Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 108 (2016)

Heft: 3

Artikel: Einfluss der Wasserführung auf das Erscheinungsbild und die Akustik von Wasserfällen : Restwasserbestimmung bei Wasserentnahmen oberhalb von Wasserfällen

Autor: Schaiko, Isabella / Arnold, Florian / Demarchi, Liliana

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939526

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Einfluss der Wasserführung auf das Erscheinungsbild und die Akustik von Wasserfällen

Restwasserbestimmung bei Wasserentnahmen oberhalb von Wasserfällen

Isabella Schalko, Florian Arnold, Liliana Demarchi, Priska Helene Hiller, Robert Boes

Zusammenfassung

Wasserfälle sind besondere Landschaftselemente. Bei Gewässern mit Wasserfällen kann eine Wasserentnahme, z. B. zur Wasserkraftnutzung, zu einem Konfliktpotenzial zwischen den Nutzungsinteressen und den Anliegen des Natur- und Landschaftsschutzes führen. Im Rahmen von drei Masterarbeiten wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich eine Methode zur Restwasserbestimmung unter Berücksichtigung der Beeinträchtigungsdauer eines Wasserfalls, der Änderung seines Erscheinungsbilds sowie seiner Akustik (Lautstärke) infolge Wasserentnahmen entwickelt. Dabei wurden Daten von insgesamt 15 Wasserfällen unterschiedlichen morphologischen Typs in der Schweiz, Österreich und Norwegen erhoben und analysiert. Es zeigte sich, dass wahrnehmbare Änderungen des Erscheinungsbilds und der Akustik von der Wasserführung und vom morphologischen Typ des betreffenden Wasserfalls abhängen. Die Änderungen der Akustik (wahrnehmbare Lautstärke) sind jedoch weniger ausgeprägt als die optischen. Bei geringen Durchflüssen sind die sichtbaren und hörbaren Änderungen bedeutender als bei grossen Durchflüssen. Die hier weiterentwickelte Methodik kann zur Restwasserbestimmung an Gewässern mit Wasserfällen angewandt werden, um die Einwirkungsintensität der geplanten Wasserentnahme auf das Erscheinungsbild und die Akustik des betreffenden Wasserfalls möglichst objektiv abzuschätzen. Dabei ist jener kritische Durchfluss zu identifizieren, ab dem die typischen und das Erscheinungsbild des Wasserfalls prägenden Fliesswege aktiviert werden. Die Einwirkungsintensität wird der Bedeutung des Wasserfalls in einer Matrix gegenübergestellt, woraus die Auswirkung der geplanten Wasserentnahme sichtbar wird, die für den Wasserfall und dessen Bedeutung als Landschaftselement entsteht.

1. Einleitung und Motivation

Wasserfälle sind bedeutende Landschaftselemente, die in erster Linie durch ihre grosse Fallhöhe und den mitunter gischtartigen Durchfluss visuell in Erscheinung treten. Zudem erzeugt das freifallende und wieder auftreffende Wasser eine charakteristische Geräuschkulisse. Wasserfälle spielen bei kantonalen Wasserstrategien, wie z. B. jener des Kantons Bern (*AWA BE,* 2011), vor allem wegen ihrer touristischen Bedeutung eine wichtige Rolle. Für die Wasserkraftnutzung sind Wasserfälle aufgrund des ausgeprägten Gefälles von grossem Interesse. Dies führt an Gewässern mit Wasserfällen zu Konflikten zwischen der Projektierung von Wasserentnahmen und dem Naturschutz (*WWF GL,* 2009, 2015; *Kugler,* 2011; *Rodewald* und *Baur,* 2015). Es stellt sich die Frage, inwieweit eine Reduktion der Wasserführung eines Wasserfalls dessen Aussehen und Akustik beeinträchtigt. Die heutige Restwasserbestimmung in der Schweiz (*GSchG,* 1991) ist jedoch nicht unmittelbar an Bedingungen geknüpft, welche die Ästhetik von Wasserfällen berücksichtigen.

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurden seit 2009 zusammen mit verschiedenen Partnerinstituten drei Masterarbeiten zum Einfluss der Wasserführung eines Wasserfalls auf sein Erscheinungsbild und die Akustik durchgeführt (*Hiller,* 2010; *Demarchi,* 2012; *Arnold,* 2015). Dabei wurden Messdaten und Fotoserien von diversen Wasserfällen in der Schweiz, in Österreich und Norwegen erhoben und ausgewertet. Im Folgenden werden nach einer Beschreibung der Wasserfallcharakteristika zunächst die Methodik und die Resultate der genannten Masterarbeiten präsentiert. Darauf aufbauend, wird ein Vorgehen zur Restwasserbestimmung vorgeschlagen, welches sich bei Projekten geplanter Wasserentnahmen an Gewässern mit Wasserfällen anwenden lässt. Der für Flora und Fauna entlang eines Gewässers benötigte Restwasserdurchfluss gemäss Gewässerschutzgesetz (*GSchG,* 1991) wird hier nicht behandelt.

2. Wasserkraft und Wasserfälle

Wasserfälle hatten in der Vergangenheit einen bedeutenden Anteil an der Nutzung der Wasserkraft und einen grossen Einfluss auf die Entwicklung von Wirtschaft und Industrie in wasserfallreichen Ländern wie Norwegen und der Schweiz (*Hudson,* 2013). Beispiele in der Schweiz sind u. a. die Kleinwasserkraftwerke am Rheinfall (KW Neuhausen, SH) aus dem Jahr 1889, am Diesbach (Hochdruckkraftwerk Diesbach AG, GL) von 1896 und am Reichenbachfall (KW Schattenhalb, BE) von 1909. Der Wasserkraft kommt zur Erreichung nationaler und internationaler Energie- und Klimaschutzziele eine grosse Bedeutung zu. In der Schweiz soll im Zuge der Energiestrategie 2050 des Bundes die Jahresproduktion aus Wasserkraftwerken bis Mitte des Jahrhunderts um 3 bis 4 TWh steigen (*Andersson et al.,* 2011; *BFE,* 2012; *SWV,* 2012). Sowohl auf globaler Ebene als auch in vielen Nationalstaaten ist die Wasserkraft die wichtigste erneuerbare Quelle für elektrische Energie mit den höchsten Wirkungsgraden und den besten Erntefaktoren (Englisch *energy payback ratio*). In Europa schreitet die Entwicklung der Kleinwasserkraft in den letzten Jahren stark voran, beispielsweise in «typischen» Wasserkraftländern wie der Schweiz, Österreich und Norwegen. In der Schweiz erfolgt eine vermehrte Wasserkraftnutzung u. a. infolge des Bundesratsbeschlusses zum Atomausstieg und der sog. kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) des Bundes (*BFE,* 2015). Mithilfe der KEV kön-

nen Kleinwasserkraftprojekte gefördert und kann deren Wirtschaftlichkeit erhöht werden (*BFE,* 2012). Bei einigen dieser Kraftwerksprojekte soll Wasser aus wasserfallbildenden Bergbächen und -flüssen energetisch genutzt werden. Da es sich meist um reine Laufwasserkraftwerke ohne nennenswerte Speicherbecken handelt, wird das Wasser nur während des Turbinenbetriebs ausgeleitet.

3. Klassifizierung und Typisierung von Wasserfällen

Trotz einer Vielzahl an internationalen Beschreibungen und Typisierungen von Wasserfällen gibt es derzeit keine allgemein anerkannte und angewandte Klassifizierungsmethodik. Da Wasserfälle ihr Erscheinungsbild laufend verändern, ist es schwierig, relevante Kriterien zu definieren. *Schneider* (1989) erfasste tabellarisch 250 Wasserfälle, welche als Grundlage für die Erstellung einer Datenbank dienten. In dieser Datenbank werden 164 Wasserfälle beschrieben und basierend auf den folgenden vier Kriterien bewertet: Fallhöhe, durchschnittliche Wasserführung, Sichtbarkeit und Bekanntheit. *Schwick* und *Spichtig* (2002) befassten sich mit der Verteilung, Systematik, Bedeutung und Gefährdung von insgesamt rund 250 Schweizer Wasserfällen. In der Schweiz haben die meisten Wasserfälle eine Fallhöhe kleiner als 30 m (*Schwick* und *Spichtig,* 2002); diese sind in der zwischenzeitlich auf rund 700 Schweizer Wasserfälle erweiterten Datenbank (*Schwick,* 2015) jedoch unterdurchschnittlich vertreten. Die Resultate und Beschreibungen zu 129 der untersuchten Wasserfälle sind in einem populärwissenschaftlichen Buch (*Schwick* und *Spichtig,* 2012) sowie auf der Internetseite www.waterfall.ch zusammengefasst. Gemäss *Schwick* und *Spichtig* (2002, 2012) werden drei charakteristische Wasserfallzonen (Kopf-, Fall- und Prallzone, *Bild 1a*) unterschieden und Wasserfälle in sieben verschiedene Wasserfall-Morphologietypen klassifiziert *(Bild 1b)*. Im Längsschnitt kann das Wasserfallbild in freifallend und kaskadenartig eingeteilt werden. Diese beiden Typen können hinsichtlich ihrer Morphologie in der Ansicht weiter in Einzelfälle, Mehrfachfälle oder deckende Fälle

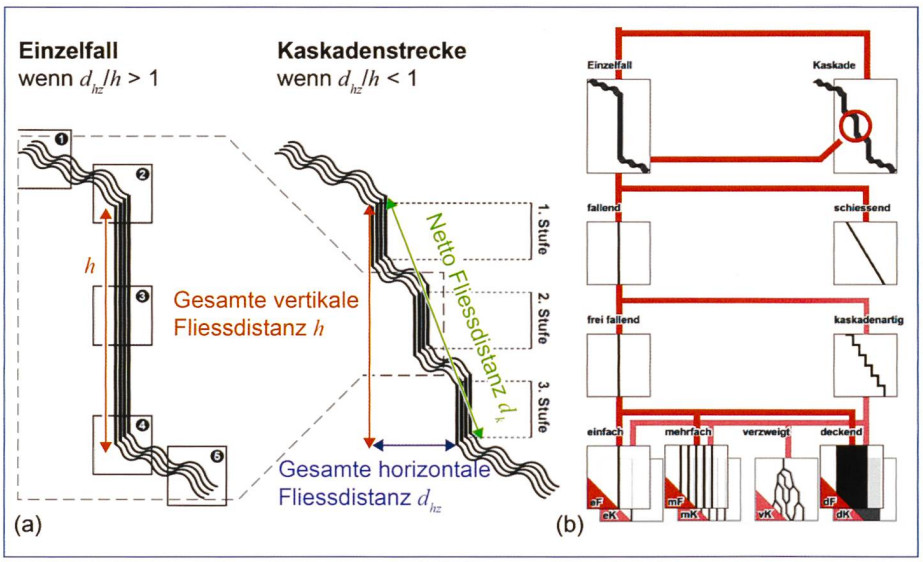


Bild 1. (a) Definitionen zur Klassifizierung von Wasserfällen mit (1) Zufluss, (2) Kopfzone, (3) Fallzone, (4) Prallzone, (5) Durchfluss, (b) Entscheidungsbaum zur morphologischen Typisierung von Wasserfällen (nach Schwick und Spichtig, 2002, und Demarchi, 2012).

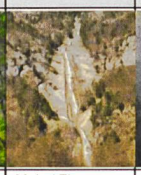
Name	Berschnerfall	Diesbachfall	Lauftenbachfall	Leuenfall	Ragnatscherfall	(Grosser) Reichenbachfall	Rheinfall	Saut du Doubs	Stuibenfall
Wasserfallbild bei ~$Q_{50\%}$									
Gemeinde (Kt./ Bundesland, Land)	Berschis (SG, Schweiz)	Glarus (GL, Schweiz)	Hauptwil-Gottshaus (TG, Schweiz)	Weissbad (AI, Schweiz)	Mels / Flums (SG, Schweiz)	Meiringen (BE, Schweiz)	Neuhausen am Rheinfall (SH, Schweiz)	Les Brenets (NE, Schweiz)	Umhausen (Tirol, Österreich)
Gewässername	Berschnerbach	Diesbach	Lauftenbach	Berndlibach	Ragnatscher-bach / Hofbach	Reichenbach	Rhein	Doubs	Horlachbach
Morphologischer Typ	deckend freifallend (df)	einfach kaskadenartig (ek)	einfach kaskadenartig (ek)	einfach freifallend (ef)	verzweigt kaskadenartig (vk)	einfach kaskadenartig (ek)	deckend kaskadenartig (dk)	deckend kaskadenartig (dk)	einfach fallend (ef)
Klassifizierung nach Plumb (1993)	42.5	46.1	24.1	37.6	30.5	79.4	61.2	68.3	53.9
Klassifizierung nach Beisel (2006)	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	RV = 2.50 Klasse 3	RV = 7.10 Klasse 8	RV = 3.55 Klasse 4	RV = 2.38 Klasse 3
Bewertung nach Schwick und Spichtig (2002)	8	9	5	7	6	11	10	9	11
Fallhöhe h [m]	46	108	18	34	sichtbarer Bereich ~380 m	115	23	17.2	159
Durchfluss-messung	Messstation: Berschnerbach – Walenstadt. (A_{EZ}-Skalierung)	Durchfluss-messung mit Salzverdünn-ungsmethode	Dauerlinien-übertrag von Station Feilen-bach – Roggwil sowie mit Salzverdünn-ungsmethode	Dauerlinienüber-trag von Station Sitter – Appenzell sowie mit Salzverdünn-ungsmethode	Messstation: Ragnatscher-bach – Mels, (A_{EZ}-Skalierung)	Durchfluss-messung und –regulierung: EWR Energie AG	Messstation: Rhein, Neuhausen – Flurlingerbrücke	Messstation: Doubs – Sortie du Lac des Brenets	Messstation: SSI Horlachbach Stuibenfall (TIWAG)
Q_m [m³/s]	0.636	0.690	0.180	0.546	0.194	2.500	367	18.700	1.900
$Q_{50\%}$ [m³/s]	0.378	0.470	0.037	0.338	0.086	1.600	333	10.450	0.997
Q_{347} [m³/s]	0.072	0.047	0.011	0.138	0.019	0.380 *Quelle*: Emch + Berger AG, 2004	182	2.130	0.351
Einzugsgebiets-grösse A_{EZ} [km²]	10.17	12.00	7.01	4.41	3.49	51.50	11'887	917.00	56.00
Anmerkungen		Bestehende WK-Nutzung				Bestehende WK-Nutzung	Bestehende WK-Nutzung		Bestehende WK-Nutzung

Tabelle 1. Übersicht der untersuchten Wasserfälle in der Schweiz und in Österreich (nach Hiller et al., 2011; Demarchi et al., 2013, und Arnold, 2015; Quelle Foto Stuibenfall: www.sagen.at).

unterteilt werden. Der kaskadenartige Typ kann zudem verzweigt sein *(Bild 1b)*.

Die in der hier präsentierten Studie behandelten Wasserfälle *(Bild 2* und *Bild 3)* sind sowohl nach den Klassifizierungsmethoden nach *Plumb* (1993) als auch nach *Beisel* (2006) bewertet worden (*Tabelle 1* und *Tabelle 2*). Mit *h* als Höhe und *w* als Breite des Wasserfalls lässt sich gemäss *Plumb* (1993) das visuelle Erscheinungsbild (Engl. *visual magnitude*) eines Wasserfalls ausdrücken mit:

$$m_{s,f,g} = m_s \cdot a_f \cdot a_g \tag{1}$$

$$\text{mit } m_s = \frac{10\log(h \cdot w^{0.69})}{\log 2} + 2.8 \tag{2}$$

Die Parameter a_f und a_g berücksichtigen den Durchfluss bzw. den Gradienten des Wasserfalls, d. h. das Verhältnis der Fallhöhe *h* zur Netto-Fliessdistanz d_k zwischen Kopf- und Prallzone des Falls *(Bild 1a)*. Die Werte für a_f variieren in Abhängigkeit des Durchflusses von 0 (gering) bis 1.25 (hoch). Ein vertikaler Wasserfall (d. h. $d_k = h$ bzw. $\sin\theta = h/d_k = 1$) wird mit $a_g = 1.0$ beschrieben und für kleinere Gradienten $\sin\theta = h/d_k < 1$ gilt $a_g = 0.5$. Hier bezeichnet θ den Winkel des Wasserfalls zur Horizontalen *(Bild 1a)*. Je höher $m_{s,f,g}$, desto grösser ist die visuelle Wirkung eines Wasserfalls.

Im internationalen Wasserfall-Klassifizierungssystem nach *Beisel* (2006) werden Wasserfälle nach ihrem Einstufungswert *RV* (Engl. *rating value*) in zehn Klassen eingeteilt. Der Einstufungswert ist eine Funktion des mittleren Wasservolumens V_m im Wasserfall, das ein Produkt des mittleren Durchflusses Q_m und der Fallzeit t_f ist und von der Geometrie des Wasserfalls abhängt. Es gilt mit *g* als Erdbeschleunigung:

$$RV = \ln V_m \tag{3}$$

$$\text{mit } V_m = Q_m \cdot t_f \tag{4}$$

$$\text{und } t_f = \frac{\sqrt{g \cdot d_k \cdot 2\sin\theta}}{g \cdot \sin\theta} \tag{5}$$

Bei der Klasseneinteilung wird der *RV*-Wert auf eine ganze Zahl aufgerundet; $RV = 2.38$ entspricht somit Klasse 3. Wasserfälle mit $Q_m < 1$ m³/s werden von dieser Klassifizierung ausgeschlossen und in Klasse 0 eingeteilt. Die Niagarafälle an der amerikanisch-kanadischen Grenze sind gemäss der Beisel-Klassifizierung mit Klasse 10 der bedeutendste Wasserfall der Erde.

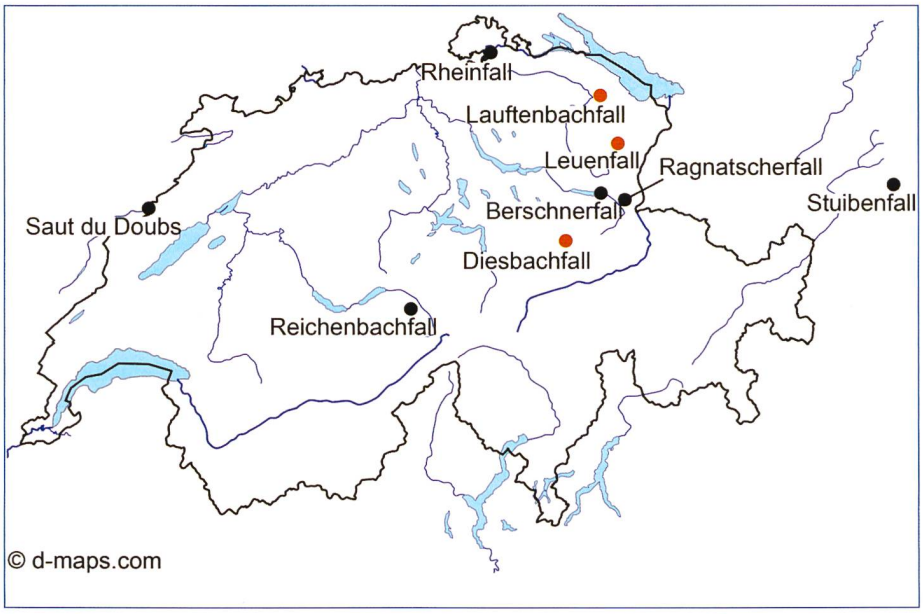


Bild 2. Standorte der untersuchten Wasserfälle in der Schweiz und Österreich mit (•) bestehender Durchflussmessstation, (•) Durchflussmessung mittels Salzverdünnungsmethode (Quelle: d-maps.com).

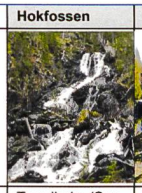
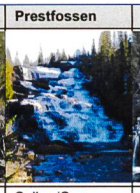
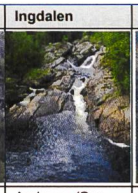
Name	Hokfossen	Prestfossen	Dølanfossen	Tverrgjuvlo	Ingdalen	Råna
Wasserfallbild bei ~$Q_{50\%}$						
Gemeinde (Provinz, Land)	Trondheim (Sør-Trøndelag, Norwegen)	Selbu (Sør-Trøndelag, Norwegen)	Malvik (Sør-Trøndelag, Norwegen)	Voss (Hordaland, Norwegen)	Agdenes (Sør-Trøndelag, Norwegen)	Selbu (Sør-Trøndelag, Norwegen)
Gewässername	Sagelva	Garbergelva	Homla	Tverrgjuvlo	Ingdalselva	Råna
Morphologischer Typ	verzweigt kaskadenartig (vk)	deckend kaskadenartig (dk)	verzweigt kaskadenartig (vk)	mehrfach freifallend (mf)	verzweigt kaskadenartig (vk)	einfach kaskadenartig (ek)
Klassifizierung nach Plumb (1993)	19.2	24.4	33.5	39.6	18.3	43.1
Klassifizierung nach Beisel (2006)	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	RV = 2.86 Klasse 3	RV = 2.38 Klasse 3	Q_m < 1 m³/s Klasse 0	RV = 2.32 Klasse 3	RV = 2.11 Klasse 3
Fallhöhe h [m]	30	34	25	75	15	150
Durchflussmessung	Messstation: Hokfossen	Messstation: Kjelstad	Dauerlinienübertrag von St. Hokfossen sowie mit ADCP / Flow tracker	Messstation: Svartavatn sowie mit ADCP / Flow tracker	Dauerlinienübertrag von St. Krinsvatn	Dauerlinienübertrag von St. Eggafoss
Q_m [m³/s]	0.235	3.461	3.345	0.910	2.567	1.189
$Q_{50\%}$ [m³/s]	0.099	1.375	1.418	0.486	1.141	0.422
Q_{347} [m³/s]	0.018	0.246	0.263	0.087	0.180	0.050
Einzugsgebietsgrösse A_{EZ} [km²]	8.02	80.80	127.30	8.60	102.38	20.05
Anmerkungen		Geplante WK-Nutzung	Fluss unter Landschaftsschutz	Geplante WK-Nutzung		Geplante WK-Nutzung

Tabelle 2. Übersicht der untersuchten Wasserfälle in Norwegen (nach Hiller et al., 2011).

Die visuelle Erscheinung gemäss *Plumb* (1993) beträgt für die Niagarafälle $m_{s,f,g}$ = 130 und ist im Vergleich zu der höchsten visuellen Magnitude der Victoriafalls (Sambia) mit $m_{s,f,g}$ = 150 weniger relevant.

Die Wasserfälle der vorliegenden Studie mit $Q_m > 1$ m³/s werden nach *Beisel* (2006) zum Grossteil in Klasse 3 eingeordnet. Diese Klassifizierung bevorzugt wasserreiche Fälle, sodass der Saut du Doubs und der Rheinfall mit Klasse 4 bzw. 8 die höchste Bewertung erhalten. Damit ist der Rheinfall gemäss *Beisel* auch international gesehen ein bedeutender Wasserfall. *Plumbs* Methode legt den Schwerpunkt auf hohe und vertikale Wasserfälle. Der Reichenbachfall erreicht mit $m_{s,f,g} \approx 79$ gemäss Gl. (1) den höchsten Wert, während der Rheinfall mit $m_{s,f,g} \approx 61$ noch hinter dem Saut du Doubs klassiert ist. Gemäss dem internationalen Klassifizierungssystem nach *Beisel* (2006) weist der Reichenbachfall mit RV = 2.50 und Klasse 3 den vierthöchsten Wert auf. Beide hier vorgestellten Methoden fokussieren auf Wasserfälle, die grösser sind als solche, an denen kleine Wasserkraftwerke normalerweise realisiert werden. In *Tabelle 1* und *2* werden sämtliche hier untersuchten Wasserfälle mit ihren wichtigsten Eigenschaften, den Klassie-

rungen nach *Plumb* (1993), *Beisel* (2006), der Bewertung (Abschnitt 4) und dem morphologischen Typ (Abschnitt 3) nach *Schwick* und *Spichtig* (2002) sowie einem Foto beim Mediandurchfluss vorgestellt.

4. Umgang mit Wasserfällen als besondere Landschaftselemente

Bei Wasserkraftprojekten haben Umweltaspekte in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen, die in der Planung und Projektierung abgeschätzt und diskutiert werden müssen. Sogenannte nichtmonetäre Einflüsse (z. B. das Landschaftsbild bzw. die ästhetischen Landschaftsleistungen von Wasserfällen) werden hinsichtlich der subjektiven Wertschätzung bzw. des Werts (Engl. *value*) der Landschaftsleistung und des Ausmasses (Engl. *extent*) der Projekteinwirkung (Einwirkungsintensität *E*, siehe Abschnitt 5.4) bewertet. Nach *Statens vegvesen* (2006) wird der Wert in die Grössenordnungen klein, mittel und gross eingeteilt *(Bild 4)*. Das Ausmass wird häufig in fünf Kategorien von «sehr negativ» bis «sehr positiv» unterteilt. Nachdem der Wert und das Ausmass für einen Aspekt bestimmt worden sind, lassen sich die Auswirkungen (Engl. *impact* bzw. *consequence*) mit einer sogenannten Auswirkungsmatrix bewerten *(Bild 4)*.

Bei Grossprojekten wird eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) verlangt, die auch das Thema des Restwasserdurchflusses bei Wasserfällen beinhaltet. In der Schweiz fallen Wasserfälle typischerweise in die beiden UVP-Fachbereiche «Oberflächengewässer und aquatische Ökosysteme» sowie «Landschaft und Ortsbild». Im Schweizerischen Bundesgesetz über die Nutzbarmachung der Wasserkraft (Wasserrechtsgesetz, WRG, 1916), Art. 22.1, heisst es: «Naturschönheiten sind zu schonen und da, wo das allgemeine Interesse an ihnen überwiegt, ungeschmälert zu erhalten.» Gemäss Art. 33 des Schweizerischen Gewässerschutzgesetzes (*GSchG,* 1991) erhöht die Behörde das Mindestrestwasser in dem Ausmass, wie es sich aufgrund einer Abwägung der Interessen für und gegen die vorgesehene Wasserentnahme ergibt. Als Beispiel für Interessen gegen die Wasserentnahme wird namentlich die Bedeutung des Gewässers als Landschaftselement erwähnt. Dessen Bewertung differiert jedoch und ist eher subjektiv und standortbezogen. Die hier beschriebene Methodik zielt darauf ab, den angemessenen Restwasserdurchfluss aufgrund möglichst objektiver Kriterien und somit das Ausmass (Einwirkungsintensität *E*) einer Wasserentnahme zu bestimmen. Zur Einstufung des Werts der Landschaftsleistung eines Wasserfalls nach *Bild 4* sind die nachfolgend beschriebenen Methoden bzw. Instrumente hilfreich.

Die Beschaffenheit einer Landschaft kann nach *Puschmann* (2005) anhand von sechs Komponenten beschrieben werden: (i) Hauptgestalt der Landschaft, (ii) Sekundärgestalt der Landschaft, (iii) Wasser und Wasserläufe, (iv) Vegetation, (v) Kulturlandschaft und (vi) Gebäude und Infrastruktur. Wasserfälle gehören zur dritten Kategorie, wobei oft eine Interaktion mit der Sekundärgestalt der Landschaft (ii) stattfindet. Für die Entstehung eines Wasserfalls ist ein bestimmtes Gefälle in der Landschaft Voraussetzung. Für das Wasserfallerscheinungsbild ist neben dem Gefälle die Wasserführung massgebend.

Im Programm «Landschaftsbeobachtung Schweiz» (LABES) wird gegenwärtig ein umfassendes Monitoring der Landschaftsqualität Schweiz aufgebaut. Im Rahmen von LABES werden der Zustand und die Entwicklungen der landschaftlichen Qualitäten in der Schweiz anhand von 34 Indikatoren ermittelt. Wasserfälle werden explizit beim Auswirkungsindikator «Authentizität» erwähnt. Dieser beschreibt, «wie die Elemente der Landschaft im Sinne ihrer Echtheit oder Angemessenheit zum Ort passend beurteilt werden. Landschaften mit hoher wahrgenommener Authentizität reflektieren besonders stark die Identität der Bevölkerung in ihrer Wohngemeinde – durch regional bedeutende Landschaftselemente (z. B. Wytweiden, Kulturdenkmäler, Wasserfälle) oder national wichtige Symbole …» (*Kienast et al.,* 2013).

Schwick und *Spichtig* (2002) nähern die ästhetischen Landschaftsleistungen von Wasserfällen an, indem sie eine

Bild 3. Standorte der untersuchten Wasserfälle in Norwegen mit (•) bestehender Durchflussmessstation, (•) Durchflussmessung mittels Salzverdünnungsmethode (Quelle: d-maps.com).

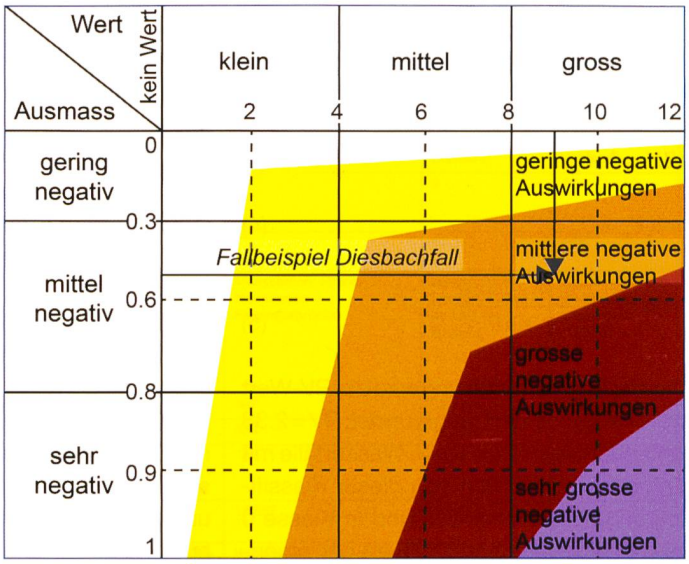


Bild 4. Auswirkungsmatrix mit Skaleneinteilung des Ausmasses nach Hiller (2010) und des Wasserfallwerts nach Schwick und Spichtig (2002), übersetzt aus Statens vegvesen (2006).

Bewertung anhand der Kriterien Fallhöhe, Durchfluss, Sichtbarkeit und Bekanntheit in jeweils drei Kategorien (gering, mittel, hoch) vornehmen. *Demarchi* (2012) stellt einen Kriterienkatalog zur Bestimmung der Bedeutung von Wasserfällen mit den drei Hauptbereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft, fünf Teilbereichen, sieben Kriterien und 12 Indikatoren auf. Zu letzteren zählen u.a. die visuelle Magnitude nach Gl. (1) und (3), die Ökomorphologie nach Stufe *F* gemäss *BUWAL* (1998) und die Anzahl an Besuchern pro Jahr. In zwei Aggregationsschritten lässt sich damit die Gesamtbewertung eines Wasserfalls vornehmen.

Flüeler (2015) stellt ein detailliertes Bewertungsinstrument für die ästhetische Landschaftsleistung von Wasserfällen anhand von drei Gehaltskategorien (physischer Wahrnehmungsgehalt, ästhetischer Erfahrungsgehalt sowie ästhetischer Nutzungsgehalt) vor, welche in 12 Kriterien mit insgesamt 30 Indikatoren unterteilt werden. Dabei fliessen auch Befragungen der lokalen Bevölkerung sowie von Wasserfall-Touristen ein. Für vier Fallbeispiele ermittelt *Flüeler* (2015) Werte der ästhetischen Landschaftsleistung und vergleicht diese mit der Einstufung nach *Schwick* und *Spichtig* (2002). Aufgrund der guten Übereinstimmung erweist sich auch die weniger aufwendige Bewertung nach *Schwick* und *Spichtig* (2002) als geeignet zur Bestimmung des Werts von Wasserfällen. Bei Letzteren liegt eine Skala von 4 bis 12 Punkten vor, welche für die Einstufung des Werts in *Bild 4* dargestellt wird. Es wird empfohlen, für Vorprojekte die Wasserfall-Bewertung nach *Schwick* und *Spichtig* (2002) zu verwenden; für Detailprojekte sollte die ausführliche Einstufung nach *Demarchi* (2012) oder *Flüeler* (2015) Anwendung finden.

5. Methodisches Vorgehen

Im Folgenden werden zunächst die Messgrössen und deren Erhebung beschrieben und anschliessend wird auf die Erfassung des Erscheinungsbilds sowie der Akustik der Wasserfälle inkl. Datenanalysen eingegangen. Weitere Informationen zur Messmethodik, zu den Messunsicherheiten und zu möglichen Messfehlereinflüssen (inkl. Sensitivitätsanalysen) können *Hiller* (2010), *Arnold* (2015) und insbesondere *Demarchi* (2012) entnommen werden.

5.1 Messgrössen und Datenerhebung

Der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Erscheinungsbild wurde an acht Wasserfällen in der Schweiz (*Demarchi*, 2012; *Demarchi et al.*, 2013; *Arnold*, 2015; *Bild 2*), einem Wasserfall in Österreich (*Hiller*, 2010; *Hiller et al.*, 2011, *Boes et al.*, 2011; *Bild 2*) sowie sechs Wasserfällen in Norwegen (*Hiller*, 2010; *Hiller et al.*, 2011; *Boes et al.*, 2011; *Bild 3*) systematisch untersucht. Die betrachteten Wasserfälle decken dabei sechs von sieben Morphologietypen ab (*Tabelle 1* und *Tabelle 2*). In *Tabelle 3* sind die geringsten Durchflüsse pro Wasserfall (bezogen auf die Überschreitungsdauer) aufgeführt, zu denen im Rahmen dieser Studie Fotografien und Schallmessungen erstellt werden konnten.

Zur Beurteilung des Erscheinungsbilds der Wasserfälle wurden für verschiedene Durchflüsse Q_i Fotografien aufgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Aufnahmen jeweils vom selben Standort mit einer, teilweise fest installierten, Digitalkamera und denselben Einstellungen (Zoom, Belichtungszeit, Auflösung usw.) entweder automatisiert in regelmässigen Intervallen oder manuell, unregelmässig und durchflussbezogen durchgeführt wurden. Als Standortkriterien für die Kamera waren die Sichtbarkeit des gesamten Wasserfalls sowie der Aussichtspunkt für Touristen massgebend (*Hiller*, 2010). Dies ergab ähnliche Bildproportionen für alle betrachteten Wasserfälle. Für eher horizontale Bildwinkel muss die Entfernung zum Wasserfall entsprechend gross sein. Infolge unterschiedlicher Witterungsbedingungen variierte die Belichtung, und die Fotos wurden dadurch unterschiedlich beeinflusst.

An allen untersuchten Schweizer Wasserfällen ausser dem Diesbachfall wurden zudem Lärmpegelmessungen bei verschiedenen Durchflüssen mit zwei Mikrofonen hoher Qualität und einem tragbaren Aufnahmegerät (Tonrekorder) durchgeführt. Da Wasserfälle je nach Wasserführung starke Radialwinde entwickeln können (*Schwick* und *Spichtig*, 2002), war ein Windschutz für die Mikrofone erforderlich. Pro Durchflusswert wurden drei Tonaufnahmen über je 30 s durchgeführt und der Mittelwert der weiteren Datenanalyse zugrunde gelegt. Vor den drei aufeinanderfolgenden Aufnahmen wurde pro Mikrofon eine Kalibrierung durchgeführt. Die Kalibrierung erfolgte mit einem Gerät, das während ca. 25 s einen Reinton der Lautstärke von 94 dB aussendete. Damit wurde die Gültigkeit der Daten sichergestellt. In einzelnen Situationen waren drei Aufnahmen à 30 s nicht möglich, z. B. wegen der starken Besucherströme am Rheinfall.

Das Vorgehen zur Durchflussbestimmung der Wasserfälle (*Tabelle 1* und *Tabelle 2*) kann wie folgt beschrieben werden: Bei acht der untersuchten Wasserfälle befindet sich eine Durchflussmessstation in der Nähe des jeweiligen Wasserfalls. In zwei Fällen wurde der Durchfluss durch eine Laufwasserkraftanlage gesteuert, d. h., der Wasserfall befindet sich in einer Restwasserstrecke, sodass die Durchflüsse im Bach bekannt waren. In den verbleibenden fünf Fällen wurde der Durchfluss manuell (Salzverdünnungs-Tracermessung, ADCP oder «Flow tracker») bzw. rechnerisch mittels Wasserstandsmessung und vorgängig erstellter Wasserstand-Durchfluss-Beziehung bestimmt. Pro Wasserfall wurden Durchflussmessungen bzw. Fotos mindestens

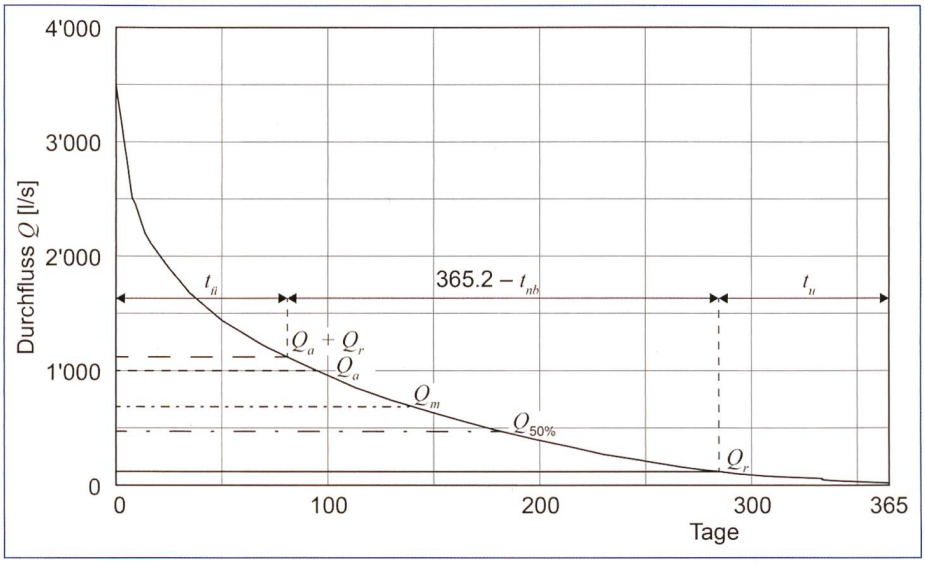


Bild 5. Typische Durchflussdauerlinie für eine Wasserentnahme: Q_r = Restwasser, Q_m = Mittelwasser, $Q_{50\%}$ = Mediandurchfluss, Q_a = Ausbaugrösse der Wassernutzung, t_u = Unterschreitung, $t_ü$ = Überschreitung, 365.2 – t_{nb} = massgebende Beeinträchtigung durch Wassernutzung.

für die folgenden Durchflüsse durchgeführt bzw. aufgenommen *(Bild 5)*:

- Q_m: mittlerer jährlicher Durchfluss
- $Q_{50\,\%} \approx Q_{182}$: Mediandurchfluss, bzw. Durchfluss, der an rund 182 Tagen im Jahr unter-, bzw. überschritten wird
- 60 % und 40 % von $Q_{50\,\%}$
- Q_{347}: Durchfluss, der an rund 347 Tagen (95 %) im Jahr überschritten wird

5.2 Erfassung des Erscheinungsbilds und Datenanalyse

Um das Erscheinungsbild eines Wasserfalls bei unterschiedlichen Durchflüssen Q_i zu bewerten, wurde die wasserbedeckte Fläche auf den aufgenommenen Fotografien bestimmt. Flächen mit viel Wasser (weisse Teilflächen in *Bild 6*) wurden dabei stärker gewichtet als Teilflächen mit wenig Wasser. Die Bestimmung erfolgte in der Masterarbeit von *Hiller* (2010) manuell und wurde von *Demarchi* (2012) auf eine standardisierte digitale Analyse mit Adobe Photoshop weiterentwickelt. *Arnold* (2015) automatisierte die Analyse und Bildbearbeitung mithilfe von Matlab. Aufgrund der stark variierenden Licht- und Kontrastverhältnisse der Fotos ist eine manuelle Kontrolle erforderlich und eine voll automatische Bildanalyse nicht möglich. Für die vereinfachte Ermittlung der wasserbedeckten Flächen der Fotos erstellte *Arnold* (2015) eine Benutzeroberfläche (GUI). Die Arbeitsschritte der Methode nach *Arnold* (2015) sind in Abschnitt 7 zusammengefasst.

5.3 Erfassung der Akustik und Datenanalyse

Zur Charakterisierung der Geräusche einer nicht konstanten Quelle eignet sich der sogenannte Mittelungspegel L_{eq}. Dieser entspricht dem über eine bestimmte Zeit durchschnittlich herrschenden Schalldruck am Immissionsort oder dem sogenannten «energieäquivalenten (Index *eq*) Pegel». Die menschliche Wahrnehmung der Lautstärke ist nicht proportional zum Schalldruck oder zur Schallintensität *I*. Da die Empfindlichkeit des Ohrs je nach Frequenz unterschiedlich ist, entspricht eine logarithmische dB-Skala von *I* eher der Hörempfindung als eine lineare Skala. *Tabelle 4* beschreibt die Empfindungen bestimmter Pegelvariationen. Eine Pegelvariation von 1 dB ist nicht wahrnehmbar, während eine Variation von 10 dB einer deutlichen Änderung entspricht. Für die Analyse von Lautstärkewahrnehmungen kann die sogenannte A-Bewertung verwendet werden. Mit einem entsprechenden Filter wird die Empfindlichkeit des Gehörs bei verschiedenen Tonhöhen berücksichtigt. Dementsprechend werden Pegelgrössen A-bewertet ausgewiesen, wie z. B. der A-bewertete Mittelungspegel L_{Aeq} [dB] (*Eggenschwiler et al.*, 2011), der auch von *Demarchi* (2012) verwendet wurde.

Als Referenzwert wurde der Schalldruckpegel beim Mediandurchfluss $Q_{50\,\%}$, abgekürzt mit L_{Aeq} ($Q_{50\,\%}$), verwendet.

Das Verhältnis zwischen zwei Lautstärkewerten [dB], das für die Berechnung des Ausmasses *E* einer Wasserentnahme notwendig ist (Abschnitt 4), kann jedoch nicht direkt hergestellt werden, da die Einheit [dB] logarithmisch skaliert ist. Das Vorgehen zur Abbildung der menschlichen Wahrnehmung von Lautstärkeänderung kann wie folgt zusammengefasst werden:

(1) Umrechnung von $L_{Aeq,i} = L_{Aeq}$ (Q_i) in Schallintensität I_i [W/m²] (*Eggenschwiler et al.*, 2011):

$$I_i = 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}} \cdot I_0 \qquad (6)$$

wobei I_i der Intensität beim Durchfluss Q_i entspricht (analog für $L_{Aeq,i}$). Der Faktor I_0 kürzt sich beim Bilden der Verhältnisgrösse weg und wird daher nicht weiter erläutert.

(2) Berechnung der Verhältnisse $I_i/I_{50\,\%}$ *(Bild 7a)*,

(3) Rückführung von $I_i/I_{50\,\%}$ in die logarithmische Skala nach *(Bild 7b)*:

$$\Delta L_{Aeq,i} = 10 \cdot \log\left(\frac{I_i}{I_{50\%}}\right) \qquad (7)$$

(4) Im logarithmischen Massstab entspricht das Verhältnis einer Pegeldifferenz *(Bild 7b)* bzw. der Lautstärkenänderung $\Delta L_{Aeq,i} = L_{Aeq,i} - L_{Aeq}$ ($Q_{50\,\%}$).

(5) Transformation der $\Delta L_{Aeq,i}$ in eine der Lautstärkewahrnehmung annähernd entsprechenden Verhältnisskala *(Bild 7c)*:

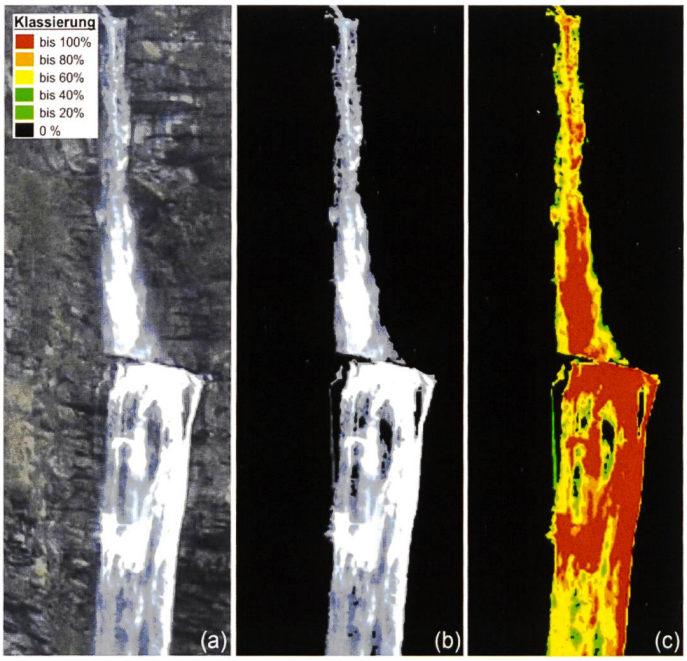


Bild 6. Klassierung der Wasserfallfläche am Beispiel des Diesbachfalls (a) Originalfoto, (b) Foto nach Ausweisung und Klassierung der wasserbedeckten Fläche, (c) optische Kontrolle der Klassierung (Arnold, 2015).

Wasserfall	$\leq Q_{347}$	Nächst höheres Q
Berschnerfall	Q_{347}	Q_{309} (nur mit Eis), Q_{284}
Lauftenbachfall	-	Q_{321}
Leuenfall	Q_{360}	Q_{329}
Ragnatscherfall	Q_{348}	Q_{344}
Reichenbachfall	Q_{362} $Q_{364.5}$ Q_{365}	Q_{276}
Rheinfall	-	Q_{311}
Saut du Doubs	-	Q_{339}

Tabelle 3. Übersicht der geringsten erfassten Durchflüsse Q_i der Studie von Demarchi (2012).

Pegelvariation [dB]	Empfindung
0 … 1	Nicht wahrnehmbar
2 … 4	Gerade wahrnehmbar
5 … 10	Deutlich wahrnehmbar
> 10	Überzeugende Änderung

Tabelle 4. Gehörsmässige Empfindung von Pegelvariationen (Eggenschwiler et al., 2011).

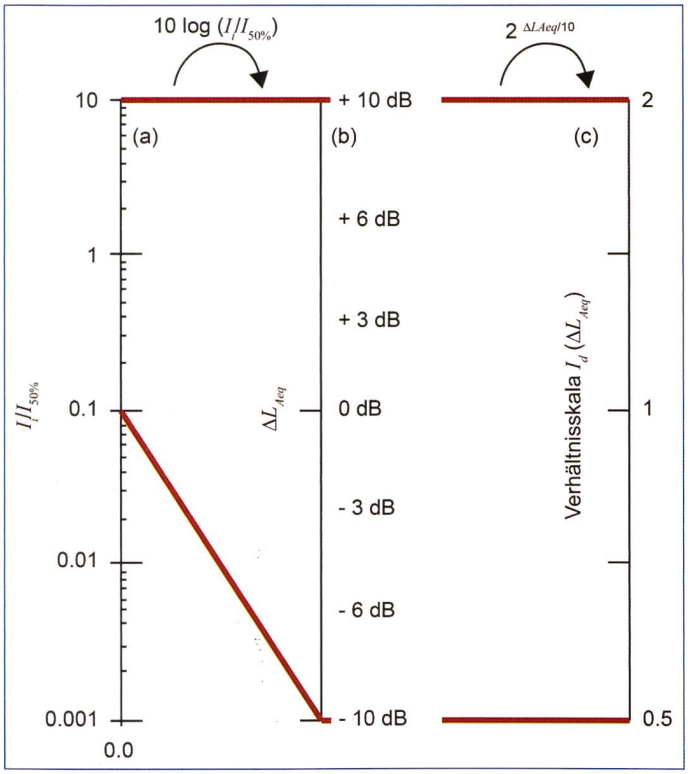


Bild 7. Skalenübersetzung der Akustik. Die Verhältnisse der Intensitäten (a) werden in ΔL_{Aeq} (b) und diese in $I_d(\Delta L_{Aeq})$ (c) transformiert. (––) einander entsprechende Wertebereiche (nach Demarchi, 2012).

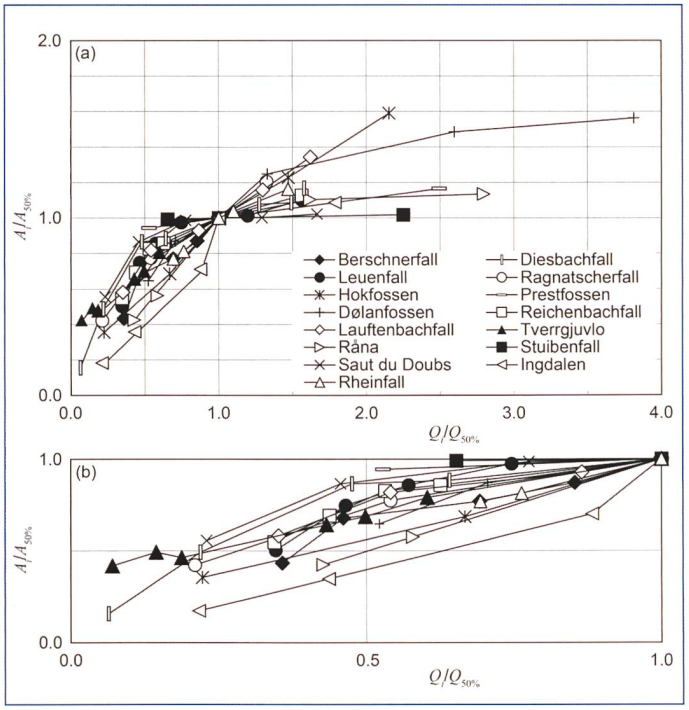


Bild 8. Relative Änderung des Erscheinungsbilds $A_i/A_{50\%}$ als Funktion der relativen Durchflussänderung $Q_i/Q_{50\%}$ für alle untersuchten Wasserfälle. (a) Übersichtsdarstellung; (b) Detaildarstellung bis $A_i/A_{50\%}$ und $Q_i/Q_{50\%}$ = 1. Schwarze Markierung: fallender morphologischer Typ, weisse Markierung: kaskadenartiger morphologischer Typ.

$$I_d(\Delta L_{Aeq,i}) = 2^{\frac{\Delta L_{Aeq,i}}{10}} \qquad (8)$$

(6) Gleichung (8) ist an die Umrechnung von Lautstärke [phon] in Lautheit [sone] angelehnt (*Eggenschwiler et al.*, 2011). Die erhaltenen Werte entsprechen einer Annäherung an die relative Änderung der Lautstärke bzw. Lautheit. Eine Erhöhung (bzw. Verminderung) des Pegels L_{Aeq} um 10 dB entspricht einer Verdoppelung (bzw. Halbierung) der wahrgenommenen Lautstärke. Es wird daher ein Indikator für die wahrgenommene relative Änderung von L_{Aeq}, abgekürzt mit $I_d(\Delta L_{Aeq,i})$, eingeführt. Die Übersetzung gilt für mittlere und höhere Pegel > 40 dB, ähnlich dem Gültigkeitsbereich von [phon] und [sone]. Die gemessenen $L_{Aeq,i}$ dieser Arbeit befinden sich in diesem Gültigkeitsbereich.

5.4 Ermittlung der Einwirkungsintensitäten *E*

Für die Beurteilung einer geplanten Wasserentnahme aus einem Gewässer wird die Einwirkungsintensität *E* ermittelt. Aus gewässerökologischer Sicht haben Wasserentnahmen in der Regel wenige positive Auswirkungen, sodass die Ordinate der Auswirkungsmatrix *(Bild 4)* nur die negativen *E*-Werte abbildet. Die Einwirkungsintensitäten werden üblicherweise dimensionslos und betragsmässig zwischen zwischen 0 (kein Ausmass der Einwirkung) und 1 (sehr grosses Ausmass der Einwirkung) dargestellt. Wird Wasser aus einem Wasserfall-bildenden Fliessgewässer entnommen, so ändern sich die wasserbedeckte Durchflussfläche und der Schallpegel infolge des Wasserfalls. Die Entnahme hat eine Einwirkung auf das Erscheinungsbild (Index *vis*) und die Akustik (Index *ak*). Die Einwirkungsintensitäten E_{vis} und E_{ak} hängen sowohl vom Ausmass als auch der Dauer der Wasserentnahme ab. Je mehr Wasser entnommen wird und je länger die Entnahme dauert, desto grösser *E*. Die Auswirkung der Wasserentnahme auf das Wasserfallbild und die -akustik ist nicht oder kaum wahrnehmbar, sobald die Ausbaukapazität Q_a zzgl. des Restwasserdurchflusses Q_r überschritten wird (Überwasser). Die Überschreitungsdauer $t_ü$ *(Bild 5)* hat somit keinen signifikanten Einfluss. Bei Unterschreiten des festgeschriebenen Restwasserdurchflusses Q_r darf kein Wasser eingezogen werden, sodass in dieser Zeit (Unterschreitungsdauer t_u, *Bild 5*) ebenfalls keine Beeinflussung des natürlichen Durchflussregimes stattfindet. Damit kann die Dauer t_{nb} (Index *nb* für «nicht beeinflusst)» bzw. die normierte Dauer T_{nb}, in der die Wasserentnahme keine signifikante Einwirkung im Vergleich zum natürlichen Durchflussregime hat, ausgedrückt werden mit:

$$t_{nb} = 365.2 - (t(Q_r) - t(Q_a + Q_r)) \quad [d] \qquad (9a)$$

$$T_{nb} = \frac{t_{nb}}{365.2} \quad [-] \qquad (9b)$$

Im Folgenden werden die Berechnungen von Evis und Eak beschrieben.

5.4.1 Einwirkungsintensitäten bzgl. Erscheinungsbild E_{vis}

Das Ausmass einer Wasserentnahme auf das Erscheinungsbild wird durch die Änderung der wasserbedeckten Fläche und die zeitliche Einwirkung nach Gl. (10) quantifiziert. Die wasserbedeckte Fläche A_i bei einem Durchfluss Q_i wird dabei auf den entsprechenden Wert $A_{50\%}$ beim Mediandurchfluss $Q_{50\%}$ normiert (Abschnitt 6.1). E_{vis} berechnet sich folglich zu:

$$E_{vis} = 1 - \frac{A_i}{A_{50\%}} \cdot T_{nb} \text{ für } \frac{A_i}{A_{50\%}} \cdot T_{nb} < 1 \qquad (10a)$$

$$E_{vis} = 0 \text{ für } \frac{A_i}{A_{50\%}} \cdot T_{nb} \geq 1 \qquad (10b)$$

5.4.2 Einwirkungsintensitäten bzgl. Akustik E_{ak}

Das Ausmass einer Wasserentnahme auf die Akustik wird durch die wahrgenommene relative Änderung des A-bewerteten Schallpegels (Abschnitt 5.3) und die zeitliche Einwirkung Gl. (11) quantifiziert. E_{ak} berechnet sich zu:

$$E_{ak} = 1 - I_d(\Delta L_{Aeq,i}) \cdot T_{nb} = 1 - 2^{\frac{\Delta L_{Aeq,i}}{10}} \cdot T_{nb} \quad \text{für } I_d(\Delta L_{Aeq,i}) \cdot T_{nb} < 1 \tag{11a}$$

$$E_{ak} = 0 \quad \text{für } I_d(\Delta L_{Aeq,i}) \cdot T_{nb} \geq 1 \tag{11b}$$

6. Resultate

6.1 Erscheinungsbild

In *Bild 8* sind die normierten Wasserfallflächen $A_i/A_{50\%}$ als Funktion des normierten Durchflusses $Q_i/Q_{50\%}$ dargestellt. Der Mediandurchfluss $Q_{50\%}$ wurde aus folgenden Gründen als Normierungswert gewählt: (i) die untersuchten Durchflüsse sind im Vergleich zum mittleren Durchfluss Q_m relativ gering und werden deutlich häufiger im Jahr erreicht oder überschritten (*Demarchi,* 2012; *Bild 5*); und (ii) das Erscheinungsbild ist für $Q_{50\%}$ kritischer und verändert sich stärker als für Q_m (*Hiller,* 2010).

Die sichtbare Änderung des Erscheinungsbilds ist bei kleineren Durchflüssen ausgeprägter. Nach *Bild 8* ändern einige Wasserfälle ihr Erscheinungsbild (relative wasserbenetzte Fläche $A_i/A_{50\%}$) mit zunehmendem Durchfluss stärker, während dieses bei anderen nach Erreichen eines relativen Grenzdurchflusses $Q_i/Q_{50\%}$ nur noch leicht zunimmt. Ersteres trifft eher auf die kaskadenartigen Wasserfälle (z. B. Lauftenbachfall, Reichenbachfall, Rheinfall) zu, da bei diesen mit zunehmendem Durchfluss mehrere Teilfliesswege aktiviert werden können. Bei freifallenden Wasserfällen ist nur ein Fliessweg möglich und die benetzte Fläche verändert sich ab einem bestimmten Durchfluss nur noch wenig. Folglich ist der Gradient an die $A_i/A_{50\%}$-Kurve bei grösseren $Q_i/Q_{50\%}$ klein (z. B. Leuenfall, Stuibenfall). Obwohl der Saut du Doubs als kaskadenartig eingestuft wird *(Tabelle 1)*, verhält sich sein Erscheinungsbild aufgrund der kleinen Stufenhöhe eher wie bei einem freifallenden Wasserfall *(Bild 8)*.

Der Reichenbachfall kann nicht eindeutig einem morphologischen Typen zugeordnet werden. Nach *Schwick* und *Spichtig* (2002) wird er als einfach freifallend beschrieben. Ein Loch im Felsen führt jedoch dazu, dass sich Fliesswege verändern und er somit einem kaskadenartigen Typ entspricht. Genau genommen befindet er sich im Übergangsbereich zwischen «einfach kaskadenartig» und «verzweigt kaskadenartig». In dieser Studie wird der Reichenbachfall als «einfach kaskadenartig» eingeordnet. Die Aktivierung von Fliesswegen mit zunehmender Wasserführung wird am Beispiel des Reichenbachfalls in *Bild 9* illustriert. Der erste aktivierte Fliessweg ist in *Bild 9a* dargestellt und entspricht dem Bereich 1 in *Bild 9d*. Sobald der zweite Fliessweg (*Bild 9b*) aktiviert ist, nimmt die relative Änderung von A_i stark zu (Bereich 2). Im Bereich 3 (*Bild 9d*) hat sich die Breite des Wasserfalls vergrössert und ein weiterer Fliessweg wurde aktiviert (*Bild 9c*). Die Gischtbildung ist in *Bild 9c* gut ersichtlich.

6.2 Akustik

Die A-bewerteten Mittelungspegel L_{Aeq} der untersuchten Wasserfälle liegen zwischen 50 und 81 dB. Bei vereisten Wasserfällen wurden auch L_{Aeq} zwischen 50 und 46 dB gemessen. Die Werte für den Rheinfall werden hier nicht dargestellt, da sie nicht mit dem relativen Durchfluss korrelieren. Die Grösse des Rheinfalls könnte dazu führen, dass es keine punktuelle Schallquelle, sondern eine Vielzahl bzw. eine Linie von Schallquellen gibt. Bei den anderen Wasserfällen ist die Schallquelle räumlich begrenzt. Weiter wurden die Messwerte bei Eis nicht näher untersucht, da die Lautstärke bzw. die Schallintensität verringert und mit den anderen Messwerten nicht vergleichbar ist.

Bild 10 zeigt die normierten Schallintensitäten $I_i/I_{50\%}$ mit $I_{50\%}$ als Schallintensität bei Mediandurchfluss ($Q_{50\%}$) logarithmisch als Funktion des normierten Durchflusses $Q_i/Q_{50\%}$. Mit der logarithmischen Darstellung wird L_{Aeq} bezogen auf den Schallpegel bei $I_{50\%}$. Auf der rechten y-Achse sind daher die relativen Pegel [dB] dargestellt, wobei 0 dB dem (Referenz-) Pegel von $I_{50\%}$ entspricht. Im Vergleich zum Referenzpegel, dem jeweiligen L_{Aeq} (Q50 %) eines Wasserfalls, verdoppelt oder halbiert sich die Lautstärke nicht, da dies einer Änderung von ±10 dB entsprechen würde. Die maximalen Änderungen betragen ca. –6 dB bzw. +4 dB, was gemäss *Tabelle 4* im Extremfall einer deutlich wahrnehmbaren Lautstärkenänderung entspricht. Die Mehrzahl der Messpunkte liegt jedoch im Bereich ±3 dB, sodass die durchflussbedingte Änderung gerade noch für das menschliche Gehör wahrnehmbar ist.

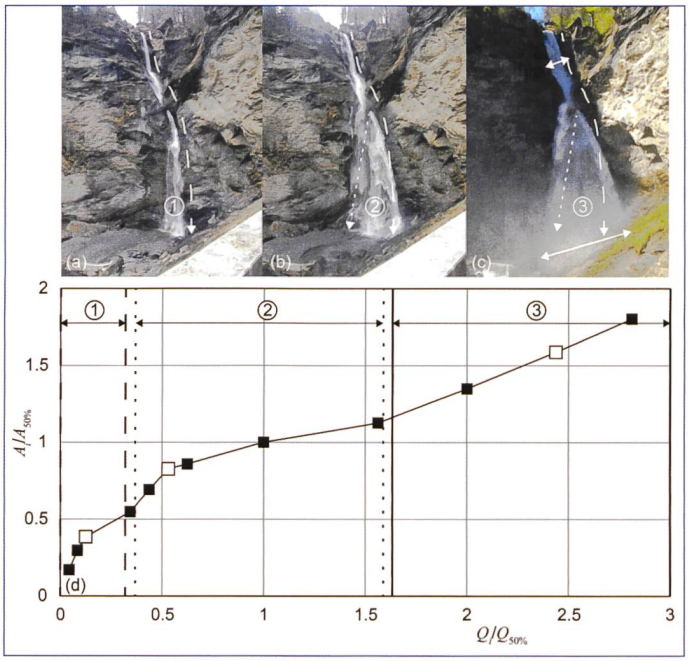


Bild 9. Stufenweise Fliesswegaktivierung am Beispiel des Reichenbachfalls, Q = [m³/s] (a) 0.135; (b) 0.85; (c) 3.9; (d) relative Änderung von $A_i/A_{50\%}$ ($Q_i/Q_{50\%}$). Weiss markierte Datenpunkte entsprechen den jeweiligen Durchflüssen Q_i der Bilder (a)–(c) (nach Demarchi, 2012).

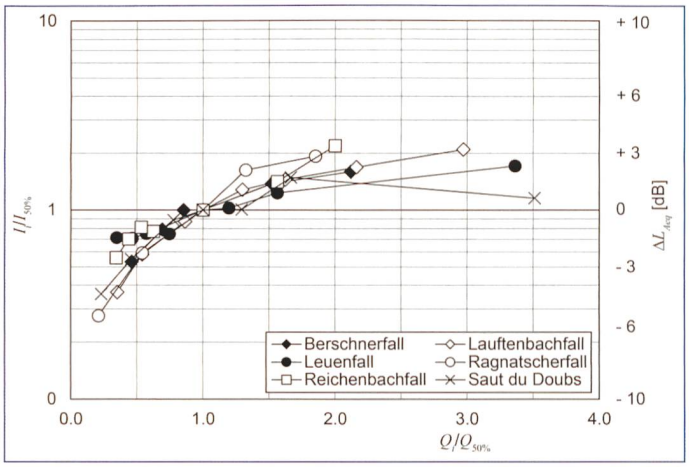


Bild 10. Relative Änderung der Akustik $I_i/I_{50\%}$ über die relative Durchflussänderung $Q_i/Q_{50\%}$ und Angabe von ΔL_{Aeq}. Schwarze Markierung weist fallenden morphologischen Typ auf, andere entsprechen dem kaskadenartigen morphologischen Typ. Die Messwerte des Rheinfalls und bei Eisbildung sind nicht dargestellt (nach Demarchi, 2012).

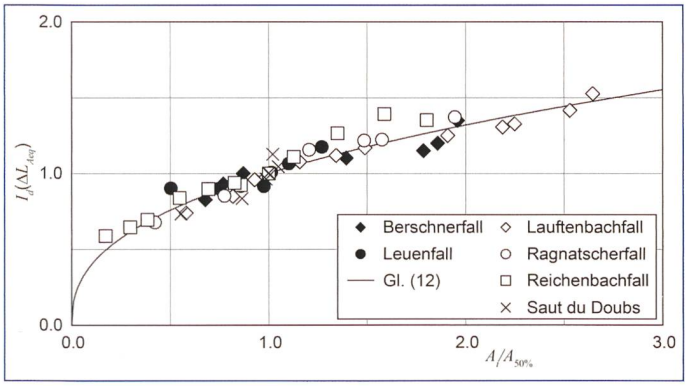


Bild 11. Indikator der Lautstärkenänderung $I_d(\Delta L_{Aeq})$ über die relative Änderung des Erscheinungsbilds $A_i/A_{50\%}$. Wasserfälle mit schwarzer Markierung weisen einen fallenden, die anderen weisen einen kaskadenartigen morphologischen Typ auf (nach Demarchi, 2012).

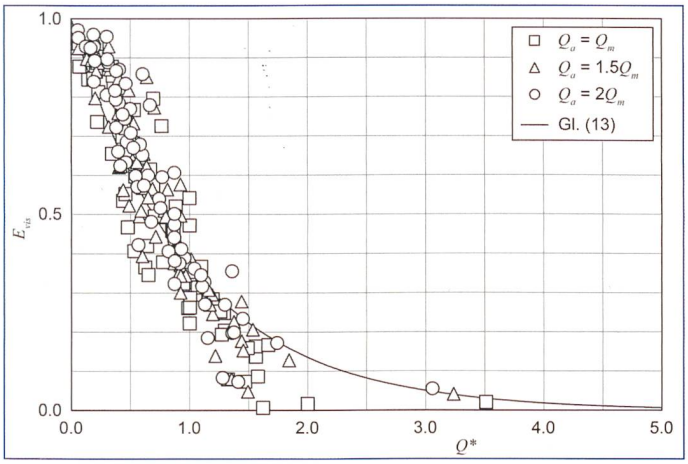


Bild 12. E_{vis} in Abhängigkeit von Q* mit Q* als Zusammenhang von $Q_r/Q_{50\%}$ in Abhängigkeit des Ausbaugrads Q_a/Q_m der Nutzanlage nach Gl. (13).

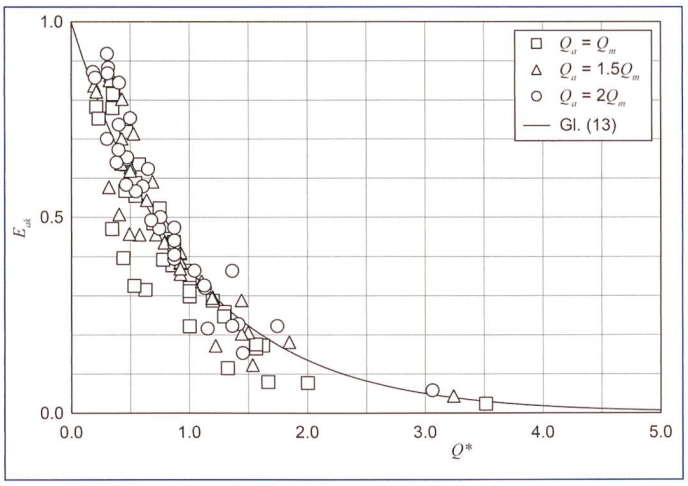


Bild 13. Akustische Einwirkungsintensität E_{ak} in Abhängigkeit von Q*. Q* beschreibt den Zusammenhang von $Q_r/Q_{50\%}$ in Abhängigkeit des Ausbaugrads Q_a/Q_m der Nutzanlage nach Gl. 13.

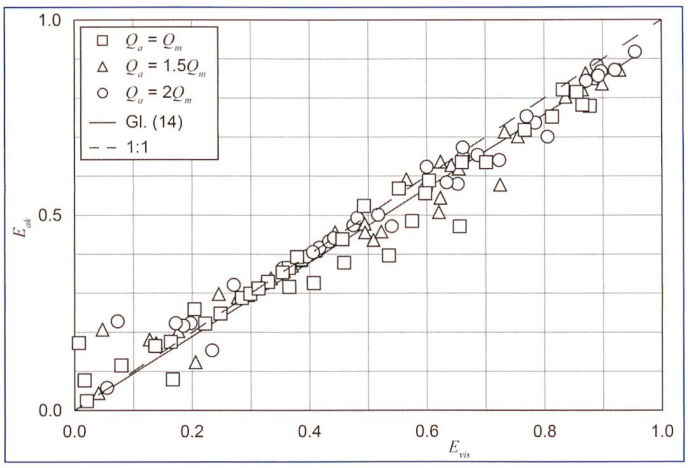


Bild 14. Zusammenhang zwischen akustischen und visuellen Einwirkungsintensitäten E_{ak} bzw. E_{vis}.

Nach *Bild 10* variiert der Verlauf der Lautstärkenänderung bei Wasserfällen mit dem morphologischen Typ. Bei freifallenden Wasserfällen (wenige Fliesswege) nimmt die Lautstärkenänderung mit zunehmendem Durchfluss weniger stark zu als bei kaskadenartigen Wasserfällen (mehr Fliesswege), da die Lautstärke eines Wasserfalls hauptsächlich durch den Aufprall von Wasser beeinflusst wird. Je mehr Fliesswege mit zunehmendem Q entstehen, desto grösser wird die Prallzone und somit lauter das Geräusch.

6.3 Vergleich Erscheinungsbild – Akustik

Die grösste Änderungsrate der Schallintensität bzw. der Lautstärke ist für $Q < Q_{50\%}$ deutlich zu erkennen, weshalb *Bild 10* Ähnlichkeiten mit *Bild 8* aufweist. Bei grösseren Q_i flacht die Änderungsrate in *Bild 10* ab. Beim Erscheinungsbild verdoppeln oder vervielfachen sich die $A_i/A_{50\%}$-Werte einiger Wasserfälle mit zunehmendem Durchfluss *(Bild 8)*, die Lautstärke hingegen verdoppelt sich bei vergleichbarer Duchflusszunahme nicht *(Bild 10)*. Nach *Bild 8* und *Bild 10* können die Wasserfälle mit stärker abflachenden Kurven eher den freifallenden Typen (wenige Fliesswege) zugeordnet werden.

Bild 11 stellt die Verhältnisse des Erscheinungsbilds $A_i/A_{50\%}$ und der Lautstärkenänderung gegenüber. Letztere wird durch den Indikator $I_d(\Delta L_{Aeq})$ (Gl. 8) für die relative Änderung von L_{Aeq} beschrieben.

Nach *Bild 11* weist A_i deutlich grössere relative Änderungen auf als die Lautstärke, da Letztere nur unterproportional zunimmt (Gl. 12, $R^2 = 0.91$). Für Schallpegel > 40 dB gilt:

$$I_d(\Delta L_{Aeq}) = \left(\frac{A_i}{A_{50\%}}\right)^{0.40} \qquad (12)$$

Über die Lautstärkenänderung von < 40 dB kann keine Aussage gemacht werden.

6.4 Einwirkungsintensität *E*

Die Einwirkungsintensität E von Wasserentnahmen auf das Erscheinungsbild E_{vis} kann nach Gl. (10) und die Akustik E_{ak} nach Gl. (11) berechnet werden. Der Restwasserdurchfluss Q_r und die zugehörige Fläche A_r sowie die Schallintensität I_r entsprechen den erhobenen Durchflussdaten Q_i, resp. der Fläche A_i und der Schallintensität I_i, für die im Rahmen der Masterarbeiten Fotografien und Tonaufnahmen erstellt wurden. Der gewählte Restwasserdurchfluss kann somit in Abhängigkeit der erhobenen Daten gewählt werden.

6.4.1 Einwirkungsintensitäten E_{vis} und E_{ak}

In *Bild 12* werden für sämtliche untersuchte Wasserfälle die visuellen Einwirkungsintensitäten nach Gl. (10) als Funktion des mit dem Mediandurchfluss $Q_{50\%}$ normierten Restwasserdurchflusses Q_r für relative Ausbaudurchflüsse von Q_a/Q_m = 1.0, 1.5 bzw. 2.0 dargestellt. Je nach Ausbaudurchfluss Q_a bzw. gewähltem Restwasserdurchfluss Q_r variiert die Dauer t_{nb}, siehe Abschnitt 5.4. Je höher der Ausbaugrad der Nutzanlage bzw. je tiefer Q_r, desto kleiner die Dauer t_{nb}, und desto grö-

sser E_{vis} nach Gl. (10a) d. h. desto grösser die Einwirkungsintensität einer Wasserentnahme. *Bild 13* zeigt die akustischen Einwirkungsintensitäten nach Gl. (11) für sieben untersuchte Schweizer Wasserfälle als Funktion von $Q_r/Q_{50\,\%}$ für Q_a/Q_m = 1.0, 1.5, 2.0.

Basierend auf dem Datensatz lassen sich sowohl E_{vis} als auch E_{ak} mit derselben Approximation beschreiben. Für E_{vis} ($Q_r/Q_{50\,\%}$) (R^2 = 0.85) sowie E_{ak} ($Q_r/Q_{50\,\%}$) (R^2 = 0.86) gilt für 1 <= Q_a/Q_m <= 2

$$E_{vis,\,ak} = e^{-Q^*}$$
$$\text{mit } Q^* = \frac{Q_r}{Q_{50\%}}\left(\frac{Q_a}{Q_m}\right)^{-0.20} \qquad (13)$$

6.4.2 Zusammenhang der Einwirkungsintensitäten E_{vis} und E_{ak}

Gemäss *Bild 14* lautet der Zusammenhang E_{vis}/E_{ak} für sieben Schweizer Wasserfälle (R^2 = 0.96):

$$E_{ak} = 0.95\, E_{vis} \qquad (14)$$

Die akustische Einwirkungsintensität E_{ak} ist demnach um rund 5 % kleiner als die visuelle E_{vis}. Die Umgebungsgeräusche (Abschnitt 6.2) könnten dazu führen, dass E_{ak} im Vergleich zu E_{vis} unterschätzt wird. Ansonsten weisen die beiden Parameter eine lineare Abhängigkeit auf. Somit folgen E_{vis} und E_{ak} vereinfachend derselben Gleichung.

6.4.3 Kombinierte Einwirkungsintensitäten E_{vis} und E_{ak}

Um die Beurteilung einer Wasserentnahme auf das Erscheinungsbild und die Akustik eines Wasserfalls zu vereinfachen, werden die Einwirkungsintensitäten E_{vis} und E_{ak} zusammengeführt. Die Gewichtung von E_{vis} und E_{ak} wurde deshalb variiert mit (i) E_m = 0.50 E_{vis} + 0.50 E_{ak}, (ii) E_m = 0.75 E_{vis} + 0.25 E_{ak} sowie (iii) E_m = 0.25 E_{vis} + 0.75 E_{ak}. Da die visuellen und akustischen Einwirkungsintensitäten wenig voneinander abweichen, hat die Gewichtung einen geringen Einfluss. Deshalb ist die kombinierte Einwirkungsintensität E_m mit (i) E_m = 0.50 E_{vis} + 0.50 E_{ak} in *Bild 15* für sieben untersuchte Schweizer Wasserfälle über $Q_r/Q_{50\,\%}$ für Q_a/Q_m = 1.0, 1.5 bzw. 2.0 dargestellt. Die Beziehung E_m ($Q_r/Q_{50\,\%}$) wird wiederum mit Gl. (13) beschrieben (hier R^2 = 0.88).

7. Restwasserbestimmung an Wasserfällen

Im Folgenden wird das Vorgehen der Restwasserbestimmung am Beispiel des Diesbachfalls zusammengefasst. Die Bildanalyse (Schritte 1–5) und die Sensitivitätsanalyse (Schritt 8) erfolgen automatisiert mithilfe eines Matlab-Tools (*Arnold,* 2015).

1. Auswahl der Fotodaten
   Für die Auswertung dienen Farbfotos von möglichst guter Qualität und demselben Bildausschnitt. Falls nötig, müssen Fotos, die aufgrund von Witterungseinflüssen wie Nebel oder Schnee nicht analysierbar sind, aussortiert werden. Weiter sollen die Lichtverhältnisse in allen auszuwertenden Fotos ähnlich sein.
2. Festlegung des zu analysierenden Bereichs
   Die Fotodaten sollten vor der eigentlichen Auswertung grob zugeschnitten werden, um nur den relevanten Ausschnitt zu bearbeiten. Dabei wird bei jedem Bild der gleiche Ausschnitt analysiert.
3. Ausweisung der wasserbedeckten Flächen
   Die Ausweisung der wasserbedeckten Flächen erfolgt über die Helligkeit der einzelnen Pixel. Dazu wird das Foto zuerst von einem RGB in einen HSV-Farbraum transferiert. Mithilfe des Schiebereglers «Helligkeit» wird ein Grenzwert festgelegt, der die wasserbedeckten von den nichtwasserbedeckten Flächen trennt. Die Pixel werden in Abhängigkeit ihrer Helligkeit der Wasserfallfläche zugeordnet. In *Bild 16* sind die wasserbedeckten Wasserfallflächen vor und nach Festlegung des Grenzwerts dargestellt.
   Mit Hilfe des Schiebereglers «Smoother» können kleinere helle Flächen, die keiner Wasserfallfläche entsprechen, geglättet und als «nichtwasserbedeckt» definiert werden *(Bild 17a).* Weitere Bereiche, die keiner wasserbedeckten Wasserfallfläche entsprechen, können mit dem Befehl «Fläche löschen» manuell entfernt werden *(Bild 17b).*
4. Klassierung der Wasserfallfläche
   Die Klassierung der wasserbedeckten Wasserfallflächen erfolgt automatisch. Das Foto wird in ein Graustufenbild umgewandelt, und die Pixel der Wasserfallfläche werden in fünf Kategorien eingeteilt. Die hellsten und weissesten Pixel, welche die höchsten Graustufenwerte besitzen, werden der Klasse «$px_{100\,\%}$» mit «100 % Wasser» zugeteilt. Pixel mit den kleinsten Graustufenwerten der Klasse «$px_{20\,\%}$» mit «20 % Wasseranteil». Graustufenwerte dazwischen fallen in die Kategorien «$px_{40\,\%}$», «$px_{60\,\%}$» und «$px_{80\,\%}$» mit jeweils 40 %, 60 % bzw. 80 % Wasseranteil. Für eine verbesserte visuelle Darstellung werden die Pixel der verschiedenen Kategorien unterschiedlich eingefärbt. Das resultierende Bild wird zur optischen Plausibilitätskontrolle dem Originalfoto gegenübergestellt *(Bild 6).* Bei Diskre-

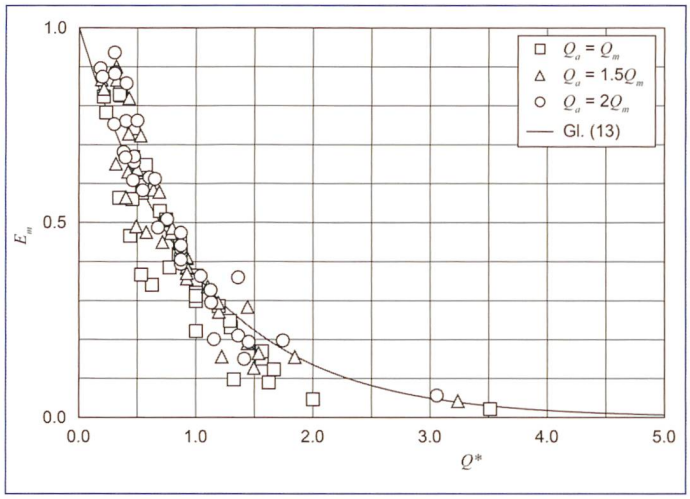


Bild 15. Mittlere Einwirkungsintensität E_m (= 0.5 E_{ak} + 0.5 E_{vis}) in Abhängigkeit von Q*.

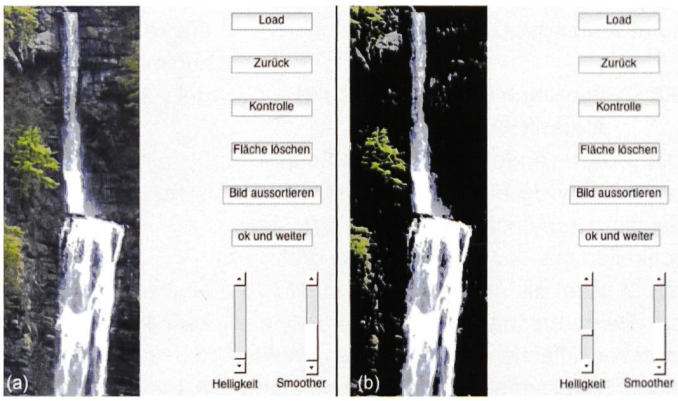


Bild 16. (a) Originalbild und (b) wasserbedeckte Fläche nach Grenzwert-Festlegung (nach Arnold, 2015).

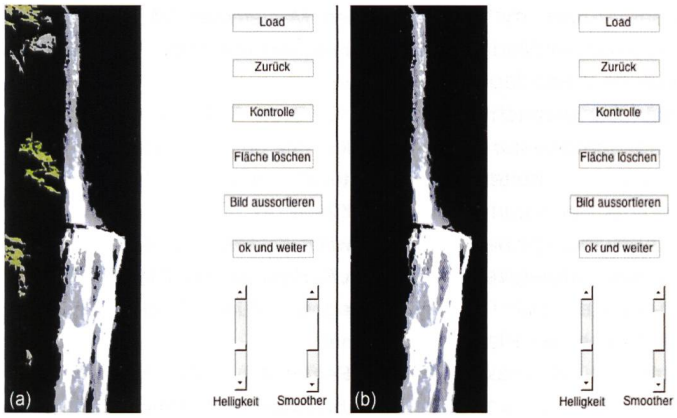


Bild 17. Ermittelte wasserbedeckte Wasserfallfläche (a) nach Glättung (Smoother), (b) nach Entfernung weiterer nicht wasserbedeckter Flächen (nach Arnold, 2015).

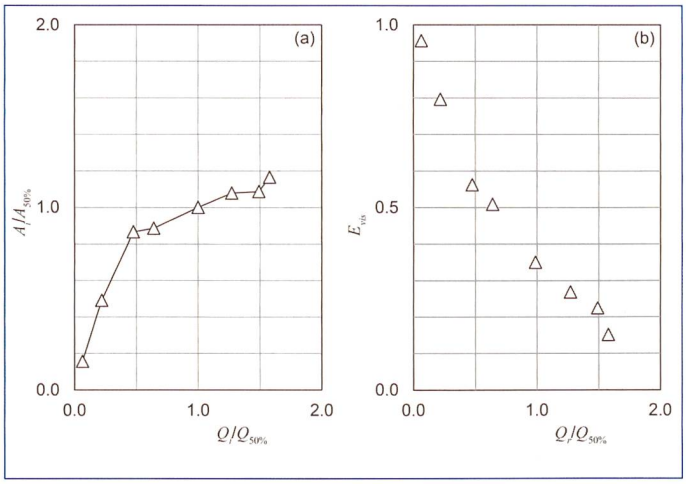


Bild 18. Restwasserbestimmung am Diesbachfall: (a) Relative Änderung des Erscheinungsbilds $A_i/A_{50\%}$ als Funktion der relativen Durchflussänderung $Q_i/Q_{50\%}$, (b) visuelle Einwirkungsintensität Evis in Abhängigkeit von $Q_r/Q_{50\%}$. Der Ausbaudurchfluss Qa beträgt dabei 1.00 m³/s, für den Ausbaugrad gilt $Q_a/Q_m \approx 1.50$ (nach Arnold, 2015).

panzen muss die Klassierung gegebenenfalls angepasst werden.

5. Berechnung der Wasserfallfläche und erste Abschätzung des Restwasserdurchflusses Q_r

   Die wasserbedeckte Wasserfallfläche A_i wird für verschiedene Durchflüsse Q_i und den zugehörigen ausgewerteten Fotodaten mithilfe der folgenden Gleichung berechnet:

$$A_i(Q_i) = px_{100\%} + 0.8 \cdot px_{80\%} + 0.6 \cdot px_{60\%} + 0.4 \cdot px_{40\%} + 0.2 \cdot px_{20\%} \quad (15)$$

   Anmerkung: Bei *Hiller* (2010) und *Demarchi* (2012) erfolgte die Einteilung der Wasserfallfläche in vier Unterklassen mit 25 %, 50 %, 75 % und 100 %. Um die ausgewerteten Fotodaten mit den dazugehörigen Durchflüssen zu verbinden, wird der Durchfluss innerhalb einer Stunde vor und nach der Aufnahme gemittelt. Fehler bei der Durchflussbestimmung, z. B. durch allfällige Wellenbildung am Pegel, werden so eliminiert. Mithilfe der Darstellung der relativen Änderung des Erscheinungsbilds $A_i/A_{50\%}$ als Funktion der relativen Durchflussänderung $Q_i/Q_{50\%}$ *(Bild 18a)* kann eine erste Annahme für den erforderlichen Restwasserdurchfluss Q_r getroffen werden. Der Wert Q_r sollte so gewählt werden, dass der Gradient der wasserbedeckten Wasserfallflächen gering ist. In *Bild 18a* ist beispielsweise ein markanter Knickpunkt bei $Q_i/Q_{50\%} \approx 0.5$ erkennbar.

6. Ermittlung der visuellen Einwirkungsintensität E_{vis}

   Die visuelle Einwirkungsintensität E_{vis} wird mit Gl. (10) für verschiedene Durchflüsse Q_i und den zugehörigen ausgewerteten Fotodaten ermittelt (Abschnitt 5.4). Falls Fotodaten fehlen, bzw. für Vorabschätzungen, wird E_{vis} mit Gl. (13) berechnet. Analog zu *Bild 18b* kann E_{vis} für verschiedene mögliche Restwasserdurchflüsse Q_r analysiert und festgelegt werden.

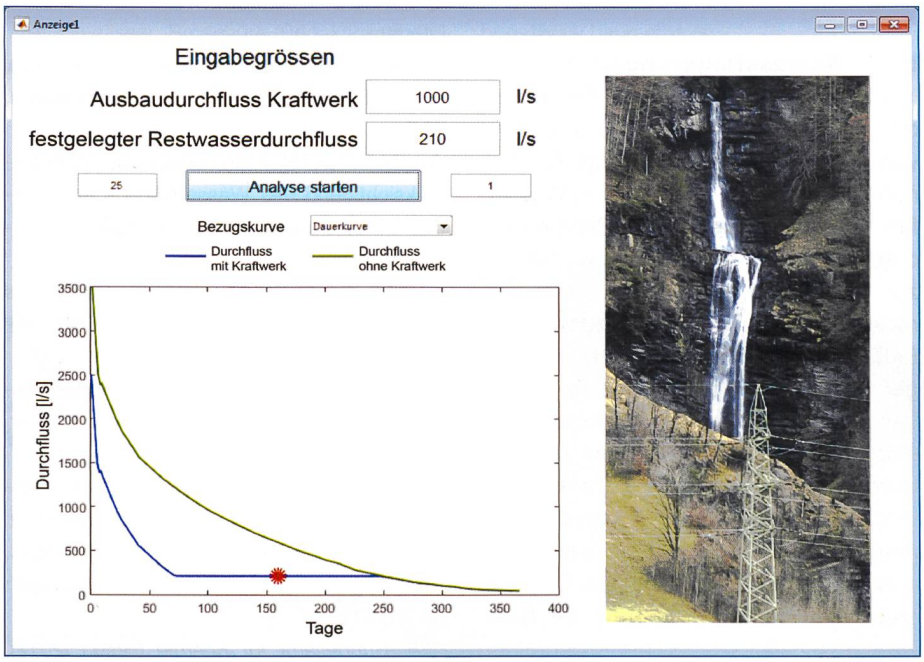


Bild 19. Simulationssoftware zur Sensitivitätsanalyse gewählter Rest- und Ausbaudurchflüsse (VAW, 2016).

7. Abschätzung der Auswirkung der Wasserentnahme

   Die Auswirkung der geplanten Wasserentnahme auf das Wasserfallbild wird mithilfe der Auswirkungsmatrix *(Bild 4)* ermittelt. Dabei entspricht das Ausmass (gering negativ bis sehr negativ) der visuellen Einwirkungsintensität E_{vis} bei Q_r. Nach *Demarchi* (2012) soll eine Wasserentnahme eine maximale Einwirkungsintensität von 0.6 bis 0.8 nicht überschreiten, um je nach Wert des Wasserfalls höchstens mittlere negative Auswirkungen zu bewirken. Für den Diesbachfall ergibt sich für $Q_r = 0.21$ m³/s und $Q_a = 1.00$ m³/s mit $Q_r/Q_{50\%} = 0.45$ nach Gl. (10) eine visuelle Einwirkungsintensität von $E_{vis} = 0.56$. Der Wert des Wasserfalls wird anhand des Kriterienkatalogs nach *Demarchi* (2012) bestimmt und kann für den Diesbachfall als mittelgross eingestuft werden (*Arnold,* 2015). Die Einstufung nach *Schwick* und *Spichtig* (2002) ergibt 9 Punkte und ist damit vergleichbar. Nach *Bild 4* resultiert für den Diesbachfall eine mittlere Beeinträchtigung. Die erforderlichen Krite-

rien werden für die Wahl der Ausbau- und Restwasserdurchflüsse beim Diesbachfall eingehalten.

8. Sensitivitätsanalyse
   Mithilfe einer Simulationssoftware lassen sich die Auswirkungen geplanter Rest- und Ausbaudurchflüsse auf das Wasserfallbild analysieren. Dabei wird eine Durchflussdauerlinie des entsprechenden Wasserfalls hochgeladen und Werte für die Ausbau- und Restwasserdurchflüsse der geplanten Wasserentnahme eingegeben. Die Bildanzahl und Dauer der Bildanzeige in [s] können variiert werden (Zahlenwerte neben «Analyse starten», *Bild 19*). Der Einfluss dieser gewählten Grössen auf den Wasserfall wird bildlich dargestellt. Weiter können der jährliche Verlauf des veränderten Wasserfallbilds untersucht und die Eingabegrössen variiert werden *(Bild 19)*.

8. Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Auswirkung von Wasserentnahmen auf das Erscheinungsbild sowie die Akustik von Wasserfällen zusammengefasst. Im Rahmen von drei Masterarbeiten wurde eine Methode zur Restwasserbestimmung unter Berücksichtigung der Entnahmedauer, des Erscheinungsbilds und der Akustik ausgearbeitet. Da Wasserfälle bedeutende Landschaftselemente sind, müssen bei einer geplanten Wasserentnahme unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden. Eine automatisierte Bildanalyse ermöglicht projektspezifisch eine effiziente Berechnung der Wasserfallfläche sowie eine erste Abschätzung des Restwasserdurchflusses und der zugehörigen Einwirkungsintensität. Die erforderlichen Schritte zur Restwasserbestimmung bei einer Wasserentnahme oberhalb eines Wasserfalls werden beispielhaft anhand des Diesbachfalls erläutert. Diese bedingen sowohl Fotoaufnahmen des Wasserfalls bei verschiedenen Durchflüssen als auch die Kenntnis einer mittleren Jahresganglinie des Durchflusses am Wasserfall.

Basierend auf einem Datensatz von 15 Wasserfällen in der Schweiz, in Österreich und Norwegen, wird zudem ein Normierungsdiagramm zur Ermittlung der (visuellen und akustischen) Einwirkungsintensität für Ausbaugrade der Nutzanlage von 1 <= Q_a/Q_m <=2 auch ohne nähere Kenntnis der mittleren Jahresganglinie entwickelt. Die Eingangsgrössen des Normierungsdiagramms sind die Rest- und Ausbauwassermengen der geplanten Wasserentnahme, der mittlere jährliche Durchfluss sowie der Mediandurchfluss. Zudem wurden Vorschläge zur Bewertung von Wasserfällen gemacht, um deren ästhetische Landschaftsleistungen einzustufen. Anhand der ermittelten Einwirkungsintensität und der Bedeutung des Wasserfalls kann die Auswirkung einer geplanten Wasserentnahme abgeleitet und quantifiziert werden. Dies ermöglicht eine objektivierte Diskussion bei der Planung von Wasserentnahmen oberhalb von Wasserfällen. Weiter lassen sich unterschiedliche Szenarien der Wasserentnahme analysieren und unter Berücksichtigung verschiedener Nutzungsinteressen diskutieren. Nicht zuletzt ermöglichen die vorgestellte Bildanalyse und die automatisierte Sensitivitätsanalyse, den Entscheidungsprozess transparent und objektiv zu gestalten.

Literatur

Andersson, G., Boulouchos, K., Bretschger, L. (2011). Energiezukunft Schweiz. ETH Zürich, 47 S.

Arnold, F. (2015). Kraftwerkausbau unter Berücksichtigung des Wasserfallbilds am Diesbach. Masterarbeit, VAW, ETH Zürich: unveröffentlicht.

AWA BE, Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (2011). Wasserstrategie 2010. Hrsg.: Regierungsrat des Kantons Bern, Bern.

Beisel, R. H. (2006). International waterfall classification system. Outskirts Press Inc., Denver, CO, USA.

BFE, Bundesamt für Energie (2015). Kostendeckende Einspeisevergütung. <http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?lang=de> Stand: 22.06.2015; Zugriff: 30.07.2015.

BFE, Bundesamt für Energie (Hrsg.) (2012). Energiestrategie 2050: Erstes Massnahmenpaket.

Boes, R. M., Hiller, P. H., Killingtveit, Å. (2011). Visual effects of waterfalls affected by water diversion. Proc. 34th IAHR Congress, Brisbane, Australia: 2760–2767.

BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) (1998). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Ökomorphologie Stufe F (flächendeckend). Schriftenreihe Vollzug Umwelt Nr. 27, Bern.

d-maps.com (2016). Kartenausschnitte von der Schweiz und Norwegen. Online verfügbar unter: <http://d-maps.com/carte.php?num_car=2642&lang=de> (Schweiz) und <http://d-maps.com/carte.php?num_car=2450&lang=de> (Norwegen).

Demarchi, L. (2012). Einfluss der Wasserführung auf das Erscheinungsbild und die Akustik von Wasserfällen. Masterarbeit, VAW, ETH Zürich & Geographisches Institut H2K, Universität Zürich.

Demarchi, L., Boes, R. M., Sauter, N. (2013). Effect of flow rate on appearance and acoustics of waterfalls. Proc. 35th IAHR Congress, Chengdu, China.

Eggenschwiler, K., Heutschi, K., Wunderli, J. M., Emrich, F., Bütikofer, R. (2011). Skript Lärmbekämpfung. ETH Zürich / EMPA Dübendorf, Herbstsemester.

Emch + Berger AG (2004). Neukonzession Kraftwerk Schattenhalb 3, Umweltverträglichkeitsbericht. Bern.

Flüeler, E. (2015). Bewertung ästhetischer Landschaftsleistungen von Wasserfällen. In: Rodewald, R.; Baur, B. (Red.) Wasserfälle: Ökologische und sozio-kulturelle Leistungen eines bedrohten Naturmonumentes. Zürich, Bristol-Stiftung; Bern, Haupt. S. 199–222.

GSchG, Gewässerschutzgesetz (1991). Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Schutz der Gewässer (Stand 1. Juni 2014), SR-Nummer: 814.20, <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.20.de.pdf>, Zugriff: 30.07.2015.

Hiller, P. H. (2010). Flow and appearance of waterfalls, Master Thesis, Norwegian Hydraulic Laboratory, Norwegian University of Science and Technology (NTNU) & VAW, ETH Zürich: unveröffentlicht.

Hiller, P. H., Steffen, K., Boes, R. M., Killingtveit, A. (2011). Determining minimal residual flow at waterfalls used for hydropower. Intl. Journal on Hydropower and Dams, 18(4): 76–82.

Hudson, B. J. (2013). Waterfalls, science and aesthetics. Journal of Cultural Geography, 30(3): 356–379.

Kienast, F., Frick, J., Steiger, U. (2013). Neue Ansätze zur Erfassung der Landschaftsqualität. Zwischenbericht Landschaftsbeobachtung Schweiz (LABES), Umwelt-Wissen Nr. 1325, Bundesamt für Umwelt, Bern, und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf: 75 S.

Kugler, H. (2011). Nicht jeder Wasserfall ein Wasserkraftwerk. Tagblatt Online, 23. August; Zugriff: 04.08.2015.

Plumb, G. A. (1993). A scale for comparing the visual magnitude of waterfalls. Earth Science Reviews. Elsevier Publishers B. V., Amsterdam, No. 34, pp. 261–270.

Puschmann, O. (2005). Nasjonalt referansesystem for landskap – Beskrivelse av Norges 45 landskapsregioner. («Nationales Referenzsystem zur Landschaft – Beschreibung der 45 Landschaftsregionen Norwegens»). NIJOS Rapport 10/2005. Norsk institutt for jord- og skogkartlegging (auf Norwegisch), Online verfügbar unter: http://www.skogoglandskap.no/filearchive/Rapport_10_05.pdf.

Rodewald, R., Baur, B. (Red.) (2015): Wasserfälle: Ökologische und sozio-kulturelle Leistun-

gen eines bedrohten Naturmonumentes. Zürich, Bristol-Stiftung; Bern, Haupt. 246 S.
Schneider, K. (1989). Wasserfälle der Schweiz und berühmte der Welt. K. Schneider, Bern, 102. S.
Schwick, C. (2015). Charakteristik und Typologie von Wasserfällen. In: Rodewald, R.; Baur, B. (Red.) Wasserfälle: Ökologische und soziokulturelle Leistungen eines bedrohten Naturmonumentes. Zürich, Bristol-Stiftung; Bern, Haupt. S. 19–36.
Schwick, C., Spichtig, F. (2002). Die Wasserfälle der Schweiz: Verteilung, Systematik, Bedeutung, Gefährdung. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern.
Schwick, C., Spichtig, F. (2012). Die Wasserfälle der Schweiz. AT-Verlag, Aarau. 144 S.
Statens vegvesen (2006). Konsekvensanalyser, veiledning. («Handbuch zur Bestimmung von Umweltauswirkungen»). Vegvesenets håndbokserie Nr. 140 (auf Norwegisch).
SWV, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (2012). Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Faktenblatt, <http://www.swv.ch/Dokumente/Faktenblaetter-SWV-28Download-Ordner29/Faktenblatt-Wasserkraftpotenzial_SWV-2012.pdf> Stand: Juli 2012; Zugriff: 30.07.2015.
VAW (2016). Wasserfälle Kraftwerk Diesbach. VAW Bericht Nr. 4324. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
WRG, Wasserrechtsgesetz (1916). Bundesgesetz vom 22. Dezember 1916 über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte (Stand 1. Juli 2012), SR-Nummer: 721.80, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19160015/201207010000/721.80.pdf>, Zugriff: 11.08.2015.
WWF GL, World Wildlife Fund Glarus (2015). Chronologie der Ereignisse um den Diesbachfall. <http://www.wwf-gl.ch/c_projekte/html_navigation_p_diesbachfall.html> Zugriff: 30.07.2015.
WWF GL, World Wildlife Fund Glarus (2009). Verstummter Schrejenbachfall erhält seine Stimme wieder. Der Schrejenbachfall und andere Beiträge des WWF Glarus für lebendige Fliessgewässer. Broschüre (Redaktion: S. Paradowski), Glarus.

Verdankungen

Die Autor/innen bedanken sich für die Bereitstellung der Datengrundlagen bei EWR Energie AG, Hochdruckkraftwerk Diesbach AG, TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, Dr. *Lars Jenssen* und Prof. *Killingtveit*, NTNU, Trondheim, und für die Unterstützung bei der akustischen Datenanalyse bei *K. Eggenschwiler*, EMPA, sowie für die Ausleihe der Tracer-Leitfähigkeitssonden bei *M. Baumann, R. Holzschuh* und *M. Tanner* vom Umweltdepartement des Kantons Thurgau.

Anschrift

Isabella Schalko, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, schalko@vaw.baug.ethz.ch
Florian Arnold, Alumnus ETH Zürich, arnold.florian@hotmail.com
Liliana Demarchi, Alumna UZH, liliana.demarchi@gmx.ch
Priska Helene Hiller, NTNU Trondheim, priska.hiller@ntnu.no
Prof. Dr. *Robert Boes*, VAW, ETH Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch

Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.
Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Oelhydraulik Hagenbuch AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01
ohe@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch, www.hydraulikshop.ch

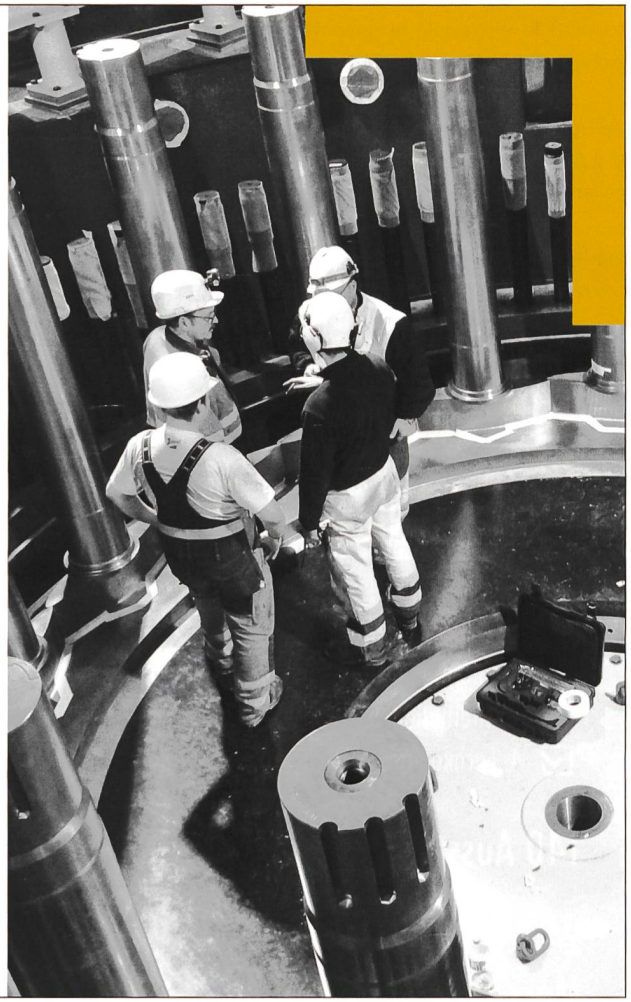
OHE
Oelhydraulik Hagenbuch AG

PROJEKTPLUS

Ihr Experte für Wasserkraftwerke
Votre expert pour les centrales hydrauliques

- Projektmanagement
  Gestion de projets
- Jahres-Inspektionen und Revisionen
  Inspections annuelles et révisions
- Zustandsexpertisen und Abnahmen
  Expertises d'état des installations et réceptions

Thomas Blau
Maschinentechniker, CAS Hydro
Technicien en mécanique, CAS Hydro

PROJEKTPLUS AG
Kreuzstrasse 51, CH-6010 Kriens
078 638 06 78

www.projekt-plus.ch