
Aktualisierung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts für den Hochrhein

Projektnummer:

HY 9/4

- abgestimmter Endbericht -

Auftraggeber:

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg (LUBW)
Regierungspräsidium Freiburg
Bundesamt für Umwelt Bern (BAFU)

bearbeitet am:

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Abteilung Hydrologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Dr.-Ing. J. Ihringer

Karlsruhe, Februar 2010

Vorwort der Auftraggeber

Der vorliegende Bericht „Aktualisierung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts für den Hochrhein“ entstand aus dem Bedürfnis heraus, die Hochwasserabflusswerte entlang des Hochrheins zwischen dem Land Baden-Württemberg (vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) sowie das Regierungspräsidium Freiburg), den anliegenden schweizerischen Kantonen und der Schweizerischen Eidgenossenschaft (vertreten durch das Bundesamt für Umwelt BAFU) zu koordinieren und aufeinander abzustimmen. Ausgelöst wurde dieses Bedürfnis durch anstehende Arbeiten im Rahmen der Gefahrenbeurteilung und der Erstellung von Gefahrenkarten. Die letzte Abstimmung erfolgte im Jahr 1998, wobei neuere Ereignisse und Arbeiten im Einzugsgebiet (z. B. Ausbau der Thur) eine Überprüfung und allfällige Anpassung der heutigen Statistik erforderlich machten.

Aus diesem Grund erteilten die LUBW, das Regierungspräsidium Freiburg und das BAFU an das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie, vertreten durch Herrn Dr.-Ing. J. Ihringer, den Auftrag, einen neuen Längsschnitt zu erarbeiten. Die Arbeiten wurden von den unten aufgeführten Vertretern der LUBW, des Regierungspräsidiums Freiburg und des BAFU begleitet. In dieser Gruppe wurden die offiziellen Werte gemeinsam und einstimmig festgelegt. Sie finden sich in *Kap. 4* (S. 4-1 bis 4-7) dieses Berichts, einmal in Form eines graphischen Längsschnitts, einmal in Form einer Tabelle. Die Hochwasserabflusswerte sind hierbei an verschiedenen Stützstellen des Hochrheins mit den Jährlichkeiten 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500, 1000 Jahre angegeben und auf $10 \text{ m}^3/\text{s}$ gerundet. Die Auftraggeber der Studie sind sich bewusst, dass die Unsicherheiten in der Beurteilung grösser sind als dieser Rundungsbereich; diese Rundungen wurden jedoch gewählt, um einen konsistenten Verlauf der Hochwassergrossen im Längsverlauf des Flusses zu erreichen.

Mit dieser Studie liegen nun neue und offiziell abgestimmte Hochwasserkennwerte für den Hochrhein für den Gebrauch bei den Fachleuten der Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung vor. Das Regierungspräsidium Freiburg hat diese Werte bereits bei den zuständigen Fachstellen als verbindlich verfügt. Das BAFU empfiehlt, bei den Beurteilungen und Planungsarbeiten diese Werte als Grundlage am Hochrhein zu verwenden.

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern
Landesanstalt für Umwelt, Messungen & Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe
Regierungspräsidium Freiburg

Auftragnehmer:

Dr.-Ing. Jürgen Ihringer Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung /
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik / Abteilung Hydrologie

Projektbegleitung und Abstimmung durch:

Frank Bödeker	Regierungspräsidium Freiburg, Ref 53.1
Dr. Manfred Bremicker	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Sachgebiet Hochwasserschutz Oberrhein, Hochwasser-Vorhersage-Zentrale
Bernhard Burkart	Regierungspräsidium Freiburg, Ref 53.1
Wolfgang Hennegriff	Landesanstalt für Umwelt, Messungen & Naturschutz Baden Württemberg / Abteilung 4 - Wasser / Referat 43 - Hydrologie und Hochwasservorhersage
Caroline Kan	Bundesamt für Umwelt, Abt. Hydrologie / Sektion Analysen und Vorhersagen
Roland Müller	Regierungspräsidium Freiburg, Ref 53.3
Dr. Wolfgang Ruf	Bundesamt für Umwelt, Abt. Gefahrenprävention / Sektion Risikomanagement
Beat Sigrist	Bundesamt für Umwelt, Abt. Hydrologie / Sektion Hydrometrie

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1-1
2	Datengrundlage und -vorauswertung	2-1
2.1	Einbezogene Datengrundlage	2-1
2.2	Statistische Prüfung der Datengrundlage und Trendbereinigung	2-5
3	Auswertung der Abflussextrémwerte	3-1
3.1	Extremwertstatistik	3-1
3.2	T-jährliche Abflüsse an den Pegeln aus der Extremwertstatistik	3-4
3.3	T-jährliche Abflüsse an zusätzlichen Gewässerstellen.....	3-12
3.4	Längsschnitt-Regionalisierung entlang des Hochrheins.....	3-15
3.5	Hochwasserabfluss-Längsschnitt für die Stützstellen	3-17
4	Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein	4-1
5	Literatur	5-1

Anlagen

- Anlage A:** Langzeitverhalten der Wasserstands- und Abflusshöchstwerte an den einbezogenen Pegeln
- Anlage B:** Partielle Mittelwerte und Trends sowie Langzeitverhalten der trendbereinigten Zeitreihen der Abflusshöchstwerte
- Anlage C:** Extremwertstatistiken der Wasserstands- und Abflusshöchstwerte an den einbezogenen Pegeln

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Bearbeitung der Hochwasserregionalisierung für Baden-Württemberg wurde für den Hochrhein zwischen dem Pegel Konstanz und dem Pegel Basel-Schifflande bzw. oberhalb der Einmündung der Kander ein Abflusslängsschnitt für Hochwasserabflüsse erstellt. Dieser Längsschnitt umfasste dabei die Abflusskennwerte mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss MHQ und T-jährliche Hochwasserabflüsse HQ_T für Jährlichkeiten zwischen $T = 2$ und 100 Jahren. Die Datengrundlage waren dabei die Pegel entlang des Hochrheins mit Abflussbeobachtungen, wobei die Beobachtungszeitreihen bis zum Jahr 1995 ausgewertet wurden. Der Abfluss-Längsschnitt wurde 1998 mit der damaligen LHG (Landeshydrologie und -geologie) in Bern abgestimmt. Dieser abgestimmte Längsschnitt wurde auch in die aktuelle Herausgabe „Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg“ mit Stand Juli 2007 (LUBW 2007) übernommen.

Für den Hochrhein sollen in Kooperation der zuständigen Behörden aus Baden-Württemberg und der Schweiz Hochwassergefahrenkarten erstellt werden. Hierfür ist es notwendig, den Abflusslängsschnitt bis zum Hochwasserextremwert HQ_{Extrem} , der in Baden-Württemberg in der Größenordnung eines 1 000-jährlichen Ereignisses festgelegt wird, zu erweitern. Neben diesem Extremwert sind entsprechend der Anforderungen von Baden-Württemberg und der Schweiz die Jährlichkeiten $T = 2, 10, 30, 50, 100, 300$ Jahre zu betrachten. Bei der Bearbeitung soll der gesamte Abflusslängsschnitts auf der Basis des heutigen Datenstands der Abflusszeitreihen unter Berücksichtigung von weitergehenden Informationen über die Abflussleistungsfähigkeit der seitlichen Hochrhainzuflüsse aktualisiert werden. Die Überarbeitung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts am Hochrhein wurde dabei in enger Kooperation und Abstimmung mit den zuständigen Behörden aus Baden-Württemberg und der Schweiz durchgeführt.

Zur Aktualisierung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts am Hochrhein sind zunächst die Beobachtungsdaten der maßgebenden Pegel zu erheben bzw. auf den aktuellen Datenstand zu verlängern. Die beobachteten Hochwasserabfluss-Zeitreihen sind über geeignete statistische Testverfahren auf Stationarität und Homogenität zu prüfen. Anschließend werden T-jährliche Hochwasserabflüsse durch Anwendung der Methoden der Extremwertstatistik ermittelt. Analog zu der Bearbeitung der Hochwasserregionalisierung in Baden-Württemberg erfolgt eine Abstimmung und ein Abgleich der statistisch ermittelten Werte im Längsschnitt des Hochrheins. Durch zusätzliche Berücksichtigung der verschiedenen Zuflüsse aus Baden-Württemberg und der Schweiz kann der gesamte, detaillierte Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein abgeleitet werden.

2 Datengrundlage und -vorauswertung

Für die Bearbeitung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts entlang des Hochrheins zwischen dem Auslauf des Bodensees (Obersee) bei Konstanz und dem Übergang des Hochrheins in den Oberrhein bei Basel sind als Datengrundlage langjährige Pegelbeobachtungen mit Abfluss-erfassung (Abflusszeitreihen) erforderlich. Langjährige Abflusszeitreihen wurden dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) vor allem für die schweizerischen Pegel entlang des Hochrheins bereitgestellt. Die Datenbereitstellung erfolgte vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Bern und von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) in Karlsruhe. Die Daten wurden aufbereitet und einer statistischen Prüfung bezüglich Stationarität und Homogenität unterzogen.

2.1 Einbezogene Datengrundlage

Die in die Untersuchung einbezogenen Pegel sind in Tabelle 2.1 mit ihrer Beobachtungszeit-spanne zusammengestellt. Die Lage der Pegel zeigt Abb. 2.1. Die einbezogenen Pegel umfas-sen somit den eigentlichen Gewässerlauf des Hochrheins zwischen dem Ausfluss des Boden-sees (Obersee) in Konstanz und dem Übergang des Hochrheins in den Oberrhein bei Basel sowie die wesentlichen Zuflüssen Thur und Aare zum Hochrheins. Bei den einbezogenen Pe-gelzeitreihen handelt es sich vor allem um die monatlichen Höchstwerte HQ(m), auf deren Grundlage die Extremwertbetrachtungen für die T-jährlichen Abflüsse abgeleitet werden. Wie Tabelle 2.1 zeigt, weisen diese Zeitreihen für die meisten Pegel einen Zeitreihenbeginn zwi-schen den Jahren 1904 und 1908 auf. Kürzere Messreihen sind am Pegel Rheinfelden/Rhein (Datenbeginn im Jahr 1933), am Pegel Hauenstein/Rhein (Datenbeginn im Jahr 1992) und am Pegel Konstanz/Rhein (Datenbeginn im Jahr 1983) vorhanden.

Lediglich für den Pegel Basel-Rheinhalle am Rhein reicht die gesamte Zeitreihe bis ins Jahr 1869 zurück. An diesem Pegel muss jedoch beachtet werden, dass sich die gesamte Zeitreihe aus den Beobachtungen verschiedener Pegelstandorte zusammensetzt. Erst ab 1996 gelten die Abflusswerte für den Standort Rheinhalle. Zuvor wurden die Abflüsse am Standort Schiff-lände, unterstrom des Standorts Rheinhalle erfasst. Zusätzlich erfolgte in den Jahren zwischen 1944 und 1995 die Datenerfassung am Standort St. Alban. Aufgrund dieser Zeitreihenzusam-mensetzung kann die Güte der Pegelbeobachtungen und damit die Güte der gesamten Ab-flusszeitreihe nur ungenau beurteilt werden. Bei der langen Beobachtungszeitreihe (ab 1869) des Pegels Basel ist auch zu beachten, dass sich die Abflussverhältnisse an der Aare infolge der Überleitung der Aare in den Bielersee im Zuge der 1. Juragewässerkorrektur ab 1891 ver-ändert haben. Weiterhin wurden die extremen Abflussscheitelwerte für den Pegelstandort in Basel über lange Zeitabstände aus den benachbarten Pegeln Rheinfelden/Rhein, Liestal/Ergolz und Münchenstein/Birs über eine angepasste Regressionsbeziehung berechnet. Um den Ein-fluss dieser unterschiedlichen Datenbestimmung zu berücksichtigen, erfolgte zusätzlich auch eine Auswertung einer Scheitelwertszeitreihe am Pegel Basel-Rheinhalle, die auch für die jüngste Beobachtungszeit ab 1990 anstelle der beobachteten Werte berechneten Abfluss-scheitelwerte beinhaltet. Dieser Datenaustausch wurde für Abflussscheitelwerte größer als $2\,700\text{ m}^3/\text{s}$ vorgenommen.

Zur Erweiterung der Datengrundlage wurden folgende zusätzliche Mess-Zeitreihen einbezogen:

- Monatliche Höchstwerte HQM(m) am Pegel Münchenstein-Hofmatt/Birs: Die Birs mündet direkt am Standort des Pegels Basel-Rheinhalle/Rhein in den Hochrhein. Deshalb wurde Pegel an der Birs trotz des relativ kleinen Einzugsgebiets in die Untersuchung einbezogen, um den Einfluss der Birs auf die Abfluss-Scheitelwerte am Pegel Basel-Rheinhalle beurteilen zu können.
- Mittlere tägliche Wasserstände MW(d) am Pegel Konstanz/Bodensee: Die Wasserstandsaufzeichnung am Bodensee (Obersee) liegen für den Pegel in Konstanz ab Nov 1817 als mittlere Tageswerte vor. Diese Zeitreihen wurden verwendet, um die Ermittlung der T-jährlichen Abflüsse des Abflusspegels in Konstanz in das langjährige Verhalten einbinden zu können.
- Mittlere tägliche Abflüsse MQ(d): Für die Pegel Neuhausen, Rekingen und Rheinfeldern am Hochrhein und die Pegel an Thur, Wutach und Aare wurden die mittleren täglichen Abflüsse MQ(d) einbezogen zur Unterstützung der Abschätzung der T-jährlichen Abflüsse unterhalb der Einmündungen von Thur und Aare in den Hochrhein.

Aus der einbezogenen Datengrundlage wurden für die Ermittlung der T-jährlichen Hochwasserabflüsse die Serien der jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte bezogen auf das hydrologische Jahr von November bis Oktober, wie es in Deutschland meist für Auswertungen von Hochwasserereignisse angewandt wird, abgeleitet. Beispielhaft zeigt Abb. 2.2 die Höchstwerte des Jahres und der beiden Halbjahre (Winter und Sommer) am Pegel Rheinfeldern/Rhein. In diese Darstellung sind neben den Höchstwerten auch der langjährige mittlere Hochwasserabfluss MHQ, der lineare Trend über die Gesamtzeitreihe sowie der wahrscheinliche Bruchpunkt nach MANN-WHITNEY eingetragen. Wie diese erste statistische Beschreibung der Zeitreihe zeigt, weisen die Höchstwerte am Pegel Rheinfeldern/Rhein offensichtlich einen Trend auf, der einen Einfluss auf die statistische Ermittlung der T-jährlichen Hochwasserabflüsse haben kann. Deshalb erfolgte zunächst eine statistische Prüfung aller einbezogenen Hochwasserabfluss-Zeitreihen bezüglich Homogenität und Stationarität.

Tabelle 2.1: Einbezogene Pegel mit zugehöriger Einzugsgebietsgröße $A_{E,o}$ sowie der Zeitspanne der vorliegenden Abfluss- und Wasserstandsbeobachtungen

Gewässer	Pegel	$A_{E,o}$ [km ²]	Zeitreihe
monatliche Abflusshöchstwerte HQ(m)			
Hochrhein	Konstanz	10 919	Okt 1983 - Mai 2008
	Neuhausen-Flurlingerbrücke	11 887	Jan 1904 - Dez 2008
	Rekingen	14 752	Jan 1904 - Dez 2008
	Hauenstein	34 023	Aug 1992 - Okt 2008
	Rheinfelden	34 526	Jan 1933 - Dez 2008
	Basel-Rheinhalle	35 897	Jan 1869 - Dez 2008
Thur	Andelfingen	1 696	Jan 1904 - Dez 2008
Aare	Untersiggenthal-Stilli	17 601	Jan 1904 - Dez 2008
Birs	Münchenstein-Hofmatt	911	Jan 1908 - Dez 2008
mittlere tägliche Wasserstände MW(d)			
Bodensee	Konstanz	10 919	Nov 1817 - Okt 2008
mittlere tägliche Abflüsse MQ(d)			
Hochrhein	Neuhausen-Flurlingerbrücke	11 887	Jan 1904 - Dez 2008
	Rekingen	14 752	Jan 1904 - Dez 2008
	Rheinfelden	34 526	Jan 1933 - Dez 2008
Thur	Andelfingen	1 696	Jan 1904 - Dez 2008
Wutach	Oberlauchringen	629	Jan 1912 - Mrz 2004
Aare	Untersiggenthal-Stilli	17 601	Jan 1904 - Dez 2008

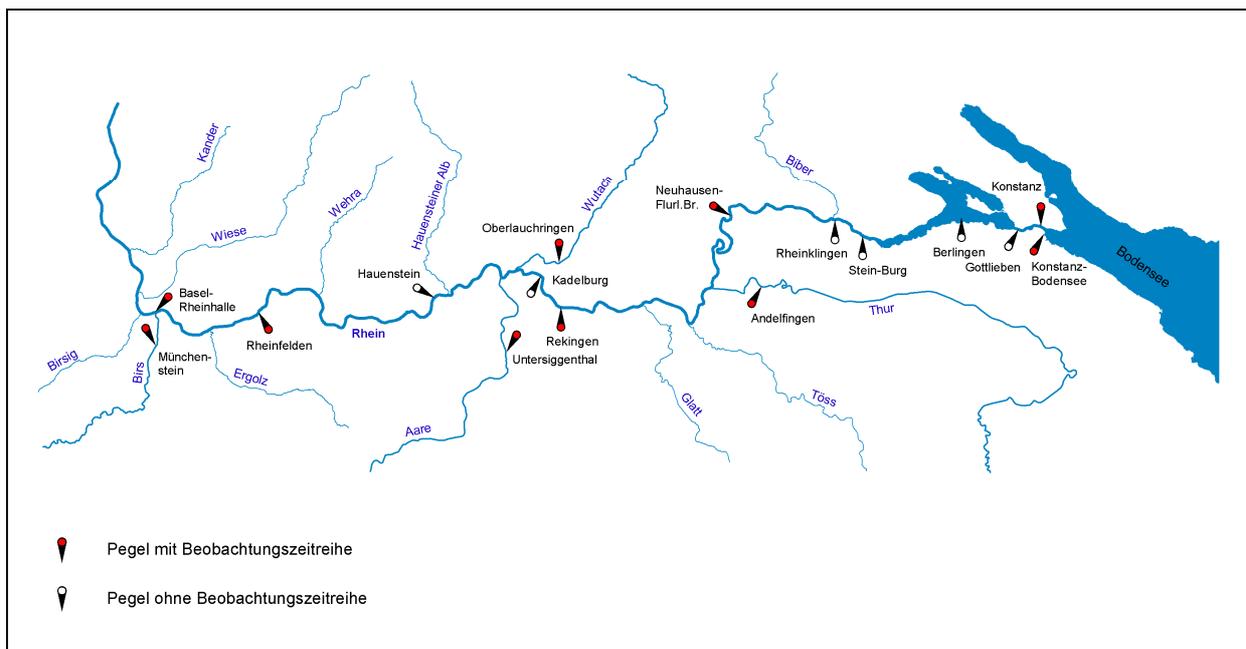


Abb. 2.1: Lage der einbezogenen Pegel am Hochrhein und seinen Nebenflüssen

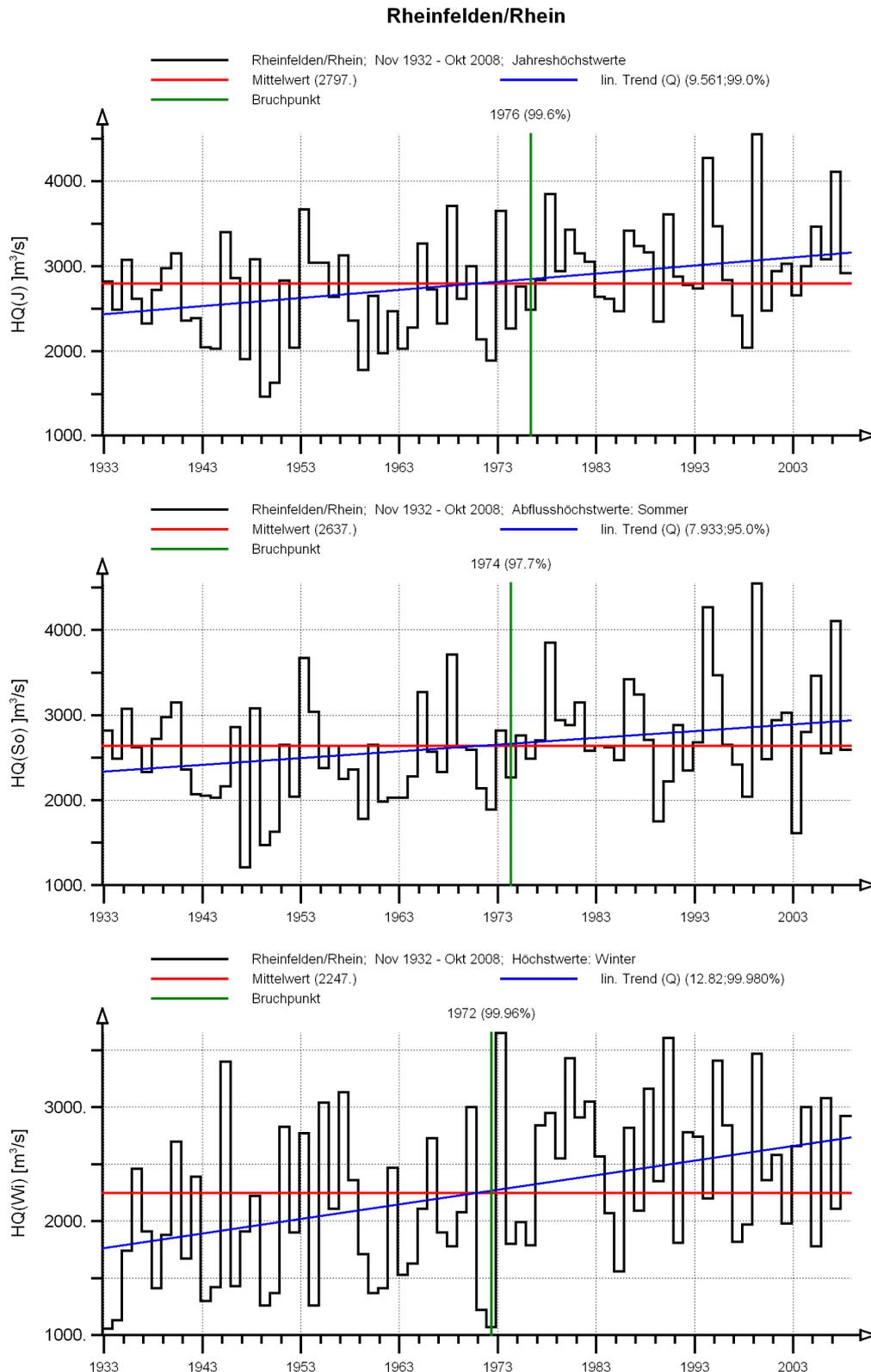


Abb. 2.2: Abflusshöchstwerte des Jahres (oberes Diagramm), des Sommerhalbjahres (mittleres Diagramm) und des Winterhalbjahres (unteres Diagramm) am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Beobachtungszeitspanne 1933 bis 2008 mit langjährigem Mittelwert, linearem Trend und Jahr des wahrscheinlichen Bruchpunkts

2.2 Statistische Prüfung der Datengrundlage und Trendbereinigung

Wie bereits Abb. 2.2 vermuten lässt, weisen die Abflusszeitreihen entlang des Hochrheins in den Jahres- und Halbjahreshöchstwerten eine zeitliche Veränderung auf. Deshalb wurde für alle einbezogenen Hochwasserabfluss-Zeitreihen zunächst eine statistischen Prüfung bezüglich Stationarität und Homogenität durchgeführt. Hierzu wurde für die Jahres- und Halbjahreshöchstwerte der jeweils lineare Trend über die gesamte Zeitreihe ermittelt und über den MANN-KENDALL-Test (Mann 1945) auf statistische Signifikanz geprüft. Anschließend erfolgte ein Test auf mögliche Inhomogenitäten in der Zeitreihe über die Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY (Pettit 1978). Dieser Test bestimmt innerhalb einer Zeitreihe den wahrscheinlichen Zeitpunkt (Bruchpunkt), an dem eine zeitlich begrenzte Trendänderung vorhanden sein kann. Das Ergebnis dieser statistischen Prüfung ist in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Die zugehörigen Abbildungen befinden sich in Anlage A. Für den Pegel Basel-Rheinhalle wurden zwei Zeitspannen ausgewertet. Diese waren die gesamte Beobachtungszeitreihe ab 1869 und zum Vergleich mit den anderen Pegeln die verkürzte Zeitreihe ab 1903.

Die Einzelergebnisse der Langzeitanalyse zeigen, dass an nahezu allen Pegeln in den Zeitreihen der Jahres- und Halbjahreshöchstwerte ein deutlicher, steigender Trend vorhanden ist, der auch meist eine hohe bis sehr hohe Signifikanz aufweist. Dies betrifft sowohl die Pegel entlang des Hochrheins als auch die Pegel an den Zuflüssen Thur, Aare und Birs.

An der Birs ist das Trendverhalten jedoch deutlich weniger ausgeprägt (statistisch signifikant). Das Langzeitverhalten an diesem Pegel ist stark durch das extreme Hochwasserereignis von 1910 geprägt. Dieses Ereignis trat im Winterhalbjahr auf und ist mit einem Scheitelwert von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ dokumentiert. Wird dieser Extremwert vernachlässigt, wird das Trendverhalten am Pegel Münchenstein-Hofmatt/Birs sehr vergleichbar mit dem Langzeitverhalten an den anderen Abflusszeitreihen.

Von der allgemeinen Tendenz abweichende Ergebnisse ergeben sich oberhalb der Einmündung der Thur an den Pegeln Konstanz und Neuhausen-Flurlingerbrücke am Hochrhein. Dieser Gewässerabschnitt ist durch das Wasserstandsverhalten des Bodensee geprägt. Zur Beschreibung des Langzeitverhaltens der Bodenseewasserstände wird zur Zeit eine getrennte Studie „Langzeitverhalten der Bodenseewasserstände“ im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) in Karlsruhe am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG 2009) durchgeführt. Die grundlegenden Ergebnisse dieser Studie spiegeln sich deutlich im Langzeitverhalten der Wasserstandshöchstwerte am Pegel Bodensee/Konstanz wieder. Wie Tabelle 2.2 zeigt, ergibt sich für die gesamte Beobachtungszeitreihe ab Datenbeginn im Jahr 1818 in den jährlichen Höchstwasserständen einen hochsignifikanten fallenden Trend mit einem wahrscheinlichen Änderungszeitpunkt (Bruchpunkt) im Jahr 1940. Betrachtet man nur die Zeitreihe ab 1941, wird die fallende Tendenz der Jahreshöchstwerte zwar etwas größer, die Veränderungen sind jedoch bei der kürzeren Zeitreihe statistisch nicht signifikant. Diese fallende Tendenz der Bodenseewasserstände überträgt sich auch auf den unterstrom liegenden Abflusspegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein, der sowohl in den Trendsicherheiten als auch im Jahr des wahrscheinlichen Bruchpunkts sehr vergleichbare Ergebnisse zum Verhalten der Bodenseewasserstände zeigt.

Aufgrund des ausgeprägten Trendverhaltens wurde an den einbezogenen Pegeln eine weitergehende Trendanalyse mit anschließender Trendbereinigung durchgeführt. Die weitergehende Trendanalyse ergab, dass die Beobachtungszeitreihen am wahrscheinlichen Bruchpunkt jeweils in zwei Teilzeitreihen getrennt werden können. An diesem Änderungszeitpunkt tritt eine „sprunghafte“ Änderung des mittleren Hochwasserabflusses MQH auf und die Trends vor und nach dem Trennungsjahr verschwinden nahe bzw. sind statistisch nicht oder nur sehr gering signifikant. Beispielhaft zeigt Abb. 2.3 dieses Trendverhalten für den Pegel Rheinfelden/Rhein. Bei den Höchstwerten des Jahres (oberes Diagramm) liegt der wahrscheinliche Bruchpunkt im Jahr 1976 und im Sommerhalbjahr (unteres Diagramm) im Jahr 1972. Zu diesem Zeitpunkt ergibt sich bei den Jahreswerten eine Erhöhung des mittleren Hochwasserabflusses von $MHQ = 2595 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $MHQ = 3076 \text{ m}^3/\text{s}$. Die beiden Teilzeitreihen vor und nach dem Änderungszeitpunkt weisen Trendsteigungen auf, die statistisch nicht signifikant sind. Im Sommerhalbjahr ergibt sich das vergleichbare Ergebnis. Da dieses Verhalten an allen einbezogenen Pegeln vorhanden ist, ist zu vermuten, dass der langfristige Trend der jeweiligen Gesamtzeitreihen tatsächlich auf eine Veränderung zurückzuführen ist, die innerhalb einer kurzen Zeitspanne um das Jahr des wahrscheinlichen Bruchpunkts stattgefunden hat.

Zur Bereinigung dieser Inhomogenität erfolgte eine Trendbereinigung. Hierzu wurde für jeden Pegel, getrennt für die Höchstwerte des Jahres und der beiden Halbjahre, durch eine additive Korrektur die Teilzeitreihe vor dem wahrscheinlichen Bruchpunkt auf den mittleren Hochwasserabfluss nach dem Trennungsjahr umgerechnet. Durch diese Korrektur konnte die vorhandene Inhomogenität beseitigt werden und die gesamte Zeitreihe wurde auf das mittlere Abflussniveau des heutigen Zustands gesetzt. Beispielhaft zeigt Abb. 2.4 die Trendbereinigung am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Höchstwerte des Jahres (oberes Diagramm) und die Höchstwerte im Sommerhalbjahr (unteres Diagramm). Diese Vorgehensweise wurde bei allen einbezogenen Pegeln, getrennt für die Höchstwerte des Jahres und der beiden Halbjahre durchgeführt.

Von der Trendbereinigung wurden folgenden Pegelzeitreihen ausgeschlossen, da die entsprechenden Beobachtungszeitreihen nicht direkt in die Ermittlung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts entlang des Hochrheins einbezogen wurden:

- Pegel Konstanz/Rhein
- Pegel Hauenstein/Rhein
- Pegel Münchenstein-Hofmatt/Birs

Die abschließende Trenduntersuchung der bereinigten Zeitreihen ist in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Infolge der Trendbereinigung verschwinden die zeitlichen Inhomogenitäten in den Zeitreihen und wahrscheinliche Bruchpunkte werden nur noch vereinzelt ausgewiesen. Somit liegen mit den trendbereinigten Hochwasserabflüssen stationäre Zeitreihen vor, die dem heutigen Zustand gleichgesetzt werden können. Die graphischen Darstellungen der partiellen Trends und der Langzeitanalyse der trendbereinigten Zeitreihen sind in Anlage B zusammengestellt.

Tabelle 2.2: Ergebnisse der Analyse des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte für die einbezogenen Pegel mit Mittelwert MHQ, absolutem Trend pro Jahr, Trendsignifikanz α und Jahr des Bruchpunkts; die Wasserstände beziehen sich auf [cm] über Pegelnull am Pegel Konstanz

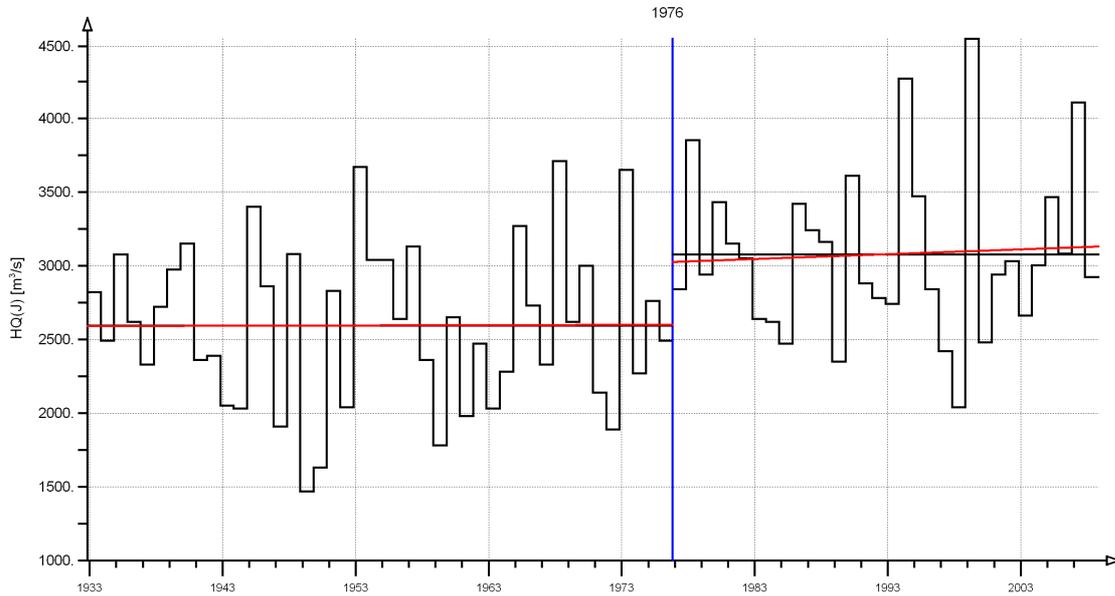
Gewässer	Pegel	Zeitspanne		MHQ [m ³ /s]	Trend [m ³ /s/a]	Signifikanz α [%]	Jahr des Bruchpunkts
mittlere jährliche und halbjährliche Hochwasserabflüsse MHQ(J), MHQ(Hj)							
Hochrhein	Konstanz	1984 - 2007	Jahr	640	-4,201	-	2002
		1985 - 2007	Winter	359	0,329	-	-
		1985 - 2007	Sommer	634	-6,16	-	2002
Hochrhein	Neuhausen	1904 - 2004	Jahr	724	-1,04	98	1940
		1904 - 2008	Winter	409	0,498	90	1960
		1904 - 2008	Sommer	722	-1,13	99	1940
Thur	Andelfingen	1904 - 2008	Jahr	582	1,29	97,5	1963
		1904 - 2008	Winter	435	0,502	-	1976
		1904 - 2008	Sommer	513	1,86	99,8	1963
Hochrhein	Rekingen	1904 - 2008	Jahr	1162	1,45	92	1963
		1904 - 2008	Winter	821	2,22	99,95	1972
		1904 - 2008	Sommer	1137	1,31	90	1963
Aare	Untersiggen- thal-Stilli	1904 - 2008	Jahr	1527	3,67	99,8	1976
		1904 - 2008	Winter	1176	3,69	99,9	1976
		1904 - 2008	Sommer	1467	3,53	99	1976
Hochrhein	Rheinfelden	1933 - 2008	Jahr	2797	9,56	99	1976
		1933 - 2008	Winter	2247	12,83	99,98	1972
		1933 - 2008	Sommer	2637	7,93	95	1974
Birs	Münchenstein- Hofmatt	1908 - 2008	Jahr	152	0,123	90	1976
		1908 - 2008	Winter	125	0,069	80	1976
		1908 - 2008	Sommer	121	0,465	80	1972
	ohne Hoch- wasser von 1910	1908 - 2008	Jahr	148	0,395	95	1976
		1908 - 2008	Winter	120	0,223	82	1976
		1908 - 2008	Sommer	121	0,465	80	1972
Hochrhein	Basel- Rheinhalle	1869 - 2008	Jahr	2846	3,38	99,8	1972
		1869 - 2008	Winter	2217	6,47	99,999	1972
		1869 - 2008	Sommer	2668	2,98	99	1964
		1904 - 2008	Jahr	2860	7,29	99,95	1976
		1904 - 2008	Winter	2300	8,46	99,98	1972
		1904 - 2008	Sommer	2685	6,11	98	1972
	HQ(J) berech- net aus Nach- barpegeln	1904 - 2008	Jahr	2860	7.31	99,95	1976
		1904 - 2008	Winter	2302	8.57	99,98	1972
		1904 - 2008	Sommer	2679	5.82	98	1972
mittlere jährliche und halbjährliche Höchstwasserstände MHW(J), MHW(Hj) in [cm ü. PN KN]							
Bodensee	Konstanz	1818 - 2007	Jahr	464	-0,174	99,8	1940
		1941 - 2008	Jahr	448	-0,253	-	1987

Trendanalyse

Mess-Stelle: Rheinfelden/Rhein; Nr: 323/2091
 Mess-Größe: Abfluss
 Zeitspanne: Nov 1932 - Okt 2008
 Datenart: Jahreswerte

Mittelwerte M
 linearer Trend: $Y = A * T$
 M = 2594.545; A = 0.226 / Jahr
 M = 3076.410; A = 3.249 / Jahr

Trendtest : Mann-Kendall



Trendanalyse

Mess-Stelle: Rheinfelden/Rhein; Nr: 323/2091
 Mess-Größe: Abfluss
 Zeitspanne: Nov 1932 - Okt 2007
 Datenart: Höchstwerte im Sommer

Mittelwerte M
 linearer Trend: $Y = A * T$
 M = 2454.524; A = -2.130 / Jahr; 50.00%
 M = 2870.162; A = 5.651 / Jahr

Trendtest : Mann-Kendall

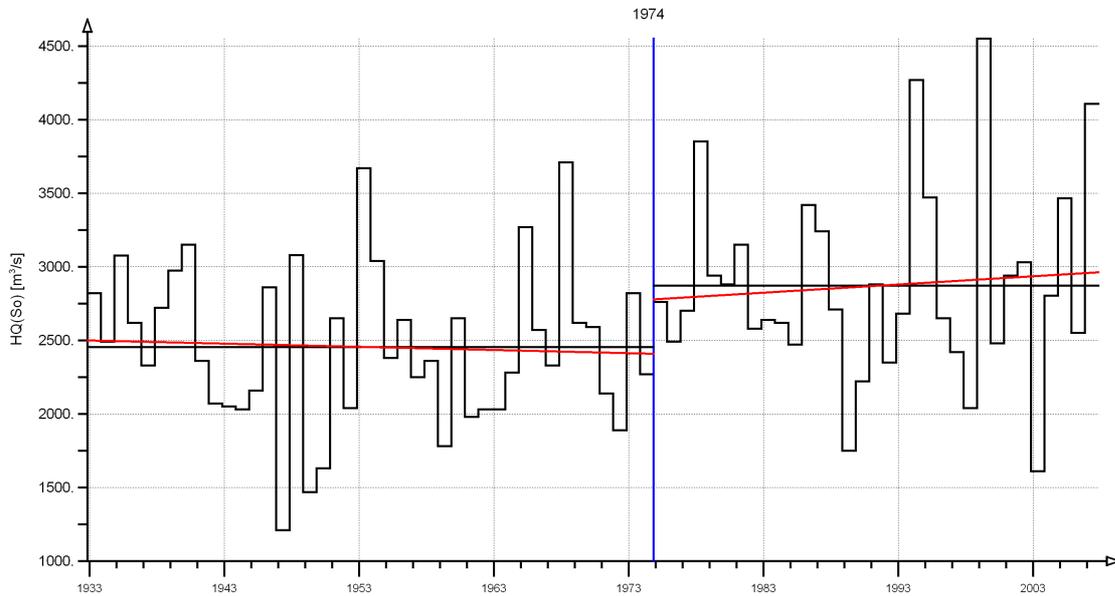
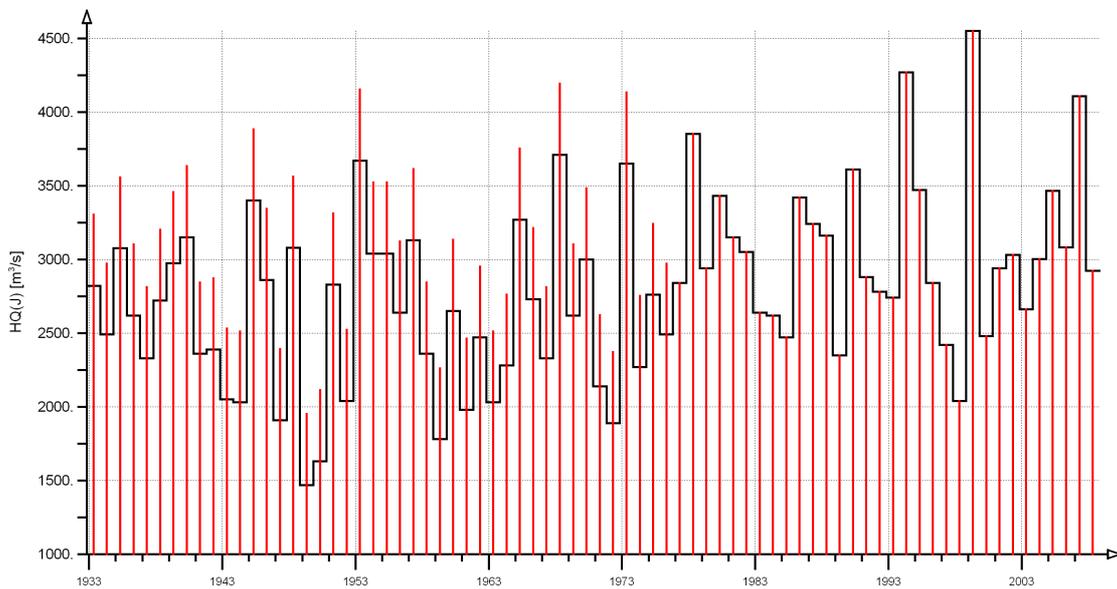


Abb. 2.3: Trendanalyse für die Teilzeitreihen vor und nach dem wahrscheinlichen Bruchpunkt am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Höchstwerte des Jahres (oberes Diagramm) und die Höchstwerte des Sommerhalbjahres (unteres Diagramm)

Trendbereinigung der Abflusshöchstwerte

Messstelle:	Rheinfelden/Rhein	Rheinfelden/Rhein
Messgröße:	Abfluss	Abfluss
Zeitspanne:	Nov 1932 - Okt 2008	Nov 1932 - Okt 2008
Datenart:	<u>Jahreshöchstwerte</u>	<u>Jahreshöchstwerte/Tr-ber</u>



Trendbereinigung der Abflusshöchstwerte

Messstelle:	Rheinfelden/Rhein	Rheinfelden/Rhein
Messgröße:	Abfluss	Abfluss
Zeitspanne:	Nov 1932 - Okt 2007	Nov 1932 - Okt 2008
Datenart:	<u>Höchstwerte im Sommer</u>	<u>Höchstwerte: Sommer/Tr-ber</u>

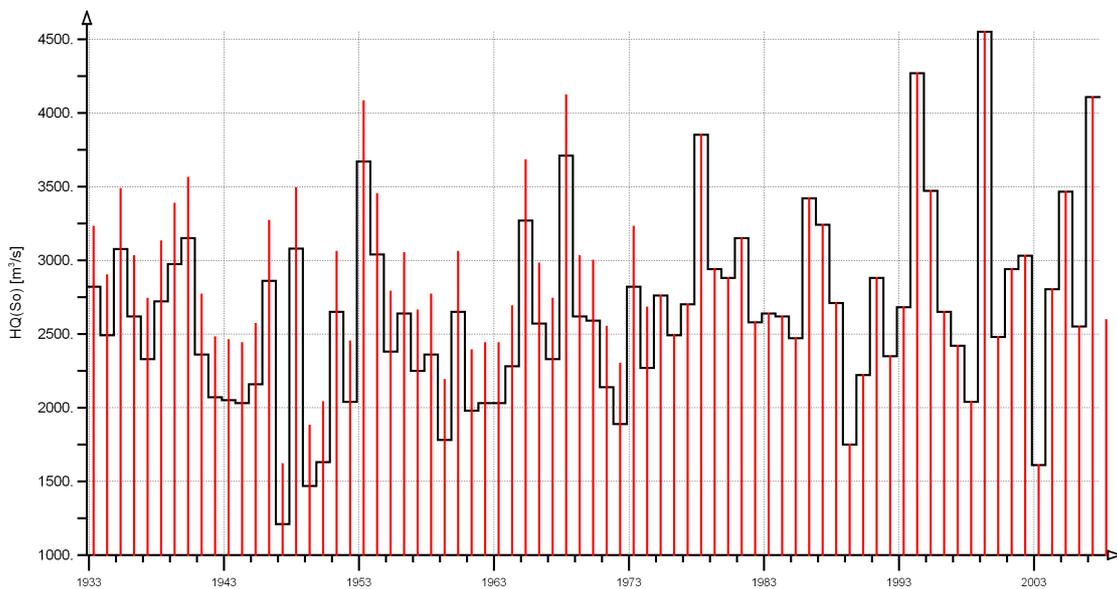


Abb. 2.4: Vergleich der originalen und trendbereinigten Zeitreihen am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Höchstwerte des Jahres (oberes Diagramm) und die Höchstwerte des Sommerhalbjahres (unteres Diagramm)

Tabelle 2.3: Ergebnisse der Analyse des Langzeitverhaltens der trendbereinigten jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte für die einbezogenen Pegel mit Mittelwert MHQ, absolutem Trend pro Jahr, Trendsignifikanz α und Jahr des Bruchpunkts; die Wasserstände beziehen sich auf [cm] über Pegelnull am Pegel Konstanz

Gewässer	Pegel	Zeitspanne		MHQ [m ³ /s]	Trend [m ³ /s/a]	Signifikanz α [%]	Jahr des Bruchpunkts
mittlere jährliche und halbjährliche Hochwasserabflüsse MHQ(J), MHQ(Hj)							
Hochrhein	Neuhausen	1904 - 2004	Jahr	693	0,118	-	-
		1904 - 2008	Winter	426	0,052	-	-
		1904 - 2008	Sommer	690	0,062	-	-
Thur	Andelfingen	1904 - 2008	Jahr	648	-0,323	-	-
		1904 - 2008	Winter	484	-0,347	-	1928
		1904 - 2008	Sommer	606	-0,431	-	1979
Hochrhein	Rekingen	1904 - 2008	Jahr	1242	-0,498	-	1940
		1904 - 2008	Winter	917	0,343	-	1913
		1904 - 2008	Sommer	1215	-0,597	-	1941
Aare	Untersiggen- thal-Stilli	1904 - 2008	Jahr	1732	0,115	-	1940
		1904 - 2008	Winter	1390	-0,045	-	-
		1904 - 2008	Sommer	1670	0,002	-	1940
Hochrhein	Rheinfelden	1933 - 2008	Jahr	3076	0,285	-	-
		1933 - 2008	Winter	2575	0,548	-	-
		1933 - 2008	Sommer	2862	-0,022	-	1941
Hochrhein	Basel- Rheinhalle	1869 - 2008	Jahr	3227	-0,808	-	-
		1869 - 2008	Winter	2726	0,861	-	1909
		1869 - 2008	Sommer	2949	-0,809	-	-
		1904 - 2008	Jahr	3269	0,298	-	-
		1904 - 2008	Winter	2727	0,249	-	-
		1904 - 2008	Sommer	3004	-0,020	-	1941
	HQ(J) berech- net aus Nach- barpegeln	1904 - 2008	Jahr	3268	0,320	-	-
		1904 - 2008	Winter	2731	0,319	-	-
		1904 - 2008	Sommer	2986	-0,859	-	1941
mittlere jährliche und halbjährliche Höchstwasserstände MHW(J), MHW(Hj) in [cm ü. PN KN]							
Bodensee	Konstanz	1818 - 2007	Jahr	464	-0,174	99,8	1940
		1941 - 2007	Jahr	448	-0,253	-	1987

3 Auswertung der Abflussextrremwerte

Grundlage des Hochwasserabfluss-Längsschnitts entlang des Hochrheins sind die statistisch ermittelten Abflussextrremwerte (HQ_T -Werte) der erforderlichen Jährlichkeiten an den einbezogenen Pegelstellen. Hierzu wurden die Methoden der Extrremwertstatistik auf die Zeitreihen der Pegel angewendet. Betrachtet wurden dabei folgende Höchstwerte:

- Jahreshöchstwerte des Wasserstands am Pegel Konstanz/Bodensee zur Ermittlung der T-jährlichen Abflüsse am Auslauf des Obersees
- Jährliche und halbjährliche Höchstwerte der Abflüsse an den Pegeln entlang des Hochrheins sowie an der Thur, der Aare und der Birs
- Jährliche und halbjährliche Höchstwerte der trendbereinigten Abflüsse an den Pegeln entlang des Hochrheins sowie an der Thur und der Aare

3.1 Extrremwertstatistik

Zur statistischen Auswertung der Abflussextrremwerte wurden an die verschiedenen jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte analytische Wahrscheinlichkeitsfunktionen angepasst. Hierzu stehen sowohl zwei- als auch dreiparametrische Verteilungsfunktionen zur Verfügung, deren Parameter sowohl über die Momentenmethode als auch über die Maximum-Likelihood-Schätzung abgeleitet werden können (IWK 2003). Als geeignete Verteilungsfunktion wurde jeweils diejenige ausgewählt, die vor allem eine gute Anpassung an die beobachteten Abflüsse zeigt. Beispielhaft zeigt Abb. 3.1 das Ergebnis der Extrremwertstatistik für den Pegel Rheinfelden/Rhein für die Abflusshöchstwerte des Jahres, sowie des Winter- und Sommerhalbjahres und in Abb. 3.2 die entsprechenden Auswertungen für die trendbereinigten Scheitelwerte. In diese Abbildungen sind eingetragen als „plotting positions“ (empirische Wahrscheinlichkeiten, ermittelt über die Beziehung von Weibull) die beobachteten Abflusshöchstwerte des Jahres (schwarz) sowie des Winter- (blau) und Sommerhalbjahres (rot) als Punkte und als Kurven die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen.

Für den Pegel Rheinfelden/Rhein ergibt sich aus dieser Extrremwertbetrachtung:

- Aus beiden Abbildungen (Abb. 3.1 und Abb. 3.7) erkennt man, dass die maßgebenden T-jährlichen Abflussscheitelwerte aus der Extrremwertstatistik für die Höchstwerte des Jahres oder des Sommerhalbjahres abzuleiten sind. Im Winterhalbjahr sind die Extrremwerte des Abflusses deutlich geringer.
- Im Bereich der kleinen Jährlichkeiten ergeben sich aus der Extrremwertstatistik für die Höchstwerte des Jahres die maßgebenden (maximalen) Abflussscheitelwerte.
- Im Bereich der großen Jährlichkeiten (bis zur Jährlichkeit $T = 1000$ a) nähert sich bei den trendbereinigten Scheitelwerten (Abb. 3.2) die Extrremwertstatistik des Sommerhalbjahres der Statistik der Jahreswerte an. Bei den nicht trendbereinigten Messwerten (Abb. 3.1) ergeben sich über die Extrapolation der Höchstwerte des Sommerhalbjahres größere Scheitelwerte als bei den Höchstwerten des Jahres.

In Anlage C sind für alle einbezogenen Pegel die Extrremwertstatistiken dargestellt, aus denen die maßgebenden Scheitelwerte für die Standorte der Pegel abgeleitet wurden.

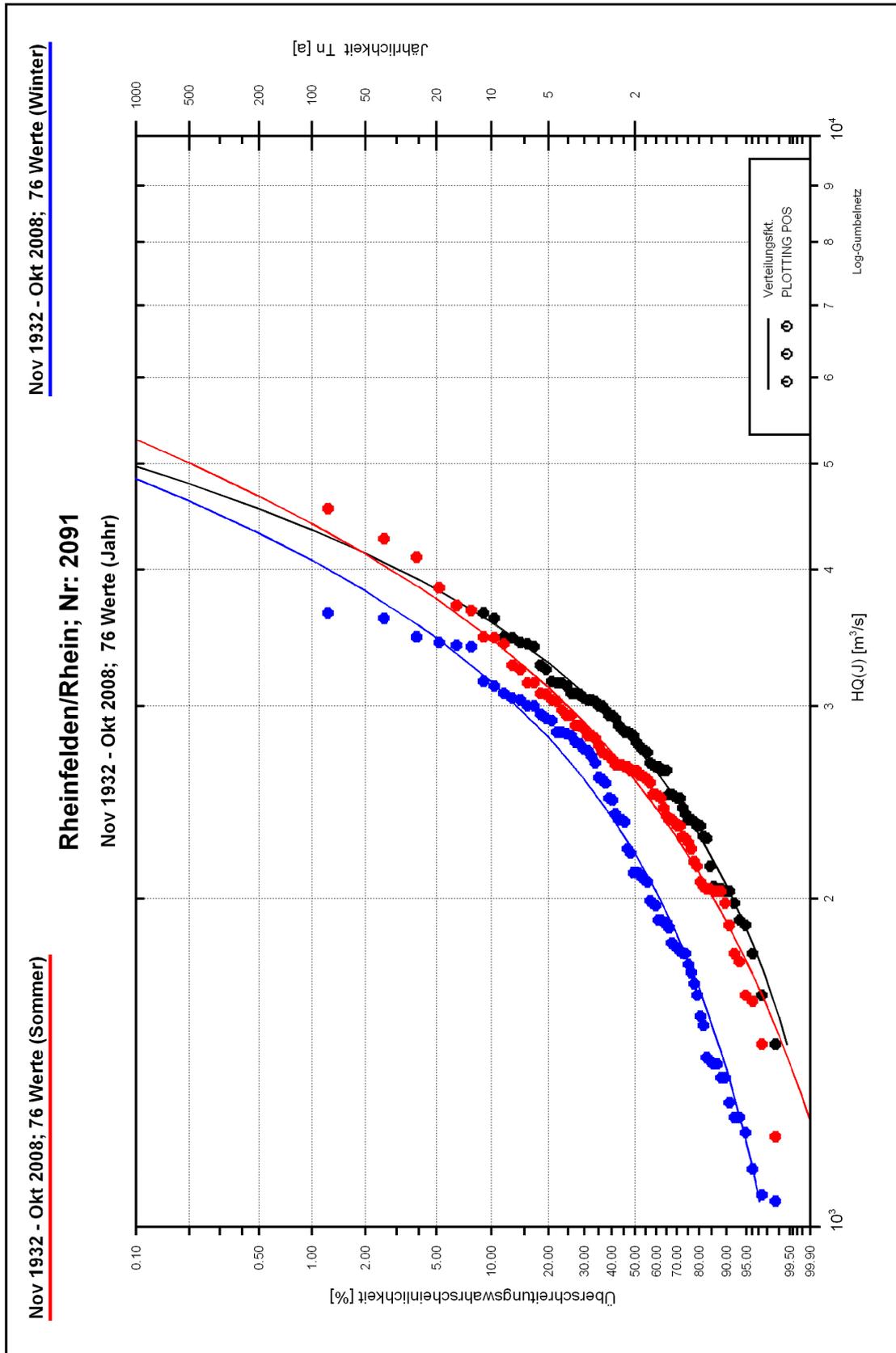


Abb. 3.1: Extremwertstatistik der Abflusshöchstwerte des Jahres- (schwarz) sowie des Winter- (blau) und Sommerhalbjahres (rot) für den Pegel Rheinfelden/Rhein

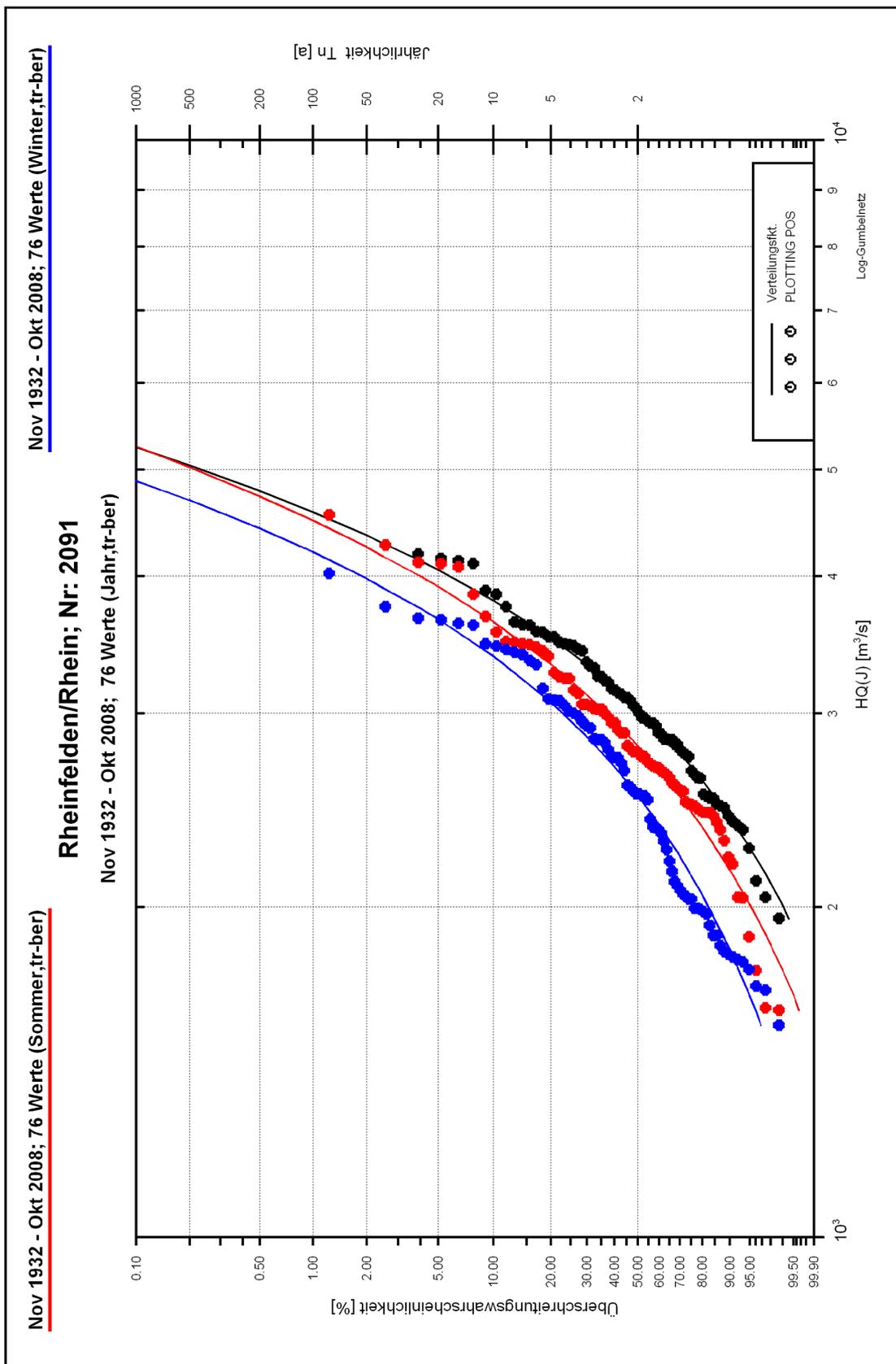


Abb. 3.2: Extremwertstatistik der trendbereinigten Abflusshöchstwerte des Jahres- (schwarz) sowie des Winter- (blau) und Sommerhalbjahres (rot) für den Pegel Rheinfelden/Rhein

3.2 T-jährliche Abflüsse an den Pegeln aus der Extremwertstatistik

Die Ableitung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts entlang des Hochrheins basiert auf den Ergebnissen der Extremwertstatistiken der einbezogenen Pegel. Insgesamt wurden als statistische Kennwerte ausgewertet der mittlere Hochwasserabfluss MHQ sowie die T-jährlichen Hochwasserabflüsse HQ_T für die Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500$ und 1000 Jahre. Zur Festlegung der maßgebenden Hochwasserabflüsse an den Pegeln wurde jeweils die Extremwertstatistik für die Höchstwerte des Jahres sowie der beiden Halbjahre getrennt erstellt und anschließend bezüglich der maßgebenden Abflussscheitelwerte beurteilt. Zusammenfassend bedeutet dies, dass im ersten Schritt an jedem einbezogenen Pegel für jede Jährlichkeit als maßgebenden pegelspezifischen HQ_T -Wert das Maximum aus den drei Extremwertstatistiken ermittelt wurde. Dieser HQ_T -Wert wurde anschließend über die Längsschnitt-Regionalisierung entlang des Hochrhein abgeglichen.

Die Einzelergebnisse der Extremwertstatistiken sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Für die maßgebenden Pegel ist zu beachten:

Pegel Konstanz/Rhein

Der Abflusspegel am Auslass des Bodensees stellt die obere Randbedingung für den Hochwasserabfluss-Längsschnitt entlang des Hochrheins dar. Da die Beobachtungsreihe jedoch zu kurz ist, um gesicherte statistische Kennwerte ableiten zu können, wurde die lange Datenreihe des Wasserstands-Pegels Konstanz/Bodensee ersatzweise eingesetzt und bezüglich der Extremwerte ausgewertet. Als maßgebende Zeitreihe wurden die trendbereinigten Jahreshöchstwerte für die Extremwertstatistik ausgewählt, da diese Ergebnisse sehr gut mit den Extremwerten aus der verkürzten Zeitreihe ab 1941 übereinstimmen.

Zur Übertragung der Wasserstandsdaten auf die Abflüsse am Auslass des Bodensees wurde zunächst anhand der gemeinsamen Beobachtungszeitspanne (1984-2007) zwischen dem Wasserstandspegel und dem Abflusspegel in Konstanz eine Abflusskurve erstellt (Abb. 3.3). Mit Hilfe dieser Abflusskurve konnten anschließend die T-jährlichen Wasserstände des Pegels Konstanz/Bodensee in die entsprechenden T-jährlichen Abflüssen am Abflusspegel Konstanz/Rhein umgerechnet werden.

Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/ Rhein

Am Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein basiert die Extremwertstatistik auf den Messdaten, die nicht trendbereinigt sind. Da der Pegel in den Abflusshöchstwerten einen fallenden Trend aufweist, ergeben sich aus den trendbereinigten Daten kleinere T-jährliche Abflüsse, die teilweise geringer sind als entsprechenden Abflüsse am Oberlaufpegel in Konstanz.

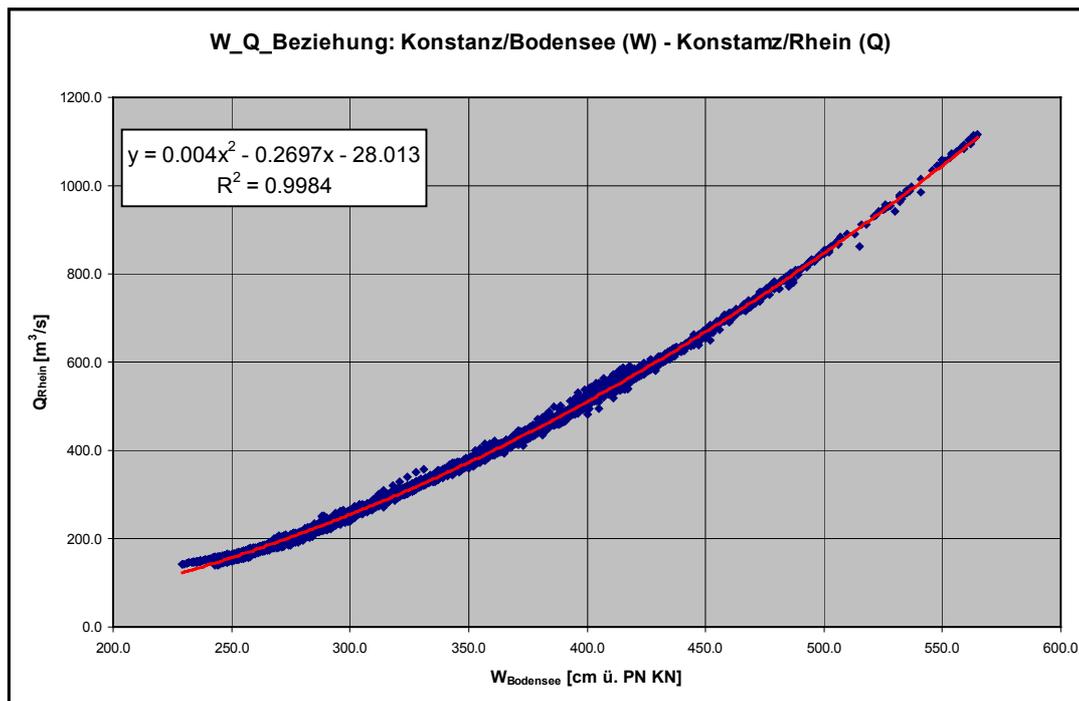


Abb. 3.3: Wasserstands-Abfluss-Beziehung zwischen dem Wasserstandspegel Konstanz/Bodensee und dem Abflusspegel Konstanz/Rhein

Pegel Andelfingen/Thur

Für den Pegel Andelfingen an der Thur wurden folgende drei Extremwertstatistiken erstellt:

- Extremwertstatistik für die originalen Messwerte
- Extremwertstatistik für die originalen Messwerte mit Berücksichtigung der Ertüchtigung der Deiche an der Thur. Entlang der Thur traten in der Vergangenheit bei extremen Hochwasserereignissen infolge Deichüberströmung großflächige Überflutungen auf. Da in der Zwischenzeit infolge Ertüchtigung der Deiche die Thur eine höhere Leistungsfähigkeit aufweist, ist zu erwarten, dass auch unterhalb der Thurmündung am Hochrhein größere Extremabflüsse auftreten können. Eine Abschätzung des Einflusses der Deichertüchtigung auf die Extremabflüsse an der Thur ist in der Studie von Scherrer (2004) dokumentiert. In dieser Studie wurden für die relevanten großen Hochwasserereignisse von 1910, 1965, 1977 und 1978 (Abb. 3.4) abgeschätzt, welche Scheitelwerte am Pegel Andelfingen/Thur bei ausreichender Leistungsfähigkeit der Thur (ohne Überflutungen) zu erwarten sind. Diese vergrößerten Abflüsse wurden in die Extremwertstatistik des Pegels übernommen. Die entsprechende Statistik ist mit dem Zusatz „kor“ gekennzeichnet.
- Da auch am Pegel Andelfingen/Thur ein signifikanter Trend vorhanden ist, wurde zusätzlich zur Berücksichtigung der erhöhten Leistungsfähigkeit der Thur auch eine Trendbereinigung der beobachteten Zeitreihe durchgeführt. Nach der Trendbereinigung wurden wiederum die Abflusserhöhungen (oben genannte Korrekturen) auf die historischen Hochwasserereignisse übertragen. Die entsprechende Extremwertstatistik ist mit „kor, tr-ber“ gekennzeichnet.

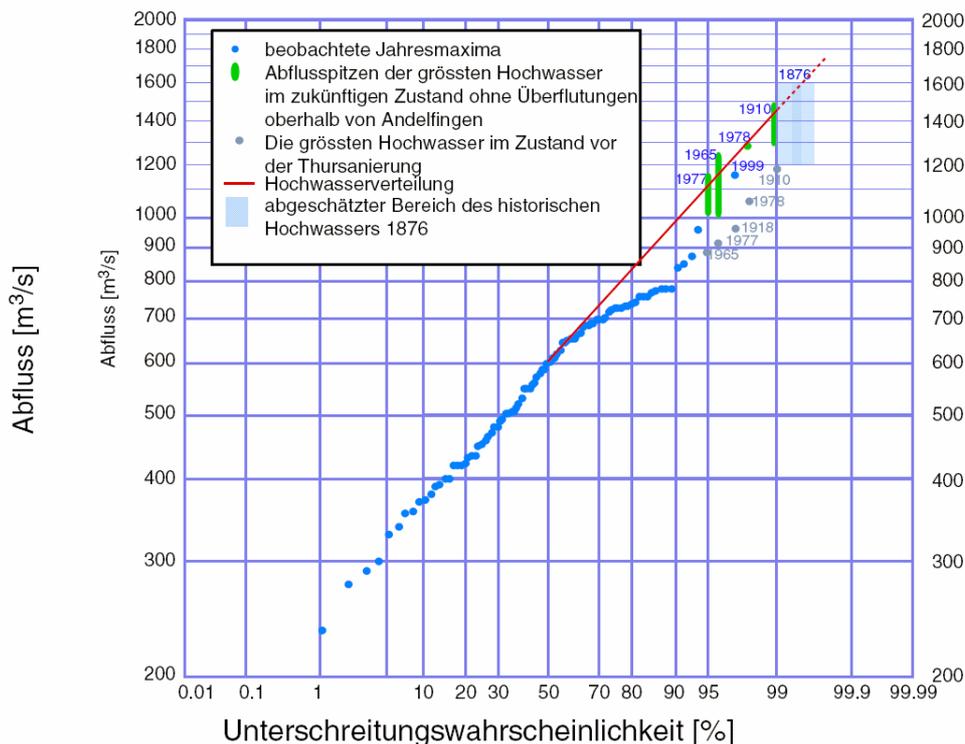


Abb. 3.4: Abfluss-Statistik am Pegel Andelfingen/Thur (aus: Scherrer 2004)

Pegel Rekingen/Rhein

Analog zu den statistischen Auswertungen der Abflussextrremwerte des Pegels Andelfingen/Thur wurden auch die Auswertungen für den Pegel Rekingen/Rhein erstellt. Hierbei wurde angenommen, dass die Abflusserhöhungen an der Thur ungemindert auch am Pegel Rekingen/Rhein zu erwarten sind. Diese Annahme ist dadurch gerechtfertigt, da an der Einmündung der Thur in den Hochrhein die zeitlich begrenzten (kurzen) Abfluss-Scheitelwerte der Thur sich normalerweise mit einer zeitlich gestreckten Abflussganglinie im Hochrhein überlagert. Das Abflussverhalten am Hochrhein oberhalb der Thurmündung ist hauptsächlich durch die langsame, zeitlich gestreckte Wasserstandsreaktion des Bodensees bestimmt. Infolge dieser Überlagerung ist der Abfluss-Scheitelwert am Pegel Rekingen/Rhein wesentlich durch den Einfluss der Thur bestimmt. Die Kennzeichnung der Varianten entspricht der Kennzeichnung am Pegel Andelfingen/Thur.

Pegel Untersiggenthal-Stilli/Aare

Für den Pegel Untersiggenthal-Stilli/Aare wurden Extremwertstatistiken für die Messdaten und für die trendbereinigten Daten erstellt. Die trendbereinigten Ergebnisse sind mit dem Zusatz „tr-ber“ gekennzeichnet.

Pegel Rheinfeldern/Rhein

Für den Pegel Rheinfeldern/Rhein wurden Extremwertstatistiken für die Messdaten und für die trendbereinigten Daten erstellt. Die trendbereinigten Ergebnisse sind mit dem Zusatz „tr-ber“ gekennzeichnet.

Pegel Münchenstein-Hofmatt/Birs

Die Birs stellt mit einer Einzugsgebietsgröße von ca. 1000 km² ein kleineres Zuflussgebiet zum Hochrhein dar. Da jedoch die Birs direkt beim Pegel Basel-Rheinhalle in den Hochrhein einmündet, wurde der Pegel an der Birs in die Untersuchung mit einbezogen. Die Ergebnisse, die auf den originalen Messdaten beruhen, zeigen, dass das Einzugsgebiet der Birs nur einen geringen Einfluss auf extreme Abflüsse im Hochrhein besitzen. Zudem ist zu beachten, dass Hochwasserereignisse an der Birs aufgrund des wesentlich kleineren Einzugsgebiets erheblich schneller ablaufen als die entsprechenden Ereignisse im Hochrhein. Aus diesem Grunde ist eine gesonderte Berücksichtigung der Hochwasserextrémwerte der Birs bei der Festlegung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts entlang des Hochrheins nicht erforderlich.

Pegel Basel-Rheinhalle/Rhein

Der Pegel Basel-Rheinhalle/Rhein weist die längste Beobachtungszeitreihe auf, die bereits im Jahr 1869 beginnt. Bei den meisten anderen einbezogenen Pegel liegt der Datenbeginn in den Jahren zwischen 1904 und 1908. Um einerseits die Extrémwertanalysen mit den anderen Pegeln entlang des Hochrheins vergleichbar zu machen und andererseits auch die lange Datenreihe in den Bewertung einbeziehen zu können, wurden für diesen Pegel folgende Auswertungen durchgeführt:

- Extrémwertstatistik für die trendbereinigten Daten mit Datenbeginn im hydrologischen Jahr 1869
- Extrémwertstatistik für die Messdaten mit Datenbeginn im hydrologischen Jahr 1903
- Extrémwertstatistik für die trendbereinigten Daten mit Datenbeginn im hydrologischen Jahr 1903
- Extrémwertstatistik für die Abflüsse, die über die gesamte Zeitreihe oberhalb von 2700 m³/s aus den Nachbarpegeln berechnet wurden, mit Datenbeginn im hydrologischen Jahr 1903
- Extrémwertstatistik für die trendbereinigten, berechneten Daten mit Datenbeginn im hydrologischen Jahr 1903

Die Auswertungen der trendbereinigten Daten sind wiederum mit dem Zusatz „tr-ber“ und die Auswertungen basierend auf den berechneten Abflüssen sind mit „ber“ gekennzeichnet.

maßgebende Hochwasserabfluss-Kennwerte an den Pegeln

Die Ergebnisse der Extrémwertanalysen an den einbezogenen Pegeln sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die maßgebenden Kennwerte (mittlerer Hochwasserabfluss MHQ und T-jährliche Werte HQ_T), die in die Längsschnitt-Regionalisierung übernommen wurden, sind für jeden Kennwert das Maximum aus den verschiedenen Statistiken.

Tabelle 3.1a: Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert

Pegel/Standort	Art	Zeitspanne	MHQ [m³/s]	Hochwasserabfluss - Kennwert [m³/s] für Jährlichkeit										
				2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000	
Konstanz/Bodensee	Messdaten	1818 - 2007	706	700	844	927	998	1 036	1 081	1 139	1 224	1 261	1 309	
	Messdaten	1941 - 2007	653	647	777	851	915	950	991	1 043	1 120	1 153	1 197	
	trendbereinigt	1818 - 2007	653	650	781	854	917	950	989	1 039	1 110	1 141	1 182	
Konstanz/Rhein	Maximum		706	700	844	927	998	1 036	1 081	1 139	1 224	1 261	1 309	
	Jahr	1904 - 2007	662	657	783	852	911	942	978	1 025	1 092	1 121	1 159	
	Sommer	1904 - 2008	660	656	783	853	912	943	980	1 026	1 093	1 122	1 160	
	Winter	1904 - 2007	360	352	422	464	502	522	547	580	630	652	682	
	Maximum		662	657	783	853	912	943	980	1 026	1 093	1 122	1 160	
Neuhausen/Rhein	Jahr	1904 - 2008	724	716	843	914	976	1 009	1 048	1 098	1 172	1 204	1 247	
	Sommer	1904 - 2008	722	715	843	915	977	1 010	1 049	1 099	1 172	1 204	1 246	
	Winter	1904 - 2008	409	400	476	521	562	585	612	648	707	728	761	
	Maximum		724	716	843	915	977	1 010	1 049	1 099	1 172	1 204	1 247	
	Jahr	1904 - 2008	582	555	719	824	921	976	1 044	1 136	1 279	1 346	1 437	
Andelfingen/Thur	Sommer	1904 - 2008	513	486	676	790	891	946	1 012	1 098	1 226	1 282	1 357	
	Winter	1904 - 2008	435	407	570	673	768	821	886	973	1 105	1 165	1 246	
	Maximum		582	555	719	824	921	976	1 044	1 136	1 279	1 346	1 437	
	Jahr, korr	1904 - 2008	595	559	750	876	997	1 067	1 154	1 272	1 457	1 543	1 660	
	Sommer, korr	1904 - 2008	523	484	690	826	956	1 031	1 125	1 251	1 451	1 544	1 670	
Andelfingen/Thur	Maximum		595	559	750	876	997	1 067	1 154	1 272	1 457	1 544	1 670	
	Jahr, korr, tr-ber	1904 - 2008	661	627	812	934	1 051	1 119	1 203	1 317	1 496	1 580	1 693	
	So., korr, tr-ber	1904 - 2008	523	484	690	826	956	1 031	1 125	1 251	1 451	1 544	1 670	
	Maximum		661	627	812	934	1 051	1 119	1 203	1 317	1 496	1 580	1 693	

Tabelle 3.1b: Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „**fett**“ markiert (Fortsetzung)

Pegel/Standort	Art	Zeitspanne	MHQ [m³/s]	Hochwasserabfluss - Kennwert [m³/s] für Jährlichkeit									
				2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Rekingen/Rhein	Jahr	1904 - 2008	1 162	1 124	1 364	1 515	1 656	1 735	1 833	1 963	2 168	2 263	2 391
	Sommer	1904 - 2008	1 137	1 097	1 347	1 504	1 651	1 734	1 836	1 973	2 187	2 287	2 422
	Winter	1904 - 2008	821	791	994	1 119	1 235	1 300	1 379	1 485	1 649	1 724	1 826
Rekingen/Rhein	Maximum		1 162	1 124	1 364	1 515	1 656	1 735	1 836	1 973	2 187	2 287	2 422
	Jahr, kor.	1904 - 2008	1 171	1 113	1 372	1 550	1 725	1 827	1 957	2 137	2 430	2 572	2 769
	Sommer, kor.	1904 - 2008	1 146	1 100	1 375	1 558	1 732	1 833	1 959	2 128	2 396	2 520	2 689
Rekingen/Rhein	Maximum		1 171	1 113	1 375	1 558	1 732	1 833	1 959	2 137	2 430	2 572	2 769
	Jahr tr-ber, kor	1904 - 2008	1 245	1 187	1 425	1 593	1 760	1 860	1 987	2 164	2 459	2 602	2 803
	So., tr-ber, kor	1904 - 2008	1 218	1 160	1 409	1 583	1 754	1 855	1 984	2 163	2 457	2 599	2 797
Untersiggenthal/Aare	Maximum		1 245	1 187	1 425	1 593	1 760	1 860	1 987	2 164	2 459	2 602	2 803
	Jahr	1904 - 2008	1 527	1 472	1 772	1 970	2 161	2 271	2 408	2 593	2 884	3 020	3 203
	Sommer	1904 - 2008	1 467	1 409	1 721	1 928	2 127	2 241	2 384	2 576	2 880	3 021	3 212
Untersiggenthal/Aare	Winter	1904 - 2008	1 176	1 145	1 468	1 656	1 823	1 914	2 024	2 166	2 379	2 475	2 602
	Maximum		1 527	1 472	1 772	1 970	2 161	2 271	2 408	2 593	2 884	3 021	3 212
	Jahr tr-ber	1904- 2008	1 732	1 680	1 955	2 138	2 312	2 413	2 538	2 708	2 975	3 099	3 268
Untersiggenthal/Aare	Sommer tr-ber	1904 - 2008	1 670	1 616	1 905	2 096	2 280	2 385	2 517	2 695	2 976	3 106	3 283
	Winter tr-ber	1904 - 2008	1 390	1 336	1 629	1 822	2 008	2 116	2 249	2 430	2 714	2 847	3 026
	Maximum		1 732	1 680	1 955	2 138	2 312	2 413	2 538	2 708	2 976	3 106	3 283

Tabelle 3.1c: Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert (Fortsetzung)

Pegel/Standort	Art	Zeitspanne	MHQ [m³/s]	Hochwasserabfluss - Kennwert [m³/s] für Jährlichkeit									
				2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Rheinfelden/Rhein	Jahr	1933 - 2008	2 797	2 763	3 288	3 584	3 840	3 978	4 141	4 351	4 659	4 795	4 974
	Sommer	1933 - 2008	2 637	3 121	3 457	3 761	3 930	4 136	4 407	4 821	5 010	5 263	
	Winter	1933 - 2008	2 247	2 810	3 159	3 464	3 629	3 826	4 080	4 456	4 623	4 844	
	Maximum		2 797	2 763	3 288	3 584	3 840	3 978	4 141	4 407	4 821	5 010	5 263
Rheinfelden/Rhein	Jahr tr-ber	1933 - 2008	3 076	3 028	3 516	3 801	4 054	4 193	4 360	4 576	4 900	5 046	5 240
	Sommer tr-ber	1933 - 2008	2 862	2 804	3 326	3 636	3 914	4 067	4 253	4 495	4 862	5 027	5 248
	Winter tr-ber	1933 - 2008	2 575	2 527	3 070	3 383	3 656	3 812	3 981	4 207	4 570	4 690	4 884
	Maximum		3 076	3 028	3 516	3 801	4 054	4 193	4 360	4 576	4 900	5 046	5 248
Münchenstein/Birs	Jahr	1908 - 2008	147	136	191	228	265	286	312	349	408	436	475
	Sommer	1908 - 2008	120	103	165	210	256	285	321	374	463	507	570
	Winter	1908 - 2008	120	116	151	172	191	202	214	230	256	265	279
	Maximum		147	136	191	228	265	286	321	374	463	507	570
Basel-Rheinh./Rhein	Jahr	1904 - 2008	2 860	2 794	3 386	3 738	4 053	4 227	4 437	4 710	5 125	5 312	5 562
	Sommer	1904 - 2008	2 685	2 603	3 210	3 582	3 921	4 110	4 342	4 646	5 116	5 331	5 620
	Winter	1904 - 2008	2 300	2 225	2 875	3 259	3 601	3 799	4 012	4 303	4 775	4 931	5 186
	Maximum		2 860	2 794	3 386	3 738	4 053	4 227	4 437	4 710	5 125	5 331	5 620
Basel-Rheinh./Rhein	Jahr, ber	1904 - 2008	2 860	2 807	3 382	3 715	4 009	4 170	4 362	4 610	4 982	5 148	5 368
	Sommer, ber	1904 - 2008	2 679	2 601	3 194	3 557	3 887	4 071	4 295	4 591	5 046	5 254	5 533
	Maximum		2 860	2 807	3 382	3 715	4 009	4 170	4 362	4 610	5 046	5 254	5 533
	Jahr, tr-ber	1869 - 2008	3 227	3 134	3 770	4 164	4 526	4 730	4 979	5 310	5 823	6 059	6 377
Basel-Rheinh./Rhein	Sommer tr-ber	1869 - 2008	2 949	2 836	3 482	3 910	4 320	4 556	4 851	5 249	5 877	6 169	6 564
	Maximum		3 227	3 134	3 770	4 164	4 526	4 730	4 979	5 310	5 877	6 169	6 564

Tabelle 3.1d: Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert (Fortsetzung)

Pegel/Standort	Art	Zeitspanne	MHQ [m³/s]	Hochwasserabfluss -Kennwert [m³/s] für Jährlichkeit									
				2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Basel-Rheinh./Rhein	Jahr tr-ber	1904 - 2008	3 269	3 212	3 752	4 071	4 356	4 512	4 701	4 946	5 317	5 483	5 705
	Sommer tr-ber	1904 - 2008	3 004	2 927	3 498	3 848	4 167	4 345	4 563	4 851	5 293	5 496	5 768
	Maximum		3 269	3 212	3 752	4 071	4 356	4 512	4 701	4 946	5 317	5 496	5 768
Basel-Rheinh./Rhein	Jahr ber, tr-ber	1904 - 2008	3268	3217	3741	4048	4320	4468	4647	4879	5228	5385	5592
	So. ber, tr-ber	1904 - 2008	2986	2918	3477	3814	4118	4286	4491	4759	5169	5355	5604
	Maximum	1904 - 2008	3268	3217	3741	4048	4320	4468	4647	4879	5228	5385	5604
Neuhausen + Thur	Tageswerte	1912 - 2004	947	920	1 119	1 242	1 354	1 416	1 493	1 593	1 749	1 820	1 916
Rekingen	Tageswerte	1912 - 2004	1 017	993	1 194	1 315	1 424	1 485	1 558	1 654	1 801	1 867	1 956
Rekingen + Wutach	Tageswerte	1912 - 2004	1 047	1 021	1 231	1 357	1 470	1 533	1 610	1 710	1 863	1 933	2 026
Reki.+Wutach+Aare	Tageswerte	1912 - 2003	2 345	2 295	2 736	2 999	3 236	3 366	3 524	3 731	4 045	4 187	4 377
Rheinfelden	Tageswerte	1933 - 2008	2 513	2 453	2 949	3 247	3 516	3 664	3 845	4 081	4 441	4 604	4 823

Abkürzungen: tr-ber: trendbereinigte Zeitreihe
 kor: Berücksichtigung der korrigierten Abflüsse infolge des Thur-Ausbaus
 ber: berechnete Scheitelwerte am Pegel Basel aus den benachbarten Pegeln

3.3 T-jährliche Abflüsse an zusätzlichen Gewässerstellen

Der Abgleich der Ergebnisse von Extremwertstatistiken entlang eines Gewässerlaufs erfordert, dass mehrere Pegel (mindestens zwei Pegel), die ein vergleichbares Abflussverhalten aufweisen, entlang der zu betrachtenden Gewässerstrecke vorhanden sind. Entlang des Hochrheins liegt jedoch zwischen der Einmündung der Thur und der Aare nur der Pegel Rekingen/Rhein mit Abflussbeobachtungen vor. Um auch für diesen Gewässerabschnitt eine gesicherte Längsschnitt-Regionalisierung durchführen zu können, wurden zusätzliche Stützstellen eingeführt. Hierzu wurden zunächst am Pegel Rekingen/Rhein die jährlich höchsten Tagesabflüssen $HQ_d(J)$ mit den entsprechenden jährlich höchsten Abflussscheitelwerten $HQ(J)$ verglichen. Wie Abb. 3.5 zeigt, besteht zwischen diesen beiden Kennwerten ein sehr enger Zusammenhang der mit einem Korrelationskoeffizient von $r = 0,95$ ausgewiesen ist. Somit können die Abflusstageswerte $MQ(d)$ herangezogen werden, um für den Hochwasserabfluss-Längsschnitt zusätzliche Stützstellen zu schaffen.

Auf der Basis der Abflusstageswerte $MQ(d)$ lassen sich über eine Zeitreihenaddition die wesentlichen Abflussanteile der Einzugsgebiete im Bereich der Einmündungen von Thur und Aare ableiten. Folgende Stützstellen wurden betrachtet:

- Hochrhein unterhalb der Einmündung der Thur: Die Summe der Tageswerte $MQ(d)$ der Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein und Andelfingen/Thur erfasst das Abflussverhalten eines Einzugsgebiets mit $12\,789\text{ km}^2$. Unterhalb der Einmündung der Thur hat der Hochrhein ein Einzugsgebiet von $13\,688\text{ km}^2$. Somit werden ca. 93% der Einzugsgebietsfläche durch die beiden Pegel erfasst.
- Hochrhein oberhalb der Einmündung der Aare: Die Summe der Tageswerte $MQ(d)$ der Pegel Rekingen/Rhein und Oberlauchringen/Wutach erfasst das Abflussverhalten eines Einzugsgebiets mit $15\,380\text{ km}^2$. Oberhalb der Einmündung der Aare hat der Hochrhein ein Einzugsgebiet von $15\,944\text{ km}^2$. Somit werden an dieser Stelle ca. 96% der Einzugsgebietsfläche durch die beiden Pegel erfasst.
- Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare: Die Summe der Tageswerte $MQ(d)$ der Pegel Rekingen/Rhein, Oberlauchringen/Wutach und Untersiggenthal-Stilli/Aare erfasst das Abflussverhalten eines Einzugsgebiets mit $32\,981\text{ km}^2$. Unterhalb der Einmündung der Aare hat der Hochrhein ein Einzugsgebiet von $33\,713\text{ km}^2$. Somit werden ca. 98% der Einzugsgebietsfläche durch die drei Pegel erfasst.
- Pegel Rekingen/Rhein: Zur Ergänzung wurden auch die Abflusstageswerte $MQ(d)$ des Pegels Rekingen/Rhein in die Betrachtung einbezogen.

Aus den Zeitreihen der Tageswerte $MQ(d)$ wurden die jährlichen Höchstwerte $HQ_d(J)$ abgeleitet und über die Extremwertstatistik ausgewertet. Wie der Vergleich der Extremwertstatistiken in Abb. 3.6 zeigt, nehmen die HQ_d_T -Werte zwischen dem Hochrhein unterhalb der Thur und oberhalb der Aare nur geringfügig zu. Erst unterhalb der Einmündung der Aare ist eine deutliche Zunahme der Abflüsse vorhanden. Die statistisch ermittelten T-jährlichen Abflüsse sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Unter der Annahme, die aufgrund der Regressionsuntersuchung in Abb. 3.5 gerechtfertigt ist, dass die Abflussentwicklung entlang des Hochrheins bei den Abflussscheitelwerten $HQ(J)$ und bei den Höchstwerten der Tagesabflüsse $HQ_d(J)$ sehr vergleichbar

ist, kann auch zwischen den Einmündungen von Thur und Aare ein Hochwasserabfluss-Längsschnitt abgeleitet werden.

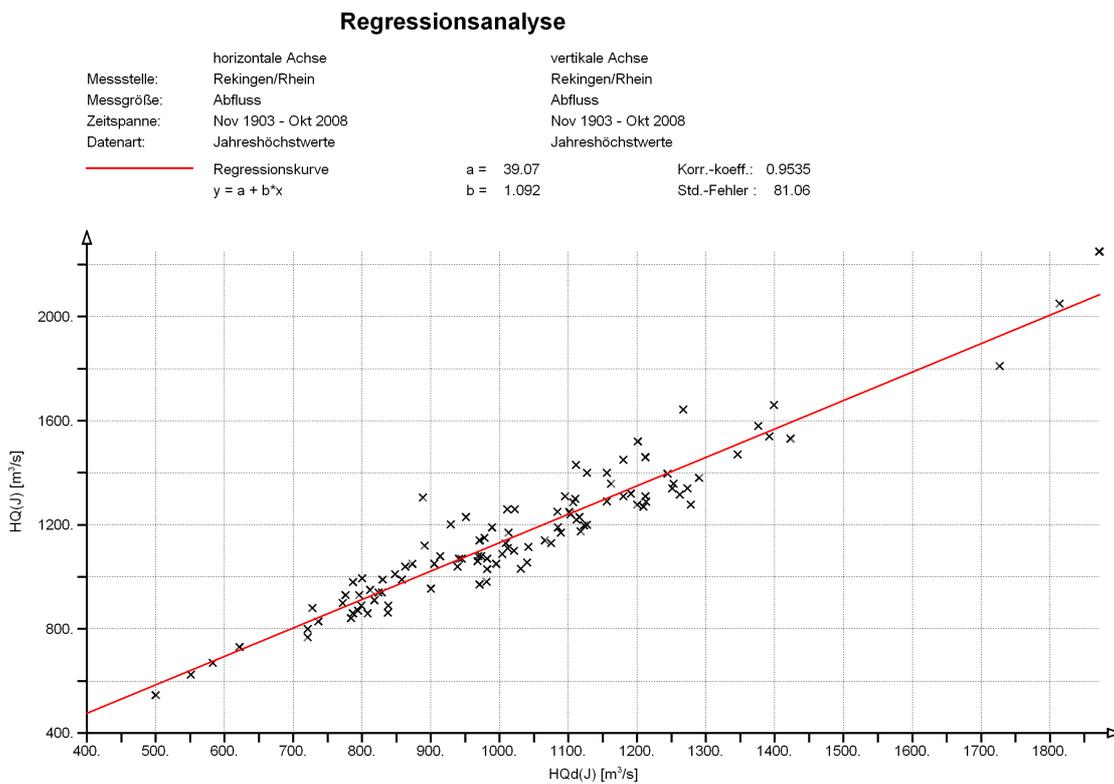


Abb. 3.5: Regressionsbeziehung zwischen den jährlich höchsten Abflusstageswerten HQd(J) und jährlich höchsten Abflussscheitelwerten HQ(J) am Pegel Rekingen/Rhein

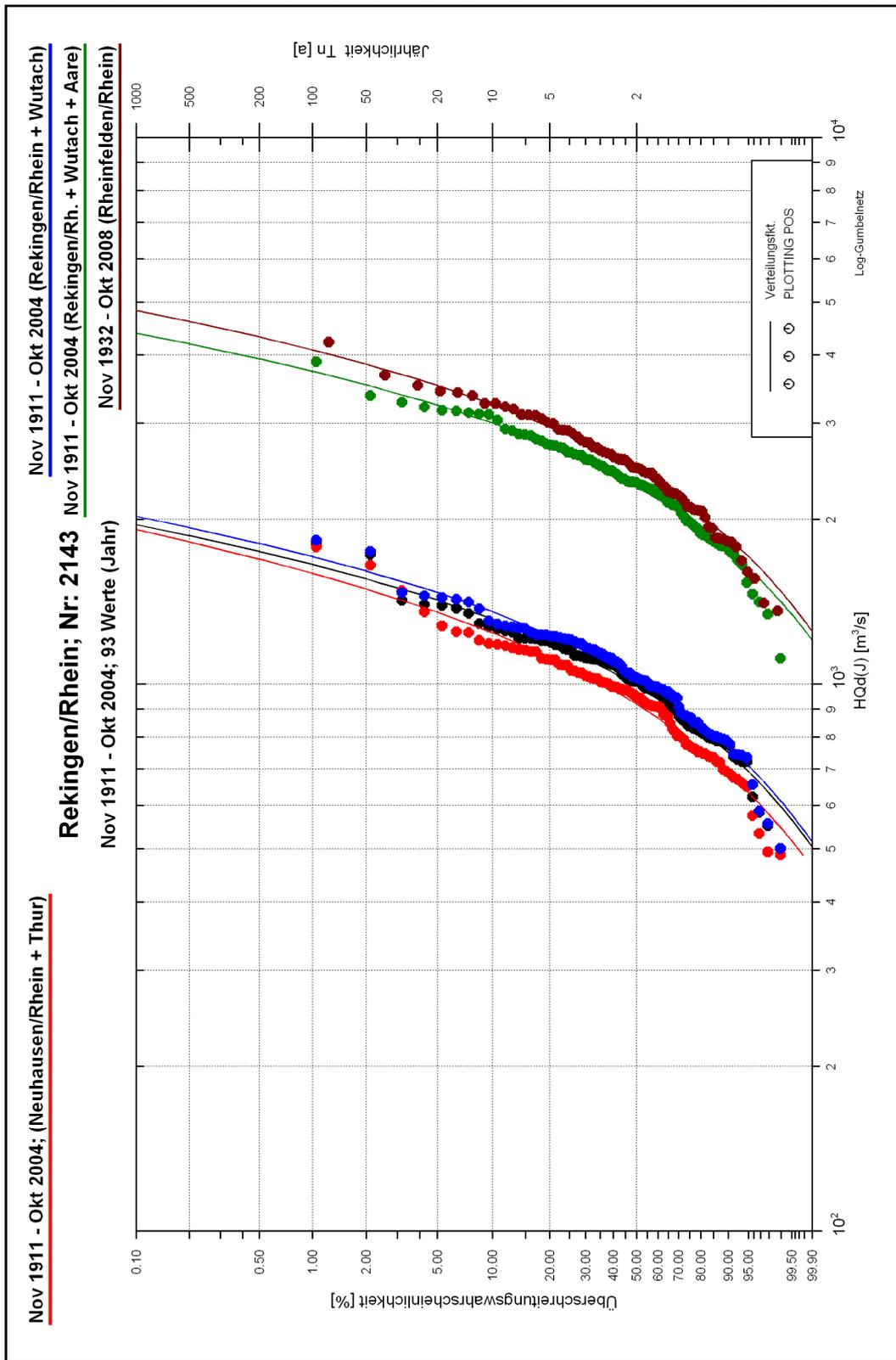


Abb. 3.6: Extremwertstatistik der jährlich höchsten Abflusstageswerte HQd(J) für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Thur (Summe: Neuhausen u. Thur), am Pegel Rekingen/Rhein sowie oberhalb (Summe: Rekingen und Wutach), unterhalb (Summe: Rekingen, Wutach und Aare) der Einmündung der Aare und am Pegel Rheinfelden/Rhein

3.4 Längsschnitt-Regionalisierung entlang des Hochrheins

Entlang eines Gewässerlaufs muss für einen bestimmten hydrologischen Kennwert ein homogener Verlauf vorhanden sein. Maßgebend hierfür ist der Spendenwert des entsprechenden Kennwerts (Kennwert bezogen auf die Größe des Einzugsgebiets $A_{E,o}$), der, insbesondere bei großen Einzugsgebieten, eine abnehmende Tendenz aufweisen muss. Zur Bewertung und Beurteilung der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 erzielten Ergebnisse aus den verschiedenen Extrémwertstatistiken entlang des Hochrheins zwischen dem Auslauf des Bodensees bei Konstanz und dem Übergang des Hochrheins in den Oberrhein bei Basel wurde eine Längsschnitt-Regionalisierung aufgestellt. Dabei wurden die jeweiligen Abfluss-Extrémwerte HQ_T bezogen auf die Größe des Einzugsgebiet (Abfluss-Spenden Hq_T) als Funktion der Einzugsgebietsgröße $A_{E,o}$ dargestellt. Aus dieser Längsschnitt-Regionalisierung wurden anschließend die gültigen T-jährlichen Abflussscheitelwerte HQ_T für die Pegel entlang des Hochrheins festgelegt.

Da das Abflussverhalten des Hochrheins für verschiedene Gewässerabschnitte unterschiedlichen Einflüssen unterliegt, erfolgt die Längsschnitt-Regionalisierung in folgenden Abschnitten:

- Hochrhein zwischen dem Auslauf des Bodensees und der Einmündung der Thur: Der erste Gewässerabschnitt zwischen dem Bodensee und der Einmündung der Thur ist vorwiegend geprägt durch die Wasserstände im Bodensee (Obersee). Die seitlichen Zuflüsse decken jeweils nur relativ kleine Einzugsgebiete ab und haben somit auf das Hochwasserabflussverhalten des Hochrheins keinen bestimmenden Einfluss.
- Hochrhein zwischen den Einmündungen von Thur und Aare: Die Thur stellt den ersten bedeutenden Zufluss zum Hochrhein dar. Das Einzugsgebiet der Thur umfasst eine Fläche von ca. $A_{E,o} = 1\,750\text{ km}^2$. Die Hochwasserabflüsse der Thur überlagern sich in der Regel mit einer zeitlich lang gestreckten Abflussganglinie des Hochrheins. Deshalb sind die Hochwasserabflüsse unterhalb der Einmündung der Thur zunächst erheblich von den Zuflüssen aus der Thur bestimmt.
- Hochrhein zwischen der Einmündung der Aare und dem Übergang zum Oberrhein bei Basel: Die Hochwasserabflüsse im Unterlauf des Hochrheins sind vorwiegend durch die Zuflüsse aus der Aare bestimmt. Die Aare deckt eine Einzugsgebietsfläche von ca. $A_{E,o} = 17\,720\text{ km}^2$ ab. Dieses Einzugsgebiet ist um ca. 11% größer als das Einzugsgebiet des Hochrheins oberhalb der Einmündung der Aare.

In die Längsschnitt-Regionalisierung wurden folgende Extrémwertanalysen einbezogen:

- Extrémwertstatistiken für die originalen Messwerte der Pegel
- Extrémwertstatistiken mit Berücksichtigung der Abflusserhöhungen an der Thur
- Extrémwertstatistiken für die trendbereinigten Daten mit Berücksichtigung der Abflusserhöhungen an der Thur

Für die drei Gewässerabschnitte des Hochrheins ergeben sich aus der Hochwasserabfluss-Regionalisierung folgende Ergebnisse:

Hochrhein oberhalb der Einmündung der Thur

Für die Längsschnitt-Regionalisierung entlang des Hochrheins oberhalb der Einmündung der Thur stehen die beiden Stützstellen Pegel Konstanz/Rhein und Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein zur Verfügung. Wie Abb. 3.7 für die ausgewerteten Abflusskennwerte MHQ und HQ_T zwischen $T = 2$ und 1000 a zeigt, weisen die jeweiligen Abflussspenden in diesem Gewässerabschnitt leicht abnehmende Tendenzen auf. Die Festlegung der Abflusskennwerte erfolgt somit bis zur Gewässerstelle „Hochrhein oberhalb Thur“ durch Anwendung der dargestellten Regressionsbeziehungen. Oberhalb der Einmündung der Thur wird der fallende Trend in den jährlichen Höchstwerten am Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein nicht berücksichtigt. Die Hochwasserabfluss-Kennwerte an den Stützstellen, die in die Längsschnitt-Regionalisierung übernommen wurden, in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Hochrhein zwischen den Einmündungen von Thur und Aare

Für die Längsschnitt-Regionalisierung entlang des Hochrheins zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare steht nur der Pegel Rekingen/Rhein zur Verfügung. Zur Ermittlung der Längsschnitt-Regionalisierung wurden deshalb die zusätzlichen Stützstellen am Hochrhein unterhalb der Einmündung Thur, am Pegel Rekingen/Rhein und oberhalb der Einmündung der Aare berücksichtigt. An diesen Stützstellen stehen die Hochwasserabflüsse abgeleitet aus Abflusstageswerten zur Verfügung (Tabelle 3.1). Die Steigungen der Abflussspenden-Regionalisierung der auf den Tageswerten basierenden Extremwerte wurde anhand der Extremwerte des Pegels Rekingen/Rhein (Abb. 3.5) auf die Hochwasserabflüsse übertragen.

Für den Gewässerabschnitt des Hochrheins zwischen den Einmündungen von Thur und Aare wurde drei Längsschnitt-Regionalisierungen durchgeführt. Die entsprechenden Abflussspenden-Darstellungen zeigen Abb. 3.8 bis Abb. 3.10. Die Kennzeichnung „ohne Thurkorrektur“ bezieht sich auf die originalen Messdaten, die Kennzeichnung „mit Thurkorrektur“ weist auf die Berücksichtigung der Abflusserhöhung an der Thur infolge der Deichertüchtigungen hin und die Kennzeichnung „Thur-Kor., tr-ber“ bezeichnet die Variante, bei der sowohl die Trendbereinigung als auch die Abflusserhöhung an der Thur berücksichtigt sind. Die Hochwasserabfluss-Kennwerte an den Stützstellen, die in die Längsschnitt-Regionalisierung übernommen wurden, sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare

Der Hochwasserabfluss entlang des Hochrheins unterhalb der Einmündung der Aare ist wesentlich geprägt durch die Hochwasserzuflüsse aus der Aare. Als Stützstellen für den Hochwasserabfluss-Längsschnitt stehen zur Verfügung die Pegel Untersiggenthal-Stilli/Aare, Rheinfelden/Rhein und Basel-Rheinhalle/Rhein. Die Hochwasserabfluss-Spenden H_q sind in Abb. 3.11 für die Extremwerte aus den originalen Messdaten, in Abb. 3.12 für die Extremwerte aus den trendbereinigten Daten und in Abb. 3.13 für die Extremwerte mit Berücksichtigung der berechneten Abflussscheitelwerte am Pegel Basel-Rheinhalle/Rhein.

Die Darstellungen zeigen, dass im Bereich kleiner Hochwasserereignisse eine sehr gute Regressionsbeziehung über diese Stützstellen erstellt werden kann. Steigen die Abflussspenden H_q jedoch mit zunehmender Jährlichkeit an, weichen die Abflussspenden des Pegels Basel-Rheinhalle/Rhein immer deutlicher von der mittleren Tendenz ab. Die statistischen Auswertungen zeigen für diesen Pegel mit zunehmender Jährlichkeit deutlich größere Abflussspenden als

der kurz oberstrom gelegene Pegel Rheinfelden/Rhein. Diese Abweichungen treten bei den Extremabflüssen, die aus den trendbereinigten Daten angeleitet wurden, besonders deutlich hervor.

Ursache hierfür könnten Unsicherheiten in der Abflusskurve des Pegels bei großen Hochwasserereignissen sein. Der Pegel Basel-Rheinhalle liegt direkt gegenüber der Einmündungsstelle der Birs, so dass die Wasserstände an der Pegelstelle infolge ungünstiger Strömungsverhältnisse beeinflusst sein können. Die Abflusskurve des Pegels ist nur bis zu einem Abfluss von 2 700 m³/s durch Abflussmessungen belegt.

Nach Diskussion dieser Problematik mit den Zuständigen aus Baden-Württemberg und der Schweiz (Besprechungen in Bad Säckingen vom 27. Mai 2009 und in Freiburg vom 18. Januar 2010) wurde folgendes vereinbart: In der Zeitreihe der Hochwasserabflüsse am Pegel Basel-Rheinhalle werden die Abflussscheitelwerte, die größer als 2 700 m³/s sind, ersetzt durch berechnete Abflüsse, die über eine Regressionsbeziehung aus den Beobachtungswerten der benachbarten Pegel Rheinfelden/Rhein, Liestal/Ergolz und Münchenstein/Birs abgeleitet sind. Das Bundesamt für Umwelt in Bern (BAFU) hat die erforderlichen Abflussberechnungen durchgeführt und die Daten dem IWG zur statistischen Auswertung übergeben. Das Ergebnis der Extremwertanalyse ist in Tabelle 3.2 unter „ber,tr-ber“ aufgelistet. Die daraus ermittelten Hochwasserabfluss-Spenden sind in Abb. 3.13 im Längsschnitt dargestellt.

3.5 Hochwasserabfluss-Längsschnitt für die Stützstellen

Der Hochwasserabfluss-Längsschnitt entlang des Hochrheins wird über die Längsschnitt-Regionalisierung abgeleitet. Hierzu wurden die Stützstellen durch die weiteren vorhandenen Pegelstellen (keine oder nur kurze Beobachtungsreihe) entlang des Hochrheins ergänzt. Die Hochwasserabflüsse der zusätzlichen Stützstellen wurden durch Anwendung der Regressionsbeziehungen über die Abflussspenden abgeleitet. Abb. 3.14 zeigt für die Jährlichkeit $T = 100$ a die Hochwasserabfluss-Scheitelwerte entlang des Hochrheins unter Berücksichtigung der einbezogenen Stützstellen für die Auswertungen der Messdaten (HQ_{100}), mit Berücksichtigung der Abfluss-Korrekturen an der Thur ($HQ_{100, \text{kor}}$) zwischen der Einmündung der Thur und der Aare sowie mit zusätzlicher Berücksichtigung der Trendbereinigung ($HQ_{100, \text{kor}, \text{tr-ber}}$). Die zugehörigen Abflussscheitelwerte sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Aus diesem Vergleich ergibt sich, dass infolge der Abfluss-Korrektur an der Thur unterhalb der Thur bis zur Einmündung der Aare beim 100-jährlichen Hochwasser eine Abflusserhöhung vorhanden ist, die bezogen auf den Pegel Rekingen/Rhein ca. 165 m³/s beträgt. Dies entspricht einer prozentualen Erhöhung von ca. 8%. Infolge der zusätzlichen Trendbereinigung ergibt sich eine weitere kleine Abflusserhöhung um knapp 11 m³/s.

Unterhalb der Einmündung der Aare ist kein Einfluss der Abflusserhöhung an der Thur zu erwarten. Infolge der Trendbereinigung ergibt sich jedoch bezogen auf den Pegel Rheinfelden/Rhein eine Abflusserhöhung von ca. 170 m³/s. Dies entspricht einer prozentualen Erhöhung von ca. 4%.

Nach Abstimmung der Ergebnisse mit den Zuständigen aus Baden-Württemberg und der Schweiz wird der Hochwasserabfluss-Längsschnitt entlang des Hochrheins zwischen dem Bodensee und oberhalb der Einmündung der Kander unterhalb von Basel wie folgt festgelegt:

- Hochrhein oberhalb der Einmündung der Thur:
Zwischen dem Bodensee und oberhalb der Einmündung der Thur wird der Abflusslängsschnitt aus den beiden Stützstellen Pegel Konstanz/Rhein und Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein auf Basis der Extremwertstatistiken ohne Berücksichtigung des Trends abgeleitet.
- Hochrhein zwischen den Einmündungen von Thur und Aare:
Zwischen den Einmündungen von Thur und Aare gelten die Extremwertstatistiken mit Berücksichtigung der Abflusskorrekturen infolge des Gewässerausbaus an der Thur und der Trendbereinigung. Der Längsschnitt wird über die Stützstelle Pegel Rekingen/Rhein und die Stützstellen am Rhein unterhalb der Einmündung der Thur und oberhalb der Einmündung der Aare abgeleitet. Die Stützstelle unterhalb der Thur ergibt sich aus den addierten Abflüssen der Pegel Neuhausen-Flurlingerbrücke/Rhein und Andelfingen/Thur und die Stützstelle oberhalb der Aare aus den addierten Abflüssen der Pegel Rekingen/Rhein und Oberlauchringen/Wutach.
- Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare:
Unterhalb der Einmündung der Aare werden die Hochwasserabflüsse über die Spendenregionalisierung aus den Pegeln Untersiggenthal-Stilli/Aare, Rheinfeldern/Rhein und Basel-Rheinhalle/Rhein abgeleitet. Dabei werden am Pegel Basel-Rheinhalle/Rhein die Extremwertstatistiken mit Berücksichtigung der berechneten Abflüsse verwendet. Die Trendbereinigung wird an allen Pegeln berücksichtigt.

Der entsprechende Verlauf der Abflussscheitel entlang des Hochrheins unter Berücksichtigung der einbezogenen Stützstellen ist in Abb. 3.15 für ausgewählte Jährlichkeiten dargestellt.

Tabelle 3.2: Ausgewählte Hochwasserabfluss-Kennwerte an den Stützstellen entlang des Hochrheins für die Längsschnitt-Regionalisierung

Pegel/Standort	Art	MHQ [m³/s]	Hochwasserabfluss -Kennwert [m³/s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Konstanz/Rhein	Messdaten	677,5	670,0	789,3	856,0	913,5	944,5	981,2	1 027,7	1 096,5	1 127,0	1 167,0
	Messdaten	724,1	716,0	843,2	914,9	976,5	1 009,6	1 048,7	1 098,6	1 171,8	1 204,2	1 246,9
Andelfingen/Thur	Messdaten	582,1	555,2	719,3	823,5	920,9	976,1	1 044,3	1 135,7	1 279,2	1 345,8	1 436,5
	korrigiert	594,9	563,0	750,1	876,3	997,4	1 067,0	1 154,1	1 271,5	1 456,9	1 543,8	1 669,5
Neuhausen + Thur	kor, tr-ber	661,5	627,2	811,8	934,0	1 051,2	1 118,7	1 203,0	1 316,7	1 496,2	1 579,5	1 692,5
	Messdaten	1 059,0	1 028,0	1 258,9	1 407,6	1 543,6	1 617,5	1 712,9	1 844,0	2 044,2	2 137,0	2 263,1
Rekingen/Rhein	korrigiert	1 067,2	1 038,0	1 269,5	1 447,1	1 615,3	1 709,0	1 827,0	1 996,7	2 271,2	2 403,3	2 587,2
	kor, tr-ber	1 127,0	1 075,0	1 314,0	1 461,6	1 615,3	1 709,0	1 827,0	1 996,7	2 291,2	2 404,3	2 587,2
Rekingen + Wutach	Messdaten	1 162,2	1 124,3	1 364,0	1 515,1	1 655,5	1 734,9	1 836,4	1 973,2	2 187,5	2 286,8	2 421,7
	korrigiert	1 171,2	1 120,0	1 375,4	1 557,6	1 732,4	1 833,0	1 958,7	2 136,6	2 430,4	2 571,7	2 768,6
Untersiggenthal/Aare	kor, tr-ber	1 244,8	1 187,1	1 425,1	1 592,9	1 760,5	1 859,8	1 987,0	2 164,3	2 458,5	2 601,6	2 802,5
	Messdaten	1 170,0	1 137,0	1 392,3	1 558,0	1 711,2	1 793,2	1 904,1	2 045,0	2 267,4	2 370,3	2 510,2
Reki. + Wutach+Aare	korrigiert	1 179,0	1 150,0	1 404,0	1 601,8	1 790,7	1 894,6	2 031,0	2 214,3	2 519,2	2 665,6	2 869,7
	kor, tr-ber	1 270,0	1 214,0	1 467,0	1 617,8	1 790,7	1 894,6	2 031,0	2 214,3	2 519,2	2 665,6	2 869,7
Rheinfeiden/Rhein	Messdaten	1 527,5	1 477,5	1 770,0	1 970,5	2 161,0	2 270,7	2 407,7	2 592,6	2 884,4	3 020,8	3 212,0
	tr-ber	1 717,5	1 685,0	1 955,5	2 137,6	2 312,3	2 412,7	2 538,4	2 707,8	2 975,7	3 106,1	3 282,8
Basel-Rheinh./Rhein	Messdaten	2 648,1	2 587,3	3 132,6	3 449,8	3 701,7	3 837,9	4 000,4	4 260,4	4 665,9	4 850,8	5 099,8
	korrigiert	2 648,1	2 587,3	3 132,6	3 449,8	3 701,7	3 837,9	4 000,4	4 260,4	4 665,9	4 850,8	5 099,8
Basel-Rheinh./Rhein	tr-ber	2 955,0	2 909,0	3 380,0	3 660,0	3 908,0	4 047,7	4 211,8	4 425,0	4 747,0	4 892,4	5 140,0
	Messdaten	2 751,0	2 687,9	3 256,5	3 583,9	3 839,9	3 977,5	4 141,4	4 406,9	4 821,2	5 009,8	5 262,9
Basel-Rheinh./Rhein	tr-ber	3 076,4	3 028,4	3 516,0	3 801,4	4 054,5	4 192,8	4 359,5	4 575,5	4 900,4	5 046,1	5 248,2
	Messdaten	2 859,8	2 794,1	3 386,4	3 738,3	4 053,3	4 226,6	4 436,6	4 710,2	5 125,0	5 330,9	5 619,9
Basel-Rheinh./Rhein	tr-ber	3 226,5	3 134,4	3 769,8	4 163,9	4 526,5	4 729,7	4 979,3	5 310,1	5 877,0	6 168,6	6 563,9
	ber, tr-ber	3 268,3	3 216,8	3 740,9	4 047,6	4 319,5	4 468,1	4 647,2	4 879,2	5 228,1	5 384,5	5 604,1

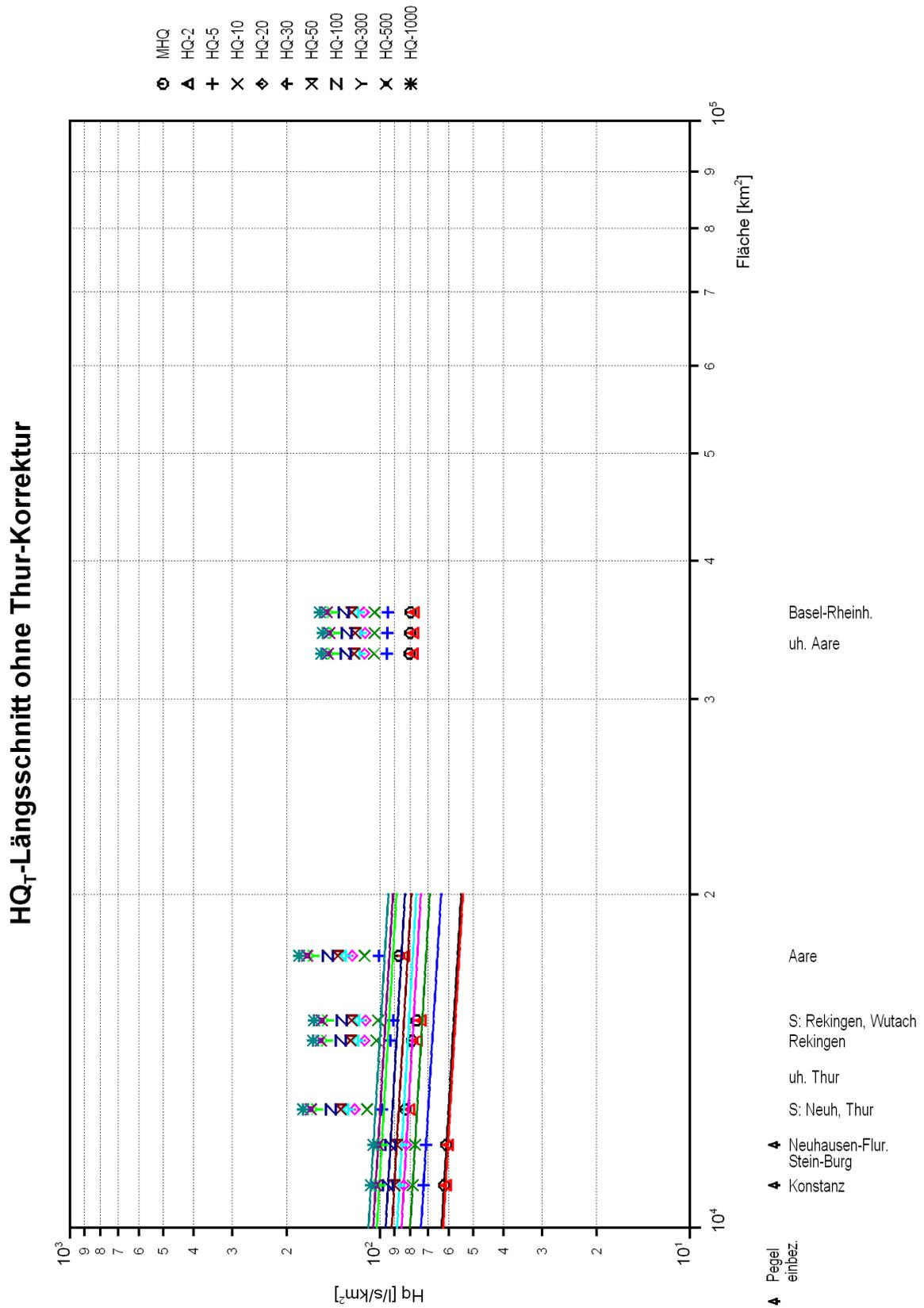


Abb. 3.7: Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MHq und Hq_T für den Hochrhein oberhalb der Einmündung der Thur

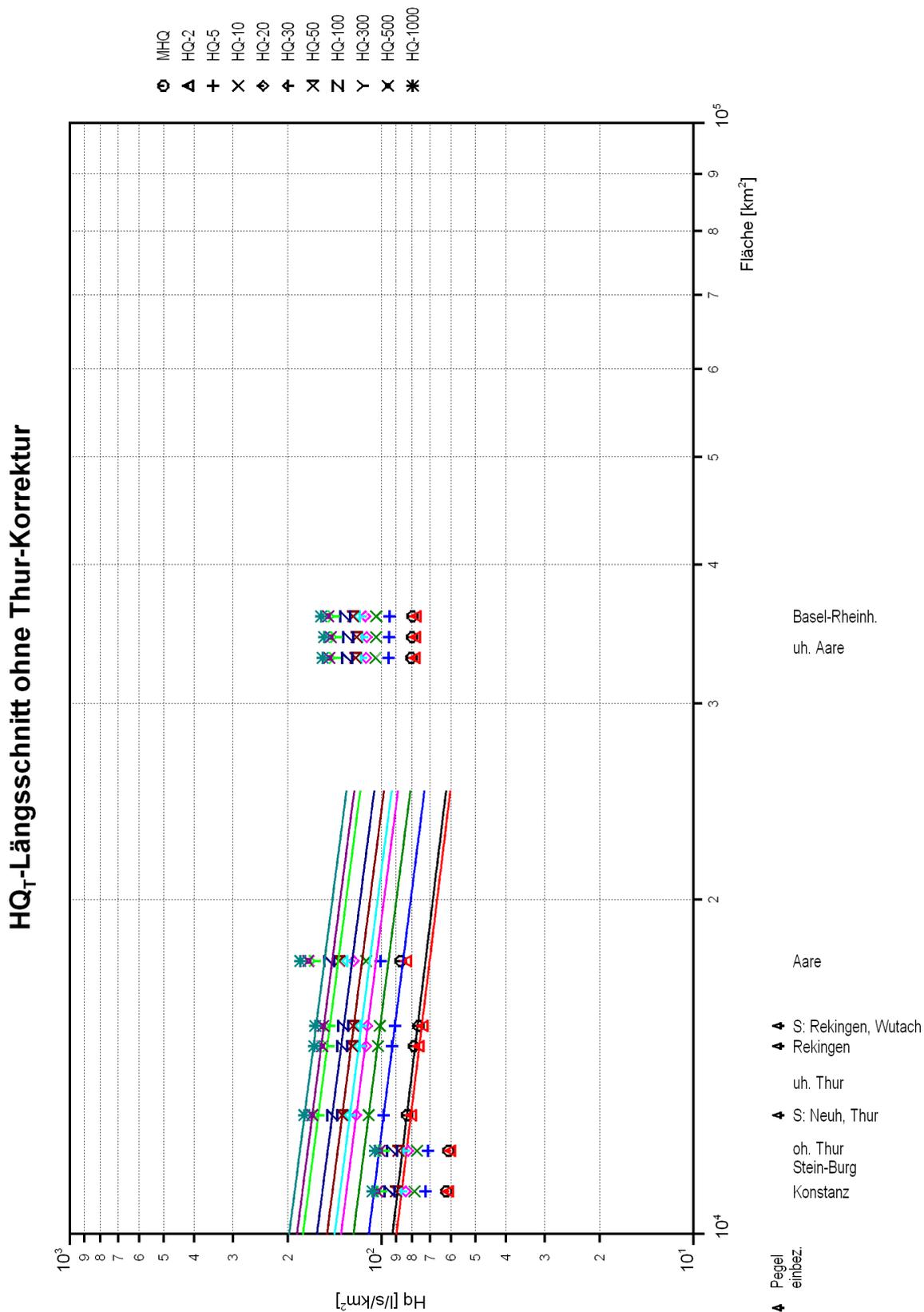


Abb. 3.8: Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MHq und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der originalen Messdaten

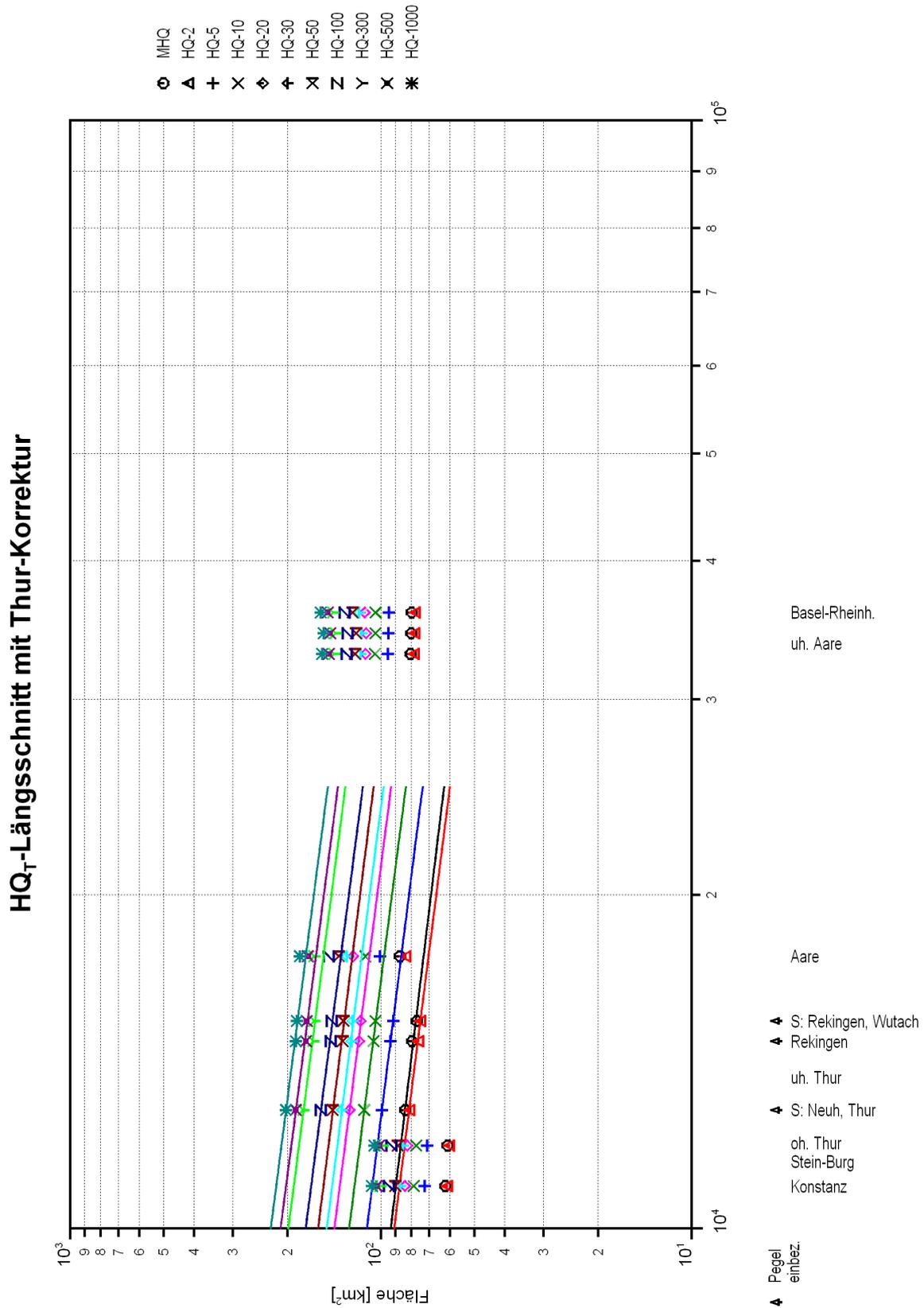


Abb. 3.9: Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MHq und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrektur an der Thur

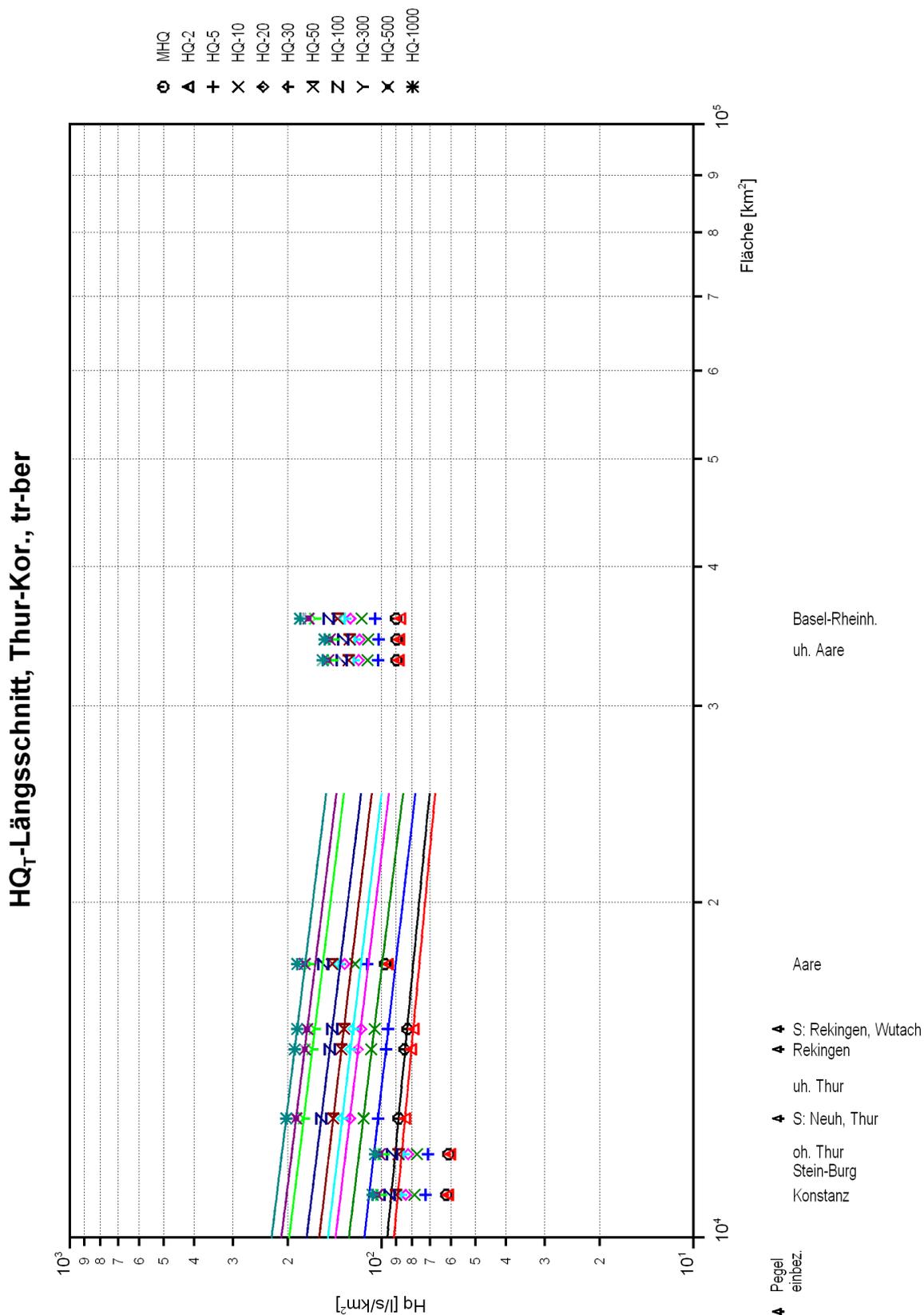


Abb. 3.10: Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MHq und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der trendbereinigten Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrektur an der Thur

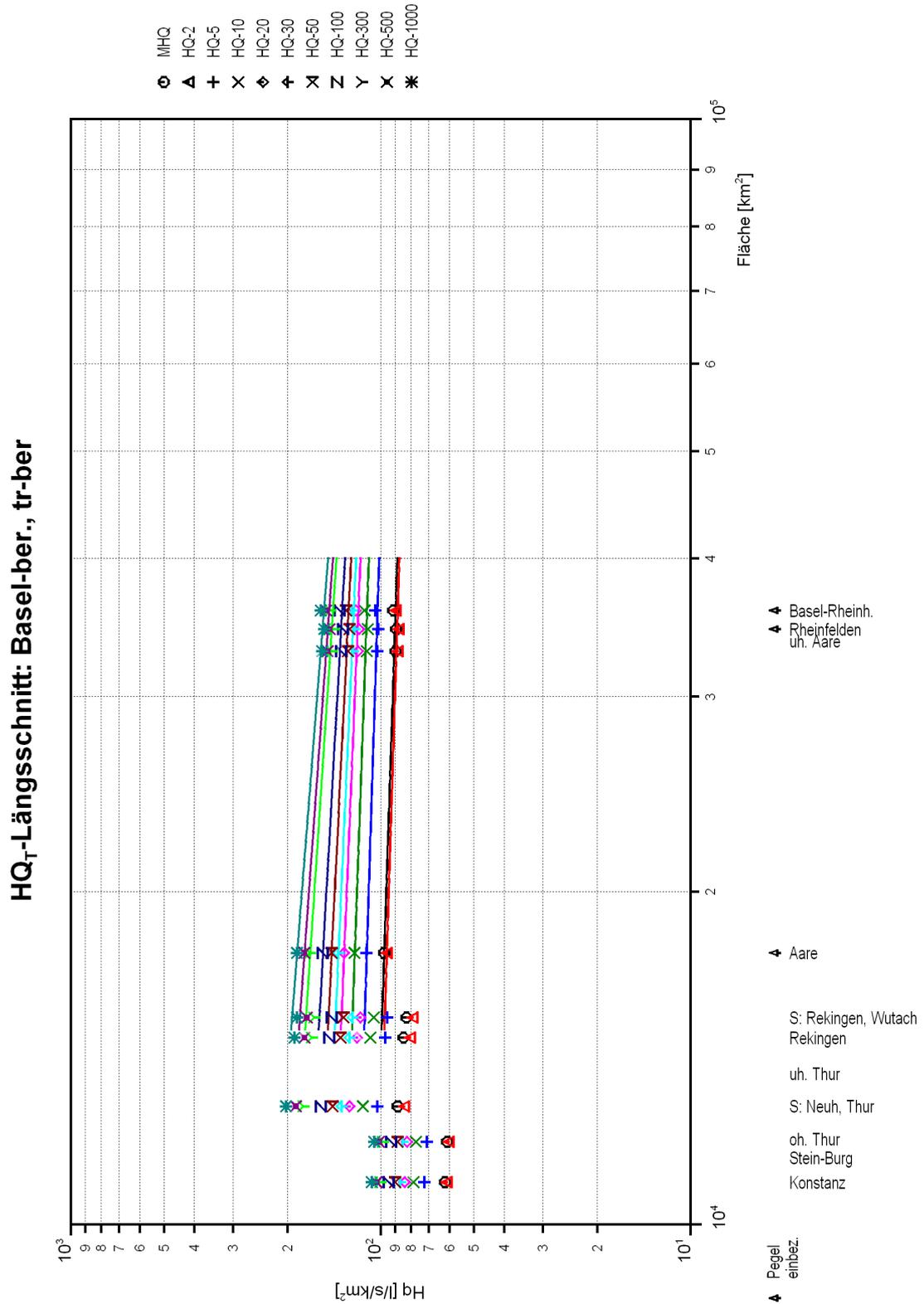


Abb. 3.13: Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MHq und Hq_T für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der trendbereinigten Daten, die am Pegel Basel-Rhein-halle/Rhein aus den benachbarten Pegeln berechnet wurden

Tabelle 3.3a: Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den originalen Messdaten

Pegel/Standort	A _{E,0} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss -Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Konstanz	10919	678	670	789	856	914	945	981	1028	1097	1127	1167
Gottlieben	10952	679	672	791	858	916	947	984	1030	1099	1130	1170
Stein-Burg	11487	705	697	821	891	951	983	1021	1070	1141	1173	1214
Rheinklingen	11521	707	699	823	893	953	985	1024	1072	1144	1176	1217
Neuhausen	11878	724	716	843	915	977	1010	1049	1099	1172	1204	1247
oh. Thur	11938	727	719	847	919	980	1014	1053	1103	1176	1209	1252
uh. Thur	13688	1103	1070	1307	1459	1599	1676	1774	1909	2117	2213	2344
Rekingen	14752	1151	1116	1362	1520	1665	1745	1847	1988	2204	2304	2440
Kadelburg	14787	1153	1118	1364	1522	1668	1747	1850	1991	2207	2307	2443
oh. Aare	15944	1203	1167	1422	1585	1737	1820	1927	2073	2298	2403	2545
uh. Aare	33664	2694	2632	3187	3509	3763	3900	4063	4325	4735	4921	5172
Hauenstein	33974	2714	2652	3212	3536	3791	3928	4091	4355	4766	4953	5205
Rheinfelden	34526	2751	2688	3257	3584	3840	3978	4141	4407	4821	5010	5263
Basel-Rheinhalle	35897	2842	2777	3366	3702	3961	4100	4265	4536	4957	5149	5406

Tabelle 3.3b: Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den originalen Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrekturen an der Thur

Pegel/Standort	A _{E,o} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss -Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Konstanz	10919	678	670	789	856	914	945	981	1028	1097	1127	1167
Gottlieben	10952	679	672	791	858	916	947	984	1030	1099	1130	1170
Stein-Burg	11487	705	697	821	891	951	983	1021	1070	1141	1173	1214
Rheinklingen	11521	707	699	823	893	953	985	1024	1072	1144	1176	1217
Neuhausen-Flur.	11878	724	716	843	915	977	1010	1049	1099	1172	1204	1247
oh. Thur	11938	727	719	847	919	980	1014	1053	1103	1176	1209	1252
uh. Thur	13688	1112	1077	1318	1500	1674	1771	1894	2068	2352	2489	2679
Rekingen	14752	1160	1122	1374	1562	1743	1844	1973	2153	2449	2591	2790
Kadelburg	14787	1162	1124	1375	1564	1745	1846	1976	2155	2452	2595	2793
oh. Aare	15944	1212	1171	1434	1630	1818	1923	2060	2245	2554	2702	2909
uh. Aare	33664	2694	2632	3187	3509	3763	3900	4063	4325	4735	4921	5172
Hauenstein	33974	2714	2652	3212	3536	3791	3928	4091	4355	4766	4953	5205
Rheinfelden	34526	2751	2688	3257	3584	3840	3978	4141	4407	4821	5010	5263
Basel-Rheinhalle	35897	2842	2777	3366	3702	3961	4100	4265	4536	4957	5149	5406

Tabelle 3.3c: Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den trendbereinigten Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrekturen an der Thur und den berechneten Abflussscheitelwerten am Pegel Basel-Rheinhalle

Pegel/Standort	A _{E,o} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss-Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Konstanz	10919	678	670	789	856	914	945	981	1028	1097	1127	1167
Gottlieben	10952	679	672	791	858	916	947	984	1030	1099	1130	1170
Stein-Burg	11487	705	697	821	891	951	983	1021	1070	1141	1173	1214
Rheinklingen	11521	707	699	823	893	953	985	1024	1072	1144	1176	1217
Neuhausen-Flur.	11878	724	716	843	915	977	1010	1049	1099	1172	1204	1247
oh. Thur	11938	727	719	847	919	980	1014	1053	1103	1176	1209	1252
uh. Thur	13688	1180	1126	1367	1520	1681	1777	1901	2074	2359	2497	2688
Rekingen	14752	1240	1183	1429	1586	1754	1854	1985	2164	2460	2603	2803
Kadelburg	14787	1241	1185	1431	1588	1756	1857	1987	2166	2463	2607	2807
oh. Aare	15944	1305	1247	1496	1657	1833	1938	2076	2260	2569	2718	2928
uh. Aare	33664	3037	2989	3473	3759	4013	4154	4322	4541	4871	5020	5227
Hauenstein	33974	3061	3013	3501	3789	4045	4186	4355	4575	4906	5055	5262
Rheinfelden	34526	3105	3057	3552	3843	4101	4243	4413	4634	4966	5116	5324
Basel-Rheinhalle	35897	3214	3164	3677	3976	4239	4384	4557	4781	5116	5266	5475

Seerhein und Hochrhein, Jährlichkeit: T = 100 a

Varianten: Messdaten, mit Thur-Korrektur, berechneten Abflüssen in Basel und zusätzlicher Trendbereinigung

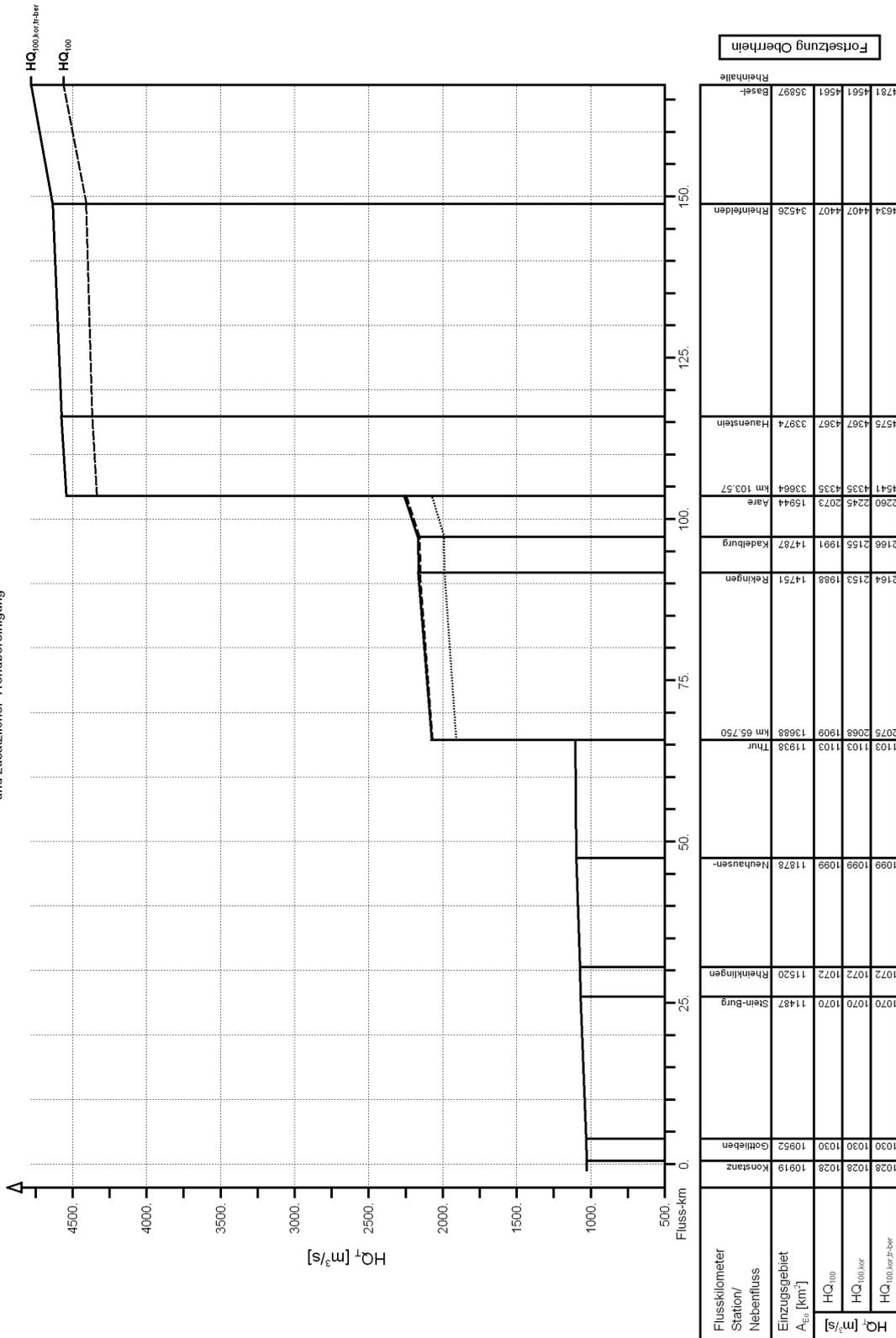


Abb. 3.14: 100-jährlicher Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein, abgeleitet an den einbezogenen Stützstellen aus den Statistiken für die Messwerte (HQ₁₀₀), mit Berücksichtigung der Thur-Korrektur und den berechneten Abflüssen am Pegel Basel-Rheinhalle (HQ_{100,kor}) und der Trendbereinigung (HQ_{100,kor,tr-ber})

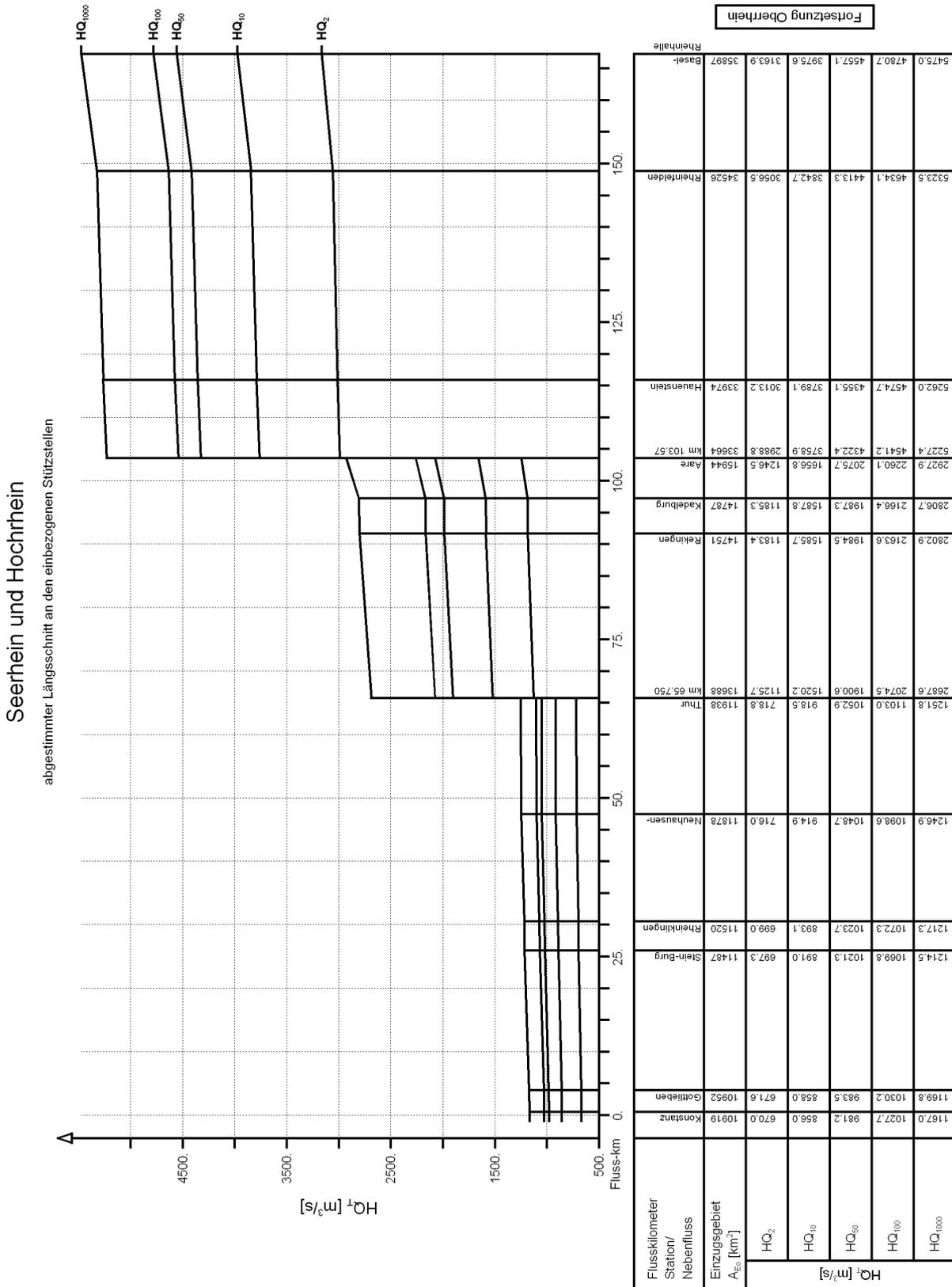


Abb. 3.15: abgestimmter Hochwasserabfluss-Längsschnitt entlang des Hochrheins an den einbezogenen Stützstellen für ausgewählte Jahreszeiten

4 Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein

Auf Basis des vereinfachten Hochwasserabfluss-Längsschnitts für den Hochrhein in Abb. 3.15 wird abschließend der detaillierte Längsschnitt abgeleitet. In Anlehnung an die Ausarbeitung der Abflusslängsschnitte bei der Studie Regionalisierung von Hochwasserabfluss-Kennwerten in Baden-Württemberg (LUBW 2007), werden alle wesentlichen Zuflüsse zum Hochrhein als Stützstellen einbezogen. Gleichzeitig wird der Längsschnitt im Unterlauf bis oberhalb der Einmündung der Kander erweitert. Insgesamt ergeben sich hieraus 49 Stützstellen, deren T-jährliche Hochwasserabflüsse durch Anwendung der Regressionsgleichungen aus der Längsschnitt-Regionalisierung abgeleitet wurden.

Die gültigen Hochwasserabflüsse entlang des Hochrheins sind in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 dargestellt. Die numerischen (gültigen) Werte für alle Stützstellen sind in Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.4 aufgelistet. Die numerischen Werte sind dabei entsprechend der Absprache zwischen Baden-Württemberg und der Schweiz auf jeweils volle $10 \text{ m}^3/\text{s}$ gerundet. In die Darstellungen der Längsschnitte sind die Werte jedoch mit einer höheren rechnerischen Genauigkeit übernommen, um in der graphischen Darstellung unplausible Sprünge an den Einmündungen kleiner Nebengewässer zu vermeiden.

Hochwasserabfluss-Längsschnitt HQ_T Seerhein und Hochrhein

Wiederholungszeitspannen T = 2, 5, 10, 20, 30 Jahre
abgestimmt zwischen LUBW Karlsruhe und BAFU Bern; e-Mail vom 29.01.2010

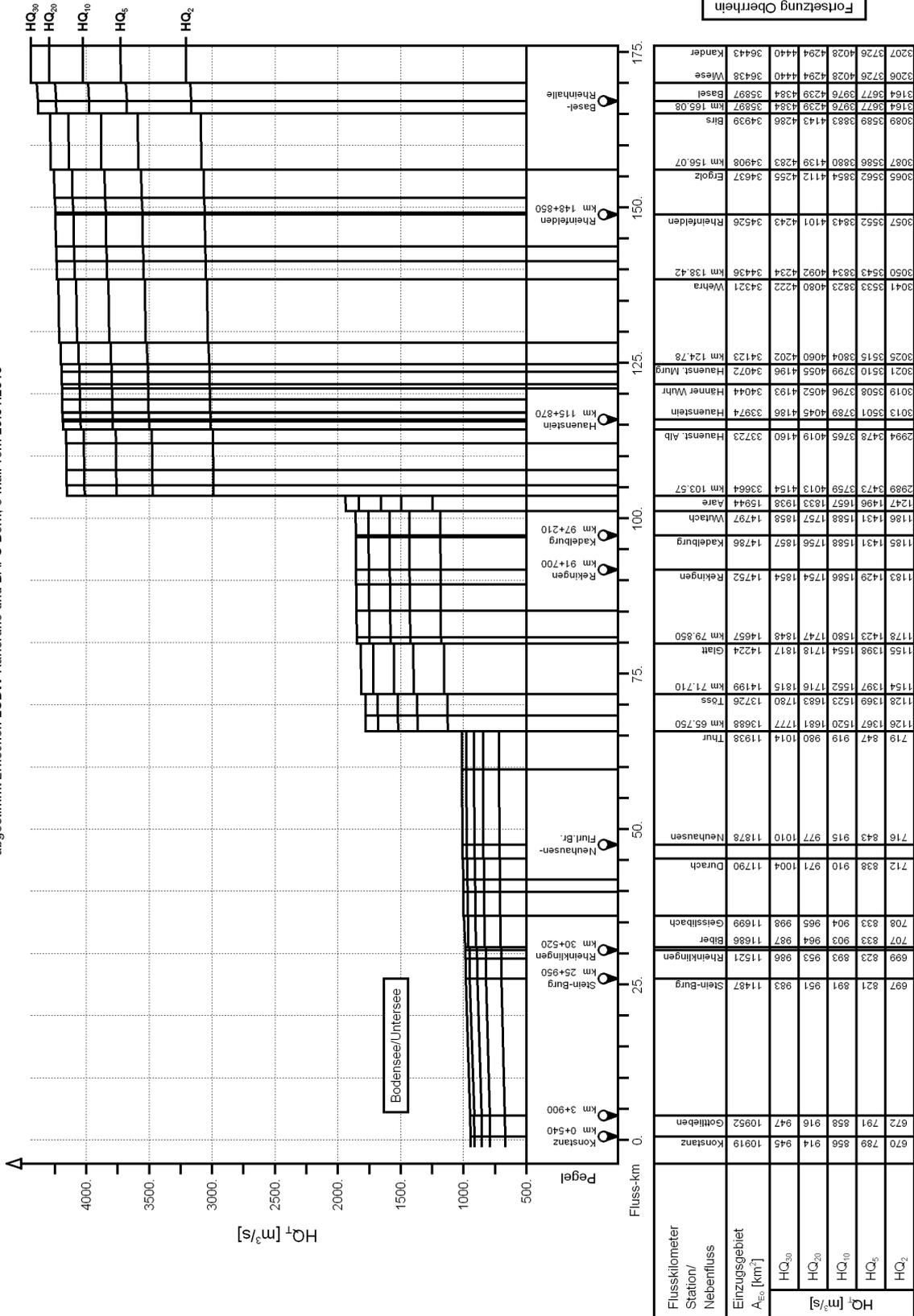
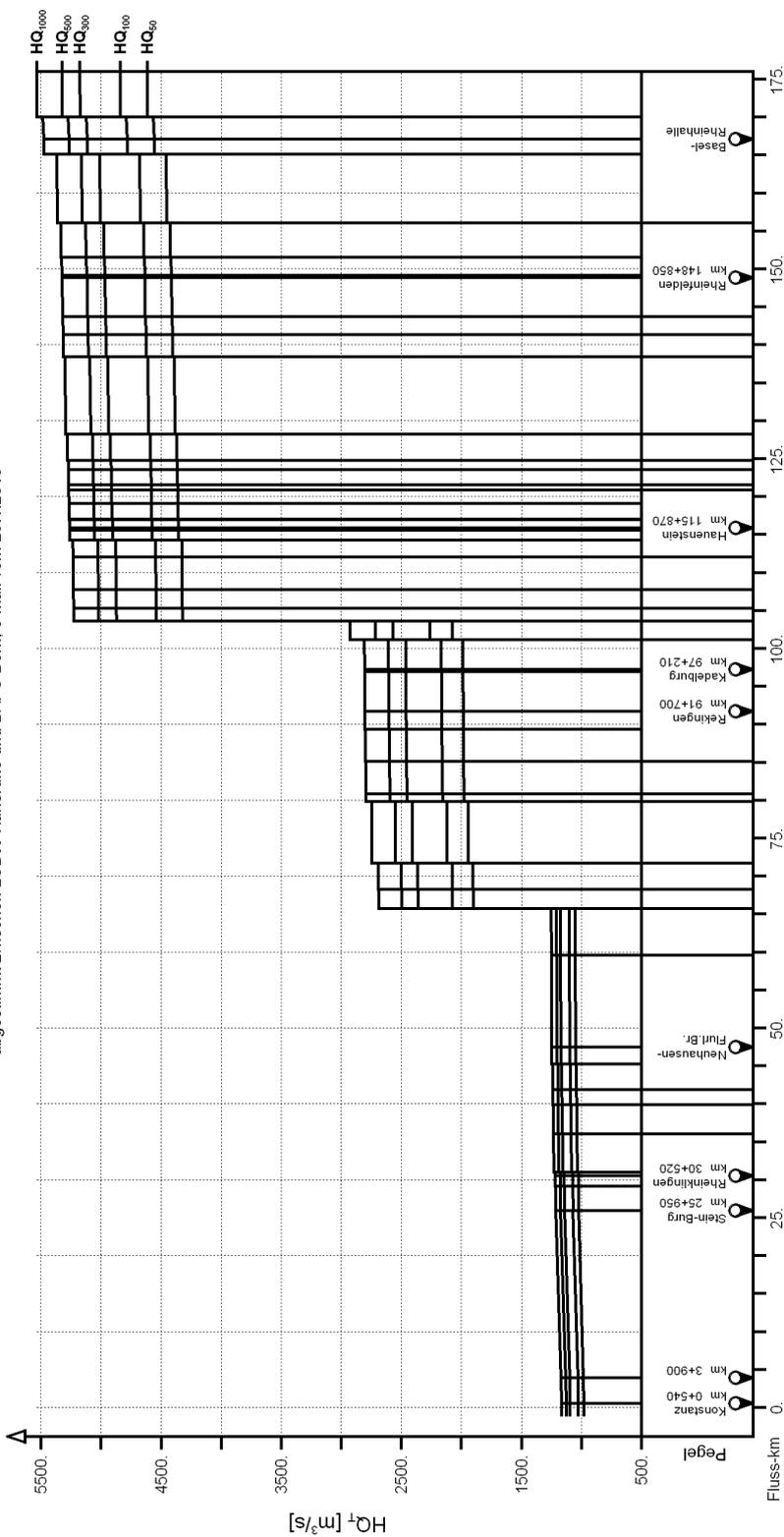


Abb. 4.1: Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein für T-jährliche Hochwasserabflüsse mit den Jährlichkeiten T = 2, 5, 10, 20, und 30 Jahre

Hochwasserabfluss-Längsschnitt HQ_T Seerhein und Hochrhein

Wiederholungszeitspannen T = 50, 100, 300, 500, 1000 Jahre
abgestimmt zwischen LUBW Karlsruhe und BAFU Bern; e-Mail vom 29.1.2010



Flusskilometer Station/ Nebenfluss	HQ _T [m³/s]				
	HQ ₁₀₀₀	HQ ₅₀₀	HQ ₃₀₀	HQ ₁₀₀	HQ ₅₀
Konstanz	10919	1167	1127	1097	1026
Konstanz	10919	1170	1130	1099	1030
Gottlieben	10919	1167	1127	1097	1026
Stein-Burg	11487	1215	1173	1141	1070
Rheinlingen	11521	1217	1176	1144	1072
Biber	11686	1231	1189	1157	1085
Geislbach	11699	1232	1190	1158	1085
Durach	11790	1240	1197	1165	1092
Neuhausen	11878	1247	1204	1172	1099
Thur	11938	1252	1209	1176	1103
1901	13688	2497	2688	2359	2075
1904	13726	2692	2922	2501	2078
Töss	14199	2744	2948	2548	2118
1941	14224	2746	2951	2551	2118
Glatt	1457	2793	2894	2451	2156
1977	14657	2807	2907	2464	2164
Rekingen	14752	2803	2803	2460	2164
Kadelburg	14786	2807	2807	2463	2166
1987	14927	2828	2808	2468	2167
Walach	15044	2828	2808	2468	2167
1988	15044	2828	2808	2468	2167
Aare	15364	3027	3027	2669	2260
3076	3027	3027	3027	2669	2260
1988	3027	3027	3027	2669	2260
Hauenst. Alb	33729	5234	5027	4878	4548
4329	5234	5027	4878	4548	4329
Hauenst. Alb	33729	5234	5027	4878	4548
4329	5234	5027	4878	4548	4329
Hauenstein	33974	5262	5055	4906	4575
4355	5262	5055	4906	4575	4355
Hauenstein	33974	5262	5055	4906	4575
4355	5262	5055	4906	4575	4355
Hänner Wühr	34044	5270	5062	4913	4582
4363	5270	5062	4913	4582	4363
Hänner Wühr	34044	5270	5062	4913	4582
4363	5270	5062	4913	4582	4363
Hauenst. Murg	34123	5279	5071	4922	4591
4371	5279	5071	4922	4591	4371
Hauenst. Murg	34123	5279	5071	4922	4591
4371	5279	5071	4922	4591	4371
Wehra	34321	5301	5093	4944	4612
4392	5301	5093	4944	4612	4392
Wehra	34321	5301	5093	4944	4612
4392	5301	5093	4944	4612	4392
Rheinleiden	34526	5323	5116	4966	4634
4413	5323	5116	4966	4634	4413
Rheinleiden	34526	5323	5116	4966	4634
4413	5323	5116	4966	4634	4413
Ergolz	34637	5336	5128	4979	4646
4425	5336	5128	4979	4646	4425
Ergolz	34637	5336	5128	4979	4646
4425	5336	5128	4979	4646	4425
Birs	34939	5369	5161	5012	4678
4457	5369	5161	5012	5012	4678
Birs	34939	5369	5161	5012	4678
4457	5369	5161	5012	5012	4678
Basel	35897	5475	5266	5116	4781
4557	5475	5266	5116	5116	4781
Basel	35897	5475	5266	5116	4781
4557	5475	5266	5116	5116	4781
Mese	36438	5534	5325	5175	4838
4614	5534	5325	5175	5175	4838
Mese	36438	5534	5325	5175	4838
4614	5534	5325	5175	5175	4838
Kander	36443	5535	5325	5175	4839
4614	5535	5325	5175	5175	4839
Kander	36443	5535	5325	5175	4839
4614	5535	5325	5175	5175	4839

Fortsetzung Oberrhein

Abb. 4.2: Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein für T-jährliche Hochwasserabflüsse mit den Jährlichkeiten T = 50, 100, 300, 500 und 1000 Jahre

Tabelle 4.1: Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen dem Pegel Konstanz/Rhein und oberhalb der Einmündung der Thur

Pegel/Standort	A _{E,o} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss-Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
Konstanz	10 919	680	670	790	860	910	940	980	1 030	1 100	1 130	1 170
Gottlieben	10 952	680	670	790	860	920	950	980	1 030	1 100	1 130	1 170
Stein-Burg	11 487	710	700	820	890	950	980	1 020	1 070	1 140	1 170	1 210
oh. Schiener Bach	11 500	710	700	820	890	950	980	1 020	1 070	1 140	1 170	1 220
uh. Schiener Bach	11 517	710	700	820	890	950	990	1 020	1 070	1 140	1 180	1 220
Rheinklingen	11 521	710	700	820	890	950	990	1 020	1 070	1 140	1 180	1 220
oh. Biber	11 522	710	700	820	890	950	990	1 020	1 070	1 140	1 180	1 220
uh. Biber	11 686	710	710	830	900	960	1 000	1 040	1 080	1 160	1 190	1 230
oh. Geisslibach	11 699	720	710	830	900	960	1 000	1 040	1 090	1 160	1 190	1 230
uh. Geisslibach	11 741	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 190	1 240
oh. Ellenriedgraben	11 745	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 190	1 240
uh. Ellenriedgraben	11 761	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 190	1 240
oh. Mülibach	11 767	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 200	1 240
uh. Mülibach	11 785	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 200	1 240
oh. Durach	11 790	720	710	840	910	970	1 000	1 040	1 090	1 160	1 200	1 240
uh. Durach	11 871	720	720	840	910	980	1 010	1 050	1 100	1 170	1 200	1 250
Neuhausen-Flurl.Br.	11 878	720	720	840	910	980	1 010	1 050	1 100	1 170	1 200	1 250
oh. Volkenbach	11 910	730	720	840	920	980	1 010	1 050	1 100	1 170	1 210	1 250
uh. Volkenbach	11 922	730	720	850	920	980	1 010	1 050	1 100	1 180	1 210	1 250
oh. Thur	11 938	730	720	850	920	980	1 010	1 050	1 100	1 180	1 210	1 250

Tabelle 4.2: Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Thur und oberhalb der Einmündung der Aare

Pegel/Standort	A _{E,o} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss-Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
uh. Thur	13 688	1 180	1 130	1 370	1 520	1 680	1 780	1 900	2 070	2 360	2 500	2 690
oh. Wilerbach	13 694	1 180	1 130	1 370	1 520	1 680	1 780	1 900	2 080	2 360	2 500	2 690
uh. Wilerbach	13 722	1 180	1 130	1 370	1 520	1 680	1 780	1 900	2 080	2 360	2 500	2 690
oh. Töss	13 726	1 180	1 130	1 370	1 520	1 680	1 780	1 900	2 080	2 360	2 500	2 690
uh. Töss	14 199	1 210	1 150	1 400	1 550	1 720	1 810	1 940	2 120	2 410	2 550	2 740
oh. Glatt	14 224	1 210	1 150	1 400	1 550	1 720	1 820	1 940	2 120	2 410	2 550	2 750
uh. Glatt	14 657	1 230	1 180	1 420	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 450	2 590	2 790
oh. Rafzbach	14 658	1 230	1 180	1 420	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 450	2 590	2 790
uh. Rafzbach	14 682	1 240	1 180	1 420	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 450	2 600	2 800
oh. Fisibach	14 698	1 240	1 180	1 430	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 450	2 600	2 800
uh. Fisibach	14 715	1 240	1 180	1 430	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 460	2 600	2 800
oh. Tägerbach	14 732	1 240	1 180	1 430	1 580	1 750	1 850	1 980	2 160	2 460	2 600	2 800
uh. Tägerbach	14 747	1 240	1 180	1 430	1 590	1 750	1 850	1 980	2 160	2 460	2 600	2 800
Rekingen	14 752	1 240	1 180	1 430	1 590	1 750	1 850	1 980	2 160	2 460	2 600	2 800
oh. Hinterbach	14 776	1 240	1 180	1 430	1 590	1 760	1 860	1 990	2 170	2 460	2 610	2 810
uh. Hinterbach	14 787	1 240	1 190	1 430	1 590	1 760	1 860	1 990	2 170	2 460	2 610	2 810
Kadelburg	14 787	1 240	1 190	1 430	1 590	1 760	1 860	1 990	2 170	2 460	2 610	2 810
oh. Wutach	14 797	1 240	1 190	1 430	1 590	1 760	1 860	1 990	2 170	2 460	2 610	2 810
uh. Wutach	15 936	1 300	1 250	1 500	1 660	1 830	1 940	2 080	2 260	2 570	2 720	2 930
oh. Aare	15 944	1 300	1 250	1 500	1 660	1 830	1 940	2 080	2 260	2 570	2 720	2 930

Tabelle 4.3: Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Aare und oberhalb der Einmündung der Hauensteiner Murg

Pegel/Standort	A _{E,0} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss-Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit										
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000	
uh. Aare	33 664	3 040	2 990	3 470	3 760	4 010	4 150	4 320	4 540	4 870	5 020	5 230	
oh. Seltenbach	33 668	3 040	2 990	3 470	3 760	4 010	4 150	4 320	4 540	4 870	5 020	5 230	
uh. Seltenbach	33 679	3 040	2 990	3 470	3 760	4 010	4 160	4 320	4 540	4 870	5 020	5 230	
oh. Liederbach	33 684	3 040	2 990	3 470	3 760	4 020	4 160	4 320	4 540	4 870	5 020	5 230	
uh. Liederbach	33 690	3 040	2 990	3 480	3 760	4 020	4 160	4 330	4 540	4 870	5 020	5 230	
oh. Hölzlebach	33 710	3 040	2 990	3 480	3 760	4 020	4 160	4 330	4 550	4 880	5 030	5 230	
uh. Hölzlebach	33 719	3 040	2 990	3 480	3 760	4 020	4 160	4 330	4 550	4 880	5 030	5 230	
oh. Hauensteiner Alb	33 723	3 040	2 990	3 480	3 760	4 020	4 160	4 330	4 550	4 880	5 030	5 230	
uh. Hauensteiner Alb	33 965	3 060	3 010	3 500	3 790	4 040	4 190	4 350	4 570	4 900	5 050	5 260	
oh. Riehbach	33 967	3 060	3 010	3 500	3 790	4 040	4 190	4 350	4 570	4 900	5 050	5 260	
uh. Riehbach	33 974	3 060	3 010	3 500	3 790	4 040	4 190	4 360	4 570	4 910	5 050	5 260	
Hauenstein	33 974	3 060	3 010	3 500	3 790	4 040	4 190	4 360	4 570	4 910	5 050	5 260	
oh. Hochsaler Wuhr	33 977	3 060	3 010	3 500	3 790	4 050	4 190	4 360	4 570	4 910	5 060	5 260	
uh. Hochsaler Wuhr	33 988	3 060	3 010	3 500	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 260	
oh. Eitzgerbach	33 988	3 060	3 010	3 500	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 260	
uh. Eitzgerbach	34 012	3 060	3 020	3 500	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
oh. Sulzerbach	34 014	3 060	3 020	3 500	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
uh. Sulzerbach	34 026	3 070	3 020	3 510	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
oh. Andelsbach	34 031	3 070	3 020	3 510	3 790	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
uh. Andelsbach	34 043	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
oh. Hänner Wuhr	34 044	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
uh. Hänner Wuhr	34 049	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
oh. Seelbach	34 055	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
uh. Seelbach	34 059	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 190	4 360	4 580	4 910	5 060	5 270	
oh. Hauenstein. Murg	34 072	3 070	3 020	3 510	3 800	4 050	4 200	4 370	4 590	4 920	5 070	5 270	

Tabelle 4.4: Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Hauensteiner Murg und oberhalb der Einmündung der Kander

Pegel/Standort	A _{E,o} [km ²]	MHQ [m ³ /s]	Hochwasserabfluss-Kennwert [m ³ /s] für Jährlichkeit									
			2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000
uh. Hauenstein. Murg	34 123	3 070	3 020	3 510	3 800	4 060	4 200	4 370	4 590	4 920	5 070	5 280
oh. Sissle	34 135	3 070	3 030	3 520	3 800	4 060	4 200	4 370	4 590	4 920	5 070	5 280
uh. Sissle	34 264	3 080	3 040	3 530	3 820	4 070	4 220	4 390	4 610	4 940	5 090	5 290
oh. Wehra	34 321	3 090	3 040	3 530	3 820	4 080	4 220	4 390	4 610	4 940	5 090	5 300
uh. Wehra	34 436	3 100	3 050	3 540	3 830	4 090	4 230	4 400	4 620	4 960	5 110	5 310
oh. Bechtelesgraben	34 446	3 100	3 050	3 540	3 830	4 090	4 230	4 400	4 630	4 960	5 110	5 310
uh. Bechtelesgraben	34 461	3 100	3 050	3 550	3 840	4 090	4 240	4 410	4 630	4 960	5 110	5 320
oh. Möhlinbach	34 470	3 100	3 050	3 550	3 840	4 100	4 240	4 410	4 630	4 960	5 110	5 320
uh. Möhlinbach	34 509	3 100	3 060	3 550	3 840	4 100	4 240	4 410	4 630	4 960	5 110	5 320
Rheinfelden	34 526	3 110	3 060	3 550	3 840	4 100	4 240	4 410	4 630	4 970	5 120	5 320
oh. Dürrenbach	34 527	3 110	3 060	3 550	3 840	4 100	4 240	4 410	4 630	4 970	5 120	5 320
uh. Dürrenbach	34 543	3 110	3 060	3 550	3 840	4 100	4 240	4 420	4 640	4 970	5 120	5 330
oh. Warmbach	34 590	3 110	3 060	3 560	3 850	4 110	4 250	4 420	4 640	4 970	5 120	5 330
uh. Warmbach	34 619	3 110	3 060	3 560	3 850	4 110	4 250	4 420	4 640	4 980	5 130	5 330
oh. Ergolz	34 637	3 110	3 070	3 560	3 850	4 110	4 250	4 420	4 650	4 980	5 130	5 340
uh. Ergolz	34 908	3 140	3 090	3 590	3 880	4 140	4 280	4 450	4 670	5 010	5 160	5 370
oh. Birs	34 939	3 140	3 090	3 590	3 880	4 140	4 290	4 460	4 680	5 010	5 160	5 370
uh. Birs	35 897	3 210	3 160	3 680	3 980	4 240	4 380	4 560	4 780	5 120	5 270	5 470
Basel-Rheinhalle	35 897	3 210	3 160	3 680	3 980	4 240	4 380	4 560	4 780	5 120	5 270	5 480
oh. Wiese	35 984	3 220	3 170	3 680	3 980	4 250	4 390	4 570	4 790	5 130	5 280	5 480
uh. Wiese	36 439	3 260	3 210	3 730	4 030	4 290	4 440	4 610	4 840	5 170	5 320	5 530
oh. Kander	36 443	3 260	3 210	3 730	4 030	4 290	4 440	4 610	4 840	5 180	5 330	5 530

5 Literatur

IWG (2009): Langzeitverhalten der Bodensee-Wasserstände, Bericht HY 8/5 (Entwurf) im Auftrag der LUBW, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe 2009

IWK (2001): Softwarepaket: Analyse von hydrologischen/geophysikalischen Zeitreihen - Anwenderhandbuch, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe 2001.

IWK (2003): Softwarepaket: Hochwasseranalyse und -berechnung - Anwenderhandbuch, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK), Universität Karlsruhe 2003.

Kendall, M. G. (1970): Rank Correlation Methods. 4th Edition, London (Griffin).

LUBW (2007): Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2007

Mann, H.B. (1945): Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.

Pettit, A.M. (1978): A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of royal statistic society (Ser. C.) Statistics* Vol. 28, pp. 126-135

Scherrer S, (2004): Szenarien für die extremen Hochwasser des Rheins bei Basel, Bericht 03/38 im Auftrag des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG), September 2004

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Lage der einbezogenen Pegel am Hochrhein und seinen Nebenflüssen	2-3
Abb. 2.2:	Abflusshöchstwerte des Jahres (oberes Diagramm), des Sommerhalbjahres (mittleres Diagramm) und des Winterhalbjahres (unteres Diagramm) am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Beobachtungszeitspanne 1933 bis 2008 mit langjährigem Mittelwert, linearem Trend und Jahr des wahrscheinlichen Bruchpunkts	2-4
Abb. 2.3:	Trendanalyse für die Teilzeitreihen vor und nach dem wahrscheinlichen Bruchpunkt am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Höchstwerte des Jahres (oberes Diagramm) und die Höchstwerte des Sommerhalbjahres (unteres Diagramm)	2-8
Abb. 2.4:	Vergleich der originalen und trendbereinigten Zeitreihen am Pegel Rheinfelden/Rhein für die Höchstwerte des Jahres (oberes Diagramm) und die Höchstwerte des Sommerhalbjahres (unteres Diagramm)	2-9
Abb. 3.1:	Extremwertstatistik der Abflusshöchstwerte des Jahres- (schwarz) sowie des Winter- (blau) und Sommerhalbjahres (rot) für den Pegel Rheinfelden/Rhein	3-2
Abb. 3.2:	Extremwertstatistik der trendbereinigten Abflusshöchstwerte des Jahres- (schwarz) sowie des Winter- (blau) und Sommerhalbjahres (rot) für den Pegel Rheinfelden/Rhein	3-3
Abb. 3.3:	Wasserstands-Abfluss-Beziehung zwischen dem Wasserstandspegel Konstanz/Bodensee und dem Abflusspegel Konstanz/Rhein	3-5
Abb. 3.4:	Abfluss-Statistik am Pegel Andelfingen/Thur (aus: Scherrer 2004)	3-6
Abb. 3.5:	Regressionsbeziehung zwischen den jährlich höchsten Abflusstageswerten $HQ_d(J)$ und jährlich höchsten Abflussscheitelwerten $HQ(J)$ am Pegel Rekingen/Rhein	3-13
Abb. 3.6:	Extremwertstatistik der jährlich höchsten Abflusstageswerte $HQ_d(J)$ für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Thur (Summe: Neuhausen u. Thur), am Pegel Rekingen/Rhein sowie oberhalb (Summe: Rekingen und Wutach), unterhalb (Summe: Rekingen, Wutach und Aare) der Einmündung der Aare und am Pegel Rheinfeldem/Rhein	3-14
Abb. 3.7:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein oberhalb der Einmündung der Thur	3-20
Abb. 3.8:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der originalen Messdaten	3-21
Abb. 3.9:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrektur an der Thur	3-22
Abb. 3.10:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein zwischen den Einmündungen der Thur und der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der trendbereinigten Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrektur an der Thur	3-23

Abb. 3.11:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der originalen Messdaten	3-24
Abb. 3.12:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der trendbereinigten Messdaten	3-25
Abb. 3.13:	Längsschnitt-Regionalisierung der Hochwasserabfluss-Spenden MH_q und Hq_T für den Hochrhein unterhalb der Einmündung der Aare; abgeleitet aus den Statistiken der trendbereinigten Daten, die am Pegel Basel-Rheinhalle/Rhein aus den benachbarten Pegeln berechnet wurden	3-26
Abb. 3.14:	100-jährlicher Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein, abgeleitet an den einbezogenen Stützstellen aus den Statistiken für die Messwerte (HQ_{100}), mit Berücksichtigung der Thur-Korrektur und den berechneten Abflüssen am Pegel Basel-Rheinhalle ($HQ_{100,kor}$) und der Trendbereinigung ($HQ_{100,kor,tr-ber}$)	3-30
Abb. 3.15:	abgestimmter Hochwasserabfluss-Längsschnitt entlang des Hochrheins an den einbezogenen Stützstellen für ausgewählte Jährlichkeiten	3-31
Abb. 4.1:	Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein für T-jährliche Hochwasserabflüsse mit den Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20$, und 30 Jahre	4-2
Abb. 4.2:	Hochwasserabfluss-Längsschnitt für den Hochrhein für T-jährliche Hochwasserabflüsse mit den Jährlichkeiten $T = 50, 100, 300, 500$ und 1000 Jahre	4-3

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Einbezogene Pegel mit zugehöriger Einzugsgebietsgröße A_{E_0} sowie der Zeitspanne der vorliegenden Abfluss- und Wasserstandsbeobachtungen	2-3
Tabelle 2.2:	Ergebnisse der Analyse des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte für die einbezogenen Pegel mit Mittelwert MHQ, absolutem Trend pro Jahr, Trendsignifikanz α und Jahr des Bruchpunkts; die Wasserstände beziehen sich auf [cm] über Pegelnull am Pegel Konstanz	2-7
Tabelle 2.3:	Ergebnisse der Analyse des Langzeitverhaltens der trendbereinigten jährlichen und halbjährlichen Höchstwerte für die einbezogenen Pegel mit Mittelwert MHQ, absolutem Trend pro Jahr, Trendsignifikanz α und Jahr des Bruchpunkts; die Wasserstände beziehen sich auf [cm] über Pegelnull am Pegel Konstanz	2-10
Tabelle 3.1a:	Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert	3-8
Tabelle 3.1b:	Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert (Fortsetzung)	3-9
Tabelle 3.1c:	Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert (Fortsetzung)	3-10
Tabelle 3.1d:	Ergebnisse der Extremwertanalyse der einbezogenen Pegel und Standorte; maßgebende Werte sind „fett“ markiert (Fortsetzung)	3-11
Tabelle 3.2:	Ausgewählte Hochwasserabfluss-Kennwerte an den Stützstellen entlang des Hochrheins für die Längsschnitt-Regionalisierung	3-19
Tabelle 3.3a:	Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den originalen Messdaten	3-27
Tabelle 3.3b:	Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den originalen Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrekturen an der Thur	3-28
Tabelle 3.3c:	Hochwasserabflüsse an den Stützstellen entlang des Hochrheins abgeleitet aus den trendbereinigten Messdaten mit Berücksichtigung der Abflusskorrekturen an der Thur und den berechneten Abflussscheitelwerten am Pegel Basel-Rheinhalle	3-29
Tabelle 4.1:	Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen dem Pegel Konstanz/Rhein und oberhalb der Einmündung der Thur	4-4
Tabelle 4.2:	Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Thur und oberhalb der Einmündung der Aare	4-5
Tabelle 4.3:	Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Aare und oberhalb der Einmündung der Hauensteiner Murg	4-6
Tabelle 4.4:	Hochwasserabfluss-Kennwerte zwischen der Einmündung der Hauensteiner Murg und oberhalb der Einmündung der Kander	4-7

