



Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin

HYMOG

Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet

**Joachim Steinrücke
Barbara Fröhlings
Ruth Weißhaupt**

**Bericht Nr. I-24 der KHR
Report No I-24 of the CHR**



Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin

HYMOG

Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet

Autoren: Joachim Steinrücke
Barbara Fröhlings
Ruth Weißhaupt

Projektleitung: Jörg Uwe Belz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland)

Fachliche Mitwirkung: Gerhard Brahmer, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Deutschland)
Manfred Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Deutschland)
Yvonne Henrichs, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Deutschland)
Hanspeter Hodel, Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
Peter Hörter, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (Deutschland)
Jürgen Ilse, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland)
Peter Krahe, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland)
Rita Lammersen, Rijkswaterstaat Waterdienst (Niederlande)
Bernd Mehlig, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Deutschland)
Dennis Meißner, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland)
Andreas Meuser, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Deutschland)
Erik Ruijgh, Deltares (Niederlande)
Eric Sprokkereef, Rijkswaterstaat Waterdienst (Niederlande)
Alexander Strietzel-Friese, Wasser- und Schifffahrtsdirektion West (Deutschland)

Vorwort

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) behandelt hydrologische Problemstellungen im Rheingebiet. Neben vielen anderen Themen stehen Methoden der Datenerfassung, Datenbearbeitung, Vergleichbarkeit der Daten sowie der hydrologischen Vorhersage im Vordergrund. Modelle, die es ermöglichen, hydrologische und morphologische Prozesse zu beschreiben und ihre Veränderungen durch menschliche Eingriffe oder Klimaänderungen zu simulieren, sind wichtige Tätigkeiten der KHR.

Für ihre eigenen Arbeiten und für die Unterstützung der zuständigen Stellen der nachhaltigen Wasserwirtschaft werden qualitativ gute hydrologische Daten und hochaufgelöste Wasserstands- und Abflussdaten benötigt. Hierzu hat die KHR eine Untersuchung durchgeführt und konsistente hochaufgelöste Zeitreihen für den Rhein hergestellt. Diese Arbeiten sind im vorliegenden Bericht dargestellt. Dieser gliedert sich in einen Haupttext, dem in der Anlage Detailergebnisse auf CD-ROM beigefügt sind. Die im Projekt ebenfalls aufgestellten konsistenten Datenreihen für die einzelnen Pegel sind gegebenenfalls bei der KHR auf Anfrage verfügbar.

Ich bedanke mich im Namen der KHR bei allen Beteiligten für die exzellent durchgeführten Arbeiten. Besonderen Dank gebührt dem Projektleiter Jörg-Uwe Belz und dem Sekretariat der KHR unter der Leitung von Eric Sprokkereef.

Der Präsident der KHR
Prof. Dr. Manfred Spreafico

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	I
1	Zusammenfassung	1
	Summary	4
2	Veranlassung und Zielsetzung	7
3	Methodisches Vorgehen	9
4	Übernahme und Aufbereitung der Daten	21
4.1	Metadaten	21
4.2	Abfluss- und Wasserstandszeitreihen	22
4.3	Abflusstafeln und Abflussmessungen	23
5	Auswertung der aufbereiteten Originaldaten	25
5.1	Analyse und Aufbereitung der gelieferten Zeitreihen	25
5.1.1	Analyse der gelieferten Zeitreihen	25
5.1.2	Aufbereitung der gelieferten Zeitreihen	31
5.1.3	Überprüfung der Wasserstand-Abfluss-Berechnung	33
5.2	Analyse der Abflussmessungen und Abflusstafeln	34
5.2.1	Analyse Abflusstafeln	34
5.2.1.1	Vorgehen bei Pegeln mit einfachen Abflusstafeln	35
5.2.1.2	Vorgehen bei Pegeln mit einfachen Abflusstafeln und Stauwerten	36
5.2.1.3	Vorgehen bei Pegeln mit Abflusstafeln und Eta-Werten	37
5.2.1.4	Vorgehen bei Pegeln mit direkter Abflussmessung	39
5.2.1.5	Ergebnisse der Analyse der einzelnen Pegel	39
5.2.1.5.1	Pegel mit einfachen Abflusstafeln	39
5.2.1.5.2	Pegel mit Abflusstafeln und Korrekturen (Stau/Eta-Werte)	41
5.2.1.5.3	Pegel mit Abflussmessenanlagen	42
5.2.1.5.4	Übersicht zur Beurteilung aller Hauptpegel	42
5.2.2	Analyse Abflussmessungen	45
6	Überblickbilanz	47
7	Bilanzanalysen und Modifikationen der Zeitreihen	53
7.1	Methodisches Vorgehen	53
7.2	Gesamtbilanz	56
7.2.1	Ermittlung von Faktoren und Fließzeiten	56
7.2.2	Bilanz und Analyse	59
7.2.3	Bilanz und Analyse mit verbesserten Faktoren	63
7.3	Detailbilanz	68

7.3.1	Bilanzraum Rekingen-Neuhausen	71
7.3.2	Bilanzraum Rheinfelden – Rekingen	72
7.3.3	Bilanzraum Basel-Rheinhalle – Rheinfelden	72
7.3.4	Bilanzraum Breisach – Basel-Rheinhalle	72
7.3.5	Bilanzraum Kehl-Kronenhof – Basel-Rheinhalle	72
7.3.6	Bilanzraum Maxau – Basel-Rheinhalle	73
7.3.7	Bilanzraum Speyer – Maxau	73
7.3.8	Bilanzraum Worms – Speyer	73
7.3.9	Bilanzraum Mainz – Worms	73
7.3.10	Bilanzraum Kaub – Mainz	73
7.3.11	Bilanzraum Andernach – Kaub	73
7.3.12	Bilanzraum Bonn – Andernach	74
7.3.13	Bilanzraum Köln – Bonn	74
7.3.14	Bilanzraum Düsseldorf – Köln	74
7.3.15	Bilanzraum Ruhrort – Düsseldorf	74
7.3.16	Bilanzraum Wesel – Ruhrort	75
7.3.17	Bilanzraum Rees – Wesel	75
7.3.18	Bilanzraum Emmerich – Rees	75
7.3.19	Bilanzraum Lobith – Emmerich	76
7.3.20	Zusammenfassung Bilanzanalyse	76
7.4	Gesamtbilanz mit verbesserten Zeitreihen	76
7.5	Spektrenbilanz	79
8	Abschätzung der Sensitivität der Einzelkomponenten auf die Bilanz	83
8.1	Genauigkeit des Wasserstandes	83
8.2	Genauigkeiten von Abflussmessungen	84
8.3	Ermittlung des Abflusses des nicht durch Pegel abgedecktes Zwischengebietes	86
8.4	Verdunstung der Gewässeroberfläche	87
8.5	Direkter Niederschlag auf die Gewässeroberfläche	87
8.6	Austausch mit dem Grundwasser	88
8.7	Schifffahrtskanäle	89
8.8	Kraftwerke	91
8.9	Trinkwasserentnahmen/Kläranlagen	91
8.10	Hysterese	92
8.10.1	Berücksichtigung der Hysterese bei Abflusszeitreihen	93
8.10.2	Berücksichtigung der Hysterese bei der Erstellung von Abflusstafeln	94
9	Fazit und Empfehlungen	99
9.1	Zufällige Fehler	99

9.2	Systematische Fehler	99
9.3	Datenaufbereitung und -pflege	100
	Allgemeine Informationen über die KHR	103
	KHR-Veröffentlichungen	104
	Kolophon	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Schematische Darstellung der Zu- und Abflüsse eines Bilanzraumes (blau = gemessene Abflüsse, rot = unbeobachtet Abflüsse)	9
Abbildung 3.2:	Übersichtskarte der Pegel und Gewässer	18
Abbildung 5.1:	Analyse Zeitreihen: regelmäßige Schwankungen (Breisach)	29
Abbildung 5.2:	Analyse Zeitreihen: konstanter Wasserstand (Worms)	30
Abbildung 5.3:	Analyse Zeitreihen: Ausfälle (Raunheim)	30
Abbildung 5.4:	Analyse Zeitreihen: Q interpoliert (Frankfurt-Osthafen)	31
Abbildung 5.5:	Durchflussermittlung nach dem Eta-Verfahren	38
Abbildung 5.6:	Abweichungen der gemessenen Wasserstände von der Wasserstandszeitreihe am Pegel Wesel	46
Abbildung 6.1:	Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Länge des Rheins für den gesamten Untersuchungszeitraum	48
Abbildung 6.2:	Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Länge des Rheins für den gesamten Untersuchungszeitraum und 6-Jahreszeiträume	49
Abbildung 6.3:	Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Einzugsgebietsgröße für den gesamten Untersuchungszeitraum	50
Abbildung 6.4:	Mittlere Abflussspende an den Rheinpegeln aufgetragen über die Einzugsgebietsgröße für den gesamten Untersuchungszeitraum	51
Abbildung 6.5:	Mittlere Abflussspende an den Rheinpegeln aufgetragen über Rhein-Kilometer für den gesamten Untersuchungszeitraum	51
Abbildung 7.1:	Schema zur Bilanzermittlung, Eingangsgrößen	54
Abbildung 7.2:	Schema zur Bilanzermittlung, Eingangsgrößen und abgeleitete Größen	54
Abbildung 7.3:	Mittlere Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus AEO	60
Abbildung 7.4:	Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus AEO	61

Abbildung 7.5:	Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus A_{EO} (aufgetragen über A_{EO} des Rheins)	62
Abbildung 7.6:	Abflusshöhen aus HAD im Bereich BadRothenfels/Murg	64
Abbildung 7.7:	Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES (aufgetragen über A_{EO} des Rheins)	67
Abbildung 7.8:	Speyer - Maxau: Differenzenzeitreihe und Abflusszeitreihe Speyer	69
Abbildung 7.9:	Exemplarische Darstellung der summierten Abflussdifferenzenzeitreihe (Speyer – Maxau) und Abflusszeitreihe Speyer	70
Abbildung 7.10:	Summenlinie der Differenzenzeitreihe (Köln – Bonn, Bonn – Andernach)	71
Abbildung 7.11:	Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten(blau), geänderten Faktoren(rot) und angepassten Abflusszeitreihen(grün). (aufgetragen über AEO des Rheins)	77
Abbildung 7.12:	Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen (relativ zu MQ) für die Bilanz mit Originaldaten(blau), geänderten Faktoren(rot) und angepassten Abflusszeitreihen(grün). (aufgetragen über AEO des Rheins)	78
Abbildung 8.1:	Abweichungen der gemessenen Wasserstände von der Wasserstandszeitreihe (am Beispiel Wesel)	85
Abbildung 8.2:	Schematische Darstellung zur Wechselwirkung von Gewässer und Grundwasser (Quelle: http://wasserforscher.de , 2010, Bayrisches Landesamt für Umwelt)	89
Abbildung 8.3:	Schematische Darstellung Westdeutsche Kanäle (Quelle: Kurzüberblick über die Wasserwirtschaft der westdeutschen Kanäle, Wasserverband Westdeutsche Kanäle)	90
Abbildung 8.4:	Schematische Darstellung der Wasserstand–Abfluss-Beziehung beim Durchgang einer Hochwasserwelle und im Falle stationärer Fließverhältnisse	92
Abbildung 8.5:	Abfluss am Pegel Rees für eine Welle mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese bei der W-Q-Beziehung	94
Abbildung 8.6:	Erzeugung einer „stationären“ Abflusstafel unter Berücksichtigung der Hysterese bei der Messung (Prinzip)	95
Abbildung 8.7:	Wasserstandsganglinie und Zeitpunkte von Abflussmessungen am Pegel Rees (Ausschnitt)	96
Abbildung 8.8:	Verschiebung der Messungen (grün) und Darstellung der W/Q-Beziehung vor und nach der Korrektur (Pegel Rees)	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Betrachtete Rheinpegel (Grenzen der Bilanzbereiche)	13
Tabelle 3.2:	Liste der untersuchten Pegel mit Kategorie (Haupt-/Nebenpegel)	16
Tabelle 3.3:	Erläuterung der Abkürzungen der Pegelbetreiber	17
Tabelle 5.1:	Gelieferte Zeitreihen der untersuchten Pegel	28
Tabelle 5.2:	Gewählte Gütekriterien für Pegel mit einfachen Abflusstafeln	40
Tabelle 5.3:	Beurteilung der Pegel mit einfachen Abflusstafeln	41
Tabelle 5.4:	Beurteilung der Pegel mit Abflusstafeln und Stau-/Eta-Werten	42
Tabelle 5.5:	Beurteilung der Pegel mit direkter Abflussmessung	42
Tabelle 5.6:	Gewählte Klassen für die Gesamtbeurteilung der Pegel	43
Tabelle 5.7:	Gesamtbeurteilung der Pegel	45
Tabelle 6.1:	Mittlere Abflüsse an den Rheinpegeln	52
Tabelle 7.1:	Hydrologische Faktoren und Fließzeiten zur Ermittlung des Zwischengebietsabfluss (abgeleitet aus Einzugsgebietsgröße)	59
Tabelle 7.2:	Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO)	62
Tabelle 7.3:	Hydrologische Faktoren zur Ermittlung des Zwischengebietsabflusses (abgeleitet aus Einzugsgebietsgröße und Abflusshöhe)	66
Tabelle 7.4:	Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO , Verbesserte hydrologische Faktoren aus AEO und HAD(ES))	68
Tabelle 7.5:	Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO , Verbesserte hydrologische Faktoren aus AEO und HAD(ES), angepasste Abflüsse)	79
Tabelle 7.6:	Überblick der Ergebnisse der Bilanzanalyse für einzelne Abflussspektren (Details siehe Anlage 2 „Bilanzanalysen und Anpassungen“)	80
Tabelle 8.1:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der W-Q-Transformation an Rheinpegeln bei Änderung der Wasserstände um 1 cm	84

Anlagenverzeichnis (CD-ROM)

Anlage 1:	Analyse der Abflusstafeln und Einschätzung der Pegelgüte
Anlage 2:	Bilanzanalysen und Anpassungen

1 Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung war die Erzeugung einer qualitativ guten, hochauflösenden Datengrundlage im Einzugsgebiet des Rheins für hydrologische Untersuchungen. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich dabei vom Bodensee bis zur deutsch-niederländischen Grenze. Als Datengrundlage dienten Wasserstands- und Abflusszeitreihen an Pegeln am Rhein sowie an Nebenflüssen mit einer Auflösung von $\Delta T=1h$ und weitere Informationen zu den Pegeln (Abflusstafeln, -messungen, evtl. weitere Zeitreihen z.B. eta-Werte).

In gemeinsamer Abstimmung mit der Steuerungsgruppe wurden die zu berücksichtigenden Pegel festgelegt. Die zugrunde liegenden Daten wurden von den einzelnen Betreibern der Pegel zur Verfügung gestellt und einer Plausibilisierung und Homogenitätsprüfung unterzogen. Der Informationsfluss zu weiteren Metadaten verlief in sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad und enthielt nicht immer die erforderlichen Informationen. Teilweise erfolgten mehrere Datenlieferungen mit differierendem Inhalt. Es ist sehr wichtig, dass die einzelnen Betreiber sensibilisiert werden, wie wichtig eine konsistente und vollständige Datenhaltung ist.

In einem ersten Schritt wurden die mittleren Werte der Rheinpegel einer vergleichenden Überblickbilanz unterzogen. Dabei stellten sich bereits zwei Bereiche heraus, in denen die Bilanzreinheit mit den gelieferten Abflusszeitreihen offensichtlich nicht gegeben ist. Dies waren der Bereich Breisach/Kehl-Kronenhof und der Niederrhein. Die restlichen Rheinabschnitte erscheinen in den Überblickbilanzen plausibel.

Der Überprüfung und insbesondere der etwaigen Verbesserung und Korrektur der Abflusszeitreihen liegt das Prinzip zugrunde, nicht die Abflusszeitreihen selbst, sondern die grundlegenden Daten im Bedarfsfall anzupassen. Nur wenn die Grundlagendaten belastbar und praktisch fehlerfrei sind, kann eine ausführliche Bilanz bei gleichzeitig homogenen Daten erreicht werden. Etwaige Änderungen werden somit ggf. an den Wasserstandszeitreihen selbst, den Abflussmessungen und den Abflusstafeln vorgenommen. Dieser Ansatz erfordert die intensive Prüfung der Grundlagendaten.

Die Prüfung der Wasserstandszeitreihen beschränkte sich auf Plausibilität und Homogenitätsprüfungen und etwaige Anpassungen. Auch die einzelnen Abflussmessungen konnten hinsichtlich ihrer Plausibilität und Homogenität überprüft werden. Eine echte Kontrolle und Nachrechnung der einzelnen Messungen erfolgte nicht. Der wesentliche Fokus lag somit darauf, die Abflusstafeln zu überprüfen. An allen Hauptpegeln erfolgte ein detaillierter Abgleich zwischen den Abflussmessungen, den Abflusstafeln und den jeweiligen Gültigkeiten. Hauptpegel, bei denen die Abflüsse nicht über einfache Abflusstafeln aus Wasserständen ermittelt werden, wurden ebenfalls durch Vergleiche mit den Messungen (teilweise mittels unterschiedlichen Verfahren) untersucht. Hier stellten sich ebenfalls einige Pegel heraus, bei denen die Abflüsse noch verbessert werden können. Diese Pegel wurden dann, falls sich hier Bilanzprobleme ergaben, entsprechend bearbeitet. Bei einzelnen Pegeln war eine An-

passung jedoch nicht möglich, da die erforderlichen Basisdaten nicht zur Verfügung standen (fehlende Messungen, Abflüsse aus Kraftwerksdaten abgeleitet, ...).

Nach der Analyse der Grundlagendaten, insbesondere der Abflusstafeln, wurde für den gesamten untersuchten Rheinabschnitt eine Gesamtbilanz erstellt. Dabei wurde für jeden Abschnitt zwischen zwei Rheinpegeln für den gesamten Untersuchungszeitraum die Differenz der am unteren Pegel zu- und abfließenden Wassermengen gebildet. Da nicht das gesamte Zwischengebiet durch Pegel abgedeckt ist, wurde die Abflussmenge aus den vorhandenen Pegeln über hydrologische Faktoren ermittelt. In einem ersten Ansatz erfolgte die Festlegung der hydrologischen Faktoren entsprechend den Einzugsgebietsgrößen. Die hierauf basierende Gesamtbilanz zeigt, dass aus den Zwischengebieten in der Regel zu viel Wasser in das System fließt. In einem zweiten Schritt wurden optimierte hydrologische Faktoren ermittelt. Hierbei wurde neben der Einzugsgebietsgröße auch die räumliche Variabilität der Abflussspenden in die Ermittlung der hydrologischen Faktoren einbezogen. Die hierauf basierende Gesamtbilanz zeigte signifikante Verbesserungen, über weite Teile des Rheins wird eine weitestgehend ausgeglichene Bilanz erreicht. Lediglich im Bereich Breisach, Kehl-Kronenhof und am Niederrhein weist die Gesamtbilanz noch signifikante „Widersprüche“ auf.

Bei der Gesamtbilanz wurden mittlere Abflüsse bzw. Gesamtabflussmengen für den kompletten Untersuchungszeitraum betrachtet. Zeitlich begrenzte Abweichungen, die sich evtl. sogar gegenseitig ausgleichen, fallen bei dieser Betrachtung nicht auf. Im Zuge der anschließend durchgeführten Detailbilanz wurde die zeitliche Varianz der Bilanzen analysiert und Verbesserungen vorgenommen. Hierzu wurde zunächst der zeitliche Verlauf der Differenzzeitreihe und der summierten Differenzen untersucht, einzelne Bilanzabschnitte zeigten signifikante Probleme. Sofern die Grundlagendaten eine datenbasierte Anpassung der Abflusszeitreihen ermöglichten, wurden diese z.B. mit neu erstellten Abflusstafeln neu berechnet. Anschließend wurde in einer erneuten Detailbilanz die Auswirkung überprüft und ggf. weitere Anpassungen im Rahmen eines iterativen Vorgehens vorgenommen. Teilweise konnten die Abflüsse jedoch nicht angepasst werden, da keine entsprechenden Grundlagendaten vorliegen (z.B. fehlende Angaben der Kraftwerksbetreiber, zu wenig Abflussmessungen,...). Vor allem für die Pegel Breisach und Kehl-Kronenhof konnten keine „guten“ Abflusszeitreihen erstellt werden. Für alle anderen Bilanzbereiche ergibt sich nach Durchführung der Anpassungen eine weitestgehend ausgeglichene Bilanz, bei der die Abweichungen teilweise deutlich unter 1% liegen.

Um Aussagen treffen zu können, wie gut die Bilanzreinheit der einzelnen Bilanzabschnitte im hohen, mittleren bzw. niedrigen Abflussbereich ist, wurde für die einzelnen Bilanzabschnitte eine Spektrenbilanz ermittelt. Dabei wird die Analyse der Bilanzreinheit bezogen auf das jeweilige Abflussniveau durchgeführt.

Im Rahmen einer abschließenden, allgemeinen Abschätzung der Sensitivität der Einzelkomponenten auf die Bilanz wurde gezeigt, dass die in die Ermittlung der Abflüsse und somit die Bilanzen eingehenden Einzelkomponenten zum Teil erhebliche Unsicherheiten aufweisen. Zufällige Unsicherheiten, wie sie z.B. bei Abflussmessungen auftreten, können nur durch eine große Anzahl von Messungen ausgeglichen werden. Systematische „Fehler“, welche in

der Regel vernachlässigt werden, sind aufgrund von Hysterese, Verdunstung und Versickerung zu erwarten. Eine Erweiterung der Methode zur Abflussberechnung unter Berücksichtigung der Hystereseinflüsse wurde aufgezeigt und exemplarisch durchgeführt. Die systematische Anwendung dieser Methode, lässt eine Verbesserung der Abflussbilanzen erwarten. Neben den „normalen“ Auswertungen, bei welchen lediglich die Daten des jeweils betrachteten Pegels verwendet werden, erscheint auch die Entwicklung einer räumlich erweiterten Abflussberechnung unter Einbezug benachbarter Pegel sinnvoll. Hierzu bedarf es jedoch weiterer zielgerichteter Untersuchungen, einer Methodenentwicklung und deren Überprüfung / Anwendung.

Mit Abschluss der Arbeiten liegen, mit Ausnahme von Breisach und Kehl-Kronenhof, für das untersuchte Rheingebiet hochaufgelöste Abflusszeitreihen vor. Unter Ansatz der hier erarbeiteten hydrologischen Faktoren führen diese zu weitestgehend ausgeglichenen Bilanzen. Im Bereich des Niederrheins und zu dem Pegel Lobith in den Niederlanden sind weitere Verbesserungen anzustreben. Ungeachtet dessen bleibt festzuhalten, dass infolge der sehr komplexen Zusammenhänge vollkommene widerspruchsfreie Daten von Wasserstand über Abfluss bis zur Bilanz nicht erreicht werden kann, es verbleiben restliche Unschärfen.

1 Summary

The intention of this study was to produce a good quality, high-resolution data basis for the catchment area of the River Rhine in order to perform hydrological investigations. The area of investigation ranges from Lake Constance to the Dutch-German border. The data basis for the investigation was the time series of the water level and the runoff time series at gauges of the river Rhine and its tributary rivers with a resolution of $\Delta T=1h$. Further information on the gauges (such as discharge tables, discharge measurement and possibly further time series e.g. eta values) were also taken into consideration.

The gauges to be considered were defined in common agreement with the steering group. The underlying data were provided by the individual operators of the gauges and were reviewed for plausibility and homogeneity. The degree of detail for further metadata varied and it was not always possible to gather all the required information. Sometimes, several data supplies with different contents were delivered. It is very important that the individual operators are aware of the importance of consistent and complete data management.

The first step was to evaluate and compare the average values of the Rhine gauges. In this process, we were already able to identify two areas in which the gauges are not in balance with the delivered runoff time series. Those areas were the area Breisach/Kehl-Kronenhof and the Lower Rhine. The overview of all other sections of the Rhine seemed plausible. The underlying principle of the examination and especially the possible amelioration and adjustment of the runoff time series is, if required, not to adapt the runoff time series themselves but the underlying data. It is only possible to achieve a detailed balance for homogenous datasets when the underlying data are resilient and practically fault-proof. Therefore, possible modifications have to be performed on the runoff time series themselves, as well as on the discharge measurements and the discharge tables. Thus, an exact examination of the underlying data is required.

The runoff time series were checked for plausibility and homogeneity and were adapted, if required. It was also possible to examine the individual discharge measurements for plausibility and for homogeneity. There was, however, no real controlling or calculation review of the individual measurements. The main focus was on the examination of the discharge tables. A detailed comparison between the discharge measurements, the discharge tables and the respective validities was performed on all main gauges. Furthermore, discharges of main gauges that could not be determined using simple discharge tables from water levels were examined by comparison with the measurements (partly using different techniques). During this process, some gauges of which the discharges could be improved were determined. Those gauges were edited accordingly when balance problems were detected. An adaptation however, was not possible for some gauges, as the required basis data were not available (missing measurements, discharges that derived from power plant data...)

After analysing the underlying data, especially after analysing the discharge tables, a total balance was created for the examined sector of the Rhine. In this process, the difference of

the inflowing and the flowing-off rate of water was generated for each sector between the gauges of the Rhine for the entire examination period. As not the entire intermediate sector is covered by gauges, the discharge rate was determined by hydrological factors. In an initial approach, those hydrological factors were determined according to the size of the catchment area. Based on this, the total balance shows that, as a general rule, too much water flows out of the intermediate areas and into the system. The second step was the determination of optimised hydrological factors. Thereby, not only the size of the catchment area, but also the spatial variability was taken into consideration. Based on that, the total balance shows significant improvements; large areas of the river Rhine showed a remarkable balance. Only the areas Breisach, Kehl-Kronenhof and the Lower Rhine still show significant "inconsistencies" in their balance.

For the total balance, the average discharges resp. the total discharge rate was observed for the entire examination period. Temporary deviations that may even offset each other are not apparent in this examination. As part of the subsequent detailed balance, the temporal variance of the balances was analysed and possible improvements were performed. For this purpose, the time course of the difference time series and the summarised differences were examined; individual balance sections show significant problems. Provided the underlying data allowed a data-based adaptation of the discharge time series, these were recalculated with newly created discharge tables, for example. Next, the effect was examined in a renewed detailed balance and, if required, further adaptations were performed using iterative procedures. It was partly not possible to adapt the discharges as no appropriate underlying data are present (e.g. missing information from the power plant operators, insufficient discharge measurements...). Especially for the gauges Breisach and Kehl-Kronenhof, it was impossible to create appropriate discharge time series. However, after implementing the adaptation, all other balance areas reveal the best possible balance, showing deviations substantially lower than 1%.

In order to make a conclusion about the purity of the balance of the individual balance sectors in the high run-off area, the average and the low run-off area, a spectrum balance was determined for the individual balance sectors. During this process, the analysis of the balance purity is performed based on the respective discharge level.

As part of a closing general assessment of the sensitivity of the individual components to the balance, it was found that some of the individual components, that were relevant for the assessment of the discharges and, therefore, for the balances, revealed significant uncertainties. Random uncertainties that occur e.g. during discharge measurements, can only be compensated through numerous measurements. Systematic "errors" that are usually not taken into consideration, can be expected due to hysteresis, evaporation and leaching.

An enhancement of the procedure for the discharge measurement considering the effects of hysteresis was shown and conducted exemplarily. The systematic application of this procedure indicates that an improvement of the discharge balances can be expected. Besides the "common" evaluations, that only use the data of the gauge observed individually, it seems reasonable to develop a spatially enhanced discharge measurement also considering the

gauges in the neighbourhood. Therefore however, further target-oriented examinations, method development and their examination/application are required.

Following the examinations, discharge time series of high resolution are available for the examined Rhine Basin, except for the areas of Breisach and Kehl-Kronenhof. By taking into consideration the developed hydrological factors herein, they lead to the best possible balances. Further improvements should be aspired to in the area Lower Rhine and the gauge Lobith in the Netherlands. However, it needs to be noted that following the very complex interrelations, entirely contradiction-free data of water levels, discharges and balances will never be achieved and that small blurs will remain.

2 Veranlassung und Zielsetzung

Die Erfassung von Grundlagendaten ist in der Wasserwirtschaft von ausschlaggebender Bedeutung. Hierauf basierend werden häufig statistische Informationen abgeleitet, welche insbesondere für den Hochwasserschutz und Niedrigwasserbetrachtungen von großer Bedeutung sind, aber auch für das operative Geschäft wie z.B. das Monitoring oder auch Vorhersagen sind die Daten von Belang. Neben der Dichte des Messnetzes und der zeitlichen Auflösung der Messwerterfassung ist insbesondere auch die Güte der erhobenen Daten und der daraus abgeleiteten Größen wie z.B. der Abfluss extrem wichtig.

Im Einzugsgebiet des Rheins sind aufgrund der Schifffahrt, aber auch aus Gründen des Hochwassermanagements und der Hochwasserwarnung unterschiedliche Modelle im Einsatz, welche sowohl historische Messwerte als auch aktuelle Messwerte verwenden. Insbesondere für diese Modelle und die hierauf basierenden Untersuchungen ist eine qualitativ gute und hoch aufgelöste Datengrundlage notwendig. Für die Modelle und die verschiedenen Untersuchungen werden Wasserstands- und Abflusszeitreihen an Pegeln im Rhein sowie an Nebenflüssen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde benötigt.

Im Rahmen dieser Untersuchung sind für das Rheineinzugsgebiet vom Bodensee bis zur niederländischen Grenzen für den Zeitraum vom 01.11.1989 bis zum 01.11.2007 konsistente hochauflösende Zeitreihen zu erzeugen.

Da im Rhein und den Nebengewässern an einer Vielzahl von Stellen der Wasserstand / Abfluss erfasst wird, ist eine Überprüfung der Güte durch einen Vergleich der Zeitreihen untereinander möglich. So müsste theoretisch die Summe aller Zuflüsse in einen Rheinabschnitt dem Abfluss aus diesem Abschnitt insbesondere unter Berücksichtigung von Retention und Translation im Rhein entsprechen. Das Prinzip der Bilanzierung bietet somit die Möglichkeit, die Daten zu prüfen und ggf. zu korrigieren.

Mit der Untersuchung und Herstellung konsistenter hochaufgelöster Zeitreihen am Rhein wurde die ProAqua Ingenieurgesellschaft durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde am 07.04.2009 beauftragt. Im Rahmen der Untersuchung sind alle Pegel im Rhein beginnend in der Schweiz mit dem Pegel Neuhausen (km 45,8) bis zum niederländischen Pegel Lobith (km 862,2) zu berücksichtigen. Neben den Rheinpegeln sind auch Messwerte der jeweiligen Zwischengebiete zu berücksichtigen. Hierzu werden insbesondere die Daten der größeren Nebengewässer verwendet, aber auch Messwerte kleinerer Nebengewässer werden eingebunden. Als Untersuchungszeitraum wird der 01.01.1989 bis zum 01.11.2007 festgelegt.

Die Durchführung der Arbeiten wird durch eine Steuerungsgruppe begleitet, in welcher Mitglieder aus der Schweiz, den Niederlanden und Deutschland vertreten durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion West und Südwest, das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, das Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW sowie die Bundesanstalt für Gewäs-

serkunde. Im Rahmen der Bearbeitung werden Zwischenergebnisse der Steuerungsgruppe vorgestellt und das weitere Vorgehen abgestimmt.

In den Jahren 2006/2007 wurde von WL|Delft Hydraulics im Auftrag der BfG eine Untersuchung zur Bilanzreinheit der Abflusszeitreihen (01.11.1989 - 31.12.2004) von Maxau bis Lobith durchgeführt. Die Analyse der Wasserbilanz der einzelnen Abschnitte zwischen den Rheinpegeln zeigte, dass in einigen Abschnitten eine positive und in einigen Abschnitten eine negative Bilanz vorliegt. Teilweise glichen sich die Fehlbilanzen bei einer abschnittsübergreifenden Betrachtung aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die erforderliche gewünschte Konsistenz und Bilanzreinheit nicht gegeben ist. Die in der Vorstudie gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen sind in die hier vorliegende Untersuchung einzubeziehen.

Die durchgeführte Untersuchung wird hinsichtlich ihres Vorgehens, der Datenbasis und der Ergebnisse in dem hier vorliegenden Bericht dokumentiert. Aufgrund des Umfangs und zum Ziel einer verbesserten Lesbarkeit sind neben diesem Hauptbericht detaillierte Angaben zu Analysen und Ergebnissen in folgenden Anhängen aufgeführt:

- Anlage 1: Analyse der Abflusstafeln und Einschätzung der Pegelgüte
- Anlage 2: Bilanzanalysen und Anpassungen

Beide Anlagen liegen dem Bericht auf CD bei.

3 Methodisches Vorgehen

Ziel der Untersuchung ist die Herstellung bilanzreiner hochaufgelöster Zeitreihen. Die Zeitreihen sind bilanzrein, wenn die Summe aller Zuflüsse in einem gegebenen Abschnitt dem gemessenen Abfluss entspricht. Die Bilanzreinheit ist im Umkehrschluss nicht gegeben, wenn die Summe aller Zuflüsse ungleich dem Abfluss in jedem Zeitpunkt ist.

Die Erstellung einer Bilanz setzt somit zunächst die Definition eines Raumes voraus, welcher zweckmäßigerweise durch Pegel am oberen und unteren Ende definiert ist. Abfluss aus dem Bilanzraum ist durch den Unterwasserpegel definiert, die Zuflüsse werden durch den Oberwasserpegel, zeitliche gemessene Zuflüsse sowie sonstige nicht gemessene Zuflüsse einschließlich eines etwaigen Grundwasseraustauschs bestimmt. In Abbildung 3.1 ist dies schematisch dargestellt.

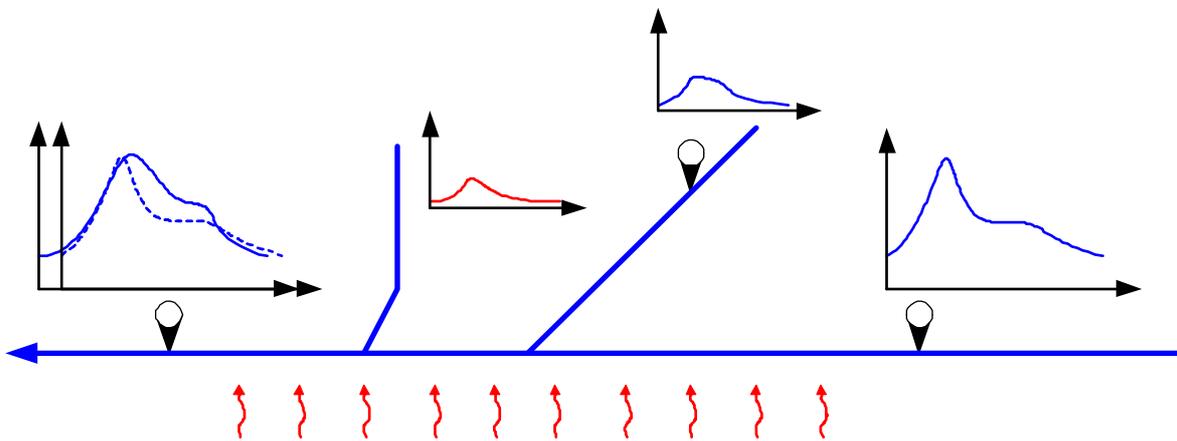


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Zu- und Abflüsse eines Bilanzraumes (blau = gemessene Abflüsse, rot = unbeobachtete Abflüsse)

Neben den reinen Zufluss- bzw. Abflusssummen sind vor dem Hintergrund der hochaufgelösten Zeitreihen auch der zeitliche Abfluss sowie die Wellentransformation von Bedeutung. Da in der Wasserwirtschaft Abflüsse häufig nicht direkt, sondern indirekt über Wasserstandsmessungen mit einer anschließenden Transformation über Abflusstafeln in Abflüsse umgerechnet werden, sind folgende Bilanzkomponenten von Bedeutung:

- Messwerte
- W/Q-Transformationen
- Zwischengebietszufluss
- Gerinneretention
- Gerinnetranslation

Durch die für einen Bilanzabschnitt maßgebenden Komponenten ist das System mathematisch überbestimmt, aus diesem Grunde sind Kontrollen möglich, aber auch Widersprüche erkennbar. Sofern in einem Bilanzabschnitt die Summe der Zuflüsse nicht dem Abfluss entspricht, müssen mindestens eine oder auch mehrere Komponenten relevante Fehler / Unschärfen enthalten. Streng genommen enthalten alle Komponenten Unschärfen, im Rahmen des Prozesses wird jedoch angestrebt, die Komponenten mit den größten Unschärfen als erstes zu identifizieren und die Unschärfen zu reduzieren. Eine absolute Bilanzreinheit wird aufgrund des komplexen Systems und der Vielzahl von Einflüssen nicht erreicht werden können.

Zur Durchführung der Arbeiten wurde ein Ansatz gewählt, welcher dem Prinzip vom Einzeldatum zur Gesamtbilanz entspricht. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass nur wenn die Grundlagendaten jeder einzelnen Komponente, welche an einer Bilanz beteiligt ist, fehlerfrei ist, die Gesamtbilanz gut sein kann.

Zu den eigentlichen Grundlagendaten gehören Wasserstandsmessungen und Abflussmessungen. Basierend auf den Abflussmessungen werden Abflusstafeln erstellt, sie sind somit keine echten Grundlagendaten, sondern abhängige Daten. Diese drei Informationen sind die Basis – sofern man direkt Abflussmessungen ausklammert – für alle weiteren Schritte der Abflussberechnung und Bilanzierung. Informationen zu Teileinzugsgebieten, zur Topologie etc. sind selbstverständlich auch echte Grundlagen, diese werden jedoch nicht modifiziert.

Der Wellenablauf, d.h. die zeitliche Verschiebung und Retention der Hochwasserwellen entlang der Fließwege, ist der letzte Baustein einer Bilanzierung, welcher jedoch nur bei sehr kurzen Bilanzzeiträumen und deutlichen Abflussschwankungen von Bedeutung ist.

Beim Vorgehen liegt der Fokus zunächst auf den Einzelkomponenten, d.h. der Auswertung und Analyse von Wasserstandsmessungen, den Abflussmessungen und den Abflusstafeln.

Nach der Prüfung und etwaigen Anpassung der Einzelkomponenten erfolgt ein abgestuftes Vorgehen, um etwaige Problembereiche eingrenzen, Bilanzfehler bestimmen und Korrekturen vornehmen zu können. Im ersten Schritt wird eine Überblickbilanz, bei welcher lediglich die Rheinpegel verwendet werden, erstellt. Ziel ist die frühzeitige Identifizierung möglicher Problembereiche.

In den weiteren Bilanzanalysen werden alle Abflusszeitreihen verwendet und eine Bilanzierung für jeden einzelnen Rheinabschnitt durchgeführt. Hierzu wird in jedem Abschnitt für jeden Zeitschritt der Bilanzfehler (Summe aller Zuflüsse abzüglich der Summe aller Abflüsse) bestimmt und als Differenzenzeitreihe abgelegt. Diese Differenzenzeitreihe wird in unterschiedlicher zeitlicher Diskretisierung verwendet.

Im Zuge der Gesamtbilanzierung liegt der Fokus auf den mittleren Werten. Ziel der Gesamtbilanzierung ist Gewinnung vertiefter Erkenntnisse insbesondere auch bzgl. des Einflusses der Nebengewässer und dient gleichzeitig der Verbesserung der hydrologischen Faktoren zur Einbindung der nicht durch Pegel beobachteten Teilgebiete.

Der zeitliche Verlauf von Abflusszeitreihen, Bilanzfehlern etc. wird in der sogenannten Detailbilanz untersucht. Neben der Analyse der zeitlichen Entwicklung erfolgt hier eine vertiefte Analyse auch unter Einbezug der jeweiligen benachbarten Bilanzabschnitte. Hierauf aufbauend werden Hypothesen bzgl. etwaiger Ursachen entwickelt.

Sofern die Analysen Fehler aufzeigen oder größere Bilanzprobleme erkennbar sind, werden Modifikationen nur in den Grundlagendaten datenbasiert vorgenommen. Hierauf aufbauend werden dann neue Abflusszeitreihen berechnet und die Bilanzierung erneut durchgeführt.

Die Modifikationen erfolgen immer nur datenbasiert. Datenbasiert heißt, es werden stets die Messwerte und Grundlagen berücksichtigt. So wird z.B. eine Änderung der Abflusstafel (mit dem Ziel die Abflussbilanz besser in den Griff zu bekommen), die den einzelnen Abflussmessungen jedoch widerspricht, nicht als zielführend erachtet und somit auch nicht vorgenommen. Durch dieses Vorgehen wird eine homogene Datenbasis von Wasserstandszeitreihen, Abflussmessungen, Abflusstafeln und Abflusszeitreihen gewährleistet. Eine direkte, auf die jeweiligen Bilanzen ausgerichtete Änderung der Zeitreihen wird nicht vorgenommen.

Zur Durchführung der Arbeiten werden die Programme ProSys (Zeitreihenverwaltungssystem, welches auf einer Oracle-Datenbank basiert), PADUA (Programm zur Auswertung und Durchführung von Abflussmessungen) und der Abflusskurven-Editor ABFLUKU verwendet. Die drei durch ProAqua erstellten Produkte bilden den Kern der verwendeten Software zur Durchführung der Arbeiten. In Ergänzung hierzu werden weitere Programme eingesetzt.

Das methodische Vorgehen dieser Untersuchung gliedert sich im Wesentlichen in folgende Schritte:

1. Datenübernahme und -aufbereitung
Zusammenstellung aller benötigten Daten in passenden Formaten (Metadaten, Abfluss-, Wasserstandszeitreihen, Abflusstafeln, Abflussmessungen, weitere Daten)
2. Analyse und Aufbereitung der originalen Zeitreihen
Prüfung auf Homogenität und Plausibilitäten etwaiger Korrekturen wie z.B. die Füllung etwaiger Lücken in den Zeitreihen.
3. Analyse und Aufbereitung der Abflussmessungen und -tafeln
Analyse der Abflusstafeln unter Einbezug der Abflussmessungen unter Berücksichtigung etwaiger Besonderheiten wie z.B. Stau- und Eta-Verfahren.
4. Erstellung der Überblickbilanz einschließlich Analysen
Einschätzung der Bilanzreinheit über den gesamten Rhein ohne Berücksichtigung der Nebengewässer
5. Erstellung der Differenzenzeitreihe und Gesamtbilanz
Beurteilung der Bilanzreinheit unter Berücksichtigung der Nebengewässer und Ermittlung der hydrologischen Faktoren

6. Detailbilanz der einzelnen Rheinabschnitte
Detaillierte Analyse der Bilanzreinheit und Lokalisierung von Problemen (im zeitlichen Verlauf für jeden Bilanzabschnitt)
7. Etwaige Anpassung der Basisdaten (z.B. Abflusstafeln) und Generierung neuer Abflusszeitreihen
8. Erneute Beurteilung der Bilanzreinheit wie in Schritt 6 (dann evtl. noch einmal zu Schritt 7)
9. Beurteilung der Bilanzreinheit bezogen auf Abflussspektren
10. Abschließende Gesamtbilanz
11. Abschätzung der Sensitivität der Einzelkomponenten bzgl. der Bilanz

Zur Analyse und Erzeugung bilanzreiner Abflusszeitreihen für den Rhein ist die Fixierung einzelner Bilanzbereiche erforderlich, welche in Abstimmung mit der Steuerungsgruppe festgelegt wurden. Die Pegel, die die Bilanzabschnitte begrenzen, sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Betrachtet wird dabei der Rhein von Neuhausen (45 km unterhalb des Bodensees) bis zum niederländischen Pegel Lobith (Rheinkilometer 862).

Pegel	A _{EO} [km ²]	Rhein-km
Neuhausen	11887	45.8
Rekingen	14718	90.2
Rheinfeldern	34526	147.4
Basel-Rheinhalle	35897	164.3
Breisach	37575	227.5
Kehl-Kronenhof	39330	292.2
Maxau	50196	362.3
Speyer	53131	400.6
Worms	68827	443.4
Mainz	98206	498.3
Kaub	103488	546.2
Andernach	139549	613.8

Pegel	A _{EO} [km ²]	Rhein-km
Bonn	140901	654.8
Köln	144232	688.0
Düsseldorf	147680	744.2
Ruhrort	152895	780.8
Wesel	154210	814.0
Rees	159300	837.4
Emmerich	159555	851.9
Lobith	159896	862.2

Tabelle 3.1: Betrachtete Rheinpegel (Grenzen der Bilanzbereiche)

Bei der Bezeichnung der Bilanzabschnitte wurden immer zuerst der untere Rheinpegel und dann der obere Rheinpegel aufgeführt, da die Betrachtung des Abschnittes von unten aus erfolgt.

In jedem Bilanzabschnitt wurden weitere Pegel an Nebengewässern ausgewählt, die zur Ermittlung der Bilanzen berücksichtigt werden. Hierbei wurden neben den Pegeln an großen Nebenflüssen, die einen entsprechend großen Zufluss in den Rhein liefern, auch Pegel kleinerer Nebengewässer berücksichtigt.

Bei den großen Gewässern wurden in der Regel die beiden mündungsnächsten Pegel berücksichtigt, um Redundanzen zu haben, aber auch um etwaige Analysen zur Überprüfung der großen Nebengewässer durchführen zu können.

Im Untersuchungsgebiet ist vor allem der Abfluss von rheinnahen Gebiete nicht durch Pegel abgedeckt. Zur Ermittlung dieses Abflusses werden Messungen an kleinen Nebengewässern als Grundlage verwendet, da diese eine ähnliche Charakteristik wie die kleinen unbeobachteten Gewässer aufweisen.

Die Pegel (sowohl am Rhein als auch an den Nebengewässern) werden für die Untersuchung in Haupt- und Nebenpegel klassifiziert. Die Klassifizierung wurde gewählt, um den Bereitstellungsaufwand der Daten seitens der Betreiber zu reduzieren.

Nebenpegel

Die Nebenpegel werden keiner weiteren Untersuchung zur Qualität ihrer Abflüsse unterzogen. Für Nebenpegel werden lediglich Metadaten und Abflusszeitreihen berücksichtigt.

Als Nebenpegel sind im Wesentlichen die Pegel der kleineren Nebengewässer klassifiziert worden, die wegen des geringeren Zuflusses keine entscheidende Auswirkung auf die Bilan-

zen haben. Aufgrund fehlender Informationen wurden auch alle französischen Pegel als Nebenpegel klassifiziert.

Hauptpegel

Die Hauptpegel werden einer genaueren Analyse zur Qualität der vorliegenden Abflusszeitreihen unterzogen. Alle Rheinpegel und die wichtigsten Pegel der Nebengewässer sind als Hauptpegel klassifiziert. Neben den Wasserstands- und Abflusszeitreihen werden hier Abflussmessungen und Abflusstafeln ausgewertet.

Der in den Niederlanden gelegene Pegel Lobith ist ebenfalls als Hauptpegel aufgeführt. Aufgrund der speziellen Rahmenbedingungen ist jedoch eine gesonderte Behandlung erforderlich. Da der Wasserstand am Pegel durch Unterwasserbedingungen beeinflusst wird, erfolgte früher eine Berechnung des Abflusses unter Verwendung von zwei Abflusstafeln zur Berücksichtigung des gestauten und ungestauten Abflusses. Ab 2010 wird ein neues Verfahren verwendet, welches einen komplexeren Algorithmus beinhaltet. Einzelheiten hierzu sind in der Anlage zur Analyse der Abflusstafeln enthalten.

Pegel	Gewässer	Kategorie	Betreiber
Neuhausen	Rhein	Hauptpegel	BAFU
Andelfingen	Thur	Hauptpegel	BAFU
Rekingen	Rhein	Hauptpegel	BAFU
Untersiggenthal	Aare	Hauptpegel	BAFU
Rheinfeldern	Rhein	Hauptpegel	BAFU
Liestal	Ergolz	Nebenpegel	BAFU
Münchenstein, Hofm.	Birs	Nebenpegel	BAFU
Basel-Rheinhalle	Rhein	Hauptpegel	BAFU
Basel	Wiese	Nebenpegel	BAFU
Breisach	Rhein	Hauptpegel	WSV
Riegel	Leopoldkanal	Hauptpegel	LUBW / RP FR
Kehl-Kronenhof	Rhein	Hauptpegel	WSV
Schwaibach	Kinzig	Hauptpegel	LUBW / RP FR
Straßburg	Ill	Nebenpegel	Frankreich
Schweighouse	Moder	Nebenpegel	Frankreich
Rotenfels	Murg	Hauptpegel	LUBW / RP KA

Pegel	Gewässer	Kategorie	Betreiber
Beinheim	Sauer	Nebenpegel	Frankreich
Maxau	Rhein	Hauptpegel	WSV
Berghausen	Pfinz	Nebenpegel	LUBW / RP KA
Neustadt	Speyerbach	Nebenpegel	RLP
Speyer	Rhein	Hauptpegel	WSV
Ubstadt	Kraichbach	Nebenpegel	LUBW / RP KA
Wiesloch	Leimbach	Nebenpegel	LUBW / RP KA
Rockenau + Q-Messanlage	Neckar	Hauptpegel	WSV
Heidelberg-Ziegelhausen (Q-Messanl.)	Neckar	Hauptpegel	WSV
Worms	Rhein	Hauptpegel	WSV
Monsheim	Pfrimm	Nebenpegel	RLP
Lorsch	Weschnitz	Nebenpegel	HLUG / RP DA
Frankfurt-Osthafen	Main	Hauptpegel	WSV
Raunheim+ Q-Messanlage	Main	Hauptpegel	WSV
Mainz	Rhein	Hauptpegel	WSV
Oberingelheim	Selz	Nebenpegel	RLP
Pfaffental	Wisper	Nebenpegel	HLUG / RP DA
Boos	Nahe	Nebenpegel	RLP
Grolsheim	Nahe	Hauptpegel	RLP
Kaub	Rhein	Hauptpegel	WSV
Leun	Lahn	Hauptpegel	WSV
Kalkofen	Lahn	Hauptpegel	WSV
Cochem mit Q-Messanlage Alken	Mosel	Hauptpegel	WSV
Friedrichsthal	Wied	Nebenpegel	RLP
Andernach	Rhein	Hauptpegel	WSV
Müsch	Ahr	Nebenpegel	RLP

Pegel	Gewässer	Kategorie	Betreiber
Altenahr	Ahr	Nebenpegel	RLP
Bonn	Rhein	Hauptpegel	WSV
Siegburg-Kaldauen	Sieg	Nebenpegel	LANUV
Menden	Sieg	Hauptpegel	LANUV
Köln	Rhein	Hauptpegel	WSV
Glüder	Wupper	Nebenpegel	LANUV
Opladen	Wupper	Hauptpegel	LANUV
Glesch	Erft	Nebenpegel	LANUV
Neubrück	Erft	Hauptpegel	LANUV
Düsseldorf	Rhein	Hauptpegel	WSV
Wetter	Ruhr	Hauptpegel	Ruhrverband
Hattingen	Ruhr	Hauptpegel	Ruhrverband
Ruhrort	Rhein	Hauptpegel	WSV
Königstraße	Emscher	Nebenpegel	Emschergenossenschaft
Wesel	Rhein	Hauptpegel	WSV
Haltern	Lippe	Hauptpegel	LANUV
Schermbeck 1	Lippe	Hauptpegel	LANUV
Rees	Rhein	Hauptpegel	WSV
Emmerich	Rhein	Hauptpegel	WSV
Lobith	Rhein	Hauptpegel	RWS

Tabelle 3.2: Liste der untersuchten Pegel mit Kategorie (Haupt-/Nebenpegel)

In der Tabelle sind die Betreiber in abgekürzter Schreibweise angegeben. Die kompletten Bezeichnungen sind im Folgenden aufgeführt:

BAFU	Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
WSV	Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
LUBW / RP FR	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Regierungspräsidium Freiburg
LUBW / RP KA	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Regierungspräsidium Karlsruhe
RLP	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
HLUG / RP DA	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Regierungspräsidium Darmstadt
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
RWS	Rijkswaterstaat

Tabelle 3.3: Erläuterung der Abkürzungen der Pegelbetreiber

In Abbildung 3.2 sind die Pegel und Gewässer in ihrer räumlichen Lage dargestellt.

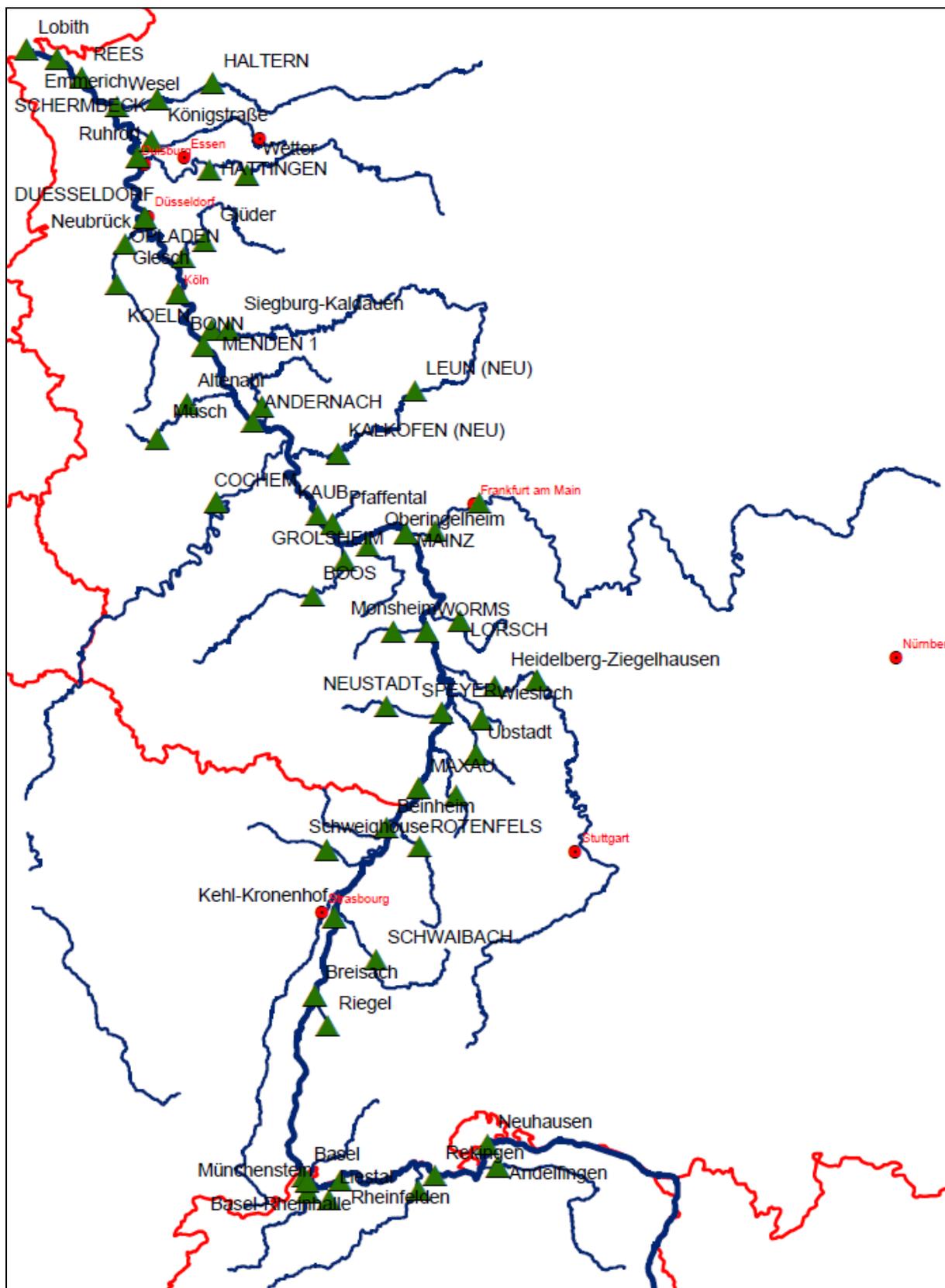


Abbildung 3.2: Übersichtskarte der Pegel und Gewässer

Hinweis zur Vorstudie

In der Vorstudie von WL|Delft Hydraulics wurden Untersuchungen zur Bilanzreinheit für den Zeitraum von 01.11.1989 bis 31.12.2004 vom Maxau bis Lobith durchgeführt. Im Rahmen der Vorstudie wurden Daten aufbereitet, analysiert und mögliche Probleme aufgezeigt sowie Empfehlungen zur Verbesserung ausgesprochen. Die Ergebnisse und Arbeiten der Vorstudie wurden auch in der hier vorliegenden Untersuchung berücksichtigt. Im Verlauf der hier durchgeführten Arbeiten zeigte sich, dass die Datenbasis eine andere als die in der Vorstudie ist, somit die Auswertungen erneut durchgeführt werden mussten. Da die Ergebnisse deutlich von denen der Vorstudie abweichen, konnten die in der Vorstudie erarbeiteten Ergebnisse und Empfehlungen nur zu geringen Teilen verwendet werden.

Allerdings wird in dieser Untersuchung an denselben Punkten, die die Vorstudie nennt bzw. hinsichtlich ihrer Sensitivität untersucht hat (Abflusskurven, primär Rheinpegel, hydrologische Faktoren, Hystereseinfluss/-korrektur), gearbeitet bzw. werden Modifikationen vorgenommen. Die Vorstudie war eher modell- als datenbasiert. Sie hat sich damit als "Aufhänger" des HYMOG-Projekts durchaus gelohnt.

Ziel der hier vorliegenden Studie ist die Schaffung einer Datenbasis, welche eine Bilanzreinheit gewährleistet, d.h. sie geht deutlich über die Ziele der Vorstudie hinaus, in welcher die Bilanzreinheit im Wesentlichen analysiert und Empfehlungen ausgesprochen wurden. Um die Verbesserungen zu erreichen, werden im Rahmen dieser Untersuchung die Grundlagen vertieft und detailliert analysiert. So werden beispielsweise alle Abflusstafeln auf den Prüfstand gestellt und Auswertungen bzgl. $dQ(t)$ oder auch $dQ(Q)$ durchgeführt.

Aufgrund der neuen Daten und des verlängerten Betrachtungszeitraumes sind in der hier vorliegenden Untersuchung praktisch alle Auswertungen, die auch in der Vorstudie gemacht wurden, erneut durchzuführen. Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine Verbesserung der Bilanzreinheit zu erreichen, somit nicht nur Empfehlungen auszusprechen, sondern aktiv Daten zu modifizieren / korrigieren. Da diese Korrekturen datenbasiert erfolgen sollten, um eine konsistente Datenbasis auch im Weiteren zu gewährleisten, wurden intensive Analysen der Abflusstafeln unter Einbezug der Abflussmessungen durchgeführt (vergl. hierzu insbesondere die Analysen zur Abflusstafel in Anlage 2).

4 Übernahme und Aufbereitung der Daten

Zu Beginn der Untersuchung mussten von den einzelnen Betreibern der jeweiligen Pegel die erforderlichen Daten bereitgestellt werden. Die Daten wurden in diversen Formaten geliefert und mussten jeweils auf ein einheitliches Format konvertiert werden. Teilweise lagen die Daten nicht in der erforderlichen Genauigkeit vor, so dass sie erneut angefordert und aufbereitet werden mussten. Auch ergaben die Plausibilitätsuntersuchungen bei einigen Daten offensichtliche Fehler, die entsprechend ebenfalls neu geliefert wurden. Aus Frankreich ist kein Pegelbetreiber in der Steuerungsgruppe vertreten, so dass hier die Datenrecherche im Internet ausgeführt wurde.

4.1 Metadaten

Zur Durchführung dieser Untersuchung ist es von großer Bedeutung genaue Informationen über die zugrundeliegenden Daten zu erhalten. Fragen wie: „Wie wurden die Daten ermittelt?“, „Wie erfolgte die Auswertung und Aggregation?“, „Welche Kontrollen werden / wurden durchgeführt?“, „Welche Besonderheiten hinsichtlich Datenerfassung und –aufbereitungen liegen vor?“, „Gibt es räumliche Besonderheiten?“ etc. sind äußerst wichtig zur Beurteilung der jeweiligen Daten. Um diese wichtigen Informationen zu erhalten, wurde ein Fragenkatalog entwickelt (siehe Aufzählung unterhalb) und an alle Betreiber der betrachteten Pegel mit der Bitte um Antwort und ggf. erforderlicher Ergänzungen versandt. Die Antworten lagen dabei in sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad vor. Zu einigen Pegeln wurden sehr ausführliche Informationen geliefert, bei anderen wiederum lediglich kurz oder auch gar nicht geantwortet.

Zu jedem untersuchten Pegel wurden vom Betreiber detaillierte Angaben zu Metadaten angefordert. Angefragt wurden dabei:

- Pegelstammdaten
 - Pegelname, -nummer, -betreiber
 - Art und Methode der Messwert-Erfassung
 - Lage, Station, Einzugsgebiet des Pegels, Rhein-km der Mündung des Gewässers (bei Pegel am Nebengewässer)
 - Höhe des Pegelnullpunktes
 - Besonderheiten am Pegel
- Informationen zur Wasserstandszeitreihe (falls Hauptpegel)
 - Höhensystem, Art der Werte (Momentanwerte, Mittelwerte, ...), zeitliche Auflösung
 - Umgang mit Lücken, wurden Korrekturen vorgenommen
 - Besonderheiten (z.B. Rückstau, Eisgang, Wehre, ...)
 - Informationen zur Abflusszeitreihe

- Einheit, Art der Werte (Momentanwerte, Mittelwerte, ...), zeitliche Auflösung
- Art der Abflussermittlung (w-Q-Transformation, direkte Abflussmessung, ...)
- Umgang mit Lücken, wurden Korrekturen vorgenommen
- Besonderheiten
- Informationen zu Abflussmessungen (falls Hauptpegel)
 - Umfang der Messungen
 - Besonderheiten
- Informationen zu Abflusstafeln (falls Hauptpegel)
 - Anzahl und Zeitraum der Abflusstafeln
 - Höhenbezugssystem
 - bauliche oder betriebliche Änderungen im Pegelbereich (neue Abflusstafel)
 - liegt Verkrautung vor, Korrekturmethode
 - sonstige Einflüsse auf w-Q-Beziehung und deren Korrektur
 - welche Messungen liegen den jeweiligen Abflusstafeln zugrunde
 - Belastbarkeitsbereich der Abflusstafeln (Wasserstand)
 - weitere Bemerkungen

Neben diesen konkreten Anfragen wurde darum gebeten, auch weitere Informationen, die evtl. für diese Untersuchung von Interesse sein könnten, ebenfalls mitzuteilen.

Falls in der weiteren Bearbeitung durch die Analysen die Vermutung auf Besonderheiten gegeben ist, die aber nicht mitgeteilt wurden, wurde evtl. beim Betreiber nachgefragt.

4.2 Abfluss- und Wasserstandszeitreihen

Zu Hauptpegeln wurden ProAqua Wasserstands- und Abflusszeitreihen und zu den Nebenpegeln nur Abflusszeitreihen zur Verfügung gestellt. Bei direkten Abflussmessungen wurde teilweise auch hierfür eine eigene Zeitreihe zur Verfügung gestellt. Diese lagen in verschiedenen Formaten und zeitlichen Auflösungen vor. Die Zeitreihen wurden alle in ein einheitliches Format und endgespeicherte Stundenwerte konvertiert. Bei höher aufgelösten Zeitreihen wurden die Stundenwerte als Mittelwerte aus den Einzelwerten ermittelt.

Die Zeitreihen der französischen Pegel wurden aus dem Internet heruntergeladen, da hier kein Ansprechpartner in der Steuerungsgruppe zur Verfügung stand. Hier lagen auch keine hochaufgelösten Daten, sondern nur Tageswerte vor. Teilweise mussten die Zeitreihen mehrfach angefordert werden, da sie mit einer zu geringen Genauigkeit geliefert wurden.

Die aufbereiteten Zeitreihen wurden in eine Datenbank auf Oracle-Basis (ProSys) importiert. ProSys ist ein von ProAqua entwickeltes datenbankbasiertes Programmsystem zur Überwachung, Auswertung und Visualisierung wasserwirtschaftlicher Zusammenhänge. Es umfasst die Verwaltung und Archivierung von Daten in Form einer Oracle-Datenbank und ermöglicht

neben Im- und Export von Zeitreihen in unterschiedlichen Formaten auch die Visualisierung der Daten durch integrierte Grafikfunktionen. In dieser Datenbank werden alle im Projekt relevanten Zeitreihen vorgehalten, auch die im Laufe der Projektbearbeitung neu erzeugten Abflusszeitreihen werden hier gespeichert und verwaltet.

4.3 Abflusstafeln und Abflussmessungen

Sowohl Abflusstafeln, als auch Abflussmessungen wurden in diversen Formaten (Text, Excel, pdf, ...) zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden in ein einheitliches Format aufbereitet und in das durch ProAqua erstellte Programm ABFLUKU importiert. Dieses Programm verwaltet die gespeicherten Abflussmessungen und –kurven und dient der Auswertung sowie Analyse von Abflussmessungen und ermöglicht die Erzeugung neuer Abflusstafeln.

Bei der Bearbeitung stellte sich bei einigen Abflusstafeln und Messungen heraus, dass die Daten mit einer zu geringen Genauigkeit geliefert wurden oder nicht vollständig waren. Einzelne Abflusstafeln und Messungen fehlten. Messungen die eigentlich nicht berücksichtigt werden sollten wurden als gültige Messungen geliefert. Diese Daten mussten dann erneut angefordert, aufbereitet und importiert werden und evtl. bereits durchgeführte Auswertungen ebenfalls erneut durchgeführt werden.

Für Pegel mit Abflusstafeln nach dem Eta-Verfahren wurden vom Pegelbetreiber Eta-Zeitreihen zur Verfügung gestellt. Diese wurden ebenfalls aufbereitet und in die Datenverwaltung ProSys importiert. Dabei wurde hier die originale zeitliche Auflösung beibehalten. Bei der Umrechnung der Wasserstände in Abflüsse werden diese Werte dann entsprechend berücksichtigt.

Wurden an einem Pegel Stauwerte berücksichtigt, so wurden diese ebenfalls als Zeitreihe zur Verfügung gestellt und analog zu den Eta-Werten aufbereitet und nach ProSys importiert.

Einen Sonderfall nimmt hier der Pegel Lobith ein. Hier wurden zwei verschiedene Methoden zur Abflusserstellung aus den Wasserständen untersucht. Dabei entsprechen beide Verfahren keinem der an den anderen Pegeln angewendeten Verfahren, so dass hier auch die Betrachtung der Abflusstafeln und Messungen nicht mit den gleichen Methoden durchgeführt wurde. Geliefert wurden hier ebenfalls Abflussmessungen und für die alte Methode verschiedene Abflusstafeln, mit denen der Abfluss anhand von zwei Wasserständen ermittelt wurde. Für die neue Methode wurde ein umfangreiches Excel-Sheet geliefert, mit dem die Transformation der Wasserstände in Abflüsse durchgeführt wurde. Die Aufbereitung der Daten erfolgte hier meist mit Excel entsprechend den angewendeten Auswertungen.

Hinweis

Bei der Bearbeitung dieses Projektes zeigte sich, dass die konsistente, redundanzfreie Datenhaltung bei den Pegelbetreibern sehr wichtig ist. Teilweise zeigten sich hier bei einigen Betreibern Defizite.

5 Auswertung der aufbereiteten Originaldaten

Die aufbereiteten Daten wurden zuerst bzgl. Auflösung, Umfang, Lücken und anschließend auf Plausibilität geprüft. Im Rahmen dieser Prüfung wurden (falls möglich) auch evtl. vorhandene Lücken gefüllt und eine einheitliche Zeitschrittweite von einer Stunde erzeugt, so dass dann für (fast) alle Pegel über den gesamten Untersuchungszeitraum lückenlose Zeitreihen mit einer Auflösung von einer Stunde vorlagen.

Anschließend wurde für die Hauptpegel die Ermittlung der Abflusszeitreihe aus der Wasserstandszeitreihe (mittels Abflusstafel, evtl. unter Berücksichtigung von Stau- oder Eta-Werten), soweit möglich, nachgerechnet und analysiert. Abschließend wurden dann die Abflusstafeln mit den Messungen ausgewertet, um die Qualität der Umrechnung beurteilen zu können.

Hinweis

Der Vergleich der zu Verfügung gestellten Zeitreihen mit den Daten der Vorstudie zeigt, dass erhebliche Differenzen vorhanden sind. Dies liegt vermutlich daran, dass hier zwischenzeitlich neue Abflusstafeln erstellt und hierauf basierend die Abflusszeitreihen erneut berechnet wurden. Die Ergebnisse der Vorstudie weichen daher zum Teil erheblich von den hier vorliegenden Ergebnissen ab.

5.1 Analyse und Aufbereitung der gelieferten Zeitreihen

Für die Untersuchung sind die Wasserstand- und Abflusszeitreihen die wesentliche Grundlage. Diese Daten wurden durch die jeweiligen Pegelbetreiber zur Verfügung gestellt und in mehreren Schritten analysiert und aufbereitet.

5.1.1 Analyse der gelieferten Zeitreihen

Die gelieferten Zeitreihen lagen in verschiedenen zeitlichen Auflösungen vor. Die Tabelle 5.1 gibt Aufschluss darüber, welche Zeitreihen in welcher zeitlichen Auflösung geliefert wurden und die Grundlage der lückenfreien Zeitreihen mit Stundenwerten waren. Für Nebenpegel sind nur Abflusszeitreihen in die Untersuchung eingegangen, die übrigen Felder sind durchgestrichen. Ergänzend hierzu sind die gelieferten Zeitreihen zu Eta- und Stau-Werten aufgeführt.

Pegel	Q-ZR		W-ZR		sonst. ZR
	Auflösung	Lücken	Auflösung	Lücken	
Neuhausen/ Rhein	10min	-	10min	-	Stau
Andelfingen/Thur	10min	-	10min	-	-
Rekingen/Rhein	10min	-	10min	-	Stau
Untersiggen- thal/Aare	10min	-	10min	-	Stau
Rheinfelden/ Rhein	10min	-	10min	-	-
Liestal/Ergolz	10min	-			
Münchenstein, Hofm./Birs	10min	-			
Basel-Rheinhalle/ Rhein	1d (bis 1994)/ 10min (ab 1995)	-/-	10min	-	-
Basel/Wiese	10min	-			
Breisach/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Riegel/ Leopoldkanal	1h	-	1h	-	-
Kehl-Kronenhof/ Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Schwaibach/Kinzig	1h	-	1h	-	-
Straßburg/Ill	1d	120d			
Schweighouse/ Moder	1d	-			
Rotenfels/Murg	1h	-			
Beinheim/Sauer	1h	-			
Maxau/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Berghausen/Pfinz	1h	-			
Neustadt/ Speyer- bach	15min	-			
Speyer/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Ubstadt/	1h	-			

Pegel	Q-ZR		W-ZR		sonst. ZR
	Auflösung	Lücken	Auflösung	Lücken	
Kraichbach					
Wiesloch/ Leimbach	1h	-			
Rockenau/Neckar	1h/1d	62481h/ -	1h/1d	264h/-	-
Heidelberg- Ziegelh./Neckar	1h/ 1d (ab 1.11.99)	78764h /1366	1h/1d	24h/-	-
Worms/Rhein	1h/1d	37h/-	1h/1d	-/-	-
Monsheim/ Pfrimm	15min	-			
Lorsch/Weschnitz	15min	-			
Frankfurt- Osthafen/Main	1h/1d	4631h/-	1h/1d	-/-	-
Raunheim/Main	1h (ab 1993)/ 1d	89894h/ -	1h/1d	-	-
Mainz/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Oberingelheim/ Selz	15min	-			
Pfaffental/Wisper	15min	-			
Boos/Nahe	15min	-			
Grolsheim/Nahe	15min	-	15min	-	-
Kaub/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Leun/Lahn	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Kalkofen/Lahn	1h/1d	310h/-	1h/1d	-/-	-
Cochem(Alken)/ Mosel	1h/1d	42876h/ -	1h/1d	-/-	-
Friedrichsthal/ Wied	15min	-			
Andernach/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	-
Müsch/Ahr	15min	-			
Altenahr/Ahr	15min	-			
Bonn/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	

Pegel	Q-ZR		W-ZR		sonst. ZR
	Auflösung	Lücken	Auflösung	Lücken	
Siegburg-K./Sieg	1h	-			
Menden/Sieg	1h	903h	1h	-	Stau
Köln/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Glüder/Wupper	1h	-			
Opladen/Wupper	1h	-	1h	-	Stau
Glesch/Erft	1h	-			
Neubrück/Erft	1h	-	1h	-	Eta
Düsseldorf/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Wetter/Ruhr	1h (bis 1.11.90)/ 15min (ab 1.11.90)	-/-	1h (bis 1.11.90)/ 15min (ab 1.11.90)	-/-	
Hattingen/Ruhr	1h (bis 1.11.90)/ 15min (ab 1.11.90)	-/34h	1h (bis 1.11.90)/15min (ab 1.11.90)	-/34h	
Ruhrort/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Königstra- ße/Emscher	nicht äquidistant	175h			
Wesel/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Haltern/Lippe	1h	22286h	1h (bis 31.3.05)	-	Eta
Schermb./Lippe	1h	-	1h	-	Eta
Rees/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Emmerich/Rhein	1h/1d	-/-	1h/1d	-/-	
Lobith/Rhein (alte Methode)	1h/1d	-/-	1h	-	
Lobith/Rhein (neue Methode)	1h	-	1h	-	

Tabelle 5.1: Gelieferte Zeitreihen der untersuchten Pegel

Die gelieferten Zeitreihen wurden visuell auf Plausibilität und Homogenität geprüft. Insgesamt sind die Daten plausibel, obschon in vielen Zeitreihen Besonderheiten vorliegen. So weisen die Zeitreihen vereinzelte Ausreißer auf (diese sind für die Bilanz jedoch nicht rele-

vant und wurden daher nicht geändert), desweiteren sind Bereiche zu erkennen, die vermutlich aufgrund des Füllens ursprünglich vorhandener Lücken „ungewöhnlich“ sind. „Ungewöhnlich“ sind z.B. längere Zeitabschnitte mit einem linearen Verlauf der Werte (vermutlich Lückenfüllung mittels linearer Interpolation) und/oder konstanten Werten. Einige Zeitreihen sind durch zyklische Schwankungen charakterisiert, welche meist durch ein in der Nähe liegendes Wehr mit Kraftwerk verursacht werden.

Im Folgenden sind exemplarisch einzelne Auffälligkeiten dargestellt, die bei der Analyse aufgefallen sind.

Am Pegel Breisach traten regelmäßige Schwankungen aufgrund des Kraftwerksbetriebs auf.

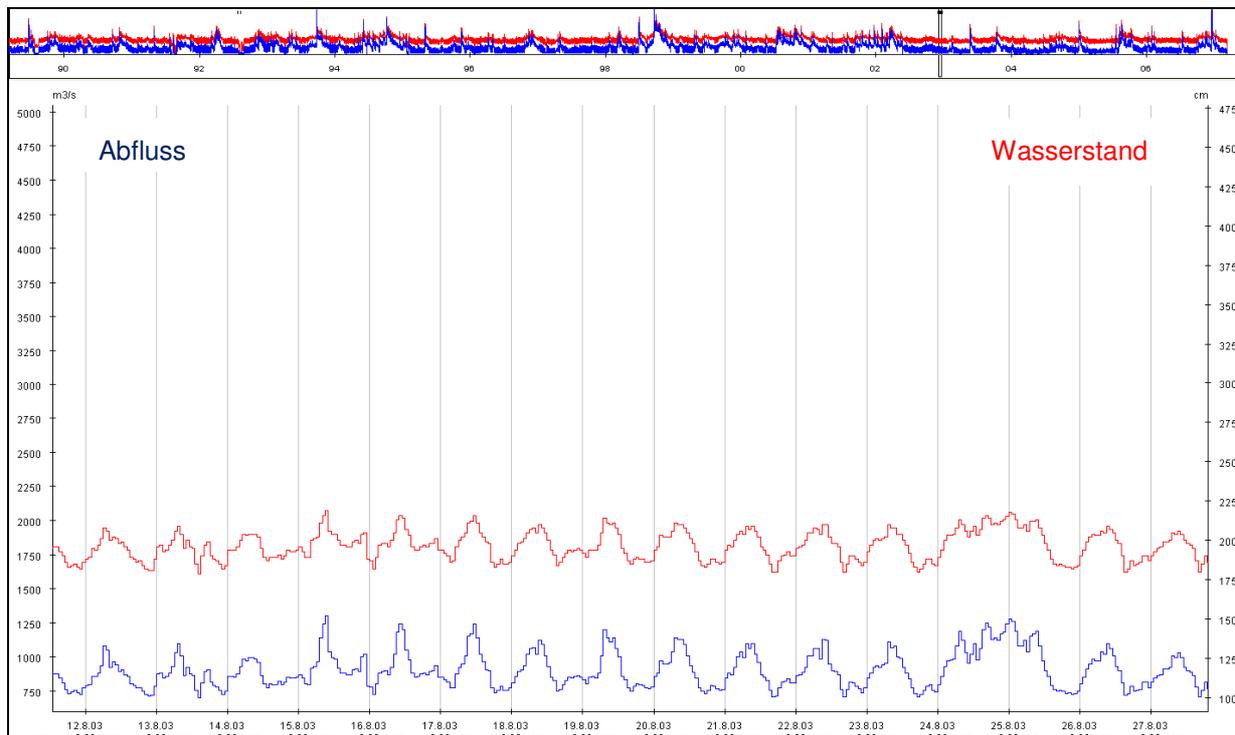


Abbildung 5.1: Analyse Zeitreihen: regelmäßige Schwankungen (Breisach)

Am Pegel Worms traten über einen Zeitraum von zwei Tagen ein unplausibler konstanter Wasserstand und entsprechend auch ein konstanter Abfluss auf. Hier wurden jedoch keine Anpassungen vorgenommen, da der Fehler für die Betrachtung größerer Zeiträume vernachlässigbar ist.

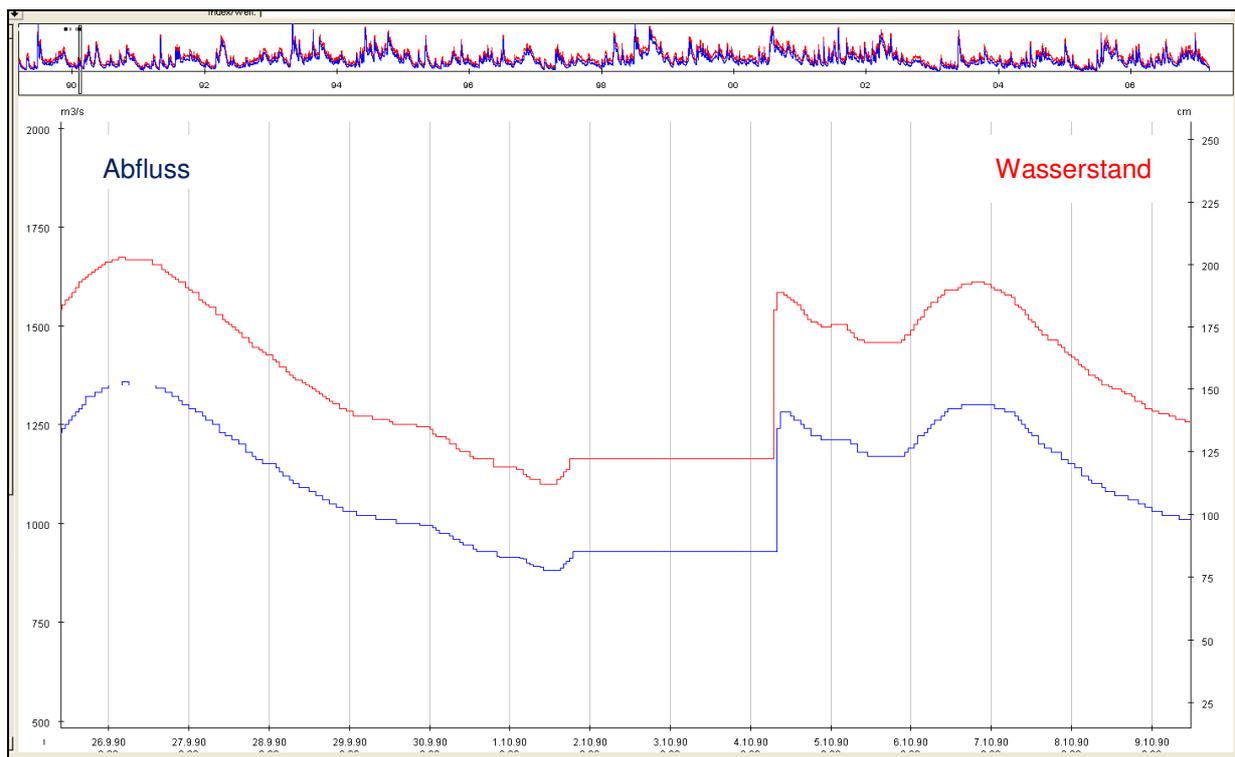


Abbildung 5.2: Analyse Zeitreihen: konstanter Wasserstand (Worms)

In Raunheim weisen die Abflüsse häufige Lücken auf, obwohl Wasserstände vorliegen. Hier wurden die Lücken mit Tageswerten gefüllt.

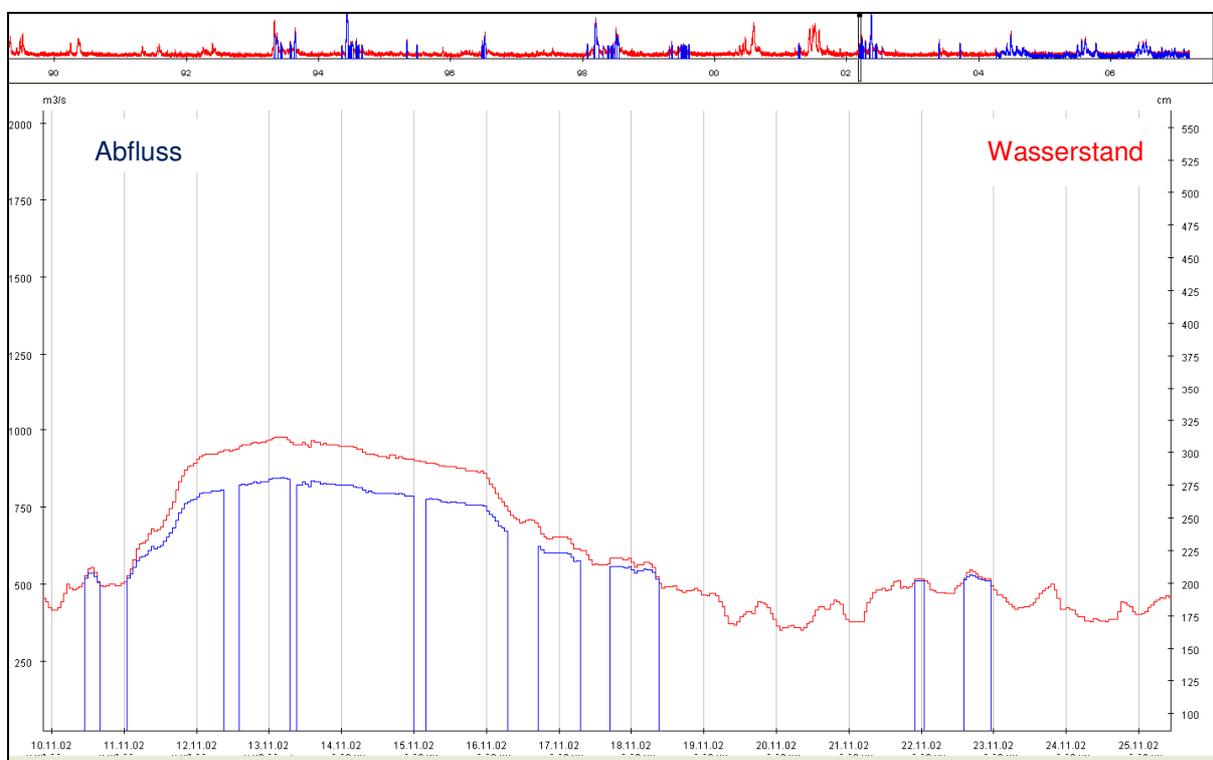


Abbildung 5.3: Analyse Zeitreihen: Ausfälle (Raunheim)

Am Pegel Frankfurt-Osthafen wurden für einen Zeitraum offenbar Abflüsse linear interpoliert, obwohl hier schwankende Wasserstände vorlagen. Da diese Zeitreihe nicht zur Bilanzierung benutzt wurde, wurde keine Korrektur vorgenommen.

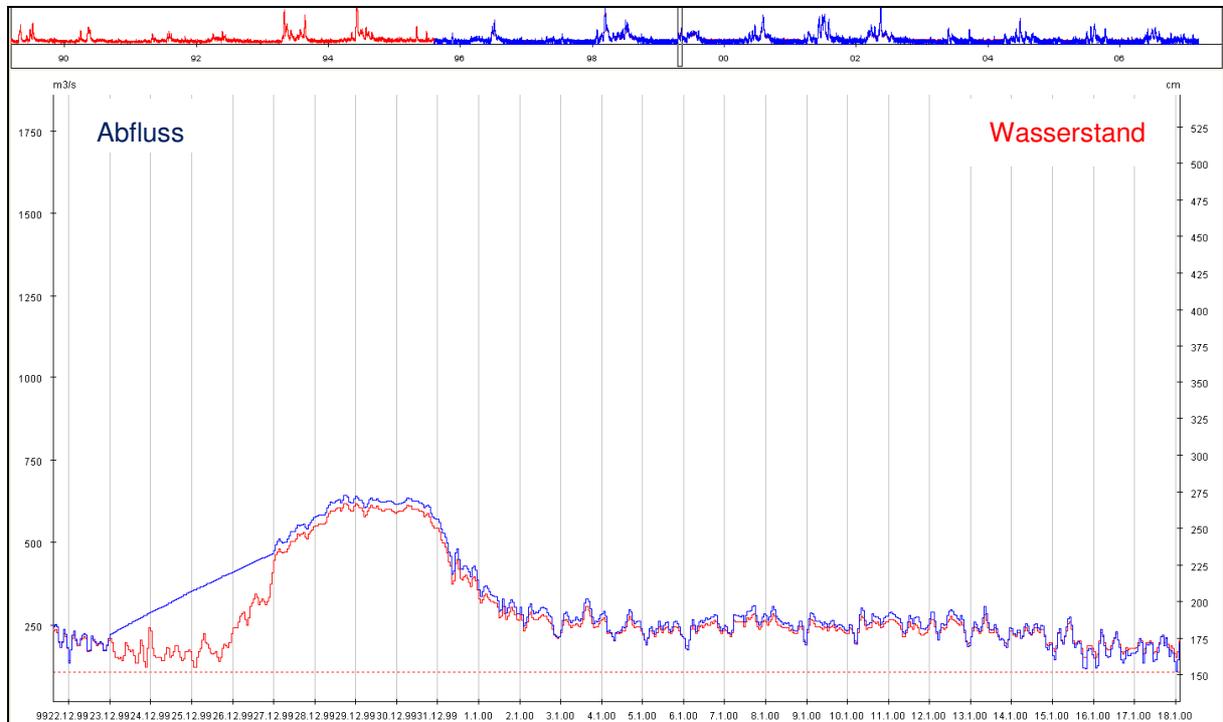


Abbildung 5.4: Analyse Zeitreihen: Q interpoliert (Frankfurt-Osthafen)

5.1.2 Aufbereitung der gelieferten Zeitreihen

Für die Bilanzierung wird an allen Rheinpegeln und an jeweils mindestens einem Pegel der berücksichtigten Nebengewässer eine lückenfreie hochaufgelöste Abflusszeitreihe benötigt. Hochaufgelöst heißt in diesem Kontext Stundenwerte.

Das Füllen etwaiger Lücken erfolgte in Abhängigkeit der jeweils am Pegel verfügbaren Daten. Dabei wurden zuerst alle Zeitreihen in Stundenwerte umgerechnet.

Das Auffüllen einer Wasserstandszeitreihe erfolgte gemäß folgender Hierarchie:

1. Auffüllen mit Tageswerten
Sofern für eine Messgröße hochaufgelöste Daten und Tageswerte vorliegen, werden etwaige Lücken der hochaufgelösten Reihe mit den Tageswerten aufgefüllt.
2. Lücken eines kurzen Zeitraums
Kurze Lücken in einer Zeitreihe werden mittels linearer Interpolation geschlossen.
3. Lücken eines langen Zeitraums
Ein Lückenschließen war nicht möglich.

Das Auffüllen von Lücken in Abflusszeitreihen der Nebenpegel (hier liegen weder Wasserstandsdaten noch Abflusstafeln vor) erfolgte nach folgendem Schema:

4. Auffüllen mit Tageswerten
Sofern für eine Messgröße hochaufgelöste Daten und Tageswerte vorliegen, werden etwaige Lücken der hochaufgelösten Reihe mit den Tageswerten aufgefüllt.
5. Lücken eines kurzen Zeitraums
Kurze Lücken in einer Zeitreihe werden mittels linearer Interpolation geschlossen.
6. Lücken eines längeren Zeitraums
Lücken werden unter Berücksichtigung von Spenden und Einzugsgebietsgröße aus Abflussdaten des benachbarten Pegels des entsprechenden Nebengewässers abgeleitet.

Das Auffüllen von Lücken in Abflusszeitreihen an Hauptpegeln erfolgte nach folgendem Schema:

7. Das Auffüllen von Lücken erfolgte unter Berücksichtigung der Abflusstafeln und der ggf. aufgefüllten Wasserstandszeitreihe.
8. Falls für die Wasserstände keine Abflusstafel vorhanden ist (z.B. zu kleine Wasserstände, die unterhalb der Gültigkeit der Abflusstafel liegen), erfolgt das weitere Vorgehen wie beim Auffüllen von Lücken in Abflusszeitreihen der Nebenpegel.

Die unter Punkt 6. genannte Methode wurde am Pegel Menden/Sieg erforderlich. Hier wurde auf den Pegel Siegburg zurückgegriffen.

An mehreren Pegeln von Nebengewässern wird der Wasserstand durch Wehre / Bauwerke maßgeblich beeinflusst. Um dies zu berücksichtigen, sind einige Pegel mit einer direkten Abflussmessung ausgestattet. Beim Auffüllen von Lücken wird dies entsprechend berücksichtigt.

Mit Abschluss dieses Schrittes lagen für alle Rheinpegel und die Hauptpegel der Nebengewässer, die in die Einzelbilanzen eingehen, lückenlose Zeitreihen des Wasserstandes und der Abflüsse vor. Auch für die Nebenpegel, die bilanziert werden, lagen lückenlose Abflusszeitreihen vor. Lediglich für einige Pegel, die als doppelte Pegel an Nebengewässern vorliegen, wurden keine lückenlosen Zeitreihen erstellt. Als relevanter Pegel zur Bilanzierung wurde möglichst der mündungsnächste Pegel gewählt. Für den Neckarzufluss ist davon abweichend aber der Pegel Rockenau SKA gewählt worden, da die Q-Zeitreihe des Pegels Heidelberg viele Lücken enthält, weil die W-Q-Beziehung den unteren W-Bereich nicht abdeckt.

5.1.3 Überprüfung der Wasserstand-Abfluss-Berechnung

Zur Überprüfung der beim Pegelbetreiber durchgeführten Wasserstands-Abfluss-Berechnungen sowie einer Prüfung, inwieweit die bei ProAqua verwendete Methode der der jeweiligen Betreiber entspricht, wurden aus den aufbereiteten (lückengefüllte Stundenwerte) Wasserstandszeitreihen und den jeweiligen Abflusstafeln neue Abflusszeitreihen generiert. Diese neuen Abflusszeitreihen wurden mit den gelieferten verglichen, was folgende Rückschlüsse zulässt:

- Die Numerik der Abflussberechnung bei den Betreibern und ProAqua ist gleich
- Die Abflussberechnung ist bei allen Betreibern einheitlich
- Die bereitgestellten Abflusstafeln, deren Gültigkeit sowie die Wasserstandsdaten passen mit wenigen Ausnahmen zueinander
- Die vereinzelt vorhandenen Differenzen sind zurückzuführen auf:
 - Datenaggregation (15 Minuten Werte vs. Stundenwerte)
 - Vereinzelt manuelle Anpassungen / Korrekturen in den originalen Abflussdaten
 - Besonderheiten wie direkte Abflussmessungen etc.

Abweichungen infolge der Datenaggregation

Die oben erwähnten, auf Datenaggregation zurück zu führenden geringen Differenzen lassen sich folgendermaßen erklären: Werden z.B. aus 15-Minuten-Wasserständen 15-Minuten-Abflüsse erzeugt und diese dann zu Stundenwerten aggregiert, so ergeben sich leichte Abweichungen zum Vorgehen, wenn erst die Wasserstände zu Stundenwerten aggregiert und diese dann in Abflüsse umgerechnet werden.

Abweichungen infolge direkter Abflussmessungen, eingeschränkter Gültigkeit

Bei den Pegeln, die im niedrigen Abflussbereich die Abflüsse nicht über eine Abflusstafel ermitteln, sondern mittels direkter Abflussmessung oder aus sonstigen Informationen (z.B. Kraftwerksdurchflüsse), ist für diese Abflüsse selbstverständlich keine Übereinstimmung mit den nachgerechneten Abflüssen vorhanden. Falls die Abflusstafeln mit entsprechendem Gültigkeitsbereich für den Wasserstand definiert wurden, sind hier keine Abflüsse ermittelt worden. Am Pegel Kehl weisen die nachgerechneten Abflüsse ($> 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$) ab 11/2001 Unterschiede zu den gelieferten auf. Am Pegel Rockenau ergaben sich, neben den Abweichungen bei niedrigen Abflüssen, auch für alle Abflüsse vor 1997 leichte Differenzen. Dies ist voraussichtlich auf eine Verschiebung des Pegelnullpunktes zurückzuführen, die in den Wasserstandszeitreihen nachgepflegt wurde, jedoch bei der Abflusstafel nicht.

5.2 Analyse der Abflussmessungen und Abflusstafeln

An den meisten Pegeln werden Wasserstandzeitreihen gemessen und diese über Abflusstafeln, teilweise mit weiteren Korrekturfaktoren (Stau, Eta) in Abflusszeitreihen überführt. Die Qualität dieser Transformation hat also einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit und Qualität der Abflusszeitreihe. Um diese Qualität genauer beurteilen zu können, wurden die Abflusstafeln mit den durchgeführten Abflussmessungen verglichen und die Abweichungen ausgewertet (Kapitel 5.2.1). In Kapitel 5.2.2 werden dann noch einige Untersuchungen zur Qualität und Genauigkeit der Abflussmessungen selbst vorgestellt. Diese detaillierten Analysen waren nicht Teil der Vorstudie, die die Abflusstafeln im Vergleich zur hydraulischen Berechnung betrachtet hat. Bei diesen Untersuchungen bietet sich jedoch der Vorteil, die Abflusstafeln mit den tatsächlichen Gegebenheiten abzugleichen und so auch eventuelle zeitliche Veränderungen im Abflussgeschehen zu erfassen.

5.2.1 Analyse Abflusstafeln

Die Analyse der Abflusstafeln ist detailliert in Anlage 2 beschrieben. Im Hauptbericht wird das prinzipielle Vorgehen erläutert und die Ergebnisse zusammenfassend dargelegt.

Zur Ermittlung von Abflüssen werden Messungen nach unterschiedlichen Prinzipien durchgeführt. Die Genauigkeit der Abflüsse eines Pegels hängt von verschiedenen Faktoren ab. Bei der Ermittlung können 4 verschiedene Typen von Pegeln unterschieden werden:

1. Pegel mit Wasserstandsmessung und Umrechnung in Abflüsse über Abflusstafeln
2. Pegel mit Wasserstandsmessung und Umrechnung in Abflüsse über Abflusstafeln mit vorheriger Anpassung des Wasserstandes über Stauwerte
3. Pegel mit Wasserstandsmessung und Umrechnung in Abflüsse über Abflusstafeln mit jeweils zwei Hüllkurven unter Berücksichtigung eines Eta-Wertes
4. Pegel mit direkter Abflussmessung

Die unterschiedlichen Typen von Pegeln wurden wie folgt untersucht, um Aussagen über die Qualität der Abflüsse treffen zu können. Dabei können an einem Pegel auch verschiedene Typen kombiniert vorkommen, z.B. direkte Abflussmessung bei niedrigen Abflüssen und Transformation über Abflusstafeln bei großen Abflüssen. Auch kann die Art der Abflussermittlung zu verschiedenen Zeiten differieren.

Die durchgeführten Auswertungen dienen einer ersten Einordnung der einzelnen Pegel. Falls die Auswertungen bei den Bilanzierungen einen weiteren Bedarf zu detaillierteren Analysen aufzeigen, so werden die Analysen dann jeweils für die entsprechenden Pegel weiter vertieft.

5.2.1.1 Vorgehen bei Pegeln mit einfachen Abflusstafeln

Bei Pegeln, an denen der Wasserstand gemessen und über eine Abflusstafel in Abflüsse umgerechnet wird, ist die Güte der Abflusstafeln ein wichtiger Faktor für die Qualität der Abflüsse. In der Analyse wurden für diese Pegel Abflusstafeln und Messungen im jeweiligen Gültigkeitszeitraum genauer untersucht, um darüber eine Abschätzung ihrer Güte vornehmen zu können. Zur Beurteilung wurden die Messungen aus dem Untersuchungszeitraum 11/1989 bis 10/2007 herangezogen. Falls nicht bekannt war, welche Messungen zur Erstellung der jeweiligen Abflusstafel berücksichtigt wurden, wurden alle Messungen des Untersuchungszeitraumes betrachtet, die im Gültigkeitszeitraum der jeweiligen Abflusstafel liegen, auch Messungen mit sehr großen Abweichungen.

Grundsätzliche Qualitätsmerkmale sind:

- „Stabilität“ bzw. „Variabilität“ der Abflusstafeln über die Zeit
- Häufigkeit und Anzahl der Messungen
- Abweichung der Abflussmesswerte von der zum Zeitpunkt der Messung gültigen Abflusstafel

Bei der Analyse der Abweichungen wurden die Untersuchungen für alle Messungen als auch getrennt für niedrige, mittlere und hohen Abflussbereiche durchgeführt.

Für jeden Pegel werden zuerst allgemeine Informationen, wie z.B. die Anzahl der Abflusstafeln und -messungen und das MQ aufgeführt.

Eine erste Grafik stellt alle im Untersuchungszeitraum gültigen Abflusstafeln mit allen in dem Gültigkeitszeitraum der Tafeln fallenden Messungen in einem W-Q-Diagramm dar. Hier kann eine erste Abschätzung der Variabilität der Abflusstafeln und der Streuungen der Messungen erfolgen.

Eine zweite Grafik (deltaQ-Zeit-Diagramm) stellt die jeweiligen prozentualen Abweichungen des gemessenen Abflusses zu dem sich aus der zum Messzeitpunkt gültigen Abflusstafel ergebenden Abfluss dar. In dieser Darstellung kann neben der allgemeinen Qualität der Abflusstafeln auch eine zeitliche Tendenz in den Abweichungen abgelesen werden und so evtl. festgestellt werden, dass eine Anpassung der Abflusstafel sinnvoll sein könnte.

In einer weiteren Grafik (deltaQ-Q-Diagramm) sind für jeden Pegel die prozentualen Abweichungen des gemessenen Abflusses von der jeweils gültigen Abflusstafel über dem gemessenen Abfluss aufgetragen. Dabei wurden nur Messungen aus dem Untersuchungszeitraum berücksichtigt. In dieser Grafik kann vor allem abgelesen werden, ob die Messungen in einem bestimmten Abflussbereich große Abweichungen zur Abflusstafel aufweisen. In diesem

Abflussbereich ist der mit der Abflusstafel ermittelte Abfluss mit einer größeren Unsicherheit behaftet als in Bereichen mit geringen Abweichungen. Auch Abflussbereiche, die vor allem positive oder negative Abweichungen aufweisen, sind in dieser Grafik zu erkennen. Dies wären Bereiche, in denen die Abflusstafeln evtl. optimiert werden können.

Um die einzelnen Pegel bzgl. ihrer Güte besser vergleichen zu können, wurden aus den prozentualen Abweichungen aller Messungen des Untersuchungszeitraumes jeweils Kennwerte ermittelt, die je Pegel in einer Tabelle zusammengefasst sind. Dies sind die mittlere prozentuale absolute Abweichung der Messungen von der Abflusstafel, die mittlere Abweichung und die Anzahl der Messungen. Diese Werte wurden einmal für alle Messungen im Untersuchungszeitraum ermittelt und jeweils für die Messungen im niedrigen, mittleren und hohen Abflussbereich getrennt. Die mittlere absolute Abweichung gibt dabei einen Anhalt über die Streuung der Messungsabweichungen und damit auf die Zuverlässigkeit der ermittelten Abflüsse. Ein großer Wert bei den mittleren Abweichungen deutet auf eine Abweichung der Messungen in eine Richtung (immer größer oder kleiner als die Abflusstafel) hin. In diesen Bereichen könnte durch Anpassung der Abflusstafel eine bessere Übereinstimmung mit den Messungen erreicht werden.

Im sehr großen Abflussbereich liegen meist nur wenige Messungen vor, so dass die Abflusstafeln hier nur dünn belegt sind. Vor allem für den Extrapolationsbereich der Abflusstafeln ergeben sich damit große statistische Unsicherheiten. Für den Extrapolationsbereich ist deshalb bei der Erstellung der Abflusstafeln nicht nur auf statistische Passgenauigkeit zu achten. Hier sind hydraulisch berechnete Stützstellen bzw. Zwangspunkte wertvoll und sollten bei der Erstellung von Abflusstafeln berücksichtigt werden.

5.2.1.2 Vorgehen bei Pegeln mit einfachen Abflusstafeln und Stauwerten

Werden bei einem Pegel die Wasserstände durch Stauwerte korrigiert, ist ein Vorgehen wie unter Kapitel 5.2.1.1 beschrieben nicht sinnvoll.

Bei der Ermittlung des Abflusses aus den Wasserständen werden die Wasserstände an diesen Pegeln zuerst über die Stauwerte korrigiert. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Wasserstand bei einem vorhandenen Abfluss um den Stauwert gegenüber der Abflusskurve erhöht ist. Der gemessene Wasserstand wird dann zur Ermittlung des Abflusses aus der Abflusstafel zuerst um den aktuellen Stauwert reduziert. Mit diesem korrigierten Wasserstand wird dann über die Abflusstafel der Abfluss ermittelt.

Die Stauwerte können natürliche Variationen der Wasserstand-Abfluss-Beziehung berücksichtigen. Bei Verkrautung ist damit eine im Jahreszyklus schwankende Stauzeitreihe zu erwarten. Dabei sollte der Anstieg kontinuierlich erfolgen. Ein schlagartiges Abfallen der Stauwerte ist z.B. bei Mahd ebenfalls plausibel. In der Schweiz werden die Stauwerte (hier werden sie Verkrautungskurven genannt) dazu genutzt diese Variationen abzubilden. Durch Stauwerte können jedoch auch sonstige Einflüsse auf den Wasserstand, wie z.B. Rückstau-einflüsse aus dem Unterwasser berücksichtigt werden. Dann können z.B. für den Zeitraum

hoher Unterwasserstände zeitvariante Stauwerte angesetzt werden. In den übrigen Zeiträumen wird die Abflusstafel dann ohne Korrekturen des Wasserstandes (bzw. einem Stauwert von Null) angewandt. Für diesen Zweck werden Stauwerte vor allem in Nordrhein-Westfalen genutzt.

Aus den durchgeführten Messungen wurden in dieser Untersuchung die Abweichungen des Wasserstandes zur Abflusstafel ermittelt. Diese entsprechen den Stauwerten der Messungen. Diese wurden dann mit der Stauwertzeitreihe gemeinsam dargestellt. Daraus lässt sich ablesen, ob die Stauwertzeitreihe durch ausreichend Messungen belegt ist und ob die Messungen in etwa auf der Stauwertzeitreihe liegen.

Falls die Wasserstandszeitreihe kontinuierlich durch Stauwerte korrigiert wird, sollte die Stauwertzeitreihe die Messungen entsprechend widerspiegeln. Falls die Stauwertzeitreihe nur in einzelnen kurzen Zeitabschnitten zur Korrektur herangezogen wird, so ist auch nur die Übereinstimmung von Messungen in diesen Zeiträumen von Bedeutung. In den übrigen Zeiträumen ist die Abflusstafel dann wie eine einfache Abflusstafel (siehe Kapitel 5.2.1.1) zu beurteilen.

5.2.1.3 Vorgehen bei Pegeln mit Abflusstafeln und Eta-Werten

Bei sich häufig änderndem Gewässerzustand, wie z.B. bei Verkräutung oder bei häufigen Änderungen der Gerinnehydraulik, wird neben der Korrektur der Wasserstände über Stauwerte auch das Eta-Verfahren angewandt. Bei diesem Verfahren wird die Wasserstand-Abfluss-Beziehung durch zwei Hüllkurven beschrieben (siehe Abbildung 5.5).

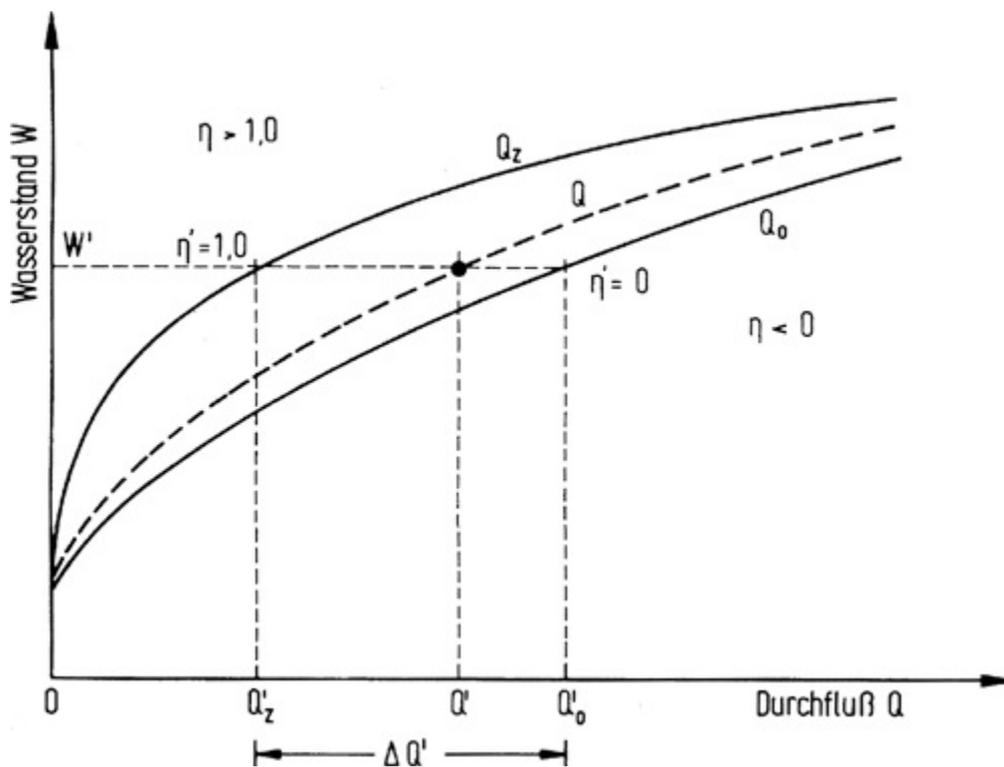


Abbildung 5.5: Durchflussermittlung nach dem Eta-Verfahren

Die obere Kurve (Q_z) kennzeichnet die Abflusskurve für den Fall der maximal wirksamen Durchflussbehinderung, z. B. durch Verkrautung. Die untere Kurve (Q_0), die sogenannte Grundkurve, stellt den Fall ohne Durchflussbehinderung dar. Eine Durchflussmessung Q teilt damit die Strecke $\Delta Q'$ im Verhältnis:

$$\eta = (Q_0' - Q') / \Delta Q'$$

Für jeden Eta-Wert ergibt sich damit eine Abflusskurve.

Für einen gegebenen Wasserstand W und den zugehörigen Werten Q_0 und ΔQ sowie dem Eta-Wert errechnet sich der Abfluss dann über folgende Formel:

$$Q = Q_0 - \eta * \Delta Q$$

Nach Festlegung der Hüllkurven können Messpunkte im Laufe der Zeit durch Veränderungen im Gewässer auch außerhalb der Hüllkurve liegen.

Bei Pegeln, an denen der Abfluss über Abflusstafeln mit zwei Hüllkurven unter Berücksichtigung von Eta-Werten ermittelt wird, wurde zur Analyse ähnlich wie bei Pegeln mit Stauwerten vorgegangen. Neben der Analyse des Verlaufs der Eta-Zeitreihe wurden auch hier die Eta-Werte der Messungen mit der Etawert-Zeitreihe verglichen. Ein plausibler Verlauf der Zeitreihe und eine gute Übereinstimmung der Zeitreihe mit den Messungen deuten auf eine gute Abbildung der Wasserstand-Abfluss-Beziehung hin.

5.2.1.4 Vorgehen bei Pegeln mit direkter Abflussmessung

An Pegeln mit direkter Abflussmessung werden die Abflüsse nicht über Transformation aus den Wasserständen ermittelt, sondern ergeben sich aus den dort installierten Abflussmessanlagen. Es wurden jedoch auch an diesen Pegeln, wie bei Pegeln mit Abflusstafeln, einzelne Messungen z.B. Flügelmessungen oder ADCP-Messungen durchgeführt.

Zur Analyse der Genauigkeit der Abflussmessanlagen wurden die von diesen Messanlagen gelieferten Abflüsse, die den Abflusszeitreihen zugrunde liegen, mit den bei den einzelnen Messungen ermittelten Abflüssen verglichen. Die prozentualen Abweichungen der einzelnen Messungen von den Abflüssen der Abflussmessanlagen zum gleichen Zeitpunkt wurden auch hier sowohl über die Zeit als auch über die Größe des Abflusses aufgetragen. Diese Diagramme ähneln somit dem ΔQ -Zeit-Diagramm bzw. ΔQ - Q -Diagramm der Pegel mit einfachen Abflusstafeln. Sie geben Aufschluss über die Genauigkeit der Abflussmessanlage. Diese Auswertung wurde jeweils für den Abfluss- bzw. Wasserstandsbereich durchgeführt, bei dem die Abflüsse der Messanlage zur Ermittlung der Abflüsse am Pegel berücksichtigt werden.

Bei den Pegeln bei denen die Abflussermittlung je nach Wasserstand bzw. Abfluss über direkte Abflussmessung bzw. Wasserstands-Abfluss-Transformation mittels Abflusstafeln stattfindet, wurde die Qualität der Abflussermittlung jeweils für die Anwendungsbereiche der einzelnen Methoden getrennt ermittelt und daraus eine Gesamtbeurteilung abgeleitet.

5.2.1.5 Ergebnisse der Analyse der einzelnen Pegel

Die Analyse der Pegel bezogen auf die Ermittlung der Abflüsse unterscheidet sich in 4 verschiedenen Typen: einfache Abflusstafeln, Abflusstafeln mit Stau-Werten, Abflusstafeln mit Eta-Werten und direkte Abflussmessung. Die einzelnen Pegel wurden gemäß ihrem Typ nach unterschiedlichen Kriterien untersucht und klassifiziert. Im Folgenden werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst und die einzelnen Pegel gegenübergestellt. Dabei werden die Pegel eines Typs untereinander verglichen und abschließend eine Abschätzung zum Vergleich aller betrachteten Pegel untereinander gegeben.

Details zu den einzelnen Pegeln sind den Ausführungen im Anhang 1 zu entnehmen.

5.2.1.5.1 Pegel mit einfachen Abflusstafeln

Bei Pegeln, bei denen der Abfluss über eine Abflusstafel aus den Wasserständen ermittelt wird, hängt die Qualität der Abflusszeitreihe stark von der Qualität der Abflusstafeln ab. Zum Gesamtvergleich wurden die ermittelten Kennzahlen aus den obigen Untersuchungen herangezogen. Dabei wurden hier die Kennzahlen betrachtet, die sich für den gesamten Abflussbereich ergeben. Die Tabelle 5.3 stellt diese Kennzahlen für die untersuchten Pegel dar. Die Gütekriterien, die eine grobe Klassifizierung der Pegel darstellen, sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Güte		Kriterium
++	Sehr zuverlässig	Abweichung < +-0,3% und absolute Abweichung < 3%
+	zuverlässig	Abweichung < +-0,5% und absolute Abweichung < 5%
o	Leichte Unsicherheiten	Abweichung < +-1,5% und absolute Abweichung < 8%
-	Mittlere Unsicherheiten	Abweichung < +-3% und absolute Abweichung < 10%
--	Große Unsicherheiten	Abweichung > +-3% oder absolute Abweichung > 10%

Tabelle 5.2: Gewählte Gütekriterien für Pegel mit einfachen Abflusstafeln

Diese Klassifizierungen dienen jedoch nur als erster Anhaltswert für die Güte eines Pegels. Für evtl. Anpassungen und ihre Priorisierungen muss die genauere Untersuchung jedes Pegels berücksichtigt werden. Die hier gegebene Beurteilung gibt je Pegel nur eine mittlere Einstufung wieder, die jedoch in einzelnen Zeitabschnitten oder auch Abflussbereichen deutlich variieren kann.

Pegel	Gewässer	mittl. Abweichung dQ [%]	mittl. Abweichung abs dQ [%]	Anzahl Messungen	Güte	Bemerkung
Neuhausen	Rhein	0.1	0.9	15	++	Ab 2005 (Bis 2004 Stauwerte)
Andelfingen	Thur	-0.1	2.0	127	++	2001-2003 Ersatzpegel Alten
Rekingen	Rhein	-0.2	0.7	14	++	Ab 2005 (Bis 2004 Stauwerte)
Untersiggenthal	Aare	-0.7	0.9	13	o	Messungen nur vor 1992 (1992-2004 Stauwerte)
Rheinfelden	Rhein	0.1	1.0	87	++	
Basel-Rheinhalle	Rhein	1.1	2.5	24	o	Ab 1995 Q aus AT ermittelt, keine Messungen vor 2003
Breisach	Rhein	-9.5	10.4	16	--	AT erst ab 1500 m ³ /s gültig
Riegel	Leopoldsk.	-5.9	10.3	39	--	
Kehl-Kronenhof	Rhein	2.7	3.1	51	-	AT erst ab 1500 m ³ /s gültig
Schwaibach	Kinzig	-1.1	9.1	92	-	
Bad Rotenfels	Murg	0.4	5.4	97	o	
Maxau	Rhein	0.2	1.8	443	++	-
Speyer	Rhein	0.1	1.8	242	++	-
Rockenau + Q-Messanlage	Neckar	0.1	6.3	85	o	AT ab 2,30 m
Heidelberg-Ziegelhausen (Q-	Neckar	1.5	7.2	37	o	AT ab 2,21 m

Pegel	Gewässer	mittl. Abweichung dQ [%]	mittl. Abweichung abs dQ [%]	Anzahl Messungen	Güte	Bemerkung
Messanl.)						
Worms	Rhein	0.0	1.8	165	++	-
Frankfurt-Osthafen	Main	0.6	10.8	26	--	-
Raunheim+ Q-Messanlage	Main	4.6	4.6	6	--	AT ab Q>550 m³/s
Mainz	Rhein	-1.1	2.1	208	o	-
Grolsheim	Nahe	1.8	15.6	75	--	12/1996 – 09/2001 keine Messungen
Kaub	Rhein	-0.8	1.6	262	o	-
Leun	Lahn	-1.6	6.1	45	o	-
Kalkofen	Lahn	0.8	4.3	50	o	-
Cochem	Mosel	-3.6	3.6	12	--	Ab 1999 Q aus QMessanlage Alken
Andernach	Rhein	-0.2	1.6	184	++	-
Bonn	Rhein	0.4	2.4	57	+	05/93 - 02/00 keine Messungen
Menden	Sieg	-2.5	3.9	180	-	Auch Stau-Werte über kurze Zeiträume (Rückstau)
Köln	Rhein	1.2	2.5	98	o	-
Opladen	Wupper	-1.5	5.7	152	o	Auch Stau-Werte über kurze Zeiträume (Rückstau)
Düsseldorf	Rhein	-0.2	2.9	99	++	-
Wetter	Ruhr	0.2	3.7	182	+	-
Hattingen	Ruhr	-0.9	2.8	215	o	-
Ruhrort	Rhein	-1.3	3.3	148	o	-
Wesel	Rhein	-2.3	3.2	203	-	-
Rees	Rhein	0.6	2.6	193	o	-
Emmerich	Rhein	1.3	3.1	210	o	-

Tabelle 5.3: Beurteilung der Pegel mit einfachen Abflusstafeln

5.2.1.5.2 Pegel mit Abflusstafeln und Korrekturen (Stau/Eta-Werte)

Pegel mit Berücksichtigung von Stau- oder Eta-Werten sind in der Einzeluntersuchung ebenfalls klassifiziert worden. Eine genaue Entsprechung der Klassen zu den Pegeln mit einfachen Abflusstafeln ist jedoch nicht gegeben.

Die Tabelle 5.4 zeigt die Gütebeurteilung der Pegel mit Stau- bzw. Eta-Werten. Da die Beurteilung aufgrund visueller Plausibilitätskontrollen erfolgte und damit subjektivem Charakter

unterliegen, sind die Pegel hier nur in drei Klassen eingeteilt worden: + = zuverlässig, o = leichte Unsicherheiten und – = mittlere Unsicherheiten.

Pegel	Gewässer	Art	Güte	Bemerkung
Neuhausen	Rhein	stau	o	
Rekingen	Rhein	stau	o	
Untersiggenthal	Aare	stau	-	Keine Messungen für Zeitraum mit Stauwerten
Menden	Sieg	stau	o	Lediglich kurze Rückstauzeiten über Stauwerte korrigiert
Opladen	Wupper	stau	-	Lediglich kurze Rückstauzeiten über Stauwerte korrigiert
Neubrück	Ertf	eta	+	
Haltern	Lippe	eta	-	
Schermbeck 1	Lippe	eta	o	

Tabelle 5.4: Beurteilung der Pegel mit Abflusstafeln und Stau-/Eta-Werten

5.2.1.5.3 Pegel mit Abflussmessenanlagen

An Pegeln mit Abflussmessenanlage wird meist eine kombinierte Abflussermittlung je nach Wasserstand über direkte Abflussmessungen oder Umrechnung über Abflusstafeln vorgenommen. Bei hohen Wasserständen wird der Abfluss über eine W-Q-Transformation mittels Abflusstafel ermittelt, bei niedrigen Wasserständen liefert die Abflussmessenanlage die Abflüsse. Die Güte der Transformation über die Abflusstafel ist an diesen Pegeln bereits ermittelt worden. Die Analyse der Qualität der Abflussmessenanlage wurde durch den Vergleich der Messungen mit der Abflusszeitreihe durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Hier sind die Pegel in drei Klassen eingeteilt worden: + = zuverlässig, o = leichte Unsicherheiten und – = mittlere Unsicherheiten. Es zeigt sich, dass die aus Abflussmessenanlagen ermittelten Abflüsse eine geringe Genauigkeit aufweisen. Für Heidelberg konnte keine Analyse durchgeführt werden, da die Abflusszeitreihe keine entsprechenden Abflüsse enthält.

Pegel	Gewässer	Güte	Bemerkung
Cochem/Alken	Mosel	-	Umrechnung von der Abflüsse Alken unklar, nur 2 Messungen
Raunheim	Main	-	Messungen nur in einem kurzen Zeitraum
Rockenau	Neckar	-	Messungen erst ab 2005 auswertbar
Heidelberg-Ziegelh.	Neckar	?	Abflusszeitreihe enthält keine entsprechenden Abflüsse

Tabelle 5.5: Beurteilung der Pegel mit direkter Abflussmessung

Die Gesamtgüte des Pegels ergibt sich aus der Güte der Abflussermittlung über die Abflusstafel gemeinsam mit der Güte der direkten Abflussmessung.

5.2.1.5.4 Übersicht zur Beurteilung aller Hauptpegel

Im Folgenden werden alle Pegel mit einer Gesamtbewertung versehen. Dabei werden die Pegel in fünf Qualitätsklassen eingeteilt. Die Tabelle 5.6 listet diese Klassen auf. Die Klassen

dienen als grobe Orientierung zur Beurteilung der Qualität und Zuverlässigkeit der resultierenden Abflusszeitreihen an dem entsprechenden Pegel. Für eine detaillierte Beurteilung der Qualität sind jedoch die einzelnen Untersuchungen zu den Pegeln immer mit zu berücksichtigen, da die Gesamtbeurteilung nicht die einzelnen Stärken und Schwächen eines Pegels berücksichtigen kann. Z.B. kann ein Pegel im niedrigen Abflussbereich sehr gute Eigenschaften aufweisen und nur bei sehr großen Abflüssen signifikante Unsicherheiten beinhalten, oder ein Pegel kann nur in einem kurzen Zeitraum Defizite aufweisen, im Mittel jedoch zuverlässige Abflusszeitreihen liefern.

Klasse	Beurteilung	Beispiel
++	Pegel mit sehr zuverlässiger Abflusszeitreihe	Einfache Abflusstafeln mit sehr geringer Abweichung Stau/Eta-Zeitreihen mit plausibel erscheinendem Verlauf und sehr geringen Abweichungen der Messungen
+	Pegel mit zuverlässiger Abflusszeitreihe	Einfache Abflusstafeln mit geringer Abweichung Stau/Eta-Zeitreihen mit plausibel erscheinendem Verlauf und geringen Abweichungen der Messungen
o	Pegel mit Abflusszeitreihe, die bereits leichte Unsicherheiten aufweist	Einfache Abflusstafeln mit mittleren Abweichungen Stau/Eta-Zeitreihen mit meist plausibel erscheinendem Verlauf und leichten Abweichungen der Messungen
-	Pegel mit mittleren Unsicherheiten in der Abflusszeitreihe	Einfache Abflusstafeln mit deutlichen Abweichungen Stau/Eta-Zeitreihen mit unplausibel erscheinendem Verlauf oder starken Abweichungen der Messungen
--	Pegel mit unsicherer Abflusszeitreihe	Einfache Abflusstafeln mit großen Abweichungen Stau/Eta-Zeitreihen mit unplausiblem Verlauf und starken Abweichungen der Messungen

Tabelle 5.6: Gewählte Klassen für die Gesamtbeurteilung der Pegel

In Tabelle 5.7 wird für alle Hauptpegel des Untersuchungsgebietes eine Gesamtbeurteilung dargestellt. Falls ein Pegel bei unterschiedlichen Typen beurteilt wurde, so wurde das Gesamturteil aus den einzelnen Teilergebnissen ermittelt.

Pegelname	Gewässer	Güte	Bemerkung
Neuhausen	Rhein	+	
Andelfingen	Thur	++	
Rekingen	Rhein	+	
Untersiggenthal	Aare	-	
Rheinfelden	Rhein	++	
Basel-Rheinhalle	Rhein	o	
Breisach	Rhein	--	AT erst ab 1500 m ³ /s gültig
Riegel	Leopoldsk.	--	
Kehl-Kronenhof	Rhein	o	AT erst ab 1500 m ³ /s gültig
Schwaibach	Kinzig	-	
Bad Rotenfels	Murg	o	
Maxau	Rhein	++	
Speyer	Rhein	++	
Rockenau + Q-Messanlage	Neckar	o	AT o, Q-Messanlage -
Heidelberg-Ziegelhausen (Q-Messanl.)	Neckar	o	AT o, Q-Messanlage unklar
Worms	Rhein	++	
Frankfurt-Osthafen	Main	--	
Raunheim+ Q-Messanlage	Main	--	AT --, Q-Messanlage -
Mainz	Rhein	o	
Grolsheim	Nahe	--	
Kaub	Rhein	o	
Leun	Lahn	o	
Kalkofen	Lahn	o	
Cochem	Mosel	--	AT --, Q-Messanlage -
Andernach	Rhein	++	
Bonn	Rhein	+	
Menden	Sieg	-	
Köln	Rhein	o	
Opladen	Wupper	o	
Neubrück	Erft	+	
Düsseldorf	Rhein	++	
Wetter	Ruhr	+	
Hattingen	Ruhr	o	
Ruhrort	Rhein	o	
Wesel	Rhein	-	

Pegelname	Gewässer	Güte	Bemerkung
Haltern	Lippe	-	
Schermbeck 1	Lippe	o	
Rees	Rhein	o	
Emmerich	Rhein	o	
Lobith (alte Methode)	Rhein	--	
Lobith (neue Methode)	Rhein	o	

Tabelle 5.7: Gesamtbeurteilung der Pegel

Einen Sonderfall in der Beurteilung der Pegel nimmt der Pegel Lobith ein, da hier zwei verschiedene Methoden der Abflussermittlung untersucht wurden. Beide Methoden unterscheiden sich von den bei den übrigen Pegeln angewendeten Methoden, so dass hier eine individuelle Beurteilung durchgeführt wurde. Die alte Methode bestand aus einer Abflussermittlung aus Wasserständen an zwei Stellen, die neue Methode arbeitet mit Berücksichtigung instationärer Abflussverhältnisse (Erosion, Hysterese). Bei beiden Methoden wurde die Beurteilung durch den Vergleich der bei den Messungen ermittelten Abflüsse zu den Abflüssen aus der Abflusszeitreihe durchgeführt.

Die Analyse der Pegel hat gezeigt, dass in der Qualität und damit in der Zuverlässigkeit der resultierenden Abflusszeitreihen deutliche Unterschiede vorliegen. Im Allgemeinen weisen die Pegel der Nebengewässer größere Unsicherheiten als die Rheinpegel auf. Die Rheinpegel, von einzelnen Ausnahmen abgesehen, besitzen eine recht gute Qualität.

Die Ursachen für die unterschiedliche Qualität sind vielfältig und oft nicht genau bekannt. An einigen Pegeln ist sie auf die speziellen Randbedingungen zurückzuführen, welche kaum geändert werden können, an anderen könnten vermutlich modifizierte Auswertungen der Messungen und Transformationen und/oder eine häufigere Aktualisierung der Abflusstafeln eine Verbesserung bedingen.

Die Auswertungen und Klassifikationen beinhalten ebenfalls Unsicherheiten, die Klassenwahl ist zum Teil subjektiv, erleichtert aber die Einschätzung der Zuverlässigkeit. Sofern die parallel und unabhängig zu den hier beschriebenen Auswertungen durchgeführten Bilanzuntersuchungen die Güteeinschätzungen erhärten, erscheint eine Anpassung der WQ-Tafeln, Berechnungen etc. sinnvoll.

5.2.2 Analyse Abflussmessungen

Die Beurteilung der Qualität Abflusstafeln wurde im Wesentlichen über den Vergleich von durchgeführten Abflussmessungen mit den Abflusstafeln durchgeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die bei den Abflussmessungen ermittelten Werte (Wasserstand und Ab-

fluss) die Wirklichkeit gut abbilden. Die Genauigkeit der Abflusstafeln ist damit stark von der Genauigkeit der Abflussmessungen abhängig. Jedoch können bereits bei den Messungen evtl. Abweichungen vorliegen. Diese lassen sich allerdings schlecht nachweisen. Die Genauigkeit der Abflussbestimmung lässt sich aufgrund der Messergebnisse nicht genauer festlegen. Die in den Messungen angegebenen Wasserstände sollten eigentlich immer identisch zu den Wasserständen aus der Zeitreihe sein. Eine Auswertung einzelner Pegel zeigte jedoch, dass dies nicht immer der Fall ist. Kleinere Abweichungen können durch ungenaue Uhrzeit bzw. über den Messzeitraum gemittelte Wasserstände verursacht sein. Bei einigen Messungen traten jedoch auch Abweichungen von über 10 cm auf, die auf einen Fehler hindeuten. Ob die Ursache nun eine falsche Uhrzeit (dann wäre die Messung zur Abflusstafel-erstellung brauchbar) oder ein falscher Wasserstand (dann verfälscht diese Messung die Abflusstafel) ist, kann aufgrund der vorliegenden Daten nicht beurteilt werden. Es wird jedoch den Pegelbetreibern empfohlen, ihre Messungen diesbezüglich zu überprüfen und ungültige Messungen als solche zu markieren und nicht bei der Erstellung von Abflusstafeln zu berücksichtigen. In Abbildung 5.6 ist exemplarisch die Auswertung für den Pegel Wesel dargestellt. Die meisten Messungen weisen nur geringe Abstände des gemessenen Wasserstands zum Wasserstand aus der Zeitreihe auf. Es liegen jedoch einzelne Messungen mit über 30 cm großen Abweichungen vor.

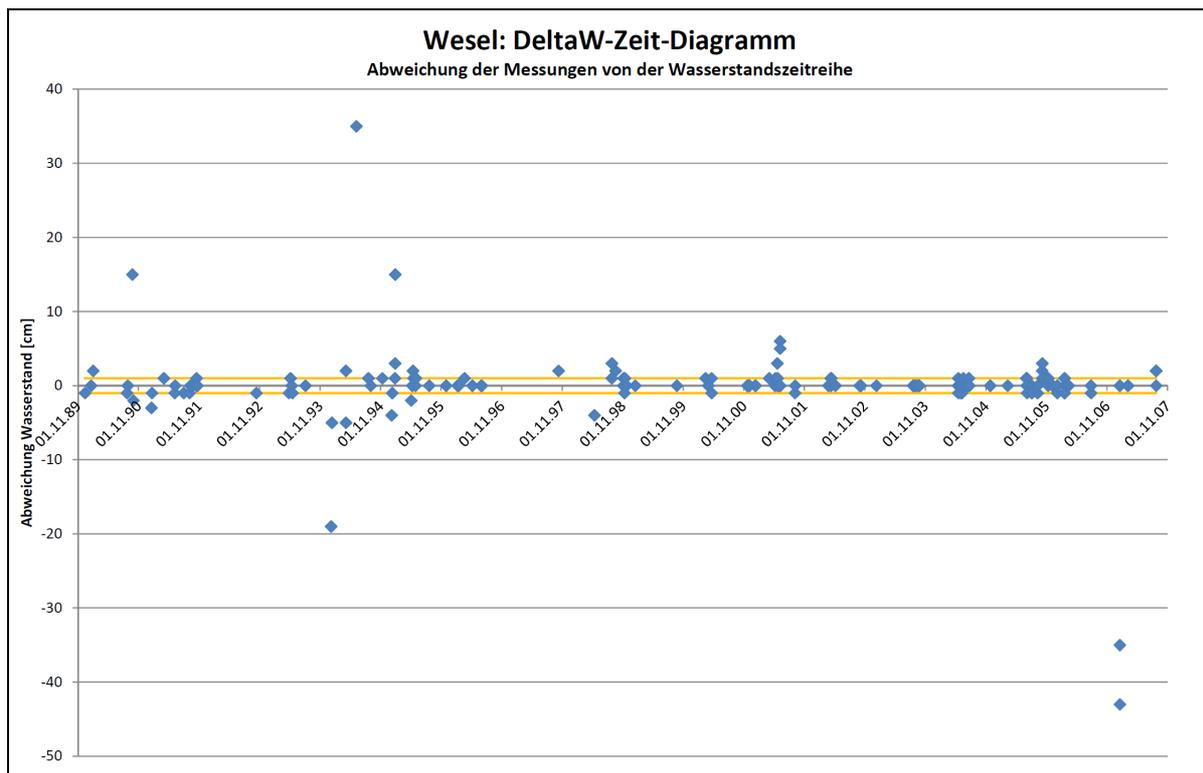


Abbildung 5.6: Abweichungen der gemessenen Wasserstände von der Wasserstandszeitreihe am Pegel Wesel

6 Überblickbilanz

Nachdem bisher vor allem die Datenbasis und die Grundlagen zur Abflussermittlung genauer analysiert wurden, wird nun die Bilanzreinheit in den einzelnen Bilanzbereichen des Rheins näher untersucht.

Die Auswertung der Abflusszeitreihen bzgl. ihrer Bilanzreinheit erfolgt in mehreren Stufen. Als Grundlage für alle Bilanzauswertungen wurden die Zeitreihen gewählt, bei denen alle Lücken gefüllt sind. Zuerst wird eine Gesamtbilanz über den Rhein und große Zeiträume analysiert, um so einen Überblick über das Gesamtsystem zu erhalten und mögliche Probleme zu ermitteln. Anschließend wird der Fokus sowohl zeitlich als auch räumlich auf kleinere Bereiche gelegt. Bei diesen Untersuchungen zeigen sich dann genauer die Problembereiche in den Abflusszeitreihen, an denen dann eine Optimierung durchgeführt wird. Über einen iterativen Prozess werden dann die Abflusszeitreihen bzgl. der Bilanzreinheit optimiert.

Zur ersten Abschätzung der Bilanzreinheit der Abflusszeitreihen wurden für die Rheinpegel über den gesamten Untersuchungszeitraum mittlere Abflüsse und Abflussspenden ermittelt und ausgewertet. Dabei wurden die Werte jeweils über den Rhein-Kilometer als auch über das Einzugsgebiet aufgetragen. Für den Pegel Lobith wurden dabei sowohl die neuen als auch die nach alter Methode ermittelten Abflusszeitreihen untersucht.

Die Betrachtung mittlerer Abflüsse aus dem gesamten Untersuchungszeitraum berücksichtigt nicht die Fließzeiten im System. Exakt wäre eine Ermittlung der mittleren Abflüsse aus um die jeweilige Fließzeit gegeneinander verschobenen Zeiträumen. Zwischen zwei Rheinpegeln liegt die Fließzeit zwischen 2 Stunden und bis zu 15 Stunden. Unter der Annahme, dass sich die Abflüsse im berücksichtigten Zeitraum um den mittleren Abfluss von den Abflüssen im korrekterweise zu berücksichtigten Zeitraum unterscheiden, liegt der Fehler in der mittleren Abflussermittlung eines Rheinpegels bezogen auf seinen Nachbarpegel für den Gesamtuntersuchungszeitraum bei 0,01 ‰ bis 0,1 ‰. Betrachtet man kürzere Zeiträume, so steigt der Fehler proportional an. Bei der Betrachtung von 6-Jahres-Zeiträumen liegt er bei 0,04 ‰ bis 0,3 ‰, bei Jahreszeiträumen bei 0,2 ‰ bis 1,7 ‰. Bei Untersuchungen, die mittlere Abflüsse betrachten, sind die Fließzeiten damit vernachlässigbar.

In Abbildung 6.1 ist der Verlauf des mittleren Abflusses über die Länge des Rheins aufgetragen. Der Abfluss des Rheins sollte mit zunehmender Rheinkilometrierung immer zunehmen. Nimmt er von einem Pegel zum nächsten hin ab, so deutet dies auf ein Bilanzproblem in diesem Bereich hin. Abnehmende mittlere Abflüsse liegen hier bei folgenden Abschnitten vor:

- Breisach – Kehl-Kronenhof
- Andernach – Bonn
- Rees – Emmerich
- Emmerich – Lobith (alt)

Die nach neuem Verfahren am Pegel Lobith ermittelten Abflüsse am Niederrhein sind deutlich plausibler als die alten, bei denen in Lobith weniger Wasser abfließt als in Emmerich. Jedoch sind auch die neuen Abflüsse in Lobith im Mittel noch geringer als die Abflüsse in Rees.

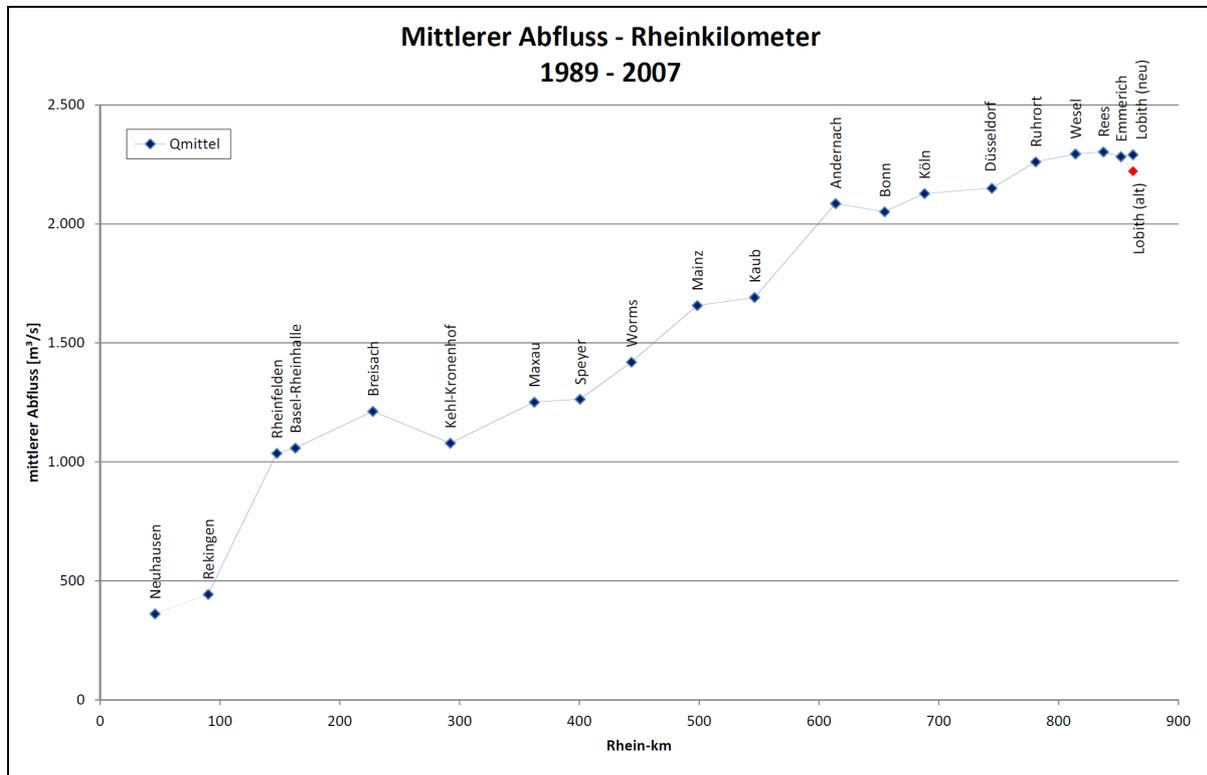


Abbildung 6.1: Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Länge des Rheins für den gesamten Untersuchungszeitraum

Neben der Auswertung für den gesamten Zeitraum wurden die mittleren Abflüsse auch für jeweils ein Drittel (6 Jahre) des Untersuchungszeitraumes ermittelt, um so die Variabilität der mittleren Abflüsse abschätzen zu können. Die Abbildung 6.2 zeigt neben dem mittleren Abfluss für den Gesamtzeitraum auch die mittleren Abflüsse für die einzelnen 6-Jahres-Zeiträume. Desweiteren sind die Abweichungen der 6-Jahres-Zeiträume vom Mittelwert aufgetragen.

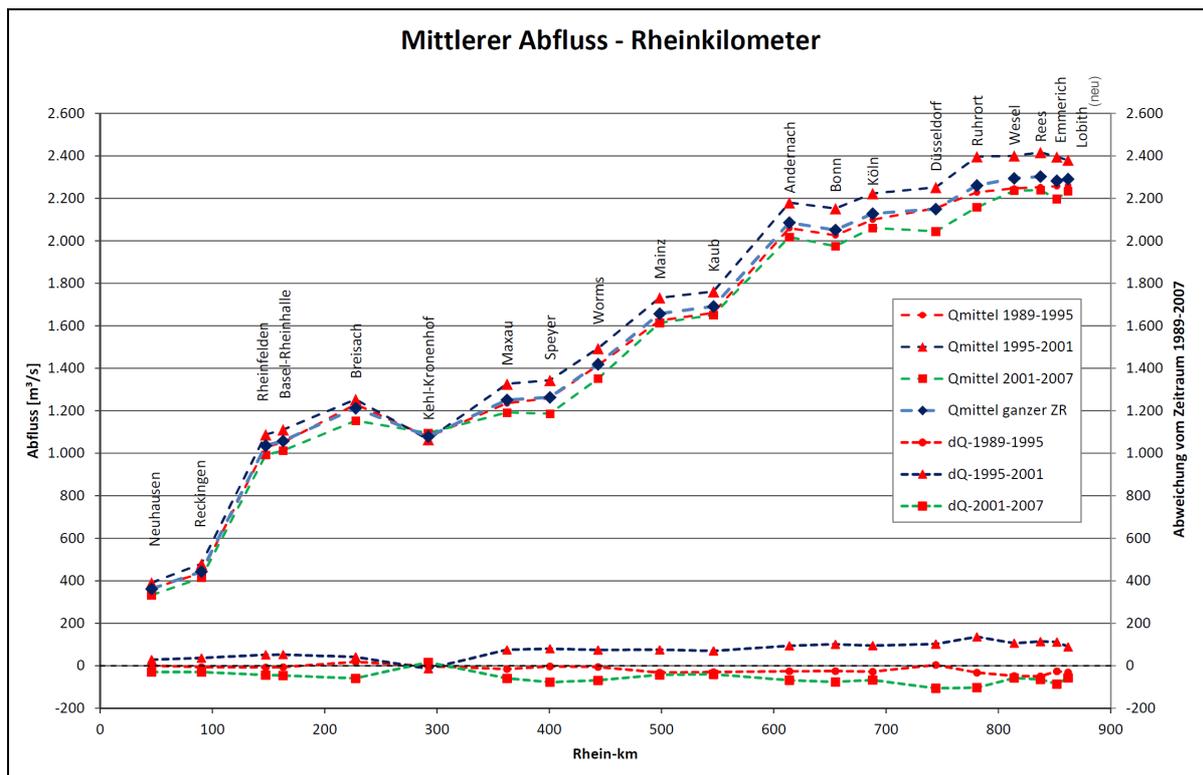


Abbildung 6.2: Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Länge des Rheins für den gesamten Untersuchungszeitraum und 6-Jahres-Zeiträume

Es zeigt sich, dass innerhalb der einzelnen 6-Jahres-Zeiträume der mittlere Abfluss an den einzelnen Pegeln deutlich unterschiedlich war. Im Zeitraum 01.11.1989 – 01.11.1995 lagen die Abflüsse ungefähr auf dem Niveau der mittleren Abflüsse des gesamten Untersuchungszeitraumes. Im Zeitraum 01.11.1995 – 01.11.2001 waren die mittleren Abflüsse dann geringer und im Zeitraum von 01.11.2001 – 01.11.2007 größer als im gesamten Untersuchungszeitraum.

Der Abfluss im Rhein steigt nicht kontinuierlich über die Rheinkilometrierung an. An den Mündungen der großen Nebengewässer sind auf kurzer Distanz starke Anstiege zu verzeichnen. Werden nun die Abflüsse statt über die Lauflänge des Rheins über die zugehörigen Einzugsgebiete aufgetragen, so müsste sich ein deutlich gleichmäßigerer Verlauf der Kurve darstellen. Es ist dabei zu beachten, dass dabei auch Einzugsgebietsgrößen am Rhein dargestellt werden, die in der Realität nicht am Rhein auftreten, da sie durch ein Nebengewässer abgebildet werden. In Abbildung 6.3 ist diese Grafik dargestellt. Auch hier stellen sich die drei bereits oben erwähnten Bereiche heraus, an denen die mittleren Abflüsse unplausibel erscheinen. In dieser Ansicht lässt sich aber bereits besser erkennen, welcher Pegel wahrscheinlich die größeren Korrekturen erfordert. Am Oberrhein scheint vor allem der Pegel Breisach zu große Abflüsse aufzuweisen. Der Pegel Bonn weist zu niedrige Abflüsse auf und am Niederrhein bei Rees, Emmerich und Lobith erscheinen die Abflüsse auch unplausibel. Ab Wesel liegen die Rheinpegel recht dicht beieinander und es gibt auch quasi keine Zuflüsse. Dies führt zu einer gewissen Redundanz von Messungen, so dass sich hier „Fehler“ bemerkbar machen, die bei anderen Pegeln mit größeren Zuflüssen nicht so deut-

lich auffallen. Im restlichen Bereich des Rheins ist jedoch ein recht homogener Verlauf der Abflüsse gegeben.

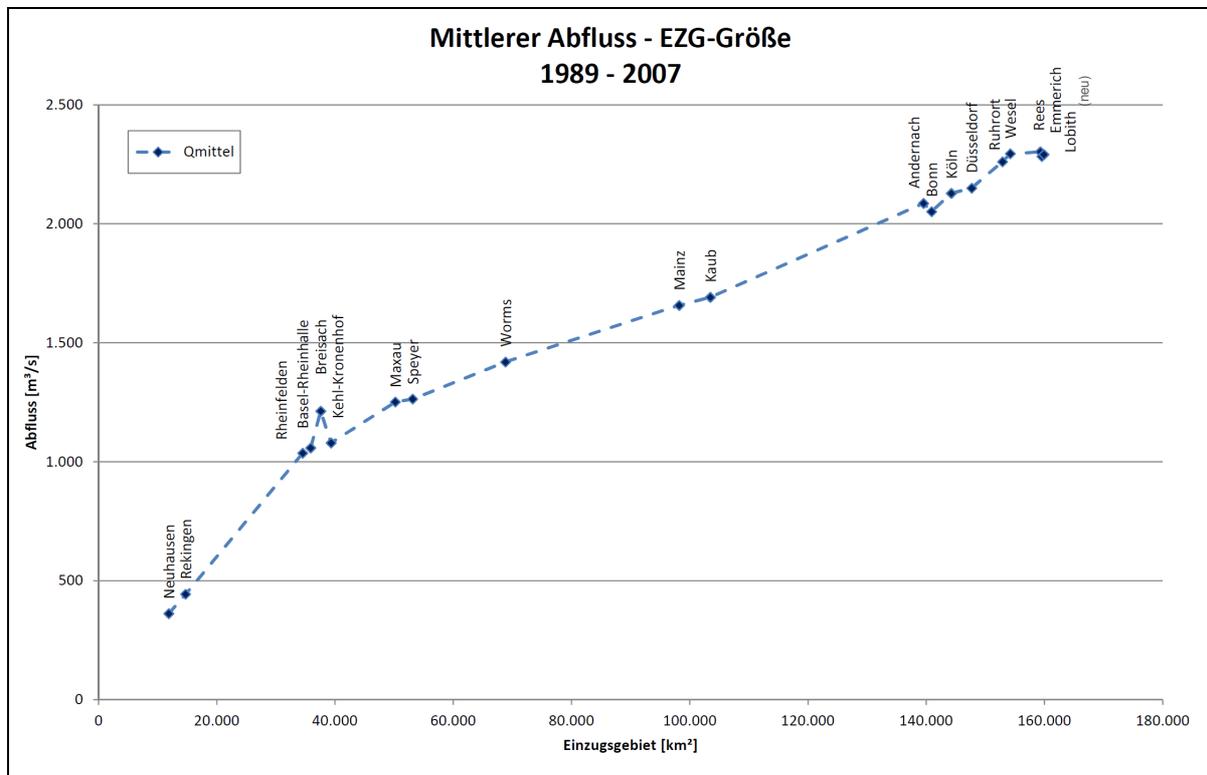


Abbildung 6.3: Mittlerer Abfluss an den Rheinpegeln aufgetragen über die Einzugsgebietsgröße für den gesamten Untersuchungszeitraum

In Abbildung 6.4 ist statt des Abflusses die Abflussspende über dem Einzugsgebiet und in Abbildung 6.5 über den Rhein-Kilometern aufgetragen. Auch hier zeigen sich die Problembe-
reiche am Pegel Breisach und am Niederrhein, wobei dies in Abbildung 6.4 deutlicher zu erkennen ist.

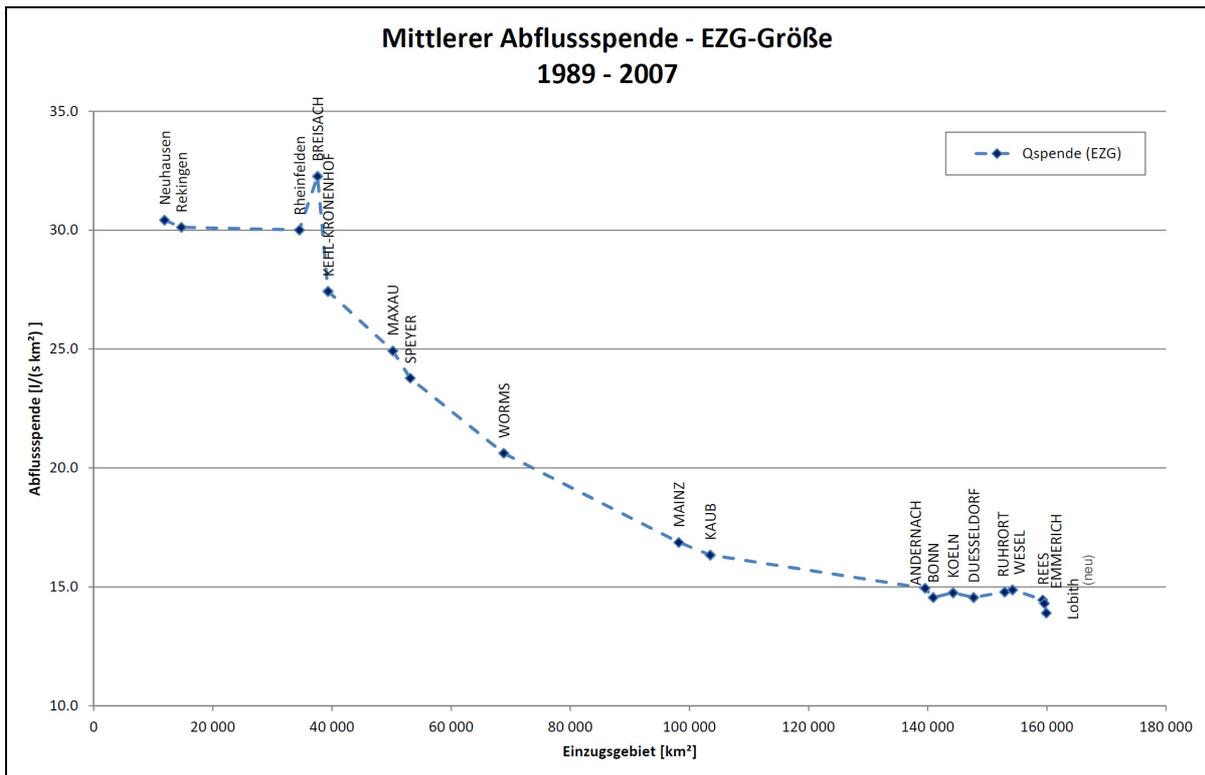


Abbildung 6.4: Mittlere Abflusspende an den Rheinpegeln aufgetragen über die Einzugsgebietsgröße für den gesamten Untersuchungszeitraum

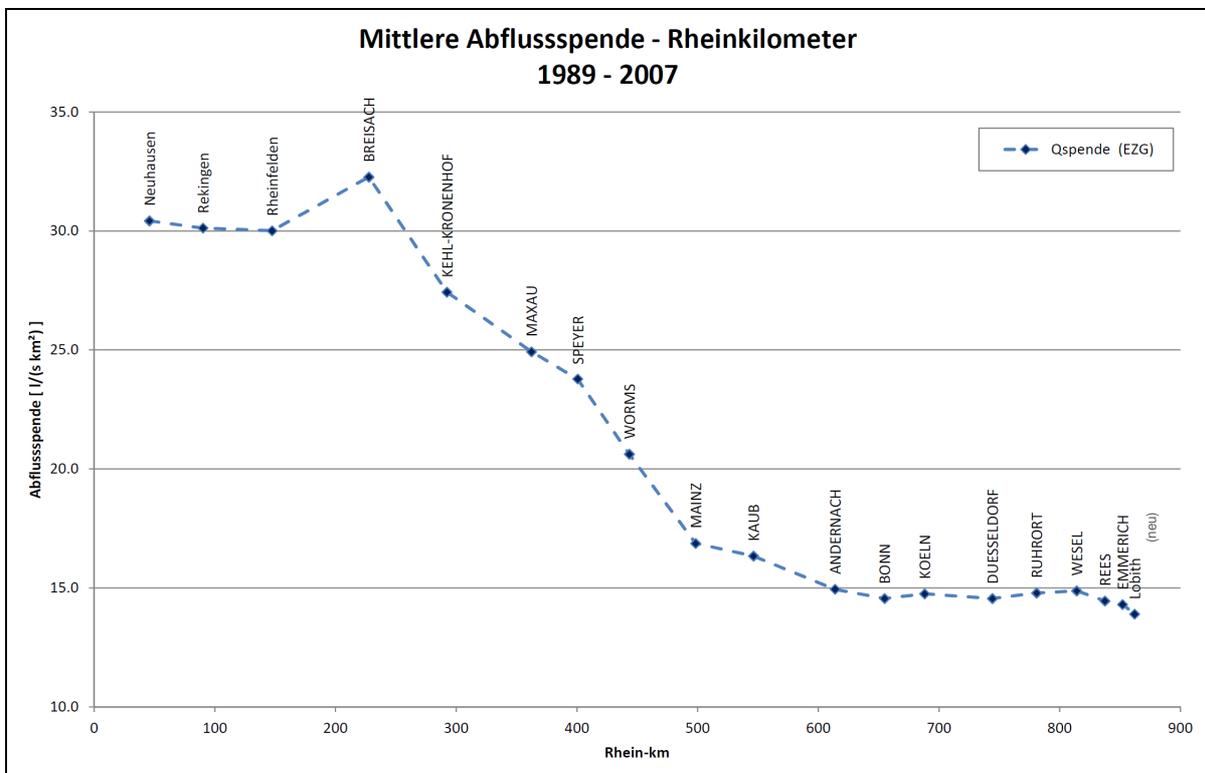


Abbildung 6.5: Mittlere Abflusspende an den Rheinpegeln aufgetragen über Rhein-Kilometer für den gesamten Untersuchungszeitraum

In der folgenden Tabelle sind die sich aus der Untersuchung ergebenden mittleren Werte an den Rheinpegeln aufgeführt:

Pegel	Rhein- km	AEO [km ²]	Mittlerer Abfluss [m ³ /s]			
			1989- 2007	1989- 1995	1995- 2001	2001- 2007
Neuhausen	45.8	11.887	362	362	390	332
Rekingen	90.2	14.718	443	437	480	414
Rheinfelden	147.4	34.526	1.036	1.028	1.088	992
Basel-Rheinhalle	164.3	35.897	1.058	1.051	1.111	1.012
Breisach	227.5	37.575	1.212	1.231	1.254	1.153
Kehl-Kronenhof	292.2	39.330	1.079	1.077	1.065	1.095
Maxau	362.3	50.196	1.251	1.236	1.326	1.192
Speyer	400.6	53.131	1.263	1.260	1.344	1.186
Worms	443.4	68.827	1.419	1.414	1.493	1.351
Mainz	498.3	98.206	1.657	1.625	1.732	1.614
Kaub	546.2	103.488	1.691	1.661	1.761	1.651
Andernach	613.8	139.549	2.086	2.060	2.180	2.018
Bonn	654.8	140.901	2.051	2.026	2.152	1.975
Köln	688.0	144.232	2.128	2.100	2.223	2.061
Düsseldorf	744.2	147.680	2.150	2.154	2.252	2.044
Ruhrort	780.8	152.895	2.261	2.228	2.396	2.157
Wesel	814.0	154.210	2.294	2.246	2.400	2.236
Rees	837.4	159.300	2.303	2.253	2.416	2.239
Emmerich	851.9	159.555	2.283	2.257	2.395	2.197
Lobith (neu)	862.2	159.896	2.291	2.259	2.380	2.234
Lobith (alt)			2.222	2.163	2.333	2.172

Tabelle 6.1: Mittlere Abflüsse an den Rheinpegeln

7 Bilanzanalysen und Modifikationen der Zeitreihen

In Kapitel 7 wird die Analyse der Bilanzreinheit für den kompletten Untersuchungszeitraum geprüft und sich daraus ergebende Anpassungen an Abflusstafeln respektive Abflusszeitreihen durchgeführt.

Die bisherigen Ausführungen und Analysen zeigen, dass die Bilanzreinheit bei den derzeitigen Abflusszeitreihen nicht gegeben ist, so dass diese detailliert geprüft und ggf. datenbasiert modifiziert werden sollen. In einem ersten Schritt wird die Bilanzreinheit geprüft und Bilanzabschnitte mit Verbesserungsbedarf bestimmt. Diese Bilanzabschnitte werden genauer untersucht und die Abflusszeitreihen, falls mit den Grundlagendaten zu belegen, entsprechend angepasst. Abschließend wird die Bilanzreinheit erneut geprüft.

Zuerst wird das methodische Vorgehen zur Bilanzanalyse und zur Anpassung der Zeitreihen näher erläutert.

Anschließend wird die summarische Bilanzanalyse synoptisch für den gesamten untersuchten Rhein dargestellt. Auch die sich daraus ergebenden ersten Anpassungen werden erläutert und die Auswirkungen aufgeführt.

Im Weiteren werden in diesem Bericht alle Bilanzräume des Rheins einzeln auf ihre Bilanzreinheit untersucht. Bei Bilanzabschnitten mit größeren Bilanzfehlern wird dann mittels der zur Verfügung stehenden Grundlagendaten nach möglichen Ursachen für den Bilanzfehler gesucht und diese entsprechend korrigiert.

Abschließend werden die erfolgten Anpassungen wiederum summarisch bewertet und können so mit der ursprünglichen Bilanzanalyse verglichen werden.

7.1 Methodisches Vorgehen

Die Bilanz eines Gewässerabschnittes ergibt sich aus dem von oberhalb kommenden Zufluss und den gesamten seitlichen Zuflüssen des Zwischengebietes im Vergleich zum Abfluss am unteren Pegel des Gewässerabschnittes. Dabei müssen je nach betrachtetem Zeitraum evtl. Translation und Retention entsprechend berücksichtigt werden.

Eine exakte Kenntnis der in der Realität auftretenden Abflüsse ist nicht möglich. Für einen Bilanzbereich liegen jeweils Abflussganglinien des oberen und des unteren Pegels vor und von einzelnen Nebengewässern (siehe Abbildung 7.1).

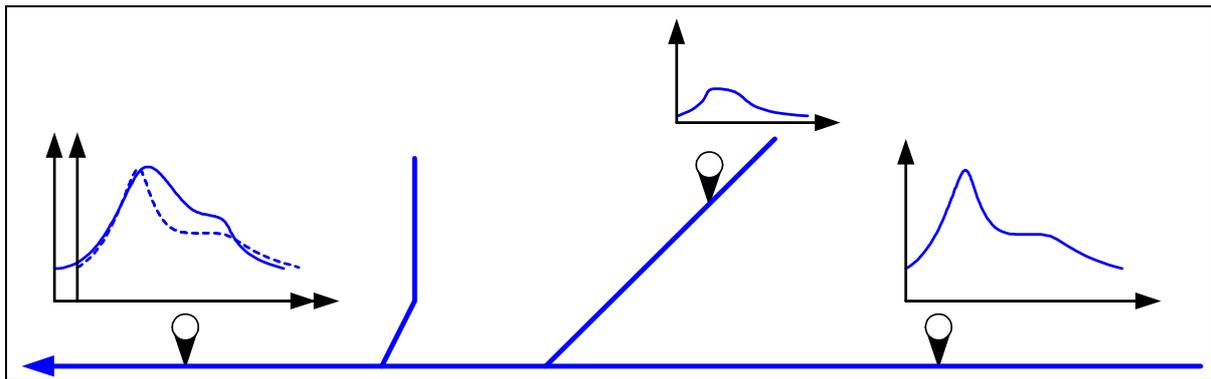


Abbildung 7.1: Schema zur Bilanzermittlung, Eingangsgrößen

Zur Überprüfung der Bilanzreinheit eines Abschnittes fehlen systembedingt jedoch weitere Informationen, die geeignet berechnet bzw. abgeschätzt werden müssen. Durch die in die Untersuchung einbezogenen Pegel der in diesem Abschnitt mündenden Nebengewässer ist nicht der gesamte Zufluss aus diesem Gewässer abgebildet. Im Bilanzabschnitt münden evtl. weitere Nebengewässer, für die keine Abflussdaten vorliegen, die Pegel der Nebengewässer liegen nicht direkt an der Mündung und decken so nicht das ganze Einzugsgebiet des Nebengewässers ab und auch das direkte Einzugsgebiet des Rheinabschnitts trägt zum Abfluss bei (siehe Abbildung 7.2, rote Elemente).

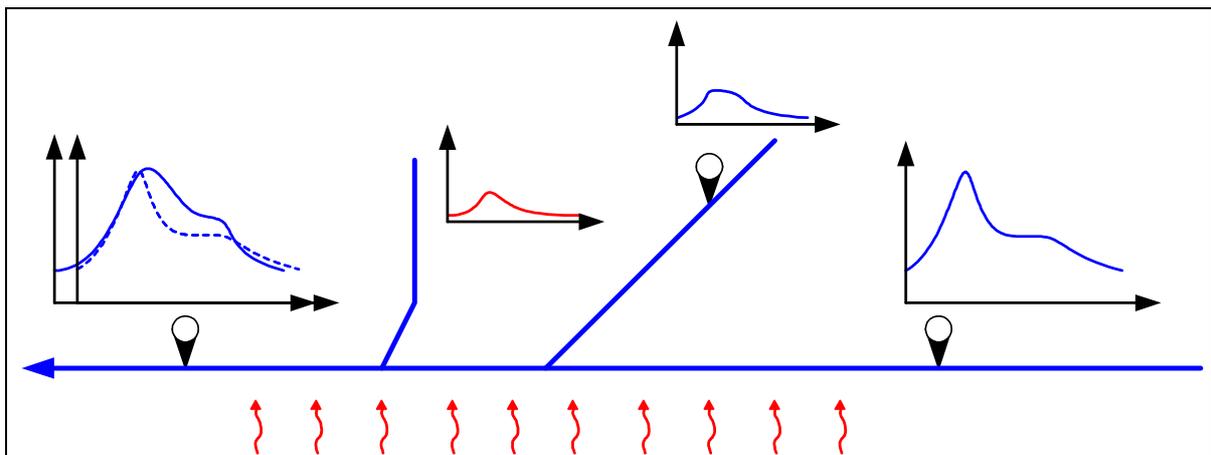


Abbildung 7.2: Schema zur Bilanzermittlung, Eingangsgrößen und abgeleitete Größen

Diese Abflussgrößen müssen aus den vorhandenen Daten sinnvoll abgeleitet werden, bevor eine Bilanzanalyse durchgeführt werden kann. Der Zwischengebietszufluss in einem Bilanzabschnitt wird durch entsprechende Faktoren aus den Abflüssen der Nebengewässer abgeleitet. Die Translation wird über eine mittlere Fließgeschwindigkeit abgeschätzt. Die Abflusszeitreihen der einzelnen Pegel werden dann entsprechend der Fließzeit verschoben.

Auf die Ermittlung der Faktoren und Fließzeiten wird in Kapitel 7.2.1 näher eingegangen.

Zur Berechnung der Bilanz werden nun für den jeweiligen Bilanzabschnitt für jeden Zeitschritt vom Abfluss am unteren Pegel die Abflüsse des oberen Pegels und der Nebenpegel abgezogen. Diese werden vorher entsprechend der Fließzeit verschoben und evtl. um einen

Faktor zur Berücksichtigung des Restzwischengebietes erhöht. Damit ergibt sich am unteren Pegel eine Abflussdifferenzenzeitreihe, die wie folgt ermittelt wird:

$$Q_{\text{diff}}(t) = Q_{\text{unten}}(t) - Q_{\text{oben}}(t - \Delta t_{\text{oben}}) - \sum_{\text{NG}} (\text{Fakt}_{\text{NG}} * Q_{\text{NG}}(t - \Delta t_{\text{NG}}))$$

mit $Q_{\text{unten}}(t)$: Abfluss am unteren Pegel zum Zeitpunkt t
 $Q_{\text{oben}}(t - \Delta t_{\text{oben}})$: Abfluss am oberen Pegel zum Zeitpunkt $t - \Delta t_{\text{oben}}$
 Fakt_{NG} : Faktor zur Berücksichtigung des Restzwischengebietes
 $Q_{\text{NG}}(t - \Delta t_{\text{NG}})$: Abfluss am Pegel des Nebengewässers zum Zeitpunkt $t - \Delta t_{\text{NG}}$
 Δt_{oben} : Fließzeit vom oberen Pegel bis zum unteren Pegel
 Δt_{NG} : Fließzeit vom Pegel des Nebengewässers bis zum unteren Pegel

Diese Differenzenzeitreihe dient nun als Grundlage der Bilanzanalyse. Sie müsste im Zwischengebiet addiert werden, um eine ausgeglichene Bilanz zu erhalten. Theoretisch sollte die Differenzenzeitreihe bei bilanzreinen Abflüssen mit exakter Abbildung des Abflussgeschehens (z.B. Translation, Retention) konstant Null sein. In dieser Untersuchung ist dies natürlich nicht gegeben und kann auch nicht das angestrebte Ziel sein. Kleinere Schwankungen aufgrund der überschläglichen Abschätzung der Fließzeit, der nicht berücksichtigten Retention und der abgeschätzten Abflüsse des nicht durch Pegel abgedeckten Resteinzugsgebietes sind auch bei gegebener Bilanzreinheit unumgänglich. Eine Differenzenzeitreihe, die um Null schwankt, ist jedoch ein Beleg für eine Bilanzreinheit der Abflüsse in diesem Abschnitt. Auch der Mittelwert der Differenz über einen größeren Zeitraum dient als Kennzahl für die vorliegende Bilanzreinheit.

Die Auswertung der Bilanzreinheit erfolgt in mehreren Schritten. In einem ersten Schritt werden die mittleren Differenzen über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet. Dabei werden die einzelnen Bilanzbereiche des Rheins miteinander verglichen. Daraus können evtl. schon Ursachen für den Bilanzfehler herausgefunden und verbessert werden (siehe Kapitel 7.2). Es wird deutlich, welche Bilanzbereiche große mittlere Differenzen aufweisen.

Bilanzfehler, die nur in einem kurzen Zeitraum auftreten und evtl. durch einen entgegengesetzten Bilanzfehler zu einem anderen Zeitraum sogar ausgeglichen werden, fallen in dieser Auswertung nicht auf. Sie werden später in der Analyse der einzelnen Bilanzabschnitte (Kapitel 7.3) näher betrachtet. Im Rahmen dieser Betrachtung werden dann die Differenzenzeitreihen jedes Bilanzabschnittes genauer analysiert. Daraus ergeben sich dann detailliertere Hinweise auf Zeiträume, in denen die Abflüsse evtl. angepasst werden sollen, um die Bilanzreinheit zu verbessern. Für diese Zeiträume werden dann die Pegel einer genaueren Analyse unterzogen. Dabei wird vor allem auf die Qualität der Abflusstafeln geachtet, jedoch werden auch weitere mögliche Fehlerquellen bei der Abflussermittlung berücksichtigt. Die Abflusstafeln werden neu erstellt, wenn die Messungen dies belegen. Mit den damit neu er-

zeugten Abflusszeitreihen werden neue Differenzenzeitreihen ermittelt, die dann wiederum bezüglich der Bilanzreinheit analysiert werden.

Abschließend wird die verbesserte Bilanzreinheit mit den angepassten Abflussganglinien noch einmal summarisch für den ganzen Rhein dargestellt.

7.2 Gesamtbilanz

In einem ersten Schritt wurden für alle Bilanzräume aus den gelieferten, aufbereiteten und damit lückenfreien Abflusszeitreihen für alle Bilanzbereiche Differenzenzeitreihen ermittelt. Aus diesen werden mittlere Abflusssdifferenzen ermittelt und entlang des Rheins dargestellt und ausgewertet.

7.2.1 Ermittlung von Faktoren und Fließzeiten

Zur Ermittlung der Differenzenabflusszeitreihen werden die nicht beobachteten Zwischengebiete über Faktoren aus den Pegeln der Nebengewässer berücksichtigt. In einem ersten Schritt wurden die Abflüsse der Nebengewässerpegel entsprechend der Einzugsgebietsgröße so erhöht, dass das gesamte Zwischengebiet des jeweiligen Bilanzabschnitts abgedeckt ist. Liegen in einem Bilanzraum Abflussdaten an mehreren Nebengewässerpegeln vor, so wurden diese mit unterschiedlichen Faktoren so gewichtet, dass flächenmäßig das gesamte Zwischeneinzugsgebiet abgedeckt ist. Das durch Pegel nicht abgedeckte Zwischengebiet wurde dabei auf die einzelnen Pegel verteilt und anschließend daraus die Faktoren abgeleitet. Münden in einem Bilanzabschnitt mehrere Gewässer in den Rhein, so repräsentieren die kleineren Gewässer eher das in der Nähe liegende Einzugsgebiet. Die großen Zuflüsse sind meist durch ein Einzugsgebiet geprägt, das auch weiter vom Rhein entfernt ist. Ihre Abflüsse weisen durch das größere Einzugsgebiet eine andere Charakteristik auf als die kleinen Zuflüsse. Durch die Akkumulation im Einzugsgebiet sind die Wellen nicht mehr so kurz und steil, sondern flacher. Die in der Abflussermittlung nicht abgedeckten Zwischengebiete weisen eher eine Charakteristik auf, die der Charakteristik der kleinen Gewässer ähnlicher ist als den großen. Die Abflüsse des Restzwischengebietes wurden deshalb eher aus den kleinen Gewässern ermittelt und die Pegel an den großen Nebengewässern nicht extrapoliert. Liegen nun Pegeldata mehrerer kleiner Nebengewässer vor, so wurde beim Ansatz des vergrößerten Einzugsgebietes auch auf die Abflussspende geachtet. Aus den Rheinpegeln wurde eine erwartete Abflussspende im Zwischengebiet ermittelt. War die erwartete Spende eher gering und im Abschnitt mündet ein Nebengewässer mit einer hohen und eines mit einer niedrigen Spende, so wurde das angesetzte Einzugsgebiet des Nebengewässers mit der niedrigen Spende stärker vergrößert als das mit der höheren Spende.

In Tabelle 7.1 sind die Faktoren der Nebenpegel aufgeführt. Im Normalfall wurden je Bilanzabschnitt die Pegel von Nebenflüssen berücksichtigt, die in diesem Bilanzabschnitt in den Rhein münden. In den beiden untersten Bilanzabschnitten Rees-Emmerich und Emmerich-Lobith mündet kein größeres Gewässer in den Rhein, so dass zur Abschätzung hier die Lippe, die oberhalb im Bilanzabschnitt Wesel-Rees mündet, herangezogen wurde, d.h. hier wurde ein entsprechend reduzierter Zufluss der Lippe als Zwischengebietszufluss angesetzt.

Pegel	Gewässer	A_{EO}	Faktor	Fließzeit bis zum nächsten Rheinpegel
		[km ²]	[-]	[h]
Neuhausen	Rhein	11 887		7
Andelfingen	Thur	1 693	1.67	5
Rekingen	Rhein	14 718		9
Untersiggenthal	Aare	17 601	1.13	9
Rheinfeldern	Rhein	34 526		3
Liestal	Ergolz	261	1.17	3
Münchenstein	Birs	911	1.17	1
Basel-Rheinhalle	Rhein	35 897		19
Basel	Wiese	458	3.66	18
Breisach	Rhein	37 575		11
Riegel	Leopoldkanal	1 102	1.59	9
Kehl-Kronenhof	Rhein	39 330		11
Schwaibach	Kinzig	954	1.00	18
Straßburg	Ill	4 600	1.00	13
Schweighouse	Moder	622	1.00	15
Bad Rotenfels	Murg	466	5.57	6
Beinheim	Sauer	541	3.88	7
Maxau	Rhein	50 196		6
Berghausen	Pfinz	231	5.41	14
Neustadt	Speyerbach	312	5.41	6
Speyer	Rhein	53 131		8
Ubstadt	Kraichbach	161	10.86	15
Wiesloch	Leimbach	114	10.86	12

Pegel	Gewässer	A _{EO}	Faktor	Fließzeit bis zum nächsten Rheinpegel
		[km ²]	[-]	[h]
Rockenau	Neckar	12 710	1.00	17
Worms	Rhein	68 827		10
Monsheim	Pfrimm	198	3.85	13
Lorsch	Weschnitz	383	3.85	12
Raunheim	Main	27 142	1.00	3
Mainz	Rhein	98 206		7
Oberingelheim	Selz	365	2.39	5
Pfaffental	Wisper	170	2.39	4
Grolsheim	Nahe	4 004	1.00	2
Kaub	Rhein	103 488		6
Kalkofen	Lahn	5 304	1.28	13
Cochem / Alken	Mosel	27 088	1.00	12
Friedrichsthal	Wied	681	3.20	3
Andernach	Rhein	139 549		6
Altenahr	Ahr	748	1.81	11
Bonn	Rhein	140 901		5
Menden	Sieg	2 825	1.18	6
Köln	Rhein	144 232		9
Opladen	Wupper	606	1.57	8
Neubrück	Erft	1 595	1.57	3
Düsseldorf	Rhein	147 680		6
Hattingen	Ruhr	4 118	1.27	13
Ruhrort	Rhein	152 895		5
Königstraße	Emscher	773	1.70	5
Wesel	Rhein	154 210		4
Schermbeck 1	Lippe	4 783	1.06	9
Rees	Rhein	159 300		3
Schermbeck 1	Lippe	4 783	0.05	1

Pegel	Gewässer	A_{EO}	Faktor	Fließzeit bis zum nächsten Rheinpegel
		[km ²]	[-]	[h]
Emmerich	Rhein	159 555		2
Schermbeck 1	Lippe	4 783	0.07	1
Lobith	Rhein	159 896		

Tabelle 7.1: Hydrologische Faktoren und Fließzeiten zur Ermittlung des Zwischengebietsabfluss (abgeleitet aus Einzugsgebietsgröße)

Die Abflusszeitreihen der Pegel werden vor der Ermittlung der Differenzen entsprechend der Fließzeiten verschoben. Die Bilanzierung bezieht sich immer auf den unteren Pegel des Bilanzabschnittes. Das zu einem Zeitpunkt am Pegel vorbei fließende Wasser war dann vor ca. Y Stunden am Pegel oberhalb, wobei Y der Fließzeit entspricht. Die angesetzten Fließzeiten sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Sie wurden aus teilweise vorliegenden Geschwindigkeitsmessungen an Pegeln und Sobek-Berechnungen abgeschätzt. Bei Betrachtungen von größeren Zeiträumen ist die Auswirkung der Verschiebung der Abflusszeitreihen nicht relevant, da in der Summe bzw. im Mittel nur kleine Abweichungen auftreten (jeweils der am Anfang bzw. Ende unterschiedlich berücksichtigte Zeitraum). Ist das Abflussniveau am Beginn und am Ende des untersuchten Bilanzabschnitts gleich, so ist auch ein Fehler aufgrund falsch abgeschätzter Fließzeiten nicht vorhanden. Beträgt die Differenz der Abflüsse am Anfang und am Ende des Bilanzierungszeitraumes 0,5 MQ und wird die Fließzeit um eine Stunde falsch angesetzt, so liegt der auftretende Fehler in den Differenzen bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Jahr bei ca. 0,006 % von MQ. Je kürzer der Zeitraum wird, desto größer kann der Fehler ausfallen. Bei einem Zeitraum von einem Monat beträgt er 0,07 % und bei 10 Tagen sind es 0,2 %. Für die hier durchgeführten Analysen sind diese Fehler vernachlässigbar.

7.2.2 Bilanz und Analyse

Mit den in Kapitel 7.2.1 ermittelten Faktoren wurde für jeden Bilanzabschnitt für den ganzen Untersuchungszeitraum eine Differenzenzeitreihe ermittelt. Um einen Gesamtblick über die Bilanzreinheit des Rheins zu erhalten, wurden aus den Differenzenzeitreihen mittlere Differenzen in den Bilanzbereichen ermittelt. Diese sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Dabei wurde in der Grafik die neue Methode der Abflussermittlung in Lobith dargestellt, die bilanzmäßig besser passt. Mit den alten Abflüssen ergäben sich am Pegel Lobith eine mittlere Differenz von -64 m³/s. Wenn nicht anders angegeben, wurden im Folgenden immer die mit der neuen Methode ermittelten Abflüsse in Lobith betrachtet.

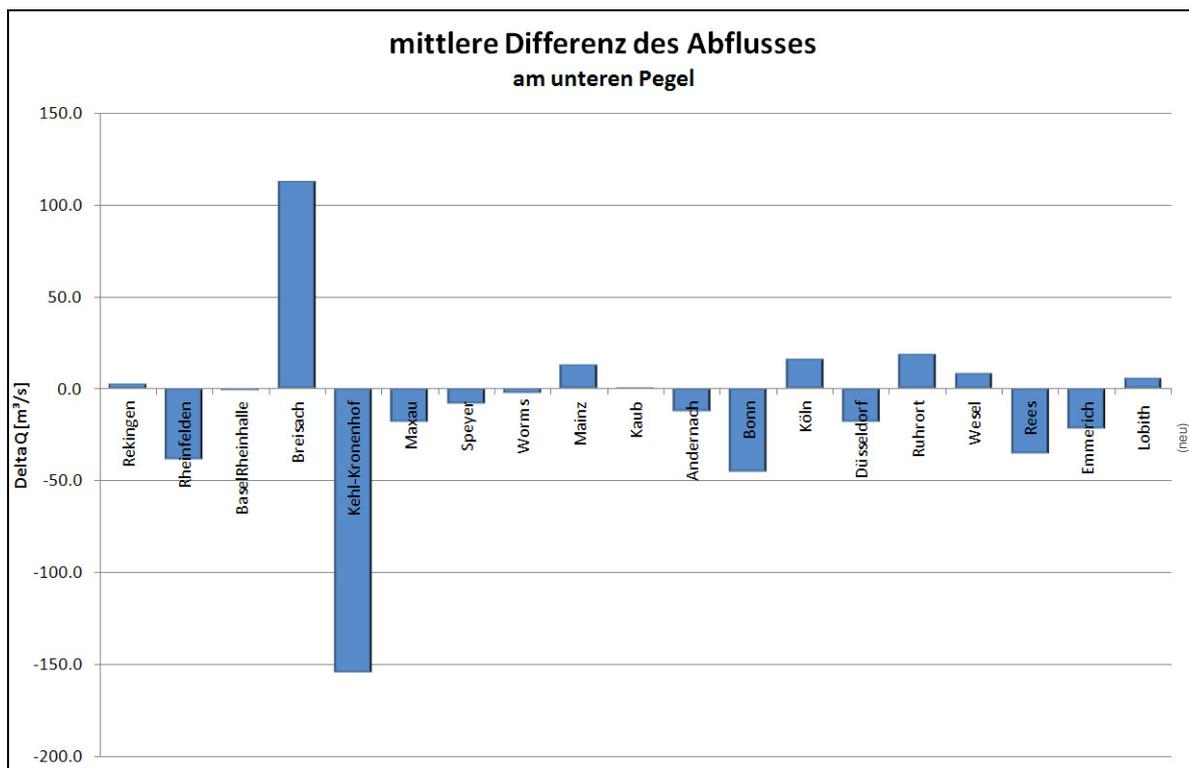


Abbildung 7.3: Mittlere Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus AEO

Hier springen vor allem die extrem großen Abweichungen am Pegel Breisach und am Pegel Kehl-Kronenhof ins Auge. Diese Pegel sind Pegel im staugeregelten Bereich des Rheins, bei denen die Abflüsse mit großen Unsicherheiten belegt sind, die sich auch hier in der Bilanz widerspiegeln.

Zur besseren Analyse der Bilanzreinheit werden im Folgenden die Abflussdifferenzen entlang des Rheins aufsummiert. Man sieht dann, ob der Bilanzfehler über den Längsschnitt des Rheins zunimmt oder sich vielleicht wieder ausgleicht. Die Abbildung 7.4 zeigt die Summenlinie. Auch hier fällt der Bereich um Breisach deutlich auf. Des Weiteren fällt auf, dass die Summenlinie insgesamt deutlich nach unten fällt. Dies bedeutet, dass im Mittel eine negative Bilanz vorliegt, d.h. aus den Zwischengebieten kommt zu viel Abfluss.

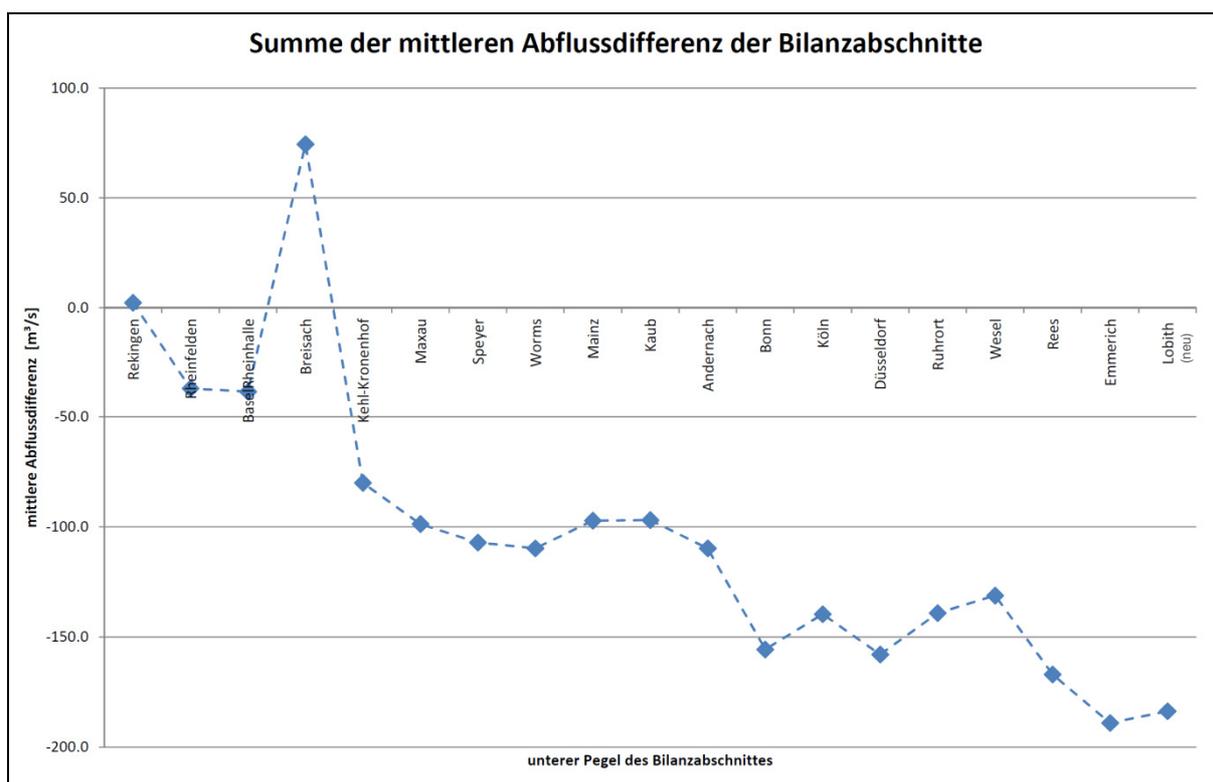


Abbildung 7.4: Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus AEO

In Tabelle 7.2 sind die Abflussdifferenzen und die Aufsummierung über den Rhein aufgeführt.

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A _{EO}	
		DeltaQ	Summe DeltaQ
		m ³ /s	m ³ /s
Rekingen	Neuhausen	2.3	2.3
Rheinfelden	Rekingen	-39.0	-36.7
BaselRheinhalle	Rheinfelden	-1.5	-38.2
Breisach	BaselRheinhalle	112.6	74.4
Kehl-Kronenhof	Breisach	-154.4	-80.0
Maxau	Kehl-Kronenhof	-18.7	-98.7
Speyer	Maxau	-8.4	-107.1
Worms	Speyer	-2.7	-109.7
Mainz	Worms	12.6	-97.2
Kaub	Mainz	0.3	-96.9
Andernach	Kaub	-12.8	-109.7
Bonn	Andernach	-45.9	-155.6
Köln	Bonn	16.0	-139.6
Düsseldorf	Köln	-18.3	-157.9
Ruhrort	Düsseldorf	18.8	-139.1

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A_{EO}	
		DeltaQ	Summe DeltaQ
		m^3/s	m^3/s
Wesel	Ruhrort	8.0	-131.2
Rees	Wesel	-35.8	-167.0
Emmerich	Rees	-22.0	-189.0
Lobith (neu)	Emmerich	5.3	-183.7

Tabelle 7.2: Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO)

Um den Einfluss der Zwischengebiete besser abschätzen können, wurde die Summenlinie in Abbildung 7.5 über der Einzugsgebietsgröße des Rheins aufgetragen.

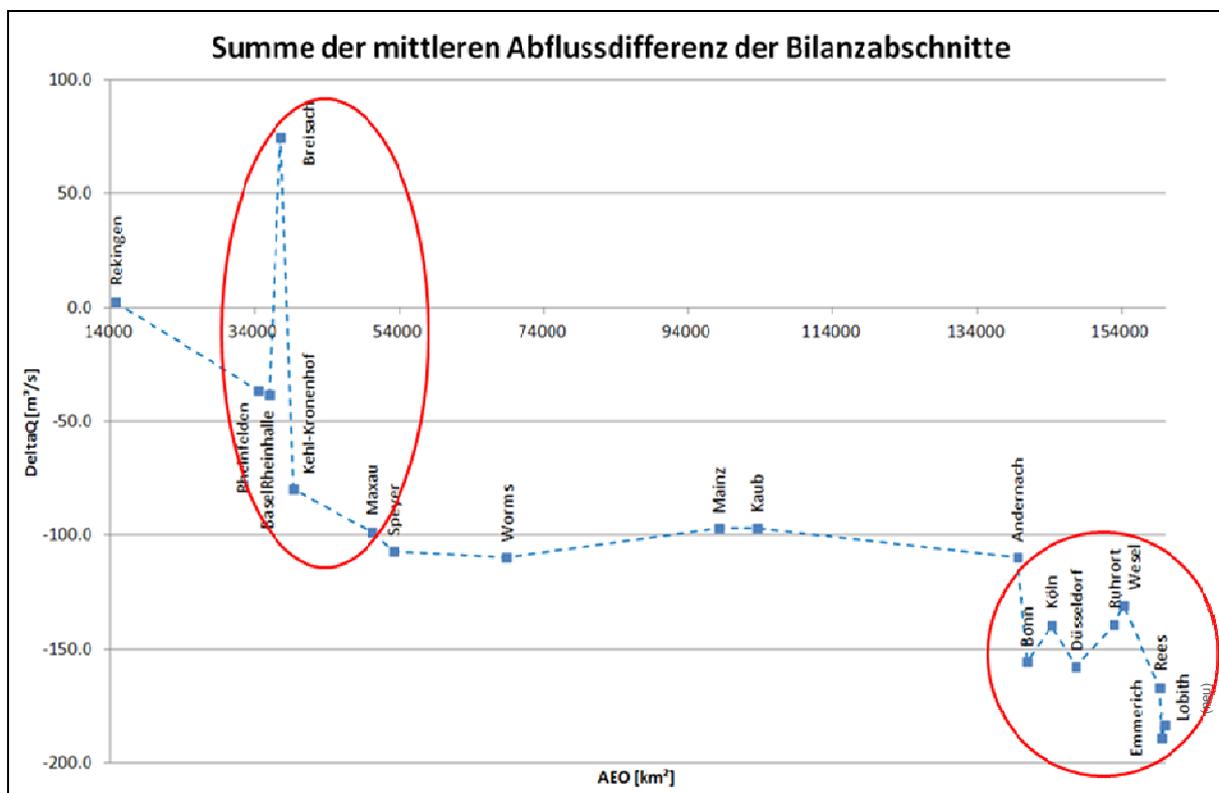


Abbildung 7.5: Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus A_{EO} (aufgetragen über A_{EO} des Rheins)

Hier sieht man deutlich, dass im ersten Bereich (bis Speyer) die Summenlinie abfällt, das heißt hier liefern wahrscheinlich die Zwischengebiete zu großen Abfluss. Der Ausreißer bei Breisach deutet auf hier vorliegende große Probleme an diesem Pegel hin, die sich jedoch nicht nach unten fortsetzen. Im Bereich von Speyer bis Andernach ist die Bilanz recht ausgeglichen, um dann am Niederrhein wieder deutlich abzufallen und sehr stark zu schwanken.

Als Ziel sollte die Summenlinie entlang des Rheins immer ungefähr Null entsprechen. Um dies zu erreichen, müssen an den Pegeln Anpassungen vorgenommen werden. Dies wird jedoch nur durchgeführt soweit diese durch Daten belegt werden können.

Im Folgenden wird kurz erläutert, wie sich Änderungen der Abflüsse an einzelnen Pegeln auf die Summenlinie auswirken, um zielgerichtet Pegel zu untersuchen. Im Wesentlichen sind hierbei zwei Fälle zu unterscheiden:

- Abflussänderungen an einem Rheinpegel
- Abflussänderung des Zwischengebietes

Bei der Abflussänderung eines Rheinpegels wird davon sowohl die Bilanz des oberhalb, als auch des unterhalb liegenden Abflussbereichs verändert. Dabei heben sich die Veränderungen gegenseitig wieder auf, so dass die Summenlinie unterhalb nicht verändert wird. Die Abflussänderung eines Zwischengebietes wirkt sich dagegen nur auf einen Bilanzabschnitt aus. Unterhalb läuft die Summenlinie dann, um den entsprechenden Wert parallel verschoben, weiter. Das heißt also, dass sich Änderungen an Rheinpegeln nur lokal auswirken und Änderungen in Zwischengebieten auch unterhalb wirksam sind.

Da die Summenlinie eine deutlich fallende Tendenz aufweist, sind die aus den Zwischengebieten kommenden Abflüsse wahrscheinlich zu hoch. Im Folgenden wurde deshalb die Ermittlung dieser Abflüsse aus den vorliegenden Pegelraten, also die Festlegung der Faktoren, entsprechend überarbeitet.

7.2.3 Bilanz und Analyse mit verbesserten Faktoren

Die erste Bilanzanalyse zeigt, dass die Zwischengebiete zu hohe Abflüsse liefern. Die Hochrechnung der Pegelraten über die Einzugsgebietsgröße auf das gesamte Resteinzugsgebiet führt also zu zu großen Abflüssen. Eine Auswertung der Abflusshöhen im Rheineinzugsgebiet (Grundlage: Hydrologischer Atlas Deutschland (HAD) bzw. Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)) zeigt, dass teilweise in den rheinnahen Bereichen, die nicht durch Pegel abgedeckt sind, deutlich niedrigere Abflusshöhen vorliegen als in den durch Pegel abgedeckten Bereichen des Einzugsgebietes. In Abbildung 7.6 ist dieser Sachverhalt für Bad Rothenfels/Murg exemplarisch dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Einzugsgebiet der Murg oberhalb des Pegels Bad Rothenfels (roter Bereich) die Abflusshöhen größer sind als im Bereich unterhalb des Pegels (grüner Bereich). Bei der Ermittlung des Abflusses dieses Resteinzugsgebietes als Hochrechnung proportional zur Einzugsgebietsgröße würde für das Restgebiet ein deutlich zu großer Abfluss ermittelt. Durch eine Abminderung im Verhältnis der Abflusshöhen kann der Abfluss des Restzwisehengebietes passender ermittelt werden.

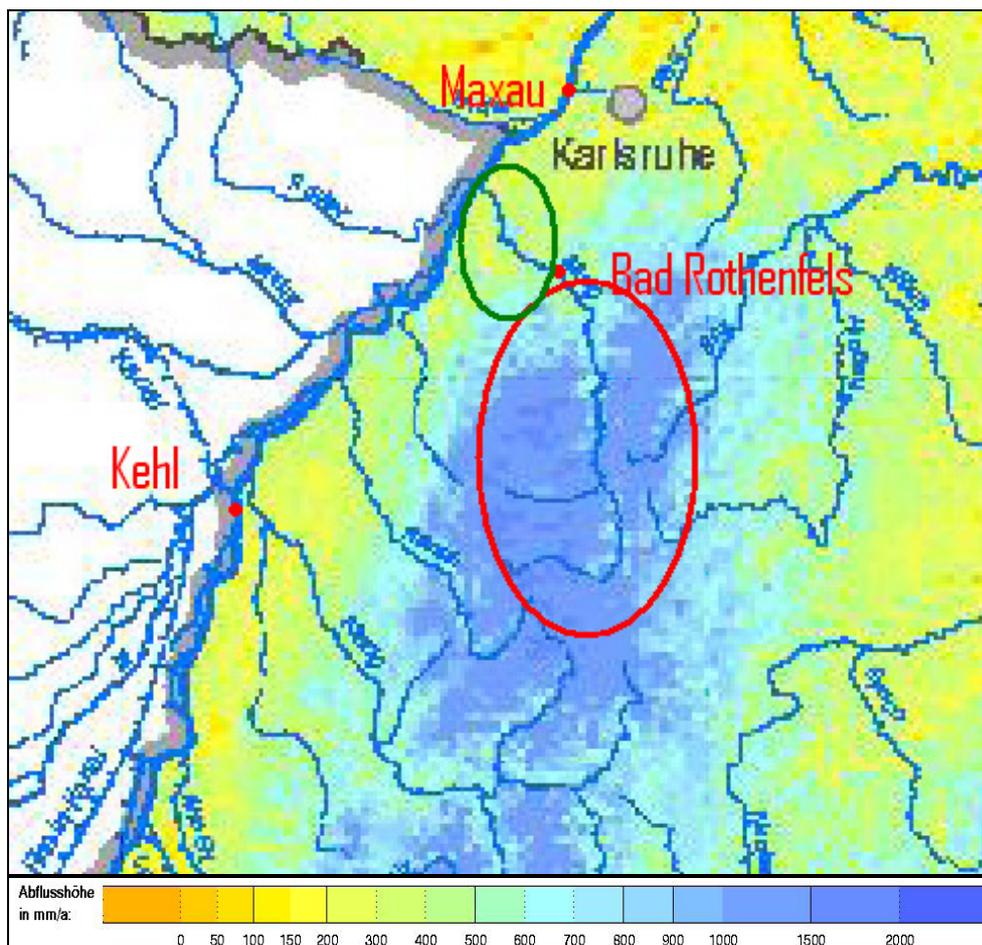


Abbildung 7.6: Abflusshöhen aus HAD im Bereich Bad Rothenfels/Murg

Die Faktoren zur Ermittlung des Abflusses des gesamten Zwischeneinzugsgebietes wurde mit diesen Informationen entsprechend den Abflusshöhen angepasst und dann eine erneute Bilanzierung durchgeführt. Die neuen Faktoren sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

Pegel	Gewässer	A_{EO}	Faktor aus A_{EO}	Faktor aus A_{EO} und HAD bzw. HADES
		[km ²]	[-]	[-]
Neuhausen	Rhein	11 887		
Andelfingen	Thur	1 693	1.67	1.67
Rekingen	Rhein	14 718		
Untersiggenthal	Aare	17 601	1.13	1.07
Rheinfeldern	Rhein	34 526		
Liestal	Ergolz	261	1.17	1.17
Münchenstein.	Birs	911	1.17	1.17

Pegel	Gewässer	A _{EO}	Faktor aus A _{EO}	Faktor aus A _{EO} und HAD bzw. HADES
		[km ²]	[-]	[-]
Basel-Rheinhalle	Rhein	35 897		
Basel	Wiese	458	3.66	2.71
Breisach	Rhein	37 575		
Riegel	Leopoldkanal	1 102	1.59	1.33
Kehl-Kronenhof	Rhein	39 330		
Schwaibach	Kinzig	954	1.00	1.00
Straßburg	Ill	4 600	1.00	1.00
Schweighouse	Moder	622	1.00	1.00
Bad Rotenfels	Murg	466	5.57	2.32
Beinheim	Sauer	541	3.88	3.88
Maxau	Rhein	50 196		
Berghausen	Pfinz	231	5.41	3.25
Neustadt	Speyerbach	312	5.41	4.57
Speyer	Rhein	53 131		
Ubstadt	Kraichbach	161	10.86	8.59
Wiesloch	Leimbach	114	10.86	9.08
Rockenau	Neckar	12 710	1.00	1.00
Worms	Rhein	68 827		
Monsheim	Pfrimm	198	3.85	3.85
Lorsch	Weschnitz	383	3.85	2.88
Raunheim	Main	27 142	1.00	1.00
Mainz	Rhein	98 206		
Oberingelheim	Selz	365	2.39	2.39
Pfaffental	Wisper	170	2.39	2.39
Grolsheim	Nahe	4 004	1.00	1.00
Kaub	Rhein	103 488		
Kalkofen	Lahn	5 304	1.28	1.28
Cochem / Alken	Mosel	27 088	1.00	1.00

Pegel	Gewässer	A _{EO}	Faktor aus A _{EO}	Faktor aus A _{EO} und HAD bzw. HADES
		[km ²]	[-]	[-]
Friedrichsthal	Wied	681	3.20	3.20
Andernach	Rhein	139 549		
Altenahr	Ahr	748	1.81	1.63
Bonn	Rhein	140 901		
Menden	Sieg	2 825	1.18	1.06
Köln	Rhein	144 232		
Opladen	Wupper	606	1.57	1.14
Neubrück	Erft	1 595	1.57	1.57
Düsseldorf	Rhein	147 680		
Hattingen	Ruhr	4 118	1.27	1.14
Ruhrort	Rhein	152 895		
Königstraße	Emscher	773	1.70	1.31
Wesel	Rhein	154 210		
Schermbeck 1	Lippe	4 783	1.06	1.05
Rees	Rhein	159 300		
Schermbeck 1	Lippe	4 783	0.05	0.03
Emmerich	Rhein	159 555		
Schermbeck 1	Lippe	4 783	0.07	0.04
Lobith	Rhein	159 896		

Tabelle 7.3: Hydrologische Faktoren zur Ermittlung des Zwischengebietsabflusses (abgeleitet aus Einzugsgebietsgröße und Abflusshöhe)

Die erneute Berechnung der Bilanzen für den Rhein ergab die in Abbildung 7.7 dargestellte Summenlinie (rot). Zum Vergleich ist die Summenlinie der ersten Bilanz in Blau mit dargestellt.

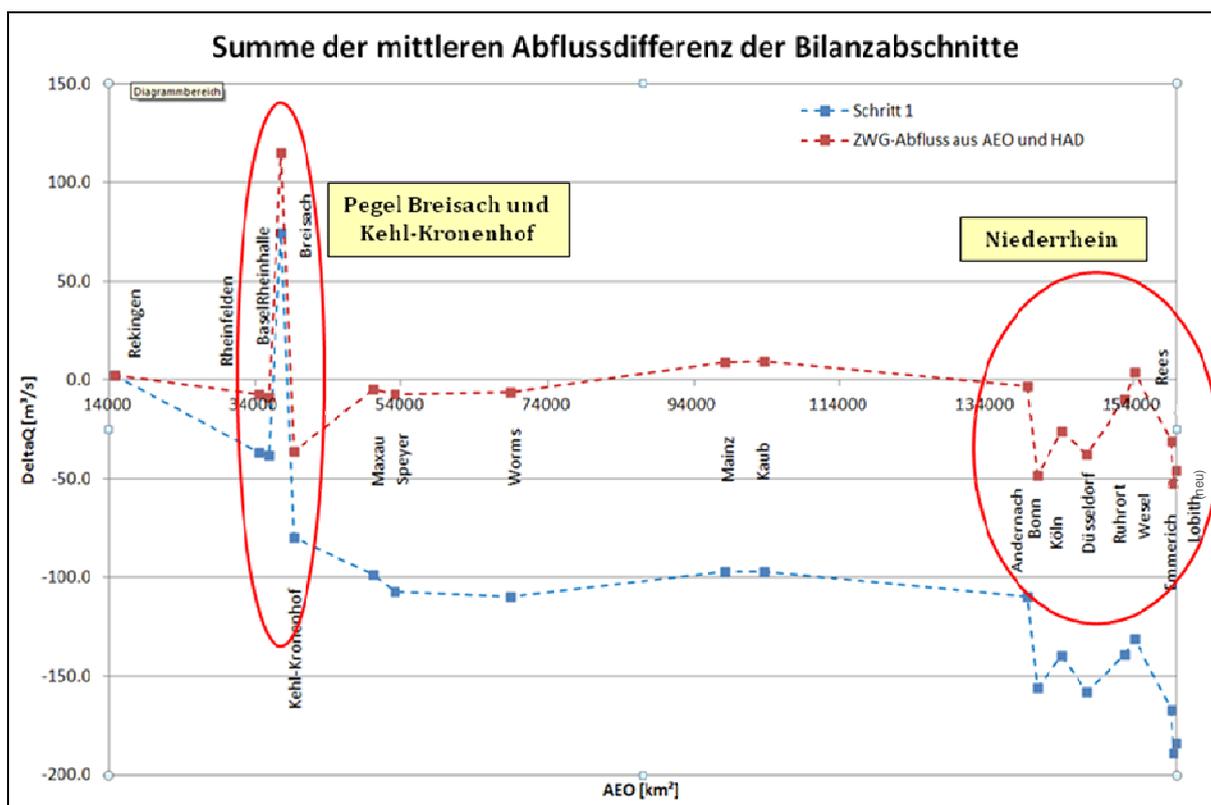


Abbildung 7.7: Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten und Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES (aufgetragen über A_{EO} des Rheins)

Durch die Anpassung der Faktoren kann in großen Teilen des Rheins bereits eine im Mittel ausgeglichene Bilanz erreicht werden. Als Bereiche, in denen noch größere Anpassungen erforderlich sind, stellen sich hier die Pegel Breisach und Kehl-Kronenhof und die Pegel des Niederrheins dar.

Bei allen weiteren Auswertungen (Detailbilanzen, Spektrenbilanzen) wurden immer die angepassten neuen hydrologischen Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES berücksichtigt.

In Tabelle 7.4 sind die Abflussdifferenzen und die Aufsummierung über den Rhein für die ursprünglichen und die neuen hydrologischen Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES aufgeführt.

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A_{EO}		Verbesserte hydrologische Faktoren aus A_{EO} und HAD(ES)	
		DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ
		m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s
Rekingen	Neuhausen	2.3	2.3	2.3	2.3
Rheinfelden	Rekingen	-39.0	-36.7	-9.6	-7.3
BaselRheinhalle	Rheinfelden	-1.5	-38.2	-1.5	-8.7
Breisach	BaselRheinhalle	112.6	74.4	123.5	114.8

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A_{EO}		Verbesserte hydrologische Faktoren aus A_{EO} und HAD(ES)	
		DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ
		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Kehl-Kronenhof	Breisach	-154.4	-80.0	-151.0	-36.2
Maxau	Kehl-Kronenhof	-18.7	-98.7	31.6	-4.6
Speyer	Maxau	-8.4	-107.1	-2.7	-7.3
Worms	Speyer	-2.7	-109.7	0.9	-6.4
Mainz	Worms	12.6	-97.2	15.4	9.0
Kaub	Mainz	0.3	-96.9	0.3	9.3
Andernach	Kaub	-12.8	-109.7	-12.8	-3.5
Bonn	Andernach	-45.9	-155.6	-44.8	-48.3
Köln	Bonn	16.0	-139.6	22.0	-26.3
Düsseldorf	Köln	-18.3	-157.9	-11.6	-37.9
Ruhrort	Düsseldorf	18.8	-139.1	27.7	-10.2
Wesel	Ruhrort	8.0	-131.2	13.9	3.7
Rees	Wesel	-35.8	-167.0	-35.1	-31.4
Emmerich	Rees	-22.0	-189.0	-21.0	-52.4
Lobith (neu)	Emmerich	5.3	-183.7	6.7	-45.8

Tabelle 7.4: Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO , Verbesserte hydrologische Faktoren aus AEO und HAD(ES))

7.3 Detailbilanz

Im Rahmen der Gesamtbilanz (siehe Kap. 7.2) lag der Fokus auf den mittleren Verhältnissen im betrachteten Zeitraum vom 01.11.1989 bis zum 01.11.2007. Aussagen über die zeitliche Variation der Bilanz werden nicht betrachtet. Um dies zu ermöglichen, wurden auf Basis der hochaufgelösten Daten Bilanzwerte für jeden einzelnen Zeitpunkt ermittelt. Dabei wurden die nicht durch Pegel abgedeckten Zwischengebiete über die neuen hydrologischen Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES berücksichtigt. Als Ergebnis liegt somit eine Zeitreihe vor, welche die Bilanzfehler repräsentiert (siehe Abbildung 7.8). Die Berechnung dieser sogenannten Abflussdifferenzenzeitreihe ist in Kapitel 7.1 detailliert beschrieben.

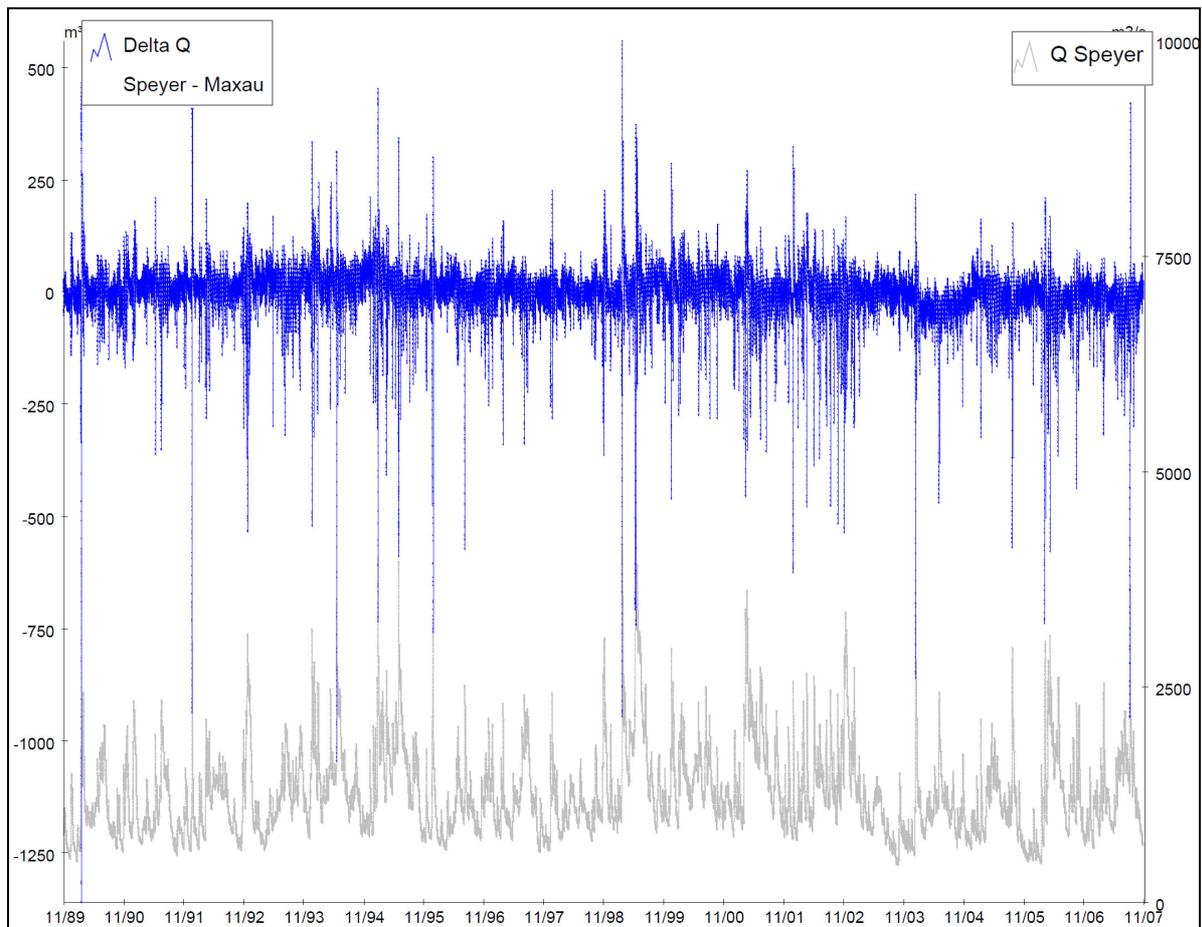


Abbildung 7.8: Speyer - Maxau: Differenzenzeitreihe und Abflusszeitreihe Speyer

Durch die Summation der Abflussdifferenzenzeitreihe entsteht eine Summenlinie, welche den Bilanzfehler über die Zeit sehr gut darstellt. In Abbildung 7.9 ist dies exemplarisch für den Bilanzraum Speyer-Maxau dargestellt. Der Verlauf der Summenlinie lässt positive Differenzen, ausgeglichene Bilanzen und auch negative Differenzen erkennen. Mögliche Ursachen sind in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Ursachen für die Differenzen können vielfältigen Ursprungs sein. Im Rahmen der Bearbeitung erfolgt ein erkenntnisorientiertes, iteratives Vorgehen, bei welchem nicht nur die Daten innerhalb eines Bilanzabschnittes, sondern auch die benachbarten und übergeordneten Bilanzbereiche betrachtet wurden. So legt z.B. der in Abbildung 7.10 dargestellte gegenläufige Verlauf der Summenlinien der benachbarten Bilanzbereiche Köln-Bonn und Bonn-Andernach nahe, dass am Pegel Bonn, d.h. an der Schnittstelle der beiden Bilanzbereiche, zu niedrige Abflüsse ermittelt werden. Dies ist ein Anlass, die Grundlagendaten - im Wesentlichen die Abflusstafeln - am Pegel Bonn kritisch und genauer zu prüfen und ggf. anzupassen, die Abflusszeitreihe Bonn neu zu berechnen und die Auswertungen erneut durchzuführen. Alternativ zu diesem Vorgehen könnte auch die Abflusszeitreihe Bonn direkt modifiziert werden. Dies ist aus Sicht der Bearbeiter jedoch nicht zielführend, da eine willkürliche Anpassung der Zeitreihen zwar die Bilanz verbessern

würde, die Homogenität der Daten von Wasserstand zu Abflusszeitreihen jedoch nicht mehr gegeben ist und mögliche Ursachen für die Differenzen ignoriert würden.

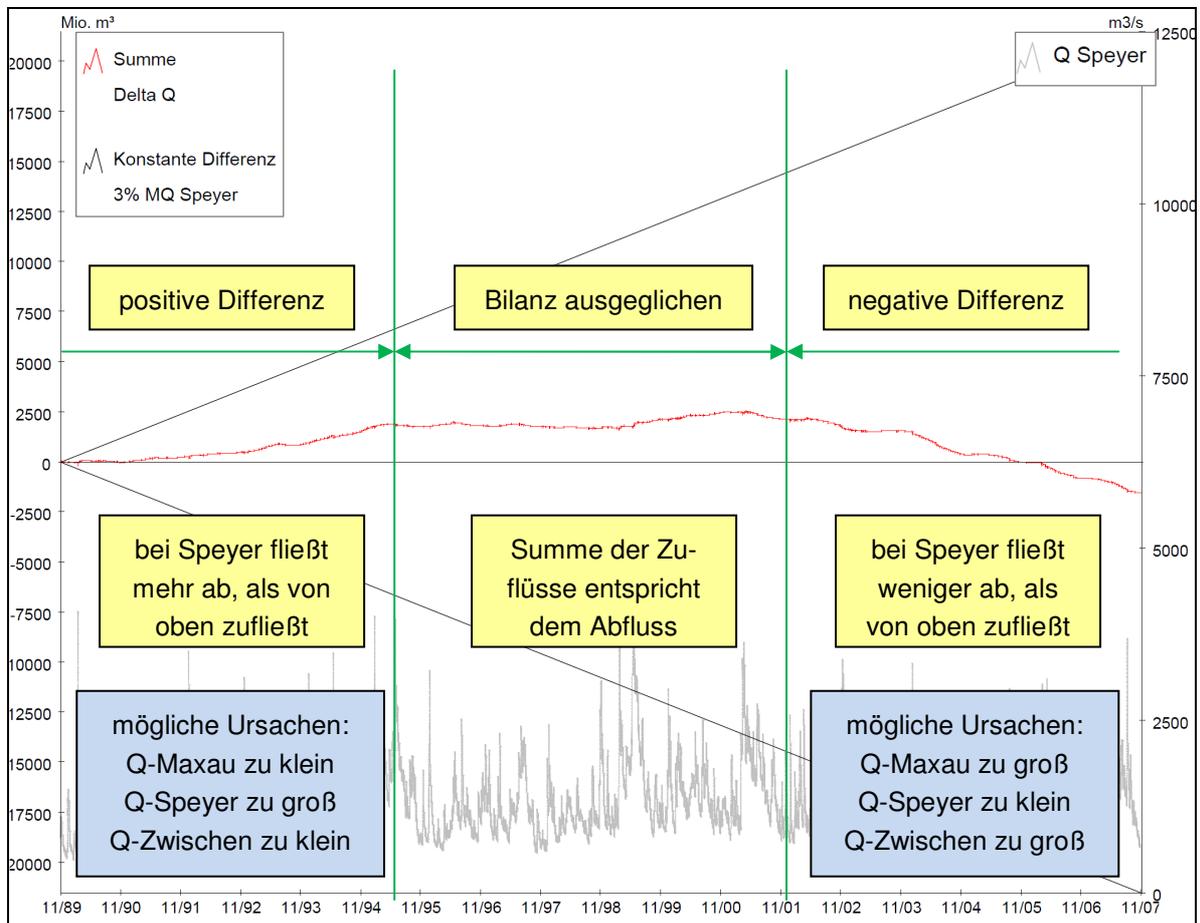


Abbildung 7.9: Exemplarische Darstellung der summierten Abflussdifferenzenzeitreihe (Speyer – Maxau) und Abflusszeitreihe Speyer

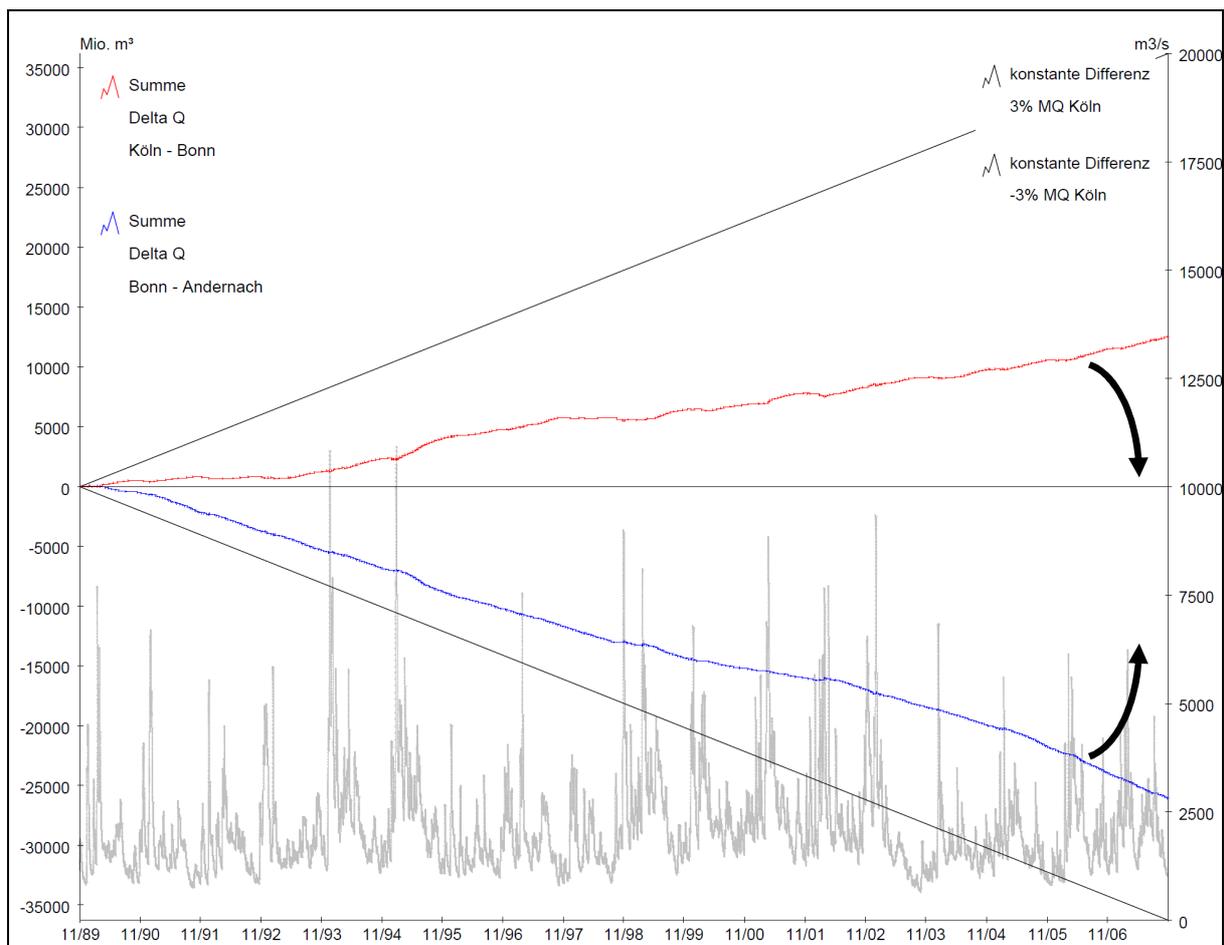


Abbildung 7.10: Summenlinie der Differenzzeitreihe (Köln – Bonn, Bonn – Andernach)

Die ausführliche Beschreibung der Analyse der einzelnen Bilanzabschnitte findet sich in Anlage 1. Dabei wird auch auf die Besonderheiten und Probleme eingegangen und es werden die durchgeführten, datenbasierten Verbesserungen aufgezeigt.

Im Folgenden werden zu jedem einzelnen Bilanzbereich nur die Ergebnisse zusammengefasst.

7.3.1 Bilanzraum Rekingen-Neuhausen

Dieser Abschnitt weist einen sehr geringen Bilanzfehler von 0,5 % auf. Auch die Summenlinie weist über fast den gesamten Zeitraum eine sehr geringe Steigung auf. Die einzelnen Abflusszeitreihen werden nicht angepasst.

7.3.2 Bilanzraum Rheinfelden – Rekingen

Der Bilanzfehler dieses Abschnitts beträgt im Mittel -0,9 %. Auch die Summenlinie weist über fast den gesamten Zeitraum eine sehr geringe Steigung auf. Jedoch treten zyklische Schwankungen in den Differenzen auf. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der Abflusszeitreihe des Pegels Untersiggenthal/Aare. Eine Korrektur dieser Abflusszeitreihe ist jedoch aufgrund der nicht vorliegenden Grundlagendaten nicht möglich. Die einzelnen Abflusszeitreihen dieses Abschnittes werden nicht angepasst.

7.3.3 Bilanzraum Basel-Rheinhalle – Rheinfelden

Der Bilanzfehler dieses Abschnitts ist mit -0,1% sehr gering. Die Summenlinie verläuft über den gesamten Untersuchungszeitraum sehr nah bei null. Die einzelnen Abflusszeitreihen dieses Abschnittes müssen nicht angepasst werden.

7.3.4 Bilanzraum Breisach – Basel-Rheinhalle

Der Bilanzfehler dieses Abschnittes ist sehr groß (10,2%): Dies ist vor allem auf den Pegel Breisach zurückzuführen. Der Pegel Breisach weist deutlich zu große Abflüsse auf. Hauptsächlich ist dies auf die Abflüsse kleiner 1500 m³/s zurückzuführen, die aus Kraftwerksangaben abgeleitet werden. Eine Anpassung dieser Abflüsse ist im Rahmen der Untersuchung nicht möglich, da keinerlei Grundlagendaten zur Ermittlung der kleinen Abflüsse vorliegen. In einem weiteren Schritt könnte für große Abflüsse eine Bilanzuntersuchung evtl. Hinweise auf erforderliche Anpassungen in diesem Abflussbereich ergeben. Die kleinen Abflüsse könnten evtl. aus Pegeldaten der ober- und unterhalb liegenden Pegel und der Pegel der Nebengewässer abgeleitet werden.

7.3.5 Bilanzraum Kehl-Kronenhof – Basel-Rheinhalle

Aufgrund der großen erforderlichen Anpassungen am Pegel Breisach wurde der Bilanzabschnitt Kehl-Kronenhof-Breisach nach oben bis Basel Rheinhalle erweitert. Auch dieser Bereich weist einen großen mittleren Bilanzfehler von -2,5 % auf. Für den Zeitraum 11/89 bis 11/03 liegt der Bilanzfehler sogar im Bereich von -5 % des MQ. Die Ursache ist hier im Wesentlichen der Pegel Kehl-Kronenhof. Er weist im Mittel zu kleine Abflüsse auf. Hauptsächlich ist dies, wie auch am Pegel Breisach, auf die Abflüsse kleiner 1500 m³/s zurückzuführen, die aus Kraftwerksangaben abgeleitet werden. Eine Anpassung dieser Abflüsse ist im Rahmen der Untersuchung, analog zum Pegel Breisach, nicht möglich, da keinerlei Grundlagendaten zur Ermittlung der kleinen Abflüsse vorliegen. Das weitere Vorgehen bei diesem Pegel erfolgt analog zum Pegel Breisach.

7.3.6 Bilanzraum Maxau – Basel-Rheinhalle

Dieser Bilanzraum weist mit 0,3 % einen recht geringen Bilanzfehler auf. Die beiden Rheinpegel liefern schlüssige Abflüsse, die nicht angepasst werden. Die Abflüsse des Zwischengebietes weisen vor allem im Zeitraum von 1994 bis 1998 zu große Werte auf. Aufgrund fehlender Grundlagendaten wird hierfür jedoch keine Anpassung vorgeschlagen.

7.3.7 Bilanzraum Speyer – Maxau

Dieser Bilanzraum ist mit einer Abweichung von -0,2 % recht ausgeglichen. Auch die Summenlinie der Differenzen weist keine großen Auffälligkeiten auf. Es werden keine Anpassungen der Abflusszeitreihen vorgenommen.

7.3.8 Bilanzraum Worms – Speyer

Dieser Bilanzabschnitt weist eine sehr ausgeglichene Bilanz auf. Anpassungen sind nicht erforderlich.

7.3.9 Bilanzraum Mainz – Worms

Dieser Bilanzabschnitt weist bis 2004 eine ausgeglichene Bilanz auf. Danach nimmt der Bilanzfehler kontinuierlich zu. Da die Bilanzbereiche ober- und unterhalb eine ausgeglichene Bilanz aufweisen, liegt die Ursache wahrscheinlich im Zwischengebiet und hier am Pegel Raunheim (Main), der den Hauptteil des Zuflusses liefert. Aufgrund der Datenlage ist eine Anpassung des Pegels in diesem Projekt nicht möglich.

7.3.10 Bilanzraum Kaub – Mainz

Dieser Bilanzabschnitt weist eine sehr ausgeglichene Bilanz auf. Anpassungen sind nicht erforderlich.

7.3.11 Bilanzraum Andernach – Kaub

Dieser Bilanzabschnitt weist mit den gelieferten Abflüssen eine durchgehend negative Bilanz auf. Der Pegel Cochem, der die Abflüsse des Hauptzuflusses Mosel liefert, konnte durch eine neue Abflusstafel im mittleren und hohen Abflussbereich deutlich verbessert werden, im niedrigen Abflussbereich scheint eine Optimierung ebenfalls erforderlich, ist aber im Rahmen

dieses Projektes nicht durchführbar. Die Bilanz in diesem Bilanzabschnitt ist, nach Anpassungen in Cochem, sehr ausgeglichen.

7.3.12 Bilanzraum Bonn – Andernach

Dieser Bilanzabschnitt weist mit den gelieferten Abflüssen eine durchgehend negative Bilanz von im Mittel $-44,8 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Das Zwischengebiet mit einem Zufluss von ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kann dafür nicht ursächlich sein. Durch Anpassungen der Abflusstafel am Pegel Bonn lässt sich der Bilanzfehler auf $-25,4 \text{ m}^3/\text{s}$ reduzieren. Die Ursache des verbleibenden Bilanzfehlers ist evtl. auf Einfluss der Hysterese zurückzuführen. Dies sollte jedoch noch genauer untersucht werden (siehe Kapitel 8.10).

7.3.13 Bilanzraum Köln – Bonn

Dieser Bilanzabschnitt weist mit den gelieferten Abflüssen eine durchgehend positive Bilanz von im Mittel $22,0 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Sowohl am Pegel Bonn als auch am Pegel Köln durchgeführte Messungen weisen große Abweichungen zu den Abflusstafeln auf. Durch Anpassungen der Abflusstafel am Pegel Bonn und am Pegel Köln lässt sich der Bilanzfehler auf $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ reduzieren, das entspricht $0,2\%$ des mittleren Abflusses in Köln. Damit wird eine sehr ausgeglichene Bilanz erreicht.

7.3.14 Bilanzraum Düsseldorf – Köln

Dieser Bilanzabschnitt weist mit den gelieferten Abflüssen bereits eine relativ ausgeglichene Bilanz auf. Änderungen der Abflüsse am oberen Pegel aufgrund des oberhalb liegenden Bilanzbereiches erfordern jedoch auch eine entsprechende Anpassung des Pegels Düsseldorf. Dies ergab sich auch aus der Abflusstafelanalyse. Nach Anpassungen der Abflusstafel am Pegel Bonn und am Pegel Köln reduziert sich der Bilanzfehler auf $12,0 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht $0,7\%$ des mittleren Abflusses in Düsseldorf. Damit wird eine relativ ausgeglichene Bilanz erreicht.

7.3.15 Bilanzraum Ruhrort – Düsseldorf

Dieser Bilanzabschnitt weist mit den gelieferten Abflüssen einen mittleren Bilanzfehler von $27,7 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Vor allem im Zeitraum von 1996 bis 2002 ist ein großer Bilanzfehler vorhanden. Die Abflüsse des oberen Pegels Düsseldorf wurden bereits mit neu erzeugten Abflusstafeln ermittelt. Aus der Abflusstafelanalyse ergab sich ebenfalls ein Änderungsbedarf der Abflusstafeln am Pegel Ruhrort. Nach Anpassungen der Abflusstafel am Pegel Ruhrort und

den Anpassungen am Pegel Düsseldorf beträgt der Bilanzfehler $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht $0,22 \%$ des mittleren Abflusses in Düsseldorf. Damit wird eine sehr ausgeglichene Bilanz erreicht.

7.3.16 Bilanzraum Wesel – Ruhrort

Der mittlere Bilanzfehler beträgt in diesem Bilanzabschnitt mit den gelieferten Abflusszeitreihen $13,9 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $0,6 \%$ des Abflusses bei Wesel, dieser Wert ist bereits recht ausgeglichen. Jedoch ist vor allem im Zeitraum ab 2002 ein großer Bilanzfehler vorhanden. Am Pegel Ruhrort wurden bereits neue Abflüsse mit neuen Abflusstafeln ermittelt, um die Bilanzreinheit nach oberhalb zu gewährleisten. Auch am Pegel Wesel ergab sich aus der Abflusstafelanalyse ein Änderungsbedarf der Abflusstafeln. Nach Anpassungen der Abflusstafel des Pegels Wesel im Zeitraum vom 01.11.1998 bis zu 01.11.2003 und den Anpassungen am Pegel Ruhrort beträgt der Bilanzfehler $-14,0 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht $-0,6 \%$ des mittleren Abflusses in Wesel. Die Bilanz ist damit recht ausgeglichen. Auch wird der im Zeitraum ab 2002 große Bilanzfehler dadurch ausgeglichen.

7.3.17 Bilanzraum Rees – Wesel

Die Bilanzanalyse dieses Abschnittes zeigt, dass mit den gelieferten Abflüssen ein mittlerer Bilanzfehler von $-35,1 \text{ m}^3/\text{s}$ auftritt. Die Bilanz ist im ganzen Untersuchungszeitraum negativ. Die Abflüsse des oberen Pegels Wesel wurden bereits mit neu erzeugten Abflusstafeln neu ermittelt. Der Pegel Rees weist ebenfalls deutliche Abweichungen der Messungen von den Abflusstafeln mit zeitlicher Tendenz auf. Es ist also auch an diesem Pegel ein Änderungsbedarf der Abflusstafeln gegeben. Durch die Anpassungen der Abflusstafeln am Pegel Rees und den Anpassungen am Pegel Wesel reduziert sich der Bilanzfehler auf $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht $0,13 \%$ des mittleren Abflusses in Rees. Damit wird in diesem Bilanzabschnitt eine sehr ausgeglichene Bilanz erreicht.

7.3.18 Bilanzraum Emmerich – Rees

Die originalen gelieferten Abflüsse weisen in diesem Abschnitt einen mittleren Bilanzfehler von $-21,0 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Die Bilanz ist im ganzen Untersuchungszeitraum negativ, am unteren Pegel fließt deutlich weniger Wasser ab als von oben zufließt. Das Einzugsgebiet ist in diesem Bilanzabschnitt sehr klein und liefert kaum Zufluss. Am oberen Pegel Rees wurden bereits mit neu erzeugten Abflusstafeln Abflüsse neu ermittelt. Der Pegel Emmerich weist ebenfalls deutliche Abweichungen der Messungen von den Abflusstafeln mit zeitlicher Tendenz auf. Durch die Anpassungen der Abflusstafeln am Pegel Emmerich und den Anpassungen am Pegel Rees reduziert sich der Bilanzfehler auf $-6,9 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht $-0,3 \%$

des mittleren Abflusses in Rees. Damit wird in diesem Bilanzabschnitt eine sehr ausgeglichene Bilanz erreicht.

7.3.19 Bilanzraum Lobith – Emmerich

Die Bilanz mit den originalen gelieferten Zeitreihen und den nach neuer Methode ermittelten Abflüssen am Pegel Lobith weist eine mittlere Abflussdifferenz von 0,3 % auf. Dies entspricht einem Abfluss von 6,7 m³/s, der am unteren Pegel zu wenig ankommt. Die Bilanz ist damit recht ausgeglichen. Bei Berücksichtigung der Abflüsse am Pegel Lobith nach der alten Methode beträgt die Differenz -62,68 m³/s. Die alten Abflüsse am Pegel Lobith sind also deutlich zu klein.

Die Summenlinie der Differenzen weist deutliche Knicke und Steigungswechsel auf, die auf dem Ansatz für Sohlveränderungen des Pegels Lobith beruhen.

Durch den Ansatz der neu erzeugten Abflusszeitreihen des Pegels Emmerich (sowohl von ProAqua, als auch vom WSA Duisburg-Rhein) wird die Bilanz negativer. Aufgrund der Bilanzräume oberhalb ist die Abflusszeitreihe des Pegels Emmerich gut untermauert. Worauf der Sprung in den Abflüssen in diesem Bilanzraum beruht ist unklar. Evtl. spielt hier die Hysterese eine Rolle. Aber auch systematische Abweichungen im Messverfahren, sowohl am Niederrhein als auch bei Lobith, könnten eine Ursache sein.

7.3.20 Zusammenfassung Bilanzanalyse

Insgesamt konnten die Abflusszeitreihen durch die Bilanzanalyse verbessert werden. An den Pegeln Breisach und Kehl-Kronenhof wurden die Bilanzprobleme aufgezeigt. Aufgrund der vorliegenden Daten ist es jedoch nicht möglich, angepasste Abflusszeitreihen zu erstellen. Im Bilanzraum Bonn-Andernach bleibt nach Anpassungen noch eine negative Bilanz.

7.4 Gesamtbilanz mit verbesserten Zeitreihen

Um einen Überblick über die verbesserte Gesamtbilanz zu erhalten, wurden die Bilanzergebnisse mit den angepassten Abflusszeitreihen analog zu Kapitel 7.2 aufbereitet. Es ergibt sich damit die in Abbildung 7.11 in grün dargestellte Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen. Zum Vergleich sind auch die Summenlinien der Bilanzen vor den Anpassungen der Abflusszeitreihen dargestellt.

An den beiden Pegel Breisach und Kehl-Kronenhof hat die Bilanzanalyse ergeben, dass beide Pegel große Abweichungen aufweisen. Zur Darstellung der Summenlinie sind sie deshalb nicht berücksichtigt worden. Es wurde ersatzweise der Bilanzraum von Maxau nach oben bis

Basel-Rheinhalle vergrößert. Am Ober- und Mittelrhein zeigt die Bilanz ein sehr ausgeglichenes Bild, die Summenlinie läuft nahe null.

Die ursprünglich größeren Abweichungen am Niederrhein konnten durch die Anpassungen der Abflusstafeln reduziert werden. Hier verläuft die Summenlinie jedoch noch immer im negativen Bereich und weist auch unterschiedliche Steigungen zwischen zwei Pegeln auf. Im Vergleich zu den ursprünglichen Daten sind die Abweichungen jedoch deutlich geringer. Die Verbesserungen der Bilanz im zeitlichen Verlauf können an dieser Grafik nicht abgelesen werden. Sie sind in den Bilanzanalysen der einzelnen Bilanzräume (siehe Anhang 1) dargestellt.

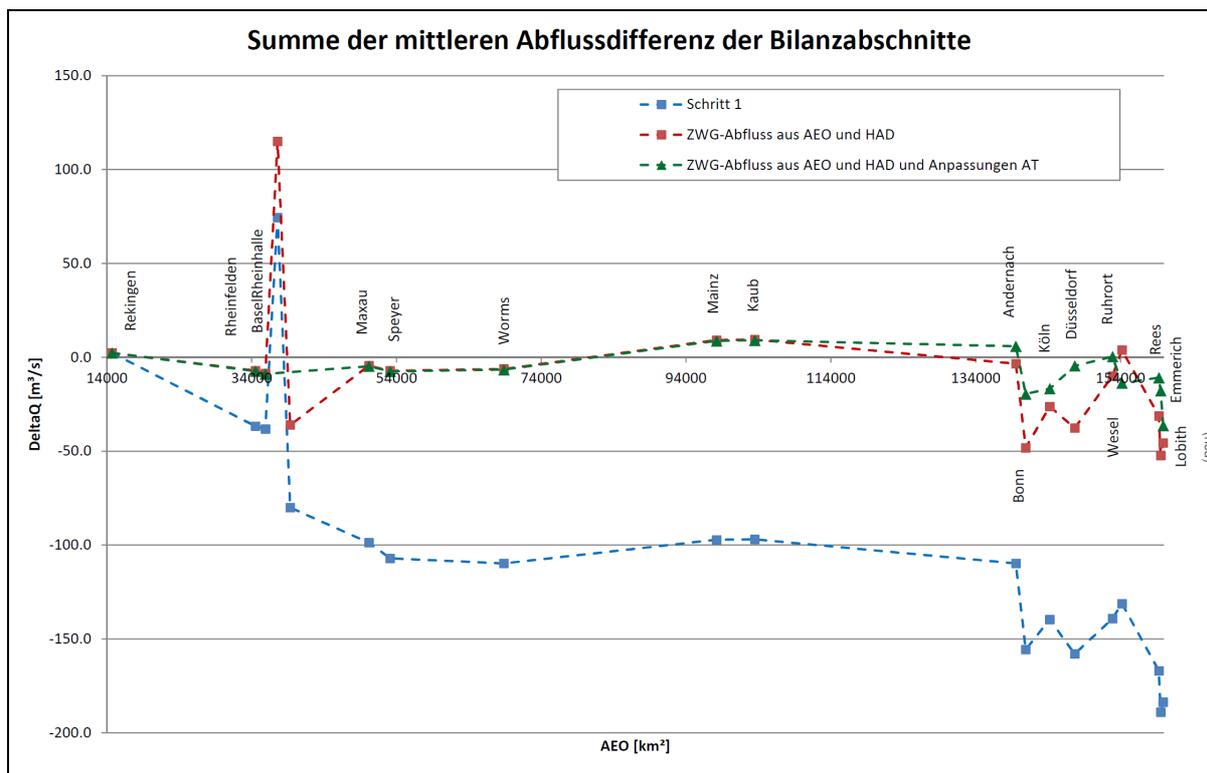


Abbildung 7.11: Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen für die Bilanz mit Originaldaten(blau), geänderten Faktoren(rot) und angepassten Abflusszeitreihen(grün). (aufgetragen über AEO des Rheins)

In Abbildung 7.12 ist die Summenlinie der Differenzen relativ zum jeweiligen MQ des Bilanzabschnittes unteren Pegels aufgetragen. Die Abweichungen (ohne Breisach und Kehl-Kronenhof) pendeln im Bereich von -1,6 % bis 0,5 % und sind damit gering.

Weitere mögliche Ursachen für Bilanzfehler, die auch evtl. für die verbleibenden Bilanzungenauigkeiten am Niederrhein verantwortlich sein könnten, werden in Kapitel 8 untersucht.

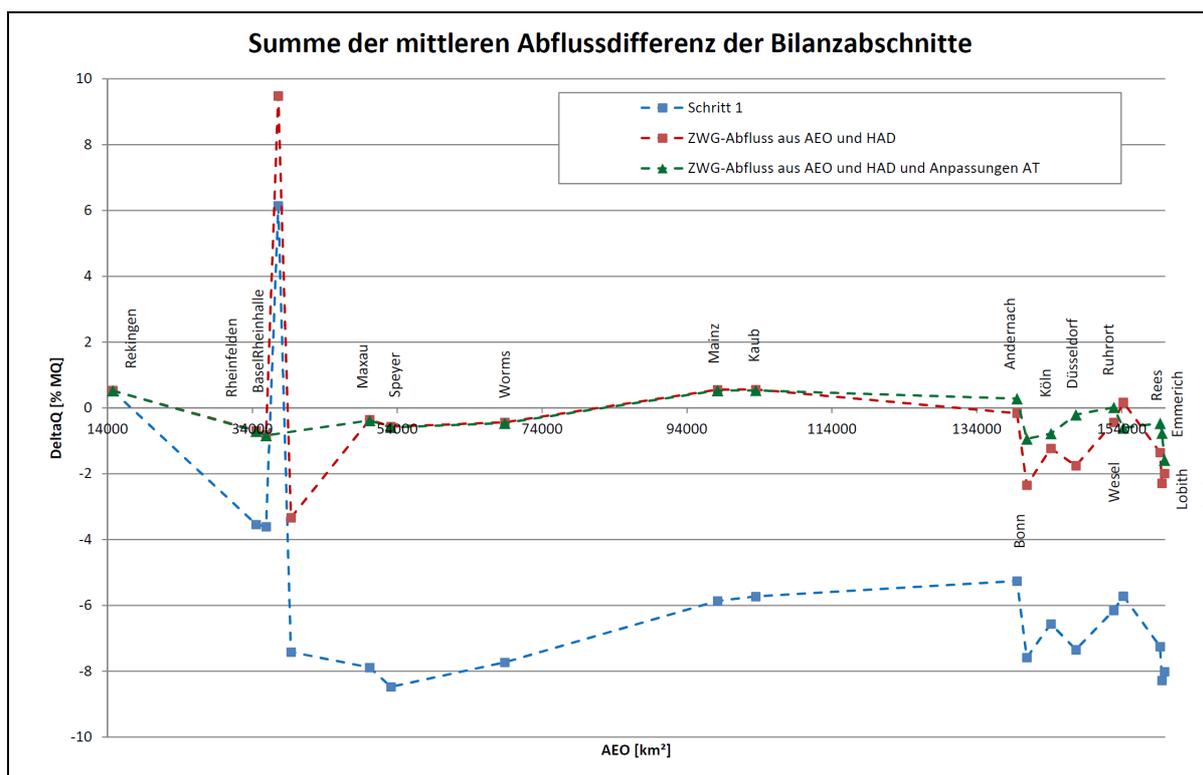


Abbildung 7.12: Summenlinie der mittleren Abflussdifferenzen (relativ zu MQ) für die Bilanz mit Originaldaten(blau), geänderten Faktoren(rot) und angepassten Abflusszeitreihen(grün). (aufgetragen über AEO des Rheins)

In Tabelle 7.4 sind die Abflussdifferenzen und die Aufsummierung über den Rhein für die ursprünglichen und die neuen hydrologischen Faktoren aus A_{EO} und HAD bzw. HADES und die angepassten Abflüsse aufgeführt.

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A_{EO}		Verbesserte hydrologische Faktoren aus A_{EO} und HAD(ES)		Angepasste Abflüsse und verbesserte hydraulische Faktoren	
		DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ
		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Rekingen	Neuhausen	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
Rheinfelden	Rekingen	-39.0	-36.7	-9.6	-7.3	-9.6	-7.3
BaselRheinhalles	Rheinfelden	-1.5	-38.2	-1.5	-8.7	-1.5	-8.7
Breisach	BaselRheinhalles	112.6	74.4	123.5	114.8	4.1	-4.6
Kehl-Kronenhof	Breisach	-154.4	-80.0	-151.0	-36.2		
Maxau	Kehl-Kronenhof	-18.7	-98.7	31.6	-4.6		

Pegel unten	Pegel oben	Hydrologische Faktoren aus A _{EO}		Verbesserte hydrologische Faktoren aus A _{EO} und HAD(ES)		Angepasste Abflüsse und verbesserte hydraulische Faktoren	
		DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ	DeltaQ	Sum DeltaQ
		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Speyer	Maxau	-8.4	-107.1	-2.7	-7.3	-2.7	-7.3
Worms	Speyer	-2.7	-109.7	0.9	-6.4	0.9	-6.4
Mainz	Worms	12.6	-97.2	15.4	9.0	15.4	9.0
Kaub	Mainz	0.3	-96.9	0.3	9.3	0.3	9.3
Andernach	Kaub	-12.8	-109.7	-12.8	-3.5	-3.2	6.1
Bonn	Andernach	-45.9	-155.6	-44.8	-48.3	-25.4	-19.3
Köln	Bonn	16.0	-139.6	22.0	-26.3	2.9	-16.4
Düsseldorf	Köln	-18.3	-157.9	-11.6	-37.9	12.1	-4.3
Ruhrort	Düsseldorf	18.8	-139.1	27.7	-10.2	4.9	0.6
Wesel	Ruhrort	8.0	-131.2	13.9	3.7	-14.1	-13.5
Rees	Wesel	-35.8	-167.0	-35.1	-31.4	2.9	-10.6
Emmerich	Rees	-22.0	-189.0	-21.0	-52.4	-6.9	-17.5
Lobith	Emmerich	5.3	-183.7	6.7	-45.8	-18.6	-36.1

Tabelle 7.5: Gesamtbilanz: Abflussdifferenzen und Summe der Abflussdifferenzen (Hydrologische Faktoren aus AEO, Verbesserte hydrologische Faktoren aus AEO und HAD(ES), angepasste Abflüsse)

7.5 Spektrenbilanz

Bisher wurde die Analyse der Bilanzreinheit unabhängig vom Abflussniveau durchgeführt. Es ist jedoch auch interessant zu wissen, wie gut die Bilanzreinheit der einzelnen Bilanzabschnitte im hohen, mittleren bzw. niedrigen Abflussbereich ist.

Zur Auswertung wurde auf die in der Bilanzanalyse bereits erzeugten Differenzzeitreihen zurückgegriffen. Jede Differenzzeitreihe wurde der jeweiligen Abflusszeitreihe am unteren Pegel als x-y-Funktion gegenübergestellt. Zu jedem Zeitpunkt wurde aus dem Differenzabfluss am unteren Pegel und dem aktuellen Abfluss am unteren Pegel ein Datenpunkt erzeugt. Aus technischen Gründen wurden dabei jeweils zehn Differenzwerte zusammengefasst, um die Punktwolke darstellen zu können. Über diese Punktwolke wurde ein gleitender Mittelwert (jeweils über 20 Werte) ermittelt und dieser als Kurve ebenfalls dargestellt. Damit kann eine Tendenz in den stark streuenden Einzelwerten deutlich gemacht werden. Als Grundlage für diese Auswertung wurden die bereits angepassten Abflusszeitreihen und die daraus ermittelten Differenzzeitreihen gewählt. In Anlage 2 sind die so erzeugten Grafiken für alle Bilanzbereiche dargestellt und ausgewertet. Es zeigt sich, in welchen Abflussbereichen deutliche systematische Abweichungen von der Bilanzreinheit vorliegen.

In Tabelle 7.6 sind die Ergebnisse für die einzelnen Bilanzbereiche kurz zusammengefasst.

Bilanzabschnitt	Analyse der Bilanz für Abflussspektrum
Rekingen - Neuhausen	ausgeglichen, nur bei großen Q negativ
Rheinfelden - Rekingen	ausgeglichen, nur bei großen Q positiv
BaselRheinhalle - Rheinfelden	ausgeglichen
<i>Breisach – Basel-Rheinhalle</i>	<i>sehr unausgeglichen (sehr kleine Q negativ, sonst positiv), Anpassungen am Pegel Breisach für $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt</i>
<i>Kehl-Kronenhof – Basel-RH</i>	<i>sehr unausgeglichen (sehr kleine Q wechselnd, mittlere Q negativ, große Q positiv)</i>
Maxau - BaselRheinhalle	relativ ausgeglichen, jedoch starke Schwankungen
Speyer - Maxau	ausgeglichen, nur bei großen Q positiv
Worms - Speyer	ausgeglichen, nur bei großen Q negativ
Mainz - Worms	ausgeglichen, leichte Schwankungen, bei großen Q negativ
Kaub - Mainz	ausgeglichen, nur bei sehr großen Q positiv
Andernach - Kaub	ausgeglichen, nur bei großen Q leicht negativ
Bonn - Andernach	ausgeglichen
Köln - Bonn	relativ ausgeglichen, große Q negativ
Düsseldorf - Köln	relativ ausgeglichen, große Q positiv, sehr große Q negativ
Ruhrort - Düsseldorf	relativ ausgeglichen, große Q negativ
Wesel - Ruhrort	ausgeglichen, sehr große Q positiv
Rees - Wesel	ausgeglichen, sehr große Q negativ
Emmerich - Rees	ausgeglichen
Lobith(neu) - Emmerich	relativ ausgeglichen, mittlere Q negativ, große Q positiv

Tabelle 7.6: Überblick der Ergebnisse der Bilanzanalyse für einzelne Abflussspektren (Details siehe Anlage 2 „Bilanzanalysen und Anpassungen“)

Am Pegel Breisach, an dem nur für Abflüsse größer $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ Abflusstafeln angewendet werden, konnte durch neue Gültigkeiten der Abflusstafeln eine Verbesserung in diesem Abflussspektrum erzielt werden.

Die größeren Abweichungen treten meist bei hohen Abflüssen auf. In diesen Bereichen liegen an den Pegeln nur sehr wenige Messungen vor, mit denen dann die Abflusstafeln erstellt werden. Die Datengrundlage zur Anpassung der Abflusstafeln ist hier also nicht vorhanden. Jedoch könnten durch eine detailliertere Auswertung für die einzelnen Bilanzabschnitte evtl. konkrete Anpassungen einzelner Abflusszeitreihen bzw. Abflusstafeln ermittelt werden, mit denen auch für die hohen Abflüsse bessere Bilanzen erreicht werden.

Die hierzu erforderlichen Auswertungen wären sehr aufwendig, darüber hinaus müsste eine Methode erarbeitet und abgestimmt werden, wie Abflusstafeln unter Berücksichtigung der Abflussmessungen und der Bilanzen / Auswertungen angepasst werden könnten.

Neben der Auswertung, die die Differenzen des gesamten Zeitraums als Grundlage hat, wurde eine weitere Auswertung je Bilanzraum für einen kürzeren Zeitraum durchgeführt (siehe Anlage 2). Dabei wurde im Regelfall das letzte Jahr des Untersuchungszeitraumes (11/06 bis 10/07) betrachtet. Findet innerhalb dieses Zeitraums jedoch noch ein Abflusstafelwechsel am unteren Pegel statt, so wurde der Zeitraum auf die Gültigkeit der letzten Abflusstafel gekürzt.

An der Landesgrenze zwischen Deutschland und den Niederlanden treffen zwei unterschiedliche Verfahren der Abflussermittlung aufeinander. Hier ist ein Vergleich der Bilanzreinheit in den einzelnen Abflussbereichen besonders interessant. Insgesamt ist die länderübergreifende Spektrenbilanz zwischen Lobith und Emmerich relativ ausgeglichen. Jedoch treten bei sehr hohen Abflüssen große positive Differenzen und bei mittleren Abflüssen negative Differenzen auf. Vor allem die Differenzen bei mittleren Abflüssen tragen zur Gesamtdifferenz in diesem Bilanzabschnitt bei, da dieser Abflussbereich einen Anteil von etwa 40 % am Gesamtabfluss hat. Hier ist also noch länderübergreifender Harmonisierungs- und Anpassungsbedarf vorhanden.

8 Abschätzung der Sensitivität der Einzelkomponenten auf die Bilanz

Wie im Rahmen des Kapitel 3 Methodisches Vorgehen beschrieben und vereinbart, erfolgten die Anpassungen zur Verbesserung der Bilanz datenbasiert. Datenbasiert heißt, dass nur Änderungen vorgenommen wurden, welche sich auf Basis von Messwerten oder Analogieschlüssen belegen lassen. Neben der Plausibilisierung und Homogenisierung der Daten war dies im Wesentlichen eine Modifikation der Abflusstafeln hinsichtlich Verlauf und Gültigkeit.

Neben diesen Einflussgrößen ist jedoch eine Vielzahl weiterer Komponenten für die Güte der Abflusszeitreihen und somit der Bilanz von Bedeutung. Die Sensitivität der einzelnen Komponenten auf die Abflusszeitreihen / Bilanz ist unterschiedlich groß. Im Folgenden werden unterschiedliche Komponenten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Abflussbilanz abgeschätzt. Neben dem Wissen um die Sensitivität der einzelnen Einflussfaktoren sollen die Ausführungen auch dazu beitragen, zukünftig eine bessere Qualität zu erreichen.

8.1 Genauigkeit des Wasserstandes

Die Grundlage der meisten Abflusszeitreihen sind die Wasserstandszeitreihen, die über Abflusstafeln in Abflüsse überführt werden. Damit ist die Genauigkeit der Wasserstandszeitreihen ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Die Angabe der Pegelwasserstände erfolgt in der Regel in Zentimeterangaben.

Wie alle Messwerte unterliegen auch die Wasserstandsmessungen Unschärfen. Bei der Abschätzung der Genauigkeit des Wasserstandes ist auch das jeweils vorherrschende hydrologische Ereignis von Relevanz. Für Niedrig- und Mittelwasserstände sind die Unschärfen vergleichsweise gering, plausibel erscheinen Ableseunsicherheiten von ± 1 cm. Für Hochwasserstände ist infolge des Wellengangs eine „präzise“ Ablesung der mittleren Pegelstände erschwert. Hier sind Ableseunsicherheiten von ± 3 cm durchaus realistisch. Selbst bei absolut korrekter Ablesung der Wasserstände am Pegel ist infolge der großen Flussbreiten - insbesondere im Niederrhein - der abgelesene Wasserstand nicht zwingend repräsentativ, da innerhalb des Querschnitts z.B. infolge des Windstaus Wasserstandsdifferenzen auftreten.

Um die Auswirkungen der „Unschärfen“ in der Wasserstandserfassung auf die daraus ermittelten Abflüsse abschätzen zu können, wurden exemplarisch an zwei Rheinpegeln (Worms, Düsseldorf) die Abflüsse mittels W-Q-Transformation zum Einen aus den originalen Wasserstandszeitreihen und zum Anderen aus um 1 cm angehobenen originalen Wasserstandszeitreihen berechnet. In der Tabelle 8.1 sind die sich ergebenden mittleren Abflüsse für die beiden Pegel aufgeführt.

Pegel	Mittlerer Abfluss aus Originalwasserständen	Mittlerer Abfluss aus um 1 cm erhöhten Wasserständen	Abweichung
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
Düsseldorf	2150	2157	0,3
Worms	1419	1425	0,4

Tabelle 8.1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der W-Q-Transformation an Rheinpegeln bei Änderung der Wasserstände um 1 cm

Bei großen Abflüssen liegen geringere Messgenauigkeiten mit Abweichungen bis zu ± 3 cm vor. Da diese Abflüsse jedoch nur selten auftreten, ist trotz der dann großen Abflüsse der Anteil am Abflussvolumen relativ gering.

Bei den großen Pegeln im Rhein liegen infolge der Ableseungenauigkeiten die Schwankungen für Bilanzen über längere Zeiträume im Bereich von $\pm 0,5$ %, bei Einzelwellen können die resultierenden Unschärfen deutlich größer sein.

8.2 Genauigkeiten von Abflussmessungen

Die Grundlage der Abflusstafeln bilden die durchgeführten Messungen. Aus ihnen werden die Abflusstafeln erzeugt und mit ihnen dann immer wieder auf ihre weitere Anwendbarkeit untersucht. Die Genauigkeit der Messungen trägt damit entscheidend zur Genauigkeit der ermittelten Abflüsse bei.

Hinsichtlich der Sensitivität von Abflussmessungen ist zu unterscheiden zwischen der Genauigkeit der Wasserstandserfassung während einer Messung und der Durchflussmessung selbst.

Wasserstand

Bei der Untersuchung einzelner Pegel zeigte sich, dass teilweise erhebliche Differenzen zwischen dem bei der Messung registrierten Wasserstand und dem zu diesem Zeitpunkt in der Wasserstandszeitreihe vorliegenden Wasserstand auftreten. Dies kann ggf. auf einen falsch angegebenen Messzeitpunkt zurückzuführen sein, was für die Erstellung der Abflusstafel irrelevant wäre. Es ist jedoch auch möglich, dass bei der Abflussmessung ein „falscher“ Wasserstand abgelesen und im Weiteren verwendet wurde.

In Abbildung 8.1 ist exemplarisch der zu einzelnen Abflussmessungen registrierte Wasserstand und die Wasserstandszeitreihe am selben Pegel dargestellt. Zur besseren Interpretation wurde die gelbe Linie mit einer Abweichung von einem Zentimeter eingblendet. Bei den meisten Messungen ist die Differenz vom gemessenen Wasserstand zum entsprechenden Wasserstand der Zeitreihe kleiner oder gleich einem Zentimeter. Es liegen jedoch auch einige Messungen mit deutlich größeren Abweichungen vor.

Sofern die Fehler bei der Angabe des Wasserstandes nicht bemerkt werden, können deutliche Fehler in der Abflusstafel und somit auch der Abflusszeitreihe auftreten. Eine generelle Aussage zu den Fehlern ist schwierig, bei der Annahme einer Abbildegenauigkeit von 1 bis 2 cm liegt der resultierende Fehler in der Abflusszeitreihe analog zu den Darstellungen in Kapitel 8.1 bei rund 0,5 bis 1 %.

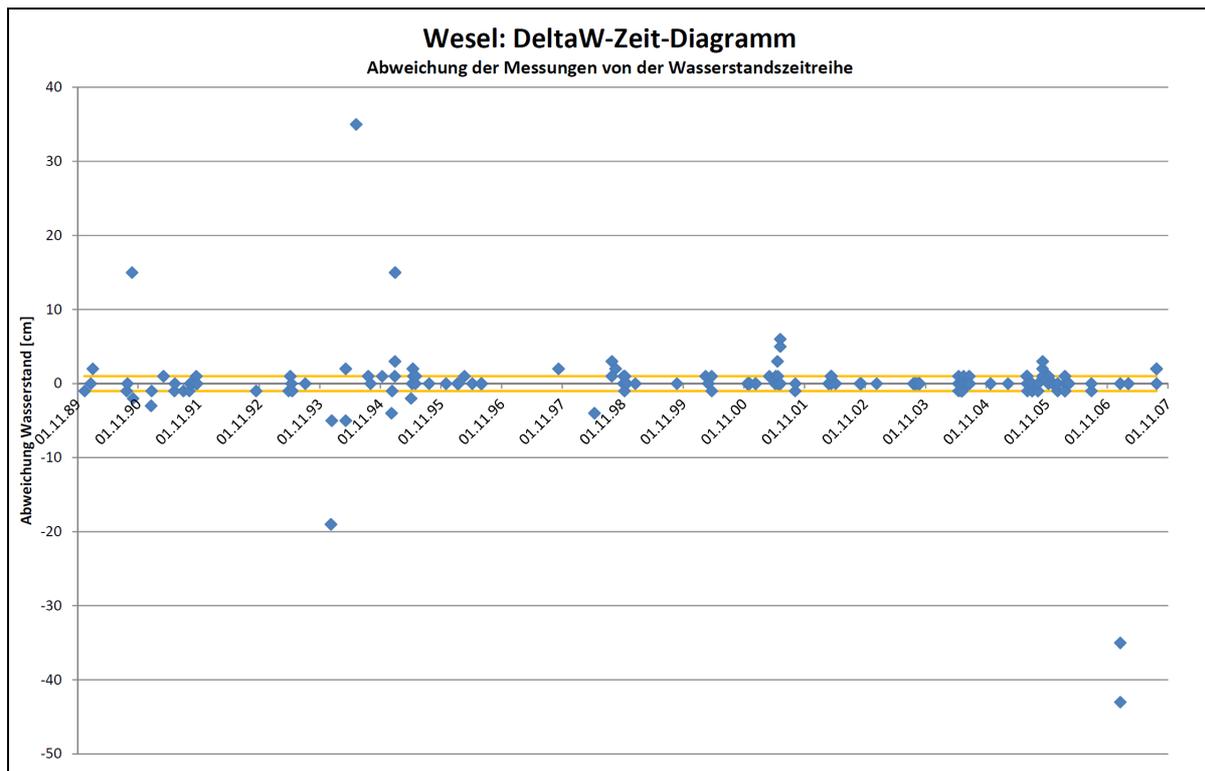


Abbildung 8.1: Abweichungen der gemessenen Wasserstände von der Wasserstandszeitreihe (am Beispiel Wesel)

Durchflussmessung

Bei der Abschätzung der Genauigkeit von Abflussmessungen muss, analog zu den Wasserstandsablesungen, zwischen den Abflussmessungen bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasserständen unterschieden werden. Die Genauigkeit der Abflussmessungen hängt sehr stark von den örtlichen Verhältnissen an dem jeweiligen Pegel ab, allgemeingültige Aussagen für alle Pegel sind nicht möglich.

Tendenziell ist zu erwarten, dass die Abflussmessungen bei mittleren Verhältnissen besser erfassbar sind als bei extrem hohen Abflüssen. Bei sehr hohen Abflüssen sind die Abflussverhältnisse nicht immer klar definiert, die Turbulenzen nehmen zu und das Vorland wird überströmt. Ergänzend ändert sich der Abfluss während der Messung in einer Hochwasserwelle aufgrund der hydrologischen Geschehnisse.

Gemäß den Erfahrungen einiger Pegelbetreiber unterliegen Abflussmessungen bei Niedrigwasser einer Unsicherheit von $\pm 5\%$. Für Mittelwasserstände nimmt das Streumaß auf rund $\pm 3\%$ ab und steigt bei Abflussmessungen während Hochwasserereignissen auf ± 5 bis $\pm 10\%$. Im Falle extremer Ereignisse können die Unschärfen auch zwischen ± 10 bis $\pm 20\%$ ansteigen.

Im Rahmen der Durchflussmessungen werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Im Bereich der großen Profile des Rheins kommen in den letzten Jahren vor allem ADCP-Messungen zum Einsatz.

Die Messungen in einem Ringversuch der BfG zum Vergleich von ADCP-Messungen im Jahr 2007 bei mittleren Abflussverhältnissen streuten bei 90 % der Messungen mit bis zu 3 % um den Referenzwert. Ob die Streuung zufällig oder systematisch auftritt, wurde dabei nicht untersucht / dokumentiert. Bei einer zufälligen Streuung könnten sich die Abweichungen bei entsprechend vielen Messungen ausgleichen. Liegen jedoch systematische Fehler vor, so werden auch die Messungen systematisch verfälscht und damit auch die Abflusstafeln und die Abflüsse. Bei einigen Messungen wurden Ungenauigkeiten bei der Durchführung festgestellt, die zu systematischen Abweichungen führen. Ob dies bei hier vorliegenden Messungen der Fall war, kann jedoch nicht beurteilt werden. ADCP-Messungen erfassen systembedingt nicht den gesamten Fließquerschnitt eines Profils. Sowohl im rechten und linken Uferbereich, als auch an der Wasseroberfläche und an der Sohle können Bereiche nicht erfasst werden. Die nicht erfassten Randbereiche werden extrapoliert, wobei sowohl die Größe der nicht erfassten Querschnittsfläche, als auch die dort auftretenden Fließgeschwindigkeiten nicht exakt bekannt sind. Der ermittelte Abfluss dieser Bereiche weist damit Unsicherheiten auf, die eine Ursache für einen Teil der oben erwähnten Abweichungen sein können.

Wenn zur Erstellung einer Abflusstafel nur wenige Messungen verwendet wurden, kann die hierauf resultierende Abflusszeitreihe denselben Fehler wie die Einzelmessungen aufweisen, d.h. $\pm 3\%$ für Mittelwasser und größere Werte für Hoch- und Niedrigwasser. Sofern einer Abflusstafel viele Messungen zugrunde liegen und diese entsprechend über das Abflussspektrum verteilt sind, nimmt die Güte der Abflusstafel und somit auch der berechneten Abflusszeitreihen zu.

Unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten der Wasserstandserfassung und der Durchflussmessung erscheint eine Spanne von $\pm 2\%$ realistisch.

8.3 Ermittlung des Abflusses des nicht durch Pegel abgedecktes Zwischengebietes

Insgesamt ist im Untersuchungsgebiet eine Fläche von 135 407 km² durch Pegel abgedeckt. Das Gesamteinzugsgebiet des Rheins am Pegel Lobith beträgt 159 896 km². Damit ist der Abfluss einer Fläche von 24 489 km² nicht durch Pegel belegt. Das entspricht 15 % des ge-

samen Einzugsgebietes. Für diese Flächen muss der Abfluss aus den vorhandenen Pegel-
daten abgeleitet werden.

Der erste Ansatz zur Ableitung der Zuflüsse aus den nicht beobachteten Zwischengebieten
als Funktion der Einzugsgebietsgröße und der im Nahbereich gelegenen Pegel (siehe Kapi-
tel 7.2.1 und 7.2.2) führte zu großen Bilanzfehlern am gesamten Rhein. Durch eine geänderte
Ermittlung der hydrologischen Faktoren, die neben den Einzugsgebietsgrößen auch die regi-
onale Abflussbereitschaft gemäß HAD bzw. HADES berücksichtigt, konnte eine deutliche
Verbesserung der Bilanz erreicht werden.

Die so ermittelten Zuflüsse aus den nicht beobachteten Zwischengebieten beinhalten die
Unsicherheit der zugrunde liegenden Abflusszeitreihen zzgl. einem Fehler, der mit der Über-
tragung der Abflüsse von einem Einzugsgebiet auf ein anderes einhergeht.

Der Fehler der Zuflusszeitreihen der nicht beobachteten Zwischengebiete liegt vermutlich im
Bereich von $\pm 5\%$ bis $\pm 10\%$. Unter Berücksichtigung des Flächenanteils der nicht beobach-
teten Zwischengebiete am Gesamtgebiet trägt dies zu einem Gesamtfehler von bis $\pm 2\%$ bei.

8.4 Verdunstung der Gewässeroberfläche

In der Bilanz wird die Verdunstung aus dem Wasserkörper des Rheins vernachlässigt. In der
nachfolgenden ganz groben Abschätzung wird eine Größenordnung bestimmt:

Wasserfläche gesamter untersuchter Rhein: ca. $800\,000\text{ m} \cdot 200\text{ m} = 160\text{ km}^2$

Verdunstungsrate der Wasseroberfläche: 600 mm/a

=> mittlere Verlustrate im gesamten Rhein $160\text{ km}^2 \times 600\text{ mm/a} = 3\text{ m}^3/\text{s}$

Im Vergleich zum mittleren Gesamtabfluss in Lobith von knapp $2.300\text{ m}^3/\text{s}$ entspricht dies
einem Anteil von rund $-0,13\%$. In den Sommermonaten ist die Verdunstung größer, der mitt-
lere Abfluss kleiner, so dass der Verdunstungsanteil auf bis zu -1% ansteigen kann.

Bei dieser Abschätzung ist zu berücksichtigen, dass dies kein zufälliger, sondern ein syste-
matischer „Fehler“ ist. Zur Berücksichtigung der Verdunstung wäre somit der Ansatz einer
Verdunstungszeitreihe zur Korrektur der Bilanz zu erwägen.

8.5 Direkter Niederschlag auf die Gewässeroberfläche

In der Bilanz wird der direkte Niederschlag auf den Wasserkörper des Rheins vernachlässigt.

Analog zur Betrachtung der Verdunstung erfolgt auch hier eine stark vereinfachte Abschät-
zung, um den Einfluss zu bestimmen.

Wasserfläche gesamter untersuchter Rhein:	ca. 800 000 m * 200 m = 160 km ²
Niederschlagshöhe:	750 mm/a
=> mittlerer Eintrag im gesamten Rhein	160 km ² x 750 mm/a = 3,8 m ³ /s

Im Vergleich zum mittleren Gesamtabfluss in Lobith von knapp 2.300 m³/s entspricht dies einem Anteil von etwa +0,17 %. Sofern intensive Niederschläge mit einer geringen Wasserführung zusammenfallen, kann der Effekt kurzzeitig und lokal deutlich größer sein. Der Einfluss nimmt in Fließrichtung aufgrund der steigenden Rheinabflüsse ab.

Analog zur Verdunstung ist auch hier zur Verbesserung der Bilanz die Berücksichtigung von Niederschlagszeitreihen in den jeweiligen Bilanzabschnitten zu überdenken. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Niederschläge wie auch die Verdunstung keine zufälligen, sondern systematische Fehler darstellen.

8.6 Austausch mit dem Grundwasser

Zwischen Fließgewässern und dem Grundwasser erfolgt in der Regel ein Austausch, welcher den hydraulischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Ist der Grundwasserstand tiefer als der Wasserstand im Gewässer, erfolgt eine Exfiltration ins Grundwasser, im umgekehrten Fall eine Infiltration in den Wasserkörper (siehe Abbildung 8.2). Aufgrund der Bilanzprobleme im Niederrhein wurde der Austausch mit dem Grundwasser stets als eine mögliche Fehlerquelle bzw. Ursache genannt.

Eine grobe Abschätzung der möglichen Versickerung in diesem Bereich lässt geringe Versickerungsraten erwarten. Bei einem angesetzten k_f -Wert von 10^{-4} m/s und einer Wasserspiegeldifferenz vom Rhein zum Grundwasser von 1 m ergeben sich, je nach Ansatz der Dicke des durchströmbaren Grundwasserleiters Werte für die Versickerungsrate von $3 \cdot 10^{-5}$ bis $10 \cdot 10^{-5}$ m³/s je lfdm. Für den Rheinabschnitt zwischen Düsseldorf – Köln mit einer Länge von rund 56 km entspricht dies ca. 1,5 bis 5,6 m³/s. Diese Zu- oder Abströmungen treten jedoch nicht über den gesamten Zeitraum auf, sondern es wechseln, je nach Wasserstand im Rhein und im Grundwasser, Phasen des Zufließens mit Phasen des Abfließens ab.

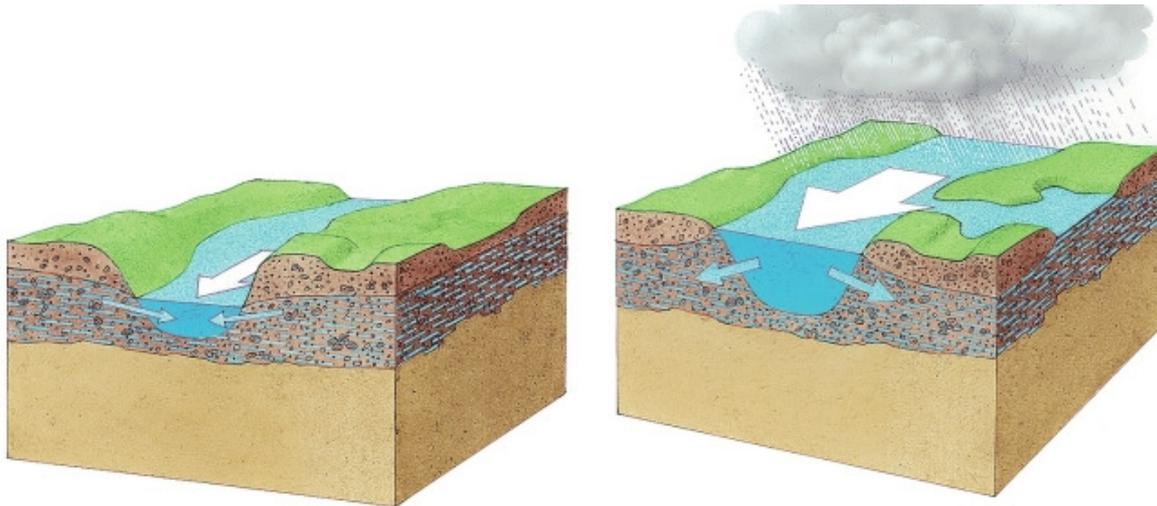


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung zur Wechselwirkung von Gewässer und Grundwasser (Quelle: <http://wasserforscher.de>, 2010, Bayrisches Landesamt für Umwelt)

Auch in der Vorstudie wurde der Grundwassereinfluss durch den Sobek-internen Grundwasserbaustein (status quo) abgebildet. Die Parametrisierung erfolgte auf Basis der großen Rheinhochwasser in den 1990er Jahren (Simulation von Einzelereignissen). Gemäß den Ergebnissen der Vorstudie liegt der größte Grundwasserzustrom in den Rhein mit 32 bis 42 m³/s zwischen den Pegeln Düsseldorf und Köln (vergleiche Bericht der Vorstudie Phase 2¹ Seite 4-53). Dieser Grundwasserzustrom erscheint sehr hoch. Der Grundwasser-Baustein ist, wie die Vorstudie belegt hat, für Langzeitsimulationen eher ungeeignet. In der hier vorliegenden Untersuchung beträgt der Bilanzwert zwischen Düsseldorf und Köln 4,9 m³/s und ist somit deutlich kleiner als die 32 bis 42 m³/s.

Der Einfluss des Grundwassers ist schwer zu quantifizieren, die in Sobek angesetzten Parameter sind voraussichtlich zu überarbeiten. Lang andauernde signifikante Grundwasserzu- oder -abströmungen sind vermutlich zu vernachlässigen.

8.7 Schifffahrtskanäle

Der Rhein wird intensiv zur Schifffahrt genutzt. Insbesondere am Niederrhein erfolgt eine intensive Bewirtschaftung der Schifffahrtskanäle, für welche im Wesentlichen der Rhein und die Lippe zur Speisung herangezogen werden. In Abbildung 8.3 ist ein Gesamtsystem schematisch dargestellt.

¹ Weerts, A.H. and M.J.P. Mens, 2007. Water balance Maxau – Rhine branches. Phase 2: Water balance analyses between the main hydrometric stations. WL | Delft Hydraulics report, Q4231, commissioned by RIZA-RWS.



Abbildung 8.3: Schematische Darstellung Westdeutsche Kanäle
 (Quelle: Kurzüberblick über die Wasserwirtschaft der westdeutschen Kanäle, Wasserverband Westdeutsche Kanäle)

Vor allem über den Rhein-Herne-Kanal und den Wesel-Datteln-Kanal wird Wasser aus der Lippe (oberhalb des Pegels Schermbeck) entnommen und fließt dem Rhein und/oder der Ems zu. Dieses Wasser ist in den Pegelwassermengen (Schermbeck/Lippe) nicht mehr enthalten. Im Mittel beträgt die Speisung der Kanäle aus der Lippe ca. 300 Mio. m³/a, das entspricht einem Abfluss von 9,5 m³/s. Ein Teil dieses Abflusses fließt über den Dortmund-Ems-Kanal in die Ems, ein anderer Teil über den Wesel-Datteln-Kanal und den Rhein-Herne-Kanal in den Rhein. Weitere „Entnahmen“ sind infolge Versickerung und Verdunstung zu erwarten. Über die Größe des Anteils, der in den Rhein fließt, lagen keine Angaben vor. Die Bilanz zwischen Düsseldorf und Wesel ist insgesamt negativ. Ein weiterer Zufluss würde die Bilanz verschlechtern.

Eine Berücksichtigung der Schifffahrtskanäle erscheint sinnvoll, wenn weitere Informationen zu den Wassermengen vorliegen und die Wassermengen signifikant sind.

8.8 Kraftwerke

Kraftwerke benötigen Rheinwasser vor allem zu Kühlzwecken. Der Großteil des entnommenen Wassers wird nach der Kraftwerkspassage in der Regel wieder eingeleitet, ein gewisser Anteil verdunstet. Bei großen Kraftwerken mit mehr als 4 GW werden im zugehörigen Kühlturm etwa 1500 Kilogramm je Sekunde bzw. $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasser in Wasserdampf umgewandelt (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kühlturm>). Am Oberrhein liegen mehrere Kraftwerke (Phillipsburg, Biblis, Fressenheim, Leibstatt, ...) mit bis zu 2,5 GW Leistung. Am Niederrhein befindet sich das Kraftwerk Voerde (zwischen Wesel und Ruhrort) mit 2,2 GW. Der mögliche Wasserverlust im Rhein beträgt aufgrund der Verdunstung aus Kühltürmen jeweils bis zu $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

In Bezug auf den gesamten Rheinabfluss entspricht dies lediglich rund 0,04 %. Der mittlere Bilanzfehler im Abschnitt Wesel-Ruhrort beträgt unter Berücksichtigung der angepassten Zeitreihen $-14 \text{ m}^3/\text{s}$. In Bezug hierauf entspricht die Verdunstung in den Kühltürmen rund 7 %. Unter Berücksichtigung der Kraftwerkentnahme würde der Bilanzfehler im Abschnitt Wesel-Ruhrort nicht mehr -14 , sondern $-13 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen.

8.9 Trinkwasserentnahmen/Kläranlagen

Die Wasserentnahme aus dem Rhein zur Trinkwassergewinnung wird ihm im Wesentlichen über die Kläranlage zurückgegeben. Falls die Entnahme jedoch oberhalb eines Pegels und der Kläranlagenablauf unterhalb des Pegels liegen, wird das entnommene Wasser am Pegel „vorbeigeleitet“, die entsprechende Wassermenge fehlt an diesem Pegel.

Als Beispiel sei hier die Wassermenge einer Stadt mit einer Million Einwohnern grob abgeschätzt, die bei vollständiger Wasserversorgung der Stadt aus dem Rhein am Pegel vorbeifließen würde. Bei einer Million Einwohner und einem Trinkwasserverbrauch von 150 l/EW/d ergibt sich, falls die Trinkwasserversorgung komplett aus dem Rhein erfolgt, eine Entnahme von $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$, die am Pegel „vorbeifließen“ würde. Aufgrund dieses „Fehlers“ würde sich im Bilanzraum oberhalb ein Bilanzfehler von $-1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Bereich unterhalb ein Bilanzfehler von $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ einstellen. Für die Bereiche weiter unterhalb hätte dies keine weitere Auswirkung. Auch die Summenlinie würde durch diesen „Fehler“ nur am Pegel selbst abweichen. Weiter unterhalb gleichen sich die Bilanzfehler in den beiden Bilanzbereichen wieder aus.

8.10 Hysterese

Die W-Q-Beziehung an einem Profil ist im Wesentlichen von den geometrischen Randbedingungen geprägt und damit quasi statisch. Im Falle steigender und fallender Wasserstände werden jedoch „Verschiebungen“ verursacht. Bei steigenden Wasserständen ist das Energieliniengefälle größer als das stationäre Gefälle, die Abflüsse sind bei gleichem Wasserstand somit größer. Bei fallenden Wasserständen ist es entsprechend umgekehrt. In Abbildung 8.4 ist eine solche W-Q-Beziehung dargestellt.

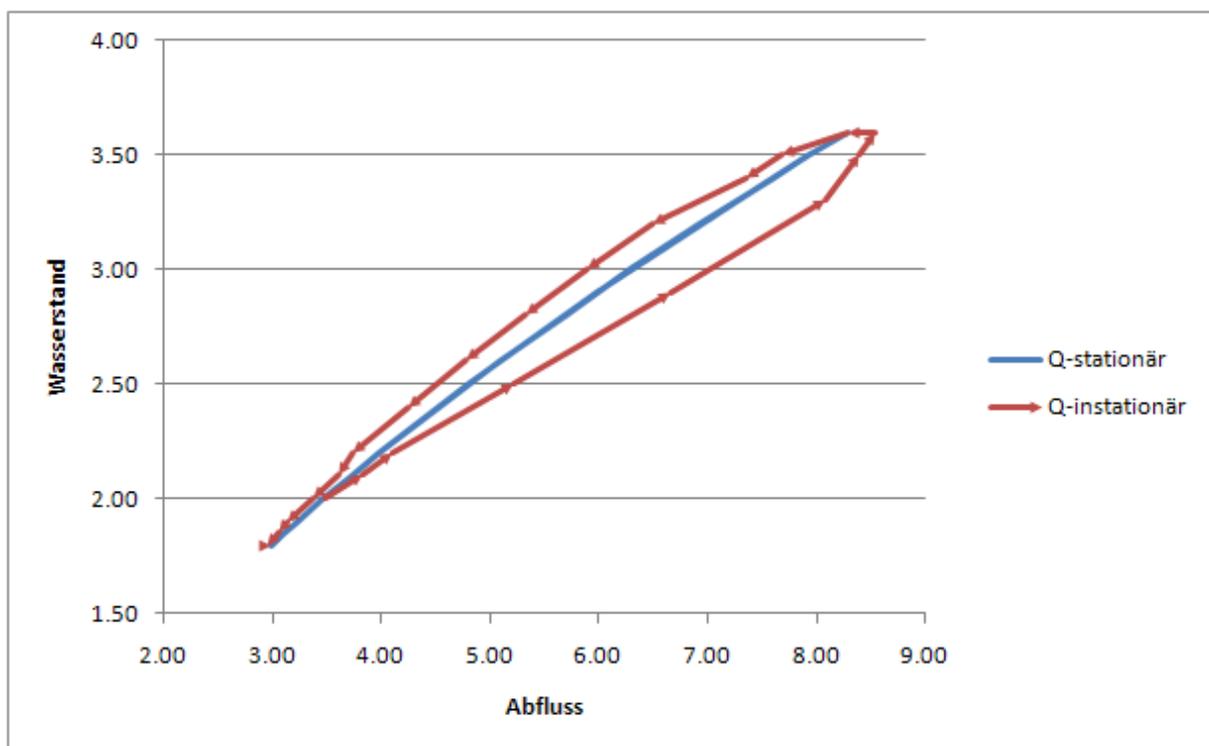


Abbildung 8.4: Schematische Darstellung der Wasserstand–Abfluss-Beziehung beim Durchgang einer Hochwasserwelle und im Falle stationärer Fließverhältnisse

Die obigen Ausführungen und auch die Abbildung 8.6 machen deutlich, dass eine einfache Transformation vom Wasserstand in Abfluss nur bei stationären Verhältnissen zulässig ist. Im Falle steigender Wasserstände wird der Abfluss in der Regel unterschätzt. Sinken die Wasserstände, wird bei dem stationären Ansatz der Abfluss überschätzt. Zur Berücksichtigung und Quantifizierung dieses Phänomens werden im Folgenden zwei unterschiedliche Einflussbereiche dieses Hysterese-Effektes getrennt voneinander untersucht, wie unter Berücksichtigung der Hysterese-Effekte eine Abflusszeitreihe modifiziert werden müsste und welchen Einfluss dies auf die Bilanz hat. Im zweiten Ansatz wird der Einfluss der Hysterese im Rahmen der Abflussmessungen und somit bei der Erstellung der Abflusstafel analysiert

und die Auswirkungen abgeschätzt. Bei der Betrachtung liegt der Fokus auf den Effekten für die Rheinpegel.

8.10.1 Berücksichtigung der Hysterese bei Abflusszeitreihen

Zur Berechnung des Hysterese-Einflusses wurde das Korrekturverfahren nach Jones benutzt. Hierbei ergibt sich der korrigierte Abfluss zu:

$$Q = Q_{AT} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{1}{S \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}\right)}$$

Q	= aktueller Abfluss [m ³ /s]
Q _{AT}	= Abfluss entsprechend Abflusstafel [m ³ /s]
S	= Energiegefälle bei konstantem Abfluss [-]
c	= Geschwindigkeit der Flutwelle [m/s]
h	= Wasserstand [m]
t	= Zeit [Sekunde]

Die Untersuchung des Hysterese-Einflusses wurde exemplarisch für den Pegel Rees durchgeführt. Für eine Welle am Pegel Rees wurde die Abflusszeitreihe einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Hysterese aus der Wasserstandzeitreihe ermittelt (Abbildung 8.5). Hier ist deutlich zu erkennen, dass der Abfluss im steigenden Bereich erhöht und im fallenden Bereich reduziert ist.

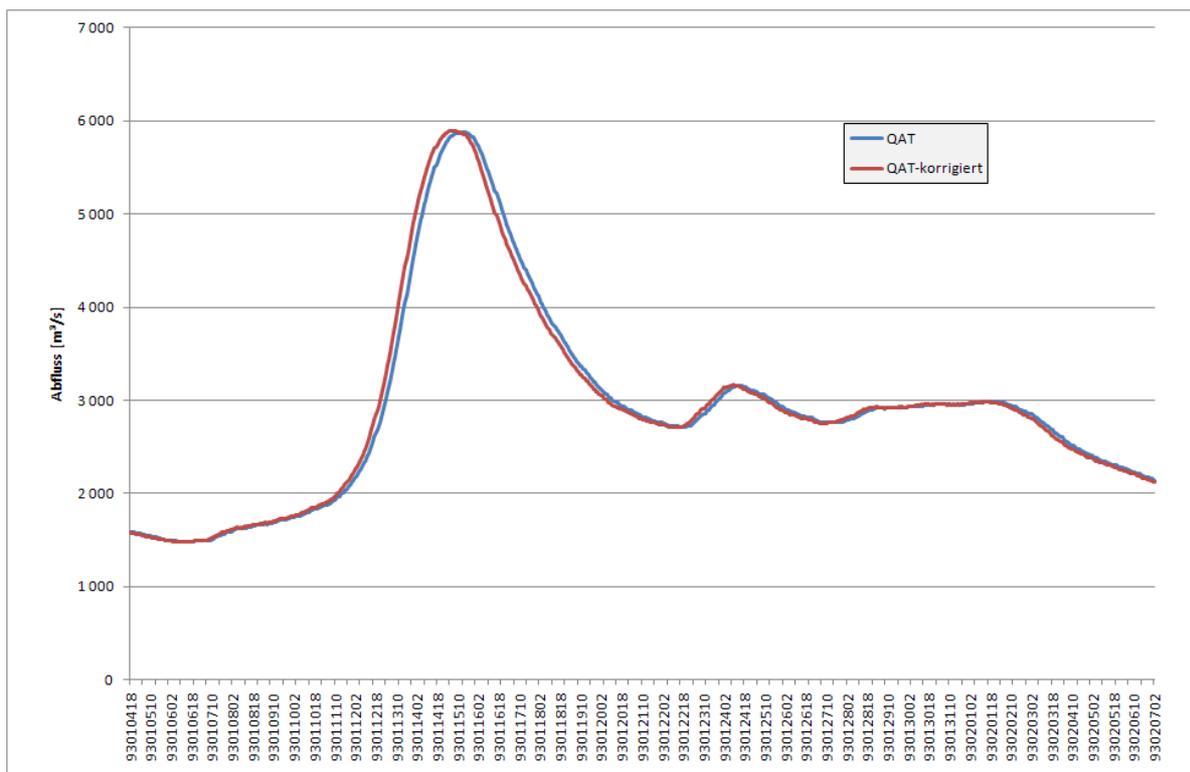


Abbildung 8.5: Abfluss am Pegel Rees für eine Welle mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese bei der W-Q-Beziehung

Der Wellenablauf wird durch die Berücksichtigung der Hysterese natürlicher abgebildet. Jedoch gleichen sich die Effekte bei der Bilanzierung gesamter Wellen und/oder längerer Zeiträume praktisch aus. In diesem Beispiel war der Einfluss auf die Bilanz mit -0,04 % nahezu Null.

Für die Bilanzierung größerer Zeiträume ist eine Berücksichtigung der Hysterese bei der Abflussermittlung aus den Wasserständen nicht relevant. Bei der Erstellung der Abflusstafeln, die der Umrechnung von Wasserständen in Abflüssen dienen, hat sie jedoch, wie im folgenden Kapitel dargestellt, einen Einfluss.

8.10.2 Berücksichtigung der Hysterese bei der Erstellung von Abflusstafeln

Der Hysterese-Effekt ist bei ansteigenden und abfallenden Hochwasserwellen stets vorhanden. Bei Abflussmessungen wird der gemessene Durchfluss dem während der Messung registriertem Wasserstand zugeordnet. Erfolgt diese Messung im ansteigenden Ast einer Hochwasserwelle, würde, wie in Abbildung 8.4 leicht zu erkennen, dem Wasserstand ein im Vergleich zum stationären Zustand zu großer Durchfluss zugeordnet.

Bei der Erstellung von Abflusstafeln wird dieser Hysterese-Effekt bei den einzelnen Abflussmessungen in der Regel nicht berücksichtigt. Da die Abflusstafel eine Ausgleichskurve durch

alle Abflussmessungen darstellt, kann sie die „wahren“ Verhältnisse nur widerspiegeln, wenn die Abflussmessungen lediglich zufällige Abweichungen vom „wahren“ Wert aufweisen und keine systematischen Fehler vorhanden sind.

Die Hysterese ist nicht zufällig, sondern systematisch, da bei steigendem oder fallendem Wasserstand der Abfluss größer oder kleiner als der im stationären Zustand ist. Im Extremfall, wenn z.B. immer nur bei fallendem Wasserstand gemessen würde, würde sich eine Abflusstafel ergeben, die bei fallendem Wasserstand den korrekten Abfluss angibt, bei stagnierendem und erst recht bei steigenden Wasserständen jedoch einen zu kleinen.

Zum Ausgleich dieser Abweichungen ist es sinnvoll, die Messungen vor der Erzeugung der Abflusstafel um den Hysterese-Einfluss zu bereinigen. Erfolgt z.B. bei steigendem Wasserstand eine Durchflussmessung, ist diese durch die Hysterese beeinflusst. Der gemessene Abfluss muss somit derart reduziert werden, dass der Hysterese-Effekt entfällt, der korrigierte Abfluss somit einen stationären Abfluss des gemessenen Wasserstands entspricht. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 8.6 für eine Messung im Wellenanstieg dargestellt.

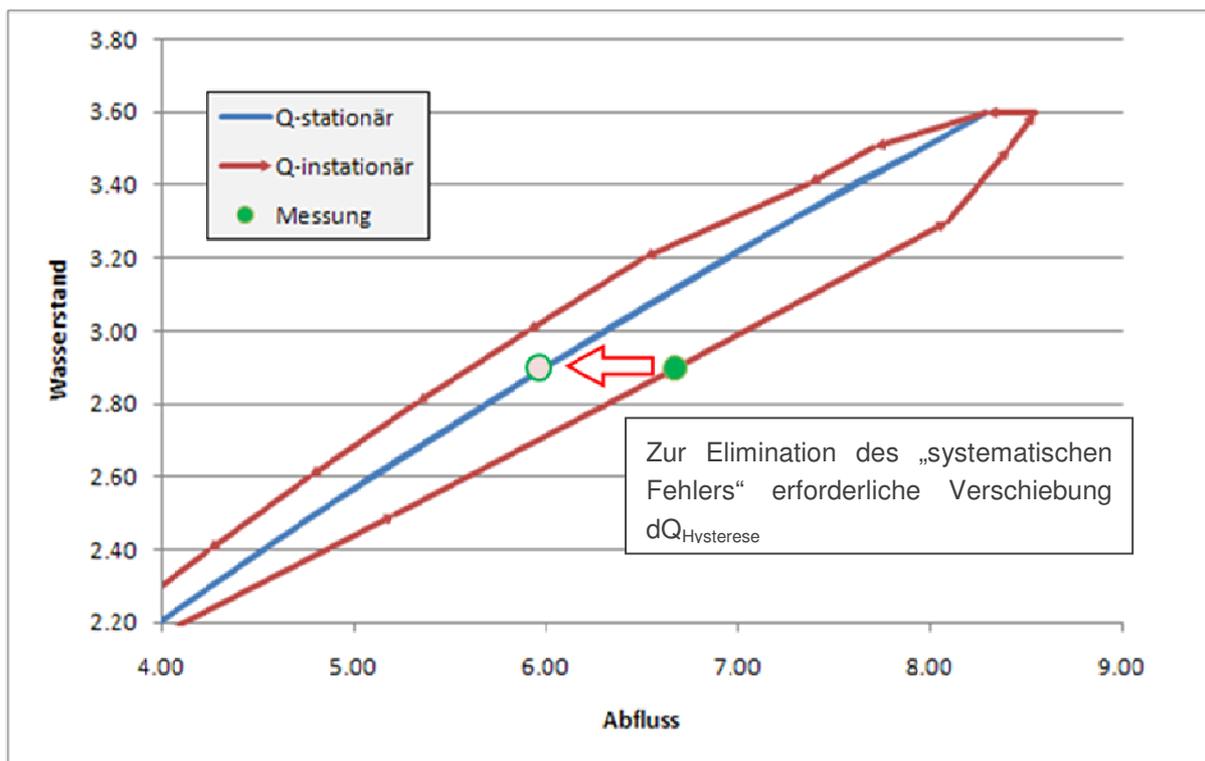


Abbildung 8.6: Erzeugung einer „stationären“ Abflusstafel unter Berücksichtigung der Hysterese bei der Messung (Prinzip)

Das oben beschriebene Vorgehen wurde exemplarisch am Pegel Rees untersucht. In Abbildung 8.7 ist ein Ausschnitt der Wasserstandsganglinie dem Zeitpunkt der Abflussmessungen gegenübergestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass einige Messungen im stark fallenden und auch steigenden Bereich von Hochwasserwellen stattgefunden haben.

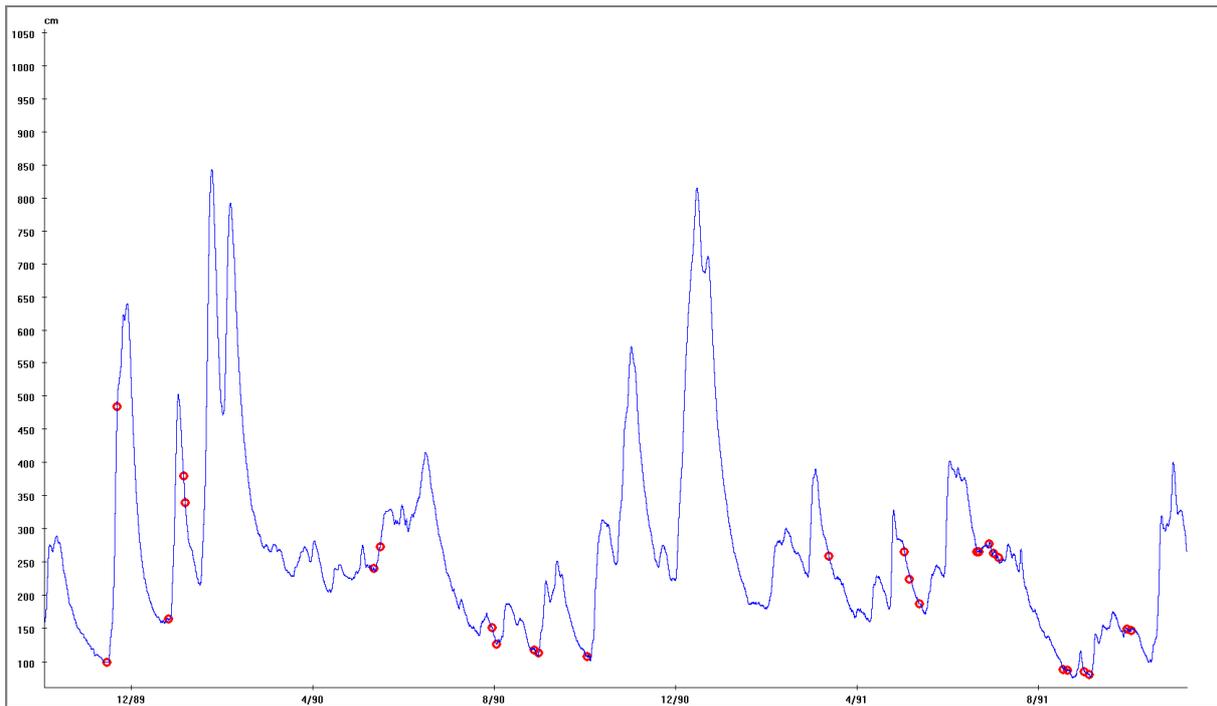


Abbildung 8.7: Wasserstandsganglinie und Zeitpunkte von Abflussmessungen am Pegel Rees (Ausschnitt)

$$Q = Q_{AT} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{1}{S \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}\right)}$$

7.1 Jones Correction

$$Q = Q_{AT} + dQ_{Hysterese}$$

7.2 Definition der Korrektur $dQ_{Hysterese}$

$$dQ_{Hysterese} = Q - Q_{AT}$$

7.3

$$dQ_{Hysterese} = Q \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{S \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}\right)}}\right)$$

7.4 Korrektur nach Umformung

Zur Korrektur der Messwerte wurde auch hier das Korrekturverfahren nach Jones zugrunde gelegt (vergleiche Kapitel 8.10.1). In der Gleichung entspricht der Parameter Q_{AT} dem stationären Abfluss bzw. dem Abfluss der Abflusstafel. Q ist der korrigierte Wert. Der Parameter $dQ_{Hysterese}$ entspricht der Differenz zwischen dem stationären und dem instationären Abfluss.

Nach Einsetzen und Umformung ergibt sich die Korrektur gemäß Gleichung 7.4. Unter der Annahme, dass die Flutwelle eine Geschwindigkeit von 0,9 m/s aufweist und dass Energiegefälle dem Sohlgefälle von 0,1 ‰ entspricht, ergibt sich die in Abbildung 8.8 dargestellte Verschiebung. Im rechten Teil der Abbildung sieht man als Kreise die durchgeführten Messungen und als rote Punkte die entsprechend der Hysterese korrigierten Messungen. Diese sind meist etwas gegenüber dem Mittelpunkt des Kreises verschoben. Um die Verschiebung deutlicher zu erkennen, wurde diese im linken Teil mit einem größeren Maßstab dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass mehr und größere Verschiebungen nach links auftreten, das bedeutet, dass die Abflüsse durch die Verschiebung auf ein stationäres Niveau im Mittel vergrößert werden. Der Hysterese-Einfluss gleicht sich also nicht statistisch aus, sondern verfälscht die Abflusstafel systematisch.

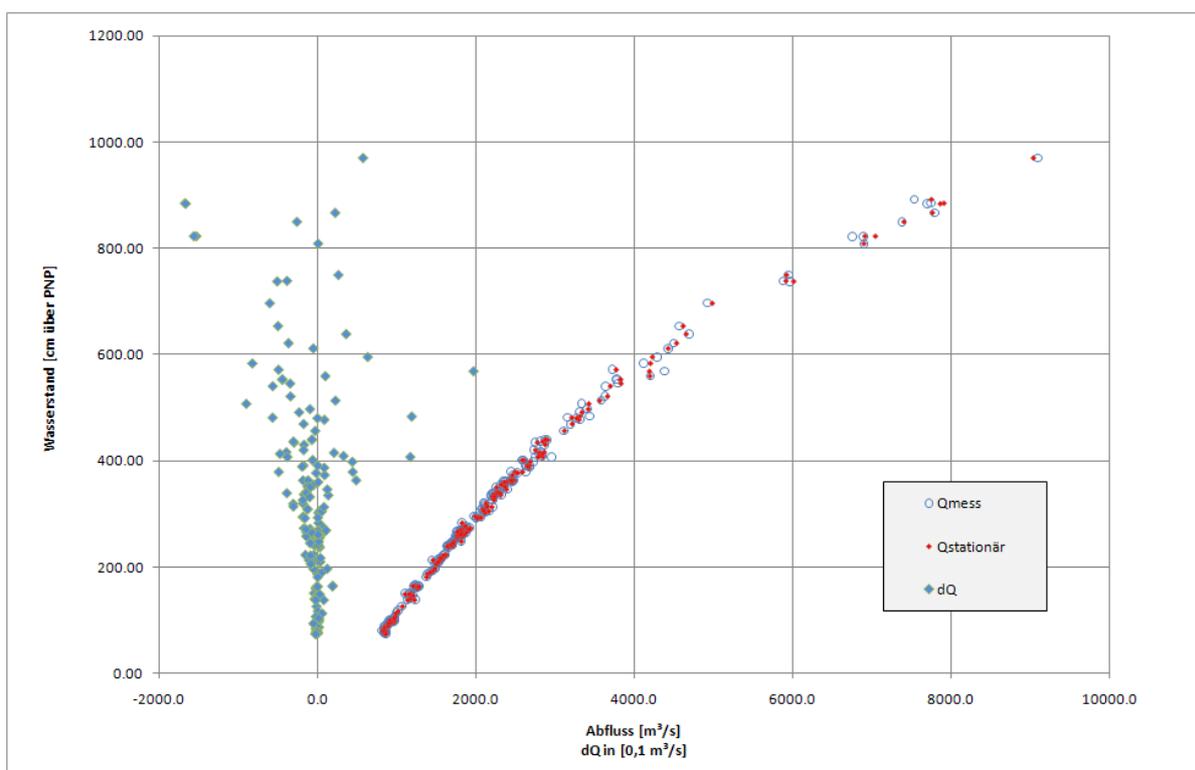


Abbildung 8.8: Verschiebung der Messungen (grün) und Darstellung der W/Q-Beziehung vor und nach der Korrektur (Pegel Rees)

Durch die Verschiebung auf ein „stationäres Niveau“ werden die resultierenden Abflussmesswerte am Pegel Rees um rund 0,4% vergrößert (ca. 10 m³/s). Die Abflusstafel und somit auch die hierauf basierenden Abflüsse würden um ein vergleichbares Maß verändert. Bei anderen hydraulischen Verhältnissen kann der Einfluss der Hysterese anders ausfallen und auch über 1% liegen. Je nach Verteilung der Messungen, falls z.B. fast immer im abfallenden Ast einer Welle gemessen wurde, sind auch Abweichungen bis zu 3% möglich.

Da die Hysterese-Effekte in flachen Gewässern deutlich ausgeprägter sind als in steilen, ist die Berücksichtigung der Hysterese am Niederrhein von besonderer Bedeutung. Insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass am Niederrhein die Pegel im Vergleich zum Mittelrhein

etwa 10 bis 15 m³/s (maximal 20 m³/s) zu geringe Abflüsse aufweisen. Durch die Berücksichtigung der Hysterese bei der Erstellung der Abflusstafeln könnte sich dieser Bilanzfehler deutlich reduzieren.

Die Berücksichtigung von Hysterese-Effekten bei der Erstellung von Abflusstafeln lässt bilanzrelevante Auswirkungen erwarten. Es wird empfohlen, die Abflussmessungen zu korrigieren und mit den korrigierten Messwerten die Abflusstafeln zu erstellen. Die so erstellten Abflusstafeln spiegeln die W/Q-Beziehungen unter stationären Verhältnissen wider. Bei der Berechnung der Abflusszeitreihen kann der Hysterese-Effekt eingerechnet werden (dies hat auf die Bilanz jedoch praktisch keinen Einfluss).

Hinweis:

In der Praxis zeigte sich, dass die Bestimmung der erforderlichen Verschiebungen nicht trivial ist. Dies liegt insbesondere an den hochaufgelösten Zeitreihen und der Schwierigkeit, den während der Messung maßgeblichen Gradienten der Wasserstandsganglinie automatisiert zu ermitteln. Die Verwendung von gleitenden Mittelwerten unterschiedlicher Zeitspannen ist häufig nicht zielführend. Um die Korrektur durchführen zu können, erscheint es zweckmäßig, eine Methode zur Glättung zu entwickeln und festzulegen, wie die Wellengeschwindigkeit sowie das Energieliniengefälle angesetzt werden sollen. Hierzu erscheinen weitere Untersuchungen zweckmäßig, in welchen z.B. eine Sensitivität bzgl. der statischen und/oder variablen Wellengeschwindigkeit und des Energieliniengefälles untersucht werden sollten.

9 Fazit und Empfehlungen

Die Ausführungen in Kapitel 7 zeigen, dass nach der Anpassung eine gute Gesamtbilanz für den Rhein erreicht wird. Die Bilanzfehler - gemessen am jeweiligen Mittelwasserabfluss - liegen zwischen -1,6 und 0,5 %. Die bekannten und auch hier als problematisch identifizierten Abschnitte Breisach und Kehl-Kronenhof sind hierbei ausgeklammert. Angesichts der Vielzahl von Einflussfaktoren und der in den Daten enthaltenen Unsicherheiten und systematischen Fehler sind die Ergebnisse als sehr gut zu bezeichnen. Ungeachtet dessen sind im Folgenden einige Empfehlungen zur Verbesserung der Bilanz aufgeführt.

9.1 Zufällige Fehler

Die durchgeführten Arbeiten basieren alle auf Messungen und deren Auswertung. Jede Messung enthält Fehler, die – sofern keine systematischen Fehler vorliegen – zufällig um den wahren Wert streuen. Das Streumaß und die Standardabweichung hängen von den Messmethoden, dem gemessenen Objekt und weiteren Randbedingungen ab. Sofern die Messtechnik und damit der Messwert nicht erhöht werden kann, lässt sich der wahre Wert durch eine Vielzahl von Messungen und deren Mittelwertbildung bestimmen. Dieser allgemeingültige Ansatz gilt auch für die Wasserwirtschaft. Um gute Ergebnisse zu erreichen, sind viele Messungen erforderlich, systematische Fehler sind hierbei zu vermeiden.

Neben der eigentlichen Messung gilt Analoges auch für die Datenspeicherung und deren Auswertungen. Unter der Annahme, dass in den Messungen keine systematischen Fehler vorhanden sind, stellen die Messungen statistisch gesehen die bestmögliche Schätzung dar. Eine Rundung dieser Rohdaten sollte zu keinem Zeitpunkt erfolgen, da dies eine Verschlechterung der Datenbasis bedingt. Bei der Veröffentlichung von Werten ist eine Rundung sehr wohl geboten, um den Vertrauensbereich zu dokumentieren und keine falsche Genauigkeit vorzuspiegeln. Die bereitgestellten Daten und Metadaten lassen vermuten, dass aufseiten der Bearbeiter die Sensibilität bezüglich der Daten verbessert werden kann. Neben echten Fehlern wie z.B. der Ablesung des Wasserstandes bei Durchflussmessungen sind auch Aussagen wie „das sind ja nur 1, 2 cm“ oder „das liegt im Rahmen der Messgenauigkeiten“ kritisch zu sehen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Bilanzfehler im Rhein bereits sehr gering sind.

9.2 Systematische Fehler

Neben den zufälligen Fehlern sind unter Umständen auch systematische Fehler in den Daten enthalten. Es ist von äußerster Wichtigkeit, diese zu kennen, ihre Signifikanz abzuschätzen und ggf. die systematischen Fehler zu eliminieren. Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung wurden systematische Fehler bei der Bilanzierung im Bereich der Verdunstung, der Niederschlagsbelastung, der Wasserentnahmen für Trinkwasser, die Kraftwerke

und/oder die Schifffahrt sowie Hysterese-Effekte aufgezeigt. Die jeweilige Signifikanz ist in Kapitel 8 aufgeführt. Die Entnahmen und Einleitungen haben ggf. lokale Auswirkungen, in Bezug zur Gesamtbilanz sind sie jedoch am Rhein gering. Ungeachtet dessen sollten größere Entnahmen/Einleitungen berücksichtigt werden, wegen der Unsicherheiten z.B. der Speisung der Kanäle ist ein Rückgriff auf Messwerte zweckmäßig.

Der Einfluss von Niederschlag und Verdunstung (vergleiche Kapitel 8.5 und 8.4) ist insgesamt relativ gering, insbesondere auch deswegen, da sich Verdunstung und Niederschlag zum Teil aufheben. Während der relativ zum jeweiligen Mittelwasserabfluss betrachtete Einfluss in Fließrichtung kontinuierlich geringer wird, können die absoluten Werte in den einzelnen Bilanzabschnitten durchaus von Bedeutung sein. Insbesondere im Falle starker Niederschläge sind lokale und zeitlich eng begrenzte Einflüsse auch in der Bilanz bemerkbar. Durch die Berücksichtigung von Niederschlag und Verdunstung kann die Abflussbilanz geringfügig verbessert werden.

Die in Kapitel 8.10 aufgeführten Hysterese-Effekte haben insbesondere in den flachen Gewässerabschnitten des Niederrheins eine Bedeutung. Während die alleinige Anwendung eines Korrekturverfahrens auf die WQ-Transformation geringe Einflüsse auf die Bilanz haben, kann eine Berücksichtigung bei der Korrektur von Abflussmessungen und Erstellung von Abflusstafeln von größerer Signifikanz sein. Daher wird empfohlen, dies an allen Pegeln des Niederrheins zu berücksichtigen.

9.3 Datenaufbereitung und -pflege

Wie in Kapitel 9.1 beschrieben, sind aufgrund der zufälligen Fehler viele Messungen hilfreich, den wahren Wert zu ermitteln. Viele Messungen allein helfen jedoch nur, wenn die hierauf basierenden Abflusstafeln kritisch überprüft und ggf. angepasst werden.

Die Erfahrungen mit den zur Verfügung gestellten Abflusstafeln und insbesondere dem Vergleich mit den jeweiligen Abflussmessungen zeigen, dass in einigen Bereichen eine häufigere Aktualisierung und Prüfung der Abflusstafeln zweckmäßig wäre. Um dies zu gewährleisten, ist eine Sensibilisierung der jeweiligen Bearbeiter sinnvoll, vorausgesetzt ist, dass die Arbeitszeiten und Ressourcen gegeben sind.

An einigen Pegeln wird die Wasserstands-Abfluss-Beziehung durch Krautwuchs beeinflusst. Hier wird zur Korrektur häufig das eta-Verfahren eingesetzt. Der eta-Wert gibt an, wie zwischen der oberen und der unteren Hüllkurve der Abflusstafel interpoliert werden soll. Der zeitvariante eta-Wert wird unter Berücksichtigung von Abflussmessungen ermittelt. Den bereit gestellten Unterlagen war zu entnehmen, dass die eta-Werte an einigen Pegeln einer direkten Interpolation der Messwerte zwischen der oberen und unteren Hüllkurve entsprechen. Als Ergebnis liegen eta-Zeitreihen vor, welche einen sehr inhomogenen und sehr schnell ändernden Verlauf aufweisen. De facto heißt dies, dass jeder einzelnen Messung absolutes Vertrauen geschenkt wird und die Abflusstafel hierauf basierend direkt (gemäß

dem eta-Wert) verschoben wird. Da einzelne Abflussmessungen jedoch größere Unsicherheiten enthalten (vergleiche Kapitel 8.2) wird seitens ProAqua empfohlen, einen Ausgleich von Messungen herbeizuführen, um eine langsame und stetige Änderung der eta-Werte zu erreichen.

Wie mehrfach erwähnt, unterliegen Messungen, auch nach der Bereinigung etwaiger systematischer Fehler, bei aller Sorgfalt einer gewissen Unschärfe. Nur durch viele Messungen und deren Auswertung (in der Regel Mittelwertbildung) kommen die Messwerte den wahren Werten näher. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, alle Daten mit der maximalen Genauigkeit, mit der sie erfasst werden können / wurden, zu speichern. Eine evtl. Rundung der Einzelwerte sollte lediglich im Rahmen von Veröffentlichungen erfolgen, um durch die Rundung auch den Vertrauensbereich zu dokumentieren. Im Bereich der Wasserstände erscheint die Ablage in mm-Genauigkeit zweckmäßig. Neben den oben aufgeführten Gründen können durch die höhere Auflösung Sprünge in der resultierenden Abflusszeitreihe reduziert und somit homogenere Abflusszeitreihen erzeugt werden. So kann die Änderung des Wasserstandes um einen Millimeter bei heutiger Rundungspraxis zur Änderung des „gemessenen Wasserstandes“ von einem Zentimeter führen, was wiederum eine Erhöhung des resultierenden Abflusses (in Abhängigkeit des Pegels und Wasserstandes) um 20 m³/s und mehr bedingt.

Ein weiterer wichtiger Grundsatz ist eine konsistente Datenhaltung. Im Rahmen der Projektbearbeitung kam es teilweise zu mehrfachen Datenlieferungen, die Differenzen untereinander aufwiesen. Dies sollte eigentlich nicht vorkommen (können). Auch bei der systematischen Erfassung und Speicherung von Metadaten und zusätzlichen Informationen sind noch Verbesserungen möglich. Teilweise mussten erforderliche Informationen vom Betreiber aus diversen Quellen recherchiert werden, vereinzelt Informationen und Details waren nicht mehr zu ermitteln. Zum Beispiel war bei einigen Messungen lediglich das Messdatum, nicht jedoch die Uhrzeit bekannt.

Die Ausführungen und die gemachten Erfahrungen zeigen, dass ein wesentlicher Teil der erreichbaren Genauigkeit mit der Sorgfalt und auch dem hiermit verbundenem Aufwand zur Analyse, Wartung etc. verbunden ist. Eine kontinuierliche Schulung, Fortbildung und Sensibilisierung der zuständigen Mitarbeiter ist neben der vorhandenen und verfügbaren Infrastruktur ein elementarer Baustein für qualitativ hochwertige Grundlagen und hierauf resultierenden Ganmlinien.

Allgemeine Informationen über die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)

Die KHR ist eine Organisation, in der wissenschaftliche Institutionen der Rheinanliegerstaaten gemeinsam hydrologische Grundlagen für die nachhaltige Entwicklung im Rheingebiet erarbeiten.

Mission und Aufgaben der KHR sind:

Erweiterung der Kenntnisse über die Hydrologie des Rheingebietes durch:

- gemeinsame Untersuchungen
- Austausch von Daten, Methoden und Informationen
- Entwicklung standardisierter Verfahren
- Veröffentlichungen in einer eigenen Schriftenreihe

Beiträge zur Lösung von grenzüberschreitenden Problemen durch die Entwicklung, Verwaltung und Bereitstellung von:

- Informationssystemen (KHR-Rhein-GIS)
- Modellen, wie z.B. Wasserhaushaltsmodelle und das Rhein-Alarmmodell

Die Länder, die sich daran beteiligen sind:

die Schweiz, Österreich, Deutschland, Frankreich, Luxemburg und die Niederlande.

Beziehung zur UNESCO und WMO:

Die KHR wurde 1970 anlässlich der UNESCO-Empfehlung zur Förderung einer engeren Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten gegründet. Seit 1975 erfolgt die Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Hydrological Water Resources Program (HWRP) der WMO.

Für weitere Informationen über die KHR, siehe unsere Website: www.chr-khr.org

KHR-Veröffentlichungen

CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag / Le bassin du Rhin. Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye. ISBN 90-12017-75-0 (nicht mehr lieferbar)

Berichte der KHR

- I-1 GREBNER, D. (1982): Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 / Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (nicht mehr lieferbar)
- I-2 GERHARD, H., J.W. VAN DER MADE, J. REIFF, L.P.M. DE VREES (1983): Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage 1985) / La sécheresse et les basses eaux de 1976 (2ème édition, 1985). ISBN 90 70980 01 0 (nicht mehr lieferbar)
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet / Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 02 9 (nicht mehr lieferbar)
- I-4 BUCK, W., R. KIPGEN; J.W. VAN DER MADE, F. DE MONTMOLLIN, H. ZETTL, J.F. ZUMSTEIN (1986): Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet / Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 03 7 (nicht mehr lieferbar)
- I-5 TEUBER, W., A.J. VERAART (1986): Abflußermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzgebiet / La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano hollandaise. ISBN 90 70980 04 5 (nicht mehr lieferbar)
- I-6 TEUBER, W. (1987): Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs / Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débits. Résultats d'une étude comparative. ISBN 90 70980 05 3 (nicht mehr lieferbar)
- I-7 MENDEL, H.G. (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet / Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 06 1 (nicht mehr lieferbar)
- I-8 ENGEL, H., H. SCHREIBER, M. SPREAFICO, W. TEUBER, J.F. ZUMSTEIN (1990): Abflußermittlung im Rheingebiet im Bereich der Landesgrenzen / Détermination des débits dans les régions frontalières du bassin du Rhin. ISBN 90 70980 10 x (nicht mehr lieferbar)
- I-9 CHR/KHR (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet / La crue de 1988 dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 11 8 (nicht mehr lieferbar)
- I-10 NIPPES, K.R. (1991): Bibliographie des Rheingebietes / Bibliographie du bassin du Rhin. ISBN 90 70980 13 4 (nicht mehr lieferbar)
- I-11 BUCK, W., K. FELKEL, H. GERHARD, H. KALWEIT, J. VAN MALDE, K.R. NIPPES; B. PLOEGER; W. SCHMITZ (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen. Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft / Le Rhin sous l'influence de l'homme. Aménagement, navigation, gestion des eaux. ISBN 90 70980 17 7 (nicht mehr lieferbar)
- I-12 SPREAFICO, M., A. VAN MAZIJK (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. ISBN 90 70980 18 5
- I-13 SPREAFICO, M., A. VAN MAZIJK (réd) (1997): Modèle d'alerte pour le Rhin. Un modèle pour la prévision opérationnelle de la propagation de produits nocifs dans le Rhin. ISBN 90 70980 23

- I-14 EMMENEGGER, CH. ET AL. (1997): 25 Jahre KHR. Kolloquium aus Anlaß des 25jährigen Bestehens der KHR / 25 ans de la CHR. Colloque à l'occasion du 25e anniversaire de la CHR. ISBN 90 70980 24 x
- I-15 ENGEL, H. (1997): Fortschreibung der Monographie des Rheingebietes für die Zeit 1971-1990 / Actualisation de la Monographie du Bassin du Rhin pour la période 1971-1990. ISBN 90 70980 25 8
- I-16 GRABS, W. (ed.) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. ISBN 90 70980 26 6
- I-17 ENGEL, H. (1999): Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet. Extremereignisse zwischen Dez.1993 und Febr. 1995. ISBN 90 70980 28 2 (nicht mehr lieferbar)
- I-18 KOS, TH.J.M., H. SCHEMMER, A. JAKOB (2000): Feststoffmessungen zum Vergleich von Messgeräten und Messmethoden im Rhein, 10-12 März 1998. ISBN 90-36953-54-5
- I-19 BARBEN, M. ET AL. (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. ISBN 90-36954-11-8
- I-20 KRAHE, P., D. HERPERTZ (2001): Generation of Hydrometeorological Reference Conditions for the Assessment of Flood Hazard in large River Basins - Papers presented at the International Workshop held on March 6 and 7, 2001 in Koblenz. ISBN 90-36954-18-5
- I-21 KRAHE, P. ET AL. (2004): Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Einflusses dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen auf den Abfluss des Rheins. ISBN 90-36956-74-9
- I-22 BELZ, J.U. ET AL. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert - Analyse, Veränderungen, Trends. ISBN 978-90-70980-33-7
- I-23 GÖRGEN, K. ET AL. (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. ISBN 978-90-70980-35-1
- I-24 STEINRÜCKE, J., B. FRÖHLINGS, R. WEIßHAUPT (2012): HYMOG – Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheinsgebiet. ISBN 978-90-70980-00-9

Katalog/Catalogue 1 SPROKKEREEF, E. (1989): Verzeichnis der für internationale Organisationen wichtigen Meßstellen im Rheingebiet / Tableau de stations de mesure importantes pour les organismes internationaux dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 08 8

Berichte unter der Schirmherrschaft der KHR

- II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Quantitative Analyse der Abflüsse / Analyse quantitative des débits (nicht mehr lieferbar)
- II-2 GRIFFIOEN, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein / Modèle d'alerte pour le Rhin. ISBN 90 70980 07 x (nicht mehr lieferbar)
- II-3 SCHRÖDER, U. (1990): Die Hochwasser an Rhein und Mosel im April und Mai 1983 / Les crues sur les bassins du Rhin et de la Moselle en avril et mai 1983. ISBN 90 70980 09 6 (nicht mehr lieferbar)
- II-4 MAZIJK A. VAN, P. VERWOERDT, J. VAN MIERLO, M. BREMICKER, H. WIESNER (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0. Kalibrierung und Verifikation / Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0. Calibration et vérification. ISBN 90 70980 12 6 (nicht mehr lieferbar)
- II-5 MADE, J.W. VAN DER (1991): Kosten Nutzen Analyse für den Entwurf hydrometrischer Meßnetze / Analyse des coûts et des bénéfices pour le projet d'un réseau hydrométrique. ISBN 90 70980 14 2 (nicht mehr lieferbar)
- II-6 CHR/KHR (1992): Contributions to the European workshop Ecological Rehabilitation of Floodplains, Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. ISBN 90 70980 15 0

- II-7 NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. ISBN 90 70980 16 9 (nicht mehr lieferbar)
- II-8 MENDEL, H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. ISBN 90 70980 19 3
- II-9 WITTE, W., P. KRAHE, H.J. LIEBSCHER (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. ISBN 90 70980 20 7 (nicht mehr lieferbar)
- II-10 WILDENHAHN, E., U. KLAHOLZ (1996): Große Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins. ISBN 90 70980 21 5
- II-11 SPREAFICO, M., C. LEHMANN, H. SCHEMMER, M. BURGDORFFER, TH. L. KOS (1996): Feststoffbeobachtung im Rhein, Beschreibung der Meßgeräte und Meßmethoden. ISBN 90 70980 22 3
- II-12 SCHÄDLER, B. (Red.) (1997): Bestandsaufnahme der Meldesysteme und Vorschläge zur Verbesserung der Hochwasservorhersage im Rheingebiet. Schlußbericht der IKSAR Arbeitseinheit 'Meldesysteme / Hochwasservorhersage' Projektgruppe 'Aktionsplan Hochwasser' / Annonce et prévision des crues dans le bassin du Rhin. Etat actuel et propositions d'amélioration. Rapport final de l'unité de travail 'Systèmes d'annonce / prévision des crues' Groupe de projet 'Plan d'action contre les inondations'. ISBN 90 70980 27 4
- II-13 DRÖGE, B., H. HENOCH, W. KELBER, U. MAHR, T. SWANENBERG, T. THIELEMANN, U. THURM (1999): Entwicklung eines Längsprofils des Rheins. Bericht für die Musterstrecke von Rhein km 800-845. Arbeitsgruppe 'Sedimenttransport im Rhein' Projekt 3. ISBN 90 70980 29 0
- II-14 MAZIJK, A. VAN, CH. LEIBUNDGUT, H.P. NEFF (1999): Rhein Alarm Modell Version 2. 1. Erweiterung um die Kalibrierung von Aare und Mosel. Kalibrierungsergebnisse von Aare und Mosel aufgrund der Markierversuche 05/92, 11/92 und 03/94. ISBN 90 70980 30 4
- II-15 KWADIJK, J., W. VAN DEURSEN (1999): Development and testing of a GIS based water balance model for the Rhine drainage basin. ISBN 90 70980 31 2
- II-16 MAZIJK, A. VAN, J.A.G. VAN GILS, V. WEITBRECHT, S. VOLLSTEDT (2000): ANALYSE und EVALUIERUNG der 2D-MODULE zur Berechnung des Stofftransportes in der Windows-Version des RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis. ISBN 90-36953-55-3
- II-17 SPREAFICO, M., R. WEINGARTNER ET AL. (2002): Proceedings International Conference on Flood Estimation, March, 6-8, 2002 Berne, Switzerland. ISBN 90-36954-60-6
- II-18 BRONSTERT A. ET AL. (2003): LAHoR – Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumassnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. ISBN 90-70980-32-0
- II-19 KROEKENSTOEL, D.F., E.H. VAN VELZEN (2003): Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen – Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative? ISBN 90-36954-98-3
- II-20 SPREAFICO, M., C. LEHMANN (Ed.) (2009): Erosion, Transport and Deposition of Sediment - Case Study Rhine- Contribution to the International Sediment Initiative of UNESCO / IHP. ISBN 90-70980-34-4

KOLOPHON

Bericht Nr. I-24 der KHR Report No I-24 of the CHR

Sekretariat, PO Box 17
NL 8200 AA Lelystad
Email: info@chr-khr.org
Website: www.chr-khr.org

Projektdurchführung

ProAqua Ingenieurgesellschaft
für Wasser- und Umwelttechnik mbH
Turpinstraße 19
D 52066 Aachen
Email: mail@proaqua-gmbh.de
Website: www.proaqua-gmbh.de

Übersetzung Kap. 1 / Translation Ch. 1

Vertaal.nl
Tongerlo 17
NL 5993 NS Maasbree
Email: info@vertaal.nl
Website: www.vertaal.nl

Drucker / Printers:

Enveloprint BV
PO Box 42
NL 7090 AA Dinxperlo
Email: info@enveloprint.nl
Website: www.enveloprint.nl

ISBN: 978-90-70980-00-9