



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Aufsicht Talsperren

**Schlussbericht vom 29.11.2021**

---

# Hochwasserereignisse aus kontinuierlicher Langzeitsimulation zur Überprüfung der Sicherheit der Stauanlagen

---



**Universität  
Zürich** <sup>UZH</sup>

**Datum:** 29.11.2021

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Aufsicht Talsperren  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Beauftragte:**

Geographisches Institut, Universität Zürich  
Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich  
<https://www.geo.uzh.ch/de/units/h2k.html>

**Autoren:**

Maria Staudinger  
Reinhard Furrer  
Daniel Viviroli

**BFE-Projektbegleitung:**

Dr. Markus Schwager

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501960-01

**Versionen:**

Version 1: 17.03.2021

Version 2: 29.11.2021 Korrektur farbliche Hervorhebung in Tabelle 4: angewendeter  
Jährlichkeitsbereich HQ1000 entspricht den Wiederkehrperioden 1000 bis 2000 Jahre (nicht 1000 bis  
3000 Jahre, wie in Version 1 angegeben)

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

## Zusammenfassung

Die in diesem Projekt entwickelte Methodik erlaubt es, auf der Basis von kontinuierlichen Langzeitsimulationen verschiedene Abflussverläufe von Hochwassern mit gegebenen Wiederkehrperioden durch realistische Ganglinien wiederzugeben. Der vorliegende Bericht beschreibt zum einen die Entwicklung dieser Methodik und zum anderen erste Auswertungen der Resultate aus dem Projekt „Extremhochwasser an der Aare“ (EXAR) für 19 Stauanlagen unter Bundesaufsicht im Einzugsgebiet der Aare.

Der Vorteil der entwickelten Methodik ist, dass sich realitätsnahe repräsentative Ganglinien für eine Sicherheitsabschätzung zu definierten Jährlichkeitsbereichen ergeben. Dies kann zu realistischeren Abschätzungen führen als die sonst häufig verwendeten synthetischen Ganglinien, welche typischerweise nur durch einen oder zwei Parameter definiert werden.

In einem ersten Schritt wurden aus den vorliegenden EXAR-Daten bivariate Jährlichkeiten bezüglich Abflussspitze und Hochwasservolumen berechnet und die entsprechenden Hochwasserganglinien bestimmten Jährlichkeitsbereichen (z. B. HQ100, HQ1'000, HQ5'000) zugeordnet. Innerhalb jedes Jährlichkeitsbereiches wurden dann die Ganglinien über funktionelles Clustering gruppiert. Dieses Clustering basiert auf einer Beschreibung der Ganglinien durch Funktionen, was bedeutet, dass die Ganglinien nicht nur nach bestimmten Charakteristika wie Abflussspitze oder Hochwasservolumen gruppiert werden, sondern die gesamte Form der Ganglinien in den Clustering-Prozess miteinbezogen wird.

Aus jedem Cluster wurde anschliessend ein funktioneller Boxplot konstruiert, welcher wiederum die Form der Ganglinien im Cluster statistisch aggregiert darstellt. Die sich daraus ergebenden repräsentativen Ganglinien sollen den jeweils gewählten Jährlichkeitsbereich gut abdecken. Die Mittellinie des funktionellen Boxplots (was in etwa einem Median eines klassischen Boxplots entspricht) dient dann als repräsentative Ganglinie und entspricht einer tatsächlichen Ganglinie des Ausgangsdatensatzes.

Um die Methode hinsichtlich ihrer Eignung als Grundlage für die Beurteilung der Hochwassersicherheit von Stauanlagen zu evaluieren, wurden zwei unterschiedliche Fälle betrachtet: 1) Stauanlagen mit beweglichen Organen zur Hochwasserentlastung und 2) Stauanlagen mit einem freien Überfall ohne zusätzliche bewegliche Organe zur Hochwasserentlastung. Für beide Fälle wurde jeweils der maximale Pegelanstieg im Stauraum berechnet und mit dem Volumen und der Abflussspitze der eingehenden Ereignisganglinien verglichen.

In der Evaluation zeigte sich, dass die Mittellinie der funktionellen Ganglinien nicht immer am besten für eine Beurteilung der Hochwassersicherheit der Stauanlage geeignet ist. Deshalb wurden aus den funktionellen Boxplots jeweils weitere Ganglinien extrahiert. Zum einen waren dies repräsentative Ganglinien für Ereignisse mit sehr grossem Volumen innerhalb des Clusters, zum anderen repräsentative Ganglinien für Ereignisse mit grosser Abflussspitze innerhalb des Clusters. Diese zusätzlich ausgewählten Ganglinien decken den Bereich ungünstiger Pegelanstiege für die untersuchten Stauanlagen gut ab.

Zusätzlich wurde die Methode univariat auf Anlagen angewendet, welche als Wehre betrachtet werden können. Der Fokus lag dabei auf der Abflussspitze. Für alle Anlagen ergaben sich mit der univariaten Methode enge funktionelle Boxplots, bei welchen die Mittellinie repräsentativ für die Kurvenschar der Jährlichkeitsbereiche war.

Das 2020 angelaufene Projekt „Extremhochwasser Schweiz“ wird weiterentwickelte Langzeitsimulationen für grosse Einzugsgebiete ( $\geq 1'000 \text{ km}^2$ ) in der gesamten Schweiz bereitstellen und auch kleine (ca.  $10\text{--}1'000 \text{ km}^2$ ) Einzugsgebiete abdecken können. Mit der hier entwickelten Methode und ersten Tests für hypothetische Anlagen mit freiem Überfall wurde eine gute Grundlage geschaffen, mit welcher diese Simulationen ebenfalls im Hinblick auf die Stauanlagensicherheit ausgewertet werden können.

## Résumé

La méthodologie développée dans ce projet permet de reproduire différents cours d'écoulement de crues avec des périodes de retour données au moyen d'hydrogrammes réalistes sur la base de simulations continues à long terme. Le présent rapport décrit d'une part le développement de la méthodologie et d'autre part les premières évaluations des résultats du projet «Extremhochwasser an der Aare» (EXAR) pour 19 barrages sous surveillance fédérale dans le bassin versant de l'Aar.

L'avantage de la méthodologie développée est qu'elle arrive à des hydrogrammes réalistes et représentatifs pour un résultat d'évaluation de la sécurité pour des intervalles d'annualités définies. Cela peut conduire à des estimations plus réalistes que les hydrogrammes synthétiques fréquemment utilisés, qui ne sont généralement définis que par un ou deux paramètres.

Dans un premier temps, des annualités bivariées (débit de pointe et volume des crues) ont été calculées à partir des données EXAR existantes et les hydrogrammes résultants ont été assignés aux intervalles d'annualités prédéfinis (par exemple HQ100, HQ1'000, HQ5'000). Dans chaque intervalle d'annualité, les hydrogrammes ont ensuite été regroupés par clustering fonctionnel. Ce clustering est basé sur une description des hydrogrammes par fonction, ce qui signifie qu'ils ne sont pas seulement regroupés en fonction de certaines caractéristiques telles que le débit de pointe ou le volume de crue, mais que leur forme entière est incluse dans le processus de clustering.

Un boxplot fonctionnel a ensuite été construit à partir de chaque cluster, qui à son tour agrège statistiquement la forme des hydrogrammes du groupe. Les hydrogrammes représentatifs qui en résultent sont destinés à bien couvrir l'intervalle d'annualité choisie dans chaque cas. La ligne centrale du boxplot fonctionnel (qui correspond approximativement à la médiane d'un boxplot classique) sert alors d'hydrogramme représentatif et correspond à un hydrogramme réel de l'ensemble de données initial.

Afin d'évaluer la pertinence de la méthode en tant que base d'évaluation de la sécurité des barrages contre les crues, deux cas différents ont été examinés : 1) les barrages avec des organes de déversoir mobiles et 2) les barrages à déversoir libre c'est-à-dire sans organe de déversoir mobile supplémentaire. Pour chacun des deux cas, l'augmentation maximale du niveau du réservoir a été calculée et comparée aux volumes et aux débits de pointe des hydrogrammes des événements entrants.

L'évaluation a montré que la ligne centrale des hydrogrammes fonctionnels n'est pas toujours la meilleure pour évaluer la sécurité du barrage contre les crues. Par conséquent, des hydrogrammes supplémentaires ont été extraits des boxplots fonctionnels. Il s'agissait d'une part, d'hydrogrammes représentatifs d'événements ayant un volume très important dans le cluster, et d'autre part, d'hydrogrammes représentatifs d'événements ayant un débit de pointe important dans le cluster. Ces

hydrogrammes supplémentaires sélectionnés couvrent bien la gamme des niveaux d'eau défavorables pour les barrages étudiés.

En outre, la méthode univariée a été appliquée aux barrages qui peuvent être considérées comme des déversoirs. L'accent a été mis sur le débit de pointe. Pour toutes les installations, la méthode univariée a produit des boxplots fonctionnels serrés dans lesquels la ligne centrale était représentative de l'ensemble des courbes pour les intervalles d'annualité.

Le projet "Extremhochwasser Schweiz", qui a débuté en 2020, permettra de réaliser des simulations à long terme plus avancées pour les grands bassins versants ( $\geq 1'000 \text{ km}^2$ ) dans toute la Suisse et pourra également couvrir les petits bassins versants (environ 10–1'000  $\text{km}^2$ ). La méthode développée ici et les premiers tests pour des systèmes hypothétiques à débordement libre ont permis de créer une base solide pour évaluer ces simulations en ce qui concerne la sécurité des barrages.

# Inhalt

|  |    |
|--|----|
| Inhalt.....  | 4  |
| 1. Motivation.....   | 6  |
| 2. Datengrundlage.....   | 6  |
| 3. Betrachtete Stauanlagen .....   | 9  |
| 4. Methodenentwicklung .....   | 11 |
| 4.1. Überblick.....  | 11 |
| 4.2. Definition Hochwasserereignis.....  | 11 |
| 4.2.1. Univariate Ereignisbestimmung .....   | 13 |
| 4.2.2. Bivariate Ereignisbestimmung .....  | 13 |
| 4.2.3. Umgang mit Oszillationen.....   | 13 |
| 4.3. Berechnung der Jährlichkeiten .....   | 13 |
| 4.3.1. Univariate Jährlichkeit .....   | 13 |
| 4.3.2. Bivariate Jährlichkeit.....   | 14 |
| 4.4. Definition Jährlichkeitsbereiche.....   | 15 |
| 4.5. Funktionelle Beschreibung der Ganglinien mit B-Splines .....  | 15 |
| 4.6. Clustering innerhalb der Jährlichkeitsbereiche.....   | 16 |
| 4.6.1. Funktioneller Clusteralgorithmus.....   | 16 |
| 4.6.2. Optimale Anzahl Cluster .....   | 16 |
| 4.7. Funktionelle Boxplots .....   | 17 |
| 5. Methodenevaluation für die bivariate Auswertung.....  | 18 |
| 5.1. Funktionelles Clustering und funktionelle Boxplots .....  | 18 |
| 5.1.1. Zuflussganglinien zur Stauanlage Rossens .....  | 19 |
| 5.1.2. Zuflussganglinien zur Stauanlage Mühleberg.....   | 20 |
| 5.1.3. Zuflussganglinien zur Stauanlage Schiffenen.....  | 20 |
| 5.1.4. Fazit Methodenevaluation funktionelle Cluster und Boxplots .....  | 21 |
| 5.2. Evaluation der Methode hinsichtlich der Anwendung zur Beurteilung der Sicherheit von Stauanlagen .....            | 21 |
| 5.2.1. Fall 1: Stauanlage mit Klappen mit Verwendung eines anlagespezifischen Schwellenwerts .....                     | 22 |
| 5.2.2. Fall 2: Stauanlage mit freiem Überfall mit Verwendung eines Schwellenwertes aus Hochwasserstatistik (HQ10)..... | 25 |
| 5.2.3. Fazit Evaluation der Methode hinsichtlich der Anwendung zur Beurteilung der Sicherheit von Stauanlagen .....    | 27 |
| 6. Anwendung der univariaten Methode für Wehre und einzelne Talsperren.....  | 27 |
| 6.1. Anwendung und Resultate .....   | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2. Fazit.....   | 32 |
| 7. Beurteilung der Unterschiede zwischen den Simulationen der Versionen 2018 und 2019.....  | 32 |
| 8. Fazit.....   | 37 |
| 9. Daten .....  | 37 |
| 10. Ausblick.....   | 38 |
| Referenzen .....  | 39 |
| 11. Appendix .....  | 41 |
| 11.1. Sensitivität der FDA bezüglich der Wahl der Anfangsbedingungen.....                   | 41 |
| 11.1.1. B-Splines, Fourier .....  | 41 |
| 11.1.2. Anzahl Funktionen zu Beschreibung.....  | 41 |
| 11.2. Vergleiche Clusteralgorithmen .....   | 42 |
| 11.3. Sensitivitätsstudie Matriceingabe für funktionelle Boxplots.....                      | 45 |
| 11.4. Repräsentativität der Hochwasserganglinien für verschiedene Jährlichkeitsbereiche.... | 45 |
| 11.5. Einfluss des Schwellenwertes auf die ausgewählten Hochwasserereignisse .....          | 48 |
| 11.6. Sensitivität der Clusterabdeckung auf Ereignisschwellenwert .....                     | 54 |
| 11.7. Sensitivität der Clusterabdeckung auf Änderung der Pegel-Volumen-Beziehung .....      | 55 |

## 1. Motivation

Für den Nachweis der Hochwassersicherheit von Stauanlagen werden in der Schweiz zwei Hochwasserereignisse betrachtet: das Bemessungshochwasser und das Sicherheitshochwasser (BfE, 2015; Dändliker et al., 2018). Das Bemessungshochwasser entspricht in der Regel dem HQ1'000. Das Sicherheitshochwasser wird meist ermittelt, indem die Ganglinie des Bemessungshochwassers mit einem angenommenen Faktor multipliziert wird.

Insbesondere für das HQ1'000 als Ausgangspunkt für das Bemessungshochwasser bestehen grosse Unsicherheiten. Es ist zudem nicht bekannt, welchen Eintretenswahrscheinlichkeiten die betrachteten Sicherheitshochwasser entsprechen. Zusätzlich sind die Volumina bei den Hochwasserereignissen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Auch bei neueren für die Schweiz entwickelten bivariaten Ansätzen (z. B. Brunner et al., 2017), bei welchen sowohl Abflussspitze als auch Hochwasservolumen betrachtet werden, ist die Abschätzung der Wiederkehrperiode aufgrund der Datenlage limitiert (typischerweise auf ca. ein HQ100).

Aus dem Projekt EXAR (Andres et al., 2021; Staudinger und Viviroli, 2020) sind nun sehr lange und kontinuierliche Abflusssimulationen verfügbar. Basis für diese Abflusssimulationen ist eine hydrometeorologische Modellkette beginnend mit einem Wettergenerator (GWEX, Evin et al. 2018) gefolgt von hydrologischen Einzugsgebietsmodellen (HBV-Modell, Version UZH, Seibert and Vis, 2012) und hydraulischem Routing (RS Minerve, García Hernández et al. 2016). Die kontinuierlichen Langzeitsimulationen umfassen 289'000 Jahre in stündlicher Auflösung und bilden heute eine einheitliche Grundlage zur Beurteilung der Hochwassergefährdung entlang der grossen Flüsse im Einzugsgebiet der Aare. Mit dem im Jahr 2020 gestarteten Projekt "Extremhochwasser Schweiz" wird eine solche Datengrundlage auch für alle übrigen und kleineren Einzugsgebiete in der Schweiz erarbeitet werden.

Die in vorliegendem Projekt entwickelte Methodik erlaubt es, verschiedene Abflussverläufe von Hochwasserereignissen mit gegebenen Wiederkehrperioden durch realistische Ganglinien wiederzugeben. Der vorliegende Bericht beschreibt zum einen die Entwicklung der Methodik im Sinne einer Pilotstudie und zum anderen erste Auswertungen der EXAR-Resultate für 19 Stauanlagen unter Bundesaufsicht im Einzugsgebiet der Aare. Zu beachten ist, dass für die Mehrheit der 19 betrachteten Stauanlagen keine Langzeitsimulationen aus EXAR vorliegen, da EXAR auf wichtige Schlüsselstellen und ausgewählte Beurteilungspereimeter in der Aare ausgerichtet war. Auch wurden im vorliegenden Projekt keine zusätzlichen Langzeitsimulationen speziell für Stauanlagen vorgenommen, vielmehr wurden die in EXAR simulierten Zeitreihen mit Hinblick auf die betrachteten Stauanlagen wo nötig neu zusammengesetzt.

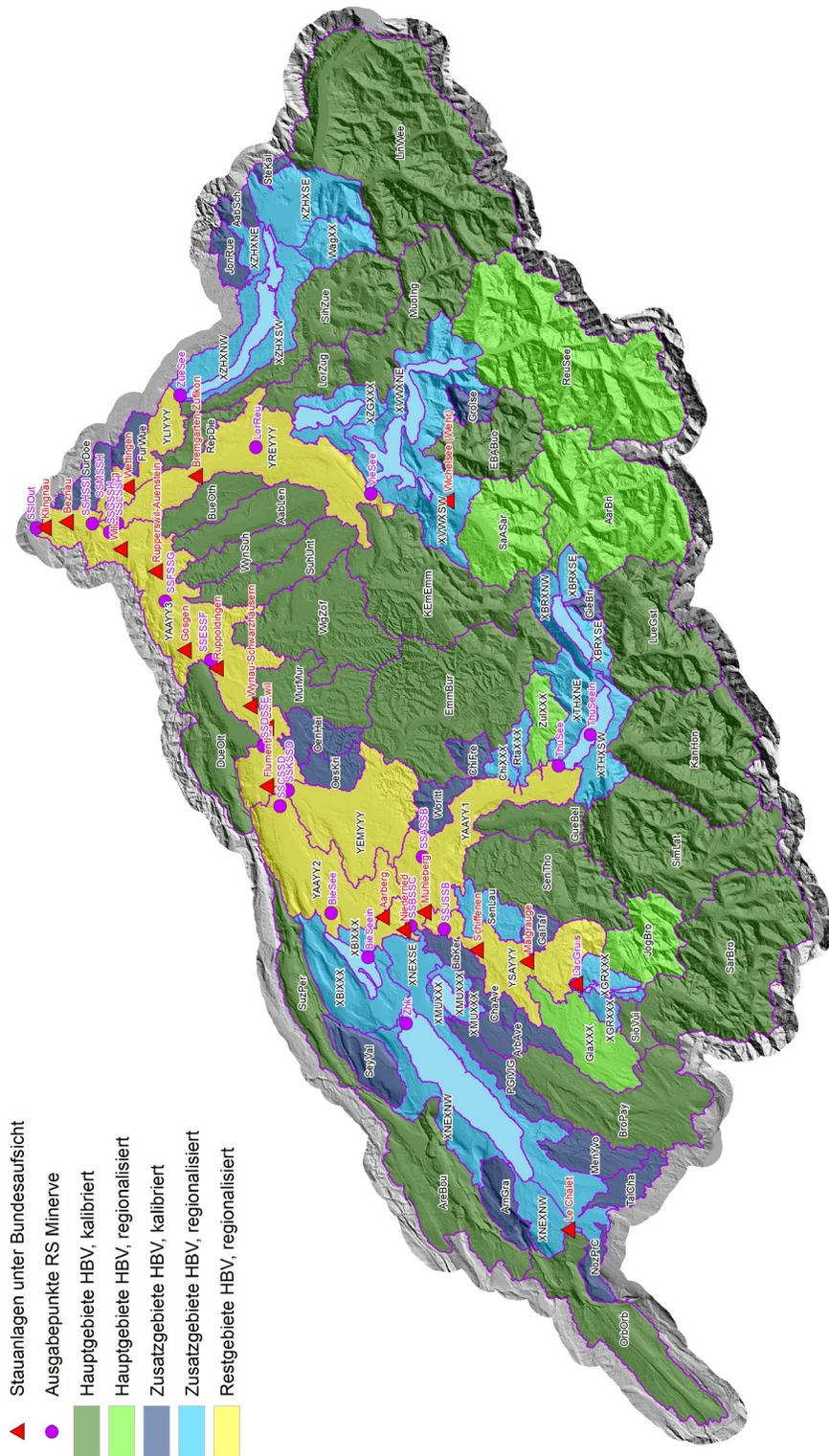
## 2. Datengrundlage

Ausgangslage für die Arbeiten sind die Resultate von EXAR, d.h. kontinuierliche Abflussganglinien aus Langzeitsimulationen in stündlicher Auflösung mit einer Länge von 289'000 Jahren. Diese Abflussganglinien stehen für 79 hydrologische Einzugsgebiete sowie für 19 Transferpunkte und Seeausflüsse zur Verfügung (siehe Abbildung 1). Die hydrologischen Unsicherheiten wurden in EXAR über drei repräsentative Parametersätze und entsprechende Simulationen abgebildet. Die Parametersätze repräsentieren dabei einen mittleren, einen tiefen, und einen hohen Bereich der Simulationen. Um eine einheitliche Auswertungsmethode zu entwickeln, wurden hier nur die Simulationen des mittleren Parametersatzes verwendet.

In EXAR wurden zwei Modellversionen verwendet, eine provisorische Version (Version 2018) und eine definitive Version (Version 2019). Die Version 2019 ist eine leicht verbesserte Version bezüglich der Parametrisierung im hydrologischen Modell, aber die berechneten Zeitreihen sind um einen Faktor 10 kürzer. Ein Vergleich der beiden Versionen im Rahmen von EXAR zeigte, dass die definitive Version von 2019 im Vergleich zur provisorischen Version von 2018 für die Saane im Mündungsbereich etwa 10–15% höhere Spitzenabflüsse erzeugt.

Für die Methodenentwicklung wurden im vorliegenden Projekt die Simulationen der provisorischen Version 2018 verwendet, für welche die volle Zeitreihe von 289'000 Jahren zur Verfügung steht. Ein Korrekturfaktor auf die leicht verbesserte definitive Version 2019 (wie in EXAR angewendet) würde grosse Unsicherheiten mit sich bringen, da hier die gesamte simulierte Ganglinie angepasst werden müsste und nicht nur die Wiederkehrperioden der simulierten Jahresspitzen wie im EXAR-Projekt geschehen.

Die hier entwickelte Methode wurde im Anschluss auch auf die Daten der definitiven Version 2019 angewendet, um entsprechende Resultate für die Saane abzuschätzen (siehe Abschnitt 7). Da die definitive Version 2019 aus kürzeren Zeitreihen besteht als die provisorische Version 2018, weist sie im Bereich seltener Hochwasser jedoch zusätzliche Unsicherheiten auf.



- ▲ Stauanlagen unter Bundesaufsicht
- Ausgabepunkte RS Minerve
- Hauptgebiete HBV, kalibriert
- Hauptgebiete HBV, regionalisiert
- Zusatzgebiete HBV, kalibriert
- Zusatzgebiete HBV, regionalisiert
- Restgebiete HBV, regionalisiert

Abbildung 1 Übersicht Stauanlagen, EXAR Einzugsgebiete, Transferpunkte und Seeausflüsse.

### 3. Betrachtete Stauanlagen

Für die Stauanlagen Beznau, Klingnau, Le Chalet und Wildegg-Brugg konnten die im Rahmen von EXAR ermittelten Abflusszeitreihen unverändert verwendet werden, da die EXAR-Transferpunkte gut mit den Positionen der Stauanlagen übereinstimmen. Für alle anderen der 19 betrachteten Stauanlagen wurden die Abflussganglinien durch Kombination der Beiträge verschiedener Teileinzugsgebiete aus EXAR ermittelt.

**Tabelle 1 Zusammensetzung der simulierten Abflüsse aus EXAR zu den Stauanlagen.**

| Stauanlage                        | Zusammensetzung Gebiete EXAR*              | Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| Aarberg <sup>2</sup>              | SSBSSC + [0.950 · YAAYY1]                  | 5'095                            |
| Bannwil <sup>2</sup>              | SSDSSE + OenHei + [0.16 · YAAYY3]          | 9'832                            |
| Beznau <sup>1</sup>               | SSHSSI                                     | 17'601                           |
| Bremgarten-Zufikon <sup>2</sup>   | [0.97 · SSLSSH]                            | 3'329                            |
| Flumenthal <sup>2</sup>           | SSCSD + SSKSSD                             | 9'582                            |
| Gösgen <sup>2</sup>               | SSFSSG + [0.43 · YAAYY3]                   | 10'819                           |
| Klingnau <sup>1</sup>             | SSIOut                                     | 17'687                           |
| Le Chalet <sup>1,5</sup>          | OrbOrb                                     | 342                              |
| Maigrauge <sup>2</sup>            | LacGru + GlaXXX + [0.44 · YSAYYY]          | 1'264                            |
| Mühleberg <sup>2,3</sup>          | SSASSB + [0.86 · YAAYY1]                   | 3'168                            |
| Niederried <sup>2</sup>           | SSBSSC + [0.91 · YAAYY1]                   | 5'078                            |
| Rossens <sup>2,5</sup>            | SarBro + JogBro + SioVui + XGRXXX + XGRXPP | 952                              |
| Rupperswil-Auenstein <sup>2</sup> | SSFSSG + SuhUnt + WynSuh + [0.67 · YAAYY3] | 11'298                           |
| Ruppoldingen <sup>2</sup>         | SSDSSE + OenHei + MurMur + [0.27 · YAAYY3] | 10'114                           |
| Schiffenen <sup>2</sup>           | LacGru + GlaXXX + GalTaf + [0.48 · YSAYYY] | 1'406                            |
| Wettingen <sup>2</sup>            | [0.99 · SSMSSH]                            | 2'376                            |
| Wichelsee <sup>2,4,5</sup>        | SaASar + [0.13 · XVWXSWS]                  | 308                              |
| Wildegg-Brugg <sup>1</sup>        | SSGSSH                                     | 11'643                           |
| Wynau-Schwarzhäusern <sup>2</sup> | SSDSSE + OenHei + [0.2 · YAAYY3]           | 9'867                            |

\* Gebietskürzel: GalTaf: Galtera; GlaXXX: La Glâne; JogBro: Jogne; LacGru: Ausfluss Greyerzersee; MurMur: Murg (AG); OenHei: Önz; OrbOrb: Orbe; SaASar: Sarner Aa; SarBro: Sarine; SioVui: Sionge; SSASSB: Aare-Halen; SSBSSC: Aare-Golaten; SSCSD: Aare-Solothurn; SSDSSE: Aare-Walliswil; SSFSSG: Aare-Aarau; SSGSSH: Aare-Brugg; SSHSSI: Aare-Stilli; SSIOut: Aare-Rheinmündung; SSKSSD: Emme; SSLSSH: Reuss; SSMSSH: Limmat; SuhUnt: Suhre; WynSuh: Wyna; XGRXPP: Greyerzersee, Seefläche (Niederschlag und Verdunstung); XGRXXX: Greyerzersee, diverse Zuflüsse; XVWXSWS: Vierwaldstättersee, südwestliche Zuflüsse; YAAYY1, YAAYY3: Talflächen Aare; YSAYYY: Talfläche Saane

<sup>1</sup> Abbildung in EXAR praktisch identisch, d. h. das in EXAR verwendete Einzugsgebiet unterscheidet sich vom Einzugsgebiet der Stauanlage um höchstens ±0.3%.

<sup>2</sup> Keine identische Abbildung in EXAR, die Abflusszeitreihen mehrerer Einzugsgebiete werden aufsummiert (in eckigen Klammern: nicht gesamtes Einzugsgebiet, sondern nur flächenproportionaler Anteil)

<sup>3</sup> Der Hochwasserentlastungsstollen Thunersee ist berücksichtigt (siehe Andres et al. 2021 und Staudinger und Viviroli 2020).

<sup>4</sup> Für die Anlage Wichelsee wurden wie in der Spalte „Zusammensetzung Gebiete EXAR“ festgehalten die Simulationen für den Ausfluss des Sarnersees verwendet, zu welchen zudem flächenproportional die Simulationen für die südwestlichen Zuflüsse zum Vierwaldstättersee addiert wurden (d. h. 13% der EXAR-Simulationen für Gebiet XVWXSWS). Der Hochwasserentlastungsstollen Sarnersee ist gemäss Prämissen von EXAR nicht berücksichtigt, da in EXAR 2015 als Referenzjahr für das Gewässernetz vorgegeben war.

<sup>5</sup> Das Einzugsgebiet der Anlage beträgt weniger als 1'000 km<sup>2</sup> und liegt somit ausserhalb des Bereichs, für welchen die Methoden von EXAR entwickelt wurden, es ist mit zusätzlichen Unsicherheiten zu rechnen.

Dabei wurden die Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten soweit nötig um den Anteil der zum Gesamtabfluss beitragenden Einzugsgebietsfläche korrigiert; die Beiträge der einzelnen Teileinzugsgebiete wurden anschliessend zu einem Gesamtabfluss aufsummiert (Tabelle 1).

Für vorliegendes Projekt wurden also keine neuen Simulationen speziell an den betrachteten Stauanlagen erstellt, sondern die bestehenden Simulationen aus EXAR verwendet. Dieses Vorgehen muss im Rahmen der bereits in Abschnitt 2 erwähnten Unsicherheiten von EXAR als weiterer Unsicherheitsfaktor beachtet werden. Die Plausibilität der abgeleiteten Resultate konnte insofern geprüft werden, dass das geschätzte Hochwasser einer bestimmten Wiederkehrperiode von Wehr zu Wehr im Flusslauf (d. h. mit zunehmender Grösse des Einzugsgebietes) zu- und nicht abnimmt. Dies ist fast überall der Fall, ausser bei der Stauanlage Rapperswil-Auenstein, welche bei Jährlichkeiten von über 70'000 Jahren einen höheren Spitzenabfluss zeigt als die flussabwärts gelegene Anlage Wildegg-Brugg. Diese Ausnahme ist vermutlich dadurch zu erklären, dass die unterhalb von Aarau stattfindende Retention nur bei Wildegg-Brugg berücksichtigt wird, nicht aber bei Rapperswil-Auenstein: Für Wildegg-Brugg wurde direkt der Transferpunkt SSGSSH verwendet, welcher Retention wie in RS Minerve eingebaut abbildet. Bei Rapperswil-Auenstein hingegen wurden die Abflusszeitreihen ausgehend vom Transferpunkt Aarau zusammengesetzt (SSFSSG + SuhUnt + WynSuh + 0.67\*YAAYY3, siehe Tabelle 1) und enthalten noch keine Retentionseffekte. Darüber hinaus basieren Schätzungen des Spitzenabflusses für solch grosse Wiederkehrperioden auf nur wenigen simulierten Werten, was zu erhöhter Unsicherheit führt.

***Tabelle 2 Abschätzungen der Abflussspitzen für verschiedene Wiederkehrperioden mit der in EXAR verwendeten Methode (univariate Abschätzung, Weibull plotting positions). Es muss unbedingt beachtet werden, dass gemäss der in diesem Bericht erläuterten Unsicherheiten nur die Abschätzungen für das HQ10 bis zum HQ10'000 belastbar sind. Die Werte für das HQ50'000 und das HQ100'000 sind nur indikativ.***

|                          | Belastbare Werte            |                             |                              |                              |                                |                                | Indikative Werte                |                                 |                                  |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                          | HQ10<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ50<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ100<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ300<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ1'000<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ5'000<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ10'000<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ50'000<br>(m <sup>3</sup> /s) | HQ100'000<br>(m <sup>3</sup> /s) |
| Aarberg                  | 1205                        | 1564                        | 1708                         | 1927                         | 2181                           | 2638                           | 2788                            | 3795                            | 4316                             |
| Bannwil                  | 988                         | 1160                        | 1257                         | 1432                         | 1593                           | 1846                           | 1934                            | 2390                            | 3030                             |
| Beznau                   | 2190                        | 2724                        | 2956                         | 3345                         | 3760                           | 4266                           | 4418                            | 5035                            | 6073                             |
| Bremgarten-<br>Zufikon   | 706                         | 875                         | 934                          | 1018                         | 1101                           | 1252                           | 1299                            | 1460                            | 1638                             |
| Flumenthal               | 955                         | 1128                        | 1215                         | 1372                         | 1521                           | 1768                           | 1869                            | 2299                            | 2876                             |
| Gösgen                   | 1073                        | 1293                        | 1400                         | 1589                         | 1793                           | 2103                           | 2170                            | 2570                            | 3257                             |
| Klingnau                 | 2198                        | 2737                        | 2968                         | 3332                         | 3760                           | 4270                           | 4429                            | 5051                            | 6126                             |
| Le Chalet                | 185                         | 234                         | 251                          | 278                          | 301                            | 332                            | 340                             | 361                             | 371                              |
| Maigrauge                | 548                         | 728                         | 811                          | 967                          | 1150                           | 1505                           | 1586                            | 2172                            | 2396                             |
| Mühleberg                | 590                         | 683                         | 700                          | 734                          | 783                            | 889                            | 925                             | 1131                            | 1186                             |
| Niederried               | 1203                        | 1560                        | 1704                         | 1921                         | 2175                           | 2631                           | 2777                            | 3787                            | 4299                             |
| Rossens                  | 440                         | 578                         | 640                          | 754                          | 889                            | 1173                           | 1274                            | 1736                            | 1851                             |
| Rapperswil-<br>Auenstein | 1135                        | 1384                        | 1502                         | 1707                         | 1934                           | 2266                           | 2348                            | 2741                            | 3449                             |
| Ruppoldingen             | 1029                        | 1218                        | 1322                         | 1509                         | 1692                           | 1978                           | 2059                            | 2498                            | 3173                             |
| Schiffenen               | 558                         | 744                         | 829                          | 991                          | 1175                           | 1538                           | 1630                            | 2206                            | 2443                             |
| Wettingen                | 437                         | 544                         | 588                          | 668                          | 749                            | 873                            | 904                             | 1104                            | 1168                             |
| Wichelsee                | 95                          | 149                         | 171                          | 207                          | 242                            | 288                            | 307                             | 349                             | 371                              |
| Wildegg-Brugg            | 1193                        | 1468                        | 1597                         | 1821                         | 2064                           | 2374                           | 2442                            | 2820                            | 3298                             |
| Wynau-<br>Schwarzhäusern | 992                         | 1166                        | 1263                         | 1439                         | 1602                           | 1856                           | 1943                            | 2399                            | 3044                             |

Schliesslich muss beachtet werden, dass die Stauanlagen Le Chalet, Rossens und Wichelsee ein Einzugsgebiet von weniger als 1'000 km<sup>2</sup> haben. Die Methoden von EXAR wurden hingegen für Gebiete mit einer Gesamtfläche von mehr als 1'000 km<sup>2</sup> entwickelt und getestet, weshalb hier mit zusätzlichen Unsicherheiten zu rechnen ist.

Die Spitzenabflüsse für die verschiedenen Jährlichkeiten an den Anlagen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Diese wurden aus den Abflusszeitreihen zu den jeweiligen Anlagen berechnet, indem jeweils die Jährlichkeit der grössten Abflussspitzen ermittelt wurden, die innerhalb einer Stunde in einem Jahr aufgetreten sind (siehe auch Abschnitte 4.3.1 für die univariate Berechnung der Jährlichkeiten). Wie auch in EXAR explizit erwähnt, sind die Werte bis zu einer Jährlichkeit von 10'000 Jahren belastbar, grössere Jährlichkeiten sind nur indikativ zu verwenden.

## **4. Methodenentwicklung**

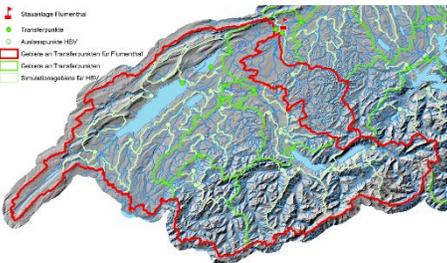
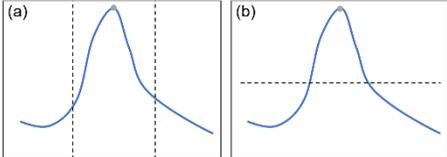
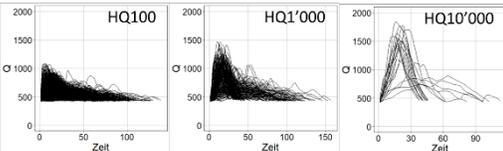
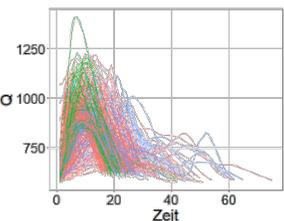
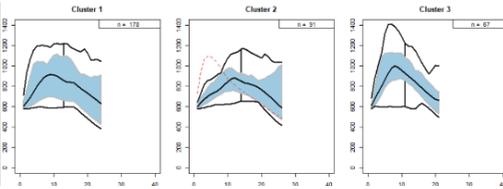
### **4.1. Überblick**

Die ausserordentlich grosse Länge der simulierten Zeitreihe aus EXAR erlaubt eine Auswertung im Rahmen einer funktionellen Datenanalyse (FDA; vgl. Chebana et al., 2012 und Ternynck et al., 2016). Die Hochwasserereignisse werden dabei zuerst in Gruppen vordefinierter Jährlichkeitsbereiche unterteilt. Als Grundlage für diese Jährlichkeiten werden pro Stauanlage bivariate Statistiken (Spitze, Volumen) erstellt. Pro Jährlichkeitsbereich werden anschliessend Ganglinien mit ähnlichem Verlauf in Clustern zusammengefasst. Mit Hilfe von funktionellen Boxplots (*functional boxplots*, siehe Abschnitt 4.7) werden schliesslich eine mittlere Ganglinie sowie nach Bedarf weitere Ganglinien aus dem definierten Jährlichkeitsbereich extrahiert. Dabei wird nicht punktweise pro Zeitschritt extrahiert, sondern es werden vollständige Ganglinien aus der Schar der simulierten Ganglinien ausgewählt. Die gewählten Kurven sollen jeweils repräsentativ für diesen Jährlichkeitsbereich sein (Abschnitt 4.4). Einen Überblick der Methode gibt Tabelle 3.

### **4.2. Definition Hochwasserereignis**

Die minimale Dauer eines betrachteten Hochwasserereignisses ergibt sich aus dem Zeitschritt der zugrundeliegenden Simulationen und beträgt eine Stunde. Die Hochwasserereignisse, die für das Projekt verwendet werden, sind simulierte Jahresmaximalabflüsse, die über ein 24-Stunden gleitendes Mittel ausgewählt wurden. Das gleitende Mittel wurde verwendet, um nicht durch Oszillationen in der Zeitreihe ein Hochwasser fälschlicherweise als Jahreshochwasser zu deklarieren. Innerhalb des 24-Stunden-Fensters, in welchem das maximale Jahreshochwasser gefunden wurde, wurde das absolute Maximum (pro Stunde), also die Abflussspitze des Ereignisses, gesucht. Im Anschluss wurde das gesamte Hochwasserereignis bestimmt.

**Tabelle 3 Übersicht Methodik.**

| Schritt  | Kurzbeschreibung   |
|--|--|
| Zusammenführung der simulierten EXAR Abflusszeitreihen zu Zuflusszeitreihen zu den Stauanlagen | <p>Flächengewichtete Summe der simulierten Abflussganglinien aus EXAR, die zu einer Stauanlage führen. Ausser des in EXAR bereits berechneten Routings wurde kein weiteres Routing vorgenommen.</p>    |
| Extraktion der Ereignisganglinien  | <p>Die Hochwasserereignisse sind die Jahresmaxima aus den Simulationen als 24-stündige gleitende Mittel. Für den univariaten Fall (a) wird ein festes Zeitfenster um die jährlichen Abflussspitzen gelegt, um die Ereignisse zu extrahieren. Für eine bivariate Analyse (b) werden Ereignisbeginn und Ereignisende mit einem Schwellenwert bestimmt, was die Bestimmung des Ereignisvolumens erlaubt.</p>  |
| Zuweisung zu einem Jährlichkeitsbereich  | <p>Die Jährlichkeit wird über die empirischen Auftretenswahrscheinlichkeiten nach Weibull berechnet. Für den bivariaten Fall wird dazu eine empirische Copulafunktion verwendet. Die Jährlichkeitsbereiche umfassen bestimmte Jährlichkeiten und die Bereichsbreite wird vordefiniert.</p>   |
| Clustering innerhalb des Jährlichkeitsbereichs   | <p>Das Clustering erfolgt mithilfe des funktionellen Cluster-Algorithmus «itersubspace». Dabei wird jede einzelne Ganglinie mit verschiedenen durch den Algorithmus modellierten Zentrallinien auf Ähnlichkeit abgeglichen.</p>    |
| Funktionelle Boxplots  | <p>Die Cluster müssen in Matrixform gebracht werden, um funktionelle Boxplots zu berechnen. Aus den funktionellen Boxplots können repräsentative Ganglinien für die Beurteilung der Hochwasser-sicherheit von Stauanlagen extrahiert werden.</p>   |

#### 4.2.1. Univariate Ereignisbestimmung

Die univariate Bestimmung der Hochwasserjährlichkeit bezieht sich auf die Abflussspitze. Die univariate Ereignisbestimmung wurde für die Wehre entlang der Aare benutzt, da bei diesen die Abflussspitzen die absolut dominierende Charakteristik der Ereignisganglinien sind. Um dennoch eine FDA vorzunehmen und auch im univariaten Fall typische Ereignisganglinien zu erhalten, wurde mit einem festen Zeitfenster um die jährlichen Abflussspitzen gearbeitet, um die Ereignisse zu extrahieren. Mit dieser Ereignisdefinition sind folglich alle Ereignisse auf die Abflussspitze ausgerichtet.

Zur Bestimmung der Fensterbreite wurde ihre Anwendung auf die Ganglinien systematisch getestet. Dabei sollten die Fenster nicht zu gross gewählt werden, um den Fokus auf die Abflussspitze bei den funktionellen Clustern nicht zu verlieren, und nicht zu eng, um noch eine typische Ganglinie beschreiben zu können. Letztendlich wurde die Fensterbreite auf 24 Stunden vor und 24 Stunden nach der Spitze festgesetzt.

#### 4.2.2. Bivariate Ereignisbestimmung

Im bivariaten Ansatz benutzen wir einen Schwellenwert, der aus der univariaten Hochwasserstatistik entnommen wurde, z. B. ein HQ10. Dieser Schwellenwert ist daher abhängig von Abflussregime und Extremwertverteilung des jeweiligen Einzugsgebietes. Implizit ist mit dieser Ereignisdefinition auch eine Ausrichtung der Kurven bestimmt: In diesem Fall sind die Ereignisse also nicht wie beim univariaten Fall mit der Spitze nach x Stunden justiert. Für jede bivariate Bestimmung wurde parallel aber auch eine univariate gemacht. Die bi- und univariaten Berechnungen können verglichen werden, um Unterschiede zwischen einer rein spitzenbasierten und einer bivariaten (Spitze und Volumen) Analyse aufzuzeigen und die entsprechenden Auswirkungen auf die Resultate zu untersuchen.

#### 4.2.3. Umgang mit Oszillationen

Die teilweise in den ermittelten Abflussganglinien vorhandenen schnellen Oszillationen sind Artefakte, welche sich aus den im Routing eingebauten Wehrreglementen bei Seen und Stauanlagen ergeben können. Das Clustering wurde daher auf geglättete Daten angewendet. Das Glätten erfolgte unter Verwendung eines einfachen Dreieck-Filters mit den Gewichten  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ . Die stärkste mögliche Glättung bei einer hypothetischen „ungünstigen“ Spitze  $b$ ,  $b+a$ ,  $b$  beträgt demnach  $\frac{1}{2} \cdot a$ . Da geglättete Kurvenscharen ohne Oszillationen als Resultat erwünscht sind, wurde diese Glättung für die resultierenden Ganglinien übernommen.

### 4.3. Berechnung der Jährlichkeiten

#### 4.3.1. Univariate Jährlichkeit

Für die univariate Berechnung der Jährlichkeiten wurden nur die Abflussspitzen aller Jahre betrachtet. Die empirischen Jährlichkeiten wurden aus den empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten  $u^{obs}$  mithilfe von Plotting Positions nach Weibull geschätzt. Diese werden empfohlen, wenn die Form der zugrundeliegenden Verteilung unbekannt ist und erwartungstreue Überschreitungswahrscheinlichkeiten verwendet werden sollen.

$$x = \frac{R_i}{n}$$

Dabei ist  $x$  die Abflussspitze und  $R_i$  der Rang der betrachteten Abflussspitze innerhalb aller Abflussspitzen (absteigend sortiert) und  $n$  die Gesamtzahl aller Abflussspitzen (in diesem Fall  $n = 289'000$ ). Die univariate Jährlichkeit  $T(x)$  einer Abflussspitze ist dann:

$$T(x) = \frac{\mu}{1 - x}$$

mit  $\mu$  der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen, hier also pro Jahr.

#### 4.3.2. Bivariate Jährlichkeit

Die Volumina und Abflussspitzen der grössten jährlichen Hochwasser wurden als Zufallsvariablen behandelt und die bivariaten empirischen Wiederkehrperioden für jedes Ereignis berechnet. Dazu wurde eine empirische Copulafunktion zuhulfe genommen.

Die bivariate empirische Copulafunktion (Nelson, 2006) für eine bivariate Stichprobe der Länge  $n$  für Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  ist definiert als:

$$C_n\left(\frac{i}{n}, \frac{j}{n}\right) = \frac{\text{AnzahlPaare}(x, y) \text{ mit } x \leq x_i \text{ und } y \leq y_i}{n}$$

Dabei sind  $x_i$  und  $y_i$  die geordneten Abflussspitzen und Hochwasservolumina und  $1 \leq i, j \leq n$ . Die bivariate empirische Copulafunktion kann auch folgendermassen ausgedrückt werden:

$$C_n\left(\frac{i}{n}, \frac{j}{n}\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1\left(\frac{R_i}{n} \leq u_i, \frac{S_i}{n} \leq v_i\right)$$

$R_i$  und  $S_i$  sind die Ränge der Daten für Abflussspitzen und Hochwasservolumina und  $u_i$  und  $v_i$  sind dabei je eine Art nicht-parametrische Überschreitungswahrscheinlichkeit, die auf der Anzahl der zugrundeliegenden Daten basiert und in Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt wird.

Diese bivariaten Wahrscheinlichkeiten wurden dann in bivariate Jährlichkeiten übersetzt (siehe Übersicht bei Brunner et al., 2016). Es wurde die bivariate Jährlichkeit aller Ereignisse gewählt, bei denen sowohl Abfluss als auch Volumen eine bestimmte Wahrscheinlichkeit überschreiten («joint and»).

$$T(u, v) = \frac{\mu}{1 - u - v + C_n(u, v)}$$

Wobei  $\mu$  die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen ist, hier also ein Jahr.

Wenn man entweder Volumen oder Abflussspitze als relevanter erachtet, könnte man statt der bivariaten «joint and» Jährlichkeiten auch bedingte Jährlichkeiten über Copulafunktionen berechnen, um eine bivariate Jährlichkeit für die Ereignisse zu schätzen. Die Bedingung kann z. B. sein, dass erst eine bestimmte Abflussspitze erreicht sein muss, um das Volumen miteinzubeziehen, oder umgekehrt, dass man ein bestimmtes minimales Hochwasservolumen als Bedingung hat, um eine Abflussspitze in die Betrachtung einzuschliessen (Vergleich Übersicht in Brunner et al., 2016 v.a. Abbildung 2).

Die «joint and» Jährlichkeiten und die bedingten bivariaten Jährlichkeiten (bedingt auf bestimmte Abflussspitze) wurden verglichen und anhand der sich an der Stauanlage ergebenden Pegelanstiege evaluiert (siehe Abschnitt 5.2 für Evaluation über Pegelanstiege). Im Vergleich ergaben diese auf Abflussspitze bedingten Jährlichkeiten in den betrachteten Stauanlagen zwar ungünstigere Pegelanstiege bezüglich einer Sicherheitsüberprüfung, aber diese Bedingung könnte für andere Anlagentypen relevante Ereignisse ausschliessen. Es ist also möglich, dass durch die bedingten bivariaten Jährlichkeiten die ungünstigsten Volumen-Abflussspitze-Kombinationen für eine Anlage aussortiert und folglich in der Sicherheitsüberprüfung der Anlage gar nicht betrachtet werden, obwohl gerade diese Kombinationen tatsächlich kritisch wären. Daher haben wir uns für dieses Projekt bewusst dafür entschieden, Abflussspitze und Volumen nicht an die Überschreitung einer bestimmten Abflussspitze oder eines bestimmten Abflussvolumens zu binden.

#### 4.4. Definition Jährlichkeitsbereiche

Die Breite der Jährlichkeitsbereiche ist relevant für die Bestimmung typischer Ganglinien. Für die Anwendung soll der Jährlichkeitsbereich möglichst eng ausfallen, um möglichst nah an einer bestimmten Jährlichkeit zu liegen. Für robuste Ergebnisse sollten aber genügend Ereignisse in einem Bereich vorhanden sein. Auch hier musste also ein Kompromiss zwischen Anwendung und Theorie gefunden werden. Die Breite der Jährlichkeitsbereiche für HQ100, HQ300, HQ1'000 und HQ5'000 wurde bewertet, indem die Anzahl der Ereignisse betrachtet wurde, welche in eine Klasse fallen, indem visuelle Unterschiede zwischen den Klassenbreitenstufen untersucht wurden und indem die Robustheit des Clusteralgorithmus (Konvergenz und Clustergrösse) auf die ausgewählte Kurvenschar innerhalb der Klasse verglichen wurde. Diese Auswahl wurde am Beispiel der Daten für die Stauanlage Rossens vorgenommen. Tabelle 4 zeigt die getesteten Klassenbreiten sowie die letztlich ausgewählte Klassenbreite. Für HQ10'000, HQ50'000 und HQ100'000 wurde der Bereich aufgrund der geringen Anzahl zur Verfügung stehender Ereignisse so breit wie möglich gewählt. Der Bereich HQ10'000 umfasst demzufolge alle Ereignisse mit Jährlichkeiten von 10'000 bis 50'000 Jahren, der Bereich HQ50'000 alle mit Jährlichkeiten von 50'000 bis 100'000 Jahren und der Bereich HQ100'000 alle Ereignisse mit einer Jährlichkeit von 100'000 Jahren oder mehr.

Insgesamt erlaubt die Datengrundlage statistisch belastbare Aussagen bis in den Bereich eines HQ10'000, wobei die Unsicherheiten der zugrundeliegenden Simulationen (Wettergenerator, hydrologisches Modell, hydrologisches Routing) unbedingt mit zu berücksichtigen sind (siehe Andres et al., 2021 und Staudinger und Viviroli 2020). Zu Vergleichszwecken wurden auch Auswertungen für das HQ50'000 und das HQ100'000 vorgenommen. Diese Werte haben allerdings wegen der grossen Unsicherheiten nur indikativen Charakter und werden in diesem Bericht nicht weiter besprochen.

*Tabelle 4 Getestete Bereiche für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300, HQ1'000 und HQ5'000. Die farbig unterlegten Bereiche sind die, welche im Weiteren verwendet wurden. Für seltenere Wiederkehrperioden (HQ10'000, HQ50'000, HQ100'000) wurden jeweils alle relevanten Ereignisse verwendet, sie sind daher nicht in der Tabelle mit aufgeführt. # gibt die Anzahl der Ereignisse im jeweiligen Jährlichkeitsbereich an.*

| HQ100   |     | HQ300   |     | HQ1'000     |     | HQ5'000      |    |
|---------|-----|---------|-----|-------------|-----|--------------|----|
| Bereich | #   | Bereich | #   | Bereich     | #   | Bereich      | #  |
| 100-105 | 124 | 300-350 | 147 | 1'000-1'100 | 29  | 5'000-6'000  | 13 |
| 100-110 | 246 | 300-400 | 272 | 1'000-2'000 | 176 | 5'000-7'000  | 20 |
| 100-115 | 360 | 300-500 | 436 | 1'000-3'000 | 250 | 5'000-8'000  | 28 |
| 100-120 | 471 |         |     | 1'000-4'000 | 273 | 5'000-9'000  | 35 |
|         |     |         |     | 1'000-5'000 | 296 | 5'000-10'000 | 40 |

#### 4.5. Funktionelle Beschreibung der Ganglinien mit B-Splines

Um eine funktionelle Datenanalyse mit den Hochwasserganglinien zu machen, müssen diese als Funktionen dargestellt werden. Dies kann mit verschiedenen Methoden erreicht werden, z. B. mit B-Splines (Bouveyron and Jacques, 2011; Jacques and Preda, 2014; James and Sugar, 2003) oder Karhunen-Loève Expansion (Yao et al., 2005). In diesem Projekt wurde die Projektion der Ganglinien

auf Basisfunktionen basierend auf B-Splines gemacht (Appendix 11.1.1). Generelles Ziel bei der funktionellen Beschreibung der Hochwasserganglinien war, genügend B-Splines zu benutzen, um die wichtigsten Charakteristika der Ganglinie zu beschreiben, aber nur so viele wie nötig, um die benötigte Rechenzeit beim darauffolgenden funktionellen Clustering der Ganglinien kurz zu halten. Die Anzahl B-Splines richtet sich nach der Komplexität der Abflussganglinie, welche sich mit dem definierten Ereignisschwellenwert ändern kann. Folglich kann es sein, dass die Anzahl B-Splines für unterschiedliche Schwellenwerte bei der Ereignisdefinition angepasst werden muss, damit wirklich die relevanten Charakteristika einbezogen werden.

#### 4.6. Clustering innerhalb der Jährlichkeitsbereiche

Die Ereignisse innerhalb eines Jährlichkeitsbereiches wurden verschiedenen Clustern zugeordnet. Jedes Cluster sollte repräsentativ für typische Ganglinienformen dieses Jährlichkeitsbereiches sein. Dies kann mit einem funktionellen Clustering erreicht werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass nicht nur bestimmte vorausgewählte Charakteristika wie Spitze, Volumen oder Dauer der Ereignisse in die Clusterzuordnung einfließen, sondern die gesamte Ereignisganglinie – vorausgesetzt natürlich, dass diese hinreichend gut durch Funktionen beschrieben wurde.

##### 4.6.1. Funktioneller Clusteralgorithmus

Um diese Repräsentativität der Cluster zu erreichen, sollte der dabei verwendete Clusteralgorithmus sowohl robust sein als auch unterschiedlich grosse Cluster erlauben. Die Cluster sollten möglichst kompakt und separiert voneinander sein. Die Kriterien Kompaktheit und Separation könnten durch einen Algorithmus, der darauf abzielt, gleichzeitig möglichst gleich grosse Cluster zu schaffen, weniger Gewicht erhalten. Ein solcher Algorithmus ist daher zu vermeiden. Wir wählten nach einem Vergleich geeigneter Algorithmen (Appendix 11.2) den Algorithmus *itersubspace* (Chiou and Li, 2007) wie im R package *funcy* (Yassouridis et al., 2018) implementiert. Dieser Algorithmus erlaubt das Clustern unterschiedlich langer Ereignisse und zeigte im Vergleich mit anderen möglichen Algorithmen die robusteste Leistung.

##### 4.6.2. Optimale Anzahl Cluster

Es gibt verschiedene statistische Möglichkeiten, um die optimale Anzahl von Clustern zu ermitteln. Das gilt auch für funktionelle Cluster. Die beiden einer Optimierung zugrundeliegenden Aspekte sind 1) möglichst grosse Ähnlichkeit innerhalb eines Clusters zu erreichen und 2) möglichst voneinander unterschiedliche Cluster zu erhalten. Die Gewichtung dieser beiden Aspekte ist aber eine subjektive Entscheidung.

Wie ähnlich sich die Ereignisse in einem Cluster sind und wie gut separiert die Ereignisse von anderen Clustern sind, kann man bei der FDA bestimmen, indem man den Unterschied der Ereignisse zur modellierten Clusterzentralinie innerhalb des zugeordneten Clusters mit den Unterschieden der Ereignisse zu anderen Clustern vergleicht.

Das wurde in mit sogenannten Schattenwerten (*shadow values*; Leisch, 2010) gemacht, welche auch auf funktionelle Cluster angewendet werden können (Yassouridis et al., 2018). Für jede Ganglinie  $x$ , also eine funktionell beschriebene Hochwasserganglinie, kann man den Schattenwert  $s(x)$  folgendermassen berechnen:

$$s(x) = \frac{2d(x, c(x))}{d(x, c(x)) + d(x, \tilde{c}(x))}$$

Wobei  $c(x)$  die Zentrallinie des zugeordneten Clusters ist,  $\tilde{c}(x)$  die Zentrallinie des nächstliegenden Clusters und  $d$  die euklidische Distanz. Wenn  $s(x)$  nahe bei 0 ist, dann liegt die Ereignisganglinie nahe bei der Zentrallinie des Clusters. Wenn  $s(x)$  nahe bei 1 ist, dann ist der Unterschied zur Zentrallinie des zugeordneten Clusters gleich dem Abstand zu der Zentrallinie des nächstähnlichen Clusters. Ein Cluster ist also gut von anderen separiert, wenn viele der Kurven innerhalb dieses Clusters kleine Schattenwerte haben. Der mittlere Schattenwert aller Ganglinien  $s_{ij}$ , bei denen Cluster  $i$  das nächste Cluster und Cluster  $j$  das zweitnächste Cluster sind, kann als einfaches Mass für Clusterähnlichkeit bzw. -unähnlichkeit verwendet werden:

$$s_{ij} = |A_i|^{-1} \sum_{x \in A_{ij}} s(x)$$

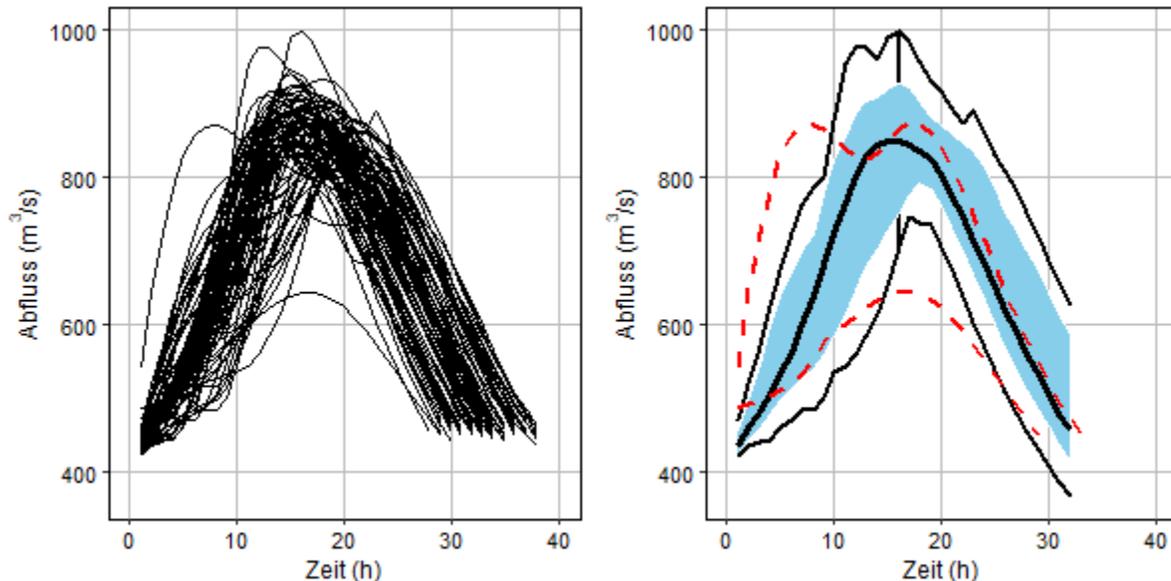
wobei  $A_i$  und  $A_j$  die Anzahl der einzelnen Schattenwerte bzw. verglichener Cluster sind. Diese Verwendung der Schattenwerte ist ein rein statistischer Abgleich. Die optimale Clusteranzahl kann sich jedoch auch aus dem Zweck der Funktionsanalyse zur Überprüfung der Sicherheit von Stauanlagen ergeben. Deshalb wurde überprüft, ob die statistisch ermittelte optimale Clusteranzahl es erlaubt, die für die Sicherheit der Stauanlage relevanten Ganglinien auszuwählen. Hierzu wurden Retentionsberechnungen durchgeführt, um den Pegelanstieg im Stauraum als Reaktion auf die repräsentativen Ganglinien aus den funktionellen Boxplots (Abschnitt 4.7) zu ermitteln. Je ungünstiger ein resultierender Pegelanstieg ist, desto wichtiger ist die Ganglinie aus dem Cluster für die Belange der Stauanlagensicherheit.

#### 4.7. Funktionelle Boxplots

Für jedes Cluster in jedem Jährlichkeitsbereich kann schliesslich ein funktioneller Boxplot erstellt werden. Funktionelle Boxplots werden über die Datentiefe (band depth) jedes Bereiches bestimmt. Diese Datentiefe wird durch die Anzahl funktioneller Kurven bestimmt, welche in einen Bereich fallen (López-Pintado and Romo, 2009).

Ein funktioneller Boxplot von Hochwasserganglinien ist eine zusammenfassende Beschreibung einer typischen Abflussganglinienform des jeweiligen Jährlichkeitsbereiches. Die Mittellinie des Boxplots stellt hier die zentralste oder tiefste beobachtete Ganglinie dar und kann dabei als repräsentative Linie für diese typische Abflussganglinie verwendet werden, d. h., mehrere Kurven können sinnvoll zusammengefasst und kompakt dargestellt werden. Typischerweise ist dann ein funktioneller Boxplot folgendermassen aufgebaut (siehe in Abbildung 2):

Die Mittellinie ist die Linie der grössten Tiefe und entspricht einer tatsächlich existierenden Ganglinie. Zusätzlich können Quantilsbereiche – definiert über die Tiefen – ausgewiesen werden. Das blaue Band in Abbildung 2 stellt einen solchen Bereich dar, in welchen im hier ausgewiesenen Fall 50% aller Ganglinien dieses Clusters fallen. Dieser Bereich wird im Folgenden 50%-Zentralregion genannt. Die Umhüllenden (schwarze Kurven) entsprechen einer Verlängerung der 50%-Zentralregion um den Faktor 1.5 nach oben und unten. Weil die Umhüllenden im klassischen Boxplot Whisker genannt werden, verwenden wir im Folgenden den Begriff Whiskerlinien. Wenn die Ganglinien die empirische Regel von 1.5 x der 50%-Zentralregion überschreiten, werden sie als Ausreisser deklariert, analog zur Definition beim klassischen Boxplot. Die Ausreisser werden im funktionellen Boxplot als rote gestrichelte Linien dargestellt.



*Abbildung 2 Beispiel eines funktionellen Boxplots. Aus den zu einem Cluster gruppierten einzelnen Ganglinien (links, dünne schwarze Linien) wird eine Kompaktdarstellung als funktioneller Boxplot (rechts). Die schwarze Mittellinie im funktionellen Boxplot entspricht einer echten Ganglinie, das blaue Band ist der berechnete Interquartilsbereich (50%-Zentralregion), die äusseren schwarzen Linien sind die Umhüllenden (Whiskerlinien). Die gestrichelten roten Linien stellen Ausreisser dar.*

Die 50%-Zentralregion (Abbildung 2, blaues Band) kann wie andere Quantile auch zur Abschätzung der Unsicherheit verwendet werden, wenn die Mittellinie für die Beurteilung der Sicherheit einer Stauanlage herangezogen wird. Sollen konkret noch extremere Ganglinien bezüglich einer Charakteristik (z. B. Volumen, Spitze) aus dem funktionellen Boxplot ausgewählt werden, kann man zum Beispiel die extremen Ganglinien bezüglich des gewünschten Merkmals innerhalb der 50%-Zentralregion verwenden, also z. B. die Ganglinie mit dem grössten Volumen.

Um die funktionellen Boxplots zu berechnen, müssen die Daten in Matrixform gebracht werden. Die zu transformierenden Ereignisse sind aber – weil über einen Schwellenwert definiert – nicht gleich lang. Um die Matrixform für die Darstellung im funktionellen Boxplot zu erreichen, müssen folglich entweder die abfallenden Äste unterhalb des Schwellenwertes für einige Ereignisse miteinbezogen werden, um alle Ereignisse vollständig zu erfassen, oder die abfallenden Äste müssen bei sehr langen Ereignissen abgeschnitten werden, obwohl der Schwellenwert noch nicht unterschritten wurde.

Deshalb wurde im vorliegenden Projekt diejenige Länge gewählt, bei der 50% aller Ereignisse vollständig waren (gesamtes Ereignis oberhalb des Schwellenwertes wurde erfasst). Eine kleine Sensitivitätsstudie zeigte, dass für andere Kürzungen (25%, 75%, 90% der Ereignisse vollständig) keine grossen Effekte auf die gewählte Mittellinie resultieren und somit auch die resultierenden Pegelanstiege im Stauraum wenig beeinflusst werden (Appendix 11.3).

## 5. Methodenevaluation für die bivariate Auswertung

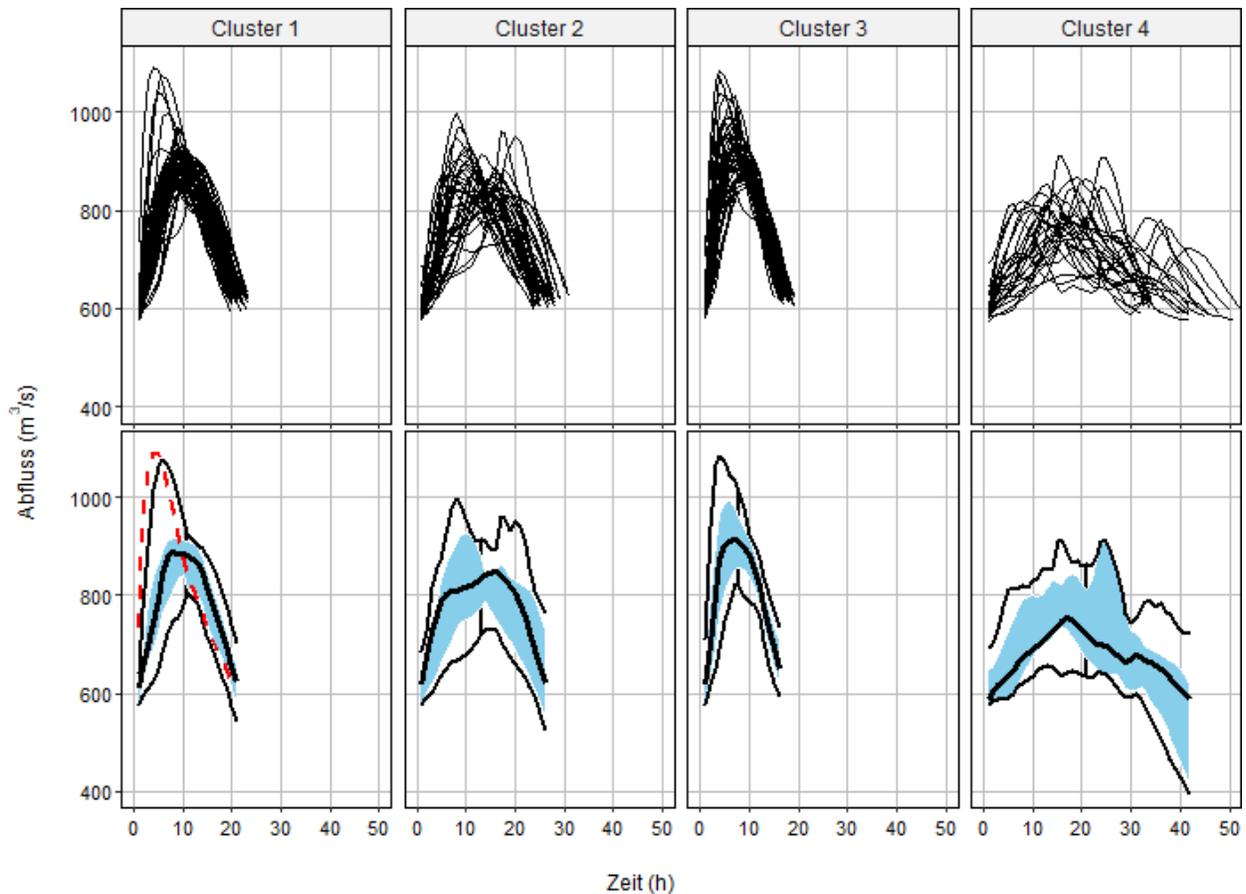
### 5.1. Funktionelles Clustering und funktionelle Boxplots

In einem ersten Schritt wurde die Kompaktheit der Cluster visuell beschrieben und die Güte der Cluster mit Schattenwerten evaluiert, um die daraus entwickelten funktionellen Boxplots zu überprüfen. Die visuelle Analyse bezog sich auf die Breite der Cluster und die Ähnlichkeit der Kurven innerhalb der

Cluster. Weiter wurde geprüft, wie die jeweiligen Cluster in den funktionellen Boxplots abgebildet wurden und ob die Mittellinien repräsentativ für das Cluster waren. Diese Aspekte wurden mithilfe einer Parameterstudie an den Beispielen der Zuflussganglinien zu den Stauanlagen Rossens, Mühleberg und Schiffenen für unterschiedliche Schwellenwerte zur Ereignisdefinition untersucht. Für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 als Beispiel werden im Folgenden die funktionellen Boxplots der verschiedenen Cluster allen Ganglinien im selben Cluster gegenübergestellt.

### 5.1.1. Zuflussganglinien zur Stauanlage Rossens

Bei der Stauanlage Rossens mit anlagespezifischem Schwellenwert konnten die ermittelten Cluster in teils sehr enge funktionelle Boxplots überführt werden (Abbildung 3, Cluster 1 und 3).



**Abbildung 3** Ganglinienschar der vier gefundenen Cluster von Hochwasserereignissen im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 für die Stauanlage Rossens (oben) und daraus abgeleitete funktionelle Boxplots (unten). Die Ereignisse wurden über einen anlagespezifischen Schwellenwert ( $575 \text{ m}^3/\text{s}$ ) definiert. Die 50%-Zentralregion ist als blauer Bereich dargestellt, Ausreisser-Ganglinien in roten gerissenen Linien.

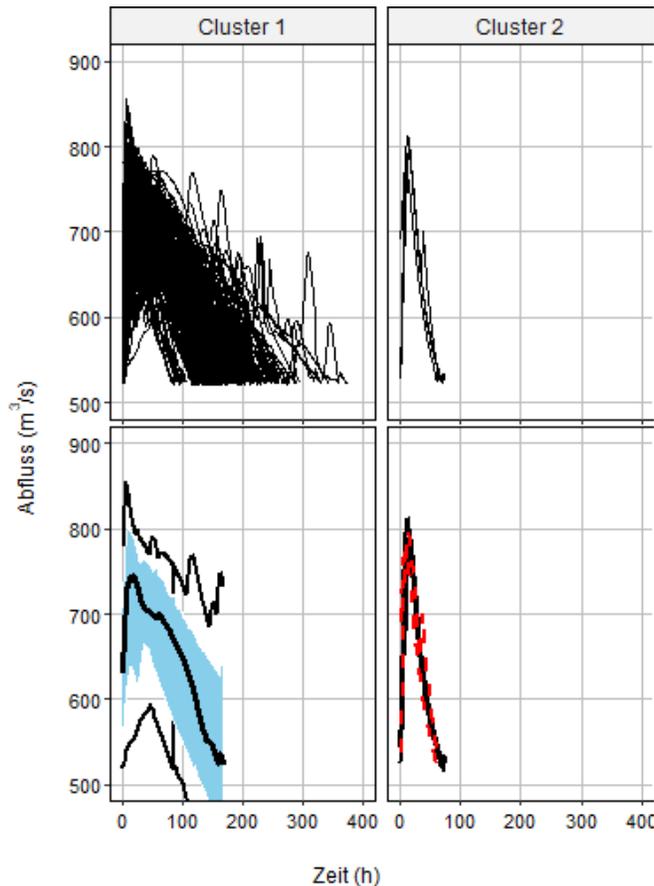
Zwei Cluster hingegen zeigten eine etwas weniger homogene Gruppierung, mit weniger aber dafür längeren zugeordneten Hochwasserereignissen. Aus diesen Clustern ergaben sich funktionelle Boxplots mit grösseren 50%-Zentralregionen (Abbildung 3, Cluster 2 und 4). Alle funktionellen Cluster bei der Anlage Rossens zeigten bei einem anlagespezifischen Schwellenwert nur wenige Ausreisser.

Die Ereignisdauer innerhalb eines Clusters ist beeinflusst von der Matrixform («50% aller Ereignisse sind vollständig» siehe Abschnitt 4.7), die für die Berechnung der funktionellen Boxplots benötigt wird. Um die Matrixform zu erhalten, werden die längsten Ereignisse unter Umständen gekürzt. Das

bedeutet, dass die sich ergebenden Ereignisdauern repräsentativ sind, ein Cluster aber durchaus längere Ereignisse enthalten kann.

### 5.1.2. Zuflussganglinien zur Stauanlage Mühleberg

Für die Stauanlage Mühleberg ergaben sich im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 nur zwei Cluster (beste Clusteranzahl nach Schattenwerten), welche aus ähnlichen Hochwasserganglinien bestanden. Das erste Cluster beinhaltet längere Ereignisse als das zweite Cluster (Abbildung 4).

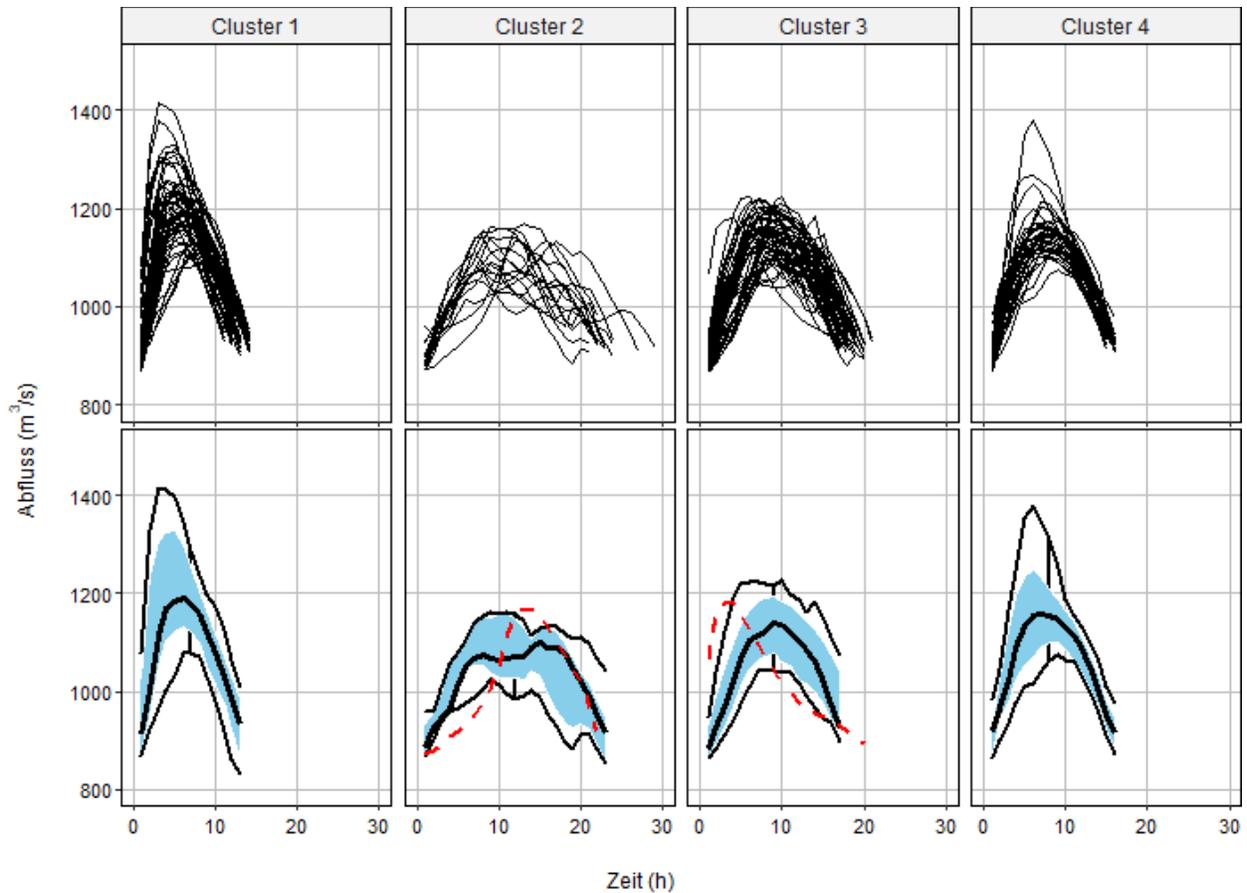


*Abbildung 4 Ganglinienschar der zwei gefundenen Cluster von Hochwasserereignissen im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 für die Stauanlage Mühleberg (oben) und daraus abgeleitete funktionelle Boxplots (unten). Die Ereignisse wurden über einen anlagespezifischen Schwellenwert ( $520 m^3/s$ ) definiert. Die 50%-Zentralregion ist als blauer Bereich dargestellt, Ausreißer-Ganglinien in roten gerissenen Linien.*

Bei dieser Anlage wurden die sehr langen Ereignisse ( $\sim 150$ – $250h$ ) für den funktionellen Boxplot nicht miteinbezogen; die ausgewählten, repräsentativen Ganglinien enden aufgrund der Matrixform bei rund  $170h$ .

### 5.1.3. Zuflussganglinien zur Stauanlage Schiffenen

Für die Stauanlage Schiffenen ergaben sich im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 vier Cluster (beste Clusteranzahl nach Schattenwerten). Diese Cluster bestanden für die kürzeren Hochwasserereignisse aus sehr ähnlichen Hochwasserganglinien und folglich ergaben sich auch enge funktionelle Boxplots mit repräsentativen Mittellinien. Das erste Cluster beinhaltet etwas kürzere Ereignisse als die anderen Cluster (Abbildung 5).



*Abbildung 5 Ganglinienschar der vier gefundenen Cluster von Hochwasserereignissen im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 für die Stauanlage Schiffenen (oben) und daraus abgeleitete funktionelle Boxplots (unten). Die Ereignisse wurden über einen anlagespezifischen Schwellenwert (864 m<sup>3</sup>/s) definiert. Die 50%-Zentralregion ist als blauer Bereich dargestellt, Ausreisser-Ganglinien in roten gerissenen Linien.*

#### 5.1.4. Fazit Methodenevaluation funktionelle Cluster und Boxplots

Vom visuellen Eindruck ausgehend kann festgehalten werden, dass das funktionelle Clustering für die drei Stauanlagen mit ihren unterschiedlichen Hochwasserganglinientypen gut funktioniert hat und auch die Mittellinie als repräsentativ angesehen werden kann. Bei den funktionellen Boxplots folgte die 50%-Zentralregionen in Form und Abstand eng der Mittellinie.

## 5.2. Evaluation der Methode hinsichtlich der Anwendung zur Beurteilung der Sicherheit von Stauanlagen

Um die Methode hinsichtlich ihrer Anwendung als Grundlage für die Beurteilung der Hochwassersicherheit von Stauanlagen zu evaluieren, werden im Folgenden zwei Fälle betrachtet:

- 1) Stauanlage mit Klappen (oder anderen beweglichen Organen zur Hochwasserentlastung)
- 2) Stauanlagen mit einem freien Überfall (und keinen beweglichen Organen zur Hochwasserentlastung)

Die beiden Fälle unterscheiden sich durch stark abweichende Schwellenwerte zur Ereignisbestimmung (vgl. Abschnitt 4.2.2). Je grösser die Kapazität zur Hochwasserentlastung beim Stauziel ist, desto grösser ist der Schwellenwert, ab welchem ein Hochwasserereignis relevant für den

Pegelmanstieg im Stauraum wird. Der Schwellenwert liegt deshalb bei Stauanlagen mit Klappen (Fall 1) höher.

Für beide Fälle wird jeweils der maximal erreichte Pegelmanstieg im Stauraum mit dem Volumen und der Abflussspitze der eingehenden Ereignisganglinien verglichen. Wir stellen dies mit Konturplots dar, bei denen die Pegelmanstiege als Kontur in ein Diagramm mit Abflussspitze (y-Achse) und Ereignisvolumen (x-Achse) eingetragen werden. Die Interpolation für die Konturlinien wurde über eine loess-Funktion berechnet, d. h. über eine lokale Regressionsanpassung eines Polynoms basierend auf einem Regressionsmodell zwischen Pegelmanstiegen, Volumina und Abflussspitzen. Abhängig von der Dichte der Punkte sind daher gewisse Bereiche des Regressionsmodelles unsicherer. Um diese Bereiche möglichst klein zu halten, haben wir eine konvexe Hülle von 1.5 mal der äussersten Datenpaare von Volumen und Abflussspitze aus unserem Datensatz für die Maximale Inter- und Extrapolation gewählt.

Die Abschätzung der maximalen Pegelmanstiege geschah unter sehr vereinfachten Annahmen und dient lediglich zur qualitativen, relativen Evaluation der entwickelten Methoden. Die abgeschätzten Pegelmanstiege sind in quantitativer, absoluter Hinsicht nicht belastbar. Sie können daher in keiner Weise zur Beurteilung der Sicherheit der betrachteten Stauanlagen dienen.

#### **5.2.1. Fall 1: Stauanlage mit Klappen mit Verwendung eines anlagenspezifischen Schwellenwerts**

Zur Evaluierung der Methode wird der Zufluss zur Stauanlage Rossens untersucht, deren Zuflusszeitreihe sich aus den Zuflüssen zum Greyerzersee und der Wasserbilanz der Seefläche (vgl. Tabelle 1) zusammensetzen lässt. Das Retentionsvolumen der Stauanlage ist gross, und die Simulationen weisen keine Oszillationen auf, da die Ganglinie vor Regulierung durch die Stauanlage betrachtet wird.

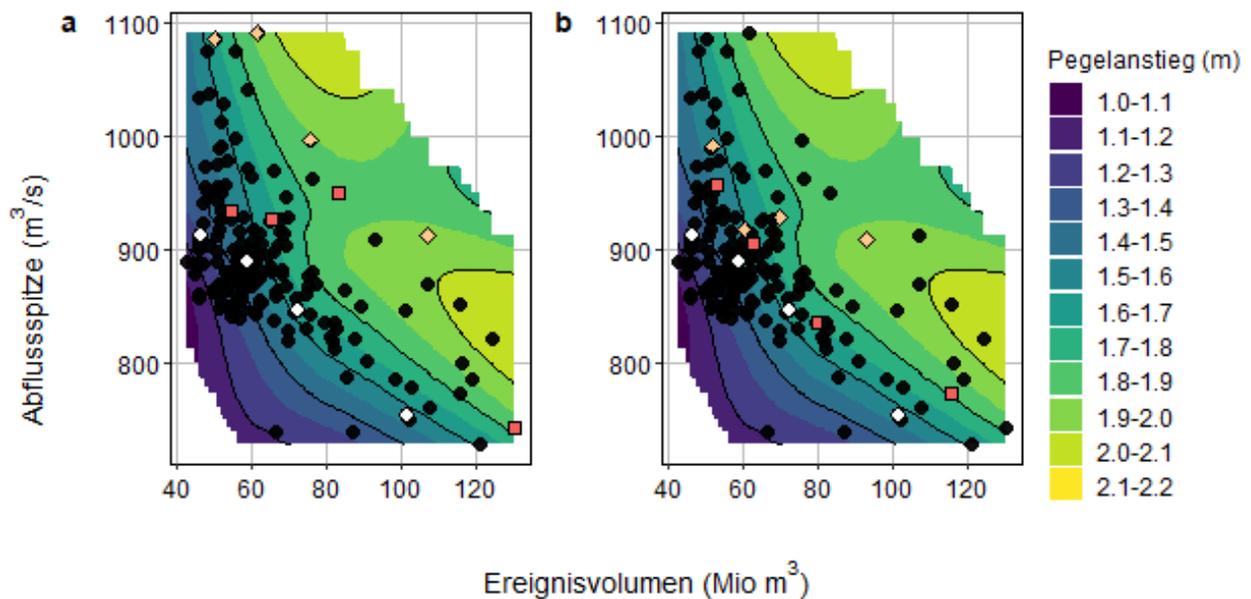
Um die Pegelmanstiege im Stauraum abzuschätzen, wurden Annahmen zum Stauraumvolumen und zur Entlastungskapazität als Funktion des Pegelstandes getroffen. So wurde angenommen, dass die Hochwasserentlastungsklappe geschlossen bleibt und die beiden Grundablässe geöffnet sind. Die hier getroffenen Annahmen dienen lediglich der Evaluierung der entwickelten Methode und können nicht für einen Sicherheitsnachweis verwendet werden. Als Eingabe für die Berechnungen wurden die Hochwasserganglinien an der Stauanlage Rossens verwendet.

Auf diese Weise kann evaluiert werden, ob die statistisch beste Clusteraufteilung auch sinnvoll für die Beurteilung der Hochwassersicherheit einer Stauanlage ist. Für die Sicherheitsabschätzung ist eine Abdeckung der ungünstigen Pegelmanstiege ausschlaggebend. Dies wird in Abbildung 6 am Beispiel des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000 für die Anlage Rossens mit einem angenommenen anlagenspezifischen Schwellenwert von 675 m<sup>3</sup>/s visualisiert. Die Ergebnisse für die Anlage Rossens für die anderen Jährlichkeitsbereiche können im Appendix 11.4 eingesehen werden.

Die Koordinaten der repräsentativen Ganglinien (Mittellinie pro Cluster, weisse Punkte) sind gut verteilt und liegen an dichten Stellen in der Punktwolke aller möglichen Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches (schwarze Punkte). Allerdings sieht man auch, dass zwar einige ungünstigere Fälle erfasst sind, nicht jedoch die ungünstigsten, welche für einen Sicherheitsnachweis besonders interessant wären (Abbildung 6 a). Mit Auswahl der grössten Volumenergebnisse im Cluster erhält man zusätzlich die dunkelorange angezeigten Quadrate in Abbildung 6 b und mit den grössten Spitzenereignissen ergeben sich die hellorange dargestellten Rauten. Die grössten Spitzenereignisse sind oft diejenigen, welche als Ausreisserganglinie im funktionellen Boxplot deklariert wurden.

Für eine repräsentativere Abdeckung der ungünstigsten Fälle ohne Einfluss der Ausreisser wurden die Ereignisse nur innerhalb der 50%-Zentralregion (blaues Band im funktionellen Boxplot) ausgewählt.

Weil die Ereignisse innerhalb der 50%-Zentralregion liegen – also in einem Bereich grösserer Datentiefe –, ergibt sich eine robustere und repräsentative Auswahl (Abbildung 6 b) sowohl der grössten Volumenergebnisse also auch der grössten Spitzenereignisse. Diese Auswahl an Ganglinien bezieht also sowohl die beste statistische Auswahl (beste Cluster nach Schattenwerten) als auch eine anwenderbezogene Auswahl (d. h. bezüglich grosser Volumen- bzw. Spitzenereignisse) mit ein.



**Abbildung 6** Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem anlagenspezifischen Schwellenwert ( $575 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Anzahl Cluster wurde auf Basis von Schattenwerten bestimmt, und die entsprechenden Werte der Mittellinien jedes Clusters sind als weisse Punkte eingezeichnet. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=64$ ,  $n_2=38$ ,  $n_3=48$ ,  $n_4=26$ . Die Werte aller Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches (hier HQ1'000) sind als schwarze Punkte gezeigt. Neben der Mittellinie sind in a) die grössten Volumenergebnisse pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse pro Cluster (hellorange Rauten) eingezeichnet, in b) die grössten Volumenergebnisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (hellorange Rauten). Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

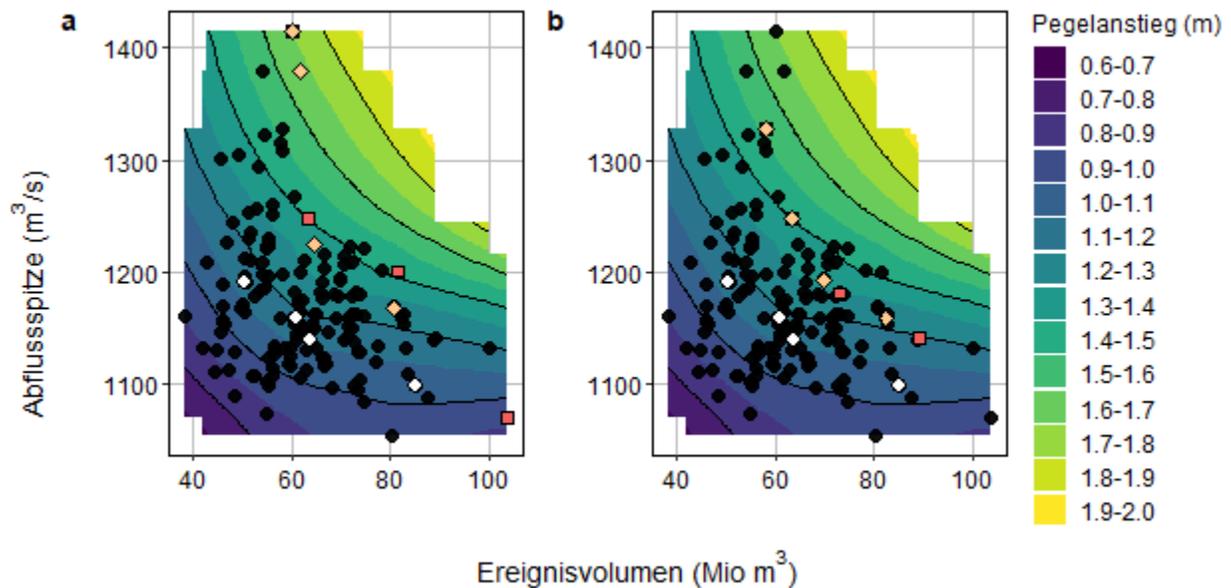
Dabei werden nicht einfach die ungünstigsten Fälle hinsichtlich zweier Charakteristika der Ganglinien verwendet, sondern die Auswahl geschieht innerhalb eines Bereiches grösserer Datentiefe, also eines repräsentativeren Bereiches (hellorange Rauten und dunkelorange Quadrate in Abbildung 6 b). Durch diese Auswahl kann man für diese Anlage mit den grössten Volumenergebnissen und mit den grössten Spitzenereignissen leicht in den Bereich ungünstigerer Pegelanstiege vorstossen.

Weiter wurde dieselbe Evaluation für die Zuflüsse zu den Stauanlagen Mühleberg und Schiffenen mit anlagenspezifischem Schwellenwert vorgenommen. Der anlagenspezifische Schwellenwert wurde bei der Stauanlage Mühleberg zu  $520 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei der Stauanlage Schiffenen zu  $864 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen. Dabei wurden wieder die besten Cluster hinsichtlich der Schattenwerte und die Hochwasserereignisse aus dem 50%-Zentralbereich mit den grössten Volumina sowie den grössten Abflussspitzen betrachtet.

Wie bei der Stauanlage Rossens wurde auch bei den Stauanlagen Schiffenen und Mühleberg angenommen, dass bei Hochwasserereignissen jeweils diejenige bewegliche Ablass- oder

Entlastungsvorrichtung verschlossen bleibt, welche die grösste Kapazität aufweist (sog. «n-1»-Regel bei «n» beweglichen Ablass- und Entlastungsvorrichtungen).

Die Stauanlage Schiffenen hat drei Überfälle mit Klappen und vier Grundablässe. Bei der Retentionsberechnung für die Hochwasserereignisse wurde angenommen, dass eine der insgesamt drei Klappen nicht zur Verfügung steht.



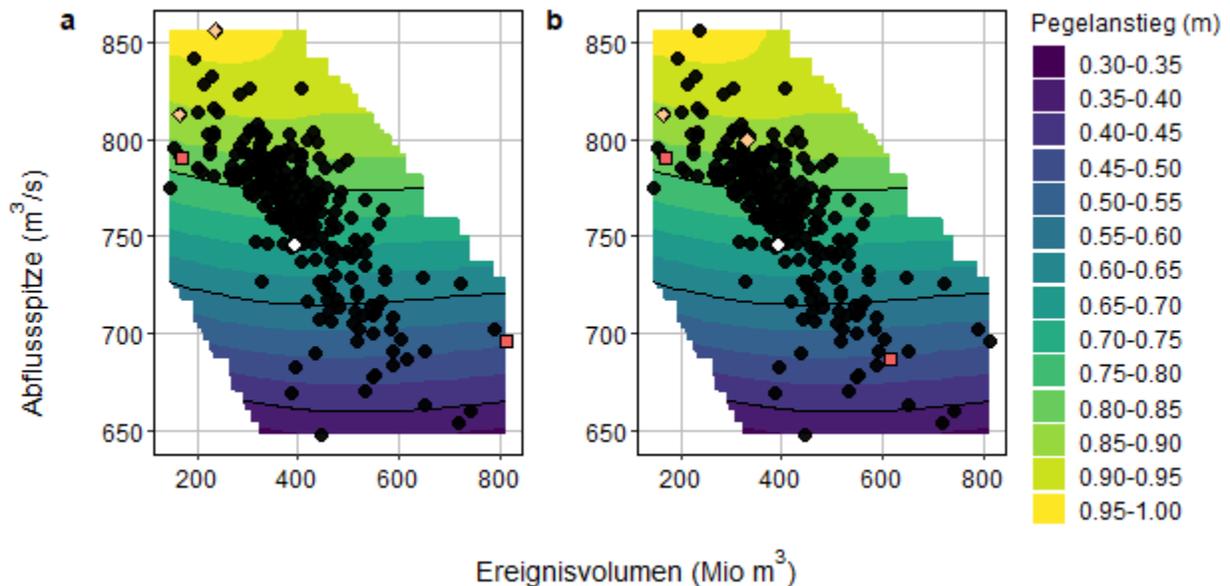
**Abbildung 7** Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Schiffenen mit einem anlagenspezifischen Schwellenwert ( $864 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Anzahl Cluster wurde auf Basis von Schattenwerten bestimmt und die entsprechenden Werte der Mittellinien jedes Clusters sind als weisse Punkte eingezeichnet. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=52$ ,  $n_2=16$ ,  $n_3=53$ ,  $n_4=35$ . Die Werte aller Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches (hier  $HQ1'000$ ) sind als schwarze Punkte gezeigt. Neben der Mittellinie sind in a) die grössten Volumenereignisse pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse pro Cluster (hellorange Rauten) eingezeichnet, in b) die grössten Volumenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (hellorange Rauten). Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

Die besten Cluster hinsichtlich der Schattenwerte waren bei der Anlage Schiffenen statistisch gut verteilt. Sie decken jedoch nicht diejenigen Ereignisse mit ab, die zu den ungünstigsten Pegelanstiegen führen (Abbildung 7). Durch den Einbezug der Ereignisse mit dem grössten Volumen in der 50%-Zentralregion konnte in diesem Fall die Abdeckung der ungünstigeren Pegelanstiege verbessert werden, wobei die Punkte aus der 50%-Zentralregion den absolut grössten ähnlich sind (Abbildung 7). Bei den grössten Ereignissen bezüglich des Volumens und der Spitze (absolut und in der 50%-Zentralregion) überlappen sich die Punkte, d. h. einige Ereignisse sind sowohl die grössten bezüglich des Volumens als auch der Spitze. Auch hier sind die absolut grössten Spitzenereignisse pro Cluster (hellorange Rauten in Abbildung 7 a) im funktionellen Boxplot teilweise als Ausreisserganglinie deklariert.

Die Stauanlage Mühleberg hat sechs Überfälle mit Klappen und einen Grundablass. Hier wurde angenommen, dass der Grundablass nicht zur Verfügung steht. Für die Anlage Mühleberg ergaben sich nur zwei beste Cluster hinsichtlich der Schattenwerte (Abbildung 8), welche statistisch betrachtet

klar getrennt ausfallen (Achtung, in diesem Fall ist einer der Mittellinien identisch mit dem grössten Volumenergebnis und der weisse Datenpunkt wird durch die hellorange Raute abgedeckt).

Ein Cluster umfasst Ereignisse mit besonders hohen Spitzen. Beim Evaluationsplot der Stauanlage Mühleberg (Abbildung 8) erscheint die Punktwolke (hier vergrössert gezeigt) im Vergleich zu den Evaluationsplots der Anlagen Rossens (Abbildung 6) und Schiffenen (Abbildung 7) sehr kompakt. Die Mittellinie deckt deshalb die Gesamtheit der Punktwolke relativ gut ab, nicht aber die für die Sicherheitsbeurteilung ungünstigsten Fälle. Die zusätzlichen Ganglinien für die grössten Volumen brachten hier keine Verbesserung (Abbildung 8, dunkelorange Punkte), wohl aber die grössten Spitzenereignisse, welche weiter in den Bereich ungünstigerer Pegelanstiege vorstossen.



*Abbildung 8 Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Mühleberg mit einem anlagenspezifischen Schwellenwert ( $520 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die Anzahl Cluster wurde auf Basis von Schattenwerten bestimmt und die entsprechenden Werte der Mittellinien jedes Clusters sind als weisse Punkte eingezeichnet. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=235$ ,  $n_2=4$ . In diesem Fall ist einer der Mittellinien identisch mit dem grössten Volumenergebnis. Die Werte aller Ganglinien des Jahresbereiches (hier HQ1'000) sind als schwarze Punkte gezeigt. Neben der Mittellinie sind in a) die grössten Volumenergebnisse pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse pro Cluster (hellorange Rauten) eingezeichnet, in b) die grössten Volumenergebnisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (hellorange Rauten). Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.*

### 5.2.2. Fall 2: Stauanlage mit freiem Überfall mit Verwendung eines Schwellenwertes aus Hochwasserstatistik (HQ10)

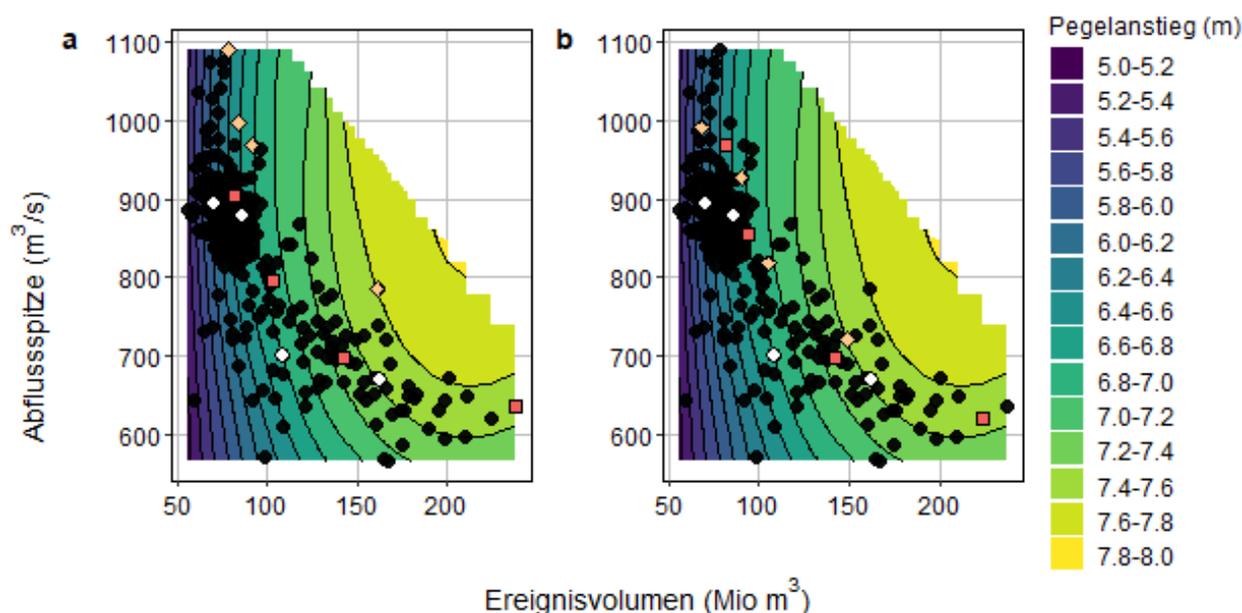
Da alle durch die Simulationen von EXAR abgedeckten Anlagen bewegliche Organe zur Hochwasserentlastung haben, wurde die Evaluation der Methodik für Anlagen ohne bewegliche Organe (Fall 2) mithilfe einer hypothetischen Anlage vorgenommen. Hierzu wurde die Entlastungskapazität der Stauanlage Rossens so verändert, dass diese einem freien Überfall entspricht. Als Eingabe für die Berechnungen wurden die simulierten Zuflussganglinien zur Stauanlage Rossens verwendet.

Der Schwellenwert zur Extraktion der Ereignisse wurde über die univariate Hochwasserstatistik (Abflussspitze) definiert; in diesem Projekt wurde konkret das HQ10 (entspricht in diesem Fall

423 m<sup>3</sup>/s) verwendet. Die Wahl des HQ10 basiert auf einer Parameterstudie des BFE für bestehende alpine Anlagen und deren Reaktionsverhalten bei Hochwasser unterschiedlicher Wiederkehrperioden.

Wie beim Fall 1 sind auch beim Fall 2 die Cluster gut in der Punktwolke verteilt (Abbildung 9 a). Es wurde aber auch ersichtlich, dass die ungünstigeren Fälle (angezeigt über die Konturlinien der Pegelanstiege) stark vom Ereignisvolumen abhängen. Ist diese Beziehung bekannt, kann man auch die Ganglinie mit dem grössten Volumen extrahieren, um die absolut ungünstigsten Fälle aus den Clustern eines Jährlichkeitsbereiches mit in Betracht zu ziehen (Abbildung 9 b). Analog kann die Ganglinie mit der maximalen Abflussspitze extrahiert werden, wenn die Abflussspitze dominanten Einfluss auf ungünstige Pegelanstiege hat.

Im Fall der Ereignisdefinition über den Schwellenwert HQ10 konnte die Auswahl der Ereignisse mit der zusätzlichen Berücksichtigung der grössten Volumenereignisse pro Cluster innerhalb der 50%-Zentralregion hin zu ungünstigeren Pegelanstiege verbessert werden. Ziel ist dabei, die ungünstigsten Hochwasser innerhalb des Datensatzes zu finden, wobei aber selbstverständlich noch ungünstigere (d. h. grössere) Hochwasser ausserhalb des Datensatzes nicht abgedeckt sind.



**Abbildung 9** Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der hypothetischen Stauanlage Rossens mit freiem Überfall, unter Verwendung des HQ10 als Schwellenwert. Die Anzahl Cluster wurde auf Basis von Schattenwerten bestimmt und die entsprechenden Werte der Mittellinien jedes Clusters sind als weisse Punkte eingezeichnet. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=53$ ,  $n_2=95$ ,  $n_3=65$ ,  $n_4=40$ . Die Werte aller Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches (hier HQ1'000) sind als schwarze Punkte gezeigt. Neben der Mittellinie sind in a) die grössten Volumenereignisse pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse pro Cluster (hellorange Rauten) eingezeichnet, in b) die grössten Volumenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (dunkelorange Quadrate) sowie die grössten Abflussspitzenereignisse der 50%-Zentralregion pro Cluster (hellorange Rauten). Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

Die Ergebnisse der beiden Evaluationen könnten sich ändern, wenn der Schwellenwert zur Ereignisauswahl nach oben oder unten verschoben würde oder die Anlage eine andere Retentions- oder Entlastungskapazität hätte. Je nach Schwellenwert werden mehr oder weniger Hochwasserereignisse mit geringerer Abflussspitze jedoch grösserem Volumen berücksichtigt (siehe Appendix 11.5 und 11.6). Je nach Retentions- oder Entlastungskapazität ändern sich die

Pegelanstiege. Zum Beispiel verschiebt sich der Bereich der maximalen Pegelanstiege (d. h. der ungünstigsten Ereignisse) in Bereiche anderer Kombinationen von Spitzen und Volumen (siehe Appendix 11.7).

### **5.2.3. Fazit Evaluation der Methode hinsichtlich der Anwendung zur Beurteilung der Sicherheit von Stauanlagen**

Je nach Entlastungs- und Retentionskapazität der Stauanlage ergeben sich die ungünstigsten Pegelanstiege für andere Hochwasserereignisse und Cluster. Das Clustering (und die Berücksichtigung weiterer Ereignisse) kann als robust angesehen werden, wenn es gelingt für verschiedene Stauanlagen mit unterschiedlichen Entlastungs- und Retentionskapazität mit derselben Methode die Gesamtheit der verschiedenen möglichen Pegelanstiege (Punktwolken) zu erfassen.

Die besten Cluster nach Schattenwerten decken die Punktwolken zusammen mit den grössten Volumen bzw. Spitzenereignissen aus der 50%-Zentralregion gut ab. Dieses Vorgehen erlaubt es, auch die Ereignisse, welche zu ungünstigen Pegelanstiege führen, miteinzubeziehen.

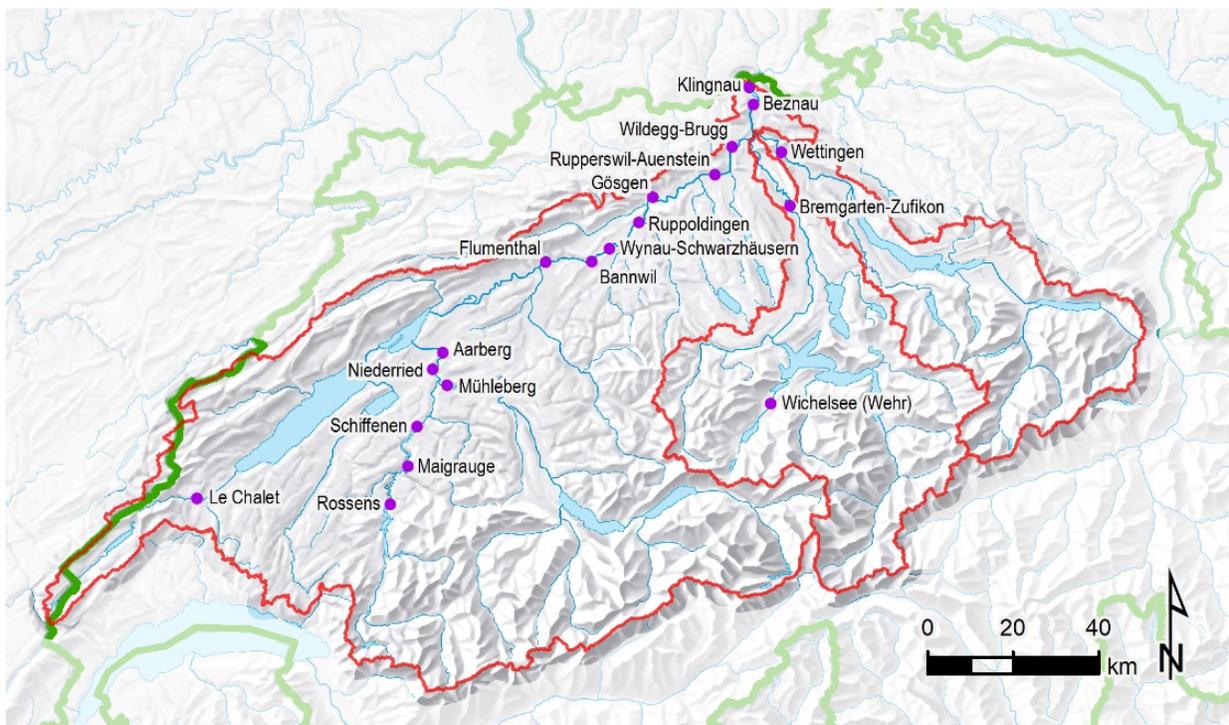
Die Wahl eines anlagenspezifischen Schwellenwertes für die Ereignisauswahl erlaubt es, nur diejenigen Ereignisse miteinbeziehen, welche für die Sicherheitsbeurteilung einer Stauanlage relevant sind. Der dadurch verkleinerte Datensatz kann genauer durch die entwickelte Methode beschrieben werden. Appendix 11.5 zeigt jedoch, dass die Methode auch bei einem tiefer gewählten Schwellenwert nach wie vor eine repräsentative und für Sicherheitsüberprüfungen robuste Auswahl von Ganglinien ermöglicht. Wird der Schwellenwert höher als der anlagenspezifische Schwellenwert gewählt, so besteht die Gefahr, dass für die Stauanlage relevante grossvolumige Hochwasserereignisse aus der Analyse ausgeschlossen werden.

Für eine einheitliche und allgemeingültige Methodik wäre es vorteilhaft, quantilsbasierte und somit anlagenunabhängige Schwellenwerte zu verwenden, welche über ein Hochwasser mit bestimmter Wiederkehrperiode definiert sind. Wir mussten jedoch feststellen, dass die Schwellenwerte bei den Stauanlagen Rossens, Schiffenen und Mühleberg nicht einem Hochwasser einheitlicher Wiederkehrperiode zugeordnet werden konnten. So war bei der Anlage Mühleberg das HQ10 am nächsten am anlagenspezifischen Schwellenwert, bei der Anlage Rossens das HQ50 und bei der Anlage Schiffenen das HQ200. Allgemeingültige Hochwasserkennwerte als Ausgangspunkt für die Schwellenwerte konnten also in diesem Projekt nicht gefunden werden.

## **6. Anwendung der univariaten Methode für Wehre und einzelne Talsperren**

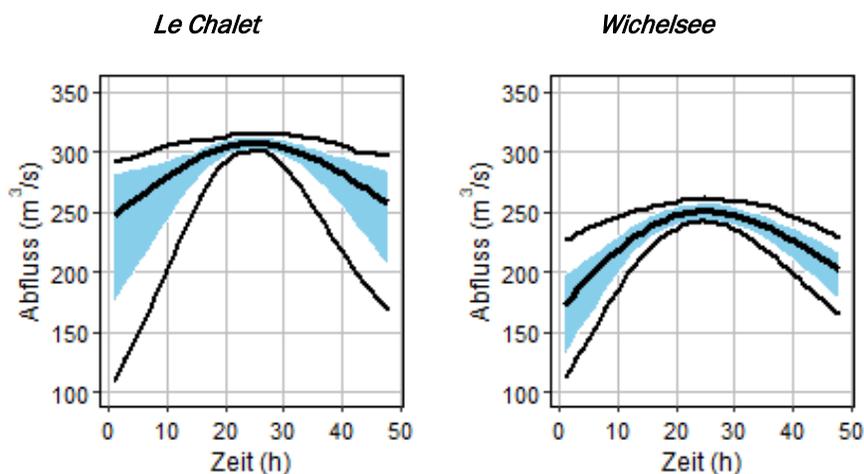
### **6.1. Anwendung und Resultate**

Für die Wehranlagen und auch für einzelne Talsperren ist eine univariate Analyse bezüglich Abflussspitze ausreichend, da aufgrund der geringen Retentionsvolumina und der hohen Abflüsse alleinig die Hochwasserspitze für die Hochwassersicherheit der Stauanlage massgebend ist. Die univariate Analyse folgt der Anlagenkaskade in Abbildung 10. Weil sich die Scharen der Hochwasserganglinien mit Ausrichtung auf die Abflussspitze sehr ähnlich sind, konnte bei der Anwendung der univariate Methode meist auf ein Clustering verzichtet werden. Die funktionellen Boxplots sind aus je 145 Ganglinien für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 berechnet.



**Abbildung 10 Überblick zur Lage und Abfolge der im Projekt betrachteten Stauanlagen.**

Entsprechend der Stauanlagenkaskade im Einzugsgebiet der Aare (Abbildung 10) wurden die funktionellen Boxplots für einzelne Gruppen von Stauanlagen entlang verschiedener Gewässerabschnitte betrachtet.



**Abbildung 11 Funktionelle Boxplots der beiden Anlagen Le Chalet und Wichelsee für die Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000.**

Die univariaten funktionellen Boxplots der Anlagen Le Chalet und Wichelsee zeigen beide eine 50%-Zentralregion recht eng um die Mittellinie. Mit zunehmender zeitlicher Entfernung von der Spitze werden sowohl die 50%-Zentralregion wie auch der Bereich zwischen den Whiskerlinien breiter. Dies ist bei Le Chalet stärker ausgeprägt als bei der Anlage Wichelsee.

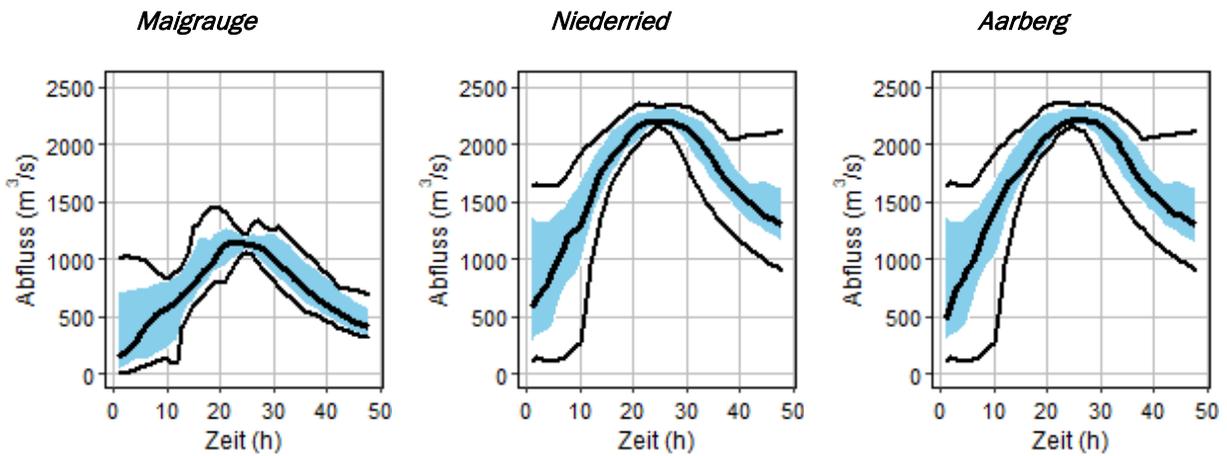
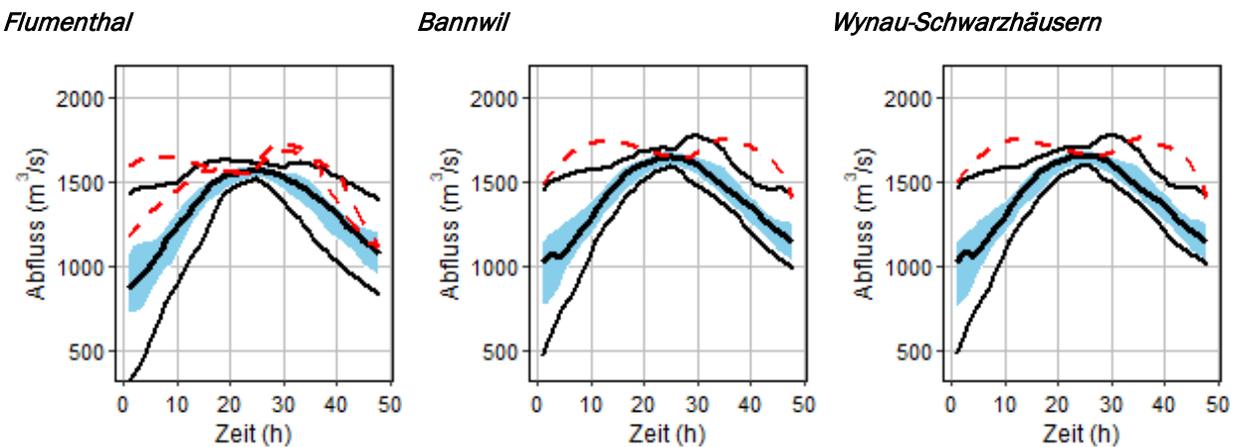
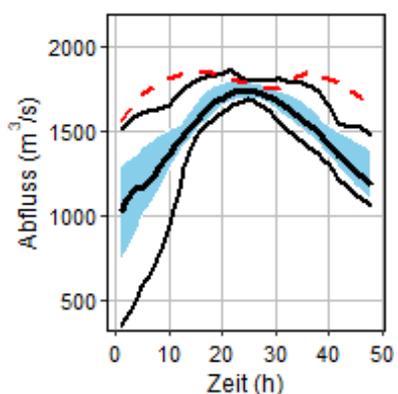


Abbildung 12 Funktionelle Boxplots für die Stauanlagen Maigrauge, Niederried und Aarberg für die Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000.

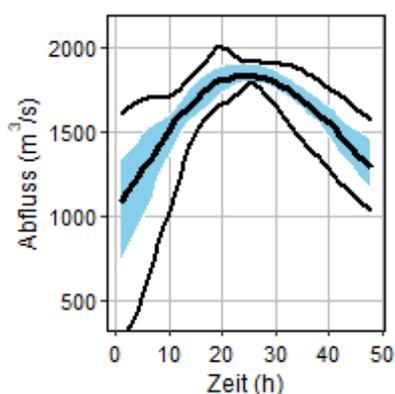
Die Stauanlagen Maigrauge, Niederried und Aarberg (Abbildung 12) können als Wehre betrachtet werden. Wichtig sind jeweils die Zuflüsse aus den stromaufwärts gelegenen Stauanlagen Rossens, Schiffenen und Mühleberg, welche die ankommenden Hochwasserganglinien mitformen. Dies sieht man an der Änderung der typischen Form der Hochwasserganglinien im Jährlichkeitsbereich HQ1'000. So steigt die repräsentative Ganglinie bei der Stauanlage Maigrauge aufgrund des dämpfenden Einflusses der Stauanlage Rossens etwas flacher an und fällt flacher ab, als dies bei den Stauanlagen Niederried und Aarberg der Fall ist.



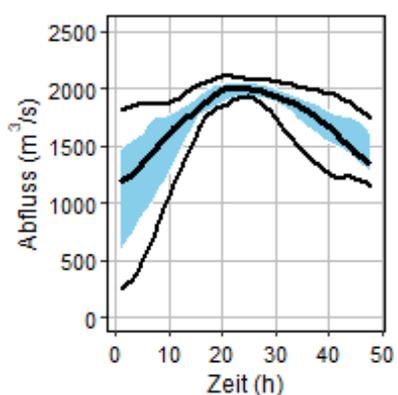
*Ruppoldingen*



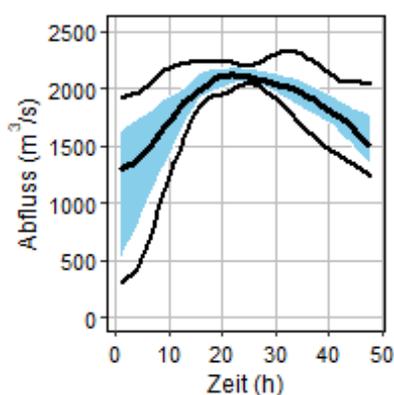
*Gösgen*



*Ruppertswil-Auenstein*



*Wildegg-Brugg*

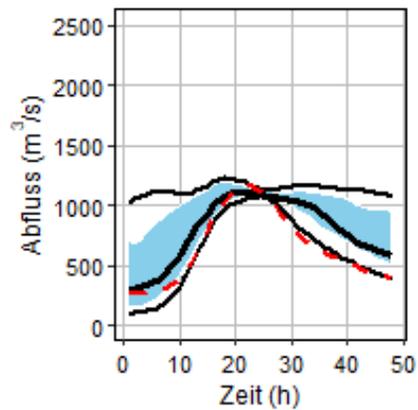


**Abbildung 13 Funktionelle Boxplots an den Wehren Flumenthal bis Wildegg-Brugg für die Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000. Ruppertswil-Auenstein und Wildegg-Brugg haben eine andere y-Achsenkalierung.**

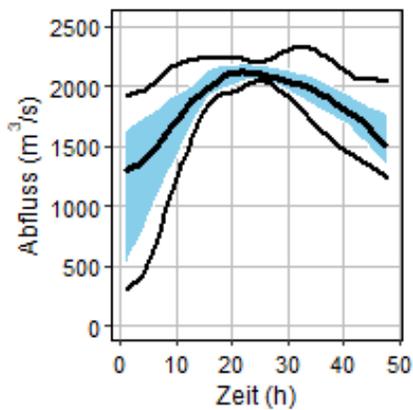
Auch für den Abschnitt Flumenthal bis Gösgen ergaben sich mit der univariaten Methode sehr klar definierte funktionelle Boxplots (Abbildung 13). Die typischen Hochwasserganglinien im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 sind sich bei allen Anlagen sehr ähnlich, mit der grössten Variation (Breite blaues Band = 50%-Zentralregion) zu Beginn des ausgewählten Zeitfensters und mit sehr geringer Variation im Bereich der Abflussspitze. Ab der Stauanlage Gösgen finden sich in diesem Teil der Kaskade keine Ausreisserganglinien mehr. Die funktionellen Boxplots der Zuflüsse zum Ende der Kaskade zeigen, dass auch hier ein Ganglinientyp für die Jährlichkeitsklasse die Gesamtheit der Ganglinien gut zusammenfassen kann (Abbildung 14).



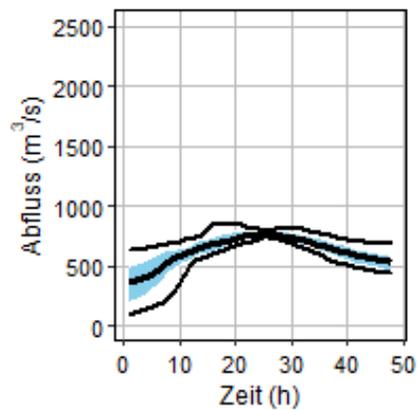
*Bremgarten*



*Wildegg-Brugg*

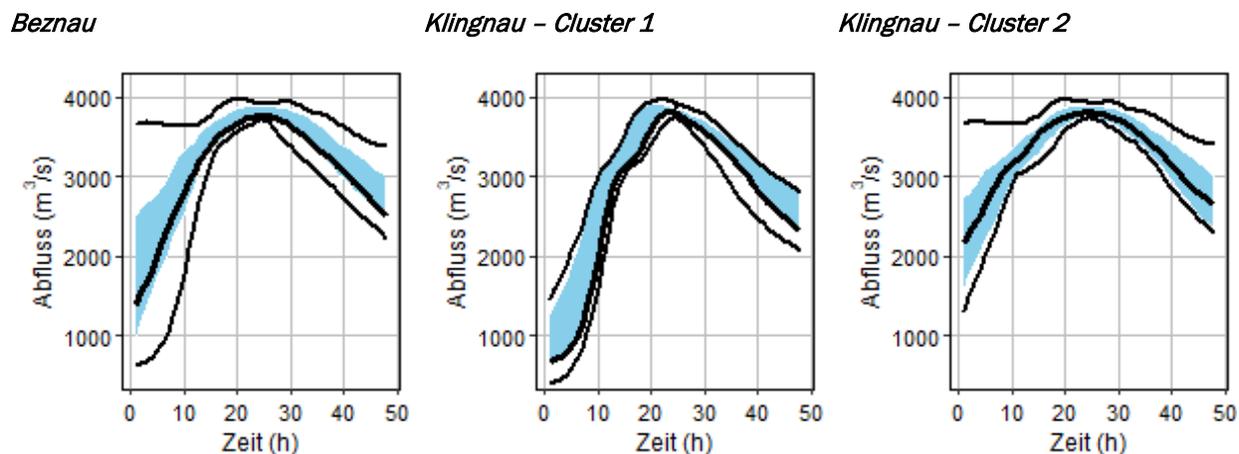


*Wettingen*



*Abbildung 14 Funktionelle Boxplots für die Anlagen Bremgarten, Wettingen und Wildegg-Brugg für die Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000.*

Die funktionellen Boxplots der beiden Anlagen Beznau und Klingnau am Ende der Kaskade (Abbildung 16) sind sich sehr ähnlich. Beim funktionellen Boxplot der Anlage Klingnau ergaben sich viele ähnlich geformte Ausreisserganglinien, weshalb hier wie bei der bivariaten Methodik ein Clusterschritt vorgeschaltet wurde. Damit werden für diese Anlage hier zwei typische Hochwasserganglinien für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 ausgewiesen.



**Abbildung 15 Funktionelle Boxplots der Anlagen Beznau und Klingnau (2 Cluster) für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000. Die y-Achse ist bei Beznau anders skaliert.**

## 6.2. Fazit

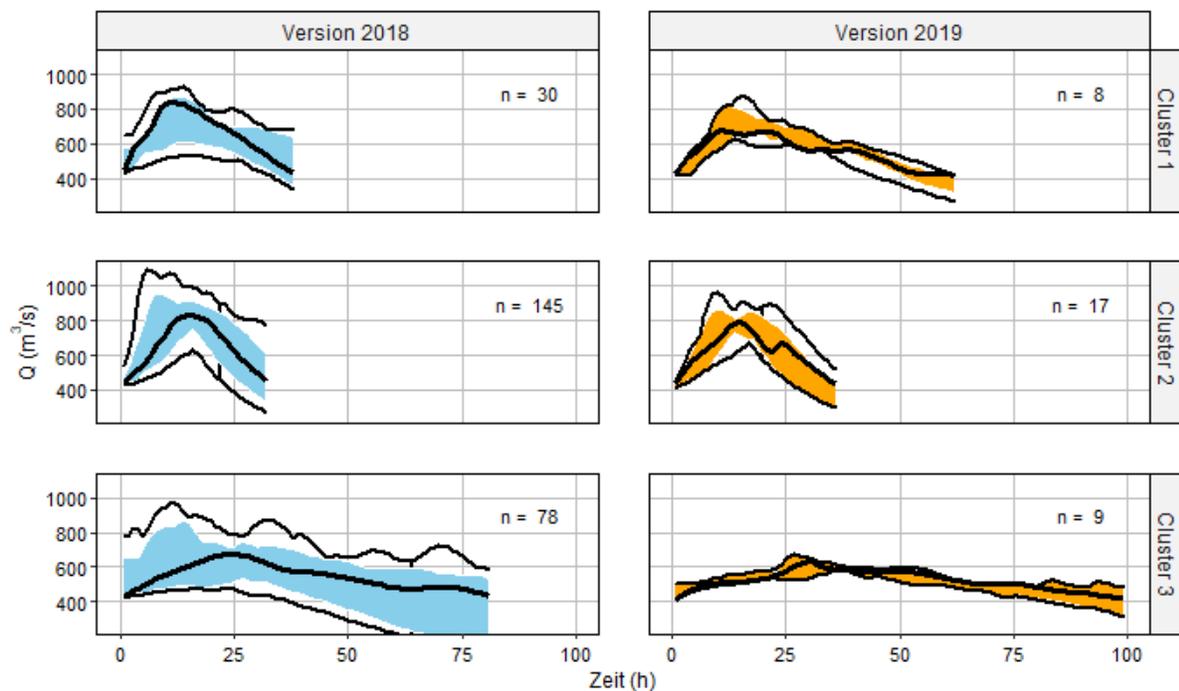
Die Anwendung der univariaten Auswertung für Wehre und Talsperren mit kleinem Retentionsvermögen funktionierte gut, und trotz vieler Ereignisse ergaben sich im betrachteten Jährlichkeitsbereich HQ1'000 enge funktionelle Boxplots, bei welchen die Mittellinie repräsentativ für die Kurvenschar ist. Wegen der Unsicherheiten in der Modellkette der EXAR-Simulationen sollten die absoluten Zahlen, v.a. Spitzenabflüsse bestimmter Wiederkehrperioden, mit Vorsicht bewertet werden. Die Ganglinien selbst stellen simulierte Abflussantworten auf meteorologische Szenarien dar, und diese Szenarien wurden in EXAR als realistisch eingeschätzt. Daher können die funktionellen Boxplots wertvolle Hinweise bezüglich der typischen Hochwasserganglinien bei den betrachteten Stauanlagen geben.

## 7. Beurteilung der Unterschiede zwischen den Simulationen der Versionen 2018 und 2019

In EXAR mussten 11'000 Jahre aus der simulierten Abflusszeitreihe von 300'000 Jahren ausgeschlossen werden, da im entsprechenden Datenpaket ein Anwendungsfehler auftrat. Zudem war es aus Zeitgründen nötig, die verbleibenden 289'000 Jahre anschliessend von der noch provisorischen Modellkonfiguration 2018 auf die definitive Modellkonfiguration 2019 zu korrigieren. Dazu wurde ein statistischer Ansatz gewählt, für den 10 % der gesamten verbleibenden Abflusszeitreihe von 289'000 Jahren sowohl in der Konfiguration 2018 wie auch in der Konfiguration 2019 simuliert und anschliessend verglichen wurden. Darauf basierend wurde ein von der Wiederkehrperiode abhängiger Korrekturfaktor für die jährlichen Spitzenabflüsse (HQ<sub>x</sub>) ermittelt, und die jährlichen Spitzenabflüsse der Simulationsresultate 2018 wurden schliesslich mit diesem Korrekturfaktor multipliziert, um daraus eine definitive Extremwertstatistik für die Spitzenabflüsse zu erhalten. Wie in Abschnitt 2 erläutert zeigte sich, dass die definitive Version 2019 für die Saane insgesamt etwa 10–15% höhere Spitzenabflüsse erzeugt als die provisorische Version 2018. Details dazu finden sich in Andres et al. (2021) und insbesondere in Staudinger und Viviroli (2020). In einer univariaten Auswertung der EXAR-Daten fallen die Abflussspitzen für Rossens und Schiffenen in der Version 2019 bis zu 4% höher aus als in der Version 2018, und die Abflussvolumina unterschieden sich im Mittel um etwa ±2–3%.

Im Rahmen der vorliegenden Studie haben wir die Unterschiede zwischen den Simulationen der Modellversionen 2018 und 2019 auch unter Anwendung von funktionellen Boxplots beurteilt. Dies geschah für die Stauanlagen Rossens und Schiffenen, welche für die Saane die relevanten Punkte innerhalb dieses Projektes darstellen und merkliche Unterschiede zwischen den Simulationsversionen aufwiesen.

Dazu verglichen wir zum einen die sich ergebenden funktionellen Boxplots für die Simulationen der beiden Modellversionen visuell. Dieser Vergleich erfolgte exemplarisch für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 (Abbildung 16 und Abbildung 18). Um die Vergleichbarkeit der Resultate zu erhalten, wurde für die Daten beider Modellversionen mit der optimalen Clusteranzahl bezüglich der Schattenwerte aus der Version 2019 gearbeitet. Zum anderen wurden pro Version die Abflussspitzen und Hochwasservolumen der repräsentativen Mittellinie aus den funktionellen Boxplots extrahiert und miteinander verglichen. Dieser Vergleich erfolgte für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300 und HQ1'000 (Abbildung 17 und Abbildung 19).



**Abbildung 16** Vergleich der Modellversion 2018 (links: funktionelle Boxplots mit 50%-Zentralregion in Blau) mit der Modellversion 2019 (rechts: funktionelle Boxplots mit 50%-Zentralregion in Orange) für die Anlage Rossens und den Jährlichkeitsbereich HQ1'000. *n* gibt jeweils die Anzahl der Ereignisganglinien an, aus welchen der funktionelle Boxplot erstellt wurde.

Obwohl die Formen bei den meisten Clustern bei Rossens im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 sehr ähnlich ausfallen (Abbildung 16), erreichen die funktionellen Boxplots der provisorischen Version 2018 doch leicht höhere Abflussspitzen (Abbildung 16, Cluster 1). Weil die Datengrundlage bei der provisorischen Version 2018 um einen Faktor 10 grösser ist, fallen die funktionellen Boxplots dort robuster aus. Wenn man nur die Spitzen und Volumina der jeweils repräsentativen Ereignisganglinie zwischen den beiden Versionen vergleicht, sind die augenscheinlichen Unterschiede jedoch nicht so gross (HQ1'000 in Abbildung 17). Neben dem Bereich HQ1'000 zeigt Abbildung 17 auch Werte für die Jährlichkeitsbereiche HQ100 und HQ300, beim Jährlichkeitsbereich HQ5'000 gab es bei der definitiven Version von 2019 nicht genügend Hochwasserganglinien für den Clusteralgorithmus.

Generell sieht man für Rossens in der definitiven Modellversion 2019 etwas geringere Abflussspitzenwerte für die Jährlichkeitsbereiche HQ100 und HQ1'000. Bezüglich Ereignisvolumen sind hingegen nur geringe Unterschiede auszumachen. Beim HQ300 ergeben sich bei der Version 2019 ein grösserer Wert für die Abflussspitze kleinvolumiger Ereignisse und grössere Volumina bei den Ereignissen mit kleiner Abflussspitze als für die provisorische Version 2018.

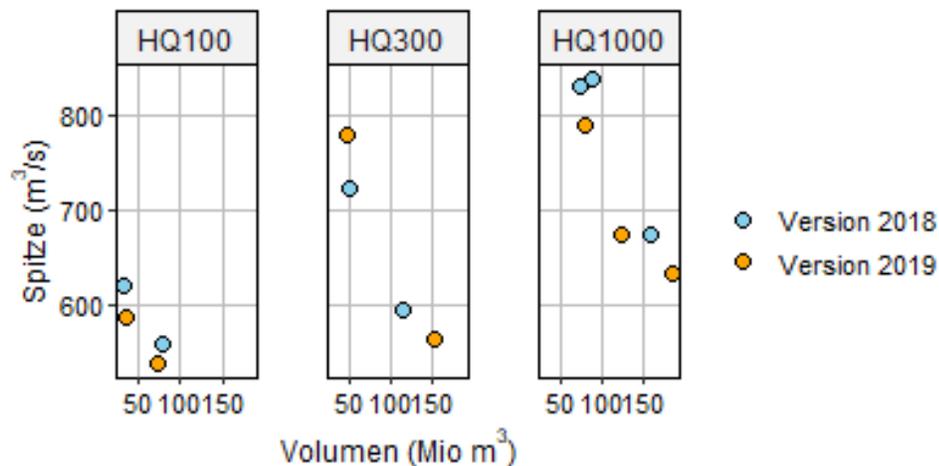


Abbildung 17 Vergleich der Modellversionen 2018 und 2019 bezüglich Abflussspitze und Hochwasservolumen für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300 und HQ1'000, Anlage Rossens. Die Datenpunkte wurden der Mittellinie der entsprechenden Cluster entnommen.

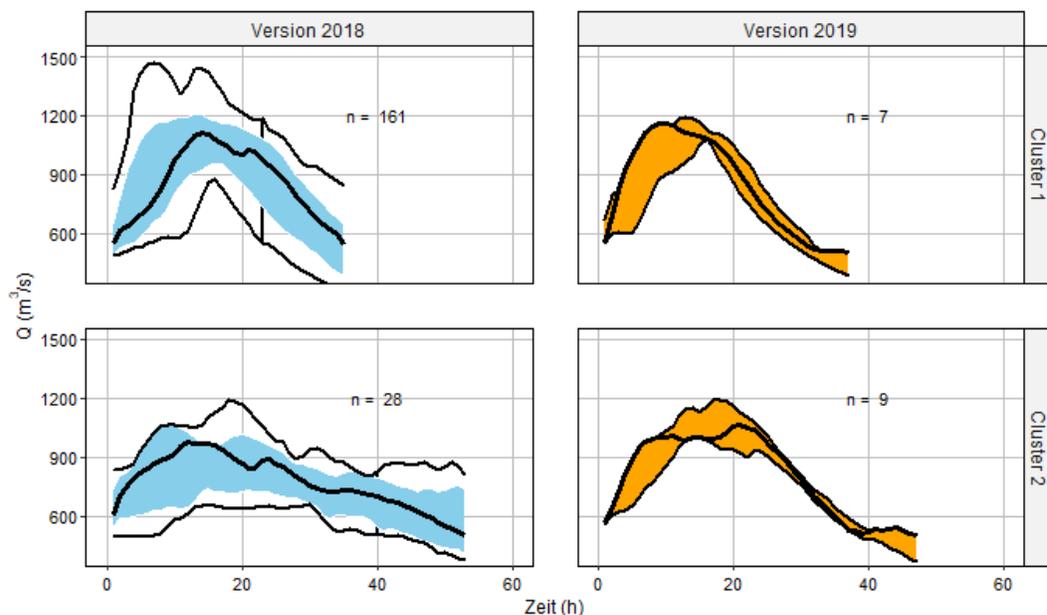
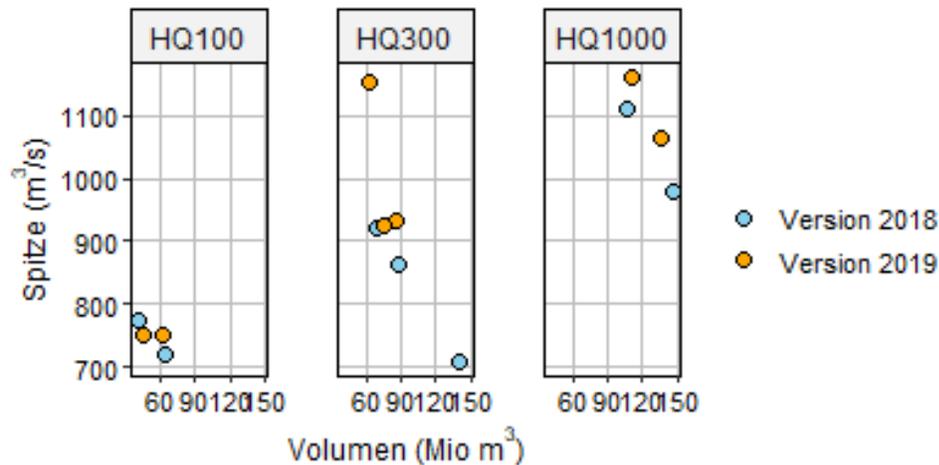


Abbildung 18 Vergleich der Modellversion 2018 (links: funktionelle Boxplots mit 50%-Zentralregion in Blau) mit der Modellversion 2019 (rechts: funktionelle Boxplots mit 50%-Zentralregion in Orange) für die Anlage Schiffenen. n gibt die Anzahl der Ereignisganglinien an, aus welchen der funktionelle Boxplot erstellt wurde.

Bei der Stauanlage Schiffenen (Abbildung 18) konnten im Jährlichkeitsbereich HQ1'000 für die definitive Version 2019 nur zwei Cluster als optimale Clusteranzahl gefunden werden. Generell sieht

man, dass in der Version 2019 deutlich weniger Ganglinien zur Berechnung der funktionellen Boxplots zur Verfügung stehen als bei der Version 2018.

Die Mittellinien der sich ergebenden funktionellen Boxplots für die Stauanlage Schiffenen unterscheiden sich zwischen den Versionen 2018 und 2019 vor allem für Cluster 2, bei welchem in der Version 2018 längere Ereignisse mit kleinerer Spitze als repräsentativ gefunden werden. Für die Jährlichkeitsbereiche HQ300 und HQ1'000 ergaben sich aus der Version 2019 repräsentative Ereignisse mit höheren Spitzen und im Falle von HQ300 grösseren Volumina als aus der provisorischen Version 2018 (Abbildung 19).



**Abbildung 19 Vergleich der Modellversionen 2018 und 2019 bezüglich Abflussspitze und Hochwasservolumen für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300 und HQ1'000, Anlage Schiffenen. Die Datenpunkte wurden der Mittellinie der entsprechenden Cluster entnommen.**

Der hier vorgenommene Versionsvergleich scheint nun demjenigen in EXAR teilweise zu widersprechen: Die Auswertungen im Rahmen von EXAR hatten gezeigt, dass die definitive Version 2019 für die Saanemündung und den Ausfluss der Anlage Rossens etwas höhere Abflussspitzen zeigt als die provisorische Version 2018. Hier zeigen die Unterschiede zwischen den Modellversionen 2018 und 2019 zumindest bei der Anlage Rossens in entgegengesetzte Richtung. Ein wichtiger Unterschied zwischen den beiden Versionsvergleichen ist jedoch, dass hier komplette Ganglinien verglichen wurden und nicht nur Jahresspitzen wie in EXAR geschehen. Diese Ganglinien wurden zudem geclustert und dabei auch auf repräsentative Mittellinien der resultierenden Cluster reduziert. Schliesslich wurden hier die Jährlichkeiten bivariat bestimmt und anschliessend im Rahmen von Jährlichkeitsbereichen ausgewertet, während der Fokus in EXAR auf der Abflussspitze einer bestimmten, exakten Jährlichkeit (univariat) lag.

Wenn man die funktionelle Auswertung beibehält und statt der repräsentativen Ganglinie (Mittellinie) alle Ganglinien der verschiedenen Jährlichkeitsbereiche zwischen den Versionen 2018 und 2019 vergleicht (Abbildung 20 und Abbildung 21), wird erkennbar, dass die Version 2019 hier vor allem in den höheren Jährlichkeitsbereichen (HQ5'000) grössere Abflussspitzen hat als die Version 2018. In den tieferen Jährlichkeitsbereichen finden sich für die Version 2019 teils tiefere Abflussspitzen als in der Version 2018, teils fallen die Spitzen sehr ähnlich aus.

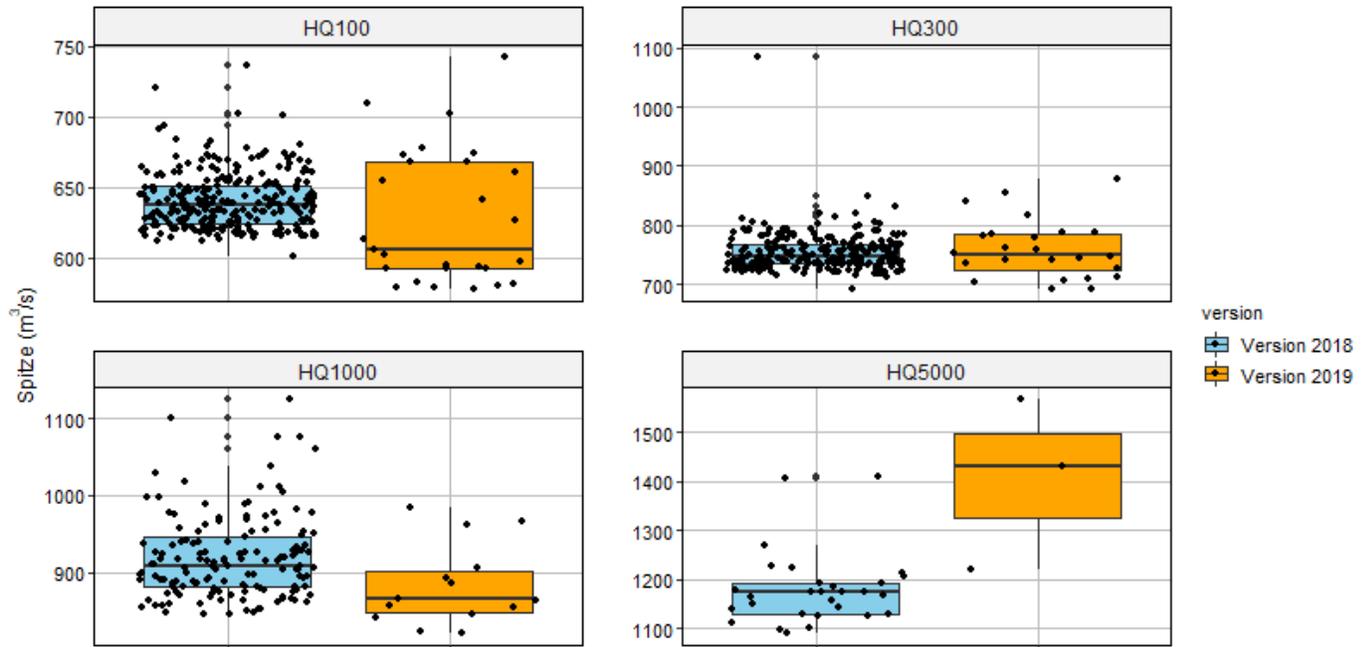


Abbildung 20 Auswertung aller Ganglinien der provisorischen Version 2018 und der definitiven Version 2019 bezüglich Spitzenabfluss für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300, HQ1'000 und HQ5'000, Anlage Rossens.

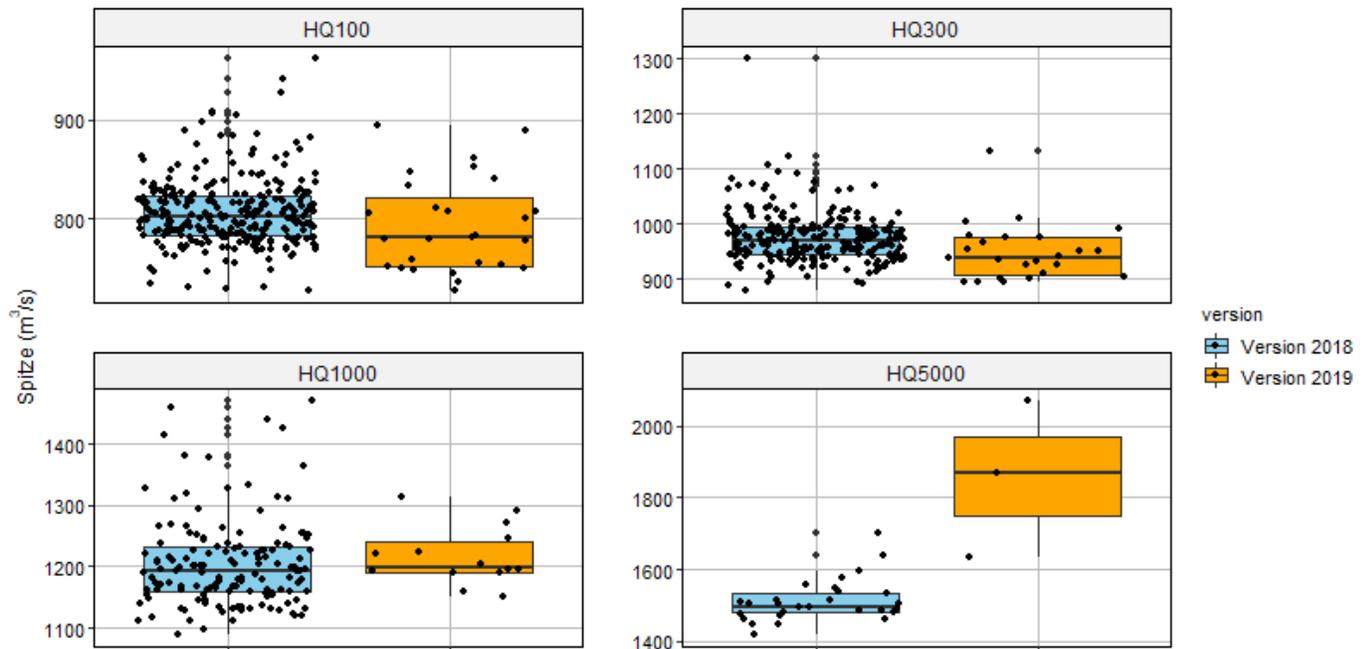


Abbildung 21 Auswertung aller Ganglinien der provisorischen Version 2018 und der definitiven Version 2019 bezüglich Spitzenabfluss für die Jährlichkeitsbereiche HQ100, HQ300, HQ1'000 und HQ5'000, Anlage Schiffenen.

## 8. Fazit

In diesem Projekt konnte eine Methode entwickelt werden, mit der typische Hochwasserganglinien für verschiedene Jährlichkeitsbereiche in funktionellen Boxplots zusammengefasst werden können. Aus diesen funktionellen Boxplots können einzelne realitätsnahe Ganglinien (z. B. Mittellinie, Ereignis mit grösster Spitze oder grösstem Volumen innerhalb der 50%-Zentralregion) extrahiert und schliesslich als Basis für Sicherheitsbeurteilungen an Stauanlagen verwendet werden. Der Vorteil im Vergleich zu bestehenden Methoden ist die bivariate Auswahl der Ereignisse und die Ausgabe realitätsnaher Ganglinien (hier aus der Langzeitsimulation). Dies ist ein wesentlicher Gewinn in Aussagekraft im Vergleich zu synthetischen Kurven, wie sie bisher mehrheitlich aus Schätzungen für Volumen und Spitze der Hochwasserereignisse konstruiert wurden. Die Verwendung einer Hochwasserganglinie, welche tatsächlich über prozessorientierte Ansätze simuliert wurde, verspricht eine realistischere Sicherheitsabschätzung.

Die Entwicklung der Methode war nur dank der sehr langen kontinuierlichen Simulationen möglich, welche aus dem Projekt EXAR vorliegen. Erst diese Datengrundlage ermöglichte die empirische Abschätzung von bivariaten Jährlichkeiten weit über den normalerweise erreichbaren Bereich von Wiederkehrperioden hinaus. Zu berücksichtigen ist dabei natürlich, dass die als Grundlage verwendeten Langzeitsimulationen ihrerseits mit Unsicherheiten behaftet sind, welche sich mit zunehmender Wiederkehrperiode vergrössern (siehe Abschnitt 2 sowie Andres et al. 2020).

Ein Vergleich von funktionellen Boxplots aus der provisorischen EXAR-Modellversion 2018 mit funktionellen Boxplots aus definitiven Modellversion 2019 ergab ähnliche Resultate, jedoch zeigten sich Unterschiede in Spitze und Volumen der repräsentativen Ganglinien. Diese Unterschiede sind vermutlich nicht allein auf die unterschiedlichen Parametrisierungen der Modellversionen 2018 und 2019 zurückzuführen. Vielmehr dürften die Unterschiede bis zu einem gewissen Grad wohl auch durch die unterschiedlich lange Simulationsreihe bedingt sein, welche die Auswahl der Mittellinie beeinflussen kann. Ausgehend von den hier und in EXAR gemachten Versionsvergleichen erscheint es insgesamt wenig ratsam, aus den vorliegenden Daten direkt einen Korrekturfaktor abzuleiten, da dieser grosse Unsicherheiten aufweisen würde.

Insgesamt können die hier erarbeiteten Resultate als eine erste Abschätzung repräsentativer Ganglinien verwendet werden, sind aber mit grosser Vorsicht zu interpretieren. Insbesondere gilt dies für die Anlagen im Saanegebiet, wo die Unterschiede zwischen der hier verwendeten Modellversion 2018 und der definitiven Modellversion 2019 am grössten ausfielen (vgl. Abschnitt 2). Vorsichtige Interpretation ist auch bei denjenigen Anlagen angezeigt, welche 1) nicht direkt durch einen Ausgabepunkt in EXAR abgedeckt sind und für welche hier eine einfache Zusammensetzung der Abflusssimulationen ohne Routing vorgenommen wurde, sowie 2) diejenigen, welche eine Einzugsgebietsfläche von weniger als 1'000 km<sup>2</sup> aufweisen (vgl. Tabelle 1). Zu berücksichtigen ist weiter, dass im Projekt „Extremhochwasser Schweiz“ nochmals lange kontinuierliche Simulationen für das Aaregebiet geplant sind. Dabei werden die in EXAR verwendeten Methoden gemäss aktuellem Stand des Wissens weiterentwickelt und die Datengrundlagen soweit von der Verfügbarkeit her möglich erweitert. Abweichungen von den Resultaten der EXAR-Modellversionen 2018 und 2019 sind daher wahrscheinlich.

## 9. Daten

Das BFE erhält für jede betrachtete Stauanlagen alle Endresultate sowie die als Grundlage für die Auswertung verwendeten Abflusszeitreihen in numerischer Form. Die Datenhaltung erfolgt durch das BFE.

Die Daten umfassen

- Repräsentative Ganglinien aus den funktionellen Boxplots für alle Anlagen und Jährlichkeitsbereiche: diese sind konkret die Mittellinie des funktionellen Boxplots jedes Clusters, sowie die maximalen Ganglinien bezüglich Volumen und Abflussspitze und die maximalen Ganglinien bezüglich Volumen und Abflussspitze innerhalb der 50%-Zentralregion.
- Eine Überblickstabelle für jede Anlage und je alle Jährlichkeitsbereiche mit Informationen zu Ereignis-ID, Abflussspitze, Volumen, geschätzter bivariater und univariater Jährlichkeit, Ereignisdauer, Auftretensmonat des Ereignisses, Clusterzugehörigkeit.
- Rohdaten, d. h. aus den EXAR-Simulationen zusammengesetzte Abflusszeitreihen für jede Anlage, sowie daraus ausgewählte Hochwasserganglinien für jede Anlage und jeden Jährlichkeitsbereich.

## 10. Ausblick

Im Zuge des 2020 angelaufenen Projektes „Extremhochwasser Schweiz“ werden die Methoden von EXAR in den nächsten Jahren weiterentwickelt, um Langzeitsimulationen für grosse Einzugsgebiete ( $\geq 1'000 \text{ km}^2$ ) in der gesamten Schweiz zu erstellen. Die davon erwarteten Resultate werden sich für das Aaregebiet leicht von den hier verwendeten unterscheiden, da a) der Wettergenerator neu aufgesetzt und methodisch verfeinert wird und b) die Modellparameter gemäss aktuellem Stand von Methoden und Daten aufdatiert werden. Die im vorliegenden Projekt erarbeitete Auswertungsmethode ist im Kontext der Resultate von „Extremhochwasser Schweiz“ wertvoll, da so das Bearbeiten einer grösseren Anzahl Stauanlagen mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Das Projekt „Extremhochwasser Schweiz“ wird über die geplanten Weiterentwicklungen auch kleine (ca.  $10\text{--}1'000 \text{ km}^2$ ) Einzugsgebiete abdecken können. Mit der im vorliegenden Projekt entwickelten Methode und ersten Tests für hypothetische Anlagen ohne bewegliche Organe wurde eine gute Grundlage geschaffen, mit welcher die neuen Simulationen ebenfalls im Hinblick auf die Stauanlagensicherheit ausgewertet werden können. Das Anpassen an die spezifischen Verhältnisse der alpinen Anlagen ist mit geringem Aufwand möglich. Die Anpassung betrifft die Wahl eines Schwellenwerts, welcher für die alpinen Anlagen sinnvoll ist, und in der Folge auch die Anzahl B-Splines, welche zur Beschreibung der sich ergebenden Ereignisse sinnvoll ist. Während der Fokus in „Extremhochwasser Schweiz“ auf Stauanlagen unter Bundesaufsicht liegt, ist das Erstellen von Simulationen für weitere Anlagen und eine entsprechende Auswertung über funktionelle Hydrographen von der Methodik her später möglich. Darüber hinaus sind die entwickelten Methoden grundsätzlich auch interessant für die Dimensionierung von wasserbaulichen Objekten wie etwa Hochwasserrückhaltebecken, Geschiebesperren und Geschiebesammlern, vorausgesetzt, dass deren Einzugsgebietsfläche mindestens  $10 \text{ km}^2$  beträgt und damit durch die in „Extremhochwasser Schweiz“ entwickelten Methoden abgedeckt ist.

## Referenzen

- Andres, N., Badoux, A. and Hegg, C.: Grundlagen Extremhochwasser Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate, Birmensdorf., 2021.
- BfE: Vollzugshilfe zur Stauanlagengesetzgebung betreffend den Bau und den Betrieb von Stauanlagen an der Aare unter direkter Bundesaufsicht., 2015.
- Bouveyron, C. and Jacques, J.: Model-based clustering of time series in group-specific functional subspaces, *Adv. Data Anal. Classif.*, 5(4), 281–300, doi:10.1007/s11634-011-0095-6, 2011.
- Brunner, M. I., Seibert, J. and Favre, A.-C.: Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation, *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 3(6), 819–833, doi:10.1002/wat2.1173, 2016.
- Brunner, M. I., Viviroli, D., Sikorska, A. E., Vannier, O., Favre, A. and Seibert, J.: Flood type specific construction of synthetic design hydrographs, *Water Resour. Res.*, 53(2), 1390–1406, doi:10.1002/2016WR019535, 2017.
- Brunner, M. I., Melsen, L. A., Newman, A. J., Wood, A. W. and Clark, M. P.: Future streamflow regime changes in the United States: assessment using functional classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(8), 3951–3966, doi:10.5194/hess-24-3951-2020, 2020.
- Chebana, F., Dabo-Niang, S. and Ouarda, T. B. M. J.: Exploratory functional flood frequency analysis and outlier detection, *Water Resour. Res.*, 48(4), doi:10.1029/2011WR011040, 2012.
- Chiou, J. M. and Li, P. L.: Functional clustering and identifying substructures of longitudinal data, *J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol.*, 69(4), 679–699, doi:10.1111/j.1467-9868.2007.00605.x, 2007.
- Dändliker, P., Darbre, G., Fuchs, H., Joos, B., Keller, Y., Lazaro, P., Rüesch, T., Schaepli, B., Schwager, M. and Zeimet, F.: Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen - Teil C2 Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung., BfE, 2018.
- Evin, G., Favre, A.-C. and Hingray, B.: Stochastic generation of multi-site daily precipitation focusing on extreme events, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(1), 655–672, doi:10.5194/hess-22-655-2018, 2018.
- García Hernández J, Paredes Arquiola J, Foehn A, R. B.: RS MINERVE – Technical Manual v2.7. For Software version 2.4.2.0., 2016.
- Jacques, J. and Preda, C.: Functional data clustering: A survey, *Adv. Data Anal. Classif.*, 8(3), 231–255, doi:10.1007/s11634-013-0158-y, 2014.
- James, G. M. and Sugar, C. A.: Clustering for sparsely sampled functional data, *J. Am. Stat. Assoc.*, 98(462), 397–408, doi:10.1198/016214503000189, 2003.
- Leisch, F.: Neighborhood graphs, stripes and shadow plots for cluster visualization, *Stat. Comput.*, 20(4), 457–469, doi:10.1007/s11222-009-9137-8, 2010.
- López-Pintado, S. and Romo, J.: On the concept of depth for functional data, *J. Am. Stat. Assoc.*, 104(486), 718–734, doi:10.1198/jasa.2009.0108, 2009.
- Nelson, R. B.: *An Introduction to Copulas*, 2nd Editio., edited by Springer, New York., 2006.
- Seibert, J. and Vis, M. J. P.: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(9), 3315–3325, doi:10.5194/hess-16-3315-2012, 2012.

- Staudinger, M. and Viviroli, D.: Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht A Projekt EXAR. Hydrometeorologische Grundlagen., Zürich., 2020.
- Ternynck, C., Alaya, M. A. Ben, Chebana, F., Dabo-Niang, S. and Ouarda, T. B. M. J.: Streamflow hydrograph classification using functional data analysis, *J. Hydrometeorol.*, 17(1), 327–344, doi:10.1175/JHM-D-14-0200.1, 2016.
- Yassouridis, C., Ernst, D. and Leisch, F.: Generalization, combination and extension of functional clustering algorithms: The R package fancy, *J. Stat. Softw.*, 85(9), 1–25, doi:10.18637/jss.v085.i09, 2018.

## 11. Appendix

### 11.1. Sensitivität der FDA bezüglich der Wahl der Anfangsbedingungen

Die für den Algorithmus gewählten Anfangsbedingungen beeinflussen die Ergebnisse. Dies betrifft namentlich das initiale Clustering, welche durch k-means, zufälliges Clustering oder hierarchisches Clustering festgelegt wird. k-means, liefert Ergebnisse, die der visuellen Zuordnung am besten entsprachen und wurde daher als Anfangsbedingung verwendet.

#### 11.1.1. B-Splines, Fourier

Die funktionelle Beschreibung der Ganglinien kann sowohl durch Fourierfunktionen als auch durch B-Splines erfolgen. Die Ganglinien können dabei als periodische Daten betrachtet werden (Ereignis, das bei einem Schwellenwert startet und wieder zu diesem zurückkehrt), und für diesen Datentyp ist grundsätzlich die Verwendung von Fourierfunktionen empfehlenswert. In bisherigen hydrologischen Anwendungen der funktionellen Datenanalyse wurden soweit uns bekannt jedoch B-Splines verwendet (Brunner et al., 2020; Chebana et al., 2012; Ternynck et al., 2016). Um die Eignung der beiden Ansätze zu prüfen, wurden in einem Test für die Stauanlage Rossens beide Möglichkeiten angewendet und anschliessend visuell überprüft. Dabei ergaben sich letztendlich (visuell) bessere Cluster für die Beschreibung mit B-Splines als mit Fourierfunktionen.

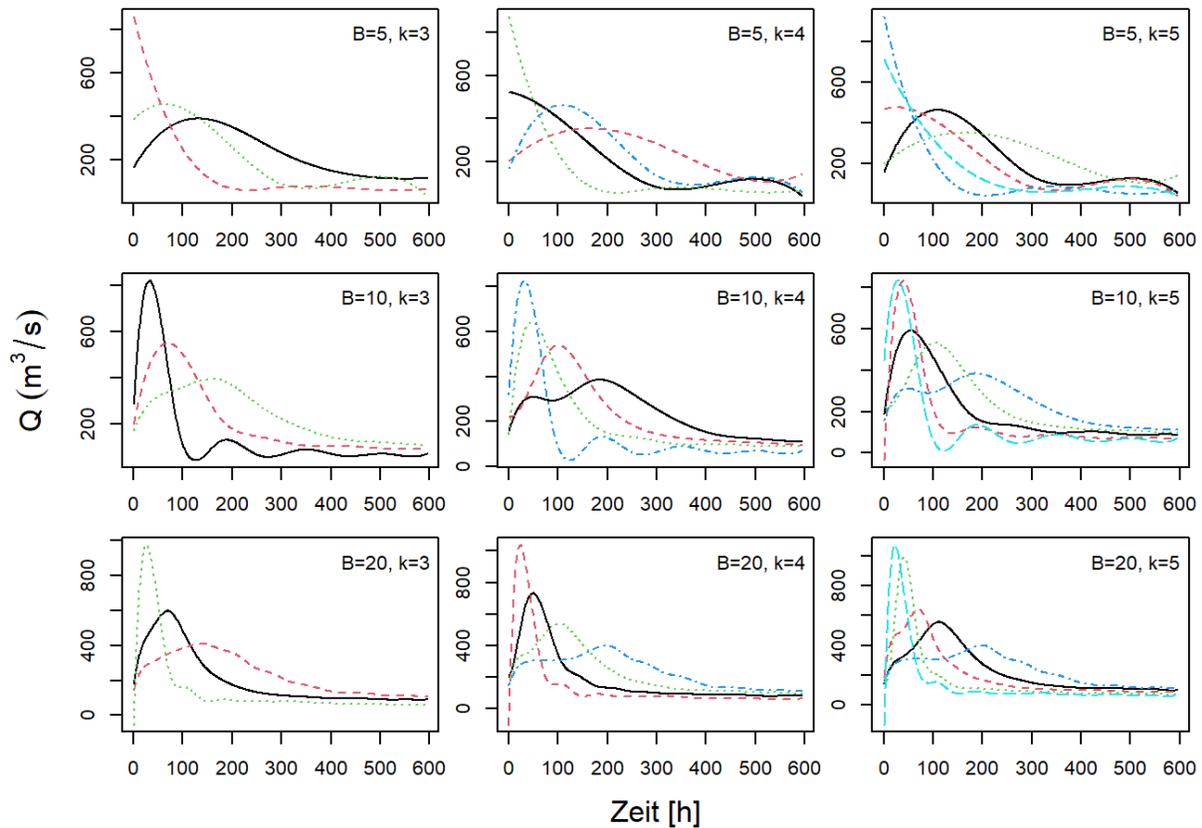
#### 11.1.2. Anzahl Funktionen zu Beschreibung

Die Auswahl der Anzahl B-Splines oder Fourierfunktionen ist äusserst wichtig, da die Funktionen die Ganglinien so beschreiben sollen, dass die wichtigen Charakteristika erfasst sind, aber nicht jede kleine Oszillation mitbewertet wird. Letzteres wäre vor allem hinsichtlich der Rechenzeiten problematisch.

Um eine optimale Beschreibung durch B-Splines zu erhalten, wurde getestet, wie sich Clusterzuordnung und Beschreibung der Zentrallinien in Abhängigkeit von der Anzahl B-Splines ändern. Wichtige Charakteristika sind Zeitpunkt und Höhe der Abflussspitze, das Abflussvolumen und die Ereignisdauer. Doppelspitzen können ebenfalls ein charakteristisches Merkmal der Hochwasserereignisse eines Gebietes sein, wurden aber im vorliegenden Projekt nicht untersucht. Neben einer realistischen Ganglinienform war die Hauptfrage: Wie stark beeinflusst die Anzahl B-Splines die Clusterbildung?

Eine Beschreibung mit 5 B-Splines vermag es nicht, die wichtigen Charakteristika einer über das univariate HQ1 bestimmten Hochwasserganglinie zu erfassen (Abbildung 22). Beim Cluster mit der höchsten Abflussspitze ist beispielsweise ersichtlich, dass kein ansteigender Ast beschrieben wird. Erst ab einer Anzahl von 15 B-Splines erscheinen die Zentrallinien als plausible Funktionsbeschreibung für die Hochwasserganglinien.

Bei 30 und mehr B-Splines wird auch das Ende des absteigenden Astes genauer beschrieben, wobei wir diesen jedoch nicht als relevante Charakteristik der Ganglinie einstufen. Eine schrittweise Erhöhung der Anzahl B-Splines im Bereich 10 bis 30 ergab 10 bis 15 B-Splines als guten Kompromiss zwischen genügend guter Beschreibung der Ganglinie und vertretbarem Rechenaufwand. In diesem Beispiel wurde der Test bezüglich Anzahl B-Splines auf den Datensatz mit langen abfallenden Ästen angewandt. Bei einem unregelmässigen Datensatz können weniger B-Splines ausreichend sein.

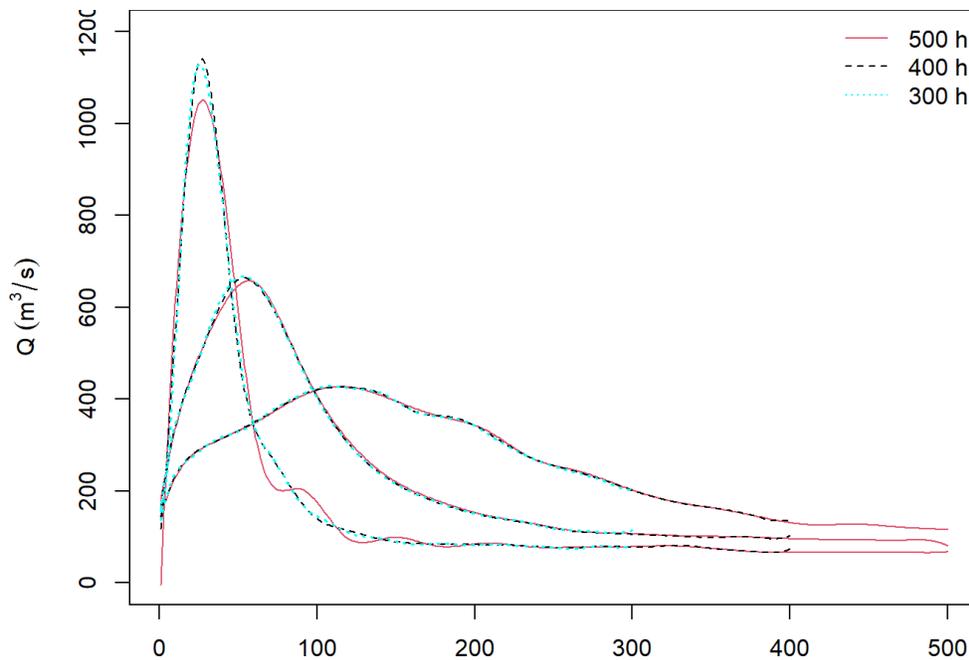


**Abbildung 22 Einfluss der Anzahl B-Splines auf die Beschreibung der Ereignisganglinien und Modellzentrallinien pro Cluster.  $B$  bezeichnet die Anzahl der verwendeten B-Splines,  $k$  die Anzahl der verwendeten Cluster.**

## 11.2. Vergleiche Clusteralgorithmen

Ein geeigneter Clusteralgorithmus ist robust und soll unterschiedlich grosse Cluster erlauben. Die unterschiedlichen Clustergrößen sind für das Ermitteln der typischen Ganglinien einer Jährlichkeit wichtig: Cluster sollen möglichst kompakt und abgegrenzt voneinander sein, und diese beiden Kriterien sollen nicht dadurch beeinflusst werden, dass die Ereignisanzahl zwischen den Clustern gleich sein muss.

Bestimmte funktionale Clustermethoden setzen voraus, dass die Eingabedaten regulär sind, also alle Zeitreihen, die verglichen werden, die gleiche Länge haben. Optimal in unserem Fall wäre, dass der Algorithmus irreguläre Datensätze erlaubt, weil dann nur die tatsächlichen, mittels Schwellenwert bestimmten Ereignisse und deren Charakteristika in den Clusterprozess einfließen. Allerdings wollten wir keinen geeigneten und robusten Algorithmus verwerfen, ohne zu untersuchen, wie sich die Sensitivität der Clusterbildung auf die verlängerten abfallenden Äste gestaltet. Letztere sind bei regulären Datensätzen erzwungenermassen miteingeschlossen. Wenn die Daten für die Clusteranalyse gleich lang sein müssen, dann ergeben sich besonders für kurze Ereignisse stark verlängerte abfallende Äste. Eine Frage ist dann, ob diese verlängerten abfallenden Äste die Clusterbildung stark beeinflussen oder ob die Ergebnisse vergleichbar sind mit einer Anwendung auf irreguläre Datensätze.



**Abbildung 23 Systematische Verkürzung der abfallenden Äste des Ereignisses von 500h auf 400h und 300h. Die Zentrallinien zeigen in den relevanten Bereichen nur marginale Unterschiede.**

Für diesen Test wurden die Daten der Anlage Rossens zugrunde gelegt, und die Clusterzahl wurde zu Beginn auf  $k = 3$  festgesetzt. Der Effekt der verlängerten abfallenden Äste ist nur marginal (Abbildung 23), und wir könnten daher auch Clusteralgorithmen verwenden, welche reguläre Datensätze (d. h. solche in Matrixform) benötigen. Für das funktionelle Clustering haben wir unter der Bedingung "unterschiedliche Clustergrößen erlaubt" die beiden Algorithmen *itersubspace* und *funHDDC* zur Verfügung. Für letzteren kommen 6 unterschiedliche sogenannte *mixed sub-models* zum Einsatz, von welchen nur 5 die Bedingung "unterschiedliche Clustergrößen erlaubt" erfüllen. Im Vergleich der beiden Algorithmen untersuchten wir, 1) wie robust die Ergebnisse sind, 2) wie gut der Algorithmus konvergiert und 3) wie lange die Rechenzeiten ausfallen. Für alle ausser einem sub-model (AkjBQkDk) konvergierte der Algorithmus *funHDDC* mit 3 Clustern nicht. Die resultierenden Zentrallinien der beiden Algorithmen für 3 Cluster sind sich sehr ähnlich (Abbildung 24). Wenn wir die Anzahl Cluster systematisch erhöhen, konvergieren *itersubspace* und *funHDDC* mit diesem sub-model (AkjBQkDk) vergleichbar gut bis zu einer Clusteranzahl von 17, bei grösseren Clustergrößen wird *funHDDC* instabil.

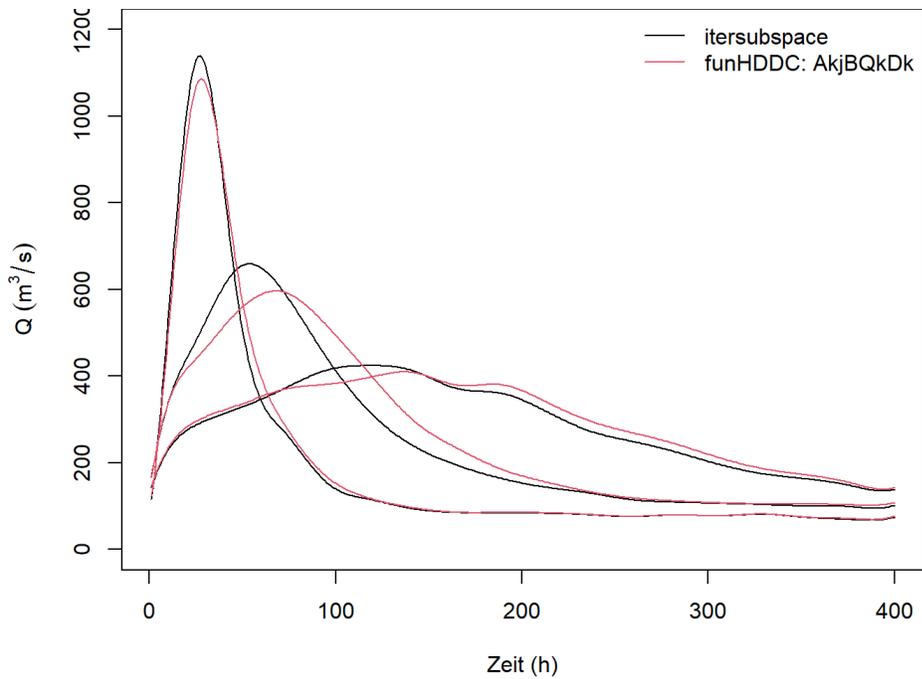


Abbildung 24 Vergleich der Cluster-Zentrallinien aus den Cluster-Algorithmen *itersubspace* und *funHDDC*.

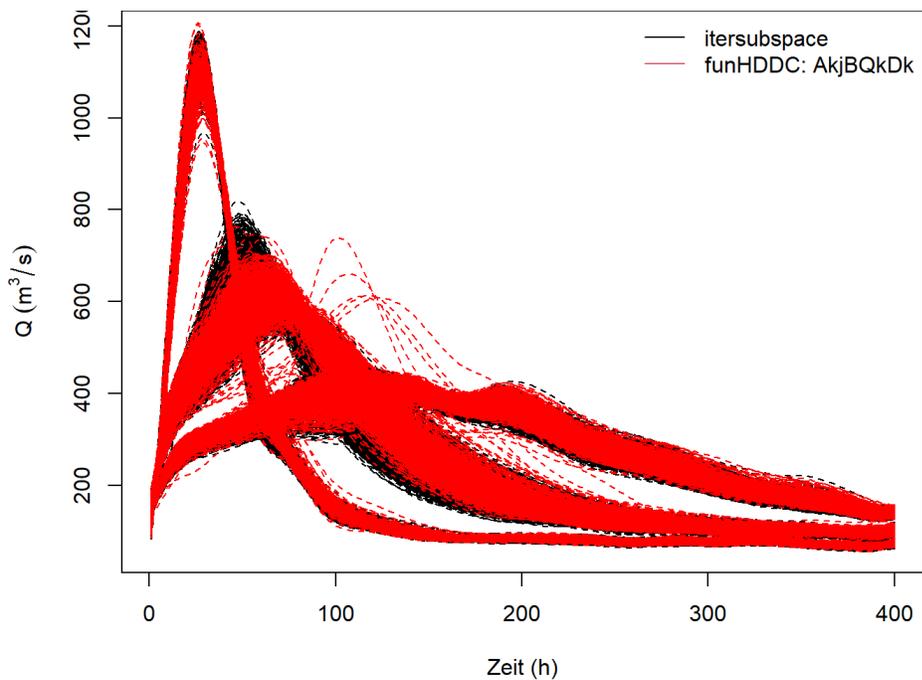


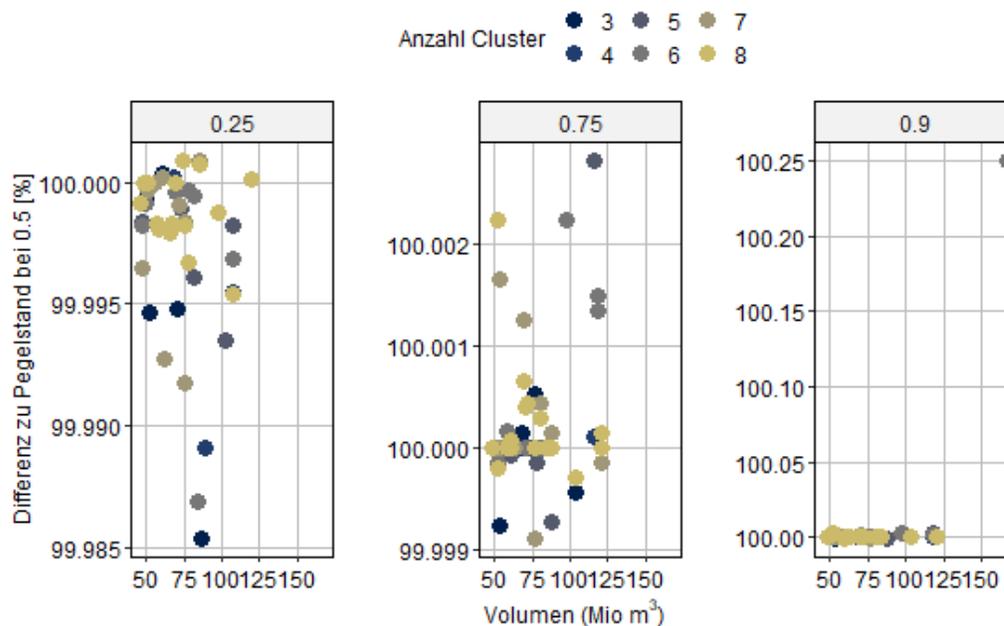
Abbildung 25 Analyse zur Robustheit der Cluster-Zentrallinien mittels Bootstrapping für die beiden Algorithmen *itersubspace* and *funHDDC*. Jede Linie entspricht den resultierenden modellierten Zentrallinien der gefundenen Cluster.

Die Robustheit wurde mit einer Art Bootstrapping getestet, indem wir 1'000 verschiedene Kombinationen bestehend aus je 300 zufällig ausgewählten Ereignissen erstellten und den Clusteralgorithmus auf jede Kombination anwendeten. Die Ergebnisse dieses kleinen Tests zeigen,

dass die beiden Algorithmen robust zu sein scheinen, *itersubspace* zeigt aber leicht robustere Resultate und ist auf kleine Änderungen im Datensatz weniger sensitiv als *funHDDC* (Abbildung 25).

### 11.3. Sensitivitätsstudie Matrixeingabe für funktionelle Boxplots

Vor der Matrixeingabe für die funktionellen Boxplots wurden die Ereignisse im Projekt auf diejenige Länge gekürzt, bei welcher 50% aller Ereignisse vollständig waren. Abbildung 26 zeigt für die Anlage Rossens, dass andere Prozentwerte für die Ereigniskürzung (25%, 75%, 90% der Ereignisse vollständig) keinen grossen Effekt auf die gewählte Mittellinie und daher auch nicht auf die Pegelanstiege im Stauraum haben. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass es für alle Kombinationen von Clusteranzahl und festgelegter Ereignislänge keine relevanten Unterschiede in den Pegelanstiege gibt.



*Abbildung 26 Sensitivität der berechneten Pegelanstiege der Stauanlage Rossens auf die Dimension der Eingabematrix für die Erstellung der funktionellen Boxplots. Dargestellt sind die Unterschiede in den Pegelanstiege im Vergleich zur verwendeten Kürzung (50% aller Ereignisse vollständig) in Abhängigkeit der Ereignisvolumina. Weiter wird differenziert für forcierte Clusteranzahlen zwischen 3 und 8.*

### 11.4. Repräsentativität der Hochwasserganglinien für verschiedene Jährlichkeitsbereiche

Während in Abschnitt 5.2 die Repräsentativität der ausgewählten Hochwasserganglinien nur für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 aufgezeigt wurde, soll hier die Repräsentativität der ausgewählten Hochwasserganglinien am Beispiel der Zuflüsse zur Stauanlage Rossens auch für die übrigen Jährlichkeitsbereiche untersucht werden.

Für den Jährlichkeitsbereich HQ100 der Anlage Rossens mit anlagespezifischem Schwellenwert ergaben sich die besten Cluster nach den Schattenwerten wie in Abbildung 27 gezeigt. Die Cluster sind statistisch gut verteilt, allerdings in einem sehr kleinen Wertebereich. Obwohl die ungünstigsten Pegelanstiege nicht erfasst sind, werden ungünstige Pegelanstiege dennoch ausreichend abgedeckt. Mit Einbezug weiterer Ganglinien – grösstes Volumen pro Cluster (Abbildung 27 b) und grösstes Volumen in der 50%-Zentralregion der Cluster (Abbildung 27 b) – konnten in diesem Fall weitere ungünstige Pegelanstiege erfasst werden.

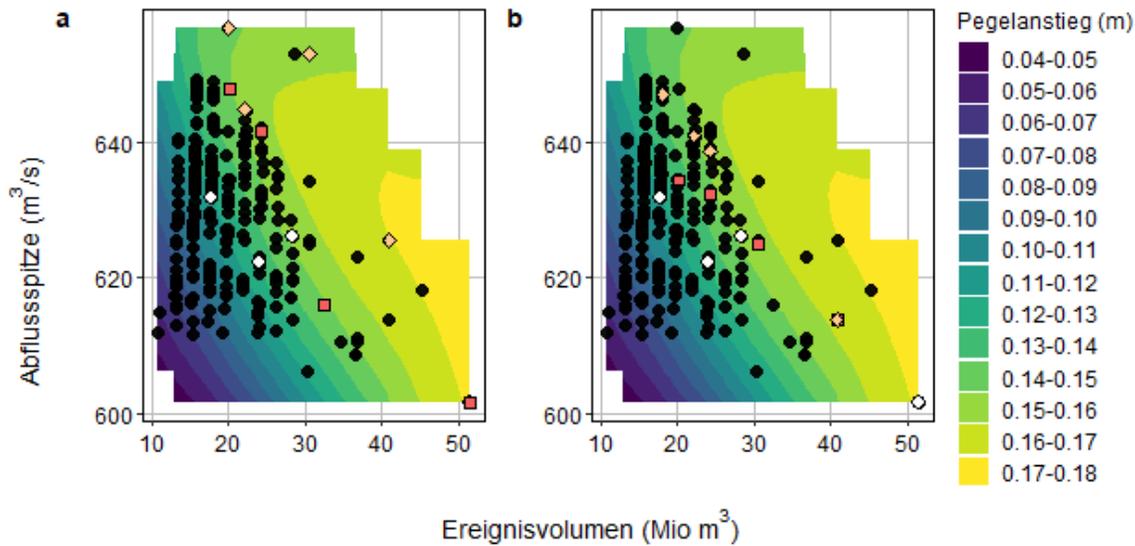


Abbildung 27 Visualisierung der extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem anlagespezifischen Schwellenwert. Das optimale (Schattenwerte) Clusteranzahlergebnis ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ100 in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren  $n_1=41$ ,  $n_2=153$ ,  $n_3=41$ ,  $n_4=10$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster.

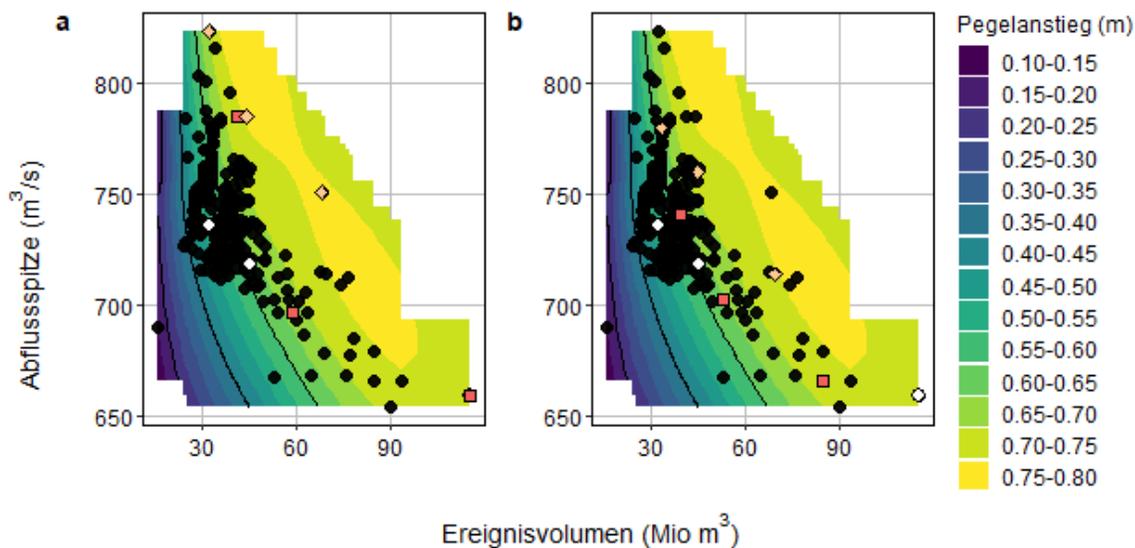
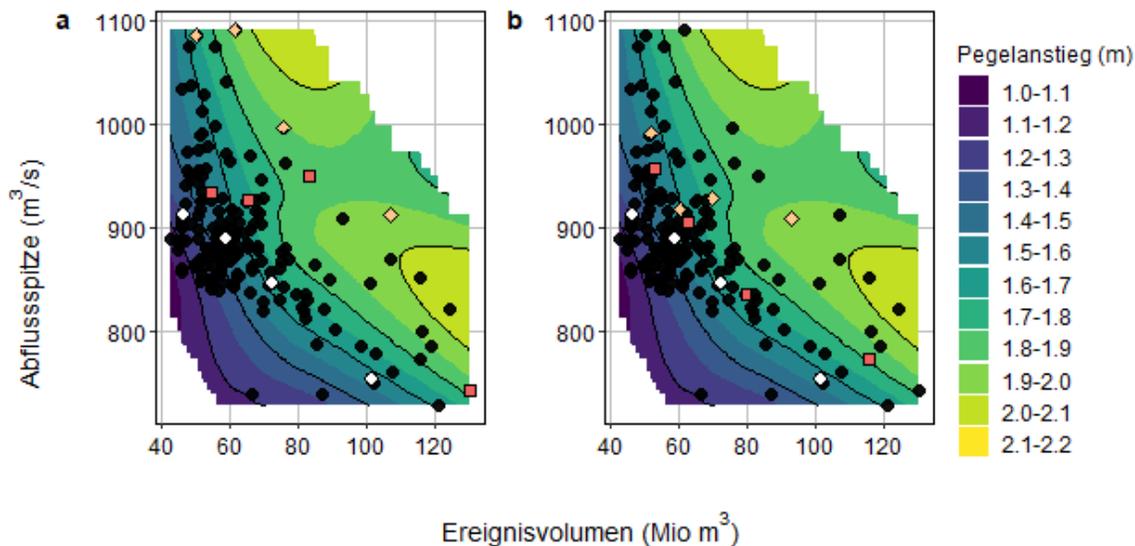


Abbildung 28 Visualisierung der extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem anlagespezifischen Schwellenwert. Das optimale (Schattenwerte) Clusteranzahlergebnis ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ300 in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren  $n_1=76$ ,  $n_2=176$ ,  $n_3=20$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster.

Für den Jährlichkeitsbereich HQ300 der Anlage Rossens mit anlagespezifischem Schwellenwert ergaben sich die besten Cluster nach den Schattenwerten wie in Abbildung 28 gezeigt. Die

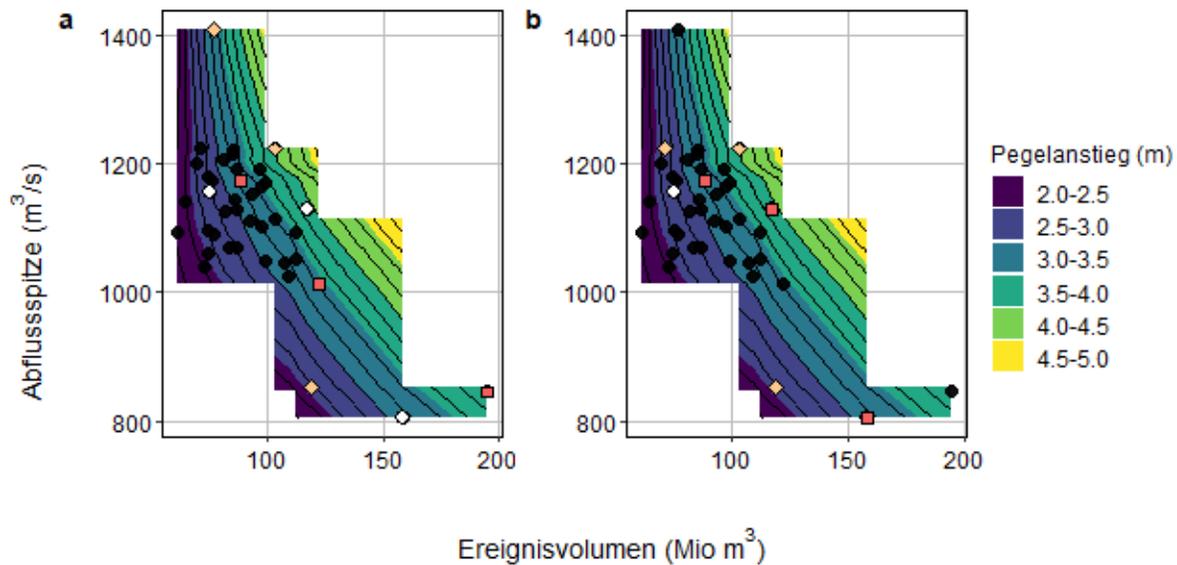
Punktewolke liegt entlang der ungünstigsten Pegelanstiege. Mit den Mittellinien der Cluster ist diese Wolke statistisch repräsentiert und mit Einbezug weiterer Ganglinien – grösstes Volumen pro Cluster und grösste Spitzenabflüsse pro Cluster (Abbildung 28 b) bzw. grösstes Volumen und grösste Spitzenabflüsse in der 50%-Zentralregion der Cluster (Abbildung 28 b) – konnten in diesem Fall weitere ungünstige Pegelanstiege erfasst werden.



**Abbildung 29** Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem anlagespezifischen Schwellenwert. Das optimale Clusteranzahlergebnis auf Basis von Schattenwerten ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000 in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=64$ ,  $n_2=38$ ,  $n_3=48$ ,  $n_4=26$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflusspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflusspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

Für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 der Anlage Rossens mit anlagespezifischem Schwellenwert ergaben sich die besten Cluster nach den Schattenwerten wie in Abbildung 29 gezeigt. Die Cluster sind statistisch schön verteilt, aber die ungünstigsten Pegelanstiege sind nicht erfasst. Mit Einbezug weiterer Ganglinien – grösstes Volumen pro Cluster (Abbildung 29 b) und grösstes Volumen in der

50%-Zentralregion der Cluster (Abbildung 29 b) – konnten in diesem Fall etwas ungünstigere Pegelanstiege erfasst werden.

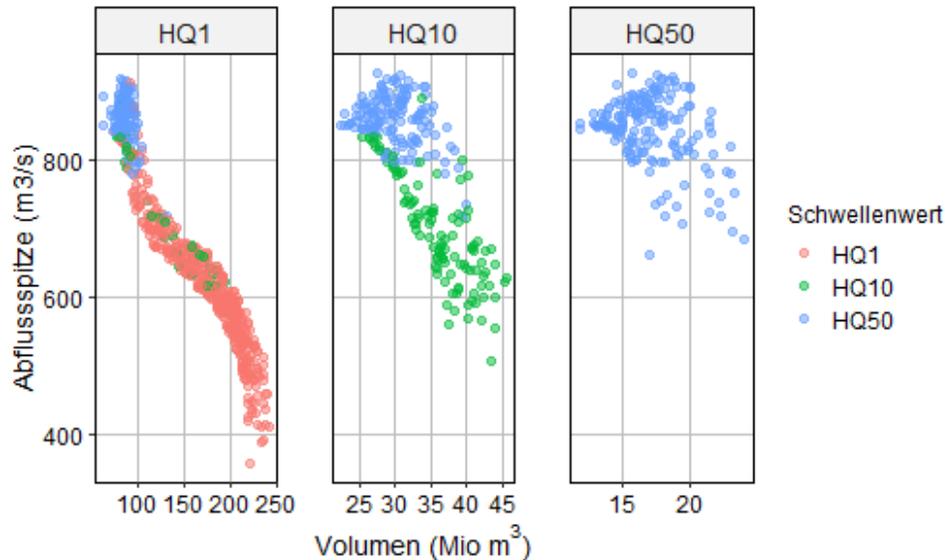


*Abbildung 30 Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem anlagespezifischen Schwellenwert. Das optimale Clusteranzahlergebnis auf Basis von Schattenwerten ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ5'000 in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=16$ ,  $n_2=21$ ,  $n_3=3$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 10 cm Pegelanstieg.*

Für den Jährlichkeitsbereich HQ5'000 ergibt sich nur eine kleine Punktwolke. Jedoch sind die ungünstigsten Ereignisse durch die repräsentativen Ereignisse aus den Clustern nicht abgedeckt. Die gefundenen besten Cluster bezüglich Schattenwerten können als repräsentativ für die Punktwolke angesehen werden.

### 11.5. Einfluss des Schwellenwertes auf die ausgewählten Hochwasserereignisse

Wenn die Schwellenwerte zur bivariaten Ereignisbestimmung anders gewählt werden, ändert sich die Beziehung zwischen Volumen und Spitze stark (Abbildung 31).



**Abbildung 31** Zusammenhang Abflussspitze und Ereignisvolumen unter der Anwendung verschiedener Jährlichkeiten (HQs) als Schwellenwerte. Mit höherem Schwellenwert von HQ1 über HQ10 zu HQ50 werden weniger und grössere Ereignisse ausgewählt für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 für die Anlage Rossens.

Mit sehr niedrigem Schwellenwert (HQ1) sind die Ereignisse viel grossvolumiger als mit höheren Schwellenwerten, weil das Volumen als Summe der Abflüsse über diesem Schwellenwert berechnet wird. Interessant ist, dass die Zuordnung einer bivariaten Jährlichkeit bewirkt, dass die Form der bivariaten Dichte bei höheren Schwellenwerten kompakter wird im Jährlichkeitsbereich HQ1'000, d. h. ähnliche Ereignisse resultieren. Der Bereich tiefer Abflussspitzen wird direkt und stark vom gewählten Schwellenwert beeinflusst.

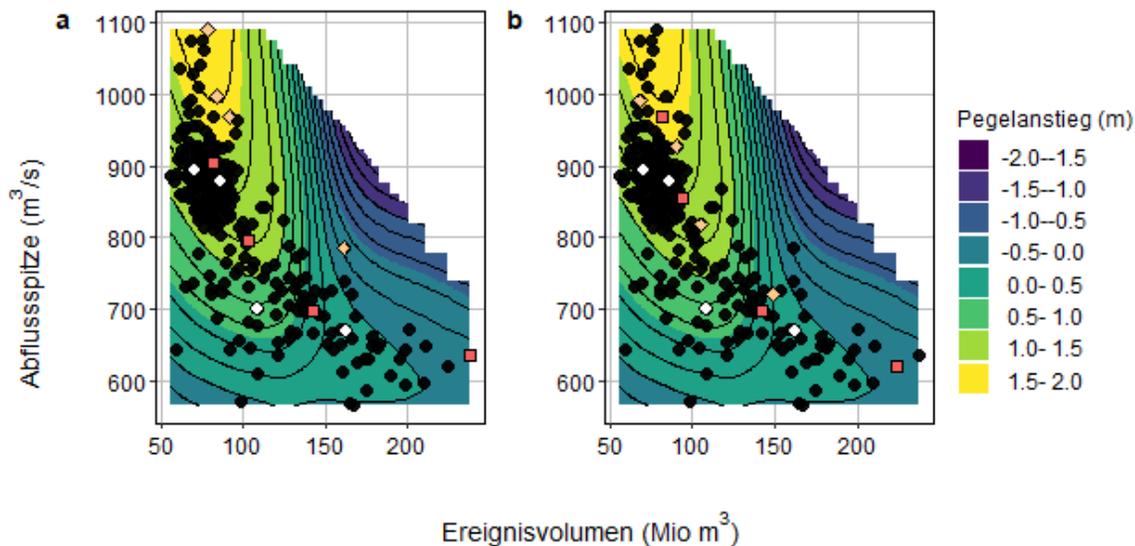
Während in Abschnitt 5.2 ausschliesslich anlagenspezifische Schwellenwerte verwendet wurden, soll hier der Einfluss der Wahl abweichender Schwellenwerte untersucht werden. Wie sich die Auswahl abweichender Schwellenwerte wie HQ10 bzw. HQ50 konkret bei den Anlagen Rossens, Mühleberg und Schiffenen auswirkt, wird im Folgenden jeweils für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 gezeigt.

Wird für die Stauanlage Rossens anstelle eines höheren anlagenspezifischen Schwellenwertes (Abbildung 6) HQ10 als Schwellenwert (Abbildung 32) verwendet, so werden viele zusätzliche Hochwasserereignisse mit geringer Spitze und grossem Volumen in der Analyse berücksichtigt. Diese zusätzlichen Ereignisse sind jedoch nicht relevant für eine Sicherheitsbeurteilung, da diese Ereignisse zu einem geringeren Pegelanstieg im Stauraum führen. Die Mittellinien aus den besten Clustern (nach Schattenwerten) sind nach wie vor repräsentativ, liegen jedoch aufgrund der breiteren Datenbasis etwas weiter auseinander. Was die zusätzliche Ganglinien aus den Clustern betrifft, so sind hier vor allem diejenigen mit grösseren Abflussspitzen – sowohl absolut (Abbildung 32 a) als auch in der 50%-Zentralregion (Abbildung 32 b) – wichtig, um nach wie vor auch ungünstigere Ganglinien ermitteln zu können. Trotz des tieferen Schwellenwertes und der zusätzlich berücksichtigten Ereignisse gelingt es mit der entwickelten Methode, die für eine Sicherheitsbeurteilung wichtigsten Ganglinien zu ermitteln.

Ein Schwellenwert HQ50 zur bivariaten Definition der Hochwasserereignisse (Abbildung 33) führt bereits zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie bei der Verwendung eines anlagenspezifischen Schwellenwertes (Abbildung 6). Sowohl die Mittellinien aus den besten Clustern (nach Schattenwerten) wie auch die zusätzliche Ganglinien aus den Clustern – sowohl absolut (Abbildung 34 a) als auch in der 50%-Zentralregion (Abbildung 34 b) – führen zu ähnlichen Ganglinien.

Für die Stauanlage Mühleberg liegen HQ10 und HQ50 über dem in Abschnitt 5.2 verwendeten anlagenspezifischen Schwellenwert. Die Änderung des Schwellenwertes für die Definition der Ereignisse auf HQ10 (wiederum Jährlichkeitsbereich HQ1'000) hat kaum einen Einfluss auf die Mittellinien (nach Schattenwerten) wie auch auf die zusätzliche Ganglinien aus den Clustern (Abbildung 34, Abbildung 8). Verwenden wir HQ50 als Schwellenwert, so werden weniger Ereignisse mit grossem Volumen und kleiner Spitze in der Analyse berücksichtigt (Abbildung 35). Da die resultierenden Pegelanstiege jedoch für diese Anlage beinahe ausschliesslich von der Zuflussspitze abhängig sind, können die für eine Sicherheitsbeurteilung wichtigsten Ganglinien auch mit einem Schwellenwert von HQ50 zuverlässig ermittelt werden.

Für die Anlage Schiffenen liegen beide HQs deutlich unter dem anlagenspezifischen Schwellenwert. Ein Schwellenwert von HQ10 oder HQ50 führt wie bei der Stauanlage Rossens dazu, dass mehr Ereignisse mit tiefer Spitze und grossem Volumen für die Analyse berücksichtigt werden, welche jedoch für eine Sicherheitsbeurteilung nicht relevant sind. Die grössere Anzahl berücksichtigter Ereignisse, führt dazu, dass sich zwar nach wie vor belastbare Mittellinien aus den besten Clustern (nach Schattenwerten) ableiten lassen, diese jedoch durch die Wahl des Schwellenwertes beeinflusst sind (Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 8). Die zusätzlichen Ganglinien aus den Clustern – sowohl absolut (Abbildung 36 a und Abbildung 37 a) als auch in der 50%-Zentralregion (Abbildung 36 b und Abbildung 37 b) – ermöglichen es jedoch, die für die Sicherheitsbeurteilung wichtigsten Ganglinien trotzdem zu ermitteln. Die resultierenden ungünstigsten Pegelanstiege bleiben trotz des veränderten Schwellenwertes beinahe unverändert.



**Abbildung 32** Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem HQ10=423m<sup>3</sup>/s als Schwellenwert. Das optimale Clusteranzahlergebnis auf Basis von Schattenwerten ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000 in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier n1=53, n2=95, n3=65, n4=40. a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflusspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenergebnisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflusspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

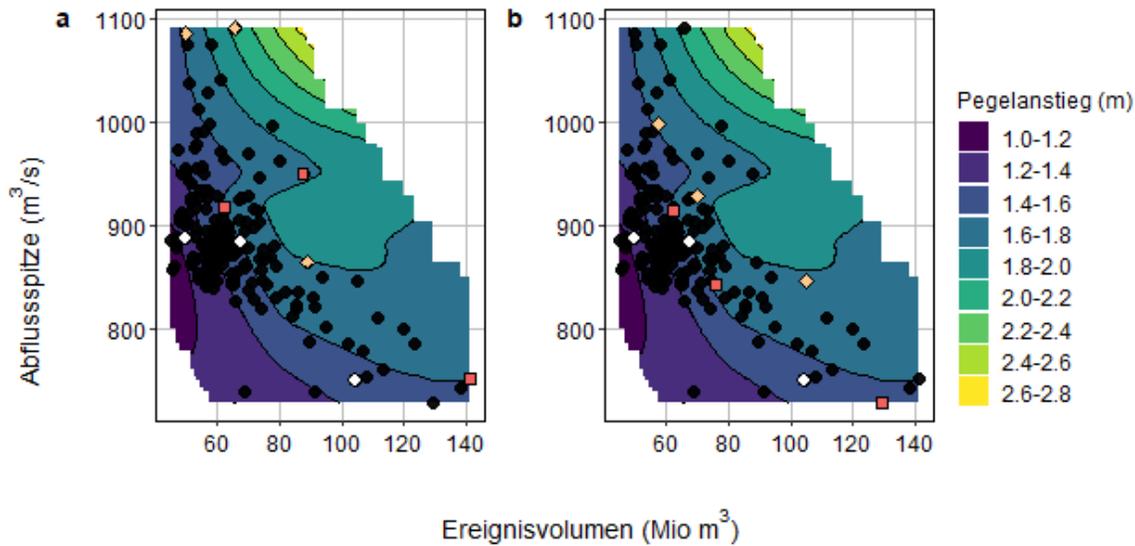


Abbildung 33 Visualisierung der extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Rossens mit einem  $HQ_{50}=556 \text{ m}^3/\text{s}$  als Schwellenwert. Das optimale (Schattenwerte) Clusteranzahlergebnis ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches  $HQ_{1'000}$  in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n_1=80$ ,  $n_2=73$ ,  $n_3=21$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster.

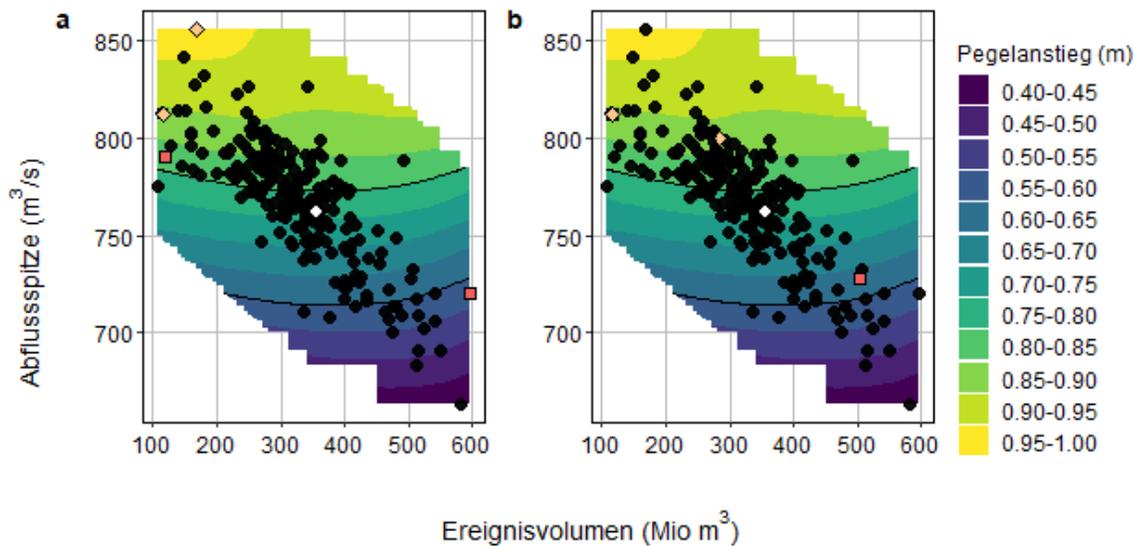


Abbildung 34 Visualisierung extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Mühleberg mit einem  $HQ_{10}=572 \text{ m}^3/\text{s}$  als Schwellenwert. Das optimale (Schattenwerte) Clusteranzahlergebnis ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches  $HQ_{1'000}$  in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren  $n_1=219$ ,  $n_2=3$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster.

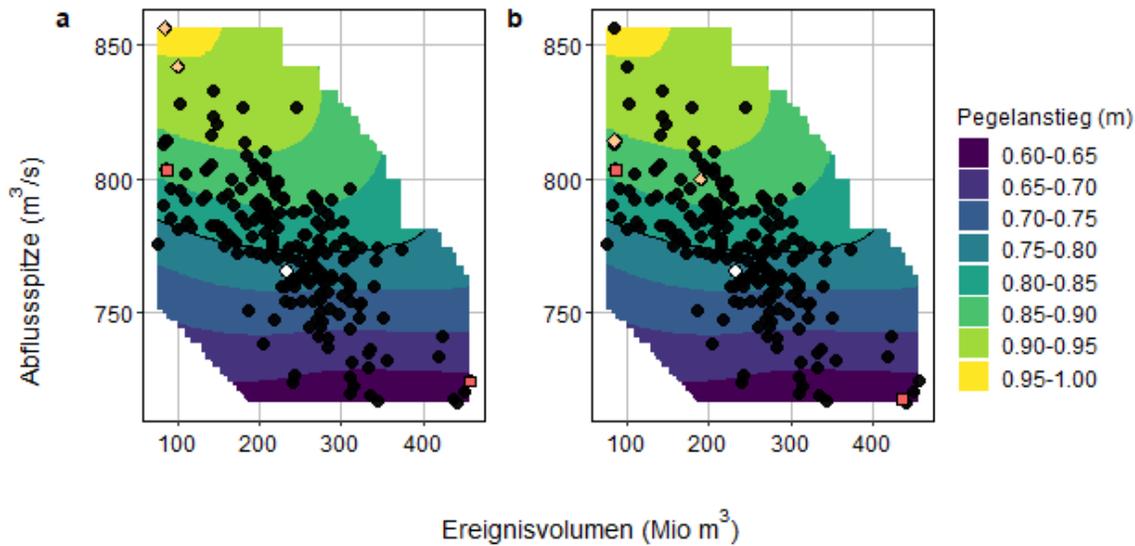


Abbildung 35 Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Mühleberg mit einem  $HQ_{50}=642 \text{ m}^3/\text{s}$  als Schwellenwert. Das optimale Clusteranzahlergebnis (Schattenwerte) ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches  $HQ_{1'000}$  in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren  $n_1=189$ ,  $n_2=7$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster.

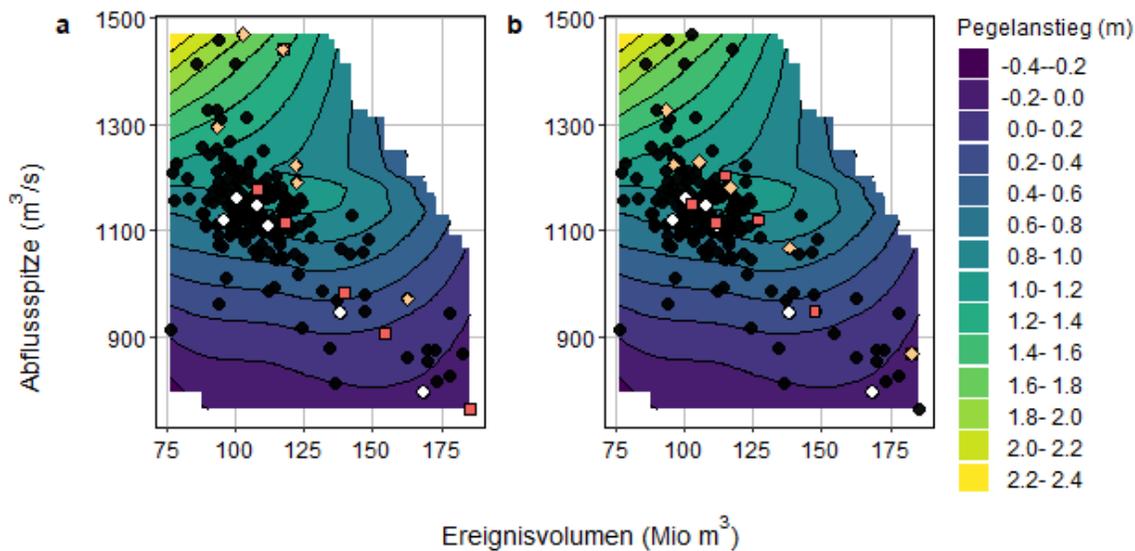


Abbildung 36 Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Schiffenen mit einem  $HQ_{10}=492 \text{ m}^3/\text{s}$  als Schwellenwert. Das optimale (Schattenwerte) Clusteranzahlergebnis ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches  $HQ_{1'000}$  in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren  $n_1=37$ ,  $n_2=16$ ,  $n_3=59$ ,  $n_4=29$ ,  $n_5=37$ ,  $n_6=11$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

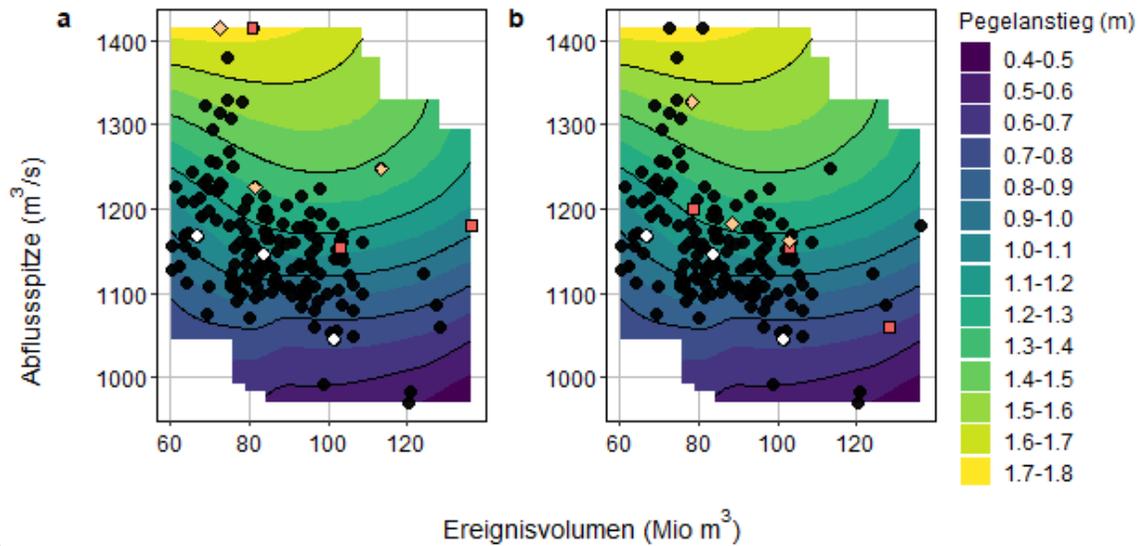
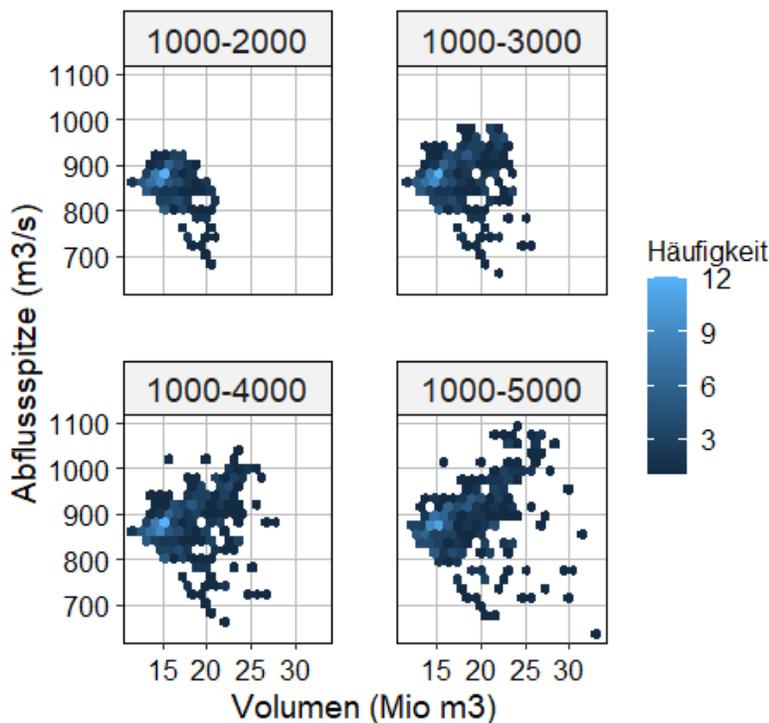


Abbildung 37 Visualisierung der aus den funktionellen Clustern extrahierten Ganglinien an der Stauanlage Schiffenen mit einem  $HQ50=680 \text{ m}^3/\text{s}$  als Schwellenwert. Das optimale Clusteranzahlergebnis auf Basis von Schattenwerten ist in Weiss gezeigt, alle Ganglinien des Jährlichkeitsbereiches  $HQ1'000$  in Schwarz. Die Anzahl der Ganglinien pro Cluster waren hier  $n1=55$ ,  $n2=72$ ,  $n3=34$ . a) Mittellinie (weiss) und grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grösste Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) pro Cluster. b) Mittellinie (weiss), grösste Volumenereignisse (dunkelorange Quadrate) sowie grössten Abflussspitzenereignisse (hellorange Rauten) jeweils der 50%-Zentralregion pro Cluster. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg.

## 11.6. Sensitivität der Clusterabdeckung auf Ereignisschwellenwert

Im Folgenden untersuchen wir, wie sensitiv die gefundene Clusterabdeckung (über Schattenwerte) auf die vordefinierte Breite des Jährlichkeitsbereiches ist. Der Effekt der Klassenbreite wird für den Jährlichkeitsbereich HQ1'000 untersucht, um daraus abzuleiten, ob sich bei einem breiteren Jährlichkeitsbereich die Auswahl der optimalen Cluster stark ändern könnte.

Da die Cluster nicht allein auf Basis der beiden Charakteristika Abflussspitze und Volumen der Ganglinie gebildet wurden, sondern funktionell, wurden diese beiden Charakteristika zwar implizit mitverwendet, aber noch viele weitere, die in der funktionellen Beschreibung erfasst werden, also die gesamte Ganglinienform. Bei der hier gemachten Analyse muss deshalb beachtet werden, dass die Cluster nicht unbedingt funktionell optimal sind, nur weil Spitze und Volumen sich sehr ähneln, selbst wenn die beiden Charakteristika die Ganglinie natürlich stark definieren.



*Abbildung 38 Dichtebeschreibung des Jährlichkeitsbereiches HQ1'000 für zunehmende Breite (HQ1'000 bis HQ2'000, HQ1'000 bis HQ3'000, HQ1'000 bis HQ4'000, HQ1'000 bis HQ5'000). Daten aus Abflusssimulationen für die Stauanlage Rossens.*

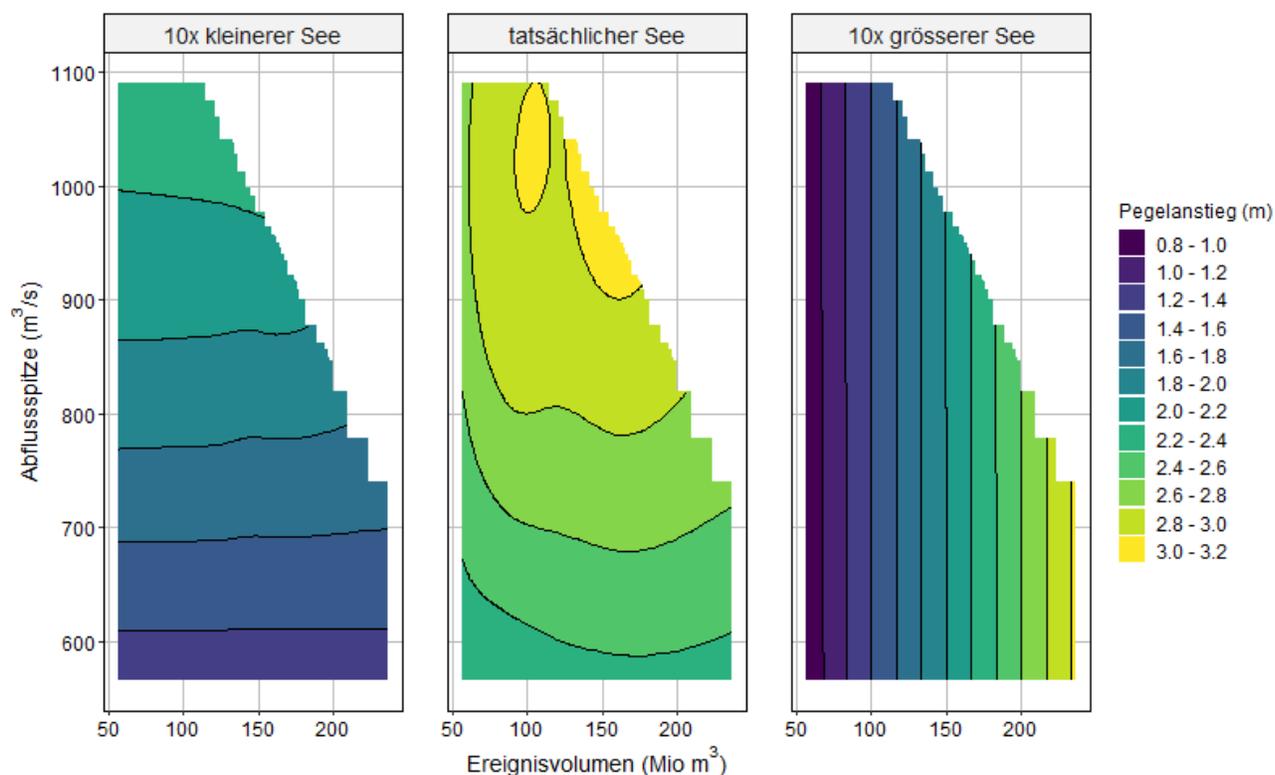
Wir sehen bei jeder Breite der Jährlichkeitsbereiche (Abbildung 40), dass die höchste Dichte im selben Bereich liegt und daher ähnliche Cluster zu erwarten sind. Es ist allerdings auch ersichtlich, dass deutlich grössere Spitzen und Volumina auftreten, wenn die Jährlichkeitsbereiche um seltenere Ereignisse erweitert werden; dies dürfte zur Ausscheidung weiterer Cluster führen. Daher ist es zum einen wichtig, den kleinstmöglichen Bereich zu wählen, wenn man nahe an einer bestimmten Jährlichkeit liegen will. Zudem ändert sich beim Schritt von HQ1'000–HQ2'000 auf HQ1'000–HQ3'000 die Ausrichtung der Punktwolke und bleibt dann für die breiteren Bereiche in Richtung der schon bei HQ1'000–HQ3'000 gesehenen.

## 11.7. Sensitivität der Clusterabdeckung auf Änderung der Pegel-Volumen-Beziehung

In dieser Sensitivitätsanalyse untersuchten wir, wie die Pegel-Volumen-Beziehung einer Stauanlage mit freiem Überfall die Lage der Punktwolke im Konturlinienplot (Pegelanstiege) und damit auch die Lage der Mittellinien der besten Cluster beeinflusst. Dafür wurden die Pegel-Volumen-Beziehungen für drei Fälle untersucht:

- 1) HQ1'000 mit tatsächlicher Pegel-Volumen-Beziehung (originales Seevolumen, aber 10-mal grössere Auslasskapazität)
- 2) HQ1'000 mit Pegel-Volumen-Beziehung\*10 (10-mal grösseres Seevolumen, und 100-mal kleinere Auslasskapazität)
- 3) HQ1'000 mit Pegel-Volumen-Beziehung/10 (10-mal kleineres Seevolumen, und 20-mal grössere Auslasskapazität)

Um die Auslasskapazität auf das vorhandene Seevolumen abzustimmen, wurde bei verringertem Volumen gleichzeitig die Kapazität erhöht und bei vergrössertem Volumen gleichzeitig die Kapazität verringert. Um die gezeigten Beispiele in einer ähnlichen Grössenordnung zu halten, wurde auch bei Fall 1 die Abflusskapazität vergrössert.



**Abbildung 39** Änderung der Beziehung zwischen Pegelanstiege, Abflussspitze und Hochwasservolumen für die Stauanlage mit freiem Überfall im Jährlichkeitsbereich HQ1'000. Die schwarzen Konturlinien zeigen einen Abstand von 20 cm Pegelanstieg. Für Fall 1 = tatsächliche Pegel-Volumen-Beziehung und 10-mal grössere Auslasskapazität (Mitte), Fall 2 = 10-mal grösserer See und 100-mal kleinere Kapazität (rechts), Fall 3 = 10-mal kleinerer See und 20-mal grössere Kapazität (links).

Die Fälle 2 und 3 zeigen die beiden möglichen Extremfälle: vollständig vom Abfluss dominiert oder vollständig vom Volumen abhängig. Die verschiedenen angenommenen Eigenschaften der Stauanlage

führen zu ganz unterschiedlichem Verhalten beim Pegelanstieg, obwohl der Zufluss in allen drei Fällen derselbe ist (vgl. Abbildung 39).

Das Verhalten beim Fall 1 hingegen liegt zwischen den beiden Extremfällen: Die höchsten Pegelanstiege werden weder durch die Ereignisse mit dem grössten Abfluss noch durch die Ereignisse mit dem grössten Volumen hervorgerufen. Die Kombination aus Abfluss und Volumen führt zu den höchsten Pegelanstiegen.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass je nach Eigenschaften der Stauanlage ganz andere Hochwasserereignisse massgebend sind. Die grössten Pegelanstiege können ausschliesslich durch den Abfluss, ausschliesslich durch das Volumen oder durch eine Kombination der beiden hervorgerufen werden. Deshalb ist es wichtig, mithilfe des Clusterings und der Auswahl zusätzlicher Ganglinien möglichst viele unterschiedliche Kombinationen aus Abfluss und Volumen zu erfassen. Die Beurteilung, welche Hochwasserereignisse tatsächlich für die spezifische Stauanlage massgebend sind, kann anschliessend mithilfe einer Retentionsberechnung erfolgen.