkungen den oberen Speicher (Abbildung 9). Dafür verantwortlich ist der Wasseraustausch zwischen den beiden Speichern. Entscheidend für die Auswirkungen ist die Tatsache, dass Wasser aus der Tiefe entnommen wird. Würde das Wasser von der Oberfläche entnommen, wären die Auswirkungen anders. Der untere Speicher wird auch wegen seiner Grösse wenig beeinflusst, denn der Zürichsee ist achtmal so gross wie der Sihlsee. Aus demselben Grund wird auch der Unterlauf des Zürichsees, die Limmat, vom Pumpbetrieb nicht tangiert.

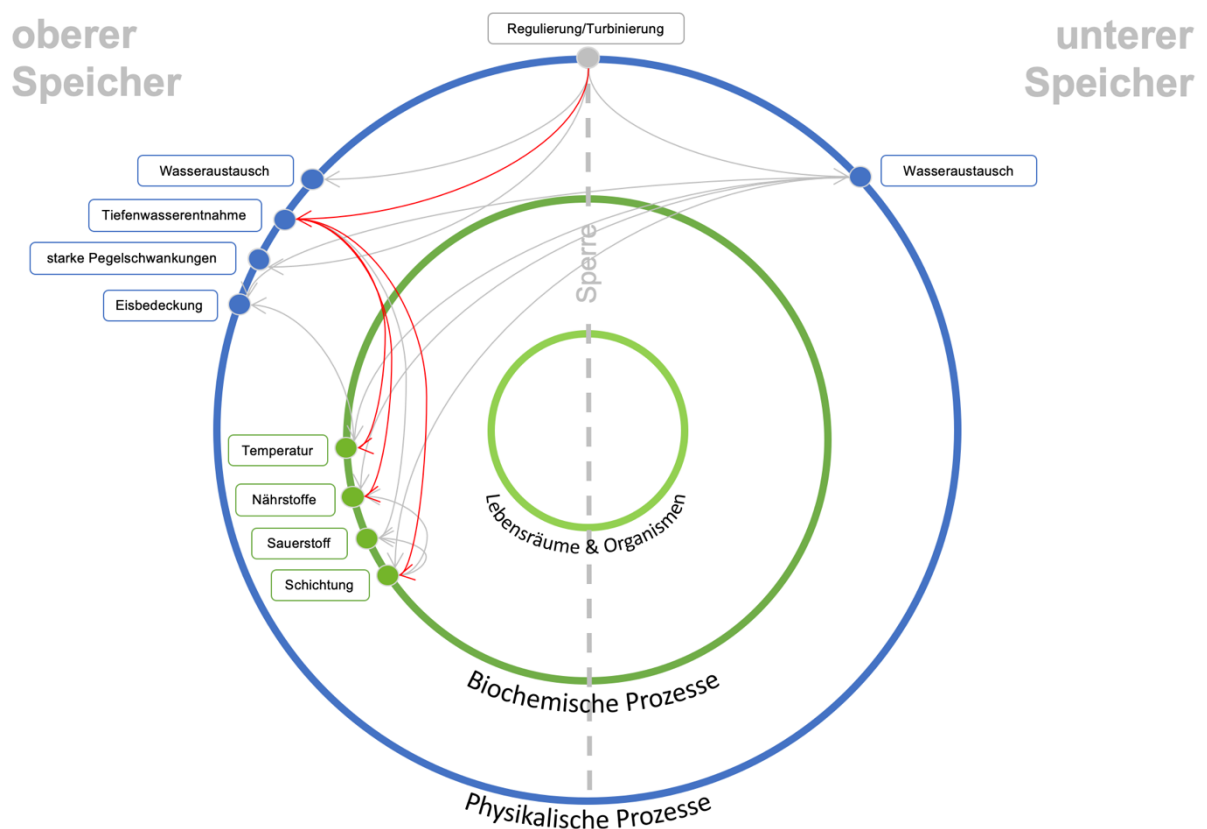


Abbildung 9: Ökologische Auswirkungen des Typs B (Beispiel Pumpspeicherkraftwerk Sihlsee – Zürichsee). Die kritischen Auswirkungen (rot) verknüpfen in erster Linie physikalische und biochemische Prozesse (Kobler et al., 2018, 2019; Kobler & Schmid, 2019)

Im Beispiel Lago Bianco – Lago di Poschiavo ist der obere Speicher weniger betroffen (Abbildung 10). Das liegt an dessen alpiner Lage und der deshalb wenig entwickelten Beschaffenheit des Sees. Im Gegensatz dazu verfügt der Lago di Poschiavo über eine entwickelte Ökologie, wie es einem natürlichen See dieser Höhenlage entspricht. Der Wasseraustausch zwischen den Speichern ist für die ökologischen Auswirkungen verantwortlich. Kritisch ist der Einfluss des Wassers aus dem oberen Speicher auf die Temperatur, die Trübung und die Schichtung des unteren Speichers. Diese Faktoren wirken sich auf die Lichtverhältnisse und somit auf die Lebensbedingungen der Organismen aus. Eine positive ökologische Auswirkung des Pumpbetriebs wäre die Reduktion von Schwall und Sunk im Unterlauf des oberen Speichers.

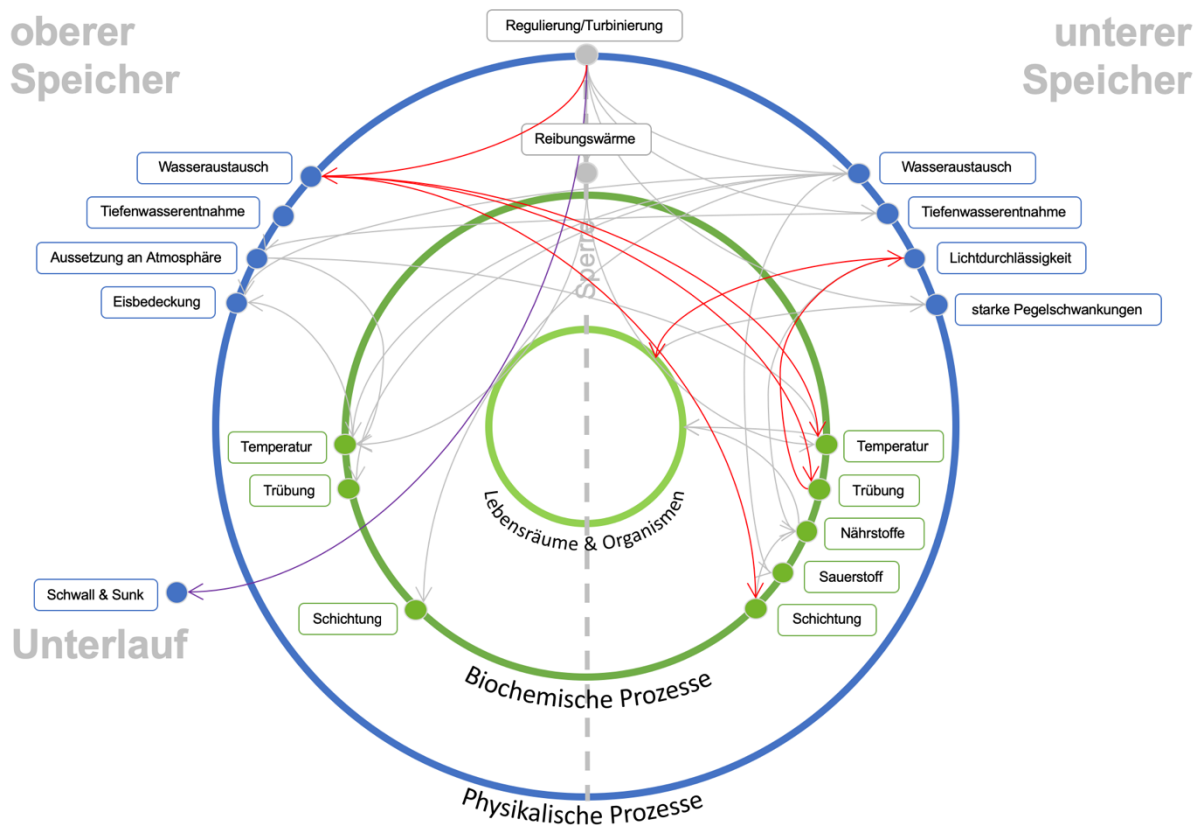


Abbildung 10: Ökologische Auswirkungen von Typ B (Beispiel Pumpspeicherkraftwerk Lago Bianco – Lago di Poschiavo). Die kritischen Auswirkungen (rot) werden vor allem durch den Wasseraustausch zwischen den beiden Speichern verursacht. Eine positive Auswirkung (violett) wäre die Reduktion von Schwall und Sunk (Bonalumi et al., 2012; Bonalumi & Schmid, 2011).

Beim Fall Oberaarsee – Grimselsee wirkt sich der Pumpspeicherbetrieb auf beide Speicher aus (Abbildung 11). Der Grimselsee ist trüber und kälter, sonst sind die beiden Speicher vergleichbar. Da in dieser Höhenlage die Entwicklung ökologischer Parameter eingeschränkt ist, hat der Wasseraustausch wenig Auswirkungen auf die Ökologie, bzw. sind in der Studie keine untersucht worden. Auf den Unterlauf, der aus dem Grimselsee gespeisen wird, wirkt sich der Austausch auf die Wasserqualität aus. Die Staumauererhöhung des Grimselsees hätte erhebliche Auswirkungen auf die Ökologie des gesamten Systems (siehe Kapitel 4.3.6).

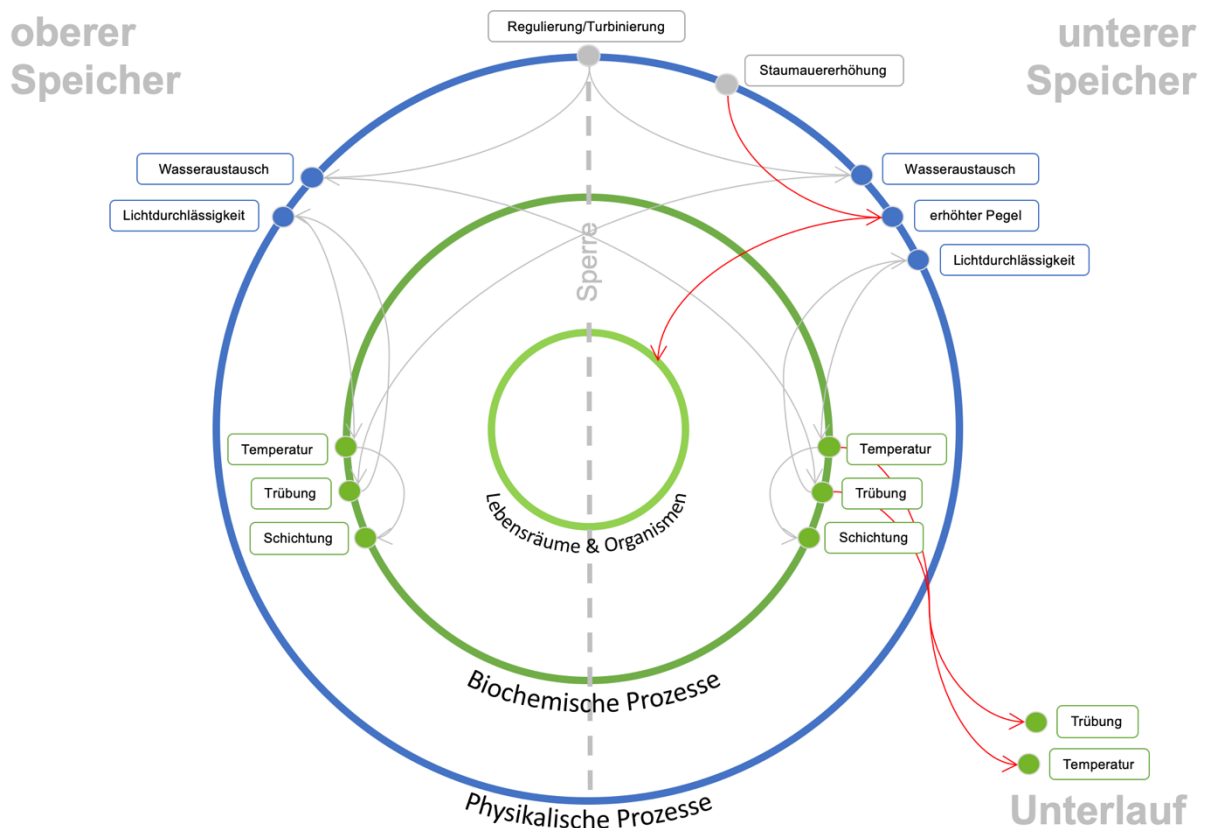


Abbildung 11: Ökologische Auswirkungen von Typ B (Beispiel Pumpspeicherkraftwerk Oberaarsee – Grimselsee). Die kritischen Auswirkungen (rot) betreffen den unteren Speicher sowie den Unterlauf (Bonalumi et al., 2011; Loser, 2012).

6.4 Typ D – Neubau eines Speichers

Beim Neubau eines Speichers ist die Zerstörung der bestehenden Lebensräume durch die Überflutung sehr einschneidend (Abbildung 13; siehe auch Kapitel 4.3.7.). Auch auf den Unterlauf gibt es ökologische Auswirkungen, da die Durchgängigkeit und somit der Geschiebetransport sowie die Vernetzung von Pflanzen und Tieren unterbrochen wird. Wird der neue Speicher zur Wasserkraftproduktion genutzt, wird der Unterlauf zudem von Schwall und Sunk oder Restwasser beeinflusst. Der Unterbruch eines Fließgewässers durch ein Stillgewässer erhöht ausserdem die Wassertemperatur des unterliegenden Fließgewässers (Kapitel 4.2.1.). Der Bau des Speichers im oberen Teil des Einzugsgebiets kann die ökologischen Auswirkungen minimieren, weil schlicht weniger Fließstrecke beeinträchtigt wird.

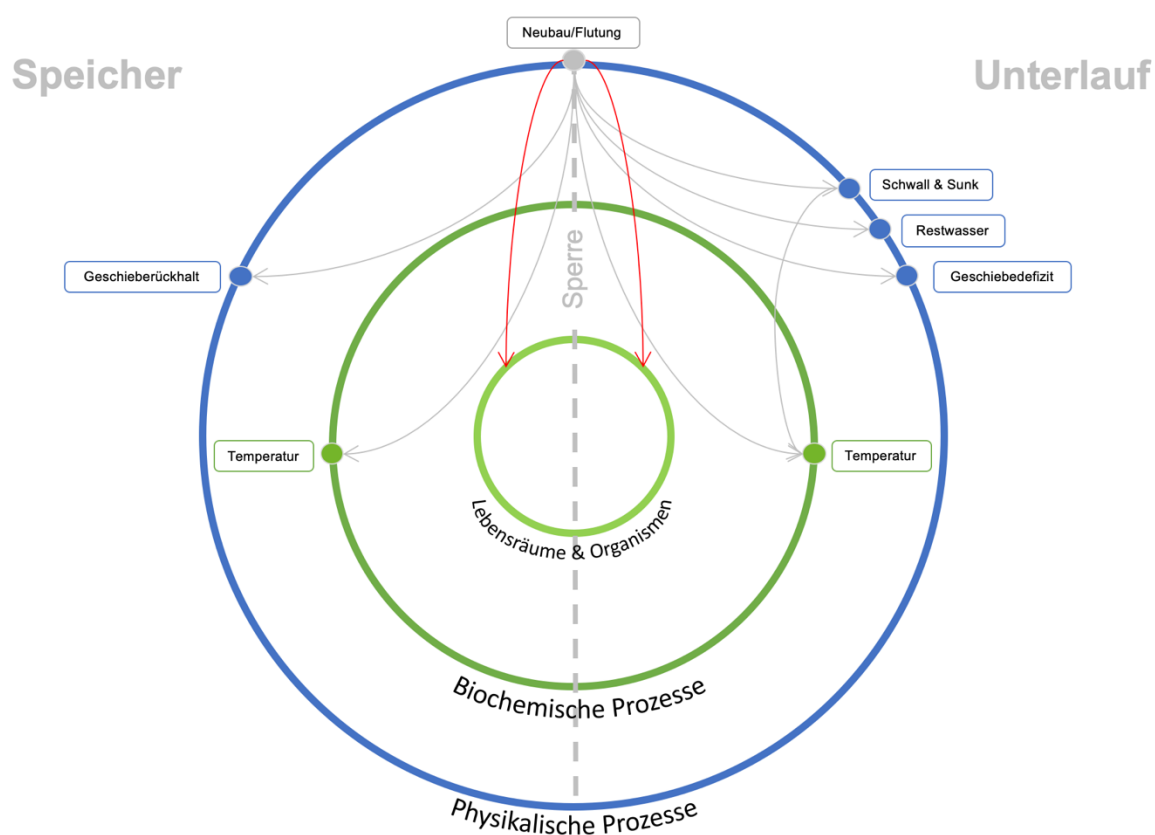


Abbildung 13: Ökologische Auswirkungen von Typ D (Neubau von Speichern). Die kritischen Auswirkungen (rot) beziehen sich auf die Zerstörung von Lebensräumen und Organismen (Ehrbar et al., 2018, 2019; Farinotti et al., 2016, 2019).

6.5 Typ E – Talsperrenerhöhung

Wie beim Neubau, überflutet auch eine Talsperrenerhöhung zusätzliche Uferbereiche (Abbildung 14). Wie auch Typ D (Neubau eines Speichers) zerstört auch Typ E Lebensraum, jedoch in einem geringeren Umfang. Auch hier gilt, je weiter oben eine Talsperre erhöht wird, desto geringer sind die Auswirkungen auf Lebensräume und Organismen. Ob und wie sich durch eine Talsperrenerhöhung die ökologischen Auswirkungen auf den Unterlauf verstärken, muss von Fall zu Fall untersucht werden.

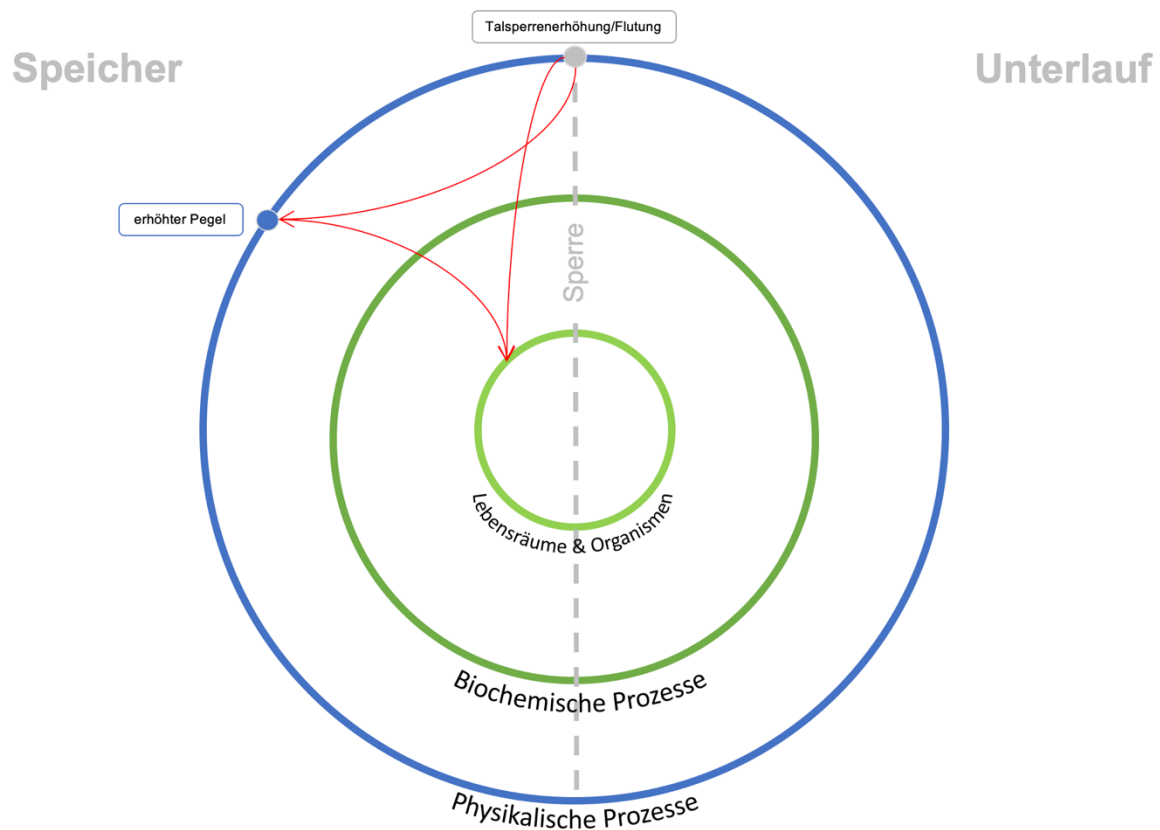


Abbildung 14: Ökologische Auswirkungen von Typ E (Talsperrenerhöhung). Die kritischen Auswirkungen (rot) betreffen erhöhte Pegel und dadurch zerstörte Lebensräume (Felix et al., 2020; Fuchs et al., 2019).

6.6 Typ F – Bewässerungsteich

Die ökologischen Auswirkungen von Bewässerungsteichen konzentrieren sich auf den Teich selbst (Abbildung 15), über Auswirkungen auf den Unterlauf liegen keine Informationen vor. Kritisch für die Funktion als Lebensraum ist die Fläche, die Tiefe und das Volumen des Teiches, damit ein natürlicher Sauerstoffaustausch stattfinden kann. Darauf sollte beim Neubau geachtet werden. Im Beispiel der Mittelgebirgsterrasse Trams im Tirol sind neben der Gewässergrösse die Vegetationsparameter entscheidend für die Biodiversität der Teiche (Kapitel 4.3.9).

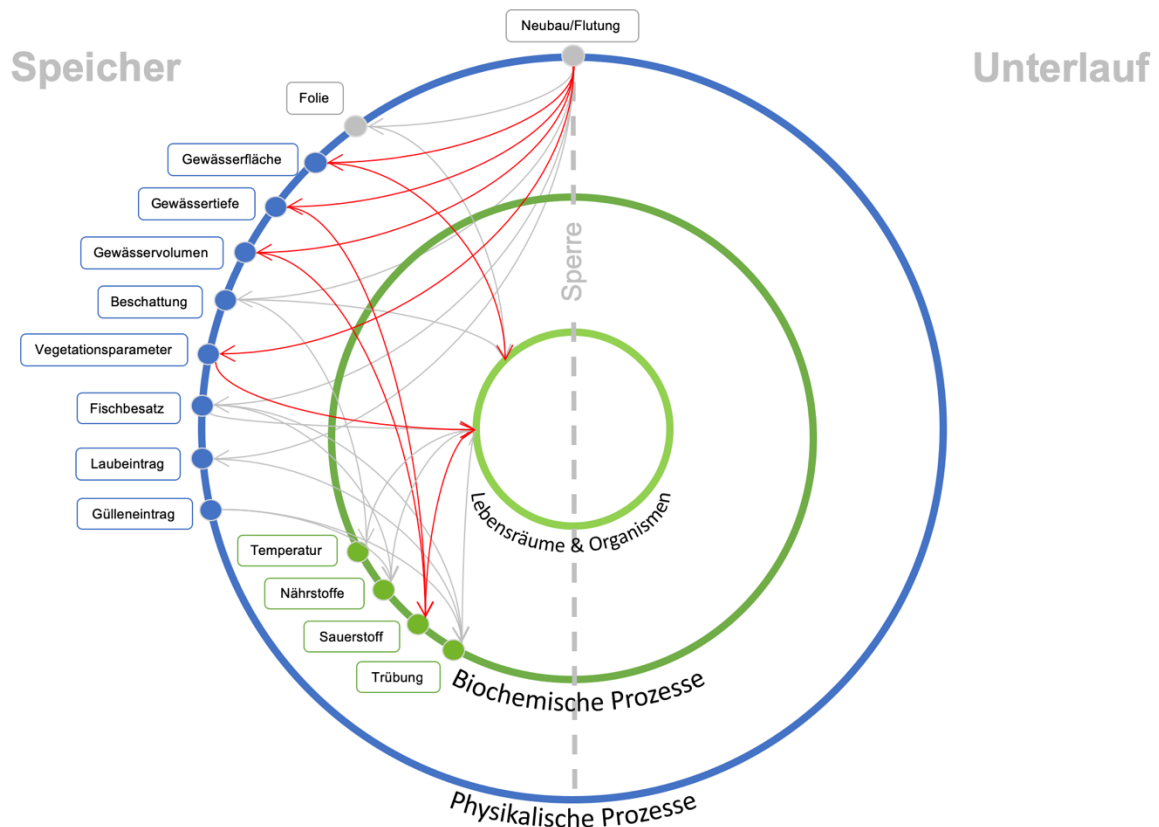


Abbildung 15: Ökologische Auswirkungen des Typs F (Bewässerungsteiche). Die kritischen Auswirkungen (rot) basieren auf den Daten der Trams (Glaser et al., 2003), des Bewässerungsteiches der Jucker Farm AG (Jucker Farm AG, 2015) sowie auf weiteren Quellen (Eppenberger-Media GmbH, 2020; Hubertus Beutler GmbH, 2018).

6.8 Fazit Speichertypen

Die «ökologischen Wirkungskreise» veranschaulichen, wie unterschiedlich die ökologischen Auswirkungen der Speichertypen A-G sind. Sogar innerhalb der Speichertypen gibt es je nach Fallbeispiel grosse Unterschiede, wie an den drei Pumpspeichern des Typs B zu erkennen ist. Bei allen Typen sind die ökologischen Auswirkungen auf den Speicher besser bekannt als die auf den Unterlauf. Ausgenommen sind die veränderten Abflussregime von Wasserkraftspeichern, die in diesem Bericht aber nicht genauer betrachtet wurden.

Die Hauptauswirkungen sind vor allem beim Speicher zu verorten, ausser beim Pumpspeicher, wo zwei Speicher involviert sind. Dort ist die Ausprägung der Auswirkungen davon abhängig, wie naturnah ein Speicher ist. Falls beide naturnah sind (Beispiel des Sihlsees), ist der kleinere Speicher stärker betroffen.

Die physikalischen Prozesse, die sich besonders hervorgehoben haben, betreffen den Pegel; mit Ausnahme der Pumpspeicher, wo primär der Wasseraustausch zu negativen Auswirkungen führt. Bei Typ A, dem Mittellandsee, sind entweder eingeschränkte Pegelschwankungen oder ein dauerhaft erhöhter Pegel für die Auswirkungen verantwortlich. Bei Typ C, dem Fliessgewässer, ist es ein geringer Pegelstand und bei den Typen D und E zu starke Schwankungen. Bei den neuen Speichern, den Typen D-G, ist die Überflutung von potentiell ökologisch wertvollem Gelände die Hauptauswirkung. Die Änderung der Wassertemperatur im Speicher und im Unterlauf ist der primäre biochemische Prozess, ausser in den Fallbeispielen der Typen E und G. Weiter ist die Trübung wichtig und bei Pumpspeichern die Schichtung. Wie sich die physikalischen und biochemischen Prozesse durch die Mehrzwecknutzung auf die Lebensräume und Organismen auswirken, ist kaum untersucht. Am meisten Informationen finden sich zu den physikalischen Prozessen und ihrer Wechselwirkung mit den biochemischen.

Schlussendlich sind die ökologischen Auswirkungen aber hauptsächlich eine Frage der Bewirtschaftung, wie in den «ökologischen Wirkungskreisen» gut ersichtlich wird. Praktisch alle physikalischen Prozesse, die sich weiter auf die biochemischen Prozesse und schlussendlich auf die Lebensräume und Organismen auswirken, werden entweder durch die Regulierung, die Turbinierung oder den Neubau verursacht.

6.9 Chancen

Die Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern hat nicht nur negative ökologische Auswirkungen zur Folge, sie bietet auch Chancen, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Am Lago di Poschiavo und am Beschneigungsteich Ahornsee wurden die Beispiele der Reduktion von Schwall und Sunk durch den Pumpspeicherbetrieb und die Schaffung eines Mehrwerts für die Ökologie durch die naturnahe Ufergestaltung aufgezeigt (Kapitel 4.3.5 und 6.2, resp. 4.3.10 und 6.7). Auch im Oberwallis werden Vorteile für die Ökologie durch die Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern wahrgenommen. Durch die Möglichkeit zur Regulierung des Abflusses sei zum Beispiel die Vispa (Unterlauf des Mattmark Stausees) ein sehr gutes Fischgewässer, da es keine starken Hochwasser mehr gäbe, die den Bestand ausschwemmen (Maurer, 2020).

Bewässerungsteiche können einen wichtigen Beitrag zum Schutz der Fliessgewässerökologie leisten, indem sie die allgemeine Wasserverfügbarkeit in Trockensituationen erhöhen. In den häufiger und extremer werdenden Trockenperioden fallen die Niedrigwassersituationen in Bächen und Flüssen mit dem erhöhten Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft zusammen. Je mehr Bauern über einen Bewässerungsteich verfügen und das zusätzliche Wasser daraus beziehen können, desto besser können Fliessgewässer entlastet werden. Beschneigungsteiche sorgen nur begrenzt für einen ähnlichen Effekt, denn für die Beschneigung aus Teichen wird weniger Wasser benötigt, als bei der Direktentnahme aus Quellen und Bächen. Somit wird weniger Wasser verbraucht und die Belastung auf die Gewässer ist geringer (LUA Salzburg, 2000).

Eine weitere Chance in Bezug auf den Klimawandel ist der Neubau und der Ausbau von Speichern (Talsperrenerhöhung). Alpine Speicher können einen Ersatz für Gletscher darstellen, indem sie Abfluss aus dem Winter- ins Sommerhalbjahr transferieren und somit den Veränderungen des Abflussregimes entgegenwirken. Insbesondere bei Wasserknappheit im Sommer ist diese saisonale Umlagerung interessant. Dabei muss aber beachtet werden, dass die saisonale Umlagerung für die Energieproduktion genau in die andere Richtung verläuft. Zusätzlich können Wasserkraftreservoirs im Sommer die natürliche kühlende Wirkung von Bächen aus ehemals vergletscherten Einzugsgebieten ersetzen, indem sie kühles Tiefenwasser in den Unterlauf leiten. Zwar entfällt durch das Ersetzen eines Fließgewässers durch ein Stillgewässer die kühlende Wirkung auf die Umgebung des Speichers selbst, aber die Umgebung des Unterlaufs kann in der Jahresbilanz dennoch gekühlt werden (Kapitel 4.2.1 und 4.3.7). Ausserdem vergrößert der Neubau und der Ausbau von Speichern durch die Kapazitätserweiterung den Beitrag zum Hochwasserschutz (Felix et al., 2020). Regulierte Wasserspeicher können extreme Hochwasser abdämpfen. Natürliche Hochwasser sind zwar wichtig für die intakte Ökologie eines Gewässers (Rey et al., 2002), aber die zerstörerischen, durch den Klimawandel an Intensität und Frequenz zunehmenden, Hochwasser zu dämpfen könnte für die Ökologie ein Vorteil sein, so die Hypothese von (Roth, 2019).

7 Fazit und Ausblick

Die Literaturanalyse zeigte, dass eine systematische Erhebung der ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern bisher fehlt. Uns liegt keine einzige Untersuchung vor, die dieses Thema explizit behandelt. Allerdings sind viele Einzelbeispiele über die ökologischen Auswirkungen einzelner Nutzungen von Wasserspeichern vorhanden, die aber schwer vergleichbar und keine pauschalen Aussagen zu den ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern zulassen. Die Typisierung der Mehrzweckspeicher ermöglichte eine Generalisierung aus den unübersichtlichen Einzelfällen und erlaubt eine systemische Betrachtung der ökologischen Auswirkungen. Dabei wurde deutlich, dass über die physikalischen und biochemischen Prozesse einiges bekannt ist, jedoch nicht über deren Auswirkungen auf die Lebensräume und die Organismen. Viele Aussagen von Experten und Expertinnen deuten darauf hin, dass die ökologischen Auswirkungen der Mehrzweckspeicher wesentlich von der Speicherbewirtschaftung anhängig sind.

Für das bessere Verständnis und die Beurteilung ökologischer Auswirkungen der Mehrzwecknutzung in der Schweiz wären folgende Fragestellungen von Interesse:

- unterschiedliche Perspektiven der Ökologie (z.B. Vögel vs. Fische)
- ökologische Auswirkungen durch die Nutzung *per se* (z.B. Beschneidung)
- Betrachtung der ökologischen Auswirkungen von Mehrzweckspeichern im Kontext des Klimawandels und unter extremen Bedingungen
- Zusätzliche Verschmutzungen der Gewässer (z.B. Pestizide, Mikroplastik, Hormone)

Auch könnte das Thema nach einzelnen Nutzungen angegangen werden, zum Beispiel mit einer Zusammenstellung der ökologischen Auswirkungen einzelner Nutzungen. Anhand dieser Zusammenstellung wären dann Argumentationsketten möglich und es könnte beispielhaft dargestellt werden, wie sich Kombinationen von Nutzungen auf die Ökologie auswirken. Zusätzlich wäre wichtig zu untersuchen, wo wieviel Wasser aus dem System Mehrzweckspeicher genommen wird und wo wieviel, oder ob überhaupt, wieder ins System zurückgeführt wird. Dabei sollte der Zeitpunkt der Entnahme und der Rückgabe sowie die Saisonalität des Gewässers berücksichtigt werden.

8 Danksagung

Bei allen, die ihr Wissen, ihre Erfahrungen und Einschätzungen für dieses Projekt eingebracht und geteilt haben, möchten wir uns herzlich bedanken. Der Dank geht insbesondere an:

Begleitung BAFU: Petra Schmocker-Fackel, Fabia Hüsler, Edith Oosenbrug

Begleitgruppe: Martin Barben (BAFU), Jan Béguin (BLW), Guido Federer (BFE), Rolf Gurtner (BAFU), Bernhard Hohl (BFE), Roland Hohmann (BAFU), Christian Holzgang (BAFU), Andreas Inderwildi (BAFU), Andreas Knutti (BAFU), Philipp Röser (BAFU), Carlo Scapozza (BAFU), Ulrich Sieber (BAFU), Markus Thommen (BAFU)

Diverse InterviewpartnerInnen

TeilnehmerInnen ExpertInnen-Workshop, 11. Juni 2020: Martin Barben (BAFU), Jan Béguin (BLW), Astrid Bjørnsen Gurung (WSL), Robert Boes (VAW ETHZ), Julia Brändle (WWF), Michael Döring (ZHAW), Christina Dübendorfer (EBP), Guido Federer (BFE), Björn Fuhrer (Landschaftswerk Biel-Seeland), Andreas Inderwildi (BAFU), Christoph Iseli (Landschaftswerk Biel-Seeland), Elke Kellner (WSL), Klaus Lanz (international water affairs), Susanna Meyer (Pro Natura), Stephan Müller (BAFU), Werner Müller (BirdLife), Roland Olschewski (WSL), Edith Oosenbrug (BAFU), Michel Piot (SWV), Andrea Salvetti (Kanton Tessin), Carlo Scapozza (BAFU), Bettina Schäfli (UniBe), Sandro Schläppi (KWO), Martin Schmid (Eawag), Petra Schmocker-Fackel (BAFU), Manfred Stähli (WSL), Markus Thommen (BAFU), Christian Unterberger (WSL)

Projekt-Team WSL: Astrid Bjørnsen Gurung, Manfred Stähli, Roland Olschewski, Christian Unterberger, Elke Kellner

Dieser Teilbericht wurde ermöglicht durch das vom Bundesamt für Umwelt finanzierte Projekt «Hydro2018 Potential Wasserspeicher Phase III» (2019-2020, Ref. I085-0951) und zusätzliche Mittel der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL.

9 Literatur

- Baudraz, M. (2018). *Effets de la Régulation du Lac sur la Faune et la Flore de la Grande Cariçaie*. Association de la Grande Cariçaie.
- Bonalumi, M., Anselmetti, F. S., Kaegi, R., & Wüest, A. (2011). Particle dynamics in high-Alpine proglacial reservoirs modified by pumped-storage operation. *Water Resources Research*, 47(9), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2010WR010262>
- Bonalumi, M., Anselmetti, F. S., Wüest, A., & Schmid, M. (2012). Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. *Water Resources Research*, 48(8), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2012WR011844>
- Bonalumi, M., & Schmid, M. (2011). *Simulation der Auswirkungen auf die Schichtung und Trübung im Lago di Poschiavo und im Lago Bianco bei unterschiedlichen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen*. Eawag.
- Bözbergblog. (2018). *Innovative Zusammenarbeit: Forschung, Naturschutz und Landwirtschaft mit neuem, gemeinsamen Lösungsansatz*. Themenblog Zum Standort Bözberg-West Und Umgebung. <https://boezbergblog.ch/innovative-zusammenarbeit-forschung-naturschutz-und-landwirtschaft-mit-neuem-gemeinsamen-loesungsansatz/>
- BPUK, LDK, BAFU, ARE, & BLW. (2019). *Gewässerraum. Modulare Modulare Arbeitshilfe zur Festlegung und Nutzung des Gewässerraums in der Schweiz*. Schweizerische Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren-Konferenz (BPUK), Konferenz kantonaler Landwirtschaftsdirektoren (LDK), Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/fachinfo-daten/modulare-arbeitshilfe-zur-festlegung-und-nutzung-des-gewaesserraums-in-der-schweiz.pdf.download.pdf/Arbeitshilfe_GWR_Module_1-3.4_Juni_2019_gesamt.pdf
- Branche, E. (2015). *Multipurpose Water Uses of Hydropower Reservoirs*. EDF (Électricité de France). <https://www.hydroworld.com/content/dam/hydroworld/online-articles/documents/2015/10/MultipurposeHydroReservoirs-SHAREconcept.pdf>
- Bryner, A., Angst, M., Fischer, M., & Vollenweider, S. (2020). Wasserpolitischer Jahresrückblick 2019. *Aqua & Gas*, 5, 58–63.
- Carraro, L., Bertuzzo, E., Mari, L., Fontes, I., Hartikainen, H., Strepparava, N., Schmidt-Posthaus, H., Wahli, T., Jokela, J., Gatto, M., & Rinaldo, A. (2017). Integrated field, laboratory, and theoretical study of PKD spread in a Swiss prealpine river. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(45), 11992–11997. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713691114>
- Carraro, L., Mari, L., Hartikainen, H., Strepparava, N., Wahli, T., Jokela, J., Gatto, M., Rinaldo, A., & Bertuzzo, E. (2016). An epidemiological model for proliferative kidney disease in salmonid populations. *Parasites and Vectors*, 9(487), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1759-z>
- Casanova, E. (2016). *AquaFutura Regionales Wassermanagement Im Parc Ela*. Esther Casanova Raumplanung GmbH.
- Delpa, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., & Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, 35(8), 1225–1233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>
- Doering, A., & Hamberger, S. (2007). *Der künstliche Winter - Mit Schneekanonen gegen den Klimawandel: Salto Mortale in die Vergangenheit*. (2.). Bund Naturschutz in Bayern.

- Dübendorfer, C., Ritscher, A., & Tratschin, R. (2019). *Trockenheit im Sommer und Herbst 2018. Auswirkungen und deren Bewältigung in der Schweizer Wasserwirtschaft*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), EBP.
- Ehrbar, D., Schmocker, L., Vetsch, D., & Boes, R. (2019). Wasserkraftpotenzial in Gletscherrückzugsgebieten der Schweiz. *Wasser Energie Luft*, *111*(4), 205–212.
- Ehrbar, D., Schmocker, L., Vetsch, D. F., & Boes, R. M. (2018). Hydropower potential in the periglacial environment of Switzerland under climate change. *Sustainability*, *10*(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su10082794>
- EPCN. (2010). *Das Kleingewässer-Manifest*. European Pond Conservation Network. <http://www.europeanponds.org>
- Eppenberger-Media GmbH. (2020). *Eigenes Bewässerungswasser als Option*. <https://www.eppenberger-media.ch/eigenes-bewaesserungswasser-als-option/>
- Etat de Fribourg. (2020). *Wasserablass für die Dynamik der Saane*. <https://www.fr.ch/de/rubd/wasser/news/wasserablass-fuer-die-dynamik-der-saane>
- Farinotti, D., Pistocchi, A., & Huss, M. (2016). From dwindling ice to headwater lakes: Could dams replace glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters*, *11*(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054022>
- Farinotti, D., Round, V., Huss, M., Compagno, L., & Zekollari, H. (2019). Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, *575*(7782), 341–344. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1740-z>
- Felix, D., Müller-Hagmann, M., & Boes, R. (2020). Ausbaupotential der bestehenden Speicherseen in der Schweiz Resumé. *Wasser Energie Luft*, *112*(1), 1–10.
- Fenocchi, A., Rogora, M., Sibilla, S., & Dresti, C. (2017). Relevance of inflows on the thermodynamic structure and on the modeling of a deep subalpine lake (Lake Maggiore, Northern Italy/Southern Switzerland). *Limnologica*, *63*, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.01.006>
- Fenrich, E. K. (2018). *Entwicklung eines ökologisch-ökonomischen Vernetzungsmodells für Wasserkraftanlagen und Mehrzweckspeicher*. Universität Stuttgart.
- Fuchs, H., Felix, D., Müller-Hagmann, M., & Boes, R. M. (2019). Bewertung von Talsperren-Erhöpfungsoptionen in der Schweiz. *Wasserwirtschaft*, *109*(5), 146–149. <https://doi.org/10.1007/s35147-019-0074-y>
- Fuhrer, B., Babbi, M., & Krüsi, B. O. (2019). Seespiegeldynamik und Vegetation in einem Feuchtgebiet im Bielersee (Schweiz) Veränderungen zwischen 1976 und 2017. *Naturschutz Und Landschaftsplanung*, *51*(09), 420–427.
- Gaudard, A., Schmid, M., & Wüest, A. (2017). Thermische Nutzung Von Oberflächengewässern. *Aqua & Gas*, *5*, 40–45.
- Gaudard, A., Weber, C., Alexander, T. J., Hunziker, S., & Schmid, M. (2018). Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *5*(5). <https://doi.org/10.1002/wat2.1295>
- Glaser, F., Mungenast, F., & Sonntag, H. (2003). Bewässerungsteiche als Lebensräume für Amphibien und Libellen am Beispiel der Trams bei Landeck (Tirol , Österreich) - Artenbestand, naturschutzfachliche Bedeutung, Schutz und Erhaltung. *Berichte Des Naturwissenschaftlichen-Medizinischen Verein Innsbruck*, *90*, 165–205.

- Haeberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y., & Schleiss, A. J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, *139*(2), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>
- Hari, R. E., Livingstone, D. M. ., Siber, R., Burkhardt-Holm, P., & Güttinger, H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, *12*, 10–26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01051.x>
- Hirsch, P. E. (2019). Wasserstandsschwankungen verhindern das Wachstum bodenlebender Algen in Stauseen – eine Herausforderung für den nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft. *REGIO BASILIENSIS*, *60*(2), 131–138.
- Hirsch, P. E., Eloranta, A. P., Amundsen, P. A., Brabrand, Å., Charmasson, J., Helland, I. P., Power, M., Sánchez-Hernández, J., Sandlund, O. T., Sauterleute, J. F., Skoglund, S., Ugedal, O., & Yang, H. (2017). Effects of water level regulation in alpine hydropower reservoirs: an ecosystem perspective with a special emphasis on fish. *Hydrobiologia*, *794*(1), 287–301. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3105-7>
- Hirsch, P. E., Schillinger, M., Appoloni, K., Burkhardt-Holm, P., & Weigt, H. (2016). Integrating economic and ecological benchmarking for a sustainable development of hydropower. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(9). <https://doi.org/10.3390/su8090875>
- Hodson, A., Brock, B., Pearce, D., Laybourn-Parry, J., & Tranter, M. (2015). Cryospheric ecosystems: A synthesis of snowpack and glacial research. *Environmental Research Letters*, *10*(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/110201>
- Hubertus Beutler GmbH. (2018). *PE-Folienteiche*. <http://www.beutlerbau.de/de/produkte/wasserbehaelter/folienbehaelter/material/>
- Iseli, G. (2015). *Künstliche Beschneidung in der Schweiz: Ausmass und Auswirkungen. Eine Forschungsarbeit durchgeführt im Rahmen des Praktikums Nachhaltige Entwicklung*. Universität Bern, Mountain Wilderness Schweiz.
- Jucker Farm AG. (2015). *Wasser für alle Fälle*. <https://www.juckerfarm.ch/farmticker/hofleben/wasser-fuer-alle-faelle/>
- Kellner, E., & Weingartner, R. (2018). Chancen und Herausforderungen von Mehrzweckspeichern als Anpassung an den Klimawandel. *Wasser Energie Luft*, *110*(2), 101–107.
- Keystone SDA. (2019). *Grimselekraftwerk: Bundesgericht wird sich erneut mit der Erhöhung der Staumauer befassen*. Ee News - Das Fachmagazin Für Erneuerbare Energien. <https://www.ee-news.ch/de/article/41376/grimselekraftwerk-bundesgericht-wird-sich-erneut-mit-der-erhoehung-der-staumauer-befassen>
- Kobler, U. G., & Schmid, M. (2019). Ensemble modelling of ice cover for a reservoir affected by pumped-storage operation and climate change. *Hydrological Processes*, *33*(20), 2676–2690. <https://doi.org/10.1002/hyp.13519>
- Kobler, U. G., Wüest, A., & Schmid, M. (2018). Effects of lake-reservoir pumped-storage operations on temperature and water quality. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su10061968>
- Kobler, U. G., Wüest, A., & Schmid, M. (2019). Combined effects of pumped-storage operation and climate change on thermal structure and water quality. *Climatic Change*, *152*(3–4), 413–429. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2340-x>
- Koschorreck, M., Downing, A. S., Hejzlar, J., Marcé, R., Laas, A., Arndt, W. G., Keller, P. S., Smolders, A.

- J. P., van Dijk, G., & Kosten, S. (2020). Hidden treasures: Human-made aquatic ecosystems harbour unexplored opportunities. *Ambio*, 49(2), 531–540. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01199-6>
- Losser, E. (2012). *Grimmel in Gefahr - Kraftwerkausbau bedroht Moorlandschaft*. WWF, Pro Natura, Greenpeace, Rheinaubund, Stiftung Landschaftsschutz Schweiz (SL), Aqua Viva, Schweizerische Greina-Stiftung (SGS), Schweizerische Energie-Stiftung (SES).
- LUA Salzburg. (2000). *Tätigkeitsbericht 1998/99*. Landesumweltanwaltschaft Salzburg.
- Lubini, V., Knispel, S., Sartori, M., Vicentini, H., & Wagner, A. (2012). Rote Listen Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen. Gefährdete Arten der Schweiz, Stand 2010. In *Umwelt-Vollzug* (Issue Nr. 1212). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweizer Zentrum für die Kartographie der Fauna.
- Maurer, L. (2020). *Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern im Oberwallis: Eine sinnvolle Klimaanpassungsmassnahme?* Universität Zürich.
- Meier, W., & Wüest, A. (2004). Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? *Wasser Energie Luft*, 96(11/12), 305–309.
- Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaepli, B., & Huwald, H. (2020). Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 115–142. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-366>
- Mountain Manager. (2006). Fortrac®-Geogitter ermöglichte Speicherteich in Flachau. In *Mountain Manager* (Vol. 37, Issue 4). EuBuCo Verlag SA.
- Mountaintalk. (2016). *Ein Speichersee wird zum Naherholungsgebiet*. <https://www.mountaintalk.com/news-trends/ein-speichersee-wird-zum-naherholungsgebiet/>
- NCCS. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland: Technical Report*. National Centre for Climate Services NCCS. https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/website/klima/CH2018_Technical_Report-compressed.pdf.download.pdf/CH2018_Technical_Report-compressed.pdf
- Nemergut, D. R., Anderson, S. P., Cleveland, C. C., Martin, A. P., Miller, A. E., Seimon, A., & Schmidt, S. K. (2007). Microbial community succession in an unvegetated, recently deglaciated soil. *Microbial Ecology*, 53(1), 110–122. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9144-7>
- Rey, P., Lott, C., Uehlinger, U., Robinson, C., Pitsch, P., Schlüchter, C., Mürle, U., Ortlepp, J., & Molinari, P. (2002). Der Spöl-Lebensraum und Energielieferant. *Cratschla: Informationen Aus Dem Schweizerischen Nationalpark*, 2, 20–23.
- Roth, P. F. (2019). *Mehrzwecknutzung von Grosswasserkraftwerken im Kanton Graubünden heute und in Zukunft*. Universität Zürich.
- SBB. (2016). *Neues Etzelwerk - Newsletter 2*.
- Schmid, M., & Köster, O. (2016). Excess warming of a Central European lake driven by solar brightening. *Water Resources Research*, 52, 8103–8116. <https://doi.org/10.1002/2016WR018651>
- Schweizer, S., Niedermayr, A., Roulier, C., Döring, M., Meyer, M., Schläppi, S., Baumgartner, J., Berger, B., Rohrer, M., Fahner, S., Schwegler, B., & Fankhauser, A. (2019). Entwicklungsszenarien einer alpinen Aue bei einem natürlichen Geschiebedefizit – die Triftaue im Oberhasli. *Wasser Energie Luft*, 111(4).
- Schweizer, S., Weissmann, H. Z., & Ursin, M. (2012). Der Begleitgruppenprozess zu den

- Ausbauprojekten und zur Restwassersanierung im Oberhasli. *Wasser Energie Luft*, 104(1).
- Seehausen, O., & Michel, M. (2015). *Einheimische Fische im Engadin und Puschlav unter Druck*. Eawag.
- Sollberger, S., Wehrli, B., Schubert, C. J., DelSontro, T., & Eugster, W. (2017). Minor methane emissions from an Alpine hydropower reservoir based on monitoring of diel and seasonal variability. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 19(10), 1278–1291.
<https://doi.org/10.1039/c7em00232g>
- Verordnung über den Schutz der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung (Hochmoorverordnung), Pub. L. No. SR 814.201 (1991). <http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19910009/index.html>
- Gewässerschutzverordnung (GSchV), Pub. L. No. SR 814.201 (1998).
<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19983281/index.html#app2ahref4>
- SRF. (2019). *An 25 Zentimetern scheiden sich die Geister*.
<https://www.srf.ch/news/schweiz/wasserpegel-des-lago-maggiore-an-25-zentimetern-scheiden-sich-die-geister>
- SRF. (2020). *Grimsel-Staumauer darf vorläufig nicht erhöht werden*.
<https://www.srf.ch/news/schweiz/entscheid-des-bundesgerichts-grimsel-staumauer-darf-vorlaeufig-nicht-erhoeht-werden>
- Staiger, L. (2008). *Wasserwirtschaftliche Aspekte und Vorgaben für die Errichtung und den Betrieb von Schigebieten in Österreich*. Technische Universität Graz.
- Swissinfo. (2019). *Ein grenzüberschreitender See sorgt für Zwietracht*.
https://www.swissinfo.ch/ger/streit-um-wasserpegel_ein-grenzueberschreitender-see-sorgt-fuer-zwietracht/44856480
- Teich, M., Lardelli, C., Bebi, P., Gallati, D., Kytzia, S., Pohl, M., Pütz, M., & Rixen, C. (2007). *Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung*. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Yvon-Durocher, G., Allen, A. P., Montoya, J. M., Trimmer, M., & Woodward, G. (2010). The Temperature Dependence of the Carbon Cycle in Aquatic Ecosystems. In G. Woodward (Ed.), *Advances in Ecological Research* (Vol. 43, pp. 267–313). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385005-8.00007-1>
- Zwicky, F. (1966). *Entdecken, Erfinden, Forschen: Im Morphologischen Weltbild*. Droemer Knaur.