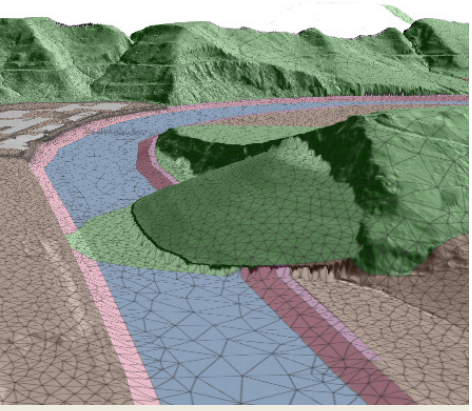

Extremhochwasser an der Aare

Detailbericht B Projekt EXAR

Historische Hochwasser

Fotos Umschlag

1. Stauanlage Mühleberg, Mühleberg. Foto: IUB Engineering AG, Begehung vom 5. April 2017.
2. Mündungsbereich Hagneckkanal in Bielersee. Foto: IUB Engineering AG, Begehung vom 10. April 2017.
3. Höhenmodell der Rutschung Brättele, nahe des Beurteilungsperimeters Mühleberg. Quelle: GEOTEST AG, 2020.
4. Wasser- und Kernkraftwerk bei Beznau. Foto: Schweizer Luftwaffe 2005, © VBZ.
5. Verklausung der Mattenschwelle bei Bern während des Hochwassers im August 2005. Foto: Schweizer Luftwaffe 2005, © VBZ.

Impressum
Datum: 18.11.2019

Herausgeber
ARGE GEOTEST-HZP-IUB, c/o GEOTEST AG, Bernstrasse 165, CH-3052 Zollikofen

Auftraggeber
Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS)

Projektleitung
Severin Schwab (GEOTEST AG, SPOC AP3 & AP4), Roni Hunziker (Hunziker, Zarn & Partner AG, AP3), Michael Müller (IUB Engineering AG, AP4)

Experten/innen des EXAR-Projekts
Helmut Habersack, BOKU Wien
Douglas Maraun, Universität Graz
Christian Pfister, em. Universität Bern
Bettina Schaefli, Universität Lausanne, Universität Bern
Anton Schleiss, em. École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL
Bruno Sudret, ETH Zürich

Redaktion
Patrick Baer (GEOTEST AG)

Autoren und Mitarbeit Inhalte Detailbericht

GEOTEST AG	Patrick Baer, Severin Schwab, Natascia von Wattenwyl
Universität Bern	Martina Kauzlaric, Oliver Wetter

Zitiervorschlag
Baer P., Schwab, S. 2019: Extremhochwasser an der Aare. Detailbericht B Projekt EXAR. Historische Hochwasser. ARGE GEOTEST-HZP-IUB. Zollikofen: 23 S.

Hinweis
Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter BAFU, ENSI, BFE, MeteoSchweiz und BABS verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

1 Einleitung 5
1.1 Kontext im Gesamtprojekt EXAR 5
1.2 Modellansatz 5
1.3 Berücksichtigte Ereignisse und Standorte 5
2 Verwendete Grundlagen 6
2.1 Scheitelwasserstände 6
2.2 Historische Gerinnegeometrie 6
2.2.1 Standort Solothurn 6
2.2.2 Standort Olten 8
2.2.3 Standort Brugg 10
3 Methodik 13
3.1 Verwendetes hydraulisches Modell 13
3.2 Masseinheiten und Höhenangaben 13
3.2.1 Umgang mit alten Masseinheiten 13
3.2.2 Höhenangaben verschiedener Landesnivellements 13
3.3 Kalibrierung und Validierung des Modells 13
3.4 Modellunsicherheiten 14
3.4.1 Einleitung 14
3.4.2 Unsicherheiten in den Grundlagedaten 14
3.4.3 Unsicherheiten in der Modellabstraktion 14
3.4.4 Quantifizierung der Unsicherheiten 14
4 Resultate 15
4.1 Standort Solothurn 15
4.2 Standort Olten 15
4.3 Standort Brugg 16
4.4 Rückrechnung Hochwasser 1480 in Olten 16
5 Diskussion 17
5.1 Vergleich der Standorte untereinander 17
5.2 Vergleich zu anderen Studien 17
5.2.1 Standort Brugg 17
5.2.2 Ereignis 1480 an Aare und Rhein 18
5.2.3 Weitere Studien 19
5.3 Vergleich mit rezenten Hochwasserabflüssen 19
6 Schlussfolgerungen 21
7 Literaturverzeichnis 23

1 Einleitung

1.1 Kontext im Gesamtprojekt EXAR

Zur Plausibilisierung der im EXAR-Projekt bestimmten Spitzenabflüsse sehr seltener Wiederkehrperioden sollen Informationen von bekannten historischen Hochwasserereignissen beigezogen werden. Für das Einzugsgebiet der Aare sind aus einer umfangreichen Vorstudie zum Projekt EXAR [1] historische Hochwasserstände mit zugehörigen Plänen und Profilen der historischen Gerinnegeometrien vorhanden. Mit den vorhandenen Geometrien und Pegeln resp. Scheitelwasserständen können mittels Normalabflussberechnungen in einem 1D-Strömungsmodell Abflüsse für ausgewählte historische Hochwasser nachmodelliert werden.

Ein direkter Vergleich der historischen Hochwasserwerte mit den Werten aus dem EXAR-Projekt ist im System der Aare jedoch nur beschränkt möglich, da in der Zeit seit den historischen Hochwasserereignissen eine Vielzahl von technischen und wasserbaulichen Massnahmen realisiert wurden, die das Abflussverhalten des Systems dauerhaft verändert haben (Kanderdurchstich, Linthkorrektion, Jura-Gewässerkorrektionen I und II). Trotzdem sind die Abflusswerte der historischen Hochwasserereignisse ein wertvolles Instrument zur Einordnung und Plausibilisierung der im EXAR-Projekt berechneten Hochwassermengen.

1.2 Modellansatz

Der verwendete Modellansatz bestand darin, historische Querprofildaten als geometrische Grundlage für ein 1D-Strömungsmodell zu verwenden. Die aus der Vorstudie [1] bekannten Scheitelwasserstände der Hochwasserereignisse dienten als Zielgrösse. Durch Variation des Abflusses im Strömungsmodell (Steuerungsgrösse) unter Normalabflussbedingungen wurde der Abfluss bestimmt, welcher zum beobachteten Scheitelwasserstand geführt hat. Die Variation von Rauigkeiten und hydraulischen Randbedingungen gab Hinweise auf die Modellstabilität und damit auf die Bandbreite der möglichen Abflusswerte, mit welchen der gesuchte Scheitelwasserstand erreicht werden kann.

1.3 Berücksichtigte Ereignisse und Standorte

Im Rahmen des Projekts wurden historische Modellierungen für alle in Tabelle 1 aufgelisteten Hochwasserereignisse und Standorte durchgeführt. Die weiteren in der Vorstudie [1] erwähnten Standorte und Ereignisse wurden im Rahmen der Hauptstudie nicht berücksichtigt, da das Ereignis nicht relevant war für das Gesamtsystem der Aare oder da keine ausreichenden geometrischen Grundlagen vorhanden waren. Die Auswahl der Ereignisse und Standorte fand im Rahmen der Hauptstudie und in Absprache mit den Verfassern der Vorstudie statt.

Tabelle 1: Berücksichtigte historische Hochwasserereignisse.

Ereignis	Standort
1480 (Sommer-Hochwasser)	Solothurn, Olten, Brugg
1570 (Winter-Hochwasser)	Brugg
1852 (Herbst-Hochwasser)	Solothurn, Olten, Brugg
1876 (Sommer-Hochwasser)	Brugg

2 Verwendete Grundlagen

2.1 Scheitelwasserstände

Die Informationen zum Ablauf der historischen Ereignisse sowie zu den Scheitelwasserständen und Pegeln an den untersuchten Standorten wurden den beiden Vorstudien zu EXAR von Wetter et al. [1] und Glauser [3] entnommen. Durch persönliche Gespräche mit den Autoren dieser Studien konnte der Informationsfluss von den Vorstudien in die EXAR-Hauptstudie sichergestellt werden.

2.2 Historische Gerinnegeometrie

Im Bericht der Vorstudie von Wetter et al. [1] wurden für alle Standorte historische Vermessungsdaten (Längen- und Querprofile, Übersichtspläne, etc.) zur Verwendung im hydraulischen Modell vorgeschlagen. Die Vermessungsdaten mussten teilweise in diversen Archiven besichtigt und digitalisiert werden, bevor sie als Grundlage für das hydraulische Modell verwendet werden konnten.

Neben historischen Profilen wurden als Vergleichsdaten auch die GEWISS-Profile der drei untersuchten Standorte ausgewertet. Der Vergleich zwischen den historischen Daten und den GEWISS-Vermessungsdaten des Zeitraums 1970 – 2010 zeigte, dass an den untersuchten Standorten nur in wenigen Fällen merkliche Geometrieveränderungen stattfanden.

2.2.1 Standort Solothurn

Das markanteste Bauwerk an der Aare in Solothurn ist die Torbrücke (Altstadtbrücke, heute Wengibrücke, rot markiert in Abbildung 1), welche bereits im 13. Jahrhundert erbaut wurde und somit bei allen zu untersuchenden Hochwasserereignissen bereits bestand. Um 1770 kam weiter flussabwärts eine Fussgängerbrücke hinzu (heute Kreuzackerbrücke, blau markiert in Abbildung 1). Die Siegfriedkarte von 1880 (Abbildung 1) zeigt die Situation in Solothurn zu der Zeit, in welcher auch die historischen Querprofile für die Modellierung vorliegen.

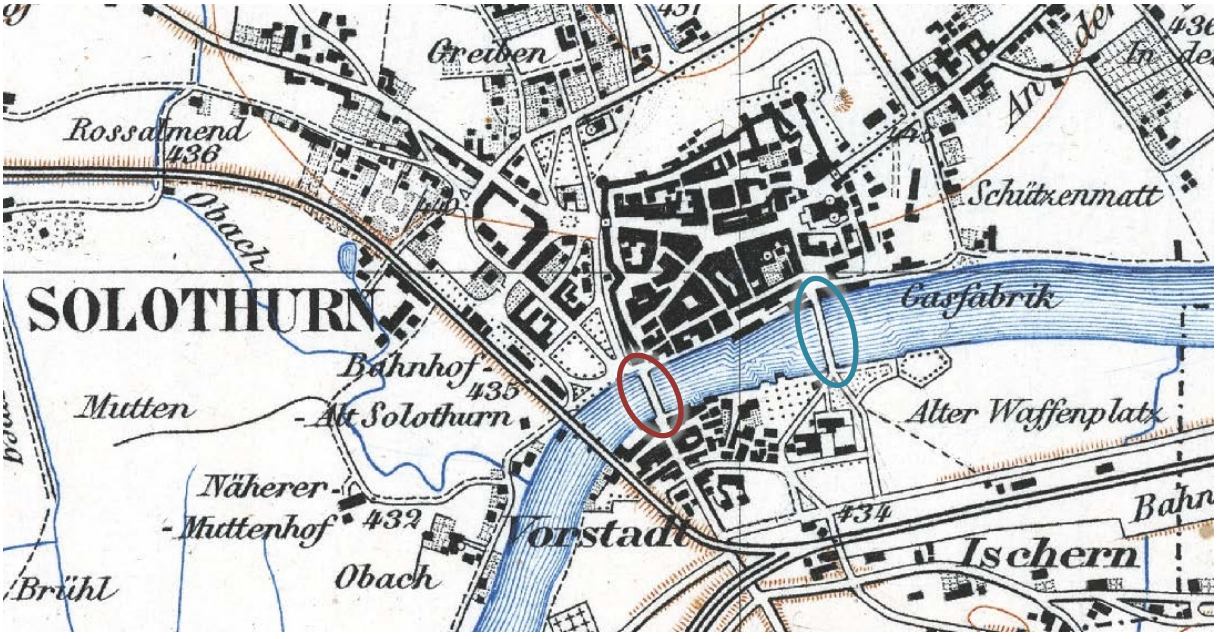

Abbildung 1: Situation in Solothurn um 1880 (Siegfriedkarte). Rot markiert: Torbrücke. Blau markiert: Fussgängerbrücke. Quelle: Bundesamt für Landestopografie.

In Solothurn wurden primär die Querprofile aus der Vermessung um 1900 aus dem Bundesarchiv verwendet (siehe Tabelle 2). Die etwas älteren Profile der Vermessung 1862 aus dem Staatsarchiv des Kantons Bern konnten in der Höhe nicht verortet werden, da der Bezugspunkt (Nullpunkt Pegel Murgenthal) in seiner Höhe nicht eindeutig bestimmbar war. Diese Profile wurden jedoch verwendet, um die teilweise unvollständigen Querprofile des Bundesarchivs (QP km 16.247, km 16.312 und km 16.331) in ihrer Breite zu ergänzen. Insgesamt konnten für den Standort Solothurn 15 Querprofile verwendet werden.

Die Querprofile stellten neben der Sohlenlage von 1900 teilweise auch Sohlenlagen von älteren Vermessungen zwischen 1855 und 1876 dar (siehe Abbildung 2). Wo möglich wurde die älteste vorhandene Sohlenlage für die Modellierungen verwendet. Das Profil bei der Torbrücke stellt die Situation vor dem Neubau der Brücke um 1878 dar, was der Situation während den zu untersuchenden Hochwasserereignissen entspricht.

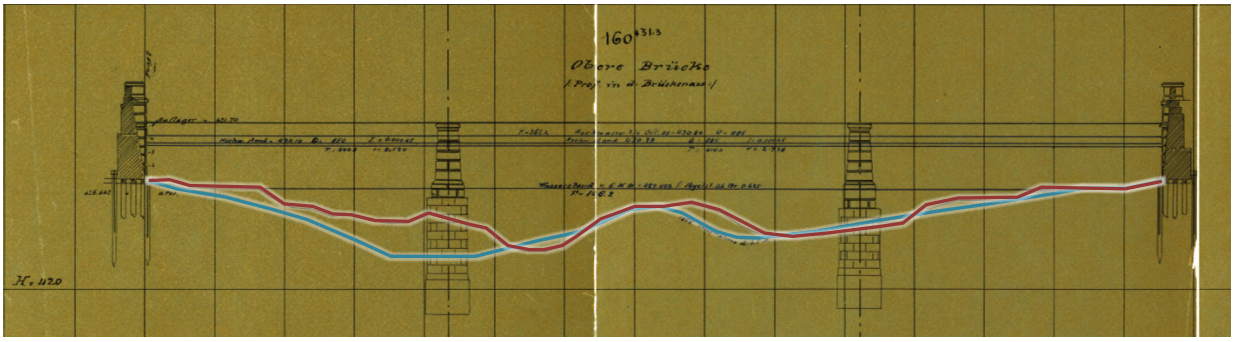

Abbildung 2: Profil km 16.031 der oberen Brücke in Solothurn (Wengibrücke). Rot hervorgehoben: Sohlenlage 1900. Blau hervorgehoben: Sohlenlage 1855. Quelle: Schweiz. Bundesarchiv.

Die Höhenlagen der Querprofile wurden teilweise anhand des vorhandenen Längenprofils von 1900 leicht angepasst, um die Ungenauigkeiten aufgrund der Verwendung verschiedener Nachführungsstände auszugleichen.

Die Übereinstimmung der Querprofile mit den heutigen GEWISS-Profilen ist bis auf einige Abweichungen der Sohlenlage im Bereich bis zu einem Meter sehr gut. Diese Abweichungen der Sohlenlage sind auf die zweite Juragewässer-Korrektion zurückzuführen, während der in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts grössere Sohlenabsenkungen im Raum Solothurn vorgenommen wurden. Da die zu untersuchenden Hochwasser am Standort Solothurn alle vor dieser Periode auftraten, werden für die Modellierungen die historischen Querprofildaten verwendet, die ebenfalls den Stand vor der Korrektion zeigen.

Tabelle 2: Verwendete historische Profile und Geometriedaten für den Standort Solothurn. Jahr in Klammer: Zusätzliche Informationen zur Sohlenlage vorhanden.

Profil	Jahr	Quelle
Aare bei Solothurn: Situationsplan (1:2‘000)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Längenprofil (1:10‘000 / 1:100)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 15.218 (1:200)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 15.732 (1:200) „Alt Pegel Schwimmschule“	1900 (1863)	Schweiz. Bundesarchiv

Aare bei Solothurn: Querprofil km 15.852 (1:200)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 15.921 (1:200) „6.0 m unterhalb Eisenbahnbrücke“	1900 (1876)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 15.965 (1:200) „60.0 m oberhalb der oberen Brücke“	1900 (1876)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.019 (1:200) „6.0 m oberhalb der oberen Brücke“	1900 (1876)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.031 (1:200) „Obere Brücke“	1900 (1855)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.043 (1:200) „6.0 m unterhalb der oberen Brücke“	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.088 (1:200) „51.0 m unterhalb der oberen Brücke“	1900 (1876)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.174 (1:200)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.247 (1:200)	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.312 (1:200) „untere Brücke“	1900 (1855)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.331 (1:200) „15.0 m unterhalb der unteren Brücke“	1900 (1865)	Schweiz. Bundesarchiv
Aare bei Solothurn: Querprofil km 16.522 (1:200) „Richtung Bahnhof Neu-Solothurn Werkhofstrasse“	1900	Schweiz. Bundesarchiv
Querprofile der Aare bei Solothurn: 50 Fuss unterhalb der Fussbrücke in Solothurn	1852	Staatsarchiv Kanton Bern

2.2.2 Standort Olten

Das markanteste Bauwerk an der Aare in Olten ist die Holzbrücke, welche die Altstadt mit dem östlichen Aareufer verbindet (rot markiert in Abbildung 3). Sie wurde bereits im 13. Jahrhundert erstmals erwähnt, womit sie bei allen zu untersuchenden Ereignissen in Olten als Referenz dienen kann. Die Eisenbahnbrücke (SBB-Brücke) flussaufwärts sowie die Bahnhofbrücke flussabwärts wurden erst 1876 resp. 1883 gebaut. Sie waren somit bei den zu untersuchenden Hochwasserereignissen in Olten noch nicht erstellt. Allerdings liegen aus der Planung dieser Brücken gute historische Querprofilinformationen der Aare vor.

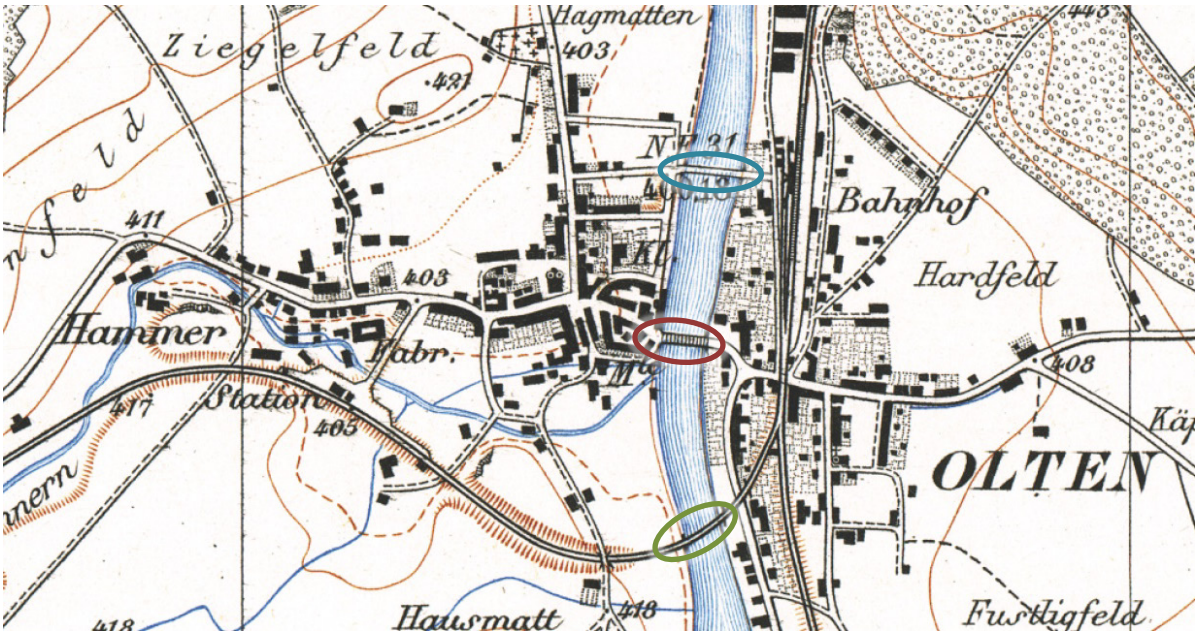

Abbildung 3: Situation in Olten um 1884 (Siegfriedkarte). Quelle: Bundesamt für Landestopografie. Rot markiert: Holzbrücke. Blau markiert: Bahnhofbrücke. Grün markiert: SBB-Brücke

Daneben liegen für den Standort Olten auch Profildaten von einer Vermessung für die Erstellung des Wasserkraftwerks Winznau / Gösgen um 1916 vor. Ältere vorhandene Profile von 1862 aus dem Staatsarchiv des Kantons Bern konnten, wie auch für den Standort Solothurn, aufgrund der nicht eindeutig bestimmbaren Höhenverortung nicht verwendet werden. Insgesamt konnten für den Standort Olten die drei Profile bei der SBB-Brücke, bei der Holzbrücke (Abbildung 4) und bei der Bahnhofbrücke (Fussgängerbrücke beim Bahnhof) verwendet werden (siehe Abbildung 3 für die Verortung der Brücken). Die erst nach 1852 erstellten Brücken (SBB-Brücke sowie Bahnhofbrücke) hatten aufgrund von lokalen Kolk-Phänomenen teilweise einen Einfluss auf die vermessenen Querprofile. Diese Effekte konnten durch eine manuelle Glättung der entsprechenden Profile korrigiert werden.

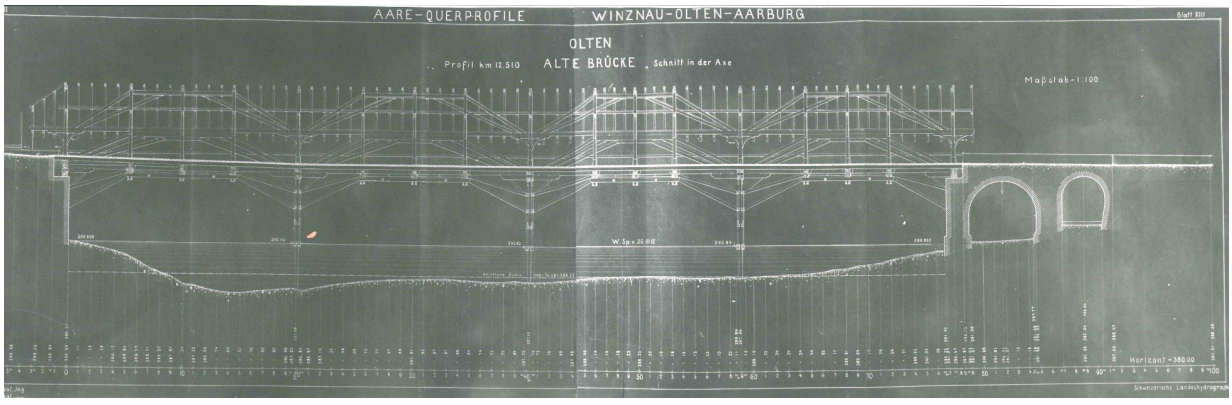

Abbildung 4: Profil km 12.510 Olten „alte Brücke“. Quelle: Stadtarchiv Olten.

Die Querprofile aus unterschiedlichen Vermessungen stimmten bezüglich Sohlentiefpunkt und mittlerer Sohlenlage nicht mit dem erwarteten Längsgefälle in diesem Bereich überein. Deshalb wurden die einzelnen Profile bezüglich ihrer Höhe anhand des Längenprofils von 1916 korrigiert. Die beiden Querprofile der Vermessung 1912 oberhalb der Dünnern („Olten Klos“ und „Hängebrücke bei

Aarburg“) wurden nicht verwendet, da die lokale Aufweitung bei der Klos von Olten mittels 1D-Strömungsmodell hydraulisch nicht abbildbar ist.

Tabelle 3: Verwendete historische Profile und Geometriedaten für den Standort Olten.

Profil	Jahr	Quelle
Olten-Gösgen: Längenprofil der Aare mit und ohne Stau (1:5‘000 / 1:50)	1916	Schweiz. Bundesarchiv
Kraftwerk Olten – Gösgen: Lageplan des Staugebietes (1:1‘000)	1916	Schweiz. Bundesarchiv
Aare-Querprofile Winznau-Olten-Aarburg: Querprofil Olten „alte Brücke“ km 12.510 (1:100)	1912	Stadtarchiv Olten
Aare-Querprofile Winznau-Olten-Aarburg: Querprofil Olten „neue Brücke“ km 12.217 (1:100)	1912	Stadtarchiv Olten
Schweiz. Bundesbahnen Strecke Olten – Biel: Profil km 39.927 „Aarebrücke bei Olten“ (1:100)	1926	Archiv Tiefbauamt der Stadt Olten

2.2.3 Standort Brugg

Die markante Brücke in Brugg ist die Steinbrücke, welche die Altstadt auf der rechten Aareseite mit der Vorstadt auf der linken Aareseite verbindet (rot markiert in Abbildung 5). Diese Stelle wurde bereits von den Römern als Übergang über die Aare benutzt und ab der Zeit von ca. 1300 n. Chr. existieren bildliche Darstellungen der Brücke. Die Brücke kann somit als Referenzpunkt für alle zu untersuchenden Hochwasser verwendet werden, auch wenn sie über die Jahre immer wieder umgebaut wurde. Die Brückengeschichte ist in [1] und [3] umfassend dokumentiert.

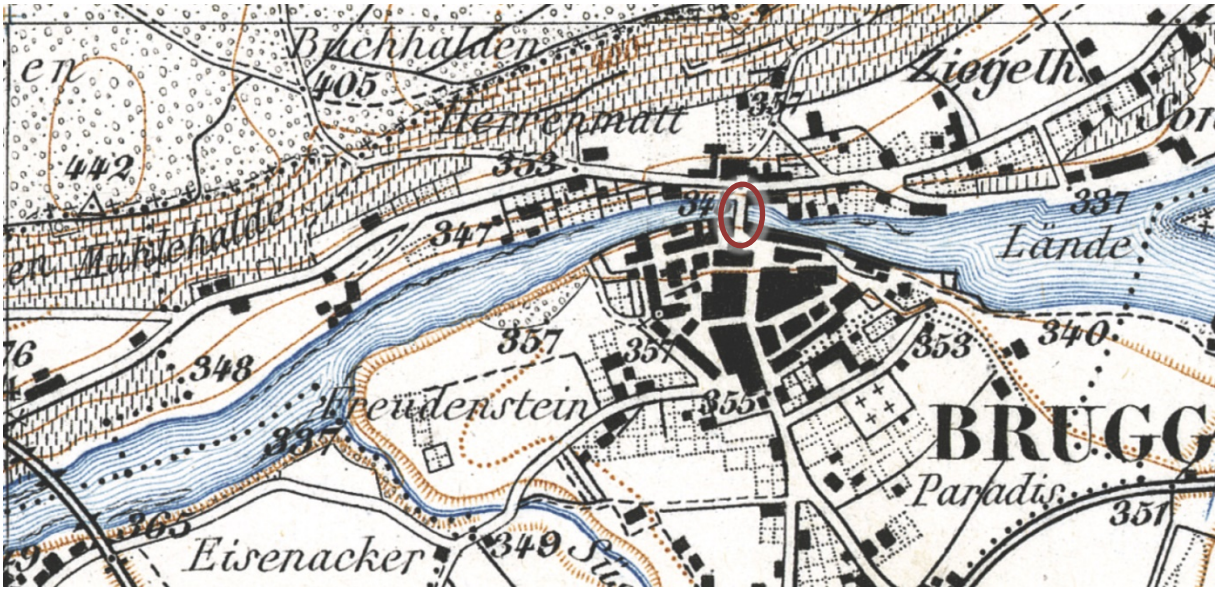

Abbildung 5: Situation in Brugg um 1878 (Siegfriedkarte). Rot markiert: Steinbrücke. Quelle: Bundesamt für Landestopografie.

Für den Standort Brugg sind kaum historische Vermessungsdaten vorhanden. Nur von der Steinbrücke existiert ein Querprofil von 1905 (siehe Tabelle 4). Die Aare verläuft in diesem Abschnitt jedoch mehrheitlich im Fels in einer natürlichen Einengung (Schluchtstrecke), weshalb die Geometrie

des Flussbettes über die Dauer als stabil angenommen werden kann. Auch die Gebäude wurden in Brugg flussaufwärts der Steinbrücke nicht direkt ans Wasser gebaut, sondern auf die natürlicherweise vorhandenen Felswände fundiert, was zeigt, dass die Gewässerbreite seit langer Zeit stabil ist.

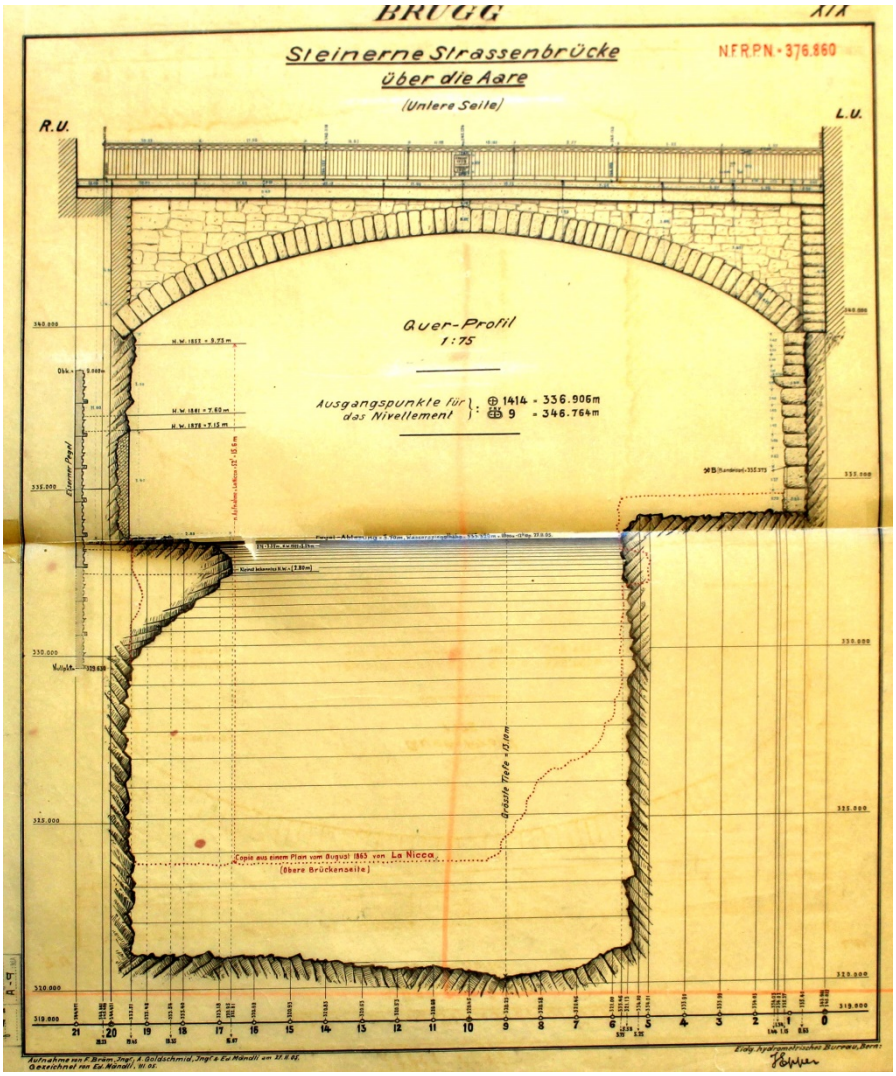

Abbildung 6: Historisches Querprofil Brugg: Querprofil steinerne Strassenbrücke über die Aare aus dem Jahre 1905. Unmassstäbliche Darstellung. Quelle: Archiv Bundesamt für Umwelt.

Ein Vergleich des historischen Profils von 1905 mit den aktuellen GEWISS-Daten zeigt, dass sich die Flussgeometrie kaum verändert hat. Die Sohlenlage ist zwar in den einzelnen Profilen leicht unterschiedlich, was jedoch eher auf den Fortschritt in der Messtechnik als auf grossflächige morphologische Veränderungen zurückzuführen ist. Deshalb und aufgrund der ungenügenden Datenlage wurde entschieden, für die Modellierungen am Standort Brugg die aktuellsten und nach neuesten Methoden erhobenen GEWISS-Daten zu verwenden.

Die Schluchtstrecke 200 m oberwasser bis 100 m unterwasser der Steinbrücke in Brugg hat eine sehr komplexe Geometrie mit einer Rechtskurve, einer gleichzeitigen Verengung und einer lokalen Absenkung der Sohle. Diese Geometrie wirkt hydraulisch als Venturi-Kanal, also als lokale Beschleunigungsstrecke aufgrund einer Verengung. Um diese komplexe hydraulische Situation im 1D-Strömungsmodell erfolgreich abbilden zu können, reichen die aktuellen GEWISS-Querprofile nicht aus, da sie nur im Abstand von 100 – 200 m vorliegen.

Die Strecke in Brugg wurde vom Bundesamt für Umwelt als Pilotstrecke für einen neuen Ansatz der Flussvermessung ausgeschieden. Aus dieser Vermessung sollen neu nicht mehr nur Querprofile hervorgehen, sondern durch den Einsatz von Radar und Echolot auch ein flächiges Abbild der Bathymetrie in Form einer Punktewolke. Für die Teststrecke in Brugg lag die Punktewolke im September 2018 vor, womit sie in die Modellierungen im Rahmen von EXAR integriert werden konnte.

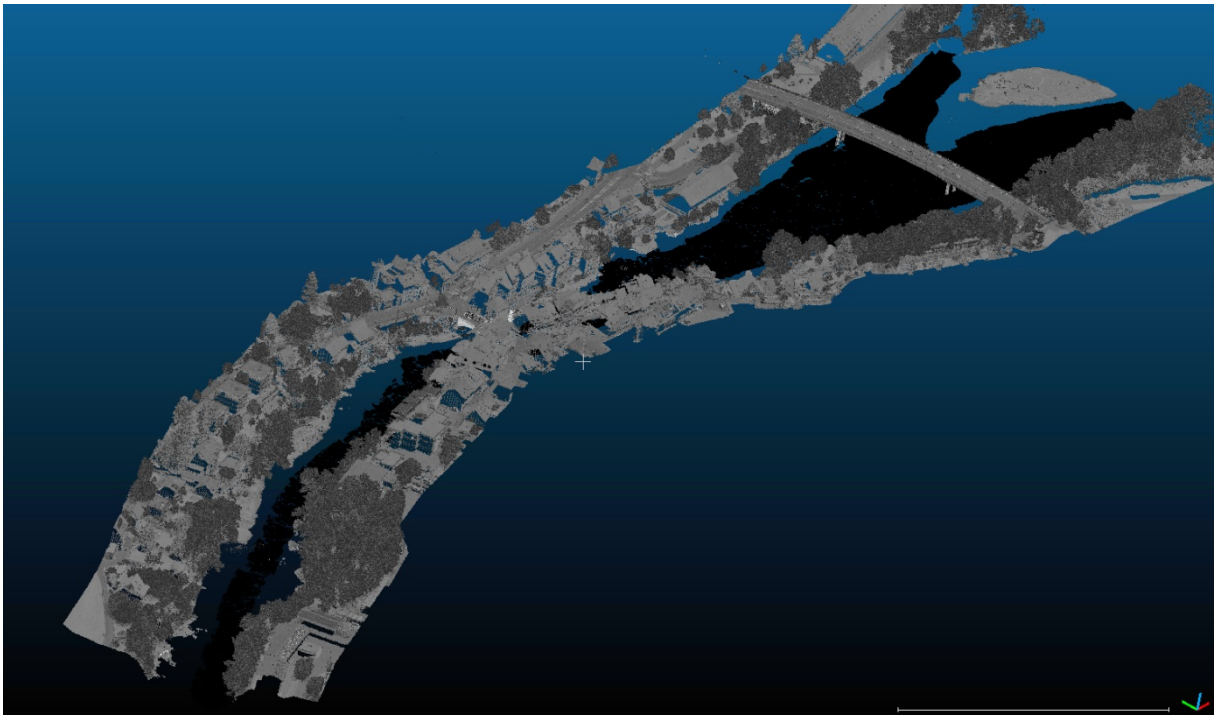

Abbildung 7: Punktewolke der Vermessungskampagne der Aare in Brugg. Grautöne: Punkte aus Laserscan. Schwarz: Punkte aus Bathymetrie-Vermessungen. Unmassstäbliche Darstellung.

Aus den flächenhaften Höheninformationen wurden Querprofile im Abstand von 10 m extrahiert. Auf diese Weise konnte das hydraulisch komplexe System ausreichend detailliert abgebildet werden. Insgesamt wurden für diesen Standort 29 Profile verwendet, wovon sechs Profile am Modellrand aus den GEWISS-Vermessungsdaten stammen und 23 Profile in der Modellmitte aus der Punktwolke der neuen Vermessungsdaten.

Tabelle 4: Vorhandene historische Profile und Geometriedaten für den Standort Brugg.

Profil	Jahr	Quelle
Brugg: Querprofil steinerne Strassenbrücke über die Aare (1:75)	1905	Archiv Bundesamt für Umwelt

3 Methodik

3.1 Verwendetes hydraulisches Modell

Die historischen Hochwasser wurden mit dem 1D-Strömungsmodell HEC-RAS in der Version 5.0.4 nachgebildet. Für mehr Informationen zum Modell sei auf das Handbuch [6] verwiesen.

3.2 Masseinheiten und Höhenangaben

3.2.1 Umgang mit alten Masseinheiten

Verschiedene alte Plangrundlagen wurden in Zoll resp. Schweizerfuss vermessen. Um sie für das auf metrischer Basis funktionierende hydraulische Modell verwenden zu können mussten die Höhen- und Längeninformationen teilweise umgerechnet werden. Als Umrechnungsfaktor wurde das Verhältnis 1 Schweizer Fuss = 0.3 m verwendet, das mit dem Konkordat von 1835 in der Deutschschweiz eingeführt wurde.

3.2.2 Höhenangaben verschiedener Landesnivellements

Die Pläne, die vor 1902 erstellt wurden, haben die Höhenangaben meist auf Basis des alten Landesnivellements von 1845 angegeben. Neuere Pläne, welche nach 1902 erstellt wurden, sind oft nach dem Landesnivellement 1902 (den heute gültigen Höhenangaben) vermessen. Um die Angaben verschiedener Erstellungsjahre vergleichen zu können, wurden die Höhenangaben von vor 1902 um 3.26 m nach unten korrigiert. So sind alle Höhenangaben kompatibel mit dem heute gültigen Landesnivellement LN02.

3.3 Kalibrierung und Validierung des Modells

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells konnten Wasserspiegellagen aus den historischen Längenprofilen (Solothurn, Olten) resp. Wasserspiegellagen am historischen Querprofil (Brugg) verwendet werden. In den verwendeten Längenprofilen sind jeweils für mehrere Abflüsse die entsprechenden Wasserspiegellagen markiert. Mit diesen mindestens zwei bekannten Pegel-Abfluss-Paaren konnte durch die Variation der Modellparameter (Rauigkeit, Randbedingungen, Sohlengefälle) für jeden der drei Standorte eine Kalibrierung und eine Validierung durchgeführt werden. Für Brugg wurden in der Vorstudie von Glauser [3] anhand von aktuellem Bildmaterial Wasserspiegellagen für verschiedene Abflüsse berechnet, die für die Kalibrierung des Modells verwendet werden konnten.

Tabelle 5: Für die Kalibrierung und Validierung der Modelle verwendete Angaben von Abfluss und Wasserspiegel

Standort	Kalibrierung	Validierung
Solothurn	Wasserspiegel des Hochwassers vom 3.-4.10.1888 mit Q = 885 m^3/s (Angabe auf Querprofilen von 1900)	Energieliniengefälle des Hochwassers vom 3. – 4.10.1888 (Angabe auf Querprofilen von 1900)
Olten	Wasserspiegel bei Q = 1050 m^3/s (Angabe auf Längenprofil von 1916)	Wasserspiegel bei Q = 900 m^3/s (Angabe auf Längenprofil von 1916)
Brugg	Wasserspiegel oberhalb Steinbrücke im Hochwasser 2007 mi Q = 1387 m^3/s (Angabe von Glauser)	Wasserspiegel oberhalb Steinbrücke bei Q = 900 m^3/s (Angabe von Glauser)

3.4 Modellunsicherheiten

3.4.1 Einleitung

In der gesamten beschriebenen Modellkette sind mehrere Quellen für Unsicherheiten vorhanden. Eine Quantifizierung aller Unsicherheiten ist im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht vollumfänglich möglich. Für einige Aspekte ist eine Abschätzung in engen Bandbreiten möglich, während andere Aspekte der Modellunsicherheiten kaum quantitativ angegeben werden können.

3.4.2 Unsicherheiten in den Grundlagedaten

Die Unsicherheiten in den Grundlagedaten sind vermutlich die grössten Unsicherheiten in der gesamten Modellkette. Folgende Aspekte werden den Unsicherheiten in den Grundlagedaten zugeordnet (mit abnehmendem Einfluss auf das Modellresultat):

- Die Angaben der Scheitelwasserstände sind teilweise mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Namentlich die Scheitelwasserstände, die aus narrativen Quellen stammen sind kritisch zu betrachten. Diese Unsicherheiten werden im Bericht zum Vorprojekt [1] abgehandelt.
- Die Querprofildaten sind teilweise deutlich jünger als die damit modellierten Hochwasserereignisse. In der Zwischenzeit konnte sich die Geometrie des Flusses massgeblich verändern. Eine Abschätzung über bauliche Veränderungen wurde von Wetter et al. [1] gemacht und ergab, dass sich an den betrachteten Standorten die Bebauung der Aare über die Jahrhunderte nicht stark verändert hat. Informationen zur Entwicklung der Sohlenlage über die Jahrhunderte liegen allerdings nicht vor.
- Ungenaue Vermessungstechniken führten zu Unsicherheiten in der Sohlenlage. Diese sind schwierig abzuschätzen, da Informationen zu den angewendeten Vermessungsmethoden fehlen. Sie dürften jedoch im Vergleich zu den Unsicherheiten der Scheitelwasserstände deutlich untergeordnet sein.
- Die alten Querprofile liegen nur in relativ grossen Abständen zueinander vor, womit Informationen zwischen den Querprofilen fehlen.

3.4.3 Unsicherheiten in der Modellabstraktion

Das 1D-Strömungsmodell HEC-RAS rechnet mit einer über das Querprofil gemittelten Strömungs- und Geschwindigkeitsverteilung. Diese Abstraktion wirkt sich vor allem bei hydraulisch komplexen Standorten wie demjenigen in Brugg auf die Unsicherheiten aus. Durch eine gute Modellkalibrierung können die modelltechnischen Unsicherheiten aber minimiert werden.

Eine weitere Unsicherheit besteht darin, dass im Modell eine fixe Sohle angenommen wird. Veränderungen in der Sohlenlage (Auflandungen, Erosionen) während eines Hochwasserereignisses werden demnach nicht abgebildet.

3.4.4 Quantifizierung der Unsicherheiten

Die publizierten Abflusswerte weisen eine Bandbreite von 100 – 300 m^3/s auf. Diese deckt die Unsicherheiten in der Parameterwahl und in der Modellabstraktion ab. Durch unterschiedliche Anwendung der Kalibrierungsparameter konnte die deklarierte Abflussbandbreite identifiziert werden, mit welcher der vorgegebene Scheitelwasserstand erreicht wird. Die Unsicherheiten in den Grundlagedaten sind obenstehend diskutiert, wurden jedoch nicht mit der Angabe einer Abflussbandbreite quantifiziert.

4 Resultate

4.1 Standort Solothurn

Die Abflusswerte am Standort Solothurn sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die Abflusswerte für das Ereignis 1480 basieren auf der Angabe eines Scheitelwasserstandes bei der Torbrücke. Für das Ereignis 1852 konnte auf eine Hochwassermarke im Bereich der Fussgängerbrücke weiter flussabwärts zurückgegriffen werden.

Tabelle 6: Abflusswerte für die historischen Hochwasserereignisse 1480 und 1852 am Standort Solothurn.

Jahr	Höhenkote [m ü. M.]	Quelltyp	Ort	Abfluss [m^3/s]
1480	430.03	Scheitelwasserstand	Torbrücke	1‘650 – 1‘750
1570	-	-	-	-
1852	428.40	Hochwassermarke	Fussgängerbrücke	1‘400 – 1‘500
1876	-	-	-	-

4.2 Standort Olten

Die Abflusswerte am Standort Olten sind in Tabelle 7 aufgelistet. Für das Ereignis 1480 ist in der Vorstudie [1] als Scheitelwasserstand das Gehniveau der Brücke angegeben. Die hydraulische Modellierung ergab für diesen Wasserstand allerdings unrealistisch hohe Abflüsse im Bereich von über 3000 m^3/s, welche weder mit anderen Standorten noch mit anderen Ereignissen am Standort Olten vergleichbar sind. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass der Scheitelwasserstand vom Standort Olten für 1480 nicht stimmt und somit der Abfluss für dieses Ereignis nicht bestimmbar ist. Gründe dafür könnten morphologische Prozesse (Auflandungen im Bereich der Brücke, welche zu einem höheren Wasserspiegel führten) oder eine Verklausung an der Brücke durch Schwemmholz sein. Gemäss der Vorstudie [1] ist es auch denkbar, dass die Angaben für 1480 in den historischen Aufzeichnungen verwechselt wurden und nicht das Gehniveau der Brücke in Olten, sondern eine Holzbrücke in einer anderen Stadt entlang der Aare gemeint war.

Das Ereignis 1852 konnte aufgrund einer Höhenangabe aus einer Hochwassermarke am Schloss Zielemp nachgebildet werden. Dieses befindet sich ca. 50 m unterwasser der Holzbrücke auf der linken Aareseite. Aufgrund des tiefen lokalen Sohlengefälles sowie der einfachen Flussbettgeometrie vor Ort, haben wir diese Höhenangabe für das Querprofil an der Holzbrücke verwendet.

Tabelle 7: Abflusswerte für die historischen Hochwasserereignisse 1480 und 1852 am Standort Olten.

Jahr	Höhenkote [m ü. M.]	Quelltyp	Ort	Abfluss [m^3/s]
1480	394.35	Scheitelwasserstand	Holzbrücke	Unrealistisch
1570	-	-	-	-
1852	391.54	Hochwassermarke	Holzbrücke / Zielemp	1‘700 – 1‘800
1876	-	-	-	-

4.3 Standort Brugg

Die Abflusswerte am Standort Brugg sind in Tabelle 8 aufgelistet. Als Scheitelwasserstand für das Ereignis 1480 wird in [1] ein Überströmen der damaligen Holzbrücke und ein Überfluten der Vorstadt mit Kote 342 m ü. M. angegeben. Gemäss den historischen Informationen ist jedoch möglicherweise ein Aufstau an der Brücke für das Überströmen und die anschliessende Überflutung der Vorstadt verantwortlich. Dieser Aufstau könnte aufgrund der komplexen Geometrie auch auf lokale Wellenbildungen zurückzuführen sein. Die Bandbreite des Abflusses von 2‘400 – 2‘700 m^3/s bildet einerseits die maximale Kapazität unter der Brücke bei Freispiegelabfluss kurz vor Berühren der Brückenunterkante auf 338.0 m ü. M. und andererseits die Kapazität mit Druckabfluss unter der Brücke und Aufstau auf 342.0 m ü. M. ab.

Zwischen 1480 und 1570 wurde die Holzbrücke in Brugg gemäss [1] deutlich höher neu gebaut. Der überlieferte Scheitelwasserstand des Jahres 1570 knapp unter der damaligen Brückenunterkante war demnach auch deutlich höher als die Brückenunterkante, wie sie 1480 bestand. Folglich erreicht der berechnete Abfluss für das Ereignis 1570 beinahe dieselbe Grössenordnung wie für das Ereignis 1480.

Für die Ereignisse 1852 und 1876 standen einerseits Hochwassermarken an der Oberseite der Brücke und andererseits Pegelmessungen ca. 8 m unterwasser der Brücke zur Verfügung. Die Angaben zum Wasserspiegel dieser beiden Standorte differierten um bis zu 50 cm, was auf lokale Strömungsphänomene zurückzuführen ist und im hydraulischen Modell mehrheitlich gut abgebildet werden konnte.

Tabelle 8: Abflusswerte für die historischen Hochwasserereignisse 1480, 1570, 1852 und 1876 am Standort Brugg.

Jahr	Höhenkote [m ü. M.]	Quelltyp	Ort	Abfluss [m^3/s]
1480	342.0	Scheitelwasserstand	Oberseite der Brücke	2‘400 – 2‘700
1570	339.1	Scheitelwasserstand	Oberseite der Brücke	2‘100 – 2‘300
1852	335.46	Pegelmessung	8m nach der Brücke	1‘900 – 2‘200
1876	333.16	Pegelmessung	8m nach der Brücke	900 – 1‘100

4.4 Rückrechnung Hochwasser 1480 in Olten

Da vom Ereignis 1852 für alle drei untersuchten Standorte Abflusswerte vorlagen, war es möglich, für den fehlenden Abfluss in Olten 1480 eine grobe Abschätzung zu machen: Die Abflusszunahme von Solothurn nach Olten während des Ereignisses 1852 beträgt 200 – 400 m^3/s, jene von Olten nach Brugg 100 – 300 m^3/s. Überträgt man diese Abflusszunahmen zwischen den Standorten auf das Ereignis 1480, so müsste der Abfluss in Olten im Bereich von 2‘000 – 2‘400 m^3/s gelegen haben.

Eine Rückrechnung mittels hydraulischem Modell ergibt für diesen Abfluss einen Pegel oberwasser der Holzbrücke von ca. 392.35 – 392.95 m ü. M. Diese Angaben sind allerdings mit deutlich grösseren Unsicherheiten behaftet als die Berechnung der Abflüsse in Kapitel 4.1 bis 4.3, da die Abflusszunahme von einem Ereignis ohne Kenntnis des Ereignisablaufs in den Zwischeneinzugsgebieten und grossen Zubringern nicht direkt auf ein anderes Ereignis übertragen werden darf.

5 Diskussion

5.1 Vergleich der Standorte untereinander

Um die Abflusswerte der verschiedenen Standorte miteinander vergleichen zu können, müssen zuerst die relevanten Zubringer in den Zwischeneinzugsgebieten quantifiziert werden. Im Abschnitt zwischen Solothurn und Olten ist der dominante Zubringer die Emme. Zusammen mit weiteren kleineren Zubringern (u.a. Murg, Wigger, Dünnern) fliessen der Aare auf diesem Abschnitt im Hochwasserfall (100-jährliches Ereignis nach heutigen Statistiken) rund 600 – 900 m^3/s zu. Ob dieser zusätzliche Abfluss zum Spitzenabfluss in der Aare unterhalb der Emmemündung beiträgt, hängt stark vom zeitlichen Zusammenspiel zwischen Aare und Emme ab und unterscheidet sich deshalb deutlich von Ereignis zu Ereignis.

Im Abschnitt zwischen Olten und Brugg münden mit u.a. Bünz, Aabach, Wyna und Suhre deutlich kleinere Zubringer in die Aare, was für das 100-jährliche Ereignis einem Zufluss in die Aare von ca. 100 – 300 m^3/s entspricht.

Tabelle 9 listet die Abflusswerte der im Rahmen von EXAR untersuchten Ereignisse und Standorte auf. Der Vergleich der Abflusswerte in Fliessrichtung der Aare erscheint unter Berücksichtigung der oben erwähnten Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet plausibel. Ebenfalls plausibel erscheint, dass die Ereignisse 1480 und 1570 in Brugg in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Diese beiden Hochwasserereignisse werden gemäss [1] in vielen Chroniken als ähnlich verheerend beschrieben.

Tabelle 9: Abflüsse der drei Standorte Solothurn, Olten und Brugg im Vergleich.

Jahr	Abfluss Solothurn [m^3/s]	Abfluss Olten [m^3/s]	Abfluss Brugg [m^3/s]
1480	1‘650 – 1‘750	-	2‘400 – 2‘700
1570	-	-	2‘100 – 2‘300
1852	1‘400 – 1‘500	1‘700 – 1‘800	1‘900 – 2‘200
1876	-	-	900 – 1‘100

5.2 Vergleich zu anderen Studien

5.2.1 Standort Brugg

Für einen Vergleich mit anderen Untersuchungen bietet sich vor allem der Standort Brugg an, wo in der Vergangenheit bereits verschiedene Studien durchgeführt wurden (siehe Tabelle 10).

Die Untersuchungen verwendeten unterschiedliche Grundlagedaten, ein unterschiedliches Berechnungsverfahren und unterschiedliche Kalibrierungsparameter. Am ehesten vergleichbar sind die Ansätze der vorliegenden Studie mit der Studie von Flussbau AG [4], welche ebenfalls ein hydraulisches Modell verwendet hat. Allerdings basieren ihre Angaben auf deutlich grossflächigeren Staukurvenberechnungen ab dem Sohlenfixpunkt des Wehrs Winznau, während die vorliegende Studie deutlich kleinräumiger und mit deutlich höher aufgelösten Grundlagedaten arbeitet.

Die Studie von Glauser [3], welche im Rahmen des EXAR-Vorprojektes durchgeführt wurde, weist einen völlig anderen Berechnungsansatz auf: Aufgrund von Bildmaterial bei Abflüssen zwischen

125 m^3/s und 1‘390 m^3/s wurde eine Pegel-Abfluss-Beziehung für das Querschnittsprofil unter der Brücke in Brugg hergeleitet. Abflusswerte für höhere Scheitelwasserstände wurden mittels einer einfachen geometrischen Extrapolation abgeschätzt.

Tabelle 10: Vergleich der Abflusswerte verschiedener Studien am Standort Brugg

	vorliegende Studie	**Studie Flussbau AG [4]**	**Studie Glauser [3]**
Abfluss Ereignis 1480 [m^3/s]	2‘400 – 2‘700	-	2‘500 – 2‘700
Abfluss Ereignis 1852 [m^3/s]	1‘900 – 2‘200	1‘700 – 1‘950	2‘270
Datengrundlage	Vermessung 2018	GEWISS Profile 2001 / 2008	Fotos mit diversen Wasserständen
Berechnung	1D hydraulisches Modell mit Normalabfluss	Staukurvenberechnung ab Wehr Winznau	Pegel-Abfluss-Beziehung
Kalibrierung	Verschiedene Pegelstände an der Brücke (Angaben aus Glauser [3])	Hochwasser 2007 an verschiedenen Pegelmessstationen	Angaben von Zschokke (1855) zum mittleren Tagesabfluss

Es zeigt sich, dass die resultierenden Abflüsse aller drei Studien in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Dies ist insofern bemerkenswert, da in den Studien teilweise deutlich voneinander abweichende Ansätze verwendet wurden.

5.2.2 Ereignis 1480 an Aare und Rhein

Wetter et al. [2] haben mit einer Methodik ähnlich der hier angewendeten historische Hochwasserabflüsse am Rhein in Basel rekonstruiert. Die Summe des historischen Abflusses von 1480 in Brugg und der höchsten gemessenen Abflüsse an den wichtigsten Zubringern zwischen Brugg und Basel (Reuss, Limmat, Hochrhein) kann somit verglichen werden mit dem rekonstruierten Abfluss 1480 in Basel.

Tabelle 11; Vergleich des rekonstruierten Spitzenabflusses 1480 in Brugg mit dem rekonstruierten Spitzenabfluss 1480 in Basel.

Fluss (Ort)	**Spitzenabfluss [m^3/s]**	**Herkunft Daten**
Aare (Brugg)	2‘500 – 2‘700	Rekonstruktion 1480
Reuss (Mellingen)	854	Messung 2005
Limmat (Wettingen)	657	Messung 1999
Hochrhein (Rekingen)	2‘043	Messung 1999
Summe	6‘050 – 6‘250	Aufsummierung Spitzenabflüsse
Rhein (Basel)	6‘400	Wetter et al. (2011) [2]

Dieser Vergleich setzt viele Vereinfachungen voraus. Die wichtigsten davon sind, dass die Spitzenabflüsse in allen Zubringern gleichzeitig auftraten und dass die höchsten gemessenen Spitzenabflüsse der Neuzeit vergleichbar sind mit den Spitzenabflüssen des historischen Extremereignisses von 1480. Deshalb ist dieser Vergleich der Daten nur bedingt belastbar. Im grösseren Kontext (vgl. Kapitel 5.2.1) zeigt sich jedoch, dass die berechneten historischen Abflüsse in verschiedenen Studien in einem sehr ähnlichen Bereich zu liegen kommen.

5.2.3 Weitere Studien

Eine ebenfalls vorliegende Studie über Extremhochwasser an der Aare mit Fokus auf den Abschnitt zwischen Thun und Bern [5] kann nicht in den Vergleich mit einbezogen werden, da sich die vorliegende Studie auf Standorte unterhalb des Bielersees beschränkt.

5.3 Vergleich mit rezenten Hochwasserabflüssen

Tabelle 12 zeigt einen Vergleich der rekonstruierten historischen Hochwasserabflüsse mit den grössten rezenten Hochwassern entlang der Aare aus den Jahren 2005 und 2007. Bei diesem Vergleich müssen die beiden grossen wasserbaulichen Veränderungen im Aare-Einzugsgebiet mit berücksichtigt werden: Kanderdurchstich und Jura-Gewässer-Korrektion. Die beiden Korrektionen haben gemäss Wetter et al. [2] einen Dämpfungseffekt auf den Spitzenabfluss heutiger Hochwasser von rund 900 m^3/s. Die rezenten Ereignisse wären also unter historischen Bedingungen ebenfalls ungefähr um diesen Wert grösser ausgefallen. Auch wenn man diese Dämpfungswirkung berücksichtigt, ist vor allem das Hochwasser 1480 immer noch deutlich grösser als die heute bekannten höchsten gemessenen Spitzenabflüsse.

Im Rahmen von EXAR war es nicht möglich, die Auswirkung der Gewässerkorrektionen auf extreme Abflüsse im Detail zu quantifizieren, da dies weitere Langzeitsimulationen bedingt hätte. Ein grober Vergleich mit der historischen Hochwassersituation ist hingegen möglich, allerdings mit grossen Unsicherheiten, insbesondere im Falle der JGK I, behaftet. Deren detaillierte Rekonstruktion hätte den Rahmen des EXAR-Projekts gesprengt.. Während der alte Lauf der Kander relativ gut nachgebildet werden kann, reicht es bei der JGK I nicht aus, nur den Lauf der alten Aare zu reaktivieren. Vielmehr müsste auch der Einfluss der Entsumpfung (umliegende Fläche der drei Jurarandseen) sowie der Ausbau und die Vertiefung der Verbindungen zwischen den drei Seen (Broyekanal und Zihlkanal) erfasst werden. Einfachheitshalber wurde die JGK I in der vorliegenden Studie berücksichtigt, indem die heutige Verbindung der Aare zum Bielersee (Hagneckkanal) entfernt und die alte Aare wieder vollständig reaktiviert wurde.

In diesem groben Vergleich zeigt sich, dass der Kanderdurchstich zu einer klaren Verschiebung des Hochwasserrisikos geführt hat: Während die Hochwasserspitzen unterhalb des damaligen Zusammenflusses von Kander und Aare abnehmen, werden diese zwischen Thun und dem damaligen Zusammenfluss grösser. Wird das Augusthochwasser 2005 unter damaligen und heutigen Bedingungen simuliert, resultiert in Thun für heutige Bedingungen eine um 200 m^3/s (respektive 40 %) erhöhte Spitze, während sie in Bern etwa halbiert wird.

Im Hinblick auf die absoluten Abflussmengen der Aare unterhalb des Bielersees sind die Auswirkungen der JGK I deutlich grösser als diejenigen des Kanderdurchstichs: Ohne JGK I würde der grösste in EXAR simulierte Spitzenabfluss für Transferpunkt SSCSSD (entspricht in etwa dem Standort Solothurn) um ca. 1‘300 m^3/s grösser ausfallen. Die überlagerte Auswirkung beider Korrektionen könnte im Vergleich zum Zustand von vor 1714 zu einer noch grösseren Reduktion der

Spitzenabflüsse geführt haben. Gleichzeitig aber ist zu bedenken, dass die Flussläufe vor den grossen Korrektionen stärker mäandrierten, die Flusssohlen flacher und rauer waren, die Vegetation stärker ausgebreitet war und grössere Retentionsräume bestanden. Diese Bedingungen haben höchstwahrscheinlich der Reduktion der Hochwasserspitzen durch die Korrektionen entgegengewirkt.

Die quantifizierte Dämpfungswirkung der Gewässerkorrektionen weist zwischen den Studien von Wetter et al. [2] und der vorliegenden Studie eine Differenz von rund 400 m³/s auf. Diese Differenz ist dadurch zu erklären, dass Wetter et al. [2] grosse bekannte Hochwasser (Wiederkehrperiode ca. 100 - 200 Jahre) als Basis genommen haben, während in der vorliegenden Studie die Dämpfungswirkung auf Extremabflüsse mit einer Wiederkehrperiode von ca. 10^{-5} bis 10^{-6} quantifiziert wurde.

Tabelle 12: Vergleich der Spitzenabflüsse der im Rahmen von EXAR analysierten vier historischen Hochwasserereignissen mit den Hochwasserereignissen 2005 und 2007 (hergeleitet aus Messwerten von Bund und Kantonen) und den mit der hydrometeorologischen Modellkette simulierten Spitzenabflüssen.

Jahr	**Spitzenabfluss Solothurn [m³/s]**	**Spitzenabfluss Olten [m³/s]**	**Spitzenabfluss Brugg [m³/s]**
1480 (Sommer)	1‘650 – 1‘750	-	2‘400 – 2‘700
1570 (Winter)	-	-	2‘100 – 2‘300
1714	Kanderdurchstich: Umleitung der Kander in den Thunersee		
1852 (Herbst)	1‘400 – 1‘500	1‘700 – 1‘800	1‘900 – 2‘200
1876 (Sommer)	-	-	900 – 1‘100
1878	JGK I: Umleitung der Aare in den Bielersee		
2005	660	1035	1057
2007	719	1392	1387
HQ100 EXAR	851 – 864	1‘263 – 1‘409	1‘575-1‘710
HQ1000 EXAR	961 – 998	1‘601 – 1‘864	2‘012-2‘222
HQ10000 EXAR	1‘246 – 1‘409	1‘905 – 2‘374	2‘378-2‘747

6 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie konnten erstmals mit einem hydrodynamischen Modell für mehrere Standorte die Abflüsse historischer Hochwasserereignisse quantifiziert werden.

Als Basis dazu dienten historische Vermessungsdaten der Aare. Auch wenn die Vermessungsdaten teilweise deutlich jünger sind als die untersuchten Hochwasserereignisse, so kann aus der Verwendung dieser Daten im Vergleich zu aktuellen Vermessungsdaten doch ein grosser Mehrwert generiert werden. Ausnahme bilden Orte, an denen die Datengrundlage für historische Geometriedaten unzureichend ist, wie beispielsweise in Brugg.

Der Vergleich der Resultate mit vorangegangenen, weniger umfangreichen Studien zeigt nur geringe Unterschiede in den Resultaten auf, was die Plausibilität aller verglichenen Studien bestätigt.

Verglichen zu den jüngsten grösseren Hochwasserereignissen 2005 und 2007 liegen die Abflusswerte für die historischen Hochwasser deutlich höher. Eine wichtige Rolle bei dieser Differenz spielen jedoch die grossen Gewässerkorrektionen, welche erst nach den letzten untersuchten historischen Ereignissen durchgeführt wurden. Durch diese grossflächigen Gewässerumleitungen wurde ein erhebliches Retentionsvolumen geschaffen, womit die Spitzenabflüsse heutiger Hochwasserereignisse deutlich geringer ausfallen als die Spitzenabflüsse im natürlichen Aare-System. Dieser Effekt muss auch bei einem Vergleich der historischen Spitzenabflüsse mit den im Rahmen von EXAR bestimmten Spitzenabflüssen für Extremereignisse mit berücksichtigt werden, da die in EXAR bestimmten Spitzenabflüsse auf dem heutigen Aare-System basieren.

Zollikofen, 18.11.2019

GEOTEST AG

Severin Schwab
Fachbereichsleiter

Patrick Baer
Sachbearbeiter / Projektleiter

Universität Bern

Martina Kauzlaric
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

7 Literaturverzeichnis

[1] Wetter O. 2016. Rekonstruktion vorinstrumenteller Scheitelwasserstände der Aare – einschliesslich ihrer wichtigsten Zubringer Saane, Emme, Reuss und Limmat inklusive einer Meteoumfeldanalyse für die extremsten Hochwasser. Universität Bern.

[2] Wetter O. et al. 2011. The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. Hydrological Sciences Journal, 56:5. S. 733-758.

[3] Glauser H. 2016. Hochwasser- und Pegel-Fakten zur Aare bei und unterhalb der Steinbrücke in Brugg. Windisch, September 2016.

[4] Flussbau AG 2014: Gefahrenkarte Hochwasser Kanton Aargau Hydrologie Aare. Ergänzende Untersuchungen zum Hochwasser 1852. Zürich, April 2014

[5] Geo 7 AG, IUB AG, HZP AG, Emch+Berger AG. 2007. Extremhochwasser im Einzugsgebiet der Aare. EHW Aare. Bericht.

[6] US Army Corps of Engineers (2016): HEC-RAS River Analysis System. Version 5.0.4. User's Manual Version 5.0, Davis (CA) USA.