



Schlussbericht vom 21.12.2020

Gerinnekapazität im Bereich der Wehre unter Bundesaufsicht an Aare, Reuss und Limmat bei extremen Hochwasserabflüssen



Quelle: Luftaufnahme EW Flumenthal, 1994 © ETH Bibliothek



Hunziker, Zarn & Partner

Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

Datum: 21.12.2020

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

Sektion Aufsicht Talsperren

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Beauftragte:

Hunziker, Zarn & Partner AG

Schachenallee 29, 5000 Aarau

www.hzp.ch

Autoren:

Matthias Pfäffli

Sebastian Jaberg

Roni Hunziker

BFE-Projektbegleitung:

Roger Frauchiger

Dr. Markus Schwager

BFE-Vertragsnummer: SI/300305-01

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes Stauanlagensicherheit durchgeführt. Für den Inhalt der Studie sind ausschliesslich deren Autoren verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	3
2	Ausgangslage.....	3
3	Auftrag.....	4
4	Grundlagen.....	4
5	Methodik.....	5
5.1	Aufbereitung der Hydrologie	6
5.2	Hydraulische Modellierung.....	6
5.2.1	Software und vorhandene Modellgrundlagen aus EXAR	6
5.2.2	Aufbereitung der Geometrie.....	7
5.2.3	Art und Weise der Berechnungen.....	8
5.3	Kategorisierung der Stauanlagen	9
5.4	Erweiterte Untersuchungen für Stauanlagen mit Brutto-zu-Netto-Umformungen	10
6	Stauanlagen ohne Brutto-zu-Netto-Umformung	11
6.1	Stauanlage Bannwil	11
6.2	Stauanlage Wynau.....	13
6.3	Stauanlage Ruppoldingen.....	15
6.4	Stauanlage Winznau/Gösgen	17
6.5	Stauanlage Wildegg-Brugg.....	19
6.6	Stauanlage Beznau.....	21
6.7	Stauanlage Bremgarten-Zufikon	23
6.8	Stauanlage Wettingen.....	25
7	Stauanlagen mit Brutto-zu-Netto-Umformung.....	27
7.1	Stauanlage Niederried	27
7.1.1	Anlagenkennwerte	27
7.1.2	Abgrenzung Nahbereich	29
7.1.3	Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage.....	29
7.1.4	Überflutungsflächen	30
7.1.5	Spezifischer Abfluss.....	31

7.2	Stauanlage Aarberg	33
7.2.1	Anlagenkennwerte	33
7.2.2	Abgrenzung Nahbereich	34
7.2.3	Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage.....	34
7.2.4	Überflutungsflächen	35
7.2.5	Spezifischer Abfluss.....	36
7.3	Stauanlage Flumenthal	38
7.3.1	Anlagenkennwerte	38
7.3.2	Abgrenzung Nahbereich	39
7.3.3	Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage.....	39
7.3.4	Überflutungsflächen	40
7.3.5	Spezifischer Abfluss.....	42
7.4	Stauanlage Rapperswil-Auenstein.....	43
7.4.1	Anlagenkennwerte	43
7.4.2	Abgrenzung Nahbereich	44
7.4.3	Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage.....	44
7.4.4	Überflutungsflächen	45
7.4.5	Spezifischer Abfluss.....	46
7.5	Stauanlage Klingnau.....	48
7.5.1	Anlagenkennwerte	48
7.5.2	Abgrenzung Nahbereich	49
7.5.3	Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage.....	49
7.5.4	Überflutungsflächen	50
7.5.5	Spezifischer Abfluss.....	51
8	Zusammenfassung.....	53

1 Einleitung

EXAR Hydrologie

Als Teil des Projekts Extremhochwasser an der Aare (EXAR) wurde für das Einzugsgebiet der Aare eine hydrologische Langzeitsimulation von knapp 300'000 Jahren durchgeführt und daraus für die Aare und für die wichtigsten Zubringer (Saane, Emme, Reuss, Limmat) eine neue Hochwasserstatistik ermittelt.

Das BFE, als Aufsichtsbehörde des Bundes über die Sicherheit der Stauanlagen in der Schweiz, möchte mithilfe der Resultate der Studie die heute gültigen Bemessungs- und Sicherheitshochwasser für die 19 an den untersuchten Flussläufen gelegenen Stauanlagen überprüfen. Eine entsprechende Studie (vgl. [1]) bereitet für diese Stauanlagen die Hochwasserstatistik aus der hydrologischen Langzeitsimulation auf. Bei 13 der 19 Stauanlagen handelt es sich um Wehre.

Brutto-Abfluss

Die hydrologischen Auswertungen im Projekt EXAR basieren auf einer Analyse des Abflusses, welcher über den gesamten Talquerschnitt fliesst (im Folgenden als «Brutto-Abfluss» bezeichnet). Für den Nachweis der Hochwassersicherheit von Wehren kann jedoch nicht nur der Brutto-Abfluss, sondern auch der Abfluss im Gerinne, welcher den Nahbereich des Wehres unter Berücksichtigung von Ausuferungen im Oberlauf und von möglicher Umströmung erreicht (im Folgenden als «Netto-Abfluss» bezeichnet), relevant sein.

Netto-Abfluss

Um den Netto-Abfluss bei den 13 Wehranlagen zu ermitteln, muss die Gerinnekapazität in den oberhalb der Wehre liegenden Flussabschnitten ermittelt werden. Dazu eignen sich hydraulische Modellierungen mit einem 2D-Modell, mit welchem die Abweichung vom Netto- zum Brutto-Abfluss für verschiedene Hochwasserabflüsse bei jeder Wehranlage festgelegt werden können.

2 Ausgangslage

Die Hunziker, Zarn & Partner AG (HZP) hat als Teil des Arbeitspakets 3 im Projekt Extremhochwasser an der Aare (EXAR) seit Februar 2016 die hydraulischen Berechnungen von extremen Hochwasserereignissen entlang der Aare durchgeführt. Dafür wurde ein flächendeckendes 2D-Modell erstellt und angewendet. In diesem sind auch sämtliche Stauanlagen und Kraftwerke implementiert sind.

3 Auftrag

Zur Ermittlung der Netto-Abflüsse sollen für 13 Stauanlagen entlang der Aare sowie in den grösseren Zuflüssen hydraulische Simulationen von Brutto-Abflüssen zwischen einem HQ₁₀₀ und einem HQ_{100'000} im stationären Zustand durchgeführt und daraus die Umformung der Brutto- zu Netto-Abflüssen abgeleitet werden. Die Untersuchungen umfassen die Anlagen Niederried, Aarberg, Flumenthal, Bannwil, Wynau-Schwarzhäusern, Ruppoldingen, Gösgen/Winzna, Rapperswil-Auenstein, Wildegg-Brugg, Beznau, Klingnau, Bremgarten-Zufikon und Wettingen.

Das BFE erteilt der Hunziker, Zarn & Partner AG am 13.07.2020 den Auftrag, die entsprechenden Untersuchungen durchzuführen.

4 Grundlagen

- [1] Staudinger M., Furrer R., Viviroli D. Hochwasserereignisse aus kontinuierlicher Langzeitsimulation (EXAR) zur Überprüfung der Sicherheit von Stauanlagen. Schlussbericht zu einer Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE). Geographisches Institut der Universität Zürich, in Vorbereitung
- [2] Vollzugshilfe zur Stauanlagengesetzgebung betreffend den Bau und den Betrieb von Stauanlagen an der Aare unter direkter Bundesaufsicht. Bundesamt für Energie, 1. Januar 2015
- [3] Hochwasserschutz und Revitalisierung Emme, Wehr Biberist bis Aare, Raumplanungsbericht & Technischer Bericht. Auflageprojekt, ARGE Emme Auen 15. Mai 2015
- [4] Kissling + Zbinden, Hochwasserschutz Emme, Los 6, 3D-Modell der Dämme, entspricht grösstenteils den ausgeführten Arbeiten, März 2019
- [5] Erdbebensicherheitsnachweis WKW Kallnach-Niederried / Stauanlage Niederried. BE9305.101. CSD Ingenieure, Dezember 2019
- [6] Müller M., Karrer T., Hemund. R., Billeter, P. Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht D Projekt EXAR, Versagen wasserbaulicher Einrichtungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB, 2020
- [7] Jaberg S., Pfäffli M. Extremhochwasser an der Aare. Resultatmappe 1 Projekt EXAR. Kalibrierung und Validierung des hydraulischen Modells. ARGE GEOTEST-HZP-IUB, 2020
- [8] Pfäffli, M., Baer P., Sutter A., Irniger, A., Hunziker, R. Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht E Projekt EXAR. Hydraulische Modellierungen. ARGE GEOTEST-HZP-IUB, 2020

[9] ARGE GEOTEST-HZP-IUB 2019: Extremhochwasser an der Aare. Resultatmappen 2 Projekt EXAR, Analysestandorte und Schlüsselstellen in den Subsystemen, ARGE GEOTEST-HZP-IUB, 2020

[10] Staudinger M., Viviroli D., 2020. Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht A Projekt EXAR, Hydrometeorologische Grundlagen. Geographisches Institut der Universität Zürich.

5 Methodik

Relevante Abschnitte zur Beurteilung der Gerinnekapazität

Um die Umformung des Brutto- zu einem Netto-Abfluss zu erfassen, wird die Gerinnekapazität zwischen dem nächsten, oberhalb der beurteilten Stauanlage liegenden Transferpunkt¹ und der Stauanlage selbst beurteilt. Dabei sind insbesondere diejenigen Gerinneabschnitte von Bedeutung, bei denen Ausuferungen die Stauanlage umströmen und erst unterhalb der Stauanlage wieder ins Gerinne zurückfliessen.

Benötigte Angaben für die Sicherheitsnachweise

Die vorliegende Untersuchung der Netto-Abflüsse bildet die Grundlage für die Beurteilung der Hochwassersicherheit gemäss der Vollzugshilfe für Stauanlagen an der Aare [2]. Diese umfasst unter anderem folgende Kriterien:

- Hochwassersicherheit der Wehre und Stauhaltungsdämme im Nahbereich
 - Belastung bei einem Bemessungshochwasser, welches einem HQ_{1000} entspricht, unter Berücksichtigung von n-1 geöffneten Wehrfeldern.
 - Sicherheitshochwasser, welches sich mit einem Faktor von 1.2 aus dem Bemessungshochwasser (oder aus einer wissenschaftlich fundierten, standortspezifischen Studie) multipliziert ergibt, unter Berücksichtigung von allen geöffneten Wehrfeldern.
- Hochwassersicherheit der Stauhaltungsdämme ausserhalb der Nahbereiche der Wehre.
 - Das Bemessungshochwasser entspricht mindestens einem HQ_{100}
 - Das Sicherheitshochwasser entspricht mindestens einem HQ_{300}

¹ Ein Transferpunkt ist eine topographische Engstelle, bei welcher auch bei extremen Überflutungsszenarien sämtliches Wasser durchfliessen muss. Ein Beispiel für einen Transferpunkt ist der Geländeriegel im Bereich der Boninger Brücke in Aarburg.

5.1 Aufbereitung der Hydrologie

Die Brutto-Spitzenabflüsse wurden anhand der vorhandenen Langzeitsimulationen und -auswertungen an den Transferpunkten entlang der Aare und mittels der Abflussstatistik der Seiteneinzugsgebiete für den Standort der jeweiligen Stauanlage durch das Geographische Institut der Universität Zürich definiert (vgl. Tabelle 1, aus [1]).

Tabelle 1: Spitzenabflüsse aus der EXAR-Hochwasserstatistik für die betrachteten Stauanlagen im Schweizer Mittelland. Liegt die Stauanlage in der Nähe von Zusammenflüssen (Niederried und Flumenthal), wird der Zusammenfluss im hydraulischen Modell berücksichtigt.

<i>Hydrologische Spitzenabflüsse aus der EXAR- Hochwasserstatistik</i>	Stauanlage	Spitzenabfluss (m ³ /s)				
		HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	HQ _{1'000}	HQ _{10'000}	HQ _{100'000}
	Niederried	1700	1920	2180	2780	4300
	<i>davon Aare</i>	<i>659</i>	<i>698</i>	<i>758</i>	<i>893</i>	<i>1150</i>
	<i>davon Saane</i>	<i>1041</i>	<i>1222</i>	<i>1422</i>	<i>1887</i>	<i>3150</i>
	Aarberg	1710	1930	2180	2790	4320
	Flumenthal	1220	1370	1520	1870	2880
	<i>davon Aare</i>	<i>735</i>	<i>799</i>	<i>865</i>	<i>1101</i>	<i>1691</i>
	<i>davon Emme</i>	<i>485</i>	<i>571</i>	<i>655</i>	<i>769</i>	<i>1189</i>
	Bannwil	1260	1430	1590	1930	3030
	Wynau	1260	1440	1600	1940	3040
	Ruppoldingen	1320	1510	1690	2060	3170
	Gösgen	1400	1590	1790	2170	3260
	Rupperswil	1500	1710	1930	2350	3450
	Wildeggen	1600	1820	2060	2440	3300
	Beznau	2960	3350	3760	4420	6070
	Klingnau	2970	3330	3760	4430	6130
	Bremgarten	930	1020	1100	1300	1640
	Wettingen	590	670	750	900	1170

5.2 Hydraulische Modellierung

5.2.1 Software und vorhandene Modellgrundlagen aus EXAR

Für die zweidimensionalen Berechnungen wurde die Software BASEMENT v3.0.2 der VAW der ETH Zürich eingesetzt. Die im Modell verwendeten numerischen Methoden basieren auf einer Diskretisierung der Modelltopografie in unstrukturierte Dreieckselemente. Diese Elemente sind Kontrollvolumen für die Berechnung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen

(Finite-Volumen-Verfahren, 1. Ordnung). Die Elementkanten definieren die Grenze des Kontrollvolumens und die Verbindung zwischen den benachbarten Elementen. Die Lösung der numerischen Gleichungen erfolgt in BASEMENT v3.0.2 mit dem HLLC-Riemann Verfahren und ist auch robust für Flutwellenberechnungen bei plötzlichen Sperrenbrüchen.

Die bestehenden Modellgrundlagen aus dem Projekt EXAR konnten für die vorliegende Untersuchung übernommen werden, sie wurden jedoch auf Veränderungen gegenüber dem heutigen Zustand überprüft (vgl. nachfolgendes Kapitel 5.2.2). Die Grundlagen beinhalten ein detailliertes Höhenmodell für das Umland und das Gerinne (mit mittlerer Sohle), die Standorte der Stauanlagen und die Pegel-Abfluss-Beziehungen der jeweiligen Anlagen sowie die Rauigkeitsbeiwerte für das Gerinne und das Umland gemäss den Resultaten aus der Kalibrierung und Validierung².

5.2.2 Aufbereitung der Geometrie

Für die Aufbereitung der Modelle wurden allfällige Veränderungen der Gerinnegeometrie, welche seit der Modellerstellung für das Projekt EXAR (Stichdatum ca. 2015) umgesetzt wurden, berücksichtigt. Zudem wurden die Anlagekennwerte (Stauziel, Wehrgeometrie und Pegel-Abfluss-Beziehung für die Wehrsegmente) detailliert geprüft.

Für die vorliegende Untersuchung wurden folgende Anpassungen im Modellperimeter vorgenommen:

- Abgleich der HWS-Mauer oberhalb der Stauanlage Niederried mit Plänen des ausgeführten Bauwerks
- Berücksichtigung des neuen Emme-Laufs aus dem Hochwasserschutzprojekt Emme Biberist bis Mündung Aare [3] inkl. den Anpassungen in der Umgebung, insbesondere der Hochwasserschutzdämme [4]
- Anpassungen des rechtsseitigen Ufers oberhalb der Brücke Jurastrasse im Gebiet Attisholz.
- Detailliertere geometrische Umsetzung des Kraftwerks Flumenthal
- Anpassungen im Bereich des Rohrer Schachens (Gemeinden Aarau und Rupperswil)

² Die Modelle wurden im Rahmen des Projekts Projekt EXAR anhand des Hochwassers 2005 kalibriert und anhand des Hochwasser 2007 validiert [7]. Die detaillierten Modelleigenschaften werden in [8] erörtert.

- Detailliertere geometrische Umsetzung des Kraftwerks Rapperswil
- Anpassung der PQ-Beziehung in Rapperswil aufgrund neuer Grundlagen
- Anpassungen und Korrekturen an den rechtsseitigen HWS-Dämmen und -Mauern entlang des Klingnauer Stausees

5.2.3 Art und Weise der Berechnungen

Stationäre Abflüsse

Die Abflüsse wurden als stationäre Modellzuflüsse jeweils so weit oberhalb der betrachteten Stauanlage zugegeben, dass sämtliche Gerinneabschnitte, welche zu einer Umströmung der Stauanlage führen können, im Modellperimeter enthalten sind.

Für die Betriebsart der Stauanlagen wurde ein Zustand mit vollständiger Öffnung aller Wehrsegmente (n-0) und einem Hochwasserbetrieb der Kraftwerke angenommen. Die Annahme des Hochwasserbetriebs bedeutet, dass bei den meisten der betrachteten Stauanlagen kein Wasser über die Turbinen abgeführt werden kann; es gibt jedoch bei einigen Kraftwerken einen Spül- oder Segelbetrieb.». Die Betriebsweise des Kraftwerks wird bei jeder Stauanlage im Abschnitt «Anlagenkennwerte» beschrieben.

Der Netto-Abfluss für die Stauanlage ergibt sich aus dem Anteil des Wassers, der bis zum Standort des Wehrs im Gerinne verbleibt und somit über die Stauanlage abgeleitet werden muss. Die Abgrenzung erfolgt jeweils dort, wo der Nahbereich der Stauanlage definiert ist, d.h. meist im Bereich von rund 50 bis 200 m oberhalb des Stauwehrs.

Brutto-zu-Netto-Umformung

Als Resultat wurde für verschiedene Abflüsse eine Brutto-zu-Netto-Umformung für jede relevante Stauanlage erarbeitet (vgl. Beispiel in Abbildung 1).

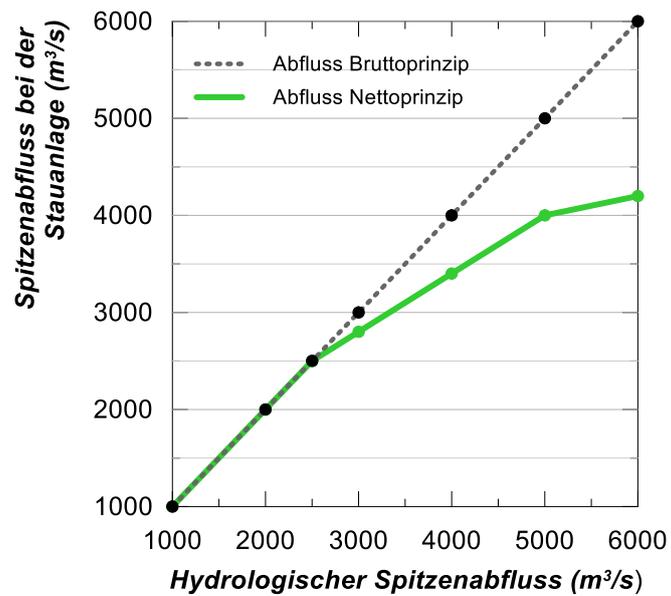


Abbildung 1: Umformung von einem Brutto-Abfluss zu einem Netto-Abfluss. In diesem Beispiel ist die Gerinnekapazität ab einem Abfluss von rund 2'500 m³/s erschöpft und es kommt zu Ausuferungen, welche die Stauanlage grossflächig umströmen.

Abgrenzung

Bei allen Untersuchungen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber davon ausgegangen, dass auch im Falle einer Überströmung von Seitendämmen keine Damnbrüche erfolgen. Damit wird die Brutto-zu-Netto-Umwandlung konservativ, d.h. es fliesst so viel Wasser wie möglich bis zur Stauanlage, berechnet.

5.3 Kategorisierung der Stauanlagen

Triage

In einem ersten Schritt wurde im Rahmen einer Triage ermittelt, in welchen Gerinneabschnitten oberhalb von Stauanlagen die Gerinnekapazität bei Spitzenabflüssen der Grössenordnung $HQ_{10'000}$ bis $HQ_{100'000}$ limitierend ist. Anhand von Abfluss-Auswertungen und Beurteilung von Überflutungsflächen konnten dadurch diejenigen Stauanlagen eruiert werden, bei denen keine Brutto-zu-Netto-Umwandlung nötig ist (d.h. es gibt keine grossflächige Umströmung der Stauanlage). Die Anlagekennwerte und Überflutungsflächen dieser Stauanlagen sind in Kapitel 6 angegeben.

5.4 Erweiterte Untersuchungen für Stauanlagen mit Brutto-zu-Netto-Umformungen

*Erweiterte
Untersuchungen mit
weiteren Abflussstufen*

Falls in einem Teilsystem die Gerinnekapazität limitierend war, wurde anhand der Berechnung von tieferen Abflüssen (HQ_{100} , HQ_{300} , $HQ_{1'000}$) der Bereich ermittelt, bei dem die Gerinnekapazität limitierend wird. Dieser Bereich wurde, wie auch der allgemeine Verlauf der Brutto-zu-Netto-Umformung, anhand von weiteren Zwischenabflüssen genauer definiert.

Zusätzlich zur Ermittlung der Brutto-zu-Netto-Umformungskurve wurde auch der spezifische Abfluss bei einem HQ_{300} graphisch dargestellt. Diese Darstellung dient der Identifikation von Schwachstellen bei den Stauhaltungs-dämmen und zeigt die wesentlichen Fliesswege auf.

Die Resultate der erweiterten Untersuchungen der relevanten Stauanlagen sind in Kapitel 7 aufgeführt.

6 Stauanlagen ohne Brutto-zu-Netto-Umformung

6.1 Stauanlage Bannwil

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Bannwil liegt an der Aare bei GEWISS km 78.16. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 417.30 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 450 m³/s turbinieren. Im Hochwasserbetrieb wird über das Kraftwerk passiv konstant 270 m³/s abgegeben (Spülbetrieb).

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 2) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

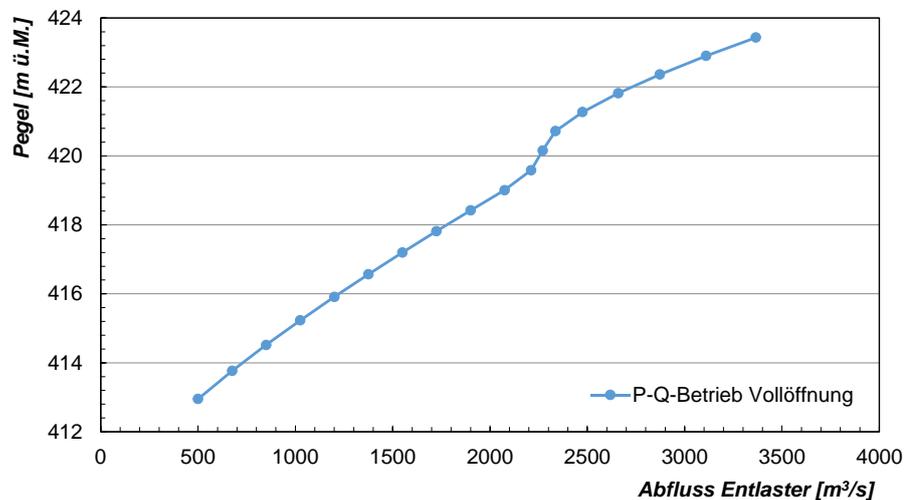


Abbildung 2: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Bannwil mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]). Der Spülbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung berücksichtigt.

Kraftwerksbetrieb

Der Spülbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung in der Modellierung berücksichtigt (konstante Abgabe von 270 m³/s).

Resultate

Die Ausuferungen bei der Stauanlage Bannwil treten erst bei sehr grossen Hochwasserereignissen auf (\gg HQ_{10⁰000}, vgl. Abbildung 3). Bei einem HQ_{100⁰000} wird die Stauanlage rechts- und linksseitig umströmt. Die Austritte entstehen dabei grösstenteils im Abschnitt von rund 400 m oberhalb der Stauanlage.

Für die Stauanlage Bannwil wird der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden, da die Ausuferungen erst bei sehr grossen Ereignissen und grösstenteils im Nahbereich der Stauanlage auftreten.

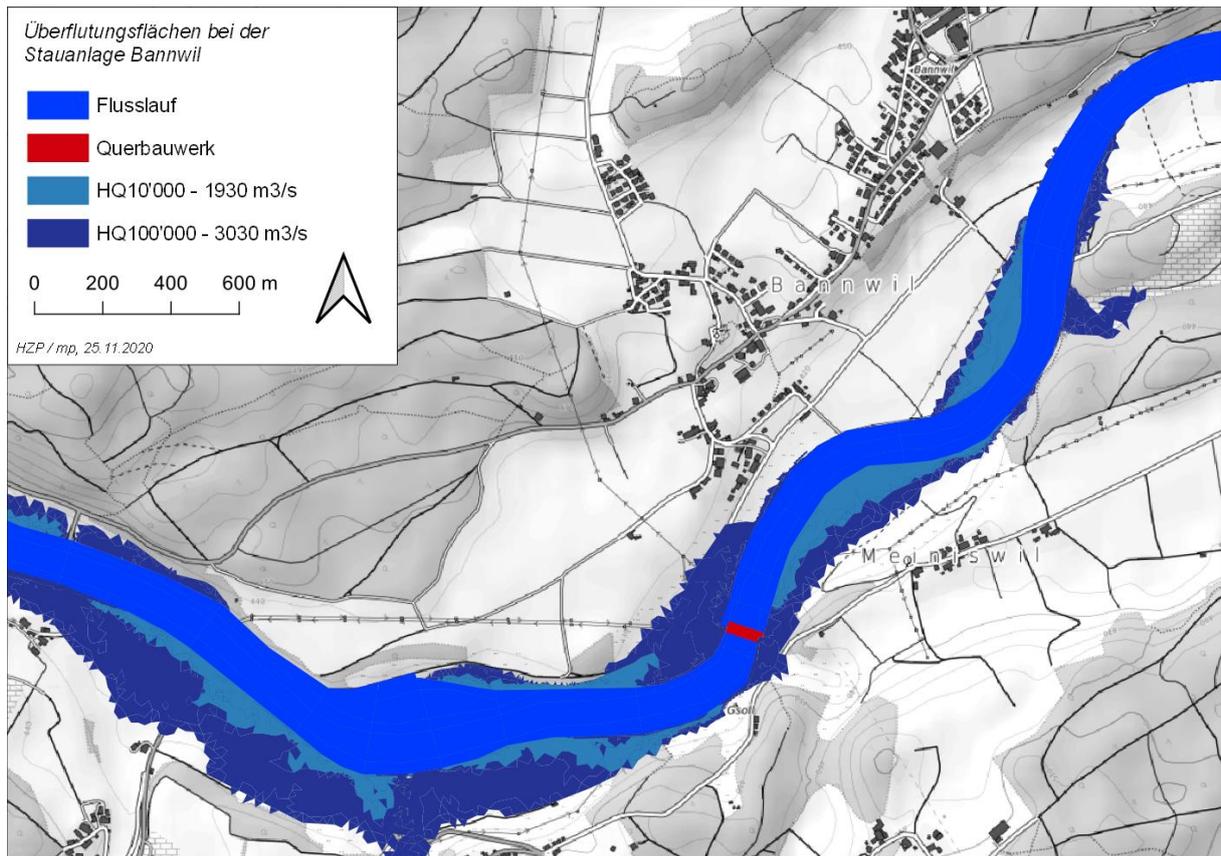


Abbildung 3: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Bannwil für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.2 Stauanlage Wynau

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Wynau liegt an der Aare bei GEWISS km 72.55. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 408.08 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 420 m³/s turbinieren. Im Hochwasserbetrieb wird über das Kraftwerk passiv konstant 50 m³/s abgegeben (Spülbetrieb).

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 4) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

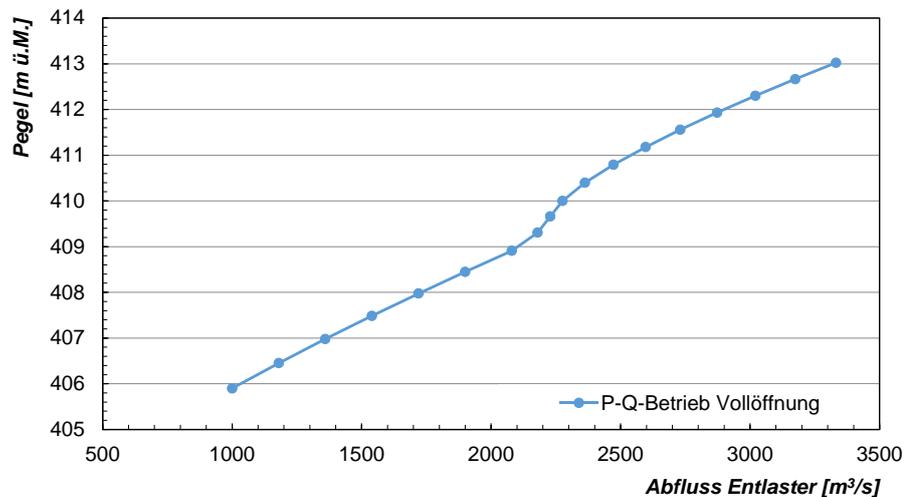


Abbildung 4: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Wynau mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]). Der Spülbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung berücksichtigt.

Kraftwerksbetrieb

Der Spülbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung in der Modellierung berücksichtigt (konstante Abgabe von 50 m³/s).

Resultate

Die Überflutungsflächen für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} zeigen, dass das Wasser grösstenteils im Gerinne bis zur Stauanlage Wynau geführt werden kann (vgl. Abbildung 5). Bei einem HQ_{100'000} gibt es rechtsseitig, im Nahbereich der Stauanlage, eine Umströmung des Bauwerks.

Für die Stauanlage Wynau wird der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden, da im Gerinne oberhalb der Stauanlage keine Ausuferungen auftreten.

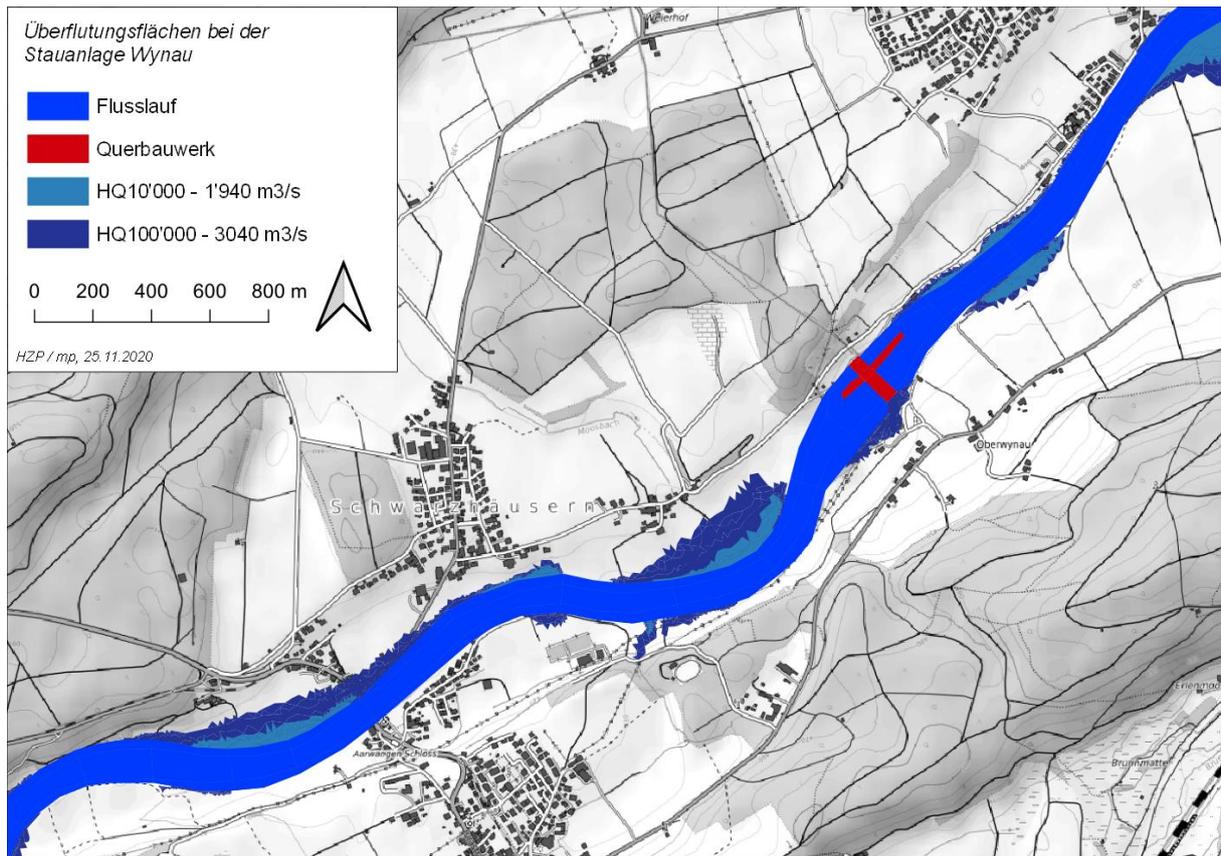


Abbildung 5: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Wynau für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.3 Stauanlage Ruppoldingen

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Ruppoldingen liegt an der Aare bei GEWISS km 61.11. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 398.40 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 475 m³/s turbinieren. Im Hochwasserbetrieb ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fliesst kein Wasser durch das Kraftwerk.

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 6) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

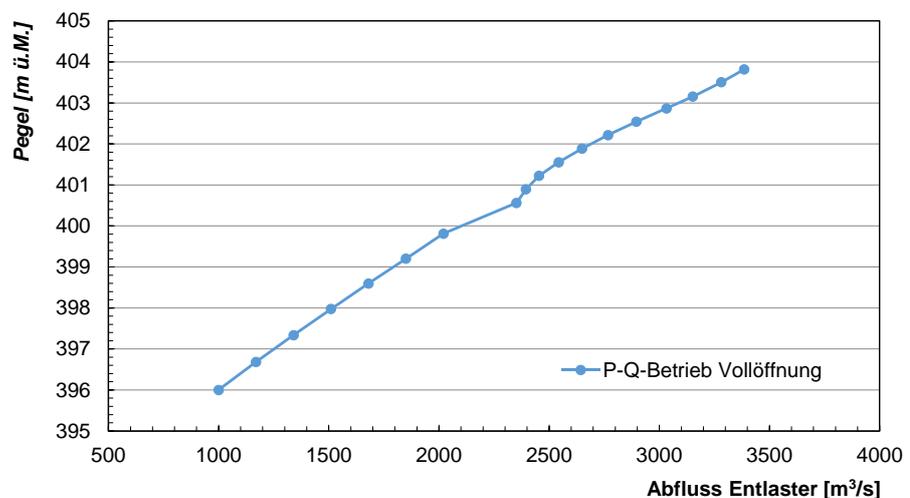


Abbildung 6: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Ruppoldingen mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Da das Kraftwerk im Hochwasserfall ausser Betrieb ist, wurde im hydraulischen Modell keine Randbedingung für das Kraftwerk vorgesehen.

Resultate

Die Ausuferungen bei der Stauanlage Ruppoldingen treten erst bei sehr grossen Hochwasserereignissen auf (\gg HQ_{100'000}, vgl. Abbildung 7). Bei einem HQ_{100'000} wird die Stauanlage rechts- und linksseitig umströmt. Die rechtsseitige Umströmung ist dabei deutlich grösser als die linksseitige. Die Austritte entstehen dabei grösstenteils im Abschnitt von rund 400 m oberhalb der Stauanlage.

Für die Stauanlage Ruppoldingen wird der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden, da es erst bei sehr seltenen Ereignissen zu Ausuferungen kommt und da diese Ausuferungen grösstenteils im Nahbereich der Stauanlage auftreten.

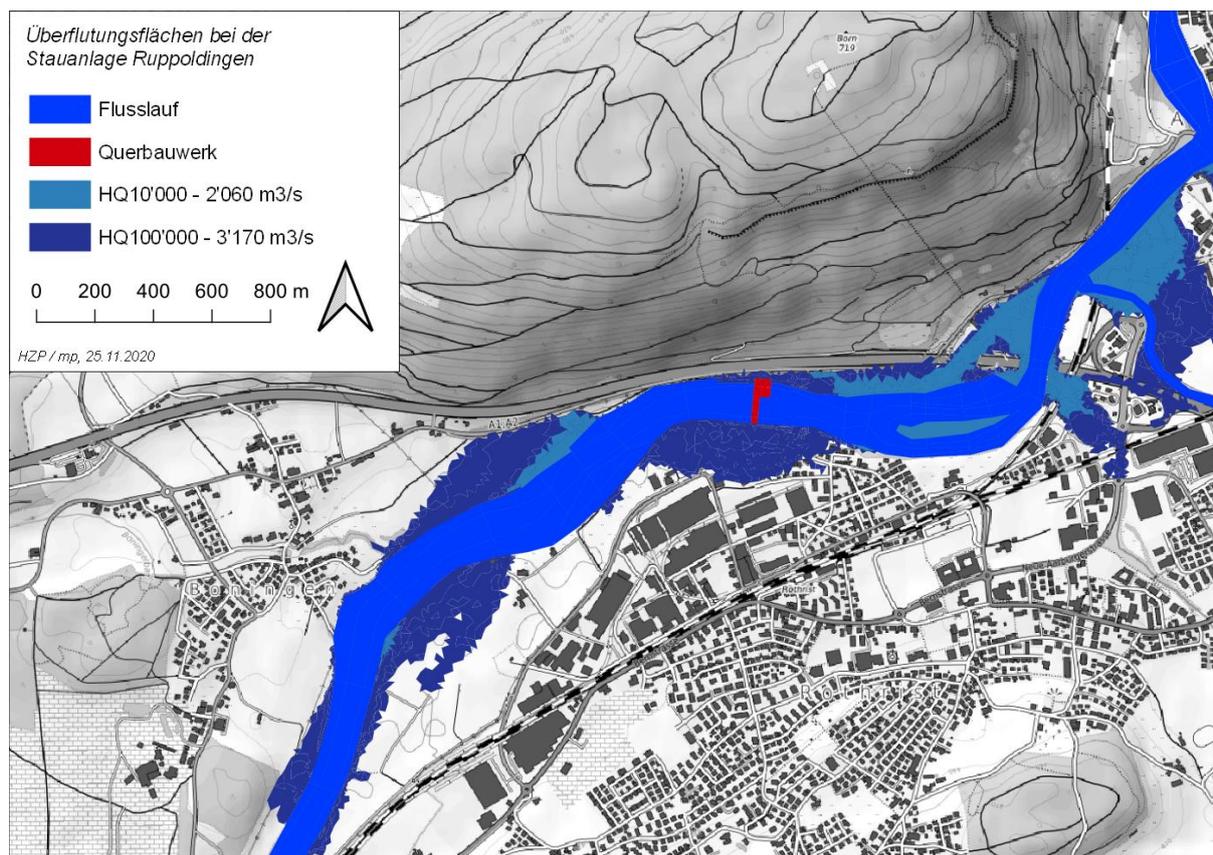


Abbildung 7: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Ruppoldingen für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.4 Stauanlage Winznau/Gösgen

Anlagenkennwerte

Das Stauwehr Winznau liegt an der Aare bei GEWISS km 52.54. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 388.14 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 380 m³/s turbinieren. Im Hochwasserbetrieb wird über das Kraftwerk passiv konstant 150 m³/s abgegeben (Segelbetrieb).

*PQ-Beziehung
Stauwehr*

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 8) wurde für die Vollöffnung der Wehrgorgane anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

Der Segelbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung in der Modellierung berücksichtigt (konstante Abgabe von 150 m³/s).

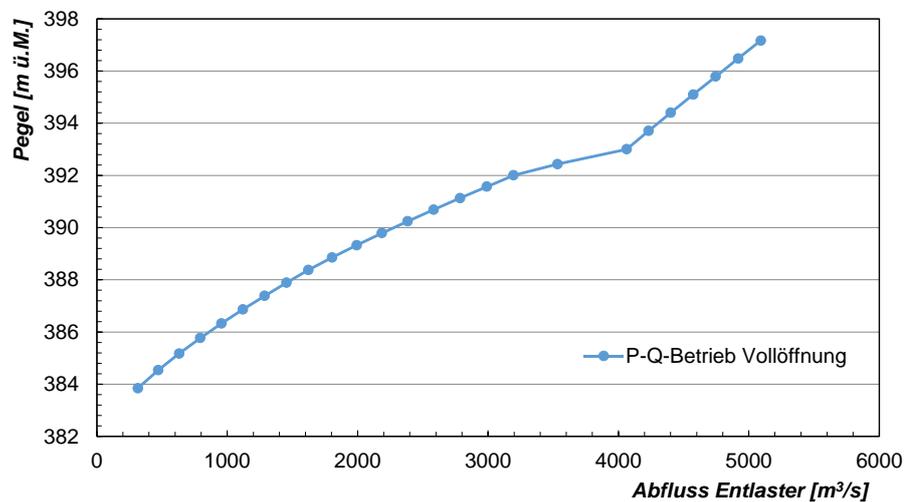


Abbildung 8: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Winznau mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]). Der Segelbetrieb des Kraftwerks wurde mit einer separaten Randbedingung berücksichtigt.

Kraftwerksbetrieb

Das Stauwehr Winznau wird bei einem HQ_{10'000} beidseitig umströmt (vgl. Abbildung 9). Die Umströmungen entstehen grösstenteils im Bereich zwischen dem Stauwehr und rund 500 m oberhalb des Stauwehrs.

Resultate

Die Überflutungsflächen für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} zeigen, dass das Gerinne bis unmittelbar vor der Rechtskurve der Aare eine genügend grosse Kapazität aufweist und keine Austritte zu erwarten sind. Zwischen der Eisenbahnbrücke und dem Stauwehr Winznau kommt es bei einem HQ_{10'000} zu rechts- und linksseitigen Umströmungen des Stauwehrs Winznau.

Für das Stauwehr Winznau wird der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden, da die Ausuferungen im Nahbereich der Stauanlage auftreten.

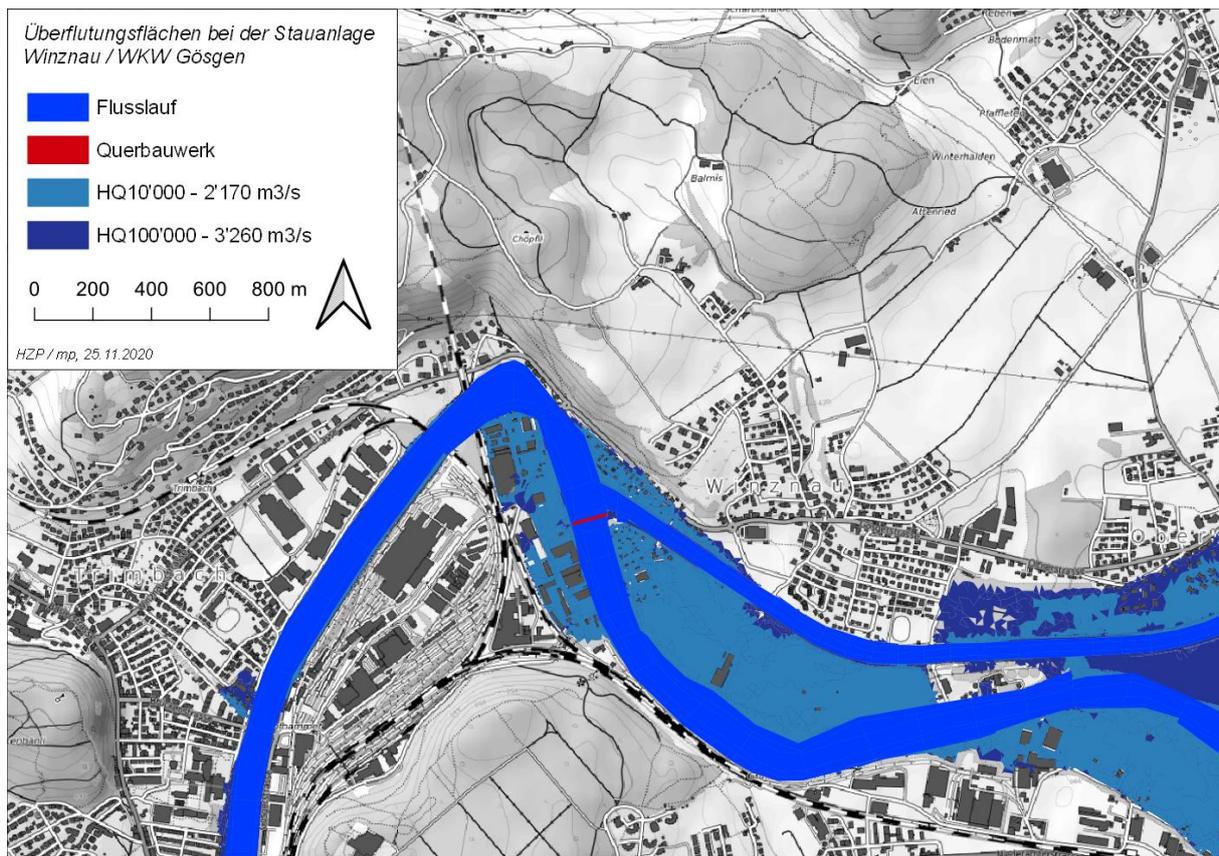


Abbildung 9: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Winznau/Gösgen für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.5 Stauanlage Wildegg-Brugg

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Wildegg-Brugg liegt an der Aare bei GEWISS km 24.34. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 348.00 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 410 m³/s turbinieren. Im Hochwasserbetrieb ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fliesst kein Wasser durch das Kraftwerk.

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 10) wurde für die Vollöffnung der Wehrgorgane anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

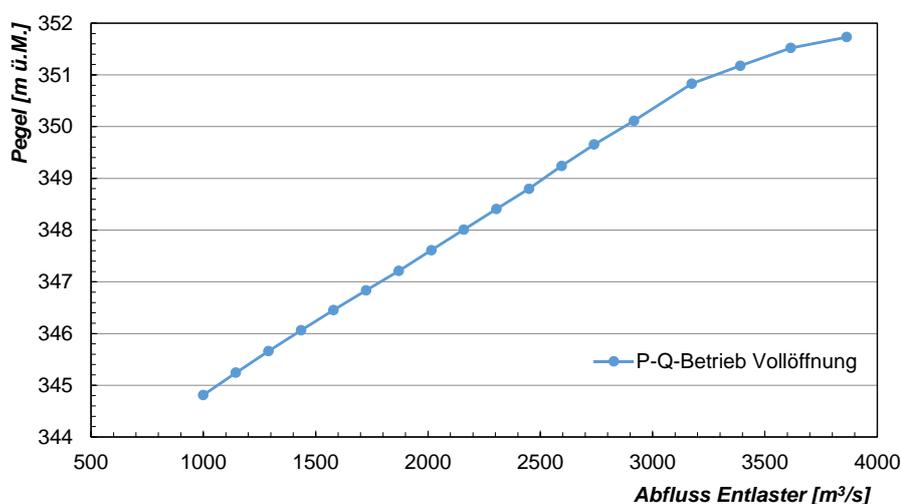


Abbildung 10: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Wildegg-Brugg mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Da das Kraftwerk im Hochwasserfall ausser Betrieb ist, wurde im hydraulischen Modell keine Randbedingung für das Kraftwerk vorgesehen.

Resultate

Die Stauanlage Wildegg-Brugg wird erst bei einem HQ_{100'000} beidseitig umströmt (vgl. Abbildung 11), wobei insbesondere die linksseitige Umströmung durch grossflächige Austritte entsteht, die sich über mehrere Kilometer entlang des Gerinnes oberhalb der Stauanlage erstrecken. Die rechtsseitige Umströmung entsteht erst zwischen der Aare-Brücke von Schinznach-Bad und der Stauanlage Wildegg-Brugg auf einer Länge von rund 700 m.

Für die Stauanlage Wildegg-Brugg wird der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden, da die Ausuferungen erst bei sehr seltenen Ereignissen (HQ_{100'000}) auftreten.

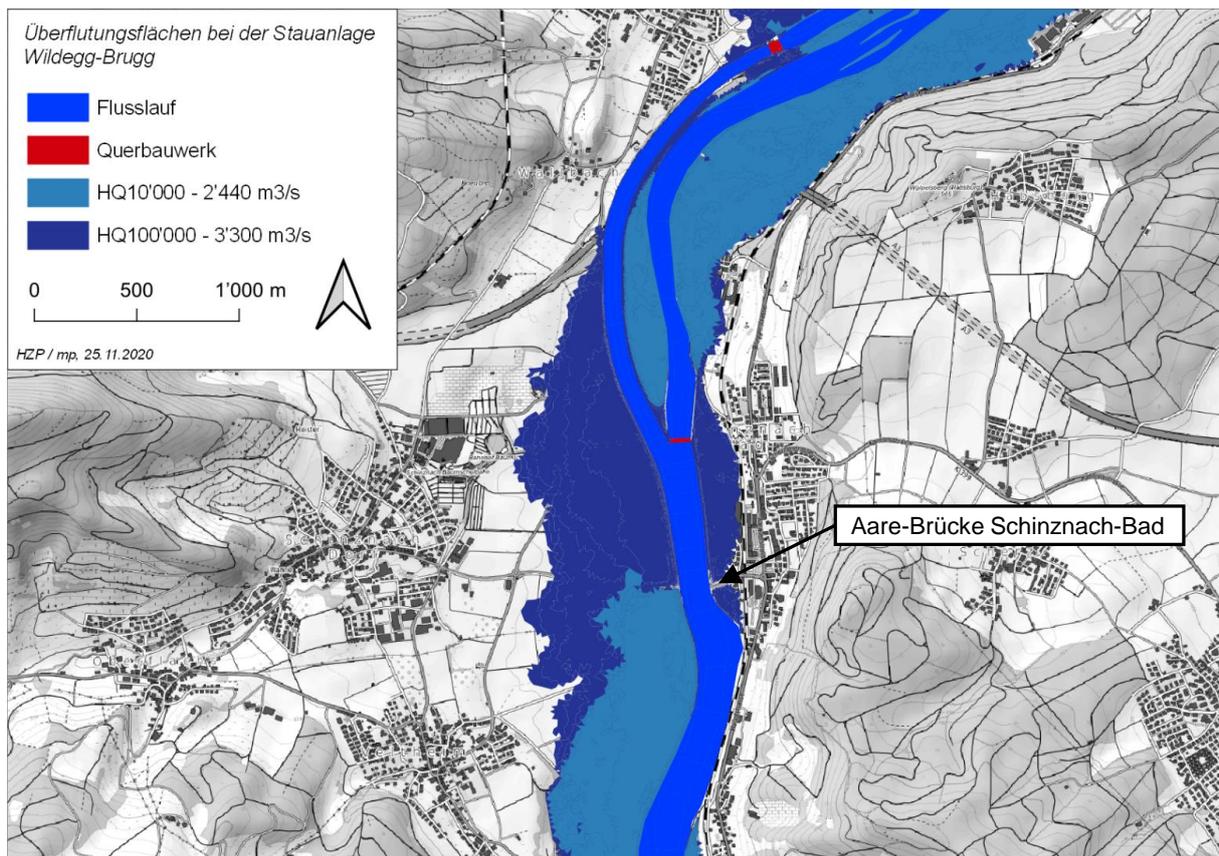


Abbildung 11: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Wildegg-Brugg für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.6 Stauanlage Beznau

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Beznau liegt an der Aare bei GEWISS km 8.74. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 325.25 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 418 m³/s turbinieren. Zusätzlich wird am Stauwehr mit einer Dotierwasserturbine maximal 140 m³/s turbiniert. Im Hochwasserbetrieb sind sowohl das Kraftwerk als auch die Dotierturbine ausgeschaltet, bei beiden Anlageteilen fliesst kein Wasser durch.

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 12) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

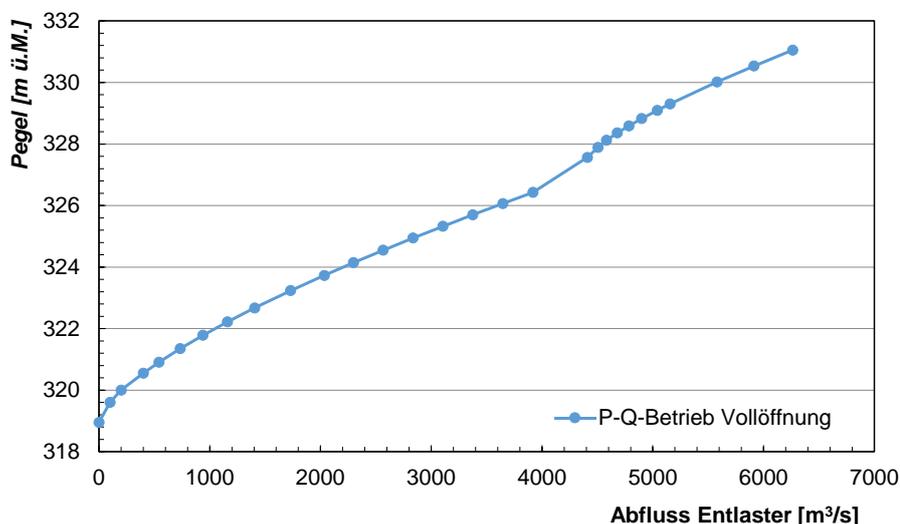


Abbildung 12: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Beznau mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Da das Kraftwerk und die Dotierwasserturbine im Hochwasserfall ausser Betrieb sind, wurden im hydraulischen Modell für diese Anlagen keine Randbedingungen vorgesehen.

Resultate

Bei der Stauanlage Beznau kommt es bei einem HQ_{10'000} und bei einem HQ_{100'000} zu lokal sehr begrenzten, seitlichen Umströmungen im Nahbereich der Stauanlage (vgl. Abbildung 13).

Für die Stauanlage Beznau wird deshalb der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden.

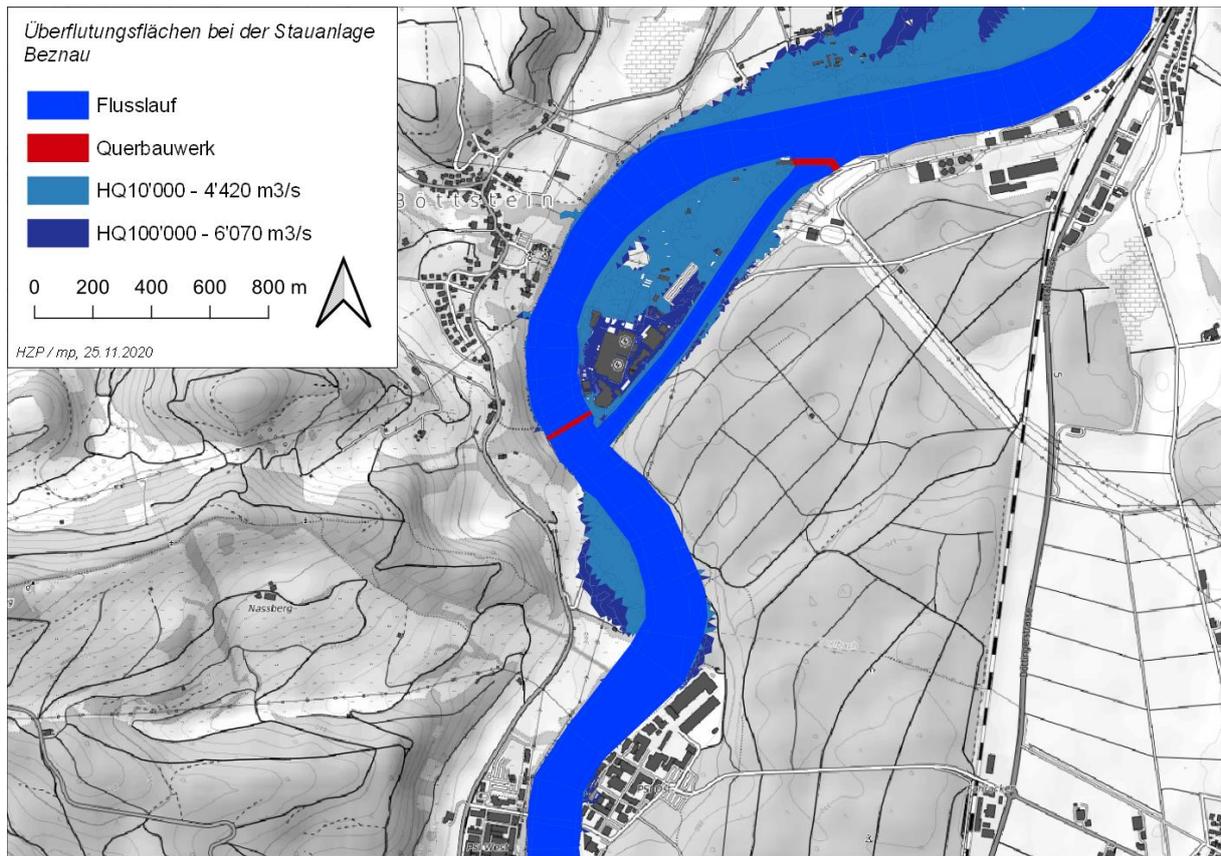


Abbildung 13: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Beznau für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

6.7 Stauanlage Bremgarten-Zufikon

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Bremgarten-Zufikon liegt an der Reuss bei GEWISS km 28.69. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 380.00 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 200 m³/s turbinieren. Aufgrund des grossen Stauraums kann das Kraftwerk auch im Hochwasserfall lange in Betrieb bleiben. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass das Kraftwerk bei allen Abflüssen in Betrieb bleibt (Konstanter Abfluss von 200 m³/s).

*PQ-Beziehung
Stauwehr*

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 14) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

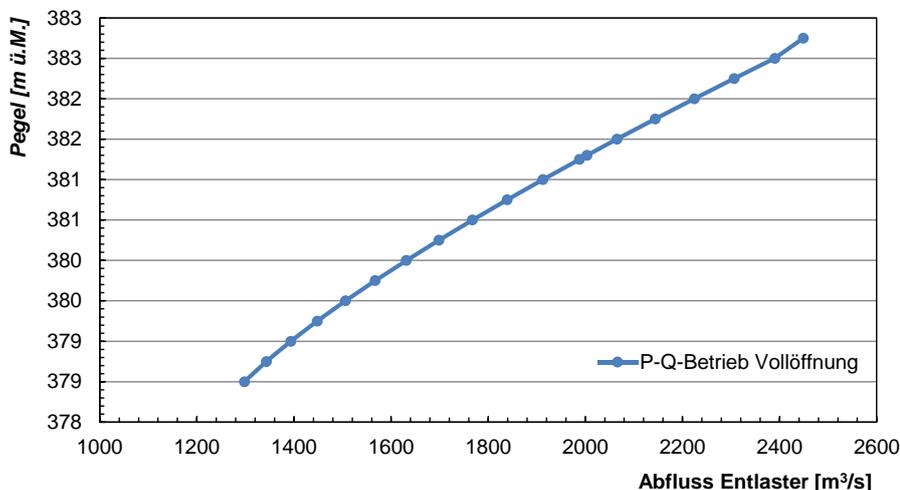


Abbildung 14: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Bremgarten-Zufikon mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]). Der Kraftwerksbetrieb wurde mit einer separaten Randbedingung berücksichtigt.

Kraftwerksbetrieb

Der Kraftwerksbetrieb wurde mit einer separaten Randbedingung in der Modellierung berücksichtigt (konstante Abgabe von 200 m³/s).

Resultate

Bei der Stauanlage Bremgarten-Zufikon gibt es bei einem HQ_{100'000} gemäss Hochwasserstatistik aus EXAR keine grossflächigen Ausuferungen, die zu einer Umströmung der Stauanlage führen können (vgl. Abbildung 15).

Für die Stauanlage Bremgarten-Zufikon wird deshalb der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden.

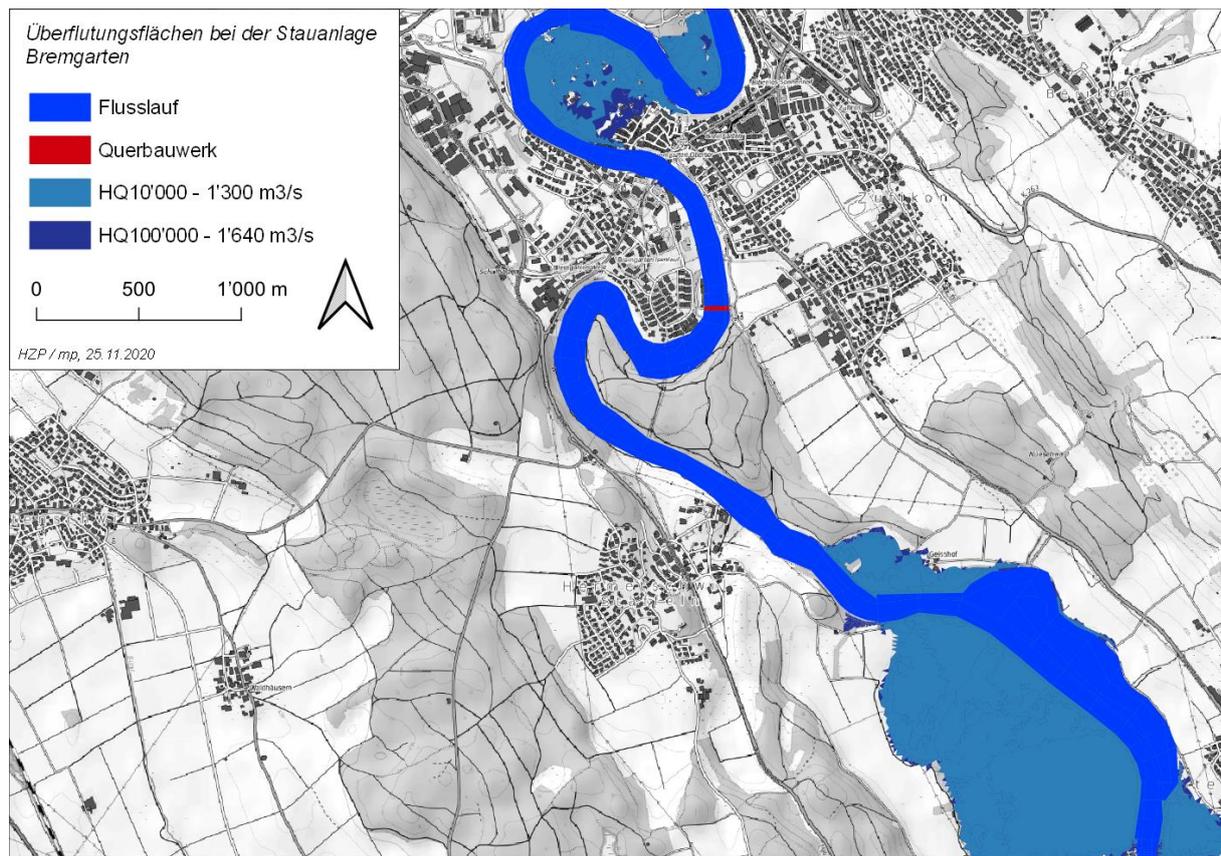


Abbildung 15: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Bremgarten-Zufikon für das $HQ_{10'000}$ und das $HQ_{100'000}$ auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des $HQ_{10'000}$ ist beim $HQ_{100'000}$ auch nass.

6.8 Stauanlage Wettingen

Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Wettingen liegt an der Limmat bei GEWISS km 12.38. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 380.24 m ü.M. Das Kraftwerk kann dabei eine Nutzwassermenge von 145 m³/s turbinieren. Aufgrund des grossen Stauraums kann das Kraftwerk auch im Hochwasserfall lange in Betrieb bleiben. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass das Kraftwerk bei allen Abflüssen in Betrieb bleibt (konstanter Abfluss von 145 m³/s).

*PQ-Beziehung
Stauwehr*

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 16) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

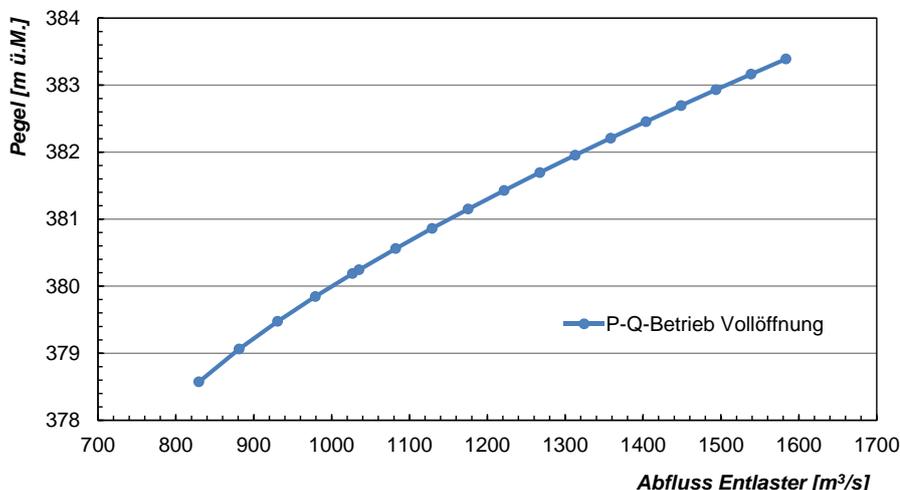


Abbildung 16: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Wettingen mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]). Der Kraftwerksbetrieb wurde mit einer separaten Randbedingung berücksichtigt.

Kraftwerksbetrieb

Der Kraftwerksbetrieb wurde mit einer separaten Randbedingung in der Modellierung berücksichtigt (konstante Abgabe von 145 m³/s).

Resultate

Bei der Stauanlage Wettingen gibt es bei einem HQ_{100'000} gemäss Hochwasserstatistik aus EXAR keine grossflächigen Ausuferungen, die zu einer Umströmung der Stauanlage führen können (vgl. Abbildung 17).

Für die Stauanlage Wettingen wird deshalb der Brutto- und der Netto-Abfluss nicht unterschieden.

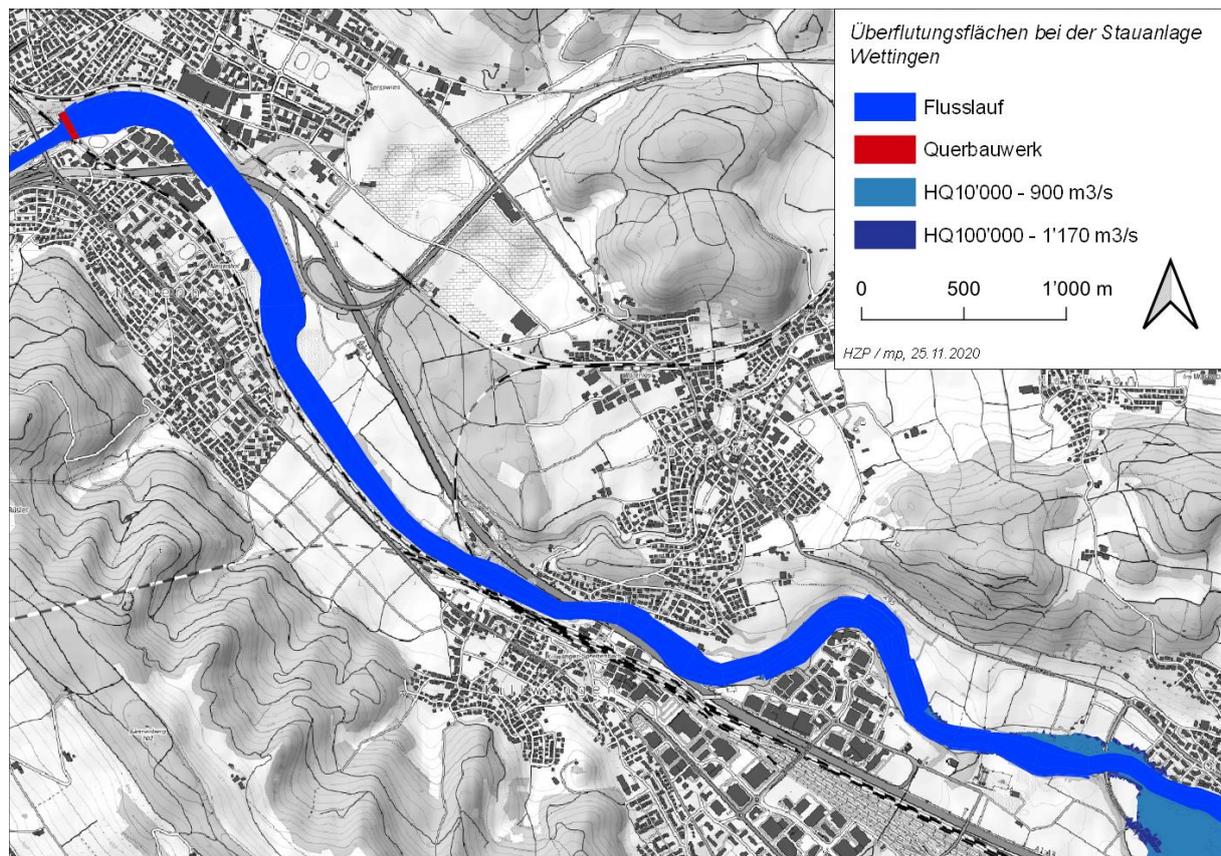


Abbildung 17: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Wettingen für das HQ_{10'000} und das HQ_{100'000} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche des HQ_{10'000} ist beim HQ_{100'000} auch nass.

7 Stauanlagen mit Brutto-zu-Netto-Umformung

7.1 Stauanlage Niederried

7.1.1 Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Niederried liegt an der Aare bei GEWISS km 150.07. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 461.14 m ü.M. auf. Die Kronenlänge des Stauwehrs beträgt insgesamt 80 m. Das Stauwehr besteht aus 5 Wehrfeldern mit einer lichten Weite von je rund 10 m.

Im Oberlauf der Stauanlage existieren rechtsseitig Stauhaltungsdämme, die zusätzlich mit einer Hochwasserschutzmauer erhöht wurden. Die Oberkante der Hochwasserschutzmauer erreicht bei der Stauanlage eine Kote von 462.60 m ü.M. und steigt oberwasserseitig parallel zum Wasserspiegelgefälle an (vgl. Abbildung 18).

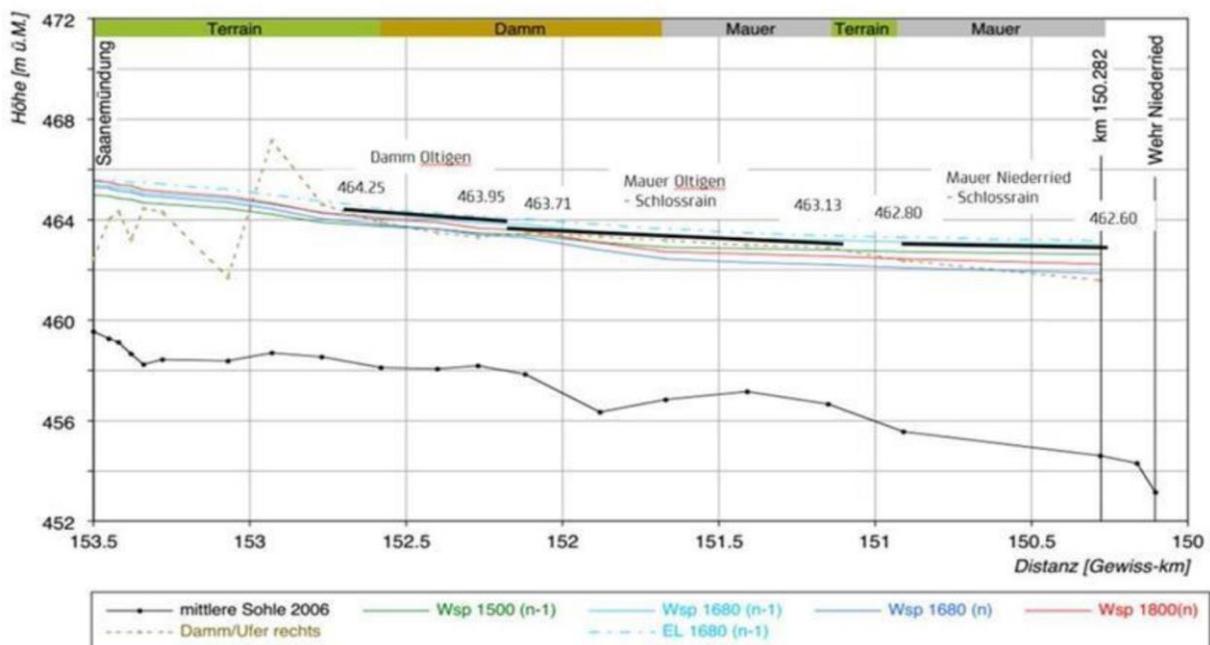


Abbildung 18: Uferhöhen rechts (Dammkronen und OK Schutzmauern) mit den massgebenden Wasserspiegeln im hydraulischen Längsprofil (aus [5])

Für die Berechnungen wurde angenommen, dass sämtliche Öffnungen bei den Schutzmauern geschlossen sind und dass die Schutzmauern während des Hochwasserereignisses intakt bleiben.

PQ-Beziehung Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 19) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt. Zudem wurde die PQ-Beziehung bis zu einem maximalen Abfluss von rund 10'600 m³/s extrapoliert (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

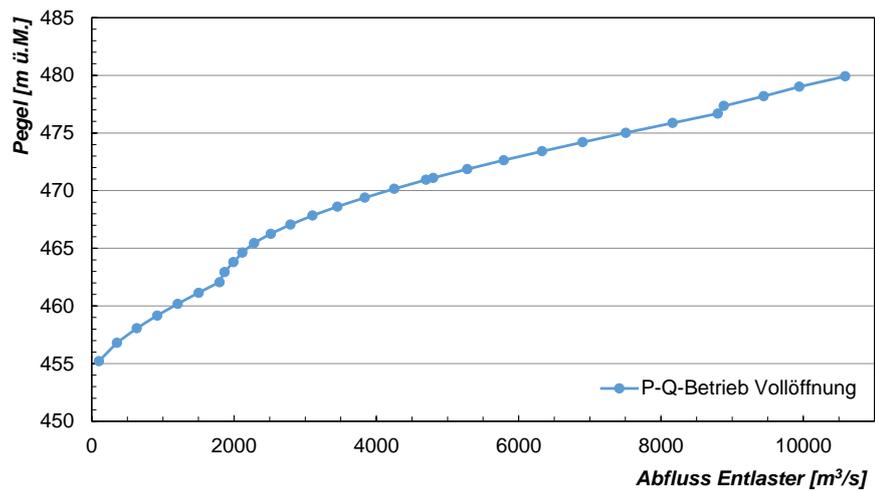


Abbildung 19: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Niederried mit Vollöffnung ($n=0$) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

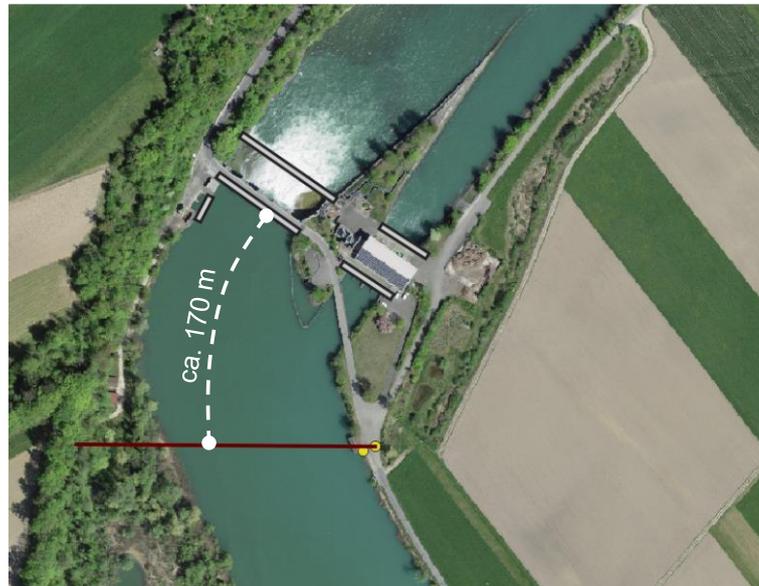
Bei der Stauanlage Niederried wird das Wasser im Regelbetrieb in zwei Kraftwerke abgeleitet:

- Das rechtsseitig des Stauwehrs Niederried liegende Kraftwerk Niederried mit einer Nutzwassermenge von $190 \text{ m}^3/\text{s}$
- Das Kraftwerk Kallnach, welches über einen unterirdischen Freispiegelstollen mit einer Nutzwassermenge von $45 \text{ m}^3/\text{s}$ beschickt wird.

Die beiden Kraftwerke sind im Hochwasserfall ausser Betrieb und führen kein Wasser durch die Anlage. Für den Kraftwerksbetrieb wurde im hydraulischen Modell keine Randbedingung vorgesehen.

7.1.2 Abgrenzung Nahbereich

Die Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage wurde gemäss den Angaben des BFE umgesetzt. Als Nahbereich der Stauanlage wurde der Bereich bis rund 170 m oberhalb der Wehranlage angenommen (vgl. Abbildung 20).



- Abgrenzungsquerschnitt
 - ▬ Randbedingungen Stauwehre / Kraftwerke
 - Abgrenzungskordinaten gemäss BFE
- Hintergrund: SwissImage ©swisstopo

Abbildung 20: Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage Niederried gemäss Angaben des BFE.

7.1.3 Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage

Die Aare kann bis zu einem Abfluss von rund 1'800 m³/s das Wasser vollständig im Gerinne bis zur Stauanlage Niederried führen (vgl. Abbildung 21). Bei höheren Abflüssen wird der rechtsseitige Stauhaltungsdamm grossflächig überströmt. Das austretende Wasser fliesst rechts an der Stauanlage vorbei und gelangt dort wieder ins Gerinne der Aare.

Die Umströmung bewirkt eine signifikante Abweichung zwischen dem Brutto- und dem Nettoabfluss, welche zwischen einem HQ₁₀₀ und einem HQ₃₀₀ (gemäss EXAR-Hochwasserstatistik) beginnt.

Bei einer allfälligen zukünftigen Anpassung der Schutzmauer kann die Netto-Abfluss-Linie parallel entlang der Y-Achse verschoben werden. Der neue Schnittpunkt mit der Brutto-Abfluss-Linie würde sich aus der angestrebten Gerinnekapazität ergeben.

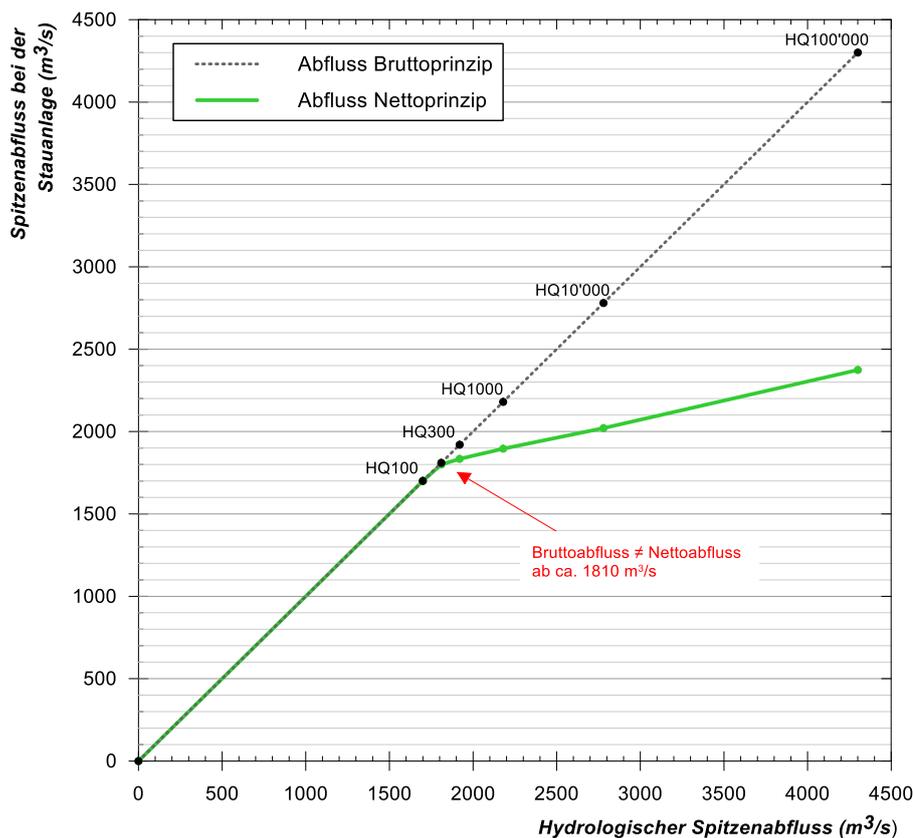


Abbildung 21: Darstellung des Netto-Abflusses (grüne Linie) für die Stauanlage Niederried in Abhängigkeit des Brutto-Abflusses. Der Netto-Abfluss entspricht ab ca. $1'810 m^3/s$ nicht mehr dem Brutto-Abfluss. Die dargestellten Punkte sind die berechneten, stationären Abflüsse, dazwischen wurde linear interpoliert.

7.1.4 Überflutungsflächen

Die Überflutungsflächen für verschiedene Wiederkehrperioden gemäss EXAR-Hochwasserstatistik (vgl. Abbildung 22) zeigen bereits bei einem HQ_{100} grosse Überflutungsflächen im Bereich der Saane-Mündung und unterhalb der Stauanlage Niederried.

Ab einem HQ_{300} wird durch die seitliche Überströmung der Schutzmauern auch die Landwirtschaftsfläche «St. Vrene» unmittelbar rechtsseitig des Kraftwerks überflutet.

Bei höheren Abflüssen nimmt die Überflutungsfläche nur noch geringfügig zu (z.B. rechtsseitig unterhalb der Saanemündung im Gebiet von Oltigen). Die Abflüsse erhöhen grösstenteils nur noch die Intensität auf den bereits benetzten Flächen.

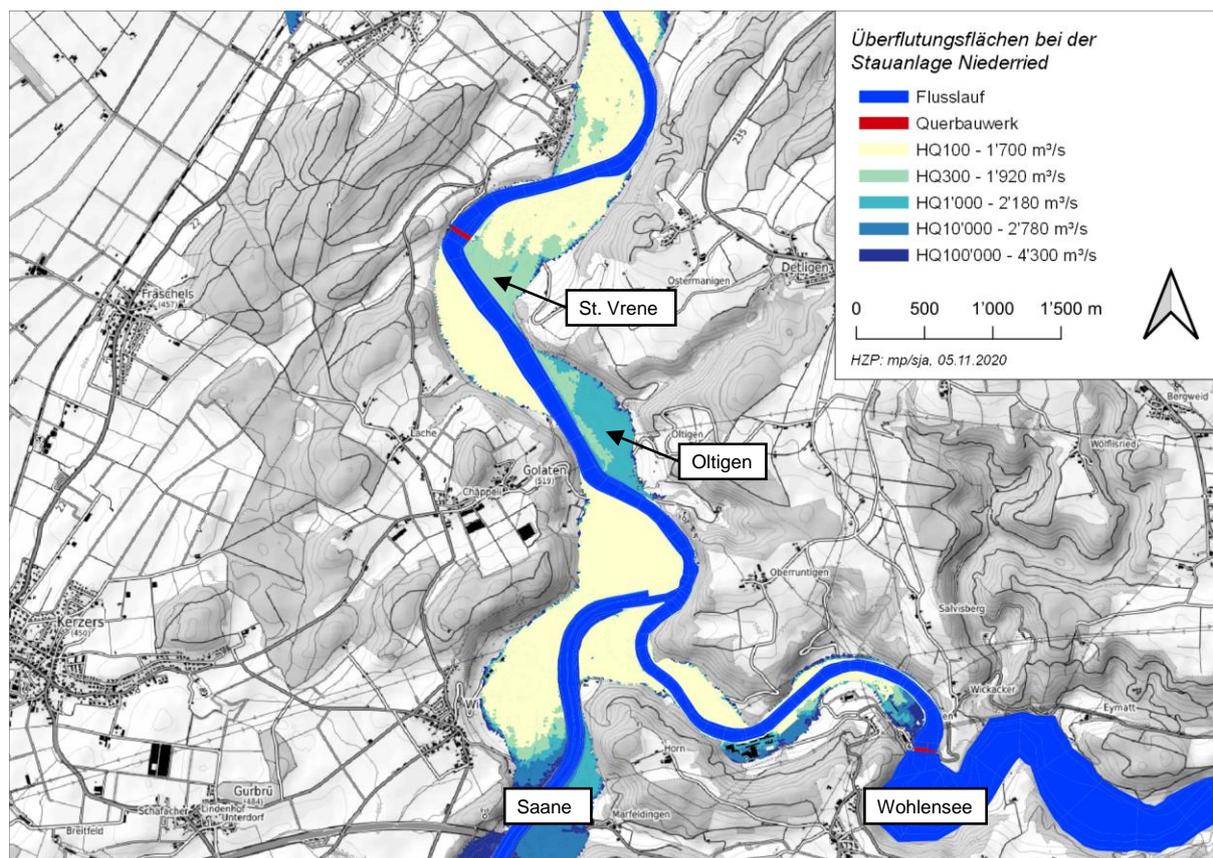


Abbildung 22: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Niederried bei verschiedenen Wiederkehrperioden auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche bei einem HQ₁₀₀ ist für sämtliche, höheren Abflüsse ebenfalls nass.

7.1.5 Spezifischer Abfluss

Der spezifische Abfluss³ bei einem HQ₃₀₀ gemäss EXAR-Hochwasserstatistik dient dazu, die Fliesswege zu identifizieren. Für die vorliegende, grossflächige Überströmung der Schutzmauern liegt der spezifische Abfluss auf der gesamten Länge der Schutzmauer in einem ähnlichen Bereich (vgl. Abbildung 23).

Am oberen Ende der Schutzmauer sowie unmittelbar bei der Stauanlage Niederried kann ein leicht grösserer Abfluss ermittelt werden.

³ Abfluss in Fliessrichtung (m³/s) pro Meter (1/m) Querschnittsbreite

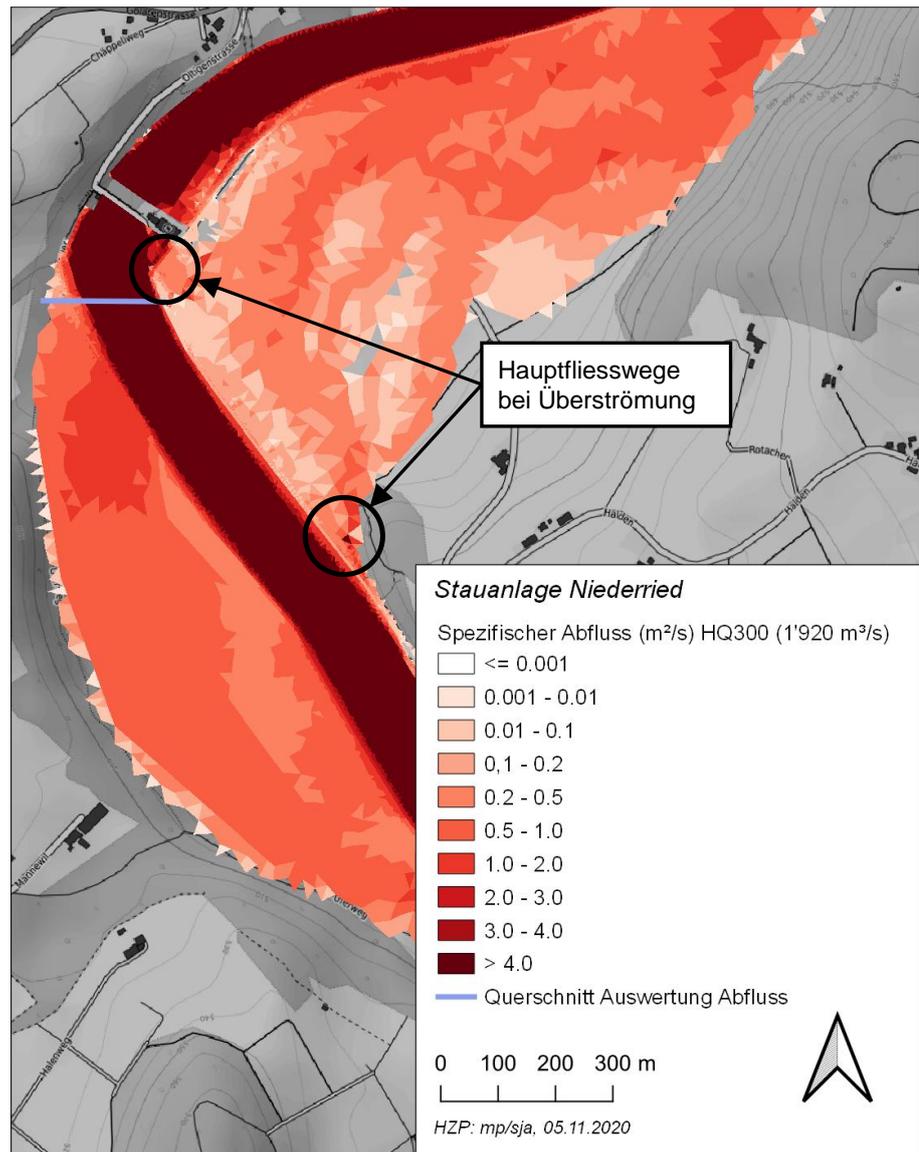


Abbildung 23: Darstellung des spezifischen Abflusses im Bereich der Stauanlage Niederried bei einem HQ₃₀₀ auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik.

7.2 Stauanlage Aarberg

7.2.1 Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Aarberg liegt an der Aare bei GEWISS km 144.44. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 451.00 m ü.M. auf. Die Kronenlänge des Stauwehrs beträgt insgesamt 73.5 m. Das Stauwehr besteht aus drei Segmenten mit einer lichten Weite von je 14.8 m.

Unmittelbar oberhalb der Stauanlage gibt es rechtsseitig einen Seitendamm, welcher bis zum südlichen Ende der Zuckermühle Aarberg reicht (ca. 250 m oberhalb der Stauanlage). Entlang des linken Ufers, von der Stauanlage Aarberg bis zum Bereich Aarberg Mühlaus (ca. 1.4 km oberhalb der Stauanlage), verläuft ebenso ein Stauhaltungsdamm. Beide Dämme sind – wenn sie beidseitig vorhanden sind – jeweils gleich hoch und gehen anschliessend in erhöhtes Terrain über.

PQ-Beziehung
Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 24) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt. Zudem wurde die PQ-Beziehung bis zu einem maximalen Abfluss von rund 9'600 m³/s extrapoliert (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

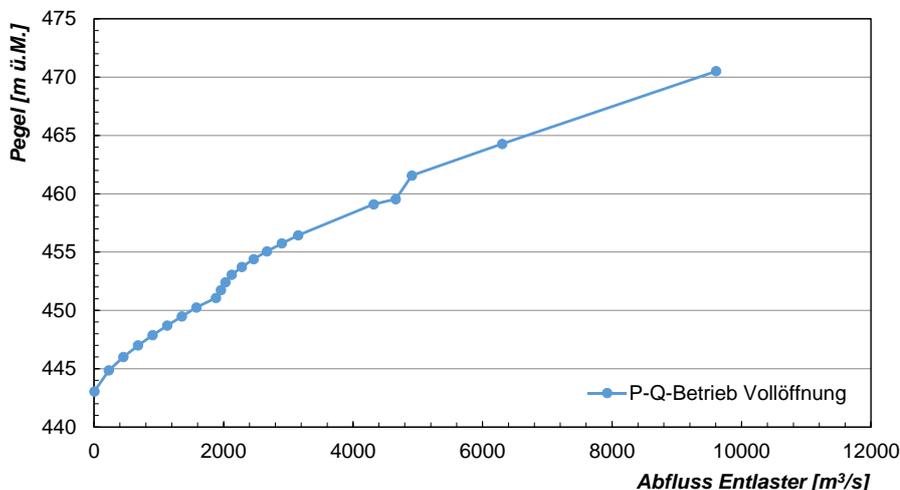


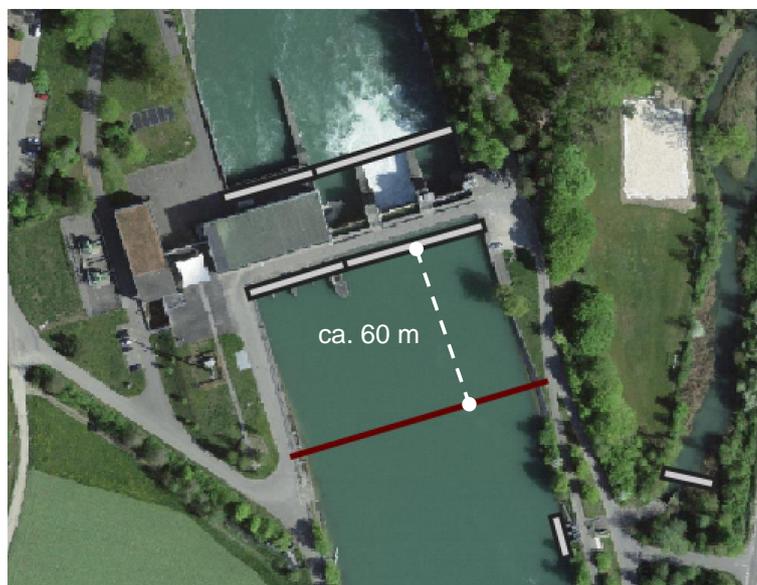
Abbildung 24: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Aarberg mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Im Regelbetrieb kann das Kraftwerk eine Nutzwassermenge von 190 m³/s turbinieren. Im Hochwasserfall ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fliesst kein Wasser durch das Kraftwerk. Im hydraulischen Modell wurde für das Kraftwerk keine Randbedingung vorgesehen.

7.2.2 Abgrenzung Nahbereich

Der Nahbereich der Stauanlage wurde als der Bereich bis rund 60 m oberhalb des Stauwehrs angenommen (vgl. Abbildung 25).



- Abgrenzungsquerschnitt
 - ▬ Randbedingungen Stauwehre / Kraftwerke
- Hintergrund: SwissImage ©swisstopo

Abbildung 25: Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage Aarberg

7.2.3 Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage

Die Aare kann bis zu einem Abfluss von rund 1'700 m³/s das Wasser vollständig im Gerinne bis zur Stauanlage Aarberg führen (vgl. Abbildung 26). Bei höheren Abflüssen wird der linksseitige Damm im obersten Abschnitt überströmt, was zu einer massgeblichen Reduktion des Netto-Abflusses im Vergleich zum Brutto-Abfluss führt.

Die Brutto- und Nettoabflüsse in Aarberg sind unabhängig von den Austritten, die an den Stauhaltungsdämmen der oberhalb liegenden Stauanlage Niederried auftreten. Eventuelle bauliche Anpassungen bei der Stauanlage Niederried haben somit keinen Einfluss auf die Brutto- oder Nettoabflüsse in Aarberg.

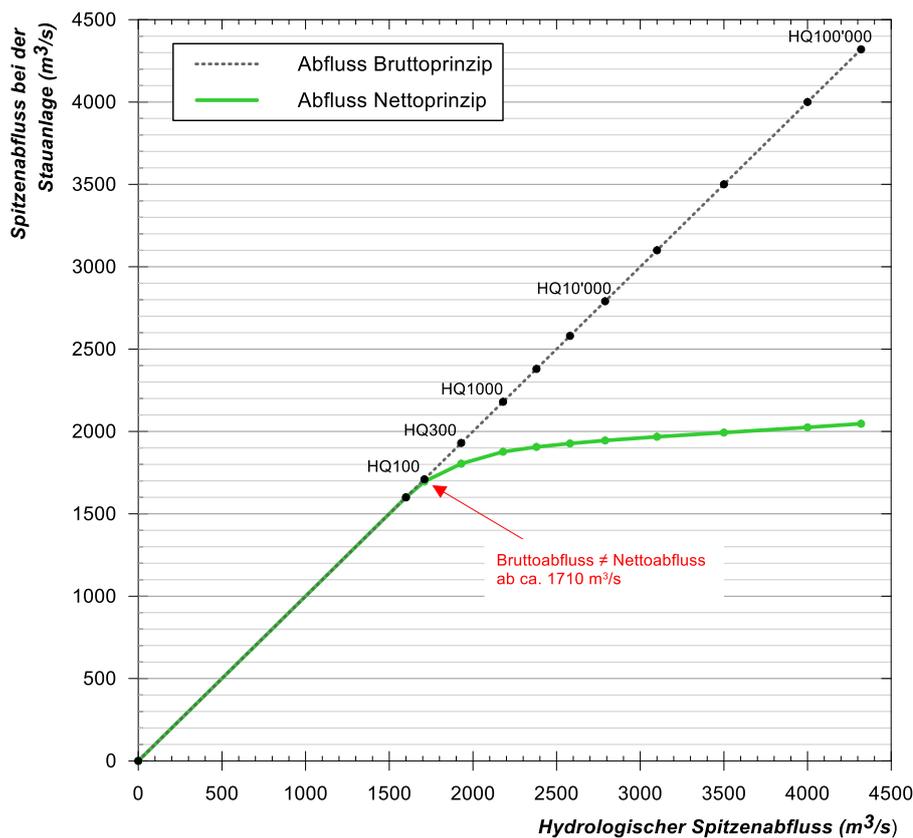


Abbildung 26: Darstellung des Netto-Abflusses für die Stauanlage Aarberg in Abhängigkeit des Brutto-Abflusses (grüne Linie). Der Netto-Abfluss entspricht ab ca. 1'710 m³/s nicht mehr dem Brutto-Abfluss. Die dargestellten Punkte sind die berechneten, stationären Abflüsse, dazwischen wurde linear interpoliert.

7.2.4 Überflutungsflächen

Die Überflutungsflächen für verschiedene Wiederkehrperioden gemäss EXAR-Hochwasserstatistik (vgl. Abbildung 27) zeigen, dass bereits bei einem HQ₁₀₀ linksseitige Austritte entlang des Stauhaltungsdammes oberhalb der Stauanlage Aarberg zu erwarten sind. Die Austritte sind jedoch gering und führen nicht zu einer signifikanten Umströmung der Anlage. Bei höheren Abflüssen nimmt die Überflutungsfläche im Gebiet Mülau zu und weitet sich grossflächig im Landwirtschaftsgebiet bis zum Kallnachkanal aus. Der Überflutungsprozess beginnt im oberen Bereich von Mülau und breitet sich mit steigenden Abflüssen in Richtung der Stauanlage aus. Bei einem HQ_{100'000} wird auch der rechts- und linksseitige Damm unmittelbar oberhalb der Stauanlage überströmt.

Die weiter oberhalb liegenden, links- und rechtsseitigen Austritte in die tiefliegenden Talflächen bei Niederried und Radelfingen fliessen beide wieder vollständig ins Gerinne zurück.

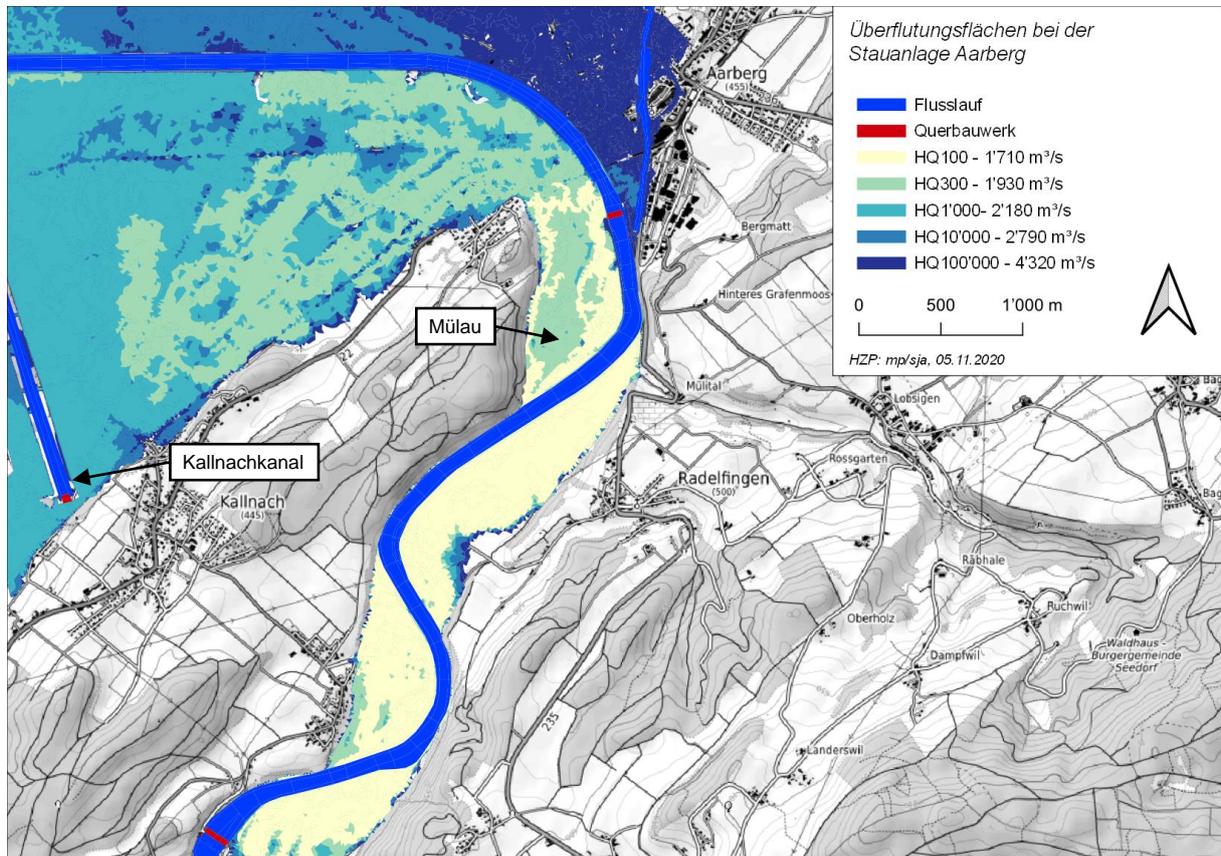


Abbildung 27: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Aarberg für verschiedene Wiederkehrperioden auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche bei einem HQ₁₀₀ ist für sämtliche, höheren Abflüsse ebenfalls nass.

7.2.5 Spezifischer Abfluss

Der spezifische Abfluss bei einem HQ₃₀₀ gemäss EXAR-Hochwasserstatistik dient dazu, die Fliesswege zu identifizieren.

Die Überströmungen konzentrieren sich bei einem HQ₃₀₀ primär auf einen rund 580 m langen Bereich oberhalb des Gebäudes Aarberg Mühlau, wo der Uferweg in einen unbefestigten Weg übergeht (vgl. Abbildung 28). Dieser Bereich wird auf der ganzen Länge ungefähr gleich stark überströmt. Es gibt jedoch Bereiche (ganz am Anfang und ganz am Ende), welche leicht stärker überströmt werden.

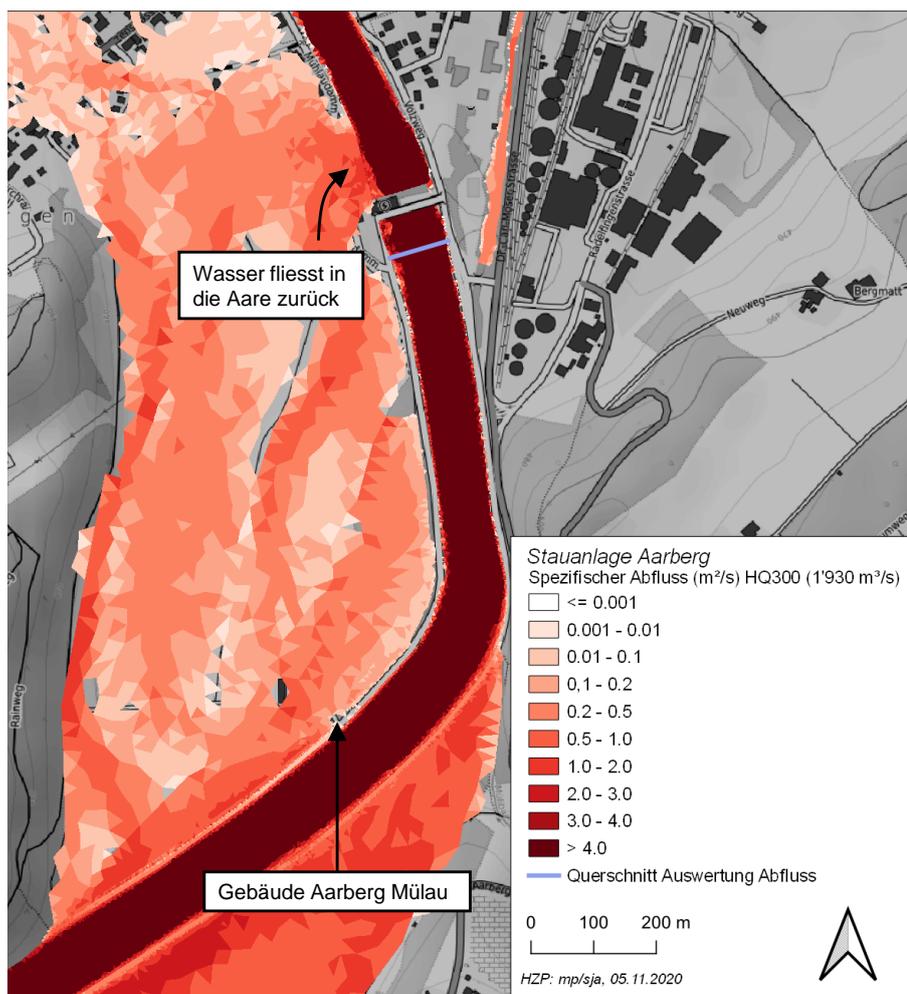


Abbildung 28: Darstellung des spezifischen Abflusses im Bereich der Stauanlage Aarberg bei einem HQ₃₀₀ auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik.

7.3 Stauanlage Flumenthal

7.3.1 Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Flumenthal liegt an der Aare bei GEWISS km 89.835. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 426.00 m ü.M. Die Kronenlänge des Stauwehrs beträgt insgesamt rund 47 m. Das Stauwehr besteht aus drei Wehrfeldern mit einer lichten Weite von je ca. 12.3 m.

*PQ-Beziehung
Stauwehr*

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 29) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt. Zudem wurde die PQ-Beziehung bis zu einem maximalen Abfluss von rund 3'330 m³/s extrapoliert (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

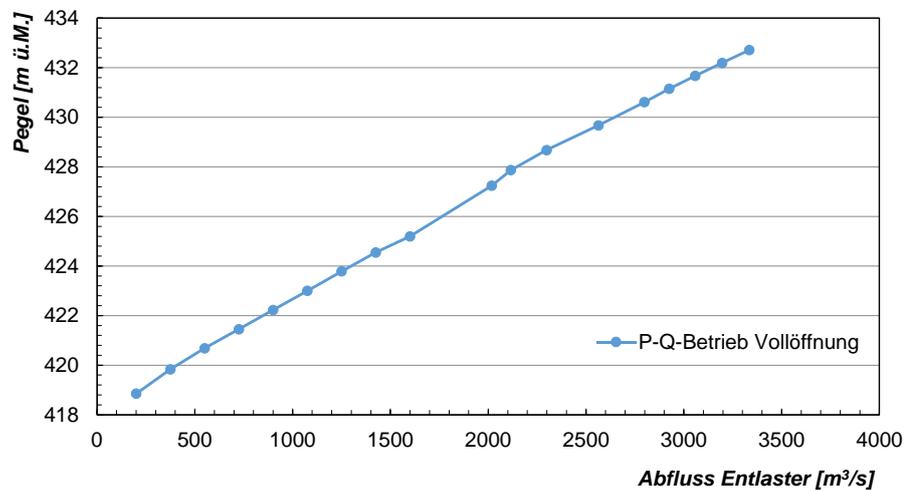


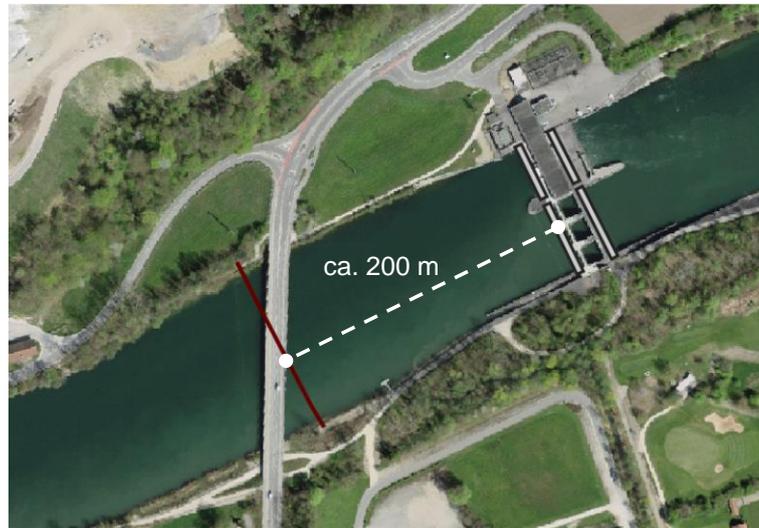
Abbildung 29: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Flumenthal mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Im Regelbetrieb kann das Kraftwerk eine Nutzwassermenge von 395 m³/s turbinieren. Im Hochwasserfall ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fliesst kein Wasser durch das Kraftwerk. Im hydraulischen Modell wurde für das Kraftwerk keine Randbedingung vorgesehen.

7.3.2 Abgrenzung Nahbereich

Der Nahbereich der Stauanlage wurde als der Bereich bis rund 200 m oberhalb des Stauwehrs angenommen (Abbildung 30). Die Abgrenzung wurde so gewählt, da es rechtsseitig oberhalb dieses Bereichs der Stauanlage zu Umströmungen kommt.



- Abgrenzungsquerschnitt
 - ▬ Randbedingungen Stauwehre / Kraftwerke
- Hintergrund: SwisssImage ©swisstopo

Abbildung 30: Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage Flumenthal.

7.3.3 Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage

Die Aare kann bis zu einem Abfluss von ca. 1'300 m³/s das Wasser vollständig im Gerinne bis zum Nahbereich der Stauanlage führen (vgl. Abbildung 31). Bei höheren Abflüssen, d.h. zwischen 1'300 und 1'370 m³/s kommt es rechtsseitig, ausserhalb des Nahbereiches, zu seitlichen Ausuferungen, welche an der Stauanlage Flumenthal vorbeifliessen. Die Ausuferungen nehmen insbesondere ab einen HQ₁₀₀₀ stark zu, wodurch der Netto-Abfluss stärker vom Brutto-Abfluss abweicht.

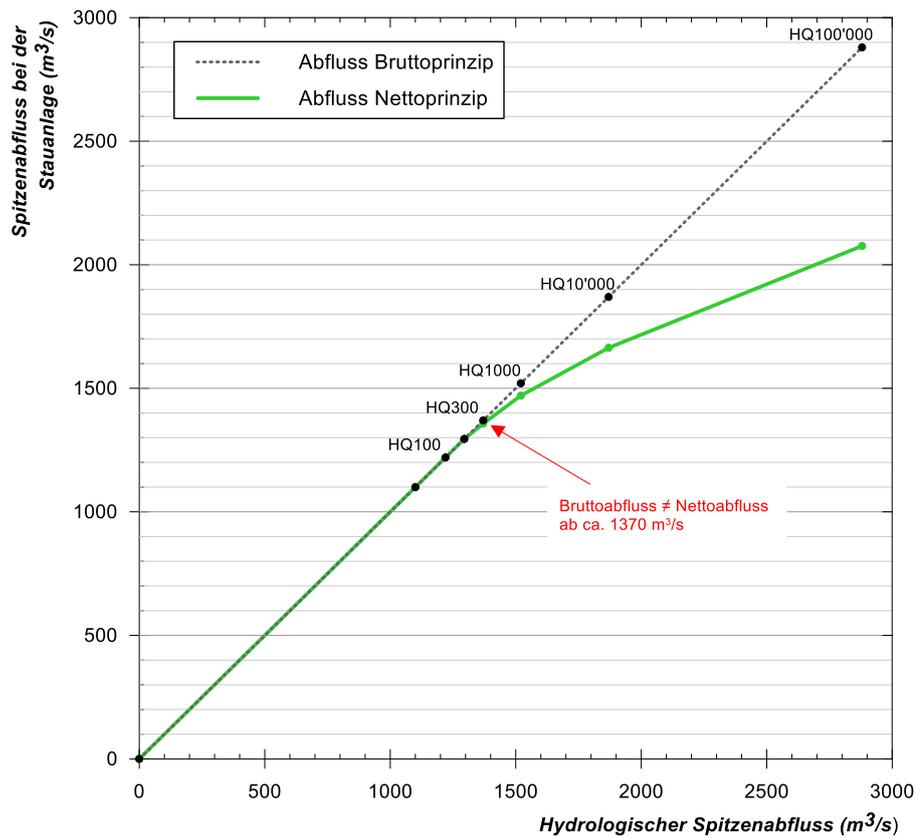


Abbildung 31: Darstellung des Netto-Abflusses für die Stauanlage Flumenthal in Abhängigkeit des Brutto-Abflusses (grüne Linie). Der Netto-Abfluss entspricht ab ca. 1'370 m³/s nicht mehr dem Brutto-Abfluss. Die dargestellten Punkte sind die berechneten, stationären Abflüsse, dazwischen wurde linear interpoliert.

7.3.4 Überflutungsflächen

Bei einem HQ₁₀₀ kann das Wasser praktisch vollständig im Gerinne der Emme und der Aare abgeleitet werden. Im Bereich der Emme-Mündung werden die rechtsseitigen Vorländer kontrolliert geflutet. Etwas oberhalb des Kraftwerks Flumenthal kommt es zu kleineren Ausuferungen, die jedoch die Anlage nicht umströmen.

Ab einem HQ₃₀₀ tritt unmittelbar unterhalb der Emme-Mündung das Wasser rechtsseitig über die Ufer und führt zu kleineren Überschwemmungen im Industriegebiet. Zudem kommt es oberhalb des Kraftwerks Flumenthal zu Austritten, welche die Anlage rechtsseitig umströmen. Die Austritte entstehen dabei ober- und unterhalb der Jurastrassen-Brücke.

Bis zu einem HQ_{1'000} sind die Abflussmengen im rechtsseitig umströmten Bereich gering (< 100 m³/s). Erst ab einem HQ_{1'000} nehmen die Abflüsse stark zu; die Umströmung beträgt bei diesem Ereignis bereits über 200 m³/s.

Neben den dargestellten Überflutungsflächen gibt es bei grossen Hochwasserereignissen an der Emme (> ca. 750 m³/s, während mehreren Stunden) einen Austritt in Kirchberg, welcher ausserhalb des Gerinnes bis nach Deitingen und von dort aus in die Aare fliesst.

Das Wasser tritt dabei in Kirchberg rechtsseitig aus und fliesst anschliessend östlich der Autobahn A1 entlang, an Kriegstetten und Deitingen vorbei und von dort aus zurück in die Aare. Wenn die Hochwasserspitze kürzer ist, kommt es im beschriebenen Gebiet lediglich zu einer stehenden Retention.

Insgesamt ist die Austrittsmenge in Kirchberg gering und beeinflusst die Brutto-zu-Netto Umformung nicht.

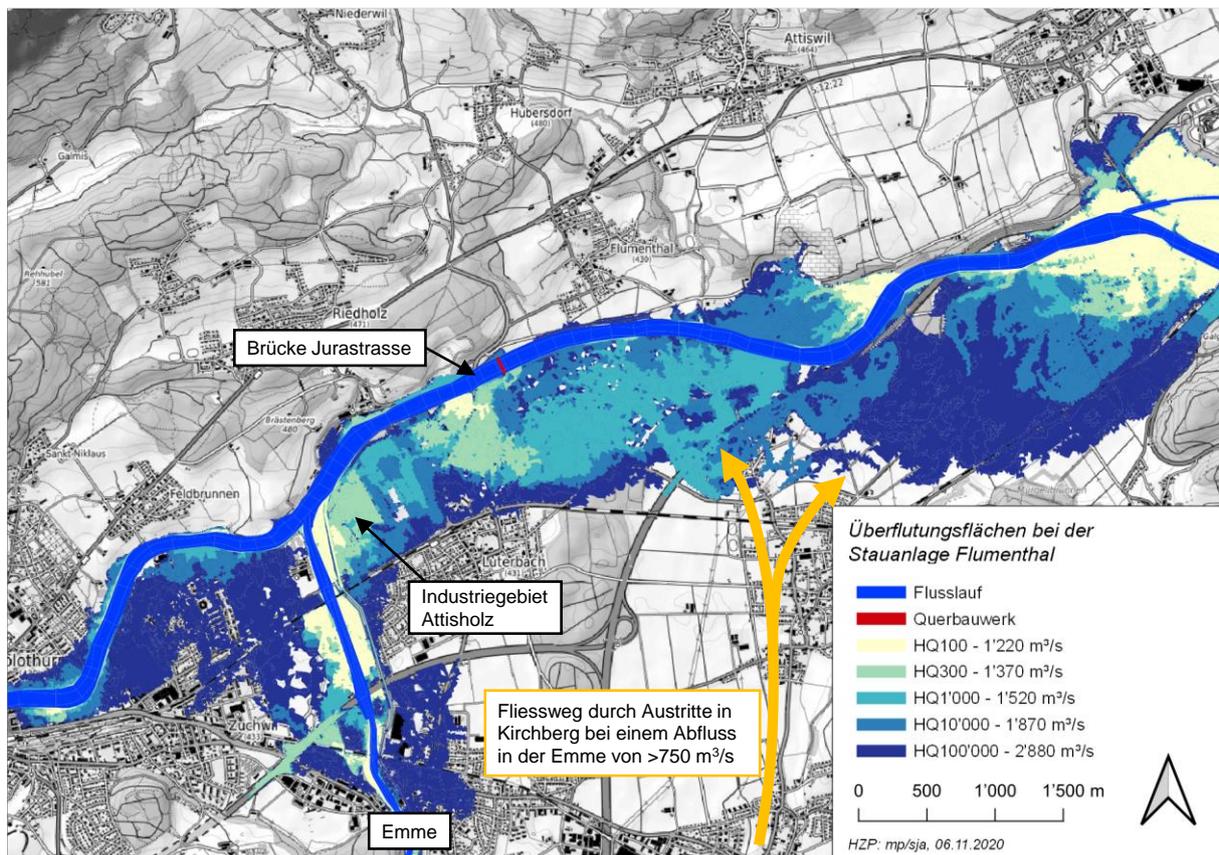


Abbildung 32: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Flumenthal bei verschiedenen Wiederkehrperioden auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche bei einem HQ₁₀₀ ist für sämtliche, höheren Abflüsse ebenfalls nass.

7.3.5 Spezifischer Abfluss

Der spezifische Abfluss bei einem HQ_{300} gemäss EXAR-Hochwasserstatistik dient dazu, die Fliesswege zu identifizieren.

Die rechtsseitigen Austritte im Bereich des Kraftwerks Flumenthal konzentrieren sich dabei auf drei Abschnitte (vgl. Abbildung 33):

- Zwischen der ehemaligen Kläranlage und den Gebäude der AEK Energie AG auf einer Länge von ca. 75 m
- Zwischen den Gebäuden der AEK Energie AG und der Brücke Jurastrasse auf einer Länge von ca. 100 m
- Unterhalb der Brücke Jurastrasse auf einer Länge von ca. 70 m

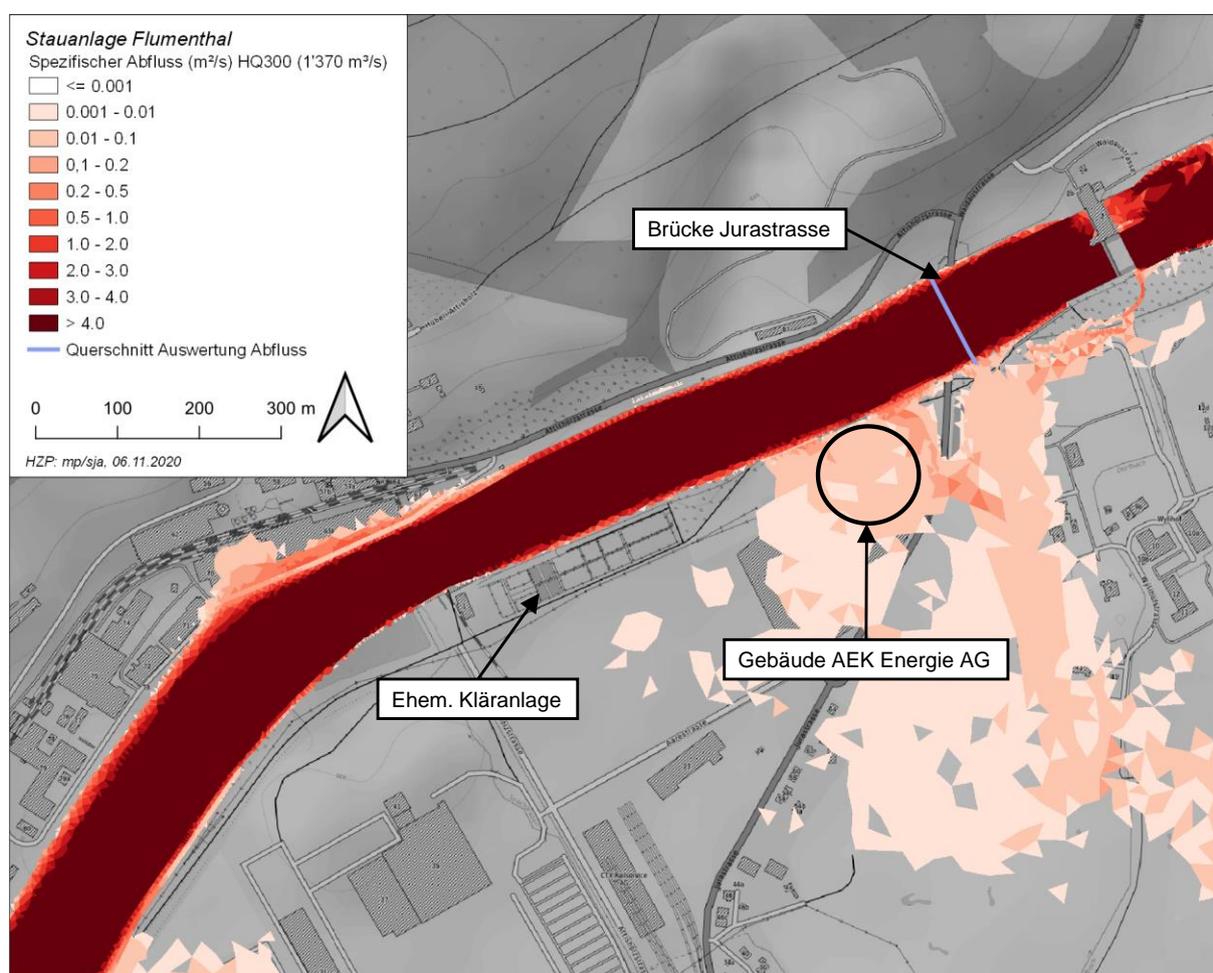


Abbildung 33: Darstellung des spezifischen Abflusses im Bereich der Stauanlage Flumenthal bei einem HQ_{300} auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik.

7.4 Stauanlage Rapperswil-Auenstein

7.4.1 Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Rapperswil-Auenstein liegt an der Aare bei GEWISS km 31.91. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 359.60 m ü.M. Die Kronenlänge des Stauwehrs beträgt insgesamt rund 77 m. Das Stauwehr besteht aus 3 Wehrfeldern mit einer lichten Weite von je rund 21 m.

*PQ-Beziehung
Stauwehr*

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 34) wurde für die Vollöffnung der Wehrgänge anhand der Geometrie der Wehrschwelle mit einer Überfallformel und unter Berücksichtigung des Unterwasserspiegels ermittelt. Zudem wurde die PQ-Beziehung bis zu einem maximalen Abfluss von rund 4'130 m³/s extrapoliert (weitere Informationen dazu in [6] und [9], wobei die PQ-Beziehung für die vorliegende Untersuchung aktualisiert wurde).

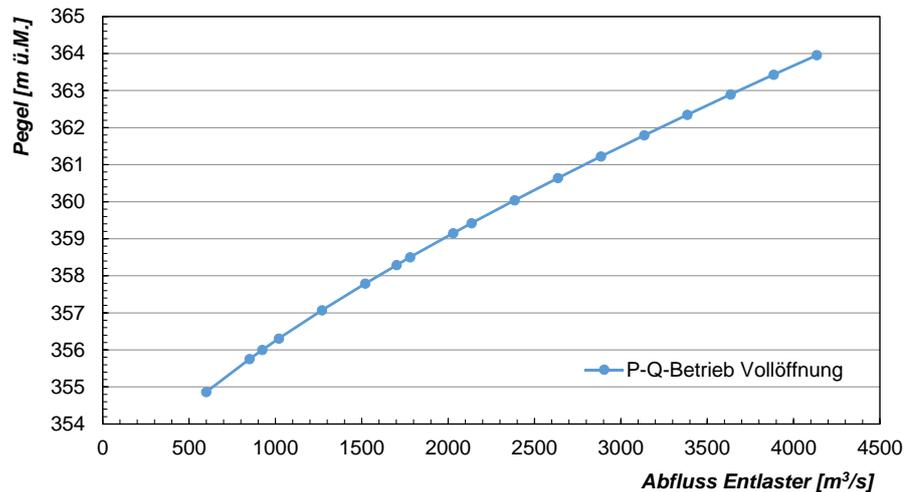


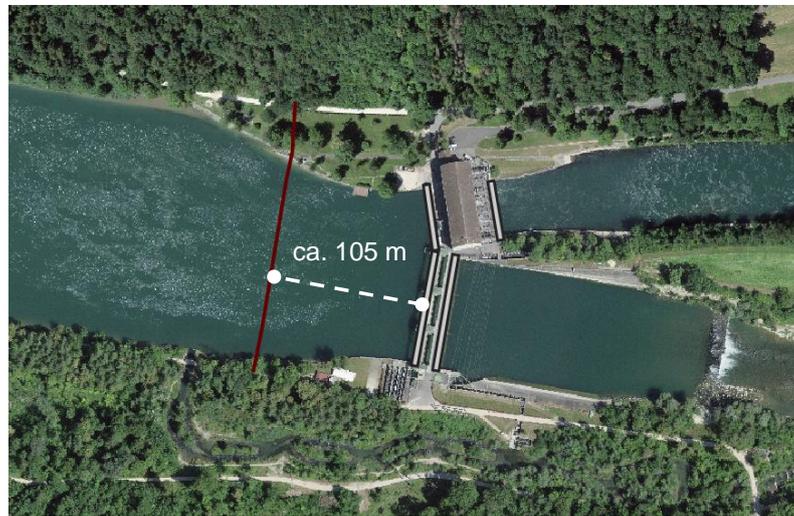
Abbildung 34: *Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Rapperswil-Auenstein mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9], wurde für die vorliegende Untersuchung aktualisiert).*

Kraftwerksbetrieb

Im Regelbetrieb kann das Kraftwerk eine Nutzwassermenge von 490 m³/s turbinieren. Im Hochwasserfall ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fließt kein Wasser durch das Kraftwerk. Im hydraulischen Modell wurde für das Kraftwerk keine Randbedingung vorgesehen.

7.4.2 Abgrenzung Nahbereich

Der Nahbereich der Stauanlage wurde als der Bereich bis rund 105 m oberhalb des Stauwehrs (vgl. Abbildung 35) angenommen.



— Abgrenzungsquerschnitt

▬ Randbedingungen Stauwehre / Kraftwerke

Hintergrund: SwissImage ©swisstopo

Abbildung 35: Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage Rapperswil-Auenstein

7.4.3 Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage

Die Aare kann bis zu einem Abfluss von ca. 2'100 m³/s das Wasser vollständig im Gerinne bis zur Stauanlage Rapperswil-Auenstein führen (vgl. Abbildung 36). Bei höheren Abflüssen, d.h. zwischen 2'100 und 2'250 m³/s, kommt es im Bereich zwischen 2.4 und 3.5 km oberhalb der Stauanlage zu rechtsseitigen Austritten im Rohrer Schachen, welche die Stauanlage umfliessen.

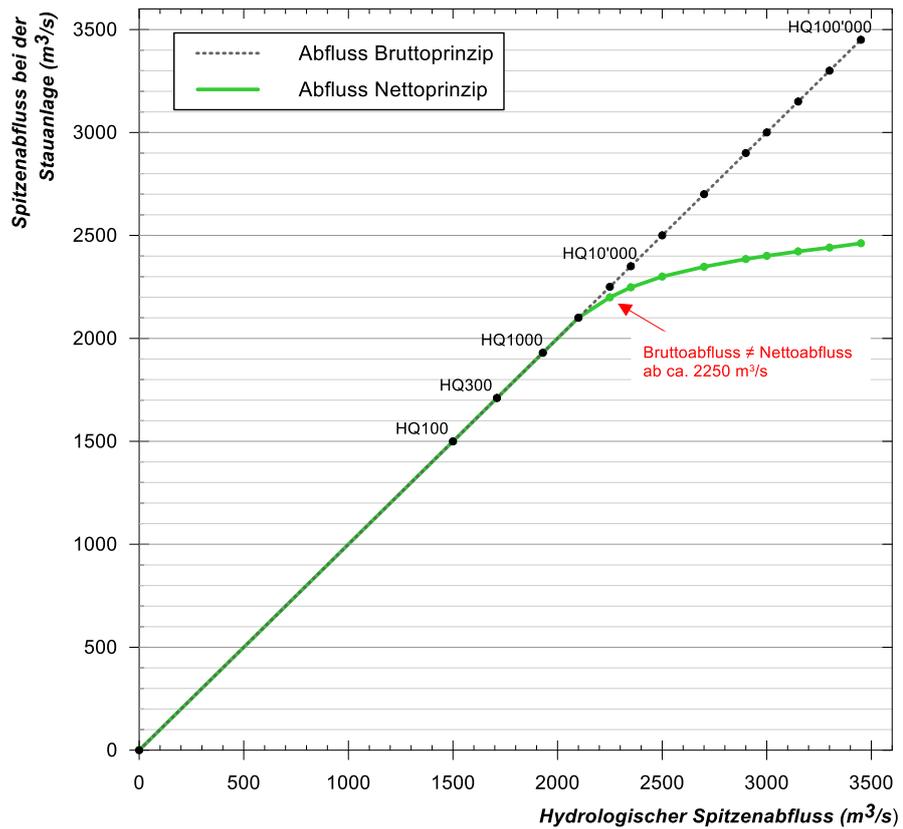


Abbildung 36: Darstellung des Netto-Abflusses für die Stauanlage Rapperswil-Auenstein in Abhängigkeit des Brutto-Abflusses (grüne Linie). Der Netto-Abfluss entspricht ab ca. 2'250 m³/s nicht mehr dem Brutto-Abfluss. Die dargestellten Punkte sind die berechneten, stationären Abflüsse, dazwischen wurde linear interpoliert.

7.4.4 Überflutungsflächen

Die Überflutungsflächen für verschiedene Wiederkehrperioden gemäss EXAR-Hochwasserstatistik (vgl. Abbildung 37) zeigen, dass Austritte erst zwischen einem HQ_{1'000} und einem HQ_{10'000} entstehen. Die grossflächige Ausuferung im Rohrer Schachen führt an der Stauanlage Rapperswil-Auenstein vorbei und fliesst unterhalb der Anlage erst bei der Gemeinde Wildegg zurück in die Aare (ca. 3 km unterhalb der Stauanlage).

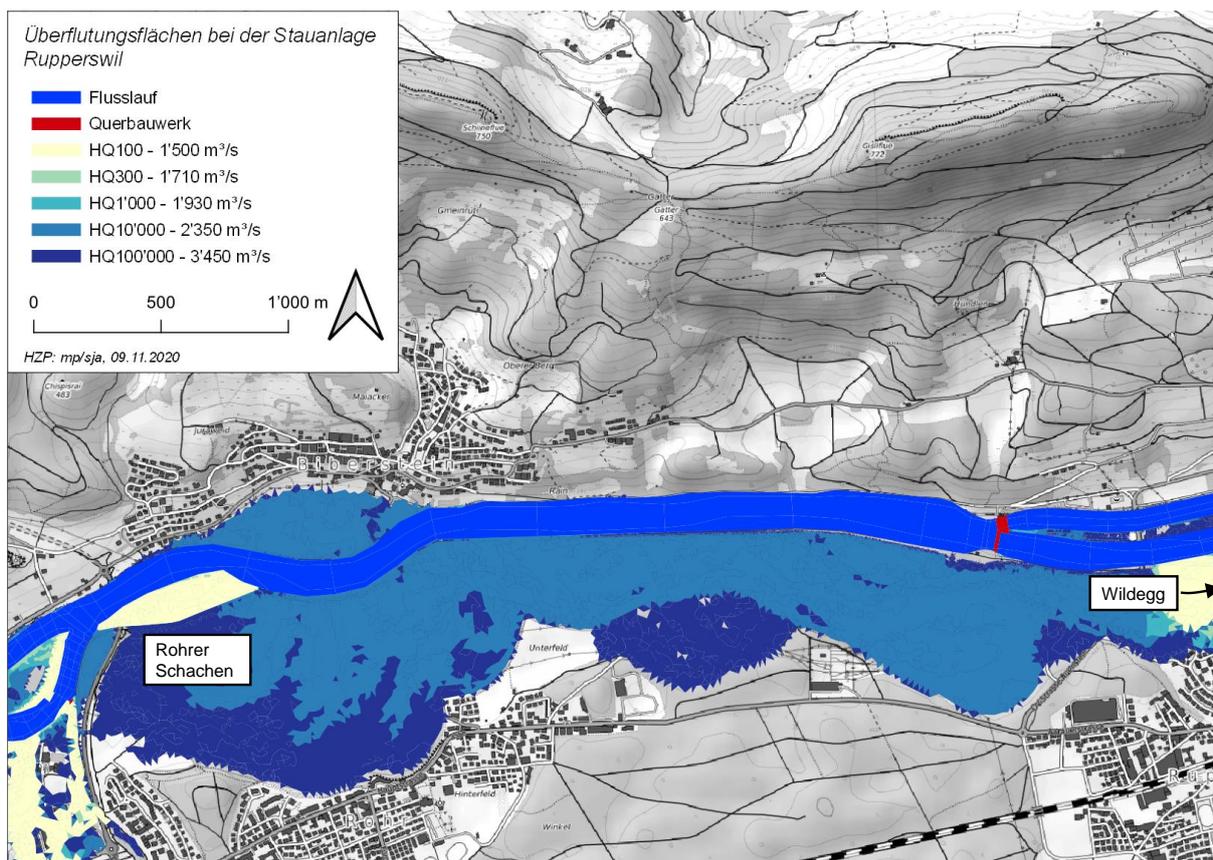


Abbildung 37: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Rapperswil-Auenstein bei verschiedenen Wiederkehrperioden auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche bei einem HQ_{100} ist für sämtliche, höheren Abflüsse ebenfalls nass.

7.4.5 Spezifischer Abfluss

Der spezifische Abfluss bei einem HQ_{300} gemäss EXAR-Hochwasserstatistik dient dazu, die Fliesswege zu identifizieren.

Für die Stauanlage Rapperswil-Auenstein ist die Gerinnkapazität oberhalb der Stauanlage bei einem HQ_{300} genügend und es wurden keine Ausuferungen berechnet (vgl. Abbildung 38).

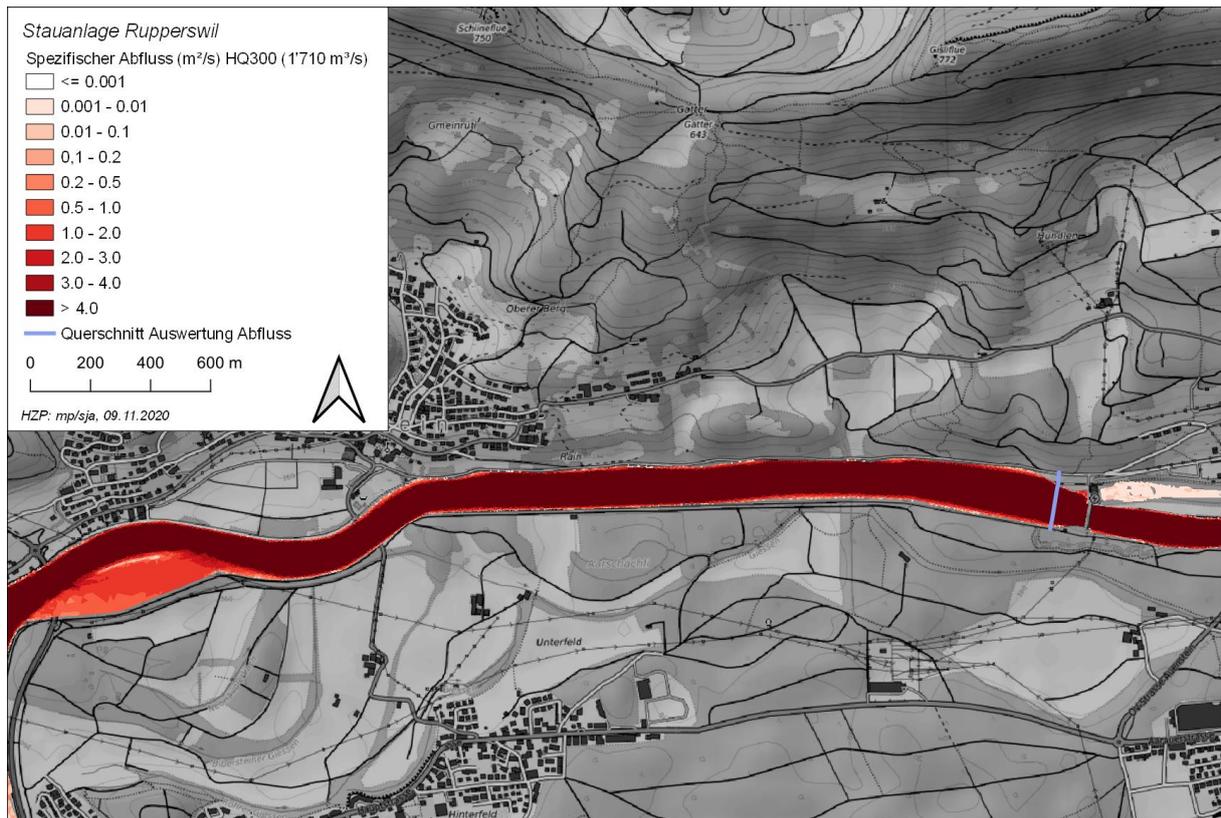


Abbildung 38: Darstellung des spezifischen Abflusses im Bereich der Stauanlage Niederried bei einem HQ₃₀₀ auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik.

7.5 Stauanlage Klingnau

7.5.1 Anlagenkennwerte

Die Stauanlage Klingnau liegt an der Aare bei GEWISS km 1.56. Die Anlage staut das Wasser im Regelbetrieb auf das Stauziel von 318.40 m ü.M. auf. Die Kronenlänge des Stauwehrs beträgt insgesamt rund 134 m. Das Stauwehr besteht aus vier Segmenten mit einer lichten Weite von je rund 29.6 m.

Entlang des Klingnauer Stausees gibt es rechts- und linksseitig Dämme, die teilweise mit Mauern verstärkt und erhöht wurden (beispielsweise in Döttingen entlang des Dammwegs bei der Brücke Aarestrasse).

PQ-Beziehung
Stauwehr

Die PQ-Beziehung für das Wehr (vgl. Abbildung 39) wurde gemäss Wehrreglement anhand der Wehrgeometrie mit einer Überfallformel ermittelt und wurde bis zu einem maximalen Abfluss von 8'500 m³/s extrapoliert (weitere Informationen dazu in [6] und [9]).

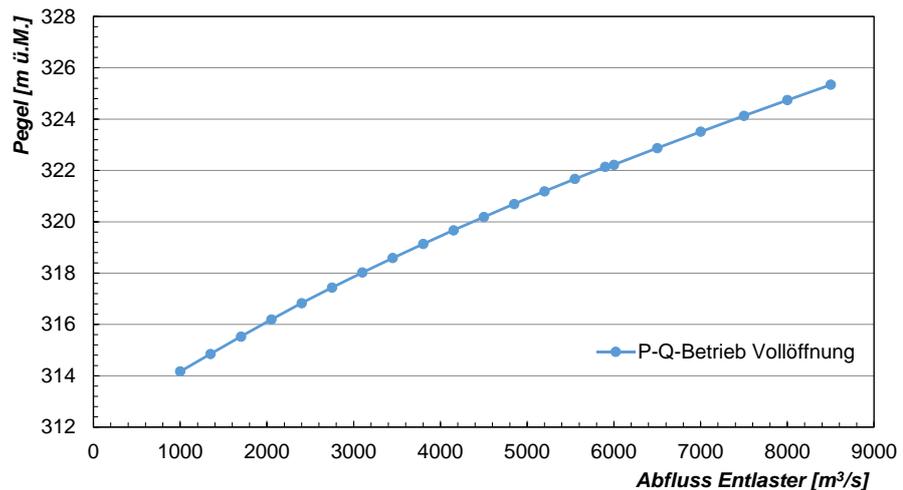


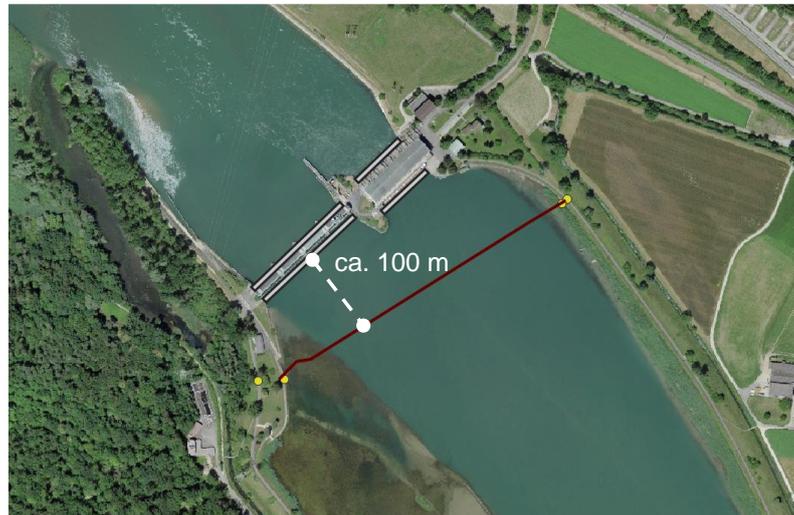
Abbildung 39: Pegel-Abfluss-Beziehung für das Stauwehr Klingnau mit Vollöffnung (n=0) (Quelle: [9]).

Kraftwerksbetrieb

Im Regelbetrieb kann das Kraftwerk eine Nutzwassermenge von 810 m³/s turbinieren. Im Hochwasserfall ist das Kraftwerk ausgeschaltet und es fliesst kein Wasser durch das Kraftwerk. Im hydraulischen Modell wurde für das Kraftwerk keine Randbedingung vorgesehen.

7.5.2 Abgrenzung Nahbereich

Die Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage wurde gemäss den Angaben des BFE umgesetzt. Als Nahbereich der Stauanlage wurde der Bereich bis rund 100 m oberhalb der Wehranlage (Abbildung 40) angenommen.



- Abgrenzungsquerschnitt
 - ▬ Randbedingungen Stauwehre / Kraftwerke
 - Abgrenzungskordinaten gemäss BFE
- Hintergrund: SwissImage ©swisstopo

Abbildung 40: Abgrenzung des Nahbereichs der Stauanlage Klingnau gemäss Angaben des BFE.

7.5.3 Gerinnekapazität und Netto-Abfluss bei der Stauanlage

Die Aare kann bis zu einem Abfluss von ca. 3'550 m³/s das Wasser vollständig im Gerinne bis zum Nahbereich der Stauanlage führen (vgl. Abbildung 41). Bei höheren Abflüssen, d.h. zwischen 3'550 und 3'760 m³/s, kommt es rechtsseitig im Bereich von Döttingen zu Austritten durch Überströmungen der Stauhaltungsdämme.

Bei Abflüssen um die 4'200 m³/s kommt es zwischen Gippingen und Burlen zu linksseitigen Austritten, welche ebenfalls die Stauanlage umfliessen. Austritte weiter oberhalb, im Bereich von Kleindöttingen, fliessen bis und mit einem HQ_{10'000} wieder in die Aare oberhalb von Burlen zurück. Bei einem HQ_{100'000} fliessen aber auch diese Überflutungen linksseitig parallel zum Stausee und gelangen erst unterhalb der Stauanlage Klingnau wieder in die Aare.

Die rechts- und linksseitigen Umströmungen führen zu zwei unterschiedlichen Steigungen der Abweichung zwischen dem Brutto- und dem Nettoabfluss. Bis zu einem Bruttoabfluss von rund 4'200 m³/s ist die Steigung etwas steiler, bei höheren Abflüssen wird die Steigung flacher, d.h. die Differenz zwischen dem Brutto- und dem Netto-Abfluss wird grösser.

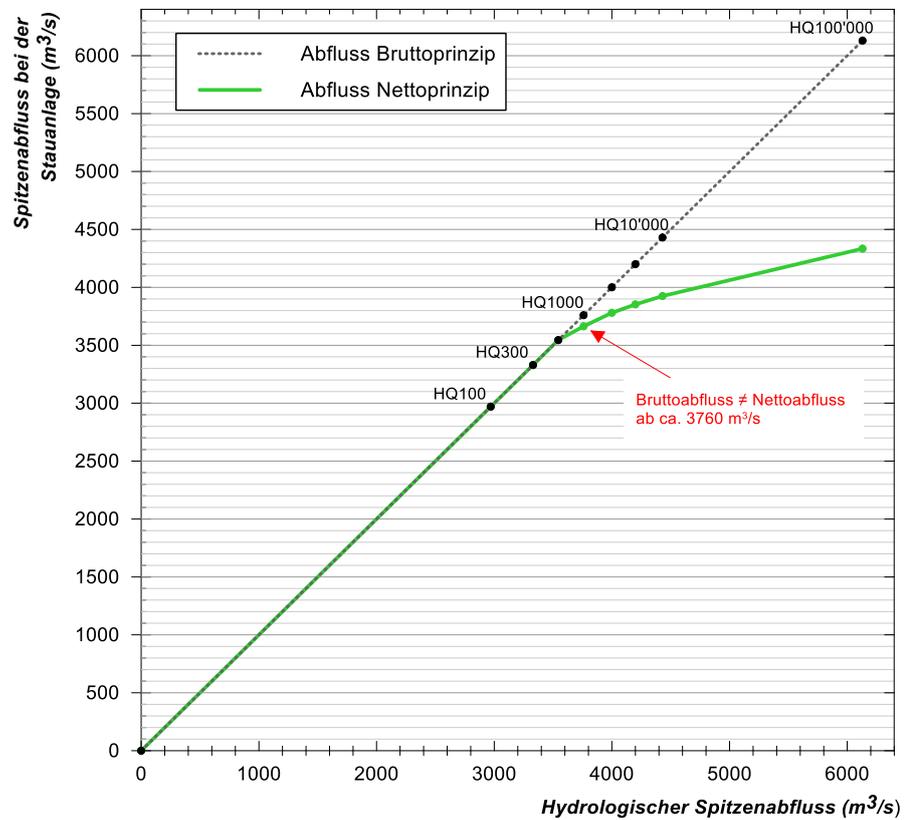


Abbildung 41: Darstellung des Netto-Abflusses für die Stauanlage Klingnau in Abhängigkeit des Brutto-Abflusses (grüne Linie). Der Netto-Abfluss entspricht ab ca. 3'670 m³/s nicht mehr dem Brutto-Abfluss. Die dargestellten Punkte sind die berechneten, stationären Abflüsse, dazwischen wurde linear interpoliert.

7.5.4 Überflutungsflächen

Bei einem HQ₁₀₀ werden lediglich die rechts- und linksseitigen Auengebiete unterhalb der Stauanlage Klingnau überflutet. Ab einem HQ₃₀₀ entstehen bei Kleindöttingen Fließwege ausserhalb des Gerinnes, die aber beim Klingnauer Stausee wieder ins Gerinne zurückfliessen. Bei einem HQ_{1'000} treten rechtsseitig bei Döttingen grössere Umströmungen auf, welche parallel entlang des Klingnauer Stausees bis zum unterhalb der Stauanlage liegenden Koblenz fließen. Bei höheren Abflüssen kommt es auch linksseitig zu Austritten, welche bei einem HQ_{10'000} in geringem Masse die Stauanlage Klingnau linksseitig umströmen. Bei einem HQ_{100'000} ist die linksseitige Umströmung deutlich ausgeprägter.

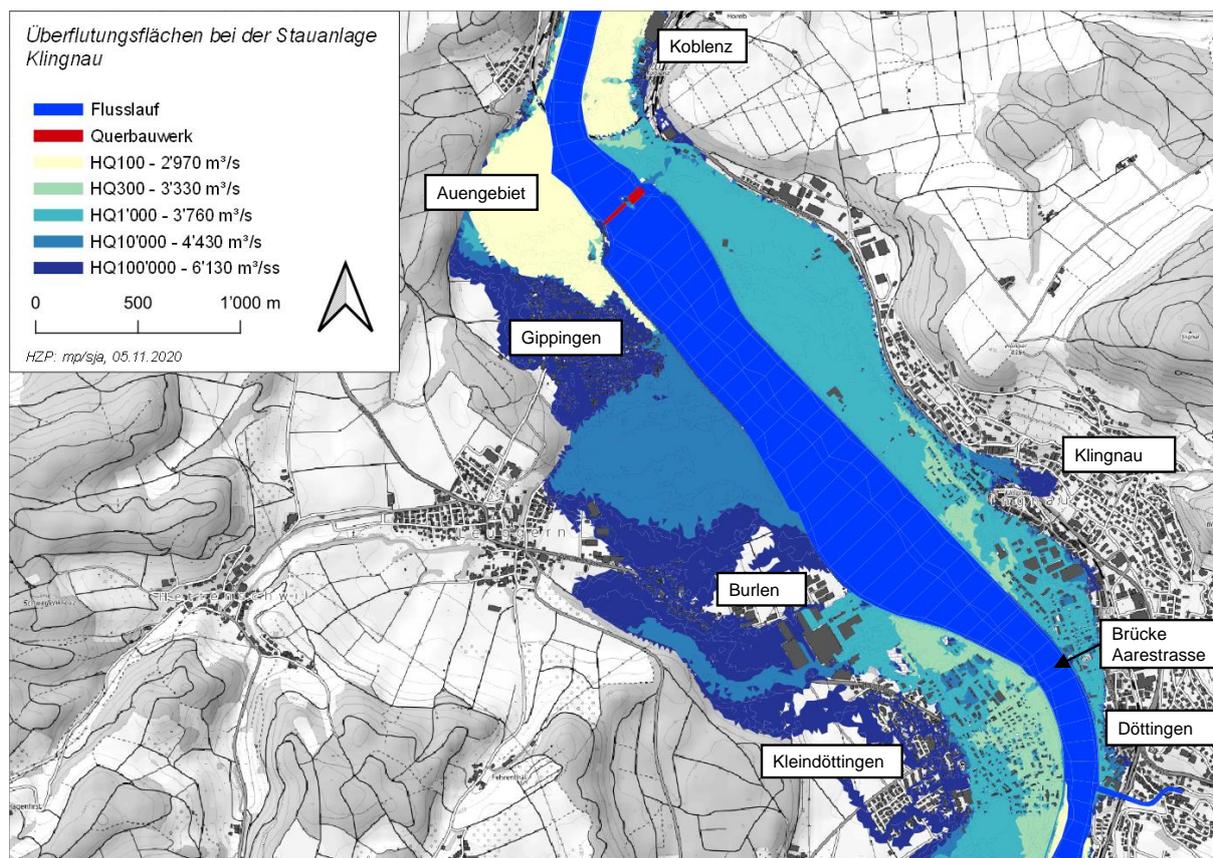


Abbildung 42: Überflutungsflächen im Bereich der Stauanlage Klingnau bei verschiedenen Wiederkehrperioden auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik. Die Überflutungsflächen sind überlagert dargestellt, d.h. die benetzte Fläche bei einem HQ₁₀₀ ist für sämtliche, höheren Abflüsse ebenfalls nass.

7.5.5 Spezifischer Abfluss

Der spezifische Abfluss bei einem HQ₃₀₀ gemäss EXAR-Hochwasserstatistik dient dazu, die Fliesswege zu identifizieren.

Im Bereich der Stauhaltungsdämme des Kraftwerks Klingnau befinden sich zwei Abschnitte mit Austritten (vgl. Abbildung 43):

- Linksseitiger Austritt oberhalb von Kleindöttingen auf einer Länge von rund 300 m
- Rechtsseitiger, sehr lokaler Austritt bei Klingnau im Gebiet der Schützenmattstrasse. In diesem Bereich gibt es einen Zugang zum Stausee.

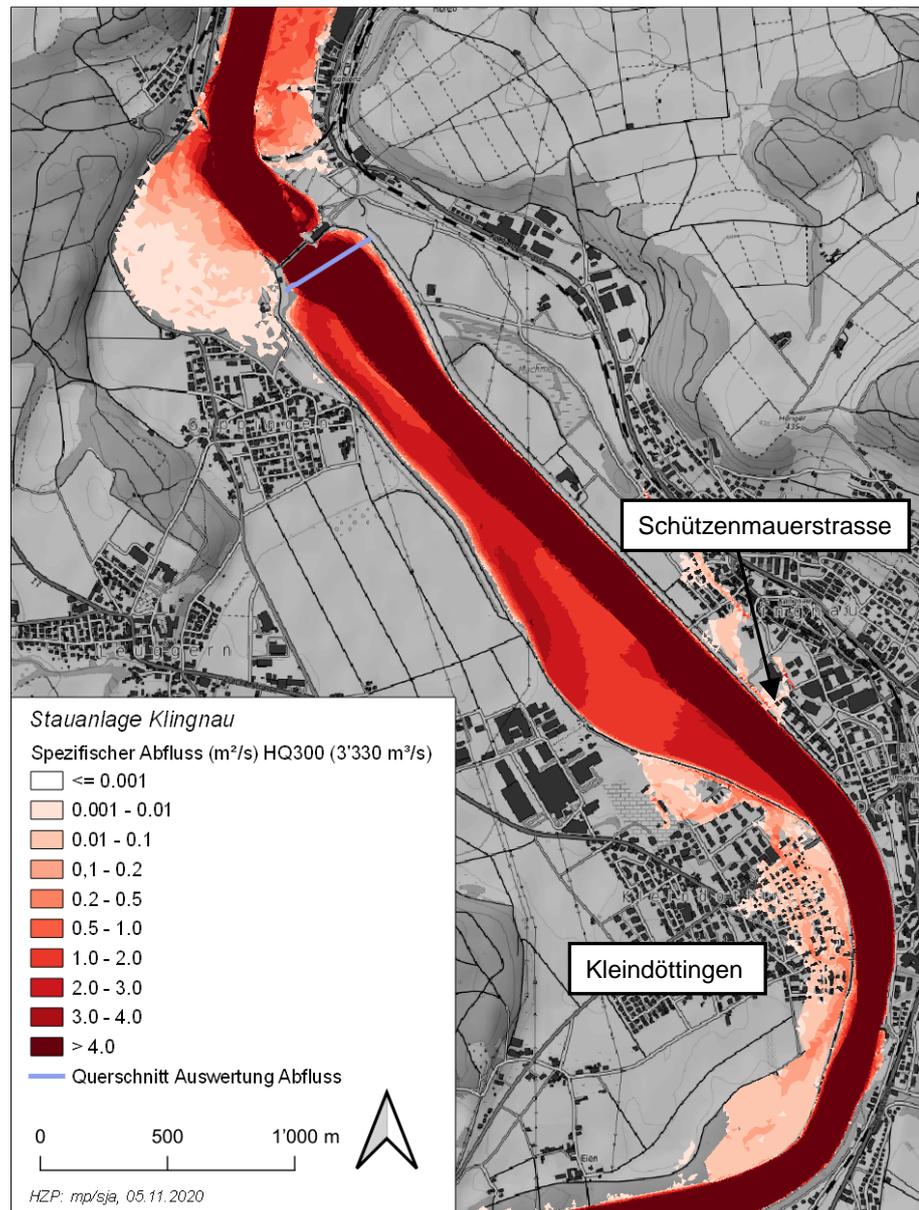


Abbildung 43: Darstellung des spezifischen Abflusses im Bereich der Stauanlage Klingnau bei einem HQ₃₀₀ auf Basis der EXAR-Hochwasserstatistik.

8 Zusammenfassung

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen können die insgesamt 13 untersuchten Stauanlagen in drei Kategorien eingeteilt werden:

- A) 2 Stauanlagen, bei denen der hydrologisch ermittelte Brutto-Abfluss den Nahbereich der Stauanlage erreicht (Brutto-Abfluss entspricht dem Netto-Abfluss) und bei denen im Nahbereich der Stauanlage keine Umströmungen auftreten: Bremgarten-Zufikon und Wettingen
- B) 6 Stauanlagen, bei denen der hydrologisch ermittelte Brutto-Abfluss den Nahbereich der Stauanlage erreicht (Brutto-Abfluss entspricht dem Netto-Abfluss) und bei denen Ausuferungen nur im Nahbereich der Stauanlagen zu erwarten sind: Bannwil, Wynau, Ruppoldingen, Winznau, Wildegg-Brugg und Beznau
- C) 5 Stauanlagen, bei denen der Netto-Abfluss vom Brutto-Abfluss abweicht. Bei diesen Stauanlagen treten Ausuferungen ausserhalb des Nahbereichs auf, welche die Stauanlage umströmen. Zudem sind bei diesen Anlagen – meist bei höheren Abflüssen - auch Ausuferungen im Nahbereich zu erwarten. Es handelt sich dabei um die folgenden Stauanlagen: Niederried, Aarberg, Flumenthal, Rupperswil-Auenstein und Klingnau

Für die Stauanlagen der Kategorie C) gibt es unterschiedliche Grössenordnungen, ab wann der Netto-Abfluss durch Ausuferungen im Oberlauf nicht mehr dem Brutto-Abfluss entspricht (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Klassifizierung des Bereichs, bei welchem für die Stauanlagen der Kategorie C) der Netto-Abfluss nicht mehr dem Brutto-Abfluss entspricht (ausgedrückt als Wiederkehrperioden aus der EXAR-Hochwasserstatistik).

Wiederkehrperiode aus der EXAR-Hochwasserstatistik	Betroffene Stauanlage
HQ ₁₀₀ – HQ ₃₀₀	Niederried, Aarberg, Flumenthal
HQ ₃₀₀ – HQ _{1'000}	Klingnau
HQ _{1'000} – HQ _{10'000}	Rupperswil-Auenstein

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass bei denjenigen Stauanlagen, bei welchen eine Brutto-zu-Netto-Umformung auftritt (Kategorie C), deutliche Abweichungen zwischen dem Brutto- und Nettoabfluss auftreten. Am ausgeprägtesten sind die Abweichungen bei den Stauanlagen Niederried, Aarberg und Rupperswil. Bei den Stauanlagen Klingnau und Flumenthal sind die Abweichungen etwas weniger stark aber immer noch signifikant.

Aarau, 21. Dezember 2020

Hunziker, Zarn & Partner AG
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

Matthias Pfäffli, MSc. ETH Umweltingenieur
Sebastian Jaberg, MSc. Geographie
Dr. Roni Hunziker, dipl. Bau-Ing. ETH