

Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br

Melanie Domokos

**Wasserqualitätsparameter als hydrologische Tracer
im Einzugsgebiet des Rheins**

**Diplomarbeit unter Leitung von
Prof. Dr. Ch. Leibundgut und Dr. J. Lange**

Freiburg i. Br., Februar 2008

Ehrenwörtliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, den 01.02.2008

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen im Text	V
Verzeichnis der Tabellen im Text	VII
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang	VIII
Verzeichnis der Tabellen im Anhang	X
Zusammenfassung	XI
Extended English Summary	XIII
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Zielsetzung	3
3 Vorgehensweise	4
4 Der Rhein im Überblick.....	6
4.1 Allgemeines zum Rhein	6
4.2 Die Entstehung des Rheins	6
4.3 Die Nebenflüsse des Rheins	7
4.4 Die wirtschaftliche Nutzung im Rheineinzugsgebiets	8
4.5 Überwachung und Schutz des Rheins	9
4.5.1 Die IKSr	9
4.5.2 Das Projekt NADUF	10
5 Die Gliederung des Rheins	12
5.1 Das Einzugsgebiet	12
5.2 Das Teileinzugsgebiet	15
5.2.1 Der Quellfluss Vorderrhein	15
5.2.1.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	15
5.2.1.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse	15
5.2.2 Der Quellfluss Hinterrhein	16
5.2.2.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	16
5.2.2.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse	16
5.2.3 Der Alpenrhein	17
5.2.3.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	17

5.2.3.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse	17
5.2.4 Der Bodensee	18
5.2.4.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	18
5.2.4.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse	18
5.2.5 Der Hochrhein	19
5.2.5.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	19
5.2.5.2 Hydrogeologische Verhältnisse	20
5.2.5.3 Hydrologische Verhältnisse	20
5.2.5.4 Klimatische Verhältnisse	21
5.2.5.5 Wirtschaftliche Nutzung	21
5.2.6 Der Oberrhein	22
5.2.6.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	22
5.2.6.2 Hydrogeologische Verhältnisse	22
5.2.6.3 Hydrologische Verhältnisse	23
5.2.6.4 Klimatische Verhältnisse	24
5.2.6.5 Wirtschaftliche Nutzung	24
5.2.7 Der Mittelrhein	24
5.2.7.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	24
5.2.7.2 Hydrogeologische Verhältnisse	25
5.2.7.3 Hydrologische Verhältnisse	25
5.2.7.4 Klimatische Verhältnisse	26
5.2.7.5 Wirtschaftliche Nutzung	26
5.2.8 Der Niederrhein	27
5.2.8.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	27
5.2.8.2 Hydrogeologische Verhältnisse	27
5.2.8.3 Hydrologische Verhältnisse	27
5.2.8.4 Klimatische Verhältnisse	28
5.2.8.5 Wirtschaftliche Nutzung	28
5.2.9 Das Rhein-Maas-Delta	29
5.2.9.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten	29
5.2.9.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse	29
5.3 Fazit	30
6 Der Stoffeintrag in Oberflächengewässer	32
6.1 Stoffquellen	32

6.2 Eintragsquellen der Nährstoffe	33
6.2.1 Chlorid	34
6.2.2 Natrium	34
6.2.3 Kalium	34
6.2.4 Sulfat	35
6.2.5 Calcium	35
6.2.6 Magnesium	35
6.2.7 Kieselsäure-Silizium	36
6.3 Eintragsquellen der organischen Verbindungen	36
6.3.1 Atrazin	36
6.3.2 Diuron	37
6.4 Eintragsquellen der Feststoffe	38
6.5 Fazit	38
 7 Untersuchungsparameter	 39
7.1 Der Abflussverhalten des Rheins.....	39
7.2 Der Schwebstoffgehalt	41
7.3 Chlorid	42
7.3.1 Auswertung	42
7.3.2 Fazit	45
7.4 Natrium	45
7.4.1 Auswertung	45
7.4.2 Fazit	47
7.5 Kalium	48
7.5.1 Auswertung	48
7.5.2 Fazit	50
7.6 Sulfat	50
7.6.1 Auswertung	50
7.6.2 Fazit	53
7.7 Kieselsäure-Silizium	53
7.7.1 Auswertung	53
7.7.2 Fazit	55
7.8 Calcium	55
7.8.1 Auswertung.....	55
7.8.2 Fazit	57
7.9 Magnesium	58

7.9.1 Auswertung	58
7.9.2 Fazit	61
7.10 Atrazin	61
7.10.1 Auswertung	61
7.10.2 Fazit	62
7.11 Diuron	63
7.11.1 Auswertung	63
7.11.2 Fazit	64
8 Abschließende Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	65
Literatur.....	68
Anhang.....	71

Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abb. 4.5.1:	Messstationen der IKSР entlang des Rheins	9
Abb. 4.5.2:	Lage der Messstationen des NADUF-Programms in der Schweiz	10
Abb. 6.1:	Eintragungspfade zur Bestimmung der Belastung der Oberflächengewässer	32
Abb. 7.2-1:	Schwebstoffgehalt und Abfluss in einem Fließgewässer; ansteigende und absinkende Wasserführung (HELLMANN 1986)	42
Abb. 7.3-1:	Chloridkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	43
Abb. 7.3-2:	Korrelation von Chlorid-Fracht und Abfluss 1978 und 2004 bei Rekingen (links) und Koblenz/Rhein (rechts)	44
Abb. 7.3-3:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Chloridkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)	44
Abb. 7.4-1:	Natriumkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	46
Abb. 7.4-2:	Korrelation von Natrium-Fracht und Abfluss 1978 und 2004 bei Rekingen (links) und Koblenz/Rhein (rechts)	46
Abb. 7.4-3:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Natriumkonzentration an der Messstelle Weil am Rhein (1995-2004)	47
Abb. 7.5-1:	Kaliumkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	48
Abb. 7.5-2:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Kaliumkonzentration an der Messstelle Weil am Rhein (1995-2004)	49
Abb. 7.6-1:	Sulfatkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	51
Abb. 7.6-2:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Sulfatkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)	52
Abb. 7.6-3:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Sulfatkonzentration an der Messstelle Koblenz/Mosel (1978-2004)	52
Abb. 7.7-1:	Kieselsäure-Silizium-Konzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1991-2000	54
Abb. 7.7-2:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Kieselsäure-Silizium-Konzentration an der Messstelle Koblenz/Rhein (1991-2004)	54

Abb. 7.8-1:	Calciumkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	55
Abb. 7.8-2:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Calciumkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)	56
Abb. 7.8-3:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Calciumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau (1978-2004)	57
Abb. 7.9-1:	Magnesiumkonzentration des Rheins bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004	59
Abb. 7.9-2:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Magnesiumkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)	60
Abb. 7.9-3:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Magnesiumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau (1978-2004)	61
Abb. 7.10-1:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Atrazin-Konzentration an der Messstelle Koblenz/Mosel (1978-2004)	62
Abb. 7.11-1:	Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Atrazin-Konzentration an der Messstelle Koblenz/Mosel (1978-2004)	63

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tab. 5.1:	Die wichtigsten Kenndaten des Rheineinzugsgebiets	13
Tab. 5.2:	Die wichtigsten Kenndaten der Teileinzugsgebiete des Rheins	14
Tab. 5.3:	Flächennutzung im Einzugsgebiet des Mittelrheins	26
Tab. 7.1:	Mittlerer Abfluss für die Zeitreihe 1978-2004	39

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb. A 4.2: Teileinzugsgebiete des Rheins	78
Abb. A 7.1-1: Q (m ³ /s) und MQ: 460 m ³ /s der Station Rekingen in der Zeitspanne von 1978-2004	79
Abb. A 7.1-2: Q (m ³ /s) und MQ: 1089 m ³ /s der Stationen Village-Neuf und Weil am Rhein in der Zeitspanne von 1978-2004.	79
Abb. A 7.1-3: Q (m ³ /s) und MQ: 1293 m ³ /s der Stationen Seltz und Lauterbourg in der Zeitspanne von 1978-2004.	80
Abb. A 7.1-4: Q (m ³ /s) und MQ: 1805 m ³ der Station Koblenz/Rhein in der Zeitspanne von 1978-2004.	80
Abb. A 7.1-5: Q (m ³ /s) und MQ: 2377 m ³ /s der Station Bimmen in der Zeitspanne von 1978-2004.	81
Abb. A 7.1-6: Q (m ³ /s) und MQ: 347 m ³ /s der Station Koblenz/Mosel in der Zeitspanne von 1978-2004.	81
Abb. A 7.1-7: Q's (m ³ /s) der Stationen am Rhein und die dazugehörigen MQ's der Messperiode von 1978-2004.	82
Abb. A 7.2-1: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Rekingen (1994-1996)	83
Abb. A 7.2-2: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Village-Neuf / Rekingen (1994-2004)	83
Abb. A 7.2-3: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Lauterbourg (1994-2004)	84
Abb. A 7.2-4: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Koblenz (1994-2004)	84
Abb. A 7.2-5: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Bimmen (1994-2004)	85
Abb. A 7.2-6: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss in der Mosel bei Koblenz (1994-2004)	85
Abb. A 7.3: Mittlere jährliche Chloridkonzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	86

Abb. A 7.4:	Mittlere jährliche Natriumkonzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	86
Abb. A 7.5:	Mittlere jährliche Kaliumkonzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	87
Abb. A 7.6:	Mittlere jährliche Sulfatkonzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	87
Abb. A 7.7:	Mittlere jährliche Kieselsäure-Silicium-Konzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	88
Abb. A 7.8:	Mittlere jährliche Calcium-Konzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	88
Abb. A 7.9:	Mittlere jährliche Magnesium-Konzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	89
Abb. A 7.10:	Mittlere jährliche Atrazin-Konzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	89
Abb. A 7.11:	Mittlere jährliche Diuron-Konzentrationen und der mittlere jährliche Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004	90

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tab. A.1:	Wasserqualitätsparameter	72
Tab. A.4:	Hauptgliederung des Einzugsgebiets des Rheins	77

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es einen Einblick in den / einen neuen Forschungszweig der Tracerhydrologie zu geben, der sich mit dem Einsatz von Wasserqualitätsparametern als hydrologische Tracer beschäftigt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) seit den 1950er Jahren Wasserqualitätsparameter zur Bewertung der Gewässergüte aufzeichnet und die Daten der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt, wurden die Untersuchungen im Einzugsgebiet des Rheins durchgeführt.

Ein grundlegender Teil der wissenschaftlichen Arbeit hat sich mit der Beschreibung des Rheineinzugsgebiets und seiner Gliederung in die einzelnen Teileinzugsgebiete beschäftigt.

Das Einzugsgebiet (EZG) des Rheins, welches eine Fläche von 198.735 km² aufweist, wird in folgende acht Teileinzugsgebiete gegliedert: Quellflüsse (Vorder- und Hinterrhein), Alpenrhein, Bodensee (Obersee und Untersee mit Seerhein), Hochrhein (mit dem Zufluss der Aare), Oberrhein (mit den Zuflüssen von Ill, Neckar und Main), Mittelhhein (mit den Zuflüssen Mosel und Lahn, Niederrhein (mit den Zuflüssen Ruhr und Lippe) und Rhein-Maas-Delta.

Bei der Beschreibung der Teileinzugsgebiete werden die großen Unterschiede deutlich, welche die einzelnen Gebiete im Bereich der Geologie, der Hydrologie, des Klimas und der Flächennutzung aufweisen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Messdaten, der Wasserqualitätsparameter und der geologischen Gegebenheiten im Rhein-Maas-Delta wurden die Untersuchungen auf den Bereich Hochrhein bis Niederrhein begrenzt.

Für die Auswertungen standen Messdaten von 17 Messstationen in der Zeitreihe 1954-2004 zur Verfügung. An den einzelnen Messstationen wurden von der IKSR entlang des Rheins 14-tägig bis zu 200 Parameter aufgezeichnet. Durch die Eingrenzung des Untersuchungsgebietes und der Datengrundlage wurden die weiteren Untersuchungen auf die Messstationen Rekingen, Village-Neuf / Weil am Rhein, Seltz / Lauterbourg, Koblenz am Rhein, Bimmen und Koblenz an der Mosel beschränkt.

Um die einzelnen Wasserqualitätsparameter, die sich als hydrologische Tracer eignen, zu finden, wurden die verschiedenen Emissionsquellen der einzelnen Stoffe untersucht. Da die Stoffe Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Chlorid, Sulfat und Kieselsäure-Silizium überwiegend aus diffusen Quellen stammen und ein großer Teil auf natürliche Weise über die Gesteinsverwitterung in die Oberflächenwässer gelangt, wurden diese Stoffe zur weiteren Auswertung herangezogen. Weitere Parameter, die zusätzlich ausgewertet wurden, sind die

Pflanzenschutzmittel Atrazin und Diuron. Diese beiden Stoffe wurden aufgrund ihres ausschließlich anthropogenen Eintrags und der verfügbaren Daten ausgewählt. Des Weiteren wurden der Abfluss und der Schwebstoffgehalt im Untersuchungsgebiet ausgewertet.

Um die visuelle Auswertung der oben genannten Wasserqualitätsparameter zu unterstützen, wurden mehrere Plots erstellt, welche die Jahresmittelwerte, das Längsprofil des Rheins und die Zeitreihe enthalten. Zusätzlich wurden die Monatsmittelwerte der einzelnen Stationen über die Zeitreihe 1978-2004 graphisch dargestellt bzw. „geplottet“. Die jährlichen und monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Stoffkonzentrationen sind mit dem Geographischen Informationssystem Arc View in verschiedene Klassen eingeteilt und über die Zeitreihe 1978-2004 dargestellt worden. Diese Darstellungen zeigten eine Korrelation der Stoffe Chlorid, Natrium und Kalium mit dem Abfluss. Die weiteren Untersuchungen bestätigten diese Korrelation. Außerdem zeigten die Ergebnisse, dass rheinabwärts die anthropogenen Emissionen von Chlorid, Natrium und Kalium zunehmen, was vermutlich auf den Abbau der Salzlagerstätten im Elsass und im Ruhrgebiet zurückgeht. Die Untersuchungen von Calcium, Magnesium und Sulfat wiesen keine Korrelation mit dem Abfluss auf. Ihr Konzentrations-Minimum trat an allen Stationen in den Sommermonaten auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass im Sommer die Gletscherschmelze den Hauptanteil am Abfluss stellt. Die Pflanzenschutzmittel Atrazin und Diuron zeigten dagegen in den Sommermonaten ihr Konzentrations-Maximum, was ein Zeichen für die intensive Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Einsatz von Wasserqualitätsparametern in der Tracerhydrologie möglich ist. Jedoch muss man berücksichtigen, dass diese Untersuchungen in einem makroskaligen Einzugsgebiet gemacht wurden, in dem eine Quantifizierung der Emissionsquellen der einzelnen Stoffe nicht möglich war.

Um Wasserqualitätsparameter in der Tracerhydrologie wirklich sinnvoll einsetzen zu können, müssen in diesem Bereich noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Stichworte: Emissionsquellen
Stoffeintrag
Rhein
Tracer
Tracerhydrologie
Wasserqualitätsparameter

Extended English Summery

The objective of this paper is to give an insight into the most recent findings in the area of tracerhydrology. Because the International Comission for the Protection of the Rhine (ICPR) has collected parameters of water quality since the 1950s and has publicized these data, the research focusses on the Rhine Region.

A fundamental part of the scientific work deals with the description of the Rhine catchment area and its individual partial catchment areas. The Rhine catchment area which covers an area of 198.735 km², is divided into eight parts: sources oft the river (so called Vorderrhein and Hinterrhein), Alps Rhine, Lake of Constance, High Rhine, Upper Rhine, Middle Rhine and Lower Rhine.

In describing the partial catchment areas, it becomes clear that there are large differences between the individual parts, concerning the geology, hydrology, climate and the general usage of land. Because of the available measurement data, the parameters of water quality and the geological conditions in the Rhine-Maas-Delta, the research limited itself on the region from Upper Rhine to Lower Rhine.

For the evaluation there was data from 17 gauging stations over a time period from 1954 to 2004. At the different gauging stations, recors were taken by the ICPR every two weeks, of up to 200 parameters along the Rhine. Because of limiting the region of research and the body of data, the further research focuses only on the gauging stations Rekingen, Village-Neuf / Weil am Rhein, Seltz / Lauterbourg, Koblenz am Rhein, Bimmen and Koblenz an der Mosel.

To get information about the various parameters of water quality which can be used as hydrological tracers, sources of emission of the individual materials were examined. Since Sodium, Potassium, Calcium, Chloride, Sulphate and Silicon Dioxide come mainly from diffuse sources and since a large part gets into the surface waters naturally through alteration, these materials were used for further evaluation. Additional parameters which were evaluated, were the plant protection agents Atrazin an Diuron. These two materials were choosen because of their anthropogenic emission and because of the data available. Besides that, the run off and the concentration of suspended material were evaluated.

To support the visual evaluation of the parameters of water quality, several plots were developed which show the yearly average, the profile of the Rhine and the time line. Also, the monthly average measurements of the individual stations during the ime period

from 1978 to 2004 are shown in a plot. The yearly and monthly average of the run off and the concentration of materials are divided into various classes, with the help of Geographical Information System Arc View, and for the period 1978 to 2004.

The presentations shows the correlation between chloride, natrium and calium on one side and the run off on the other. Additional research confirms this correlation. Also, the results show that downstream the anthropogenic emissions of chloride, natrium and calcium increase, which is probably caused by the salt cavities in the Alsace and the Ruhrgebiet. Statistically, there is no correlation between calcium, magnesium, sulphate and the run off. Their lowest concentration always happened during the summer months, at all gauging stations. This can be explained by the fact that during these months, glacier melt is the main part of the run off. The plant protection agents Atrazin and Diuron, on the other hand, show their highest concentration during the summer month, which seems to be a result of the intensive usage of agricultural land.

The results of this paper show that it is possible to use parameters of water quality in tracerhydrology. But it has to be taken into consideration that this research was done in a makroscale catchment area, with no possibility of quantifying the different sources of emission of the various materials. Because of that, it will be neccessary to do further research, so zhat the parameters of water quality can be used in a truly significant way.

Keywords: parameters of water quality
Rhine
sources of emission
tracer
tracerhydrology

1 Einleitung

Die Tracerhydrologie, ein junger Forschungszweig der Hydrologie, hat ihren Ursprung in der Karsthydrologie. Bei der Tracermethodik wird das Wasser mit bestimmten Stoffen markiert, welche das Fließverhalten des Wassers repräsentieren sollen.

Die Tracermethodik hat in den letzten Jahrzehnten eine stetige Weiterentwicklung erfahren und wird heute in vielen Bereichen der Hydrologie eingesetzt. Mit Hilfe der Tracerhydrologie können die verschiedenen hydrologischen Prozesse in unterschiedlichsten Bereichen, wie z.B. in Fließgewässern, Karst-, Kluft- und Porengrundwasserleitern, sowie Gletschern und Seen, besser untersucht werden. Aufgrund des großen Anwendungsspektrums der Tracerhydrologie nimmt sie in der Wasser-Forschung einen hohen Stellenwert ein. Zudem ist die Methodik der Tracerhydrologie bis heute das einzige Verfahren, dass hydrologische Prozesse und Stofftransportvorgänge in Oberflächengewässern und Grundwässern bis auf die Skala der Einzugsgebietsebenen beschreiben kann.

Die Tracerhydrologie arbeitet mit natürlichen und künstlichen Markierstoffen.

Die künstlichen Tracer werden punktförmig in das System eingebracht und sind dadurch räumlich, wie auch zeitlich begrenzt, was bedeutet, dass nur eine Momentanaufnahme eines Systemausschnitts möglich ist. Es gibt viele verschiedene künstliche Tracer, wie z.B. Fluoreszenztracer (u.a. Uranin), Salze (u.a. NaCl), Triftkörper (u.a. Bakterien), radioaktive Tracer (u.a. Tritium) oder aktivierbare Tracer (u.a. Bromid).

Natürliche Tracer gelangen kontinuierlich und flächenhaft über den Niederschlag in das zu untersuchende System. Die natürlichen Markierstoffe können Umweltisotope, chemische Komponenten, wie z.B. Leitfähigkeit oder Natrium oder „Pollution-Tracer“, wie z.B. Chlor, Schwermetalle, radioaktive Stoffe oder Waschmittel, sein.

Zur Bewertung und Klassifizierung der Gewässergüte werden schon seit Mitte des letzten Jahrhunderts am Rhein Wasserqualitätsparameter aufgezeichnet und ausgewertet. Dies übernimmt die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins gegen Verunreinigung (IKSR), die im Jahr 1950 von den Anrainerstaaten Schweiz, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und Niederlande gegründet wurde. Ziel war es der starken Verschmutzung des Rheins durch den Menschen Einhalt zu gebieten. Die Arbeitsschwerpunkte der IKSR sind die „ökologische Wiederherstellung“ des Rheins, die Hochwasservorsorge und der Schutz des oberflächennahen Grundwassers, das in Wechselwirkung mit dem Rhein steht.

Da die Europäischen Wasserrahmenrichtlinien vom 23. Oktober 2000 dazu auffordern die Öffentlichkeit besser über die Güte und Qualität der Fließgewässer zu informieren, veröffentlicht die IKSR zusätzlich zu ihren Publikationen, wie zum Beispiel dem Rheinatlas, ihre erhobenen Daten im Internet. Dort sind Daten von über 200 Parametern zu finden, die an 17 verschiedenen internationalen Rhein-Messstationen während 1954 bis 2004 erhoben wurden (siehe Tabelle A1 im Anhang).

Mit Hilfe der von der IKSR erhobenen Daten soll nun im Rahmen dieser Diplomarbeit herausgefunden werden, welche dieser Messparameter als hydrologische Tracer geeignet sind.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Eine grundlegende Aufgabe dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Untersuchung der Wasserparameter. Diese werden seit mehreren Jahrzehnten permanent in den Fließgewässern aufgezeichnet und ausgewertet. Nach und nach wurde für die Datenerhebung ein weitläufiges Messnetz in den Flüssen aufgebaut. Die Aufzeichnung der Messparameter dient der Überwachung und Überprüfung der Gewässergüte in den einzelnen Teilabschnitten der Flussgebiete. Des Weiteren werden die Abflussmessungen, die an den einzelnen Messstationen aufgezeichnet werden, zur Hochwasservorhersage herangezogen.

Eine interessante Fragestellung ist, die zur Verfügung stehenden Wasserparameter in weiteren Teilgebieten der Hydrologie zu nutzen. Diese Diplomarbeit soll die Anwendung der Wasserparameter in der Tracerhydrologie überprüfen. Für diese Überprüfung wurde das EZG des Rheins ausgewählt. Dies geschah aufgrund der vielen unterschiedlichen Messparameter und der großen Datenmenge die von der IKSr im Internet zur Verfügung gestellt wird.

Ziel war es unter den vorhandenen Parametern die Wasserqualitätsparameter heraus zu finden, die sich als hydrologische Tracer eignen. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss dem Stoffeintrag eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Auf Grund dessen ist die Beschreibung der verschiedenen Emissionen und somit der Eintragspfade der Parameter in das Gewässer wichtig. Die Stoffeinträge in die Oberflächengewässer kann man grob in anthropogene und diffuse Quellen aufteilen. Um die Wasserqualitätsparameter als hydrologische Tracer einsetzen zu können muss die Stoffquelle dieser Parameter bekannt sein. Aufgrund dessen ist die Untersuchung der Emissionsquellen, über die die verschiedenen Stoffe in die Flüsse gelangen, ein grundlegender Teil dieser Diplomarbeit. Wichtig ist dabei die Gliederung der Stoffe in überwiegend anthropogen und überwiegend diffus eingetragene Stoffe. Dadurch kann eine ungefähre räumliche Ausweisung der Emissionsquellen vorgenommen werden. Aufgrund der Größe des Rheineinzugsgebiets kann in dieser Arbeit nicht auf den genauen Ort oder die genaue Stofffracht der Emissionsquelle eingegangen werden.

3 Vorgehensweise

Zunächst musste die enorme Datenmenge, die für die Auswertung zu Verfügung stand, gesichtet werden. Dazu wurden die Wasserqualitätsparameter in 4 Gruppen eingeteilt: allgemeine Messgrößen, organische Mikroverunreinigungen, anorganische Stoffe und radioaktive Stoffe. In der Tabelle A.1 im Anhang werden die unterschiedlichen Gruppen mit den einzelnen Stoffen aufgeführt.

Anschließend wurde die Vollständigkeit der Messdaten der einzelnen Wasserqualitätsparameter, bezogen auf die vorhandenen Zeitreihen und die Messstationen, überprüft. Dadurch konnte die Datenmenge auf die Zeit von 1978 bis 2004 beschränkt werden.

Da das Rheineinzugsgebiet sehr groß ist, wurde die Auswertung auf die Messstationen Rekingen (1978-2004), Village-Neuf (1978-1994), Weil am Rhein (1995-2004), Seltz (1978-1992), Lauterbourg (1993-2004), Koblenz/Rhein (1978-2004), Bimmen (1978-2004) eingeschränkt. Ein Grund dafür ist die auftretenden Interaktionen von Fluss-, Grund- und Meerwasser im Gebiet des Deltarheins.

Ein grundlegender Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Beschreibung des Rheineinzugsgebiets und seiner Nebenflüsse.

Das Einzugsgebiet wurde dabei in folgende acht Teileinzugsgebiete untergliedert: Quellflüsse, Alpenrhein, Bodensee (mit Obersee, Seerhein, Untersee), Hochrhein, Oberrhein, Mittelrhein, Niederrhein und Rhein-Maas-Delta.

Die Geologie und die Landnutzung der einzelnen Teilgebiete, sowie der Niederschlag im Rheineinzugsgebiet, lieferten wichtige Informationen für die Stoff-Emissionen in den Rhein.

Um die Wasserqualitätsparameter, die sich als Tracer eignen, ausfindig zu machen, wurden die verschiedenen Stoff-Emissionen untersucht. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden folgende Parameter zur näheren Auswertung ausgewählt: der Schwebstoffgehalt als eine allgemeine Messgröße, die anorganischen Stoffe wie Chlorid (Cl^-), Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Calcium (Ca^+), Magnesium (Mg^+), Sulfat (SO_4^{2-}), Kieselsäure-Silizium (Si) und die organischen Mikroverunreinigungen wie Atrazin und Diuron.

Um die Korrelation der einzelnen Stoffkonzentrationen mit dem Abfluss zu untersuchen, wurde eine statistische Auswertung zur Bestimmung der Monatsmittelwerte und der Jahresmittelwerte durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit dem GIS-

Programm ArcView. Dazu wurden die Ergebnisse der monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der untersuchten Stoffkonzentrationen in Klassen eingeteilt und über die Zeitreihe der einzelnen Jahre dargestellt.

Die jährlichen Mittelwerte des Abflusses und der Stoffkonzentrationen wurden wiederum in Klassen eingeteilt. Diese Mittelwerte wurden über das Längsprofil des Rheins und die einzelnen Jahre der Zeitreihe graphisch dargestellt. Diese Darstellungen halfen eine Aussage über das Verhalten der ausgewählten Parameter zu machen und somit ihre Anwendbarkeit in der Tracerhydrologie zu überprüfen.

4 Der Rhein im Überblick

4.1 Allgemeines zum Rhein

Der Rhein ist mit einer Gesamtlänge von ca. 1320 km und einer mittleren Abflussmenge von 2330 m³/s kurz vor dem Rhein-Maas-Delta, mit Abstand der größte Nordseezufluss. Dennoch gehört der Rhein eher zu den kleineren Flüssen der Erde. In Europa ist er hinter Flüssen wie Wolga und Donau der sechstgrößte Strom. Der deutsche Rheinabschnitt hat eine Länge von 865 km, wobei ca. 45% der deutschen Bevölkerung im Flusseinzugsgebiet leben (URL 4).

Der Rhein entspringt in den Alpen bei Chur und mündet bei Rotterdam in die Nordsee. Sein Einzugsgebiet bedeckt weite Teile der Schweiz, Deutschlands und der Niederlande, daneben vor allem den Osten Frankreichs und den Westen Österreichs. Die größten zum rheinischen Flusssystem gehörenden Flüsse sind Aare, Mosel und Main.

Die höchste je am Rhein gemessene Abflussmenge wurde beim Hochwasser von 1926 kurz vor dem Rhein-Maas-Delta gemessen und betrug 12.000 m³/s. Die niedrigste dort gemessene Abflussmenge wurde im Sommer 1947 gemessen und betrug ca. 600 m³/s (URL 4).

Der Rhein liegt im Übergangsbereich von Zentral- und Westeuropa und ist die wichtigste Wasserstraße Europas, sowie eine der verkehrsreichsten Wasserstraßen der Welt. Dieser Strom ist auf einer Länge von 883 km für die Großschifffahrt nutzbar. Zu den bedeutendsten Orten an seinem Ufer zählen Basel, Straßburg, Bonn, Köln, Düsseldorf und Rotterdam.

4.2. Die Entstehung des Rheins

Erdgeschichtlich betrachtet ist die unmittelbare Verbindung der Alpen mit dem Gebiet des heutigen Niederrheins durch den Rhein noch recht jung. Sie entstand vor ca. 12 Millionen Jahren im Miozän durch die Vereinigung mehrerer Teilstücke älterer, ursprünglich gar nicht zusammengehöriger Flusssysteme. So lagen die Quellen des Urrheins vermutlich im Bereich des Kaiserstuhlmassivs, von wo aus er wie heute nach Norden floss. Im Pleistozän, vor über zwei Millionen Jahren, wurde dann der Aare-Rhein-Strom zu dem bereits vorhandenen Oberrhein abgelenkt, wo er sich mit dem Urrhein verband (URL 2).

Der Urrhein hatte ein teilweise anderes Flussbett als heute. Er strömte ab dem Raum Worms quer durch Rheinhessen und floss auf die Binger Pforte zu. Die Gegend von Oppenheim und Mainz berührte er hingegen nicht.

Die Täler des Rheins wurden von unterschiedlichsten geologischen und geomorphologischen Vorgängen geprägt. So floss der Rhein in frühen Erdzeitaltern in Mäandern in einem breiten und flachen Talgrund, der heute noch auf den Rheinhöhen zu erahnen und durch Rheinschotter auch nachzuweisen ist. Senkungen wie z.B. im Bereich der Kölner Bucht führten dazu, dass der Rhein ins Mittelgebirgsvorland viel Lockermaterial ablagerte. Hebungen bewirkten, dass sich der Rhein in das Rheinische Schiefergebirge in so genannten Zwangsmäandern einschnitt. Da die Hebung in Phasen erfolgte, wurde bei Stillstand wieder ein breiter Talboden ausgebildet, in den bei der nächsten Hebung wieder eingeschnitten wurde. Die verschiedenen Hebungsphasen sind in den gleich hohen Flussterrassen beiderseits des Rheins erkennbar. Bei der Entstehung der Flussterrassen spielte neben der Tektonik vor allem auch der unterschiedliche Wasserabfluss in den Kalt- und Warmzeiten während der Eiszeit eine Rolle (CHR/KHR 1978).

4.3 Die Nebenflüsse des Rheins

Die Aare ist der wasserreichste und zugleich viertlängste Nebenfluss des Rheins. Sie entwässert große Gebiete der Schweiz und bringt mit einem mittleren Abfluss MQ von $590 \text{ m}^3/\text{s}$ deutlich mehr Wasser ein, als der Rhein am Zusammenfluss selbst mit sich führt (MQ: $470 \text{ m}^3/\text{s}$). Der als Rhein bezeichnete Flusslauf hat jedoch bis hierhin eine etwas längere Fließstrecke als die Aare zurückgelegt.

In der Reihe der wasserreichsten Rheinzuflüsse folgen die Flüsse Mosel mit MQ $290 \text{ m}^3/\text{s}$, Main mit MQ $190 \text{ m}^3/\text{s}$ und Neckar mit MQ $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Die beiden längsten Rheinzuflüsse sind Mosel mit 544 km und Main mit 524 km. Eine Fließlänge über 200 Kilometer weisen die Aare, die Ill, die Lahn, die Lippe, der Neckar und die Ruhr auf (CHR/KHR 1978).

Die Tabelle A 4.1 im Anhang zeigt die wichtigsten Nebenflüsse des Rheins mit ihrer Einzugsgebietsflächen.

4.4 Wirtschaftliche Nutzung im Rheineinzugsgebiet

Der Rhein ist einer der am intensivsten genutzten Flüsse der Erde. In seinem Einzugsgebiet leben ca. 58 Millionen Menschen. Heute sind ca. 96% aller Kommunen im Rheineinzugsgebiet an Kläranlagen angeschlossen (IKSR 2005a). Viele große Industriebetriebe verfügen über eigene Kläranlagen. Infolge dieser enormen Investitionen in den Kläranlagenbau, die alle Rheinanliegerstaaten mittlerweile getätigt haben, ist die Schad- und Nährstoffbelastung zurückgegangen. Die heute noch feststellbaren Belastungen des Rheinwassers gehen zum großen Teil auf diffuse Einträge zurück.

Im Rheineinzugsgebiet findet ein erheblicher Teil der Weltchemieproduktion statt, u.a. im Raum Basel, im Rhein-Neckar-Dreieck, im Rhein-Main-Gebiet und im Ruhrgebiet.

Weiterhin sind intensive Bergbauaktivitäten entlang des Rheins zu nennen, wobei v.a. Kohle und Steinsalz gefördert wird (Nationalatlas BRD 2003). Im Raum Mosel-Saar und im Ruhrgebiet wird bis zum heutigen Tag Steinkohle und im linksrheinischen Niederrheingebiet der Ville Braunkohle gefördert. Steinsalz wird im Ruhrgebiet und entlang des Neckars abgebaut. Diese Bergbauaktivitäten haben zwar abgenommen, aber deren Auswirkungen sind heute vielerorts noch deutlich spürbar.

Als weitere Nutzungen sind u.a. Wasserentnahmen zu industriellen Kühlzwecken (u.a. für die Atomkraftwerke an Rhein und Neckar), zur Wasserkraftnutzung entlang des Oberrheins bzw. des französischen Rheinseiten-Kanals und zur Bewässerung in der Landwirtschaft aufzuführen.

Des Weiteren fungiert der Rhein als Großschifffahrtstraße. Die Wasserstraßen Rhein und Mosel haben den Status internationaler Wasserstraßen, wobei die Nutzung durch internationale Verträge festgelegt ist. Heute stellt der Rhein die bedeutendste Wasserstraße Europas dar. Über ihn und die angrenzenden Wasserstraßen werden die in den so genannten ARA-Häfen (Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen) umgeschlagenen Frachten ins Hinterland bis nach Luxemburg, Frankreich, in die Schweiz und bis in den Donaauraum transportiert. Vor allem an Schnittstellen mit anderen Handelsachsen bestehen heute bedeutende Wirtschaftsstandorte wie z.B. Köln, Ludwigshafen und Basel. Für die Chemie, die Petrochemie, die Kunststoffindustrie und die Ölraffinerien werden Erdölprodukte und Kohle über den Rhein billig herangeschafft und weiterverarbeitet. Die Chlorchemie bekommt ihr benötigtes Salz durch die Massentransportschifffahrt (Tietze et al. 1990).

4.5 Überwachung und Schutz des Rheins

4.5.1 Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)

Durch den erheblichen Nutzungsdruck in der Folge der menschlichen Aktivitäten entlang des Rheins war dieser Strom Jahre lang stark verunreinigt. Die Internationale Zusammenarbeit zum Schutz des Rheins besteht im Rahmen der IKSR seit mehr als 50 Jahren. In der Folge haben Anfang der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts die Rheinanliegerstaaten Schweiz, Frankreich, Deutschland, Luxemburg und die Niederlande ein Übereinkommen abgeschlossen, mit dem die Rheinwasserqualität deutlich verbessert werden sollte. Daher wurde entlang des Rheins ein Messnetz aufgebaut, das an den einzelnen Messstationen über 200 Parameter aufzeichnet. Um der Öffentlichkeit einen Einblick über die Gewässerqualität des Rheins zu geben, wurden diese im Internet auf der Seite der IKSR veröffentlicht.

Die Abbildung 4.5.1 zeigt die verschiedenen Messstationen der IKSR entlang des Rheins.

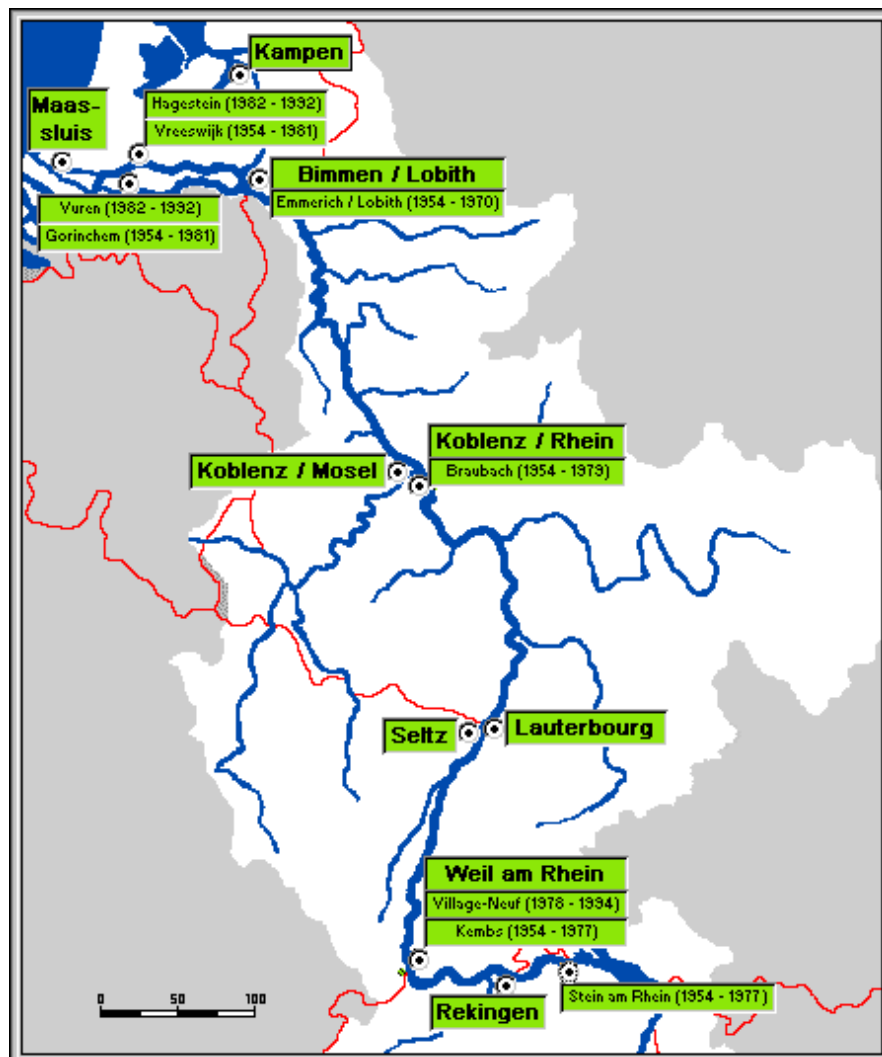


Abbildung 4.5.1: Messstationen der IKSR entlang des Rheins

Trotz des großen Nutzungsdrucks, dem das Ökosystem des Rheins durch menschliche Tätigkeit ausgesetzt ist, hat sich sowohl die chemische, als auch die biologische Situation des Rheins, verglichen mit dem Zustand von vor etwa 20–30 Jahren, stark verbessert. Seit dem Jahre 2000 liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten der IKSР auf der ökologischen Wiederherstellung des Rheins, auf der Hochwasservorsorge und auf dem Schutz des Grundwassers. Die aktuellen Rheinprogramme der IKSР sind u.a. das Aktionsprogramm Rhein, das Rheinprogramm Lachs 2020 und der Aktionsplan Hochwasser.

4.5.2 Das Projekt NADUF

Die nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässer (NADUF) wurde 1972 gegründet und wird heute gemeinsam vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), von der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) und von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) betrieben.

Die NADUF verfolgt an wichtigen Fließgewässern der Schweiz die Entwicklung der Konzentrationen und Frachten wichtiger Wasserinhaltsstoffe. Sie misst somit auch die Wasserparameter am Alpenrhein. Die Abbildung 4.5.2. zeigt die Lage der NADUF-Messtellen in der Schweiz.



Abbildung 4.5.2: Lage der Messstationen des NADUF-Programms in der Schweiz (aus URL 5)

Dieses Programm entstand durch den Schweizer Bund, der gemäß dem Umweltschutzgesetz den Auftrag hat, Erhebungen über die Wasserqualität der Gewässer durchzuführen.

Die Ziele des NADUF bestehen darin, die notwendigen Grundlagen für die Erfordernisse des Gewässerschutzes einerseits und für die wissenschaftliche Erforschung der physikalischen und chemischen Verhältnisse der schweizerischen Fliessgewässer, sowie ihrer Einzugsgebiete andererseits, zu liefern (URL 5).

5 Die Gliederung des Rheins

5.1 Das Einzugsgebiet

Die größten Nebenflüsse des Rheins sind Neckar, Main, Mosel / Saar, Lahn, Sieg, Ruhr und Lippe. Das Einzugsgebiet umfasst damit Gebiete unterschiedlichster Topographie, von den Alpen bis zur Niederrheinebene und Gebiete unterschiedlichster Nutzung, von intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen bis hin zu den industriellen Ballungsräumen. Die wichtigsten naturräumlichen Einheiten die der Rhein durchfließt, sind die Alpen, das nördliche Alpenvorland, die Oberrheinebene, das Rheinische Schiefergebirge und das Niederrheinische Tiefland.

Das Einzugsgebiet des Rheins umfasst 198.735 km² (IKSR 2005a). Der Rhein durchfließt die Staaten Schweiz, Österreich, Deutschland und Niederlande. Für Liechtenstein und Frankreich stellt er einen Grenzfluss dar. Schließlich bedeckt sein Einzugsgebiet auch einen Teil Luxemburgs, Belgiens und einen kleinen Teil Italiens.

Die Flächenanteile der einzelnen Staaten fallen entsprechend URL 5 folgendermaßen aus:

- Italien (IT):	< 100 km ²
- Schweiz (CH):	28.000 km ²
- Österreich (A):	2.400 km ²
- Deutschland (D):	106.000 km ²
- Frankreich (F):	24.000 km ²
- Luxemburg (L):	2.500 km ²
- Belgien/Wallonien (B):	< 800 km ²
- Niederlande (NL):	34.000 km ²
- Liechtenstein (FL):	<200 km ²

Der Rhein ist einer der am intensivsten genutzten Flüsse der Erde. Im Rheineinzugsgebiet leben ca. 58 Mio. Menschen. Dicht besiedelte Räume sind die Industriezentren von Nürnberg, Mittelwürttemberg, Mannheim-Ludwigshafen, des Rhein-Main-Gebietes und des Rhein-Ruhr-Wupper-Gebietes. Dazwischen liegen dünn besiedelte Gebiete mit überwiegend landwirtschaftlicher Nutzung (Tietze et al. 1990).

Die wichtigsten Kenndaten des Rheineinzugsgebiets, wie z.B. Fläche, Einwohnerzahl, Flächennutzung, sind den Tabellen 5.1 und 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.1: Die wichtigsten Kenndaten des Rheineinzugsgebiets (aus IKS SR 2005a)

		FGE Rhein	IT	CH	FL	A	D	F	L	B	NL
Fläche	km²	197.100	<100	27.930	<200	2.370	105.670	23.830	2.530	<800	33.800
Anteil an Gesamtfläche der internationalen Flussgebietseinheit Rhein	%	100	<1	14	<1	1	54	12	1	<1	17
Einwohner		58.028.000	0	5.049.000	30.000	347.000	36.914.000	3.708.000	399.000	38.000	11.543.000
Anteil an Gesamteinwohnerzahl der internationalen Flussgebietseinheit Rhein	%	100	0	9	<1	1	64	6	1	<1	20
Flächennutzungen	km²	196.900	0	28.100	0	2.400	105.600	23.700	2.500	800	33.800
Bebaute Fläche*	km²	14.800	0	950	0	70	9.750	1.490	160	40	2.340
Landwirtschaftliche Nutzung*	km²	99.310	0	9.620	0	990	56.000	13.000	1.410	430	17.860
Wälder und naturnahe Flächen*	km²	69.040	0	16.290	0	1.270	38.990	9.040	940	290	2.220
Feuchtflächen*	km²	370	0	<20	0	<5	100	<20	0	<5	230
Wasserflächen*	km²	13.350	0	1.200	0	40	790	150	10	0	11.160

* Bodennutzungsarten nach Corine Land Cover 1990 und Anteil an der Gesamtfläche der internationalen FGE Rhein Reklassifizierung gem. Hydrologischer Atlas von Deutschland 2003.

Tabelle 5.2: Die wichtigsten Kenndaten der Teileinzugsgebiete des Rheins (aus IKSr 2005a)

		FGE Rhein	Alpenrhein/ Bodensee	Hochrhein	Oberrhein	Neckar	Main	Mittelrhein	Mosel-Saar	Niederrhein	Deltarhein
Fläche	km²	197.100	11.500	24.900	21.700	13.900	27.200	13.500	28.300	18.900	37.200
Anteil an Gesamtfläche der internationalen FGE Rhein	%	100	6	13	11	7	14	7	14	10	19
Einwohner		58.028.000	1.347.000	5.277.000	7.248.000	5.500.000	6.610.000	2.695.000	4.341.000	12.778.000	12.232.000
Anteil an Gesamteinwohnerzahl der internationalen FGE Rhein	%	100	2	9	12	9	11	5	7	22	21
Flächennutzungen	km²	196.900	11.400	24.800	21.600	13.900	27.200	13.500	28.300	18.900	37.300
Bebaute Fläche*	km²	14.800	360	980	2.100	1.310	1.780	830	1.610	3.320	2.510
Landwirtschaftliche Nutzung*	km²	99.310	3.810	9.720	10.400	7.470	14.820	6.750	15.750	9.940	20.650
Wälder und naturnahe Flächen*	km²	69.040	6.520	13.230	8.950	5.130	10.510	5.870	10.760	5.500	2.570
Feuchtflächen*	km²	370	40	<20	<20	<5	<5	<5	<20	5	280
Wasserflächen*	km²	13.350	730	870	160	<20	70	40	150	150	11.160

* Bodennutzungsarten nach Corine Land Cover (CLC) 1990 und Anteil an der Gesamtfläche der internationalen FGE Rhein Reklassifizierung gem. Hydrologischer Atlas von Deutschland 2003. Abweichungen von den Angaben in den B-Berichten der BAG ergeben sich ggf. durch unterschiedliche Zusammenführung der Klassen gemäß CLC.

5.2 Die Teileinzugsgebiete

Das Einzugsgebiet des Rheins wird in die Quellflüsse (Vorderrhein und Hinterrhein), den Alpenrhein, den Bodensee (mit Obersee, Seerhein, Untersee), den Hochrhein, den Oberrhein, den Mittelrhein, den Niederrhein und das Rhein-Maas-Delta unterteilt. Von den acht Teileinzugsgebieten werden nur der Hochrhein, der Oberrhein, der Mittelrhein und der Niederrhein detaillierter beschrieben und untersucht.

Insgesamt sind 13 Quellflüsse nach dem Rhein benannt. Die fünf größten Quellflüsse sind Vorderrhein, Hinterrhein, Albula, Landwasser und Julia.

5.2.1 Der Quellfluss Vorderrhein

5.2.1.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Der Vorderrhein entsteht aus zahlreichen Quellbächen in der obersten Surselva und fließt etwa in West-Ost-Richtung von Tamins bis zum Tomasee in 2344 m Höhe, der als Quelle des Vorderrheins und auch des Rheins selbst angesehen wird. Der Vorderrhein misst bis zu seiner Vereinigung mit dem Hinterrhein nahe Chur ca. 70km (LAUTERBORN 1916).

5.2.1.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse

Die gesamte Fallhöhe von der Quelle bis Tamins beträgt etwa 1750 m, das Gesamtgefälle also im Mittel 25‰. Geologisch fällt die obere Talstrecke bis in die Nähe von Truns vorherrschend in das Gebiet der kristallinen Schiefer. Zwischen Ilanz und Reichenau durchbricht der Fluss in schluchtartig engem Tal die ungeheuren Schutt- und Trümmermassen des Flimser Bergsturzes, der vor ca. 10 055 Jahren stattfand und als das größte bekannte alpine Bergsturzereignis gilt. Der Abfluss des Vorderrheins weist große Schwankungen auf. Die höchsten Werte treten im Juni-Juli auf, in der Zeit, in der die Gletscher und Firnfelder am stärksten abschmelzen. Die niedrigsten Abflusswerte werden hingegen im Januar und Februar gemessen (CHR/KHR 1978).

5.2.2. Der Quellfluss Hinterrhein

5.2.2.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Der Hinterrhein nimmt seinen Ursprung in dem gewaltigen Firngebiet des Adulamassives als Abfluss des Paradies-Gletschers in 2216 m Höhe. Der Hinterrhein fließt oberhalb seines Zusammenflusses mit dem Vorderrhein überwiegend in Süd-Nord-Richtung entlang der Talschaften Domleschg, Heinzenberg und Val Schons und nur im Oberlauf in West-Ost-Richtung. Von Tamins bis zur Adula lässt sich eine Fließstrecke von etwa 64 km messen. In seinem Mittellauf fließt der Hinterrhein durch die Via Mala.

In den Hinterrhein mündet bei Sils aus Osten die Albula, ein dem Oberlauf des Hinterrheins mindestens ebenbürtiger Wasserlauf. Die Albula selbst hat mit der Julia und dem Landwasser zwei Zuflüsse mit großen Einzugsgebieten und entspringt oberhalb von Bergün. Die Quellbäche des Landwassers liegen in einem weiträumigen Talsystem um Davos. Von Tamins bis zu den Quellbächen des Dischmabaches am Scalettapass und über dem Furggasee beträgt die Fließstrecke des Hinterrheins in etwa 72 km (LAUTERBORN 1916).

5.2.2.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse

Das Quellgebiet liegt im Adula-Gneis, weiter abwärts steht Bündner Schiefer an, bei Splügen folgen Dolomite und Kalkgesteine, die Enge der Rofna besteht aus grünlichem Rofnaporphyr, der sich noch eine Strecke weit in das Schmaser Becken fortsetzt, hier wird er wieder von Bündnerschiefer abgelöst. Die gesamte Fallhöhe des Hinterrheins vom Paradies-Gletscher bis Tamins beträgt rund 1600 m, was ein mittleres Gefälle von etwa 25‰ ergibt (CHR/KHR 1978).

Im Einzugsgebiet des Hinterrheins befinden sich die Flüsse Reno di Lei, Averser und Jufer Rhein. Im Bereich des Vorderrheins befinden sich die Flüsse Rein da Tuma, Rein da Curnera, Rein da Cristallina, Rein da Maighels, Medelser Rhein, Rein da Nalps, Rein da Plattas und Valser Rhein.

5.2.3 Der Alpenrhein

5.2.3.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Der Rheinabschnitt zwischen Tamins und seiner Einmündung in den Bodensee wird Alpenrhein genannt. Seine Einzugsgebietsfläche beträgt 6.123 km² (IKSR 2005b). Der Alpenrhein strömt durch ein eiszeitliches, breit ausgeräumtes Kastental. Bei Sargans verhindert eine nur wenige Meter hohe Landstufe, dass er nicht durch das Seeztal, den Walensee und den Zürichsee Richtung Westen und somit Richtung Aare fließt.

Im Mündungsbereich des Rheins in den Bodensee ist ein Binnendelta ausgebildet, welches den Bereich zwischen dem Alten Rhein im Westen und dem unteren Rheindurchstich im Osten umfasst. Der natürliche Rhein verzweigt sich hier in mindestens zwei Arme. Durch das Geschiebe der eiszeitlichen Gletscher entstanden mehrere kleine Inseln. Das Rheindelta am östlichen Bodensee ist eine beeindruckende Landschaft: Zwischen dem Alten Rhein an der Staatsgrenze Österreich/Schweiz und der Dornbirnerach sind rund 2000 ha Flachwasser, Schilfröhrichte, Feuchtwiesen und Auwälder als Naturschutzgebiet ausgewiesen und geschützt (LAUTERBORN 1916).

5.2.3.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse

Geologisch ist das Tal des Alpenrheins ein übertieftes Glazialtal, das nach dem Rückzug des Rheingletschers und seiner Zuflüsse deltaartig vorrückte und allmählich mit mächtigen Schottermassen aufgefüllt wurde. Der knapp 100 km lange Alpenrhein liegt in einer Höhe von 599 m und 396 m und orientiert sich überwiegend nach Norden (IKSR 2005b).

Die Gesamtfallhöhe von Tamins bis zum Bodensee beträgt 203 m, was einem mittleren Gefälle von etwa 2‰ entspricht. Das Gefälle sinkt nahe des Bodensees auf 0,6 bis 0,8‰ (CHR/KHR 1978).

Die Niederschlagswerte im Gebiet des Alpenrheins schwanken aufgrund der Topographie zwischen 800 mm und über 3.000 mm pro Jahr. Der MQ des Alpenrheins beträgt 240 m³/s, der HQ₁₀₀ 3100 m³/s (IKSR 2005b).

Die Rheinregulierung mit dem oberen Rheindurchstich bei Diepoldsau und dem unteren Rheindurchstich bei Fußach wurde durchgeführt, um die fortwährenden Überschwemmungen in Kombination mit starken Sedimentationen im westlichen Rheindelta zu verringern. In der Folge musste auch die Dornbirner Ach umgeleitet werden.

5.2.4 Der Bodensee

5.2.4.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Der Bodensee liegt im Alpenvorland und setzt sich aus dem Obersee und Untersee zusammen. Die Uferlänge beider Seen beträgt ca. 273 km. Mit einer Gesamtfläche von 535 km² ist der Bodensee flächenmäßig der drittgrößte See Mitteleuropas. Sein Einzugsgebiet ist 11.500 km² groß und seine durchschnittliche Seehöhe beträgt 396 m ü. NN.

Die Fläche des Obersees beträgt 473 km². Er erstreckt sich zwischen Bregenz und Bodman-Ludwigshafen über eine Länge von 63,3 km. Die maximale Breite erreicht er mit 14 km zwischen Friedrichshafen und Romanshorn. An der tiefsten Stelle zwischen Fischbach und Uttwil misst er 254 m (IGKB 2004).

Der Untersee ist 63 km² groß. Er ist durch die Endmoränen verschiedener Gletscherzungen und Mittelmoränen geprägt und stark gegliedert. Nördlich der Insel Reichenau befindet sich der Gnadensee, westlich der Insel Reichenau der Zellersee und nördlich der Mettnau der Markelfinger Winkel. Die eiszeitlichen Drumlins des südlichen Bodanrücks setzten sich am Grund dieser nördlichen Seeteile fort. Südlich der Reichenau erstreckt sich von Gottlieben bis Eschenz der so genannte Rheinsee.

Über den Obersee haben drei Staaten direkten Zugang zum Rheinweg, die Schweiz im Süden, Österreich im Südosten sowie Deutschland mit Bayern im Nordosten, Württemberg im Norden und Baden im Nordwesten. Seerhein und Untersee bilden auf weite Strecken die Grenze zwischen der Schweiz und Baden (IKSR 2005b).

5.2.4.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse

Das Bodenseebecken wurde wesentlich während der Würm-Eiszeit durch den aus dem alpinen Rheintal austretenden Rheingletscher überformt. Die fluvioglaziale Erosion hat das Bodenseebecken entlang von tektonischen Verwerfungen überprägt (CHR/KHR 1978).

Der Hauptzufluss des Obersees ist der Alpenrhein, Abfluss des Obersees ist der Seerhein, der wiederum Hauptzufluss des Untersees ist. Abfluss des Untersees ist der Hochrhein. Der Alpenrhein und der Seerhein vermischen sich nur bedingt mit den Seewässern und durchströmen die Seen in meist gleich bleibenden Bahnen.

Daneben gibt es über 200 kleinere Zuflüsse. Die wichtigsten Nebenzuflüsse des Obersees sind Bregenzer Ach, Leiblach, Argen, Schussen, Rotach, Seefelder Aach, Stockacher Aach, Aach

(bei Arbon), Steinach, Goldach und Alter Rhein. Wichtigster Nebenzufluss des Untersees ist die Radolfzeller Aach.

Der Rhein trägt sehr große Mengen an Ablagerungen in den Bodensee ein. Daher ist im Mündungsbereich ein permanenter Kiesabbau mit Schwimmbaggern nötig. Würde man den Mündungsbereich nicht ausbaggern wäre die Bregenzer Bucht in einigen Jahrhunderten verlandet. Für die Verlandung des gesamten Bodensees werden zehn- bis zwanzigtausend Jahre geschätzt, vorausgesetzt, dass das Material im Mündungsgebiet nicht ausgebaggert wird (IGKB 2004).

Der mittlere Abfluss aus dem Bodensee bei Stein am Rhein beträgt $372 \text{ m}^3/\text{s}$ (IKSR 2005b). Die Pegelstände werden in Konstanz, Romanshorn und Bregenz ermittelt. Sie sind starken jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt. Die jahreszeitlich höchsten Wasserstände entstehen meist im Sommer (Juni - Juli) nach der alpinen Schneeschmelze. Zusätzliche starke Regenfälle im Sommer können den Wasserzufluss weiter erhöhen und zu Hochwasser führen. Die absolut höchsten Wasserstände am Pegel Konstanz wurden von der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg am 7. Juli 1817 (6,36 m), am 18. August 1821 (5,91 m) und am 24. Mai 1999 (5,65 m) gemessen. Das Nadelöhr des abfließenden Hochwassers stellt dabei der Rheinflall bei Schaffhausen dar.

Die jahreszeitlich niedrigsten Wasserstände treten am Rhein im Winter, in den Monaten Februar und März, auf. Die niedrigsten am Pegel Konstanz gemessenen Wasserstände betrugen 2,26 m bzw. 2,29 m und traten im Februar 1858 bzw. im Februar 2006 auf (URL 3).

5.2.5 Der Hochrhein

5.2.5.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Der Untersee verschmälert sich schließlich mehr und mehr trichterförmig in einen lang gestreckten Arm, bis der Rhein bei Stein am Rhein aus dem Bodensee ausfließt. Von nun an fließt er 141 km lang bis Basel in westlicher Richtung. Das Rheintal ist hier abwechselnd breitsohlig und schluchtartig eingeschnitten. Der Hochrhein bildet fast auf seiner gesamten Strecke die Grenze zwischen der Schweiz im Süden und Baden im Norden. Der größte Teil des Einzugsgebiets des Hochrheins liegt in der Schweiz. Es beinhaltet im Westen zwei kleine Flächen von Frankreich, die zusammen ca. 250 km^2 ausmachen. In Deutschland gehört der Hochschwarzwald zum Einzugsgebiet des Hochrheins. Die westliche Abgrenzung verläuft entlang der schweiz-französischen Grenze. In Deutschland verläuft die Grenze weiter nach

Norden entlang der Nord-Süd-Ausrichtung des Schwarzwaldhauptkammes, streift im Norden die höchsten Schwarzwaldenerhebungen, um nach Osten kreisförmig an den Rhein anzubinden. Die Ostgrenze in der Schweiz bilden die Höhenzüge des Alpsteins. Die südliche Grenze wird vom Alpenhauptkamm gebildet. Nördlich des Rheins bestimmen die Wälder des Schwarzwaldes das Landschaftsbild. Die Ausläufer des Schwarzwaldes ragen bis auf weniger als 1 km Entfernung an den Hochrhein heran und steigen sehr steil bis auf über 1.000 m Höhe an. Die höchste Erhebung des Schwarzwaldes, der Feldberg mit 1.495 m, liegt im Norden des Gebietes (IKSR 2005c).

5.2.5.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Der Hochrhein hat eine Einzugsgebietsfläche von ca. 24900 km². Der größte Teil des Hochrheins wird durch die zahlreichen Staustufen bestimmt. Auf den wenigen verbliebenen natürlichen Abschnitten gibt es immer noch mehrere Stromschnellen. Zunächst bildet der Hochrhein in Neuhausen beim Auftreffen auf eine vormals verschüttete Stromrinne den Rheinfall von Schaffhausen, den Durchbruch durch den Jura. Dieser Wasserfall gehört aufgrund seines MQ von 373 m³/s (mittlerer Sommerabfluss ca. 700 m³/s) und seiner Höhe von 20m zu den größten Wasserfällen Europas. Beim aargauischen Koblenz mündet die Aare in den Rhein, welche mit einem durchschnittlichen Abfluss von 557 m³/s deutlich wasserreicher als dieser ist (MQ: 439 m³/s). Der Rhein hat hingegen mit 311 km gegenüber 282 km den bis hierhin etwas längeren Flusslauf (IKSR 2005c).

Während der Rhein bei Kadelburger die geologischen Schichten des Oberen Muschelkalks durchfließt, trifft er bei Laufenburg wiederum auf die Ausläufer des Schwarzwälder Kristallins. Unterhalb von Säckingen treten, aus Muschelkalk bestehend, Felsenbarren und Riffe auf.

5.2.5.3 Hydrologische Verhältnisse

Der Hochrhein erstreckt sich mit einem 141 km langen Lauf von Stein am Rhein bis Basel, wobei seine Gesamtfallhöhe von Stein bis Basel 151 m beträgt. Bei dem unausgeglichene Charakter der Flusssohle wechselt das Gefälle oft auf kurzer Strecke sehr beträchtlich. Das Gefälle beträgt durchschnittlich vom See bis zum Rheinfall etwa 0,33‰, von hier bis zur Aaremündung 0,85‰, weiter abwärts auf den Strecken zwischen den Stromschnellen 0,8-1‰ (CHR/KHR 1978).

Die Wasserführung des Hochrheins wird zunächst vom Bodensee reguliert, der als gewaltiges Staubecken Hochwasser abschwächt und selbst bei längeren Trockenperioden den Fluss stets noch genügend speist. Eine sehr beträchtliche Steigerung der Wasserführung bringt die Aare. Sie beträgt durchschnittlich etwa die dreifache Wasserführung des Bodenseerheins.

Der mittlere Abfluss des Rheins bei Basel beträgt 1054 m³/s, der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) 438 m³/s und das hundertjährige Hochwasser (HQ₁₀₀) 4976 m³/s. Bei Rekingen betragen die Abflüsse folgende Werte: MQ 443 m³/s, MNQ 194 m³/s und HQ₁₀₀ 2249 m³/s. Der beträchtliche Anstieg der Wasserführung auf der Strecke des Hochrheins ist durch die Aare gegeben, welche Wassermengen von MQ 561 m³/s, MNQ 223 m³/s und HQ₁₀₀ 2249 m³/s aufweist (IKSR 2005c).

Die wichtigsten rechtsrheinischen Nebenflüsse im Teileinzugsgebiet Hochrhein sind die Wiese und die Wutach. Auf der linken Seite fließen die Aare, die Birs und die Thur in den Rhein.

5.2.5.4 Klimatologische Verhältnisse

Die Jahresmitteltemperatur beträgt ca. 9 °C im Hochrheintal und sinkt bis zum Feldberggipfel, der höchsten Erhebung im Schwarzwald, auf unter 3 °C. Die Niederschläge reichen von ca. 600 mm pro Jahr im Rheintal bis zu 2000 mm auf den Schwarzwaldhöhen und im Säntisgebiet. Vom Schweizer Mittelland mit ca. 900-1200 mm Niederschlag nimmt der durchschnittliche Jahresniederschlag in südlicher Richtung bis zu den Alpen hin zu und erreicht das Maximum in den Berner Hochalpen mit über 3000 mm. Vorwiegende Windrichtung ist Südwest. Typisch für die Tallagen sind die in der feucht-kalten Jahreszeit auftretenden Nebelschichten und Inversionswetterlagen mit z. T. dichtem und zähem Nebel in den Niederungen und Sonnenschein ab etwa 800 m ü NN (IKSR 2005c).

5.2.5.5 Wirtschaftliche Nutzung

Von der Einzugsgebietsfläche des Hochrheins sind ca. 10% besiedelt, 45% werden landwirtschaftlich genutzt und 37% der Fläche sind bewaldet.

Im schmalen Hochrheintal wird auf nährstoffreichen Lehm Böden Obst- und Ackerbau betrieben und auf den Aueböden Grünlandwirtschaft. Die Viehhaltung ist der tragende Zweig der landwirtschaftlichen Betriebe im Schwarzwald, im Jura und in den Alpen. Die bebaute

Fläche im Hochrheintal beträgt über 12%. Der Schwarzwald und der Alpenraum sind deutlich dünner besiedelt (IKSR 2005c).

5.2.6 Der Oberrhein

5.2.6.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Im Zentrum von Basel, der ersten Großstadt am Rhein, markiert das so genannte Rheinknie den Übergang vom Hochrhein zum Oberrhein und den Eintritt des Rheins in die etwa 300 km lange und bis zu 40 km breite Oberrheinische Tiefebene. Sie wird von steil abfallenden Gebirgszügen begrenzt und erstreckt sich bis zu den Rebenhügeln des Rheingaus. Das Einzugsgebiet des Oberrheins hat eine Fläche von ca. 21.700 km² (IKSR 2005d). Die Südhälfte des Oberrheins bildet die Grenze zwischen Frankreich (Elsass) und Deutschland (Baden), die Nordhälfte verbindet Rheinland-Pfalz im Westen mit Baden und Hessen im Osten und Norden.

5.2.6.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Die Entstehung dieser Senke geht bis in das ältere Tertiär zurück. Damals lag hier eine von Jurakalk bedeckte, flach gewölbte Landmasse, welche das Gebiet von Vogesen und Hardt einerseits, von Schwarzwald und Odenwald andererseits überspannte. Im Oligozän brach entlang eines von SSW nach NNO streichenden Spaltensystems die Erdkruste ein und sank, in einzelnen Schollen zertrümmert, staffelförmig in die Tiefe. Später drang das Meer von Westen und Süden her in den Oberrheingraben ein. Im Verlaufe des Oligozäns schrumpfte der Meeresarm immer mehr zu einer Bucht zusammen, die durch zuströmende Flüsse allmählich in ein Brackwasserbecken verwandelt und schließlich ganz ausgesüßt wurde (LAUTERBORN 1916).

Während der Eiszeit, wo die Gletscher der Alpen weit in das Vorland hinab reichten, brachte der Rhein ungeheure Massen von fluvioglazialen Geschieben mit sich und breitete sich über die ganze Niederung aus. Dazu kamen noch die Schuttkegel der Flüsse und Bäche aus den Randgebirgen, von denen Schwarzwald und Vogesen ebenfalls Gletscher und Firnfelder trugen. Im Laufe der Glazialzeit wurden immer mehr Schotter abgelagert, in die sich der Rhein einschneidete und die Hoch-, Mittel- und Niederterrassen schuf. Neben dem Geschiebe führten die Schmelzwasser der eiszeitlichen Gletscher auch Massen von Sand und

Gletschertrübe mit sich. Aus den meilenweit sich dehnenden öden Schotterfeldern haben die Föhnstürme das leicht bewegliche Material ausgeblasen und weg geführt. Der Sand wurde in der Nähe zu hohen Dünenzügen aufgehäuft, der feine Staub weit über die Ebene sowie die Hügel und Höhen der Randgebirge verweht. Dort lagerte er sich in mächtigen Lagen als Löß ab, die man heute z.B. noch am Kaiserstuhl oder Tuniberg vorfindet.

Da der Rhein einen alpinen Ursprung hat, zeigt der Stromlauf des Oberrheins eine sehr starke Geschiebeführung. Die Geschiebe des Oberrheins sind vorherrschend alpiner Herkunft. Am häufigsten sind Quarze, Quarzite und Hornstein (LAUTERBORN 1917).

5.2.6.3 Hydrologische Verhältnisse

Das Gesamtgefälle der ca. 362 km langen Oberrheinstrecke von Basel (252 m ü. M.) bis Bingen (76 m. ü. M.) beträgt 176 m, was einem mittleren Gefälle von etwa 0,5‰ entspricht. Im Einzelnen beträgt das Gefälle von Basel bis zum Kaiserstuhl 1‰, bis Straßburg 0,6‰, bis Mannheim etwas über 0,1‰ und zwischen Worms und Mainz streckenweise nur noch 0,05-0,08‰ (CHR/KHR 1978).

Bis zur Neckarmündung wird der jährliche Gang der Wasserbewegung des Oberrheins noch völlig von den alpinen Gewässern beherrscht. Die höchsten monatlichen Mittelwerte der Pegelstände fallen auf die Monate Juni - Juli, in denen die Gletscher und Firnfelder am stärksten abschmelzen, die niedersten monatlichen Mittelwerte auf den Februar. Durch den Zufluss des Neckars und noch mehr des Mains, die als Mittelgebirgsflüsse ihren Tiefstand im August – September, ihren Hochstand meist im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze haben, verwischt sich der alpine Charakter der Pegelkurve stromabwärts mehr und mehr. Der Hochstand fällt in der unteren Strecke zwar immer noch auf den Juni, aber der Tiefstand erscheint vom Februar gegen die Monate Oktober – November verschoben.

Der Abfluss des Oberrheins nimmt flussabwärts zu. Bei Basel (Rheinhalle) betragen die Abflusswerte der Jahre 1931-2000 MQ 1060 m³/s, MNQ 485m³/s und HQ₁₀₀ 4560 m³/s. Am Pegel Mainz beträgt der MQ 1600 m³/s, der MNQ 761 m³/s und der HQ₁₀₀ 7410 m³/s (IKSR, 2005d).

Die wichtigsten Zuflüsse des Oberrheins sind die Ill, die linksrheinisch unterhalb von Straßburg einmündet, der Neckar, der rechtsrheinisch in Mannheim und der Main der rechtsrheinisch gegenüber von Mainz in den Rhein mündet.

Die Oberrheinlandschaft hat sich im 19. Jahrhundert vor allem durch Begradigung, Trockenlegungen von Seitenarmen und Rückgang des Auen-Urwaldes stark verändert. In

Frankreich wurde der Rheinseitenkanal angelegt, der für die Rheinschifffahrt von großer Bedeutung ist. Ein beträchtlicher Teil des Rheinwassers wird entnommen bzw. umgeleitet.

5.2.6.4 Klimatologische Verhältnisse

Das wärmebegünstigte Klima der Rheinebene und der Vorbergzonen ist im Regenschatten von Vogesen und Pfälzerwald durch geringe Niederschlagsmengen geprägt, insbesondere in der Mainzer Bucht mit weniger als 500 mm/a. In den kühleren Mittelgebirgen fallen Niederschläge bis zu 2000 mm/a (IKSR 2005d).

5.2.6.5 Wirtschaftliche Nutzung

Die Einzugsgebietsfläche des Oberrheins beträgt ca. 21700 km² davon sind 13% besiedelt. Mit den Zentren Basel, Straßburg und Mannheim-Ludwigshafen ist der Oberrhein Standort zahlreicher wichtiger Industrie- und Dienstleistungsbetriebe. Die Rheinebene wird landwirtschaftlich intensiv genutzt, was der hohe Anteil von 44% an der Gesamtfläche verdeutlicht. Die hügeligen Vorbergzonen eignen sich insbesondere für Wein-, Obst- und Gemüseanbau. Waldgebiete, die 42% des Einzugsgebiets einnehmen, sind vorwiegend in den angrenzenden Lagen der Mittelgebirge anzutreffen (IKSR 2005d).

5.2.7 Der Mittelrhein

5.2.7.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Bei Bingen verlässt der Rhein den Oberrheingraben und wird mit dem Eintritt in das Rheinische Schiefergebirge zum Mittelrhein. Linksrheinisch liegen die Mittelgebirge von Hunsrück und Eifel, rechtsrheinisch Taunus und Westerwald. Der Mittelrhein zieht sich auf der größten Strecke seines Laufes durch ein tiefes Erosionstal, dessen Wände von steil aufgerichteten vielfach gefalteten devonischen Grauwacken, Tonschiefern und Quarziten gebildet werden.

Eine Unterbrechung des Rheintals bedingt das Neuwieder Becken, das sich von Koblenz bis gegen Andernach erstreckt. Gegenwärtig von fluviatilen Aufschüttungen sowie Schichten vulkanischer Asche bedeckt, haben die nach allen Richtungen ausstrahlenden Spalten dieses Einsturzbeckens die Mündung zahlreicher Bäche und Flüsse hierher gelenkt. Unter diesen

Flüssen hat die Mosel die mit Abstand größte hydrologische Bedeutung für den Mittelrhein erlangt.

Von Andernach abwärts nimmt der Rhein einen mehr gestreckten Lauf an, wobei ihn eine von der Kölner Bucht der Niederrheinischen Ebene weit heraufreichende Einsenkung leitet. Berge und Felsen, an deren Aufbau vulkanische Gesteine, vorherrschend Basalte und Trachyte, immer stärkeren Anteil nehmen, treten wieder näher an die Gestade heran. Nur wenig weiter abwärts erheben sich die zahlreichen Vulkankuppen des Siebengebirges, das sich im SO von Bonn befindet. Damit endet der Mittelrhein-Abschnitt und die weite Ebene des Niederrheins beginnt (LAUTERBORN 1917).

5.2.7.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Die Geschiebeführung des Mittelrheins ist im Allgemeinen nur wenig lebhaft. Alpine Gerölle gelangen jetzt fast nur noch als grober Sand hierher. Was sonst von größeren Geschieben auf der Stromsohle, auf den Geröllbänken sowie am Ufer liegt, entstammt den Flüssen und Bächen der mittelhheinischen Gebirge. Der Rhein selbst liefert Quarzite, Grauwacken, sowie zahlreiche Eruptivgesteine wie Diabase, Basalte und Trachyte. Die Lahn bringt besonders harte dunkle Radiolarite, die Nahe Porphyre und Melaphyre, sowie charakteristische Chalcedone und Achate (LAUTERBORN 1918).

5.2.7.3 Hydrologische Verhältnisse

Der Gebirgscharakter des Mittelrheins tritt in dessen Gefälle hervor. Die Gesamtfallhöhe der 124 km langen Strecke von Bingen (76 m ü. M.) bis Bonn (50 m ü. M.) beträgt 26 m, was ein mittleres Gefälle von 0,21‰ ergibt. Im Einzelnen wechselt das Gefälle sehr beträchtlich. Vor dem Eintritt des Rheins in das Gebirge beträgt es etwa 0,126‰, steigt dann aber in der Felsenstrecke des Bingerlochs bei Niederwasser auf 1,25‰, stellenweise selbst auf 2‰, weiter abwärts schwankt es zwischen 0,1-1‰ oft schon auf ganz kurze Entfernung. Das geringste Gefälle, nur 0,01‰, zeigt die Stromstrecke oberhalb des einengenden Felsenriffs der Lorelei (CHR/KHR 1978).

Wie schon oben erwähnt, wird der Gang der jährlichen Wasserbewegung im Oberrhein bis zur Neckarmündung durch die alpinen Zuflüsse geprägt, während stromabwärts der Einfluss der Mittelgebirgsgewässer immer mehr in den Vordergrund tritt. Im Mittelrhein fallen die höchsten monatlichen Mittelwerte der Pegelstände zwar ebenfalls noch auf den Juni, liegen

aber nur noch ganz wenig über diejenigen des Frühlings und Winters. Die tiefsten Mittelwerte zeigen die Monate September und Oktober, ganz wie in den Flüssen der Mittelgebirge. Nur die Jahreskurve der mittleren Niederwasserstände lässt auch hier noch ein gleichmäßiges Ansteigen vom Februar bis zum Juni und dann einen Abfall bis zum Winter erkennen, zeigt also ganz ähnliche Verhältnisse wie am Oberrhein.

Die wichtigen Zuflüsse des Mittelrheins sind Mosel und Lahn, die bei Koblenz einmünden. Im nahezu gesamten Bereich des Mittelrheins greift Rheinland-Pfalz auf rechtsrheinisches Gebiet über.

5.2.7.4 Klimatologische Verhältnisse

Mit einem Niederschlag von 500-650 mm/a sind das Neuwieder-, Limburger- und Gießener Becken sowie die Täler der unteren Nahe und der unteren Lahn als besonders regenarm zu bezeichnen. Überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen von bis zu 1100 mm pro Jahr ergeben sich dagegen durch das Aufgleiten und Abregnen feuchter Luftmassen auf der südwestlich-nordöstlich gerichteten Abdachung des hohen Westerwaldes sowie im westlichen Hunsrück. Der mittlere Gebietsniederschlag in den übrigen Mittelgebirgslandschaften liegt bei 700 bis 900 mm/a (IKSR 2005e).

5.2.7. 5 Wirtschaftliche Nutzung

Das Einzugsgebiet des Mittelrheins erweist sich in seiner Gesamtheit als typische Mittelgebirgslandschaft mit einem relativ hohen Waldanteil von 43,1 % (siehe Tabelle 1).

Neben der Waldwirtschaft spielt aber auch der Weinbau eine wichtige Rolle. Bedingt durch die schwierigen Bearbeitungsverhältnisse in den Steillagen ist die Produktionsfläche seit 1900 auf heute etwa 530 Hektar zurückgegangen (IKSR 2005e).

Tabelle 5.3: Flächennutzung im Einzugsgebiet des Mittelrheins (aus IKSR 2005e)

Nutzung	Anteil in %
Wald	43,1
Acker	34,6
Grünland	13,5
Sonderkulturen	1,4
Siedlungen	6,4
Vegetation ¹	0,7
Wasserflächen	0,3
Summe	100

¹ Nach CORINE hier überwiegend „Wald-Strauch-Übergangsstadien“

5.2.8 Der Niederrhein

5.2.8.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

In Bonn geht der Mittelrhein mit dem Eintritt in das Norddeutsche Tiefland in den Niederrhein über. Der Niederrhein liegt zwischen 50 m und 12 m über dem Meer.

Das Einzugsgebiet des Niederrheins umfasst 18.884 km² (IKSR 2005f). Naturräumlich wird der Niederrhein in die Niederrheinische Bucht, Westfälische Bucht und Münsterländer Kreidebecken gegliedert.

Der weitaus größte Teil des Bearbeitungsgebiets liegt in Nordrhein-Westfalen, kleinere Gebietsanteile am südlichen bzw. südwestlichen Rand des Bearbeitungsgebiets liegen in Rheinland-Pfalz, ein sehr kleiner Gebietsanteil in Hessen.

5.2.8.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Das mittlere Gefälle des ca. 230 km langen Niederrheins beträgt 0,165‰. Im Einzelnen ergeben sich wegen der unausgeglichenen Stromsohle ziemliche Schwankungen. So beträgt das Gefälle bei Zons unterhalb Kölns 0,34‰, während es sonst auf der Strecke zwischen Köln und der Ruhrmündung durchschnittlich nur 0,112-0,182‰ misst.

Die Geschiebeführung des Niederrheins ist bei dem schwachen Gefälle ziemlich gering. Der Strom führt Gerölle, die nur selten noch die Größe von 2 cm übertreffen und sowohl auf der Sohle als an den Ufern als Kiesbänke abgelagert werden. Sie entstammen vorherrschend dem Gebiete des Mittelrheins sowie der Ruhr. Daneben finden sich an ruhigen Stellen überall auch beträchtliche Ablagerungen von Sand und Schlick, die stromabwärts immer mehr an Boden gewinnen (CHR/KHR 1978).

5.2.8.3 Hydrologische Verhältnisse

Im Gang der jährlichen Wasserstandsbewegung zeigt die Kurve der mittleren Pegelstände ihren Gipfel in den Monaten Januar – Februar, ihren Tiefstand im September – Oktober; ähnlich verhalten sich die Durchschnittswerte der höchsten monatlichen Wasserstände. Anders jedoch diejenigen der niedersten monatlichen Wasserstände. Ihr Minimum fällt zwar ebenfalls auf die Monate Oktober – November, ihr Maximum dagegen auf den Juni, also noch genau wie im Mittel- und Oberrhein. Aus diesen Pegelbeobachtungen sowie aus sorgfältigen Messungen der Wassermenge am Oberrhein bei Germersheim sowie bei Lobith geht hervor,

dass die Speisung des Niederrheins im Winter hauptsächlich durch die Zuflüsse aus den Mittelgebirgen vom Neckar abwärts erfolgt, die um diese Zeit etwa 3/5 der gesamten Wassermenge liefern. Im Sommer dagegen steuern diese Flüsse nur etwa 1/4 der gesamten Wassermenge bei, während der Hauptanteil den abschmelzenden Gletschern und Firnfeldern der Alpen entstammt.

Der Rhein erreicht das Niederrheingebiet, das an der Landesgrenze zwischen Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen bei Bad-Honnef beginnt, mit einem MQ von 2.040 m³/s, MNQ liegt bei 896 m³/s, der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) bei 6.240 m³/s, so dass ein relativ ausgeglichenes Abflussverhalten vorliegt (Pegel Andernach, Reihe 1931 bis 2001). Kurz vor Austritt aus dem Teileinzugsgebiet (das an der deutsch-niederländischen Grenze bei Bimmen/Lobith endet) zeigt der Rhein am Pegel Rees (Reihe 1931 bis 1998) die folgenden Abflusswerte: MNQ 1.030 m³/s, MQ 2.270 m³/s und der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) 6.550 m³/s (IKSR 2005f).

Die wichtigsten Zuflüsse sind Ruhr und Lippe. Wie dem Oberrhein wurde dem mäandrierenden Niederrhein durch wasserbauliche Maßnahmen ein festes Flussbett geschaffen. Allerdings steht dem Niederrhein dank weit zurückliegender Deiche bei Hochwasser mehr Ausdehnungsfläche als dem Oberrhein zur Verfügung.

5.2.8.4 Klimatische Verhältnisse

Klimatisch gesehen ist das Einzugsgebiet des Niederrheins atlantisch geprägt, d.h. regenreiche, vergleichsweise milde Winter und mäßig warme Sommer bestimmen im Mittel die vorherrschenden Wetterlagen.

Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 846 mm, wobei die Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit von Relief und Exposition stark variiert. So werden in den trockeneren Teilen der Westfälischen Bucht nur rund 750 mm Niederschlag pro Jahr erreicht, während die höheren Mittelgebirgslagen Niederschläge von über 1.000 mm/a aufweisen (IKSR 2005f).

5.2.8.5 Wirtschaftliche Nutzung

Mit jeweils 30% Flächenanteil dominieren die Nutzungen „Wald-/Forstfläche“ und „Ackerland“. Siedlungsflächen sowie Flächen mit Industrie und Gewerbe nehmen insgesamt einen Flächenanteil von ca. 15% des Niederrheins ein. Als größter Ballungsraum ist hier das

Ruhrgebiet mit seiner extrem hohen Siedlungsdichte und Flächenanteilen von bis zu 50% zu nennen. Der Bergbau spielt eine wichtige Rolle im Einzugsgebiet des Niederrheins. Die bergbauliche Nutzungen besitzen dort eine lange Tradition und hohe Relevanz. Neben Stein- und Braunkohle wird auch vereinzelt Steinsalz angebaut. Aktuell beeinflussen sowohl unterirdische als auch oberirdische Abbauverfahren die Oberflächengewässer und Grundwässer (IKSR 2005f).

5.2.9 Rhein-Maas-Delta

5.2.9.1 Naturräumliche Lage und topographische Besonderheiten

Das an der niederländisch-deutschen Staatsgrenze beginnende Rhein-Maas-Delta stellt die zentrale Landschaft der Niederlande dar. Da das rheinische Fluss-System überwiegt, wird es oft auch einfach Rheindelta genannt, muss dann aber vom Rheindelta am Bodensee unterschieden werden.

Für das Rheindelta sind folgende beiden Flussteilungen, auch Bifurkationen genannt, ausschlaggebend: zum Einen die Rheinteilung bei Millingen in Waal und Nederrijn, zum Anderen der Abzweig der (Gelderschen) Issel vom Nederrijn bei Arnheim.

Das Delta des Rheins ist in besonderer Weise mit dem der Maas liiert. Die Maas mündete bis 1904 für etwa vier Jahrhunderte bei Gorinchem in die Waal, seitdem ist sie mit dem Rheinsystem jedoch eigentlich nicht mehr verbunden und fließt über Bergse Maas und Amer in die ehemalige Meeresbucht Hollands Diep.

Das Einzugsgebiet des Deltarheins liegt zum überwiegenden Teil in den Niederlanden (ca. 90%). Ein kleiner Teil der Fläche (ca. 10%) ist deutsches Territorium (IKSR 2005g).

5.2.9.2 Hydrogeologische und hydrologische Verhältnisse

Der tiefere Untergrund des Deltarheins wird von marinen Sedimentgesteinen der Kreidezeit gebildet. Oberhalb der Kreideablagerungen ist der Untergrund des Bearbeitungsgebietes Deltarhein aus Sand, Ton und Torf aufgebaut. Die geohydrologische Grundlage besteht aus Tonen und Sanden, die im Tertiär, also vor mehr als zwei Millionen Jahren, abgelagert wurden. Im frühen Pleistozän, vor etwa zwei Millionen Jahren, war der größte Teil des gegenwärtigen Rheindeltas von der Nordsee bedeckt. Auf dem Grund bildeten sich marine Ablagerungen von Ton und Sand. Allmählich zog sich das Meer zurück. In der trocken

gefallenen Fläche fand der Rhein seinen Weg, lagerte Sand und Kies ab und baute so das Delta auf. Nach den Eiszeiten bildeten sich Decksande und Torfgebiete, während die Flüsse weiterhin Sand und Ton ablagerten. Vor etwa 7.500 Jahren wurden die pleistozänen Ablagerungen allmählich überdeckt von neuen Flussablagerungen. Daneben entstanden Torfschichten, Schorren, Tondecken, Strandwälle und Küstendünen.

Aufgrund dieser wechselnden Bedingungen in der geologischen Geschichte hat sich im Untergrund des Deltarheingebiets ein wechselhafter und diskontinuierlicher Aufbau ergeben. Daher liegt im EZG Deltarhein ein äußerst komplexes System der Grundwasserströmungen vor. Dies wird noch verstärkt durch die vielen Polder mit unterschiedlichen Grundwasserspiegeln. Das damit verbundene Austauschsystem von Süß- Salz- und Brackgrundwasser ist noch nicht im Gleichgewicht mit den hydraulischen Randbedingungen (IKSR 2005g).

Das Einzugsgebiet des Deltarheins umfasst eine Fläche von ca. 37.200 km². Die Hydrographie des heutigen Deltas ist geprägt von den Delta-Hauptarmen, weiteren Stromarmen (u.a. Linge, Vecht), sowie kleineren Flüssen und Bächen. Mit den so genannten Deltawerken erfuhr das Delta in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts einer seiner größten Umgestaltungen.

5.3 Fazit

Aufgrund der Datengrundlage, die durch die IKSR zur Verfügung stand, wurden in dieser Arbeit die Teileinzugsgebiete Hochrhein, Oberrhein, Mittellrhein, Niederrhein und Deltarhein untersucht. Die geographische Lage dieser Einzugsgebiete ist im Anhang in Abbildung A.5 dargestellt.

Das Rheineinzugsgebiet ist eines der am besten erforschten Flusssysteme in Europa, wobei die IKSR mit ihrer Forschung einen großen Beitrag dazu geleistet hat. Die geologische Situation ist weitläufig bekannt, sowie die geomorphologischen Verhältnisse und die klimatischen Gegebenheiten. Dennoch sind die einzelnen hydrologischen Prozesse die in einem so großen Gebiet wie dem des Rheins ablaufen, sehr komplex und teilweise immer noch nicht ausreichend erforscht.

Am Deltarhein sind auf Grund der geologischen Gegebenheiten sehr komplexe Oberflächen-/ Grundwasser-Interaktionen zu erwarten, die im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden können. Daher wird der Deltarhein trotz ausreichender Datenmenge nicht weiter in die Auswertung mit einbezogen.

Obwohl das Bearbeitungsgebiet nun kleiner ist, besteht immer noch das Problem der stark variierenden Geologie, Flächennutzung und klimatischen Gegebenheiten in den einzelnen Teileinzugsgebieten. Diese Problematik erschwert erheblich die räumliche Ausweisung der verschiedenen Emissionsquellen in das Fließgewässer des Rheins.

6 Der Stoffeintrag in Oberflächengewässer

6.1 Stoffquellen

Den Stoffeintrag in die Gewässer kann man grob in folgende zwei Hauptgruppen unterteilen: zum einen in die Gruppe der punktförmigen Einträge und zum anderen in die Gruppe der diffusen Stoffeinträge (EISELE 2002).

In der Abbildung 6.1 sind die unterschiedlichen Eintragspfade in die Oberflächengewässer dargestellt. Die punktförmigen Belastungen kommen aus kommunalen (Eintragspfad 8) und industriellen Abwässern (Eintragspfad 12). Diese werden in Sammelkanalisationen erfasst und über Kläranlagen in die Oberflächengewässer geleitet. Das Niederschlagswasser, das über Trenn- oder Mischkanalisationen und aus Regenüberlaufbecken in die Gewässer gelangt, gehört ebenfalls zu den punktförmigen Emissionen (Eintragspfade 7 und 9).

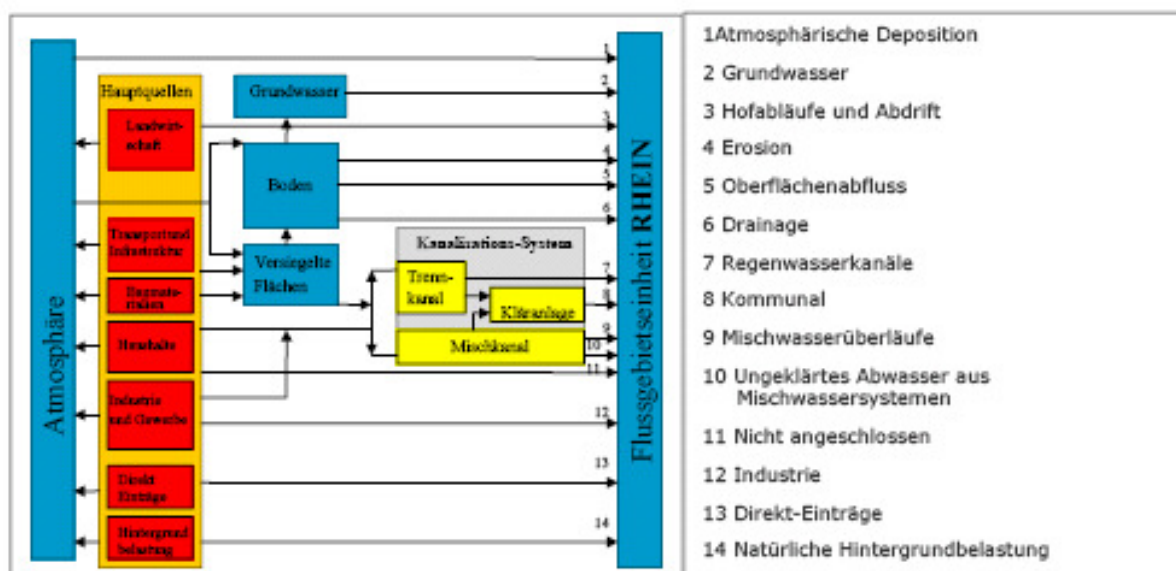


Abbildung 6.1: Eintragspfade zur Bestimmung der Belastung der Oberflächengewässer (Quelle: IKSR 2005a)

Die diffusen Stoffeinträge können weiter untergliedert werden in eine natürliche Hintergrundbelastung und eine anthropogene Belastung.

Die natürliche Hintergrundbelastung ist die nicht auf anthropogene Luftverschmutzungen zurückzuführende Stoffmenge im Niederschlag und die Stoffkonzentration des Abflusses unter potentiell natürlicher Vegetation. Diese Stoffkonzentrationen sind abhängig von den Eigenschaften der Boden- und Gesteinsschichten. Aufgrund dessen werden die Stoffeinträge durch Oberflächenabfluss (Eintragspfad 5) und Erosion (Eintragspfad 4), durch Sickerung bzw. Auswaschung über Grundwasser (Eintragspfad 2), durch Drainageeinträge (Eintragspfad

6) und durch atmosphärische Deposition (Eintragspfad 1) zu den diffusen Belastungen gezählt.

Demgegenüber gibt es auch anthropogene diffuse Belastungen, die durch sämtliche Veränderungen im Hinblick auf Fließwege, Abflussmengen und Stoffkonzentrationen definiert werden (DVWK 1998). Dazu zählen die Direkteinträge von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie von Weidevieh und der Oberflächenabfluss von außerörtlichen Straßen und Wegen (Eintragspfad 13). Doch auch landwirtschaftliche Abflüsse (Eintragspfad 3), wie z.B. Hofabläufe und Abdrift sowie nicht kanalisierte Abwässer (Eintragspfad 11), die vor allem aus ländlichen Gebieten aus mehreren kleinen punktuellen Belastungen stammen, werden zu den anthropogen diffusen Belastungen gezählt..

6.2 Eintragsquellen der Nährstoffe

Die Nährelemente Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Magnesium (Mg^{2+}), Calcium (Ca^{2+}), Chlorid (Cl^-), Sulfat (SO_4^{2-}) und Kieselsäure-Silizium (Si^{+}) stammen überwiegend aus diffusen Quellen, Bodenmineralen, Niederschlag und Düngung. Aus diesem Grund wurden sie herangezogen, um ihre Eigenschaft als hydrologischer Tracer zu überprüfen.

Ein Problem hierbei ist, dass über den Nährstoffeintrag in aquatischen Ökosystemen keine allgemeingültigen Aussagen gemacht werden können. Es können nur allgemeine Aussagen zur Abschätzung der Emissionsquellen gemacht werden. In den in der Landwirtschaft ausgebrachten Düngemitteln sind in der Regel das für die Ernährung der Pflanzen wichtige Kalium und das als Düngebegleiter wichtige Magnesium und Calcium enthalten. Da die Stoffe aber auch in einem eben so starken Ausmaß Bestandteil der Minerale des Bodens sind, spiegeln deren Konzentrationen im Boden vorwiegend die Beschaffenheit des Ausgangsgesteins wieder (WALTHER 1999).

Bei den Stoffen Chlorid, Natrium und Kalium muss jedoch die höhere Belastung durch die Abspülung von Streusalz oder durch Abwässer aus dem Bergbau berücksichtigt werden. Im Rheineinzugsgebiet verursacht z.B. der Kalibergbau, der früher im Elsass betrieben wurde und heute noch im Rhein-Neckar- und im Ruhrgebiet betrieben wird, einen unnatürlich hohen Chlorideintrag.

6.2.1 Chlorid

Chlorid tritt in der Natur überwiegend in Verbindung mit Na^+ -, K^+ - und Mg^+ -Ionen auf. Daneben existiert eine begrenzte Anzahl natürlicher organischer Chloridverbindungen. Geochemisch gesehen stammt das Chlorid aus den Ozeanen. Die Gesteine der festen Erdkruste enthalten nur 130 g/t im Vergleich zu 28.300 g/t Natrium und 25.900 g/t Kalium (KÖLLE 2003). Dadurch kann man davon ausgehen dass, wenn man auf höhere Chloridkonzentrationen stößt, das Chlorid direkt oder indirekt aus den Ozeanen stammt. Beträchtliche Chloridmengen werden durch den Abbau von Salzlagerstätten, die sich einst durch Verdunstung von Meerwasser in abgeschnittenen Meeresbecken gebildet haben, freigesetzt.

6.2.2 Natrium

Die mit Abstand wichtigste Natriumverbindung ist Natriumchlorid (NaCl), das auch „Kochsalz“ genannt wird. Natrium und Chlorid treten häufig gemeinsam auf und stehen in einer engen Beziehung. Die beiden Stoffe tauchen als Gischte von Meerwasser, das über die Landflächen verfrachtet wird, sowie als Kochsalz, Streusalz und Regeneriersalz auf (KÖLLE 2003). Aber auch die Kalidünger können neben Chlorid beträchtliche Anteile an Natrium enthalten. Dieses Zusammenspiel der Stoffe darf bei ihrer Auswertung nicht vernachlässigt werden.

6.2.3 Kalium

In der Natur tritt Kalium oft in Verbindung mit Sylvin (Kaliumchlorid) oder Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) auf. Dadurch steht es zu Chlorid in einer engen Beziehung (KÖLLE 2003). Das Kalium gelangt überwiegend durch den Kalibergbau und die Kalidüngung in die Oberflächengewässer.

6.2.4 Sulfat

Die Sulfatkonzentrationen von Fließgewässern sind teilweise geologisch bedingt, u.a. durch Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) oder Anhydrit (CaSO_4). Eine weitere Quelle für Sulfateinträge in die Gewässer kann die Abschwemmung aus landwirtschaftlichen Flächen als Magnesiumsulfat (MgSO_4) sein. Jedoch kann Sulfat auch über kommunale und industrielle Abwässer als Natriumsulfat (Na_2SO_4), sowie über die Abwässer von Salzlagerstätten eingetragen werden.

6.2.5 Calcium

Der Anteil von Calcium am Aufbau der Erdkruste liegt bei 3,6%, womit es zu den häufigsten Elementen der Erdkruste zählt. Gebirgsbildend tritt Calcium als Kalk (Calciumcarbonat) und Dolomit (Calcium-Magnesiumcarbonat) auf. Ebenfalls häufig kommt Calcium als Gips oder Anhydrit (Calciumsulfat) in der Natur vor. Des Weiteren enthalten sehr viele Silicate und Tonminerale Calcium (KÖLLE 2003).

Calcium zählt zu den mengenmäßig wichtigsten Wasserinhaltsstoffen und kann durch verschiedene Reaktionen in Lösung gehen. Eine der wichtigsten ist die Auflösung von Calciumcarbonat durch CO_2 -haltiges Wasser. Eine weitere Reaktion ist die Auflösung von Calciumsulfat aus gipshaltigen Schichten. Durch Neutralisationsreaktionen, aufgrund von „saurem Regen“, kann es auch zur Lösung von Calcium kommen. Bei den Neutralisationsreaktionen sind hauptsächlich Kalk und Mergel die Calciumquellen. Calcium kann aber auch durch die chemische Industrie oder den Kalibergbau als Calciumchlorid in die Gewässer gelangen. Zudem wird Calciumchlorid auch im winterlichen Straßendienst an Stelle von Natriumchlorid eingesetzt.

6.2.6 Magnesium

Magnesium zählt zu den in der Natur am häufigsten auftretenden Elementen, da es beim Aufbau der Erdkruste einen Anteil von etwa 2,1% aufweist. Magnesium tritt als Carbonat in Dolomit (Calcium-Magnesiumcarbonat) und als Magnesit (reines Magnesiumcarbonat) bei der Gebirgsbildung auf. Das Magnesium ist auch in Silicaten und zahlreichen Tonmineralen weit verbreitet. Wie oben schon erwähnt kommt Mg in zahlreichen Komponenten von Salzlagerstätten, wie z.B. in Verbindung mit Chlorid als Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) oder mit Sulfat als Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) vor. Im Kalibergbau gibt es nur für kleine Anteile der

Magnesiumsalze eine sinnvolle Verwendung. Sie werden u.a. als Komponente von Düngern und für die Gewinnung von metallischem Magnesium eingesetzt (KÖLLE 2003).

6.2.7 Kieselsäure-Silizium

Die IKSR gibt in ihren Aufzeichnungen den Parameter Kieselsäure-Silizium (Si) an. Die Sauerstoffsäuren des Siliziums ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) werden als Kieselsäuren bezeichnet. Im deutschen Sprachgebrauch wird das Wort Kieselsäure für alle möglichen Formen von synthetischen Siliziumdioxiden verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit soll Kieselsäure-Silizium für das chemische Element Silizium (Si) stehen. Silizium ist das zweithäufigste Element der Erdkruste, das an ihrem Aufbau mit 27,7% beteiligt ist. Silizium ist Bestandteil des Quarzes (SiO_2) sowie aller Silikate, einschließlich der Tonminerale. Somit gelangt es hauptsächlich durch die Verwitterung von Silicaten in die Fließgewässer (KÖLLE 2003).

6.3 Eintragsquellen der organischen Verbindungen

Pflanzenschutzmittel sind meistens komplexe organische Verbindungen und stammen ausschließlich aus anthropogenen Quellen. Sie werden überwiegend im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt. Durch eine Vielzahl von weiteren organischen Verbindungen aus anthropogenen Quellen werden die Gewässer zusätzlich belastet. Diese gelangen über die atmosphärische Deposition in die terrestrischen Ökosysteme und werden danach in die Fließgewässer eingetragen. Beispiele hierfür sind die Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und die Einträge von endokrinen Substanzen in die Gewässer (EISELE 2003).

6.3.1 Atrazin

Atrazin wurde als Herbizid vor allem bei Mais- und Spargelkulturen gegen Unkraut eingesetzt. Somit gehört es zu den Pflanzenschutzmitteln, die überwiegend durch anthropogenen Eintrag in die Natur gelangen. Seit 1988 besteht für Atrazin ein Anwendungsverbot in Wasserschutzgebieten, das 1992 zu einem vollständigen Anwendungsverbot erweitert wurde.

Aufgrund dieses Anwendungsverbots für Atrazin in Deutschland kann man davon ausgehen, dass man keine neuen Einträge in die Umwelt bekommt. Zusätzlich wurde die Produktion in Deutschland eingestellt. Laut der Bestandsaufnahme zur Einleitung rheinrelevanter Stoffe im deutschen Rheineinzugsgebiet der IKSР für das Jahr 2000 sind keine industriellen Direkteinleitungen für den Stoff Atrazin bilanziert worden (IKSR 2001).

Trotz des seit 16 Jahren bestehenden Verbots sind in den Ackerböden, aufgrund des jahrelangen großflächigen Einsatzes im Maisbau und bedingt durch die mäßige Persistenz des Atrazin, noch geringe Konzentrationen vorhanden. Jedoch sollten die noch vorhandenen Belastungen in Oberflächengewässern abnehmen, da Atrazin aus historischen Anwendungen inzwischen in tiefere Bodenschichten verlagert wurde. Der Rückgang der Belastung von Grundwässern ist im Vergleich mit Oberflächengewässern verzögert (UBA 2002).

6.3.2 Diuron

Diuron wird bevorzugt als Totalherbizid auf Wegen und Plätzen gegen Unkräuter eingesetzt. In der Landwirtschaft verwendet man es selektiv zur Unkrautbekämpfung beim Spargel-/Weinbau, bei Ziergehölzern und bei Kernobst. Somit gehört es zu den Pflanzenschutzmitteln, die überwiegend durch anthropogenen Eintrag in die Natur gelangen.

Diuron ist auf Grund des Pflanzenschutzgesetzes ein zugelassener Wirkstoff in allen EU-Ländern, außer Finnland, Schweden und den Niederlanden. Die Anwendung von Diuron ist in Deutschland nur eingeschränkt möglich. Durch diese Einschränkung ist die Anwendung auf Gleisanlagen bzw. auf nicht versiegelten Flächen verboten. Dies liegt daran, dass die Gefahr besteht, dass das Diuron durch Auswaschung in Gewässer oder Kanalisationen, in Straßenabläufe sowie Regen- und Schmutzwasserkanäle gelangt (UBA 2002).

Diuron wird laut Bach (2000) zu einem großen Teil über die landwirtschaftlichen Abflüsse, u.a. über „Hofabläufe“, in die Gewässer eingetragen. In seinen Untersuchungen in den Flussgebieten von Rhein, Main, Nidda und Ruhr hat Bach die Gesamtfracht der landwirtschaftlichen Wirkstoffe auf Werte von 70 % bis 90 % geschätzt. Die Einträge, die durch die Herstellung bedingt sind, belasten die Umwelt weit weniger wie die Einträge als Pestizide.

Die Deutsche Bahn hat seit dem Jahr 1996 freiwillig auf den Einsatz von Diuron zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich verzichtet. Da im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass bei Herbizidanwendungen in diesem Bereich die Gefahr des Austrags in Oberflächengewässer besonders hoch ist und die Deutschen Bahn AG die Entscheidung

getroffen hat den Eintrag von Diuron in Oberflächengewässer zu unterbinden, kann man davon ausgehen dass der Gesamtdiuron-Einsatz in Deutschland in den letzten Jahren enorm reduziert wurde (UBA 2002).

6.4 Eintragsquellen der Feststoffe

In Oberflächengewässern transportierte Feststoffe lassen sich in Schwebstoffe, Schwimmstoffe und Sedimente unterteilen. Diese stammen aus externen Quellen, aber auch aus dem Gerinne selbst.

Der Feststoffeintrag kann aus natürlichen und aus anthropogenen Quellen in die Fließgewässer gelangen (EISELE 2002). Natürliche Feststoffeinträge werden durch flächenhaften und linienhaften Bodenabtrag und durch Eintrag von Biomasse, wie z.B. Laub, eingetragen. Die anthropogenen Feststoffeinträge werden in diffuse und punktförmige Einträge unterteilt. Diffuse Feststoffeinträge werden zum größten Teil durch den Bodenabtrag von landwirtschaftlichen Flächen und den Eintrag über Drainagen verursacht. Punktförmige Feststoffeinträge stammen aus Kläranlagen, Regenentlastungen, Straßenabläufen, sowie aus Überläufen von Stillgewässern.

6.5 Fazit

Nachdem die unterschiedlichen Emissionsquellen näher betrachtet worden sind, wurden die Parameter die zur Auswertung zur Verfügung standen, dezimiert. Da die Hauptnährstoffe Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Chlorid und Sulfat überwiegend aus diffusen Quellen stammen und ein großer Teil auch natürlich über die Gesteinsverwitterung in die Oberflächenwässer gelangt, wurden diese Stoffe zur weiteren Auswertung herangezogen. Dabei ist es wichtig, dass bei der Auswertung der Stoffe Natrium, Kalium und Chlorid der erhöhte Stoffeintrag durch die Salzbergwerke oder die Salzstreuung berücksichtigt wird.

Die organischen Verunreinigungen weisen im Rheineinzugsgebiet sehr geringe Stoffkonzentrationen auf, die zum Teil unter der Nachweisgrenze liegen. Ein Beispiel hierfür ist das Hexachlorcyclohexan (HCH), das an mehreren Messstellen einen konstanten Wert mit einer Konzentration von 1,0 µg/l über eine längere Zeitreihe aufweist. Die zu den organischen Verunreinigungen gehörenden Pflanzenschutzmittel Atrazin und Diuron zeigen dieses Verhalten nicht und wurden dadurch zusätzlich zur weiteren Auswertung herangezogen.

7 Untersuchungsparameter

In dieser wissenschaftlichen Arbeit werden, nach der in Kapitel 5 erfolgten Voruntersuchung, nur die Teilgebiete Hochrhein, Oberrhein, Mittelhhein und Niederrhein weiter berücksichtigt. Zur Auswertung stehen Parameter von 17 Messstation der IKSr zur Verfügung.

Beim Hochrhein werden die Messstation Rekingen, beim Oberrhein die Stationen Village-Neuf / Weil am Rhein und Seltz / Lauterbourg, beim Mittelhhein die Messstationen Koblenz-Rhein und Koblenz-Mosel und beim Niederrhein die Station Bimmen bearbeitet. Die genaue Lage der einzelnen Messstationen ist in Abbildung A 4.1 dargestellt.

Auf Grund der im Vorfeld betrachteten Emissionsquellen wurden folgende Hauptinhaltsstoffe berücksichtigt: Chlorid (Cl^-), Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Sulfat (SO_4^{2-}), Kieselsäure-Silizium (Si) sowie die Pflanzenschutzmittel Atrazin und Diuron. Zusätzlich wurde der Schwebstoffgehalt im Rheinwasser ausgewertet.

Für die einzelnen Messstationen und die verschiedenen Untersuchungsparameter stand die Messreihe der IKSr der Jahre 1978 bis 2004 zur Verfügung.

7.1 Das Abflussverhalten des Rheins

Die mittleren Abflüsse (MQ) der Messstationen variieren für die Zeitreihe 1978-2004 zwischen minimal 347 m³/s und maximal 2377 m³/s. In der Tabelle 7.1 sind die mittleren Abflüsse aller Messstationen aufgeführt.

Tabelle 7.1: Mittlerer Abfluss für die Zeitreihe 1978-2004
(eigene Berechnung aufgrund der Daten der IKSr)

Messstation	MQ
Rekingen (Hochrhein)	460 m ³ /s
Village Neuf / Weil am Rhein (Oberrhein)	1089 m ³ /s
Seltz / Lauterbourg (Oberrhein)	1294 m ³ /s
Koblenz-Rhein (Mittelrhein)	1805 m ³ /s
Bimmen (Niederrhein)	2377 m ³ /s
Koblenz-Mosel (Mittelrhein)	347 m ³ /s

Der Abfluss Q wird von der IKSr am Oberrhein 14-tägig als Abfluss am Tag der Einzelprobenahme bereitgestellt. Das Abflussmittel wird über die zweiwöchige Messperiode

und als mittlerer Abfluss über die Messperiode von vier Wochen zur Verfügung gestellt. Der Abfluss der in der Zeitreihe 1978-2004 alle 14 Tage gemessen worden ist, wird im Anhang in den Abbildungen A 7.1-1 bis A 7.1-6 für die einzelnen Messstationen aufgeführt.

Die abflussreichen Jahre am Rhein waren in dieser Zeitreihe die Jahre 1981, 1988, 1995, 1999 und 2001. In den Jahren 1985, 1991, 1996 und 2003 trat im Vergleich zum langjährigen Mittel ein geringer MQ auf (siehe Abbildung A 7.1-7).

Das Abflussverhalten an der Station Rekingen am Hochrhein, dass durch den Bodensee reguliert wird, weist einen alpinen Charakter auf. Die jährliche Abflusskurve hat ihre Höchstwerte im Sommer durch die Schneeschmelze in den Alpen. Die niedrigsten Werte treten im Winter auf, verursacht durch den winterlichen Niederschlag in Form von Schnee.

Auch am Oberrhein ist das Abflussverhalten bis zur Neckermündung noch alpin bzw. glazial geprägt. Die höchsten monatlichen Mittelwerte des Abflusses an den Stationen Village-Neuf und Weil am Rhein fallen auf die Monate Juni - Juli, die niedrigsten Werte auf den Februar.

Bei den Stationen Seltz und Lauterbourg kann man schon leicht den Einfluss der Mittelgebirgsflüsse erkennen. Diese verschieben die höchsten Abflusswerte mehr in den Frühsommer und die niedrigsten Abflüsse in Richtung der Monate Oktober – November. Durch den Zufluss des Neckars und noch mehr des Mains, die als Mittelgebirgsflüsse ihren Tiefstand im August – September, ihren Hochstand meist im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze haben, verwischt der alpine Charakter des Abflusses stromabwärts mehr und mehr.

Die Station Koblenz/Rhein zeigt die tiefsten monatlichen Mittelwerte in den Monaten September und Oktober. Die Station weist also die niedrigsten Werte zur gleichen Zeit wie die Mittelgebirgsflüsse auf und somit auch ähnliche Werte wie die Mosel (niedrigster Abfluss: August bis Oktober). Die höchsten Abflüsse verschieben sich nur leicht Richtung Frühling, womit der Mittlrhein immer noch alpin geprägt ist.

Durch die weiteren Zuflüsse der Mittelgebirgsflüsse Lahn und Sieg und der Tieflandflüsse Ruhr und Lippe treten an der Messstation Bimmen die höchsten Abflusswerte in den Monaten Februar und März auf. Das Abflussverhalten hat sich in Bezug auf die niedrigsten Abflusswerte im Vergleich zur Messstation Koblenz/Rhein nicht verändert, da diese immer noch in den Monaten September und Oktober auftreten. Dies wird in den Abb. A 7.1-1 bis A 7.1-6 am Beispiel der 14-tägigen Mittelwerte des Abflusses von 1986 veranschaulicht.

7.2 Der Schwebstoffgehalt

Verschiedene Messungen des Schwebstoffgehalts belegen, dass die Schwebstoffgehalte S mit dem Abfluss Q zu- und abnehmen. In der Literatur wird ein korrelativer exponentieller Zusammenhang mehrfach bestätigt (siehe HELLMANN 1986). Die Zunahme des Schwebstoffgehalts mit dem Abfluss wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Von großer Bedeutung sind die Feststoffmengen, die das Einzugsgebiet und das Gewässernetz liefern. Diese Feststoffmengen sind von hydrologischen und geographischen Gegebenheiten abhängig. Daher darf man also nicht alleine die flächenhafte Abspülung bei Regenfällen berücksichtigen. In einem großen Einzugsgebiet wie das des Rheins wird die Flächenabspülung vom Abrieb und der Erosion im Strombett, sowie von den Wasserläufen der Nebenflüsse überlagert. Des Weiteren darf man die anthropogenen Einflüsse auf das Gewässernetz, wie z.B. die Staustufen am Oberrhein, nicht vernachlässigen.

Da die Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse den Umfang dieser Arbeit überschreitet und die Datengrundlage meist auch eher gering ist, soll in dieser Arbeit auch nur ein kleiner Einblick in den Schwebstoffgehalt gegeben werden.

Die Auswertungen des Schwebstoffgehalts im Rheineinzugsgebiet zeigen eine annähernde Korrelation mit dem Abfluss. Steigt der Abfluss Q , so steigt auch der Schwebstoffgehalt S (siehe die Abbildungen A.7.2-1 bis A.7.2-6 im Anhang).

Bei der genauen Auswertung des Schwebstoffgehalts sieht man mit der Zunahme des Einzugsgebiets einen immer flacheren Kurvenanstieg. Da die Zeitreihe von 1994-2004 mehrere Datenlücken enthält und die Trendlinien zum Teil geringe Bestimmtheitsmaße aufweisen, ist dies kein aussagekräftiges Ergebnis. Ein Grund für die kleinen Werte des Bestimmtheitsmaßes kann der Hystereseeffekt, der bei einer Korrelation von Schwebstoffgehalt und Abfluss auftritt, sein. Bei ansteigendem Abfluss können sehr große Schwebstoffgehalte auftreten, während bei abnehmendem Abfluss – jedoch bei sonst gleichen Zahlenwerten – viel geringere Schwebstoffgehalte gemessen werden. Dies veranschaulicht Abbildung 7.2.-1.

Ein weiterer Grund der die Auswertung des Schwebstoffgehalts erschwert, ist der anthropogene Eintrag über die Kläranlagen. Schwebstoffe anthropogener Herkunft nehmen mengenmäßig zwar eine untergeordnete Stellung ein, jedoch ist ihr Verhalten im Vergleich zu den Erosions-Schwebstoffen gegenläufig. Die Konzentration der anthropogen eingebrachten Schwebstoffe nimmt nicht mit dem Abfluss zu, sondern es tritt ein Verdünnungseffekt auf.

Mit der Datengrundlage und den daraus folgenden Ergebnissen ist der Schwebstoffgehalt im Rheineinzugsgebiet als hydrologischer Tracer nicht eindeutig aussagekräftig.

Um die Korrelation von Schwebstoffgehalt und Abfluss im Einzugsgebiet des Rheins eindeutig nachzuweisen und um den Schwebstoffgehalt somit als Tracer einsetzen zu können, müssten weitere Auswertungen mit einer größeren und genaueren Datengrundlage gemacht werden. Zusätzlich sollte man zur Auswertung noch weitere Daten heranziehen. Hierfür wären z.B. die Bodenabschwemmung der einzelnen Teileinzugsgebiete, die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe, der Anteil an organischen und anorganischen Bestandteilen sowie der Anteil an „natürlichen“ und „anthropogenen“ Einleitungen geeignet. Ebenfalls wären die Niederschlagsmengen von verschiedenen Messstationen wichtig, da bei einer Längsprofiluntersuchung nur eine Auswertung der Analysebefunde möglich ist, wenn Wasser- und Schwebstoffführung nicht durch lokale Sonderereignisse, hierzu gehören insbesondere stärkere Regenfälle, beeinflusst werden.

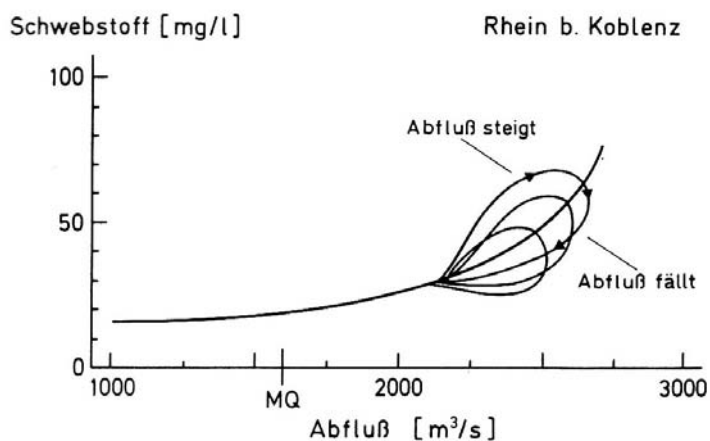


Abbildung 7.2-1: Schwebstoffgehalt und Abfluss in einem Fließgewässer; ansteigende und absinkende Wasserführung (HELLMANN 1986)

7.3 Chlorid

7.3.1 Auswertung

Die Auswertung der Chlorid-Ionen zeigt, dass der Chloridgehalt flussabwärts (siehe Abbildung A 7.3-1 im Anhang), mit einem deutlichen Konzentrationssprung an den Stationen Seltz / Lauterbourg, zunimmt. Die deutliche Konzentrationszunahme ist nicht auf natürliche Emissionen zurückzuführen. Das Beispiel in der Abbildung 7.3-1 zeigt den anthropogenen Einfluss der Chlorideinträge in den Rhein, anhand der Chloridkonzentrationen der Stationen Rekingen und Koblenz am Rhein. Die mittlere Chloridkonzentration der Station Rekingen

liegt in der Zeitreihe bei 7,9 mg/l, mit einem Schwankungsbereich von 4,55-13,50 mg/l. Durch die geringe Streuung der Einzelwerte auf niedrigem Konzentrations-Niveau kann man von einer relativ konstanten Stoffkonzentration ausgehen.

Die Station Koblenz weist hingegen einen Mittelwert von 348 mg/l und eine erhebliche Schwankungsbreite (42 bis 2050 mg/l) auf. Nicht nur die höhere Belastung der Station Koblenz, sondern auch die erhebliche Schwankungsbreite auf relativ hohem Niveau ist ein Indiz für künstlich eingeleitete Chloridmengen.

Die anthropogen bedingte Zunahme der Chloridkonzentration ist auf die im Rheineinzugsgebiet vorhandenen Salzlagerstätten, die im Elsass, im Rhein-Neckargebiet und im Ruhrgebiet betrieben werden oder wurden, zurückzuführen.

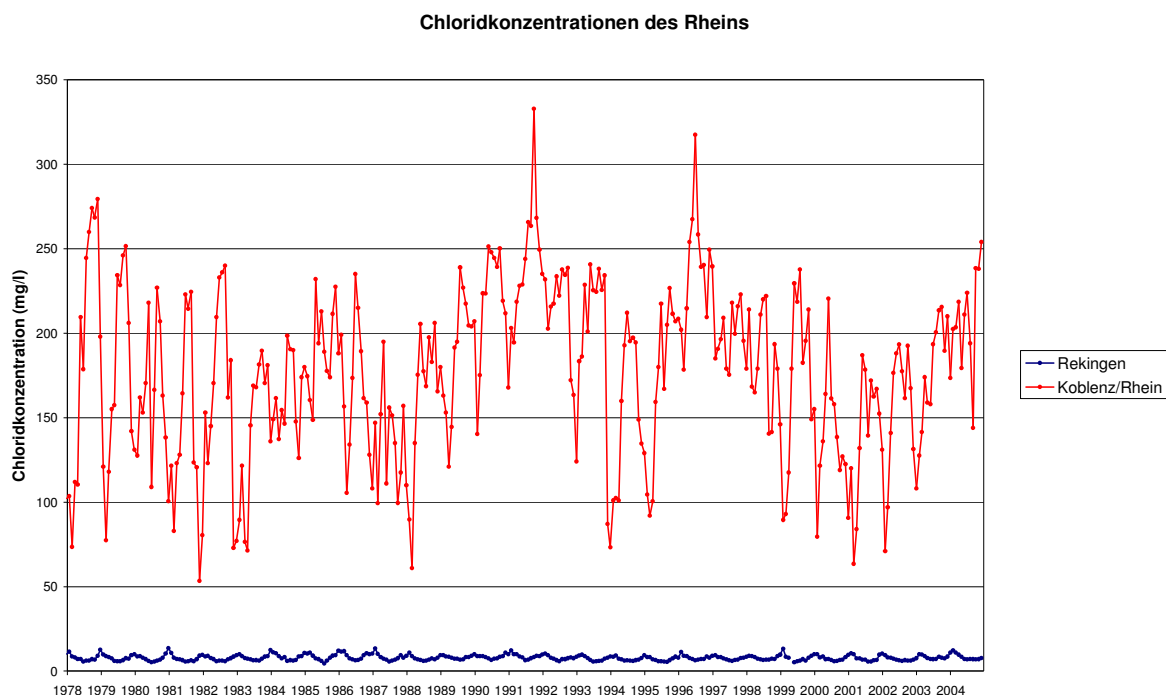


Abbildung 7.3-1: Chloridkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Durch die vereinzelt Stilllegungen und die bessere Reinigung der Abwässer der Salzlagerstätten, die in den letzten 15 Jahren erfolgten, ist der durchschnittliche Chloridgehalt im Rhein an den betreffenden Stationen wie z.B. Koblenz am Rhein zurückgegangen (siehe Abbildung A 7.3 im Anhang).

Dies zeigt auch die untenstehende Abbildung 7.3-2, die die Korrelation von Chlorid-Fracht und Abfluss wiedergibt. Im linken Teil ist die Station Rekingen dargestellt, bei der sich über einen längeren Zeitraum das Fracht-/ Abfluss-Verhältnis kaum verändert hat, im Gegensatz zu dem Fracht-/ Abfluss-Verhältnis bei Koblenz. Im rechten Teil der Abbildung sieht man

deutlich den Rückgang der Chlorid-Fracht, wenn man die Jahre 1978 und 2004 miteinander vergleicht. Eine Ausnahme macht jedoch die Station Koblenz an der Mosel, denn dort sind keine rückläufigen Konzentrationen festzustellen.

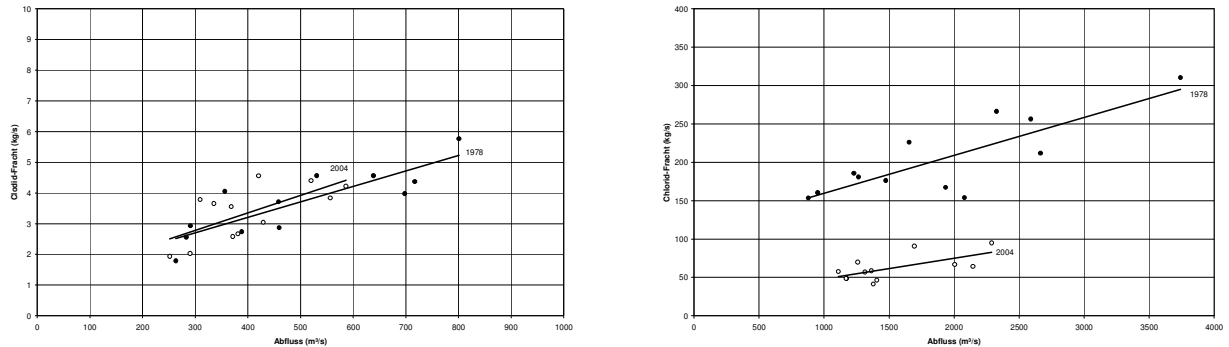


Abbildung 7.3-2: Korrelation von Chlorid-Fracht und Abfluss 1978 und 2004 bei Rekingen (links) und Koblenz/Rhein (rechts)

Die chronologische Darstellung der Chloridkonzentration zeigt eine Korrelation mit dem Abfluss bei allen Stationen. Die Abbildung 7.3-3 der Station Rekingen gibt z.B. den Verdünnungseffekt, der an allen Stationen auftritt, wieder.

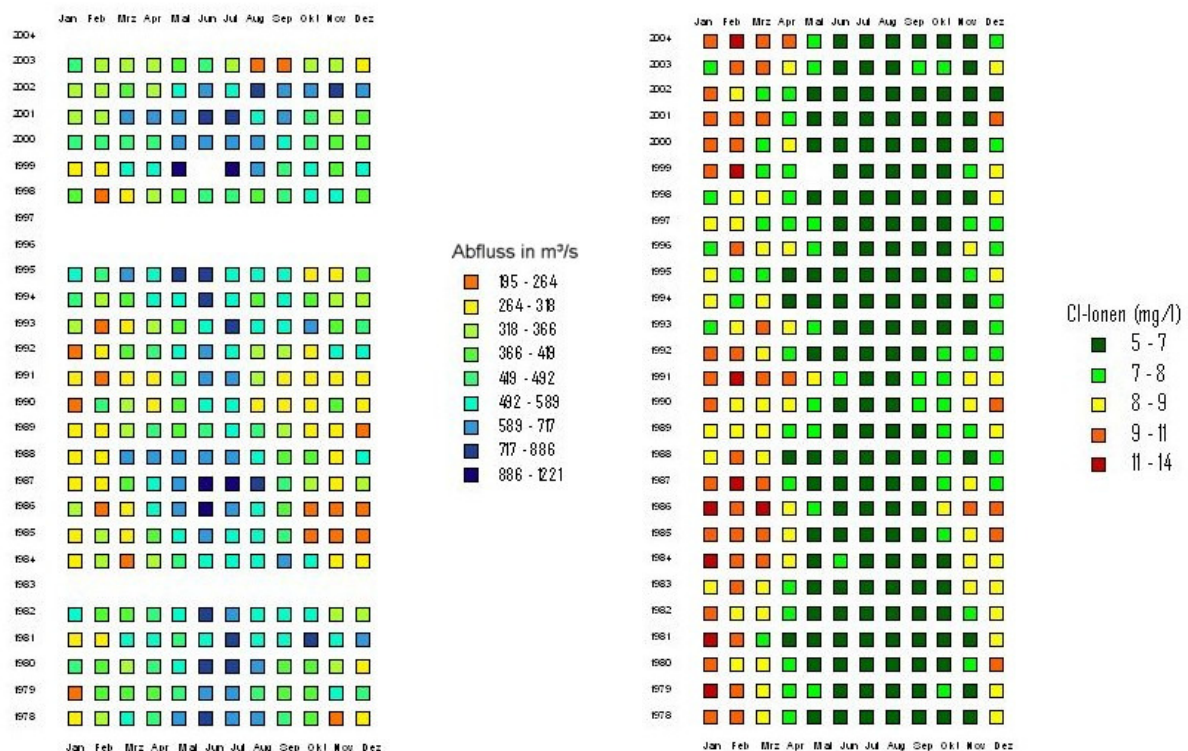


Abbildung 7.3-3: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Chloridkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)

Im rechten Teil der Graphik sind die monatlichen Mittelwerte des Abflusses dargestellt. Die niedrigsten Abflusswerte treten in den Wintermonaten November bis März auf, wobei die Chloridkonzentration in dieser Zeitspanne ihre höchsten Werte erreicht.

7.3.2 Fazit

Da man bei der Station Rekingen von einem überwiegend natürlichen Eintrag des Chlorids ausgehen kann, sind die hohen Chloridkonzentrationen im Winter eventuell ein Anzeichen für den aus dem Grundwasser stammenden Abfluss im Oberflächengewässer des Rheins. Dennoch ist es nicht auszuschließen, dass die hohen Chloridkonzentrationen aus der anthropogene Salzstreuung im Winter stammen. Unter diesen Aspekten kann Chlorid als Tracer kaum sinnvoll eingesetzt werden, da man hierfür die genauen Emissionsquellen im untersuchten EZG bekannt sein muss.

7.4 Natrium

7.4.1 Auswertung

Die Stoffe Natrium und Chlorid treten häufig zusammen auf. Das Ergebnis der Auswertung stützt die Tatsache, dass eine enge Beziehung zwischen diesen beiden Stoffen vorherrscht. Natrium legt ein ähnliches Verhalten wie Chlorid an den Tag, was die Abbildung 7.4 im Anhang verdeutlicht. Der Natriumgehalt steigt flussabwärts an, und weist den gleichen Konzentrationssprung an den Stationen Seltz / Lauterbourg auf. In der Abbildung 7.4-1 sieht man zusätzlich den Rückgang der Konzentration über die Jahre hinweg, der bei Natrium ausgeprägter als bei Chlorid ausfällt. Der Konzentrationsrückgang, der vermutlich überwiegend durch die Stilllegung der Salzlagerstätten erfolgt ist, lässt sich auch an den Werten der Station Koblenz/Mosel ablesen.

Die Abbildung 7.4-1 zeigt anhand der Stationen Rekingen und Koblenz den anthropogenen Einfluss auf die Natrium-Emissionen im Rhein. Die Kurve der Natriumkonzentration an der Station Rekingen hat einen Mittelwert von 6,68 mg/l, wobei der niedrigste Wert bei 4,1 mg/l und der höchste Wert bei 9,75 mg/l liegen. Durch die geringen Schwankungen und den niedrigen Mittelwert kann man von einem konstanten Eintrag des Natriums ausgehen, der zum größten Teil auf natürlichem Weg in den Rhein gelangt. Die mittlere Natriumkonzentration bei Koblenz liegt um ein 10-faches höher und zwar bei 61,43 mg/l. Die

relativ große Schwankungsbreite von 14 bis 160,6 mg/l belegt den anthropogenen Eintrag von Natrium in den Rhein.

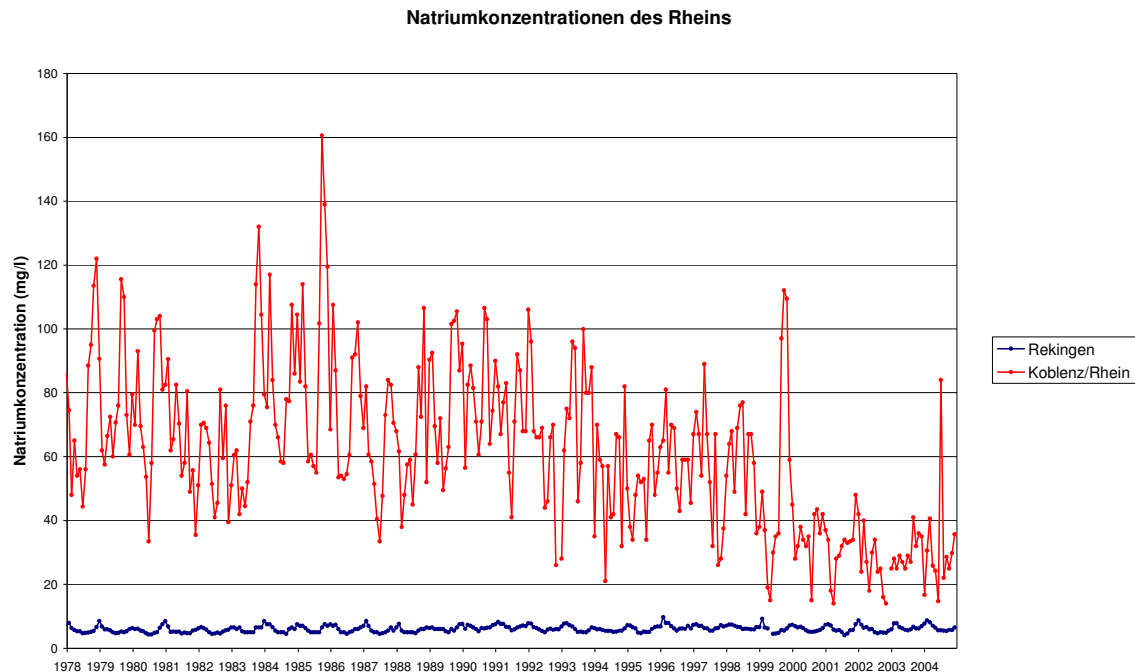


Abbildung 7.4-1: Natriumkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Des Weiteren sieht man auch den deutlichen Rückgang der Natriumkonzentration an der Station Koblenz seit 1993. Dieser wird auch durch die Korrelation der Natrium-Fracht zum Abfluss belegt (siehe Abbildung 7.4-2). Bei Koblenz weist der Rhein im Jahr 2004 eine deutlich geringere Natrium-Fracht auf als im Jahr 1978.

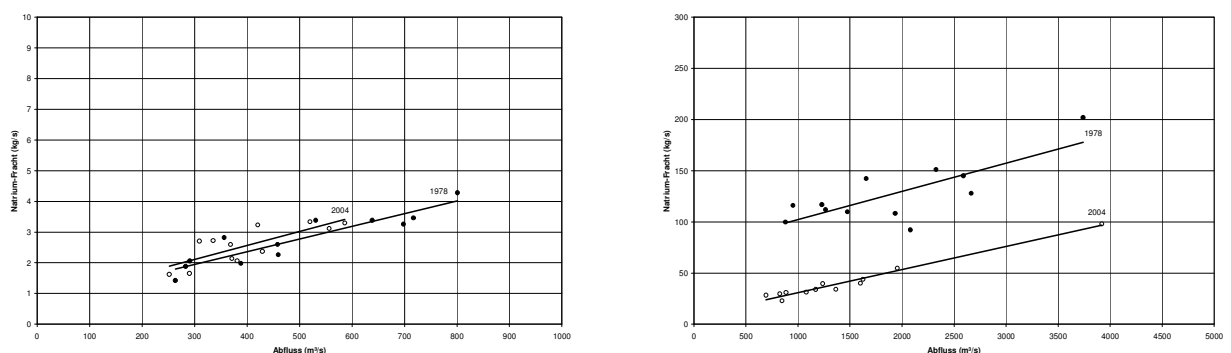


Abbildung 7.4-2: Korrelation von Natrium-Fracht und Abfluss 1978 und 2004 bei Rekingen (links) und Koblenz/Rhein (rechts)

Der oben beschriebene Verdünnungseffekt tritt auch bei Natrium ein (siehe Abbildung 7.4-3). Die Station Weil am Rhein zeigt in den Sommermonaten einen höheren Abfluss und dadurch eine geringere Natriumkonzentration. Im Jahr 2002 in dem der Abfluss auch im Winter einen überdurchschnittlich hohen Wert aufweist (MQ: 1102 m³/s in der Periode 1995-2004), liegt die Natriumkonzentration zwischen 4-7 mg/l und somit deutlich unter dem durchschnittlichen Wert von 8,6 mg/l. Dies ist ein Indiz für die Korrelation der Natriumkonzentration mit dem Abfluss.

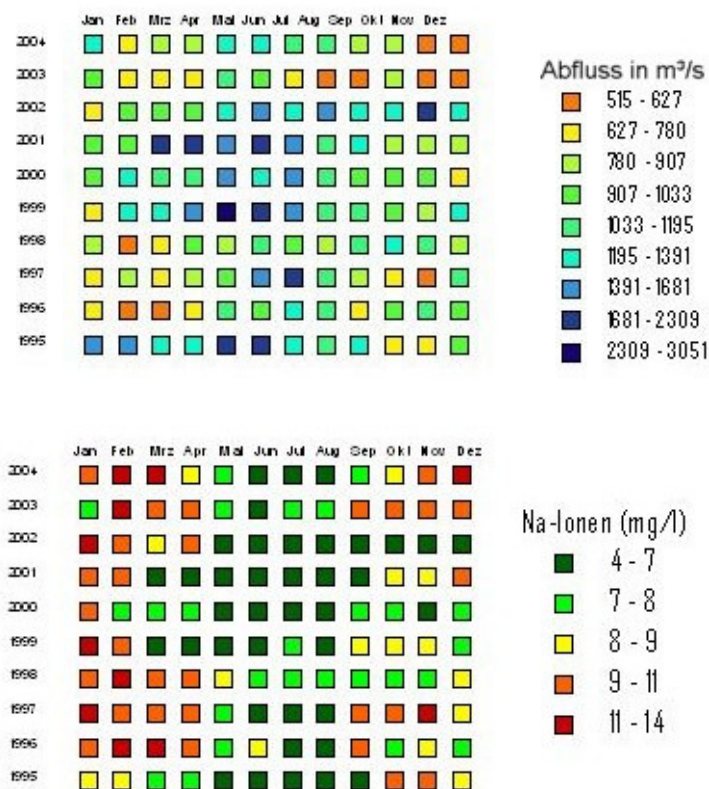


Abbildung 7.4-3: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Natriumkonzentration an der Messstelle Weil am Rhein (1995-2004)

7.4.2 Fazit

An den Messstellen Rekingen, Village-Neuf und Weil am Rhein wird der Natriumeintrag nicht von den Salzlagerstätten anthropogen beeinflusst, wodurch die Korrelation von Natrium-Fracht und Abfluss über die Jahre hinweg relativ konstant bleibt. Die hohen Natriumkonzentrationen im Winter können eventuell als Indiz für den aus dem Grundwasser stammenden Oberflächenabfluss angesehen werden. Allerdings wäre es auch möglich dass die Natrium-Emissionen durch die anthropogene Salzstreuung im Winter hervorgerufen werden.

Die geringen Werte im Sommer können mit dem überwiegend aus der Schneeschmelze stammenden Oberflächenabfluss und der daraus folgenden Verdünnung der Konzentration im Rheineinzugsgebiet erklärt werden.

Der Wasserqualitätsparameter Natrium kann somit unter der Vorraussetzung, dass genaue Angaben über die Emissionsquellen vorliegen, als hydrologischen Tracer eingesetzt werden.

7.5 Kalium

7.5.1 Auswertung

An den Stationen Seltz / Lauterbourg sieht man beim Untersuchungsparameter Kalium eine deutliche Konzentrationszunahme. Bei der Station Lauterbourg (1993-2004) ist über die Jahre hinweg eine geringere Konzentrationsabnahme erkennbar, die vermutlich aus dem Rückgang des Kalibergbaus im Elsass herrührt.

Die Abbildung 7.5-1 verdeutlicht anhand der Konzentrationskurven der Messstationen Rekingen und Koblenz/Rhein den zunehmenden anthropogenen Einfluss der Kaliumemissionen in den Rhein während der Zeitreihe 1978-2004.

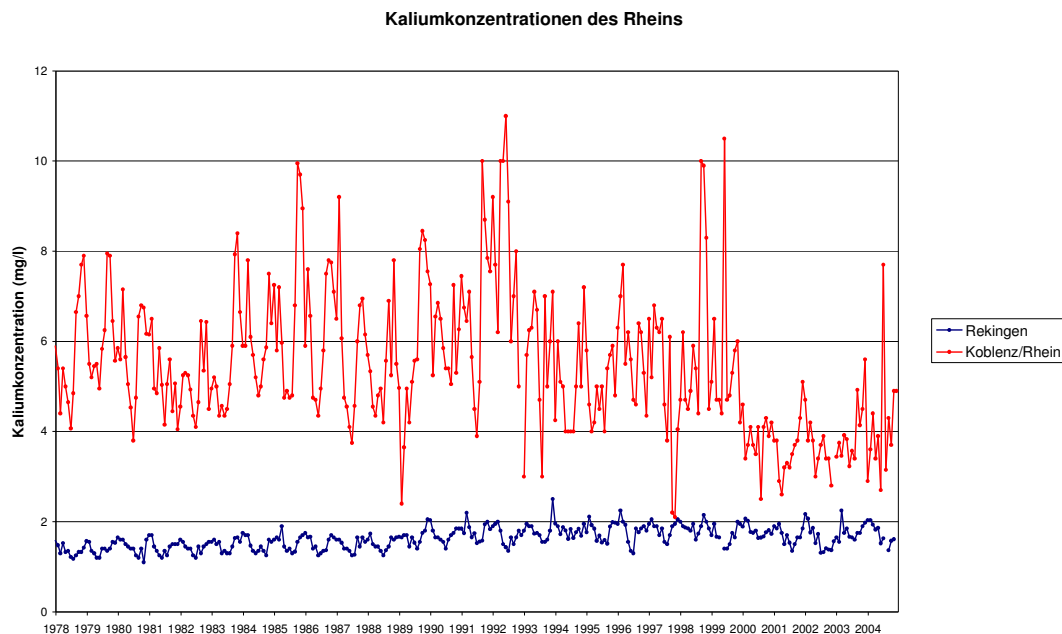


Abbildung 7.5-1: Kaliumkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Der Kurvenverlauf der Station Koblenz weist mit 2,1 bis 11,0 mg/l eine deutlich höhere Schwankungsbreite auf, als die Kaliumkonzentrationskurve bei Rekingen mit Werten von 1,1 bis 2,5 mg/l. Bei Koblenz beträgt der Konzentrationsmittelwert 6,44 mg/l. Die mittlere

Kaliumkonzentration von 1,63 mg/l und die geringe Schwankungsbreite sind Anzeichen für den überwiegend natürlichen Eintrag von Kalium in den Hochrhein bei Rekingen. Kalium zeigt somit bei der Auswertung der Jahresmittelwerte (siehe Abbildung A 7.5 im Anhang) ein ähnliches Verhalten wie Chlorid und Natrium. Die Stoffkonzentration von Kalium steigt flussabwärts an und die Messstation Konstanz an der Mosel hat die höchsten Werte. Der Grund hierfür kann einerseits die verstärkte Kalidüngung in der französischen Landwirtschaft, andererseits aber u.a. auch der Kalibergbau im Rhein-Neckargebiet sein.

Wie zuvor schon erwähnt steht Kalium mit Chlorid und Natrium in enger Beziehung. Die Abbildung 7.5-2 stellt die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Kaliumkonzentration bei Weil am Rhein dar. Die Konzentration von Kalium ist in den Wintermonaten am höchsten und der Abfluss, der glazial geprägt ist, weist in den Wintermonaten die niedrigsten Werte auf. Somit zeigt auch die Kaliumkonzentration eine Verdünnung. Verdeutlicht wird dies im Jahr 2002, wo mit 2145 m³/s ein deutlich höherer monatlicher Abflusswert im Monat November gemessen wurde. Dadurch weist die Kaliumkonzentration im November monatliche Mittelwerte von 1,4 mg/l auf.

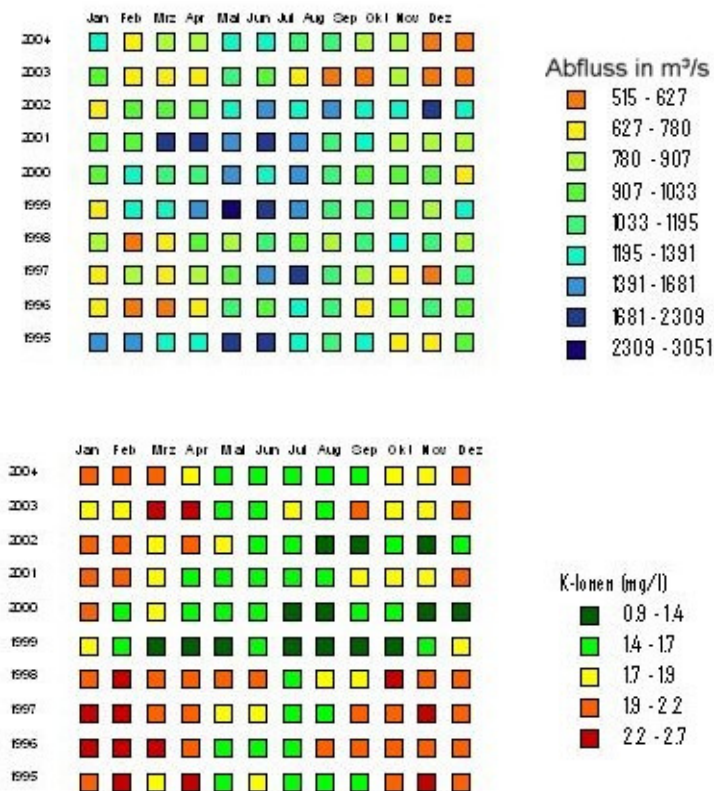


Abbildung 7.5-2: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Kaliumkonzentration an der Messstelle Weil am Rhein (1995-2004)

Die niedrigste Kaliumkonzentration wurde bei der Station Weil am Rhein im Mai 1999 während der Zeitreihe 1995-2004 gemessen. Die Kaliumkonzentration betrug damals 0,9 mg/l. Gleichzeitig wurde in diesem Monat der höchste mittlere Abflusswert von 3051 m³/s aufgezeichnet.

7.5.2 Fazit

Aufgrund des Verdünnungseffekts könnten die höhere Abflusswert im November 2002 und die damit verbundene geringe Kaliumkonzentration bei Weil am Rhein, auf ein besonderes Niederschlagsereignis zurückzuführen sein. Dies würde bedeuten, dass sich Kalium genauso wie Chlorid und Nitrat verhält.

Der Rhein zeigt in den Sommermonaten geringe Konzentrationen, da der Abfluss überwiegend durch die Schneeschmelze in den Alpen gebildet wird. In den Wintermonaten in denen der Abfluss zum größten Teil aus dem Grundwasser stammt, weist der Rhein somit auch höhere Kalium-Konzentrationen auf. Jedoch darf auch hier der Kalium-Eintrag in den Rhein durch die winterliche Salzstreuung im EZG nicht vernachlässigt werden. Dies könnte die erhöhten Konzentrationswerte ebenfalls begründen.

7.6 Sulfat

7.6.1 Auswertung

Die Abbildung A 7.6 im Anhang zeigt die mittleren jährlichen Sulfatkonzentrationen an den acht Messstellen an Rhein und Mosel. Wie erwartet nehmen die Sulfatkonzentrationen flussabwärts zu, wobei die Konzentrationswerte an der Station Koblenz / Mosel besonders hoch sind.

Die Sulfatkonzentration liegt nach HELLMANN (1986) im Allgemeinen in Oberflächengewässern zwischen 10 und 30 mg/l. Die Sulfat-Konzentrationskurven der Stationen Rekingen / Rhein und Koblenz / Mosel sind in Abbildung 7.6-1 dargestellt.

In der ausgewerteten Zeitreihe liegt der mittlere Sulfatgehalt bei der Station Rekingen bei 30 mg/l und zeigt einen relativ kleinen Schwankungsbereich von 24 bis 40 mg/l. Der Wert von 35 mg/l wird nur in den Wintermonaten November und Dezember 1987 überschritten.

Daher kann man davon ausgehen, dass der Sulfatgehalt an der Station Rekingen überwiegend aus natürlichen Quellen, u.a. der Gesteinsverwitterung, stammt.

Anders jedoch verhält sich die Sulfatkonzentration an der Messstelle Koblenz/Rhein. Dort beträgt der Mittelwerte 55,96 mg/l und der Schwankungsbereich ist deutlich größer, denn er liegt bei 26,0-100,5 mg/l. Dies deutet auf einen anthropogenen Sulfateintrag in das Gewässer hin, der vermutlich überwiegend aus industriellen Abwässern oder aus der Abschwemmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen stammt.

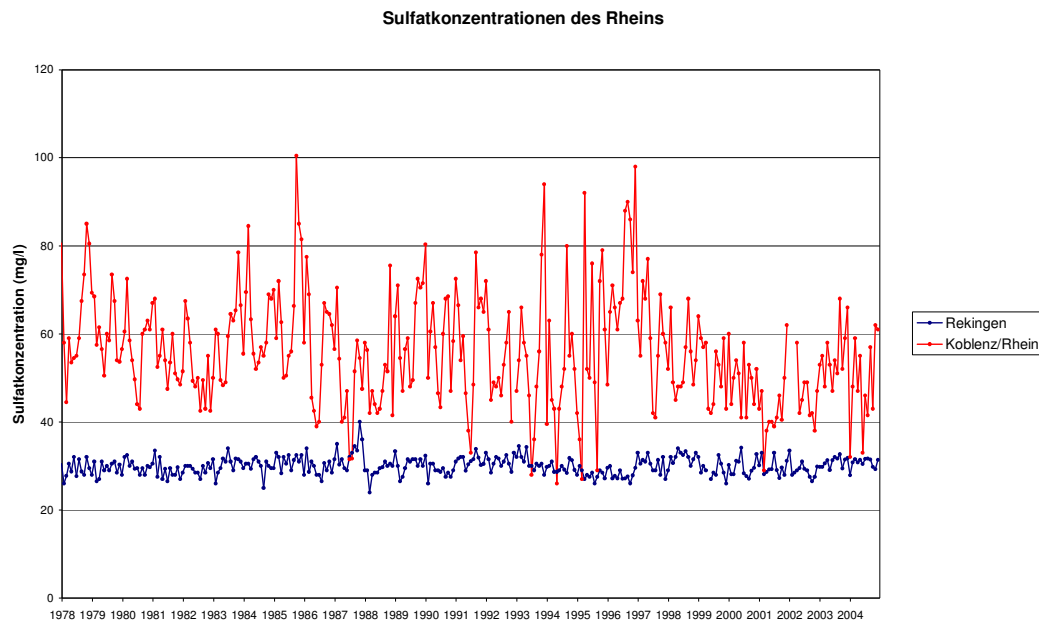


Abbildung 7.6-1: Sulfatkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Die Auswertung der monatlichen Mittelwerte des Sulfats hat keine Abhängigkeit zum Abfluss ergeben. Die Abbildung 7.6-2 zeigt dies am Beispiel der Station Rekingen. Die Monatsmittelwerte des Abfluss zeigen deutlich den glazialen Einfluss durch die hohen Abflusswerte im Sommer. Bei den SO_4 -Konzentrationen kann man weder eine Korrelation zum Abfluss noch einen jahreszeitlichen Trend erkennen.

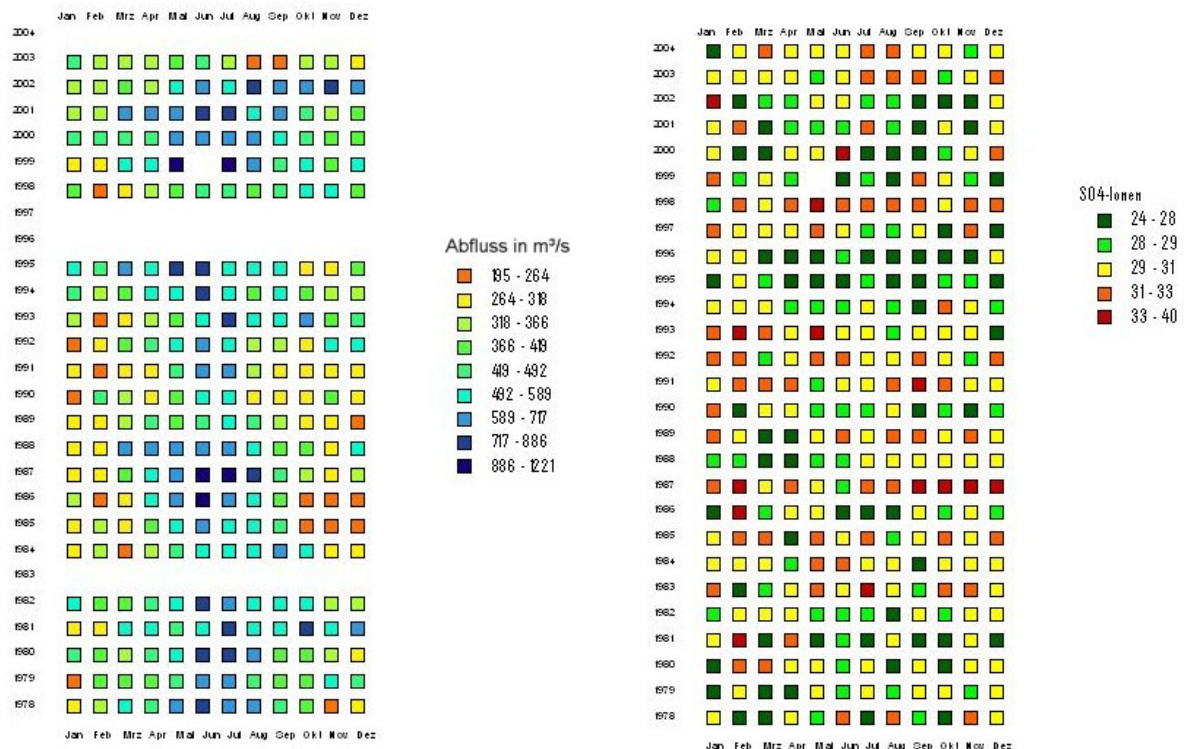


Abbildung 7.6-2: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Sulfatkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)

An der Messstation Koblenz/Mosel kann man jedoch einen jahreszeitlichen Trend und eine Korrelation zum Abfluss erkennen. Die Abbildung 7.6-3 zeigt höhere Sulfatkonzentrationen im Spätsommer, zu der Zeit in der auch niedrigere Abflusswerte durch den Einfluss des Mittelgebirges messbar sind.

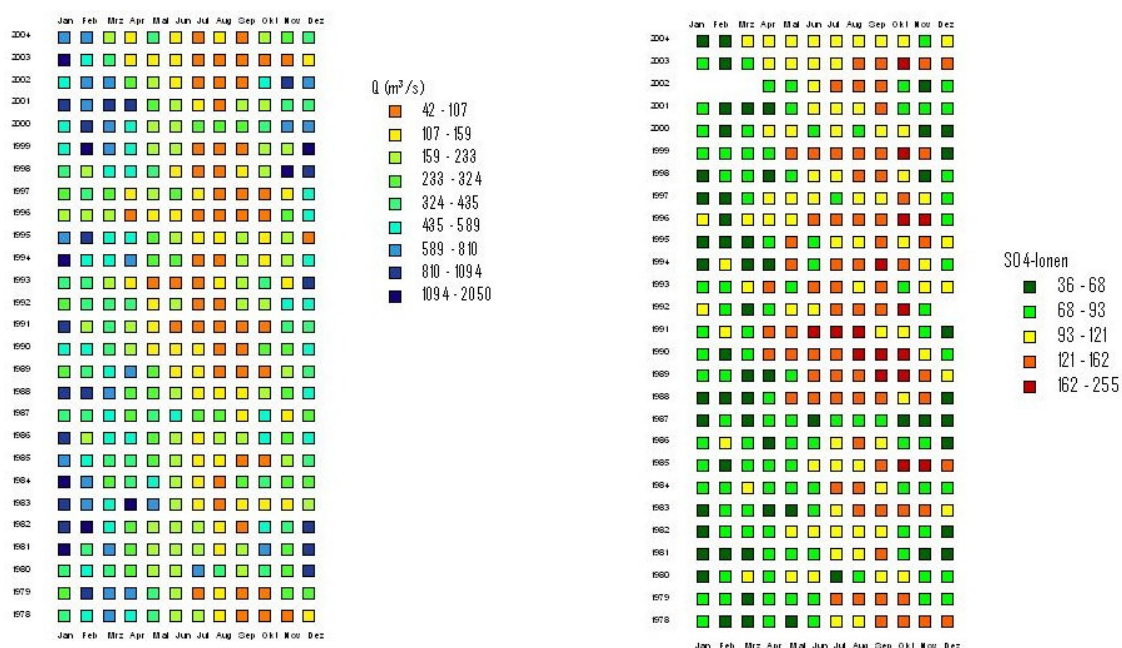


Abbildung 7.6-3: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Sulfatkonzentration an der Messstelle Koblenz/Mosel (1978-2004)

Die Mosel hat beim Untersuchungsparameter Sulfat während der untersuchten Zeitreihe einen Konzentrationsmittelwert von 100 mg/l, der somit über dreimal so hoch ist wie bei der Station Rekingen. Zudem liegen die Konzentrationen im Bereich von 36-255 mg/l, was bedeutet, dass die höchsten Werte einen 2,5-fach höheren Wert als der Mittelwert aufweisen. Das deutet darauf hin, dass das Sulfat überwiegend aus anthropogenen Quellen stammt.

7.6.2 Fazit

Da die Sulfat-Konzentrationen an der Messstelle Rekingen keine Korrelation zum Abfluss aufweisen, ist aus hydrologischer Sicht der Einsatz von Sulfat am Rhein als Tracer nicht sinnvoll. Wenn man sich im Gegensatz dazu die SO_4 -Konzentrationen in der Mosel anschaut kann man einen Zusammenhag mit dem Abfluss erkennen. Wenn man davon ausgeht, dass der größte Teil der Emission im Moseleinzugsgebiet durch die Ausbringung sulfatreicher Düngemittel auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen stammt, zeigt die hohe Sulfatkonzentration im Sommer die Zeit an in der die landwirtschaftlichen Flächen intensiv genutzt werden. Ein Teil der Düngemittel gelangt dabei über den Zwischenabfluss oder den Grundwasserabfluss in die Oberflächengewässer.

7.7 Kieselsäure-Silizium

7.7.1 Auswertung

Für die Auswertung von Kieselsäure-Silizium standen Daten von den Messstellen Rekingen, Village-Neuf, Weil am Rhein, Seltz, Koblenz/Rhein, Bimmen und Koblenz/Mosel in der Zeitreihe von 1991-2000 zur Verfügung.

Wie man in der Abbildung A 7.7 im Anhang erkennen kann, nehmen die Kieselsäure-Silizium-Konzentrationen flussabwärts minimal zu. Die Abbildung 7.7-1 zeigt die Messwerte der Stationen Rekingen und Koblenz/Rhein. Sie veranschaulicht die flussabwärts festzustellende geringe Konzentrationserhöhung. Während die Messstelle Rekingen einen Mittelwert von 1,11 mg/l aufweist, beträgt der Mittelwert bei der Station Koblenz/Rhein 1,88 mg/l. Die Schwankungsbereiche liegen bei Rekingen zwischen 0,32 mg/l und 2,00 mg/l und an der Station Koblenz zwischen 0,21mg/l und 3,20 mg/l.

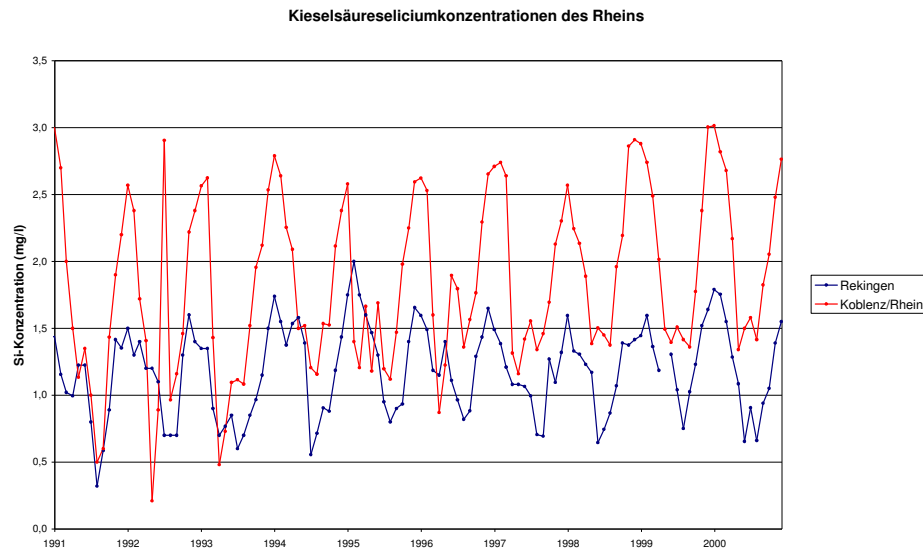


Abbildung 7.7-1: Kieselsäure-Silizium-Konzentration bei Rekingen und Koblenz (1991-2000)

Diese relativ kleinen Schwankungsbereiche und die minimale Konzentrationserhöhung von Kieselsäure-Silizium sind ein Indiz dafür, dass die Stoffquelle überwiegend natürlichen Ursprungs ist. Kieselsäure-Silizium gelangt vermutlich v.a. aufgrund der Verwitterung von silicatreichem Gestein in die Gewässer. Auffallend ist auch der ähnliche Kurvenverlauf der Konzentration an den zwei Messstellen. Das jährliche Konzentrationsmaximum fällt bei beiden Kurven auf die Wintermonate, wobei der Wert vom Juli 1992 eine Ausnahme darstellt. Der Grund für das Auftreten des Konzentrationsmaximums im Sommer 1992 kann allerdings als „Ausreißer“ vernachlässigt werden.

Diesen jahreszeitlichen Trend kann man auch mit Hilfe der Abbildung 7.7-2 feststellen. Die Abbildung gibt die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Kieselsäure-Silizium-Konzentration der Messstelle Koblenz am Rhein wieder.

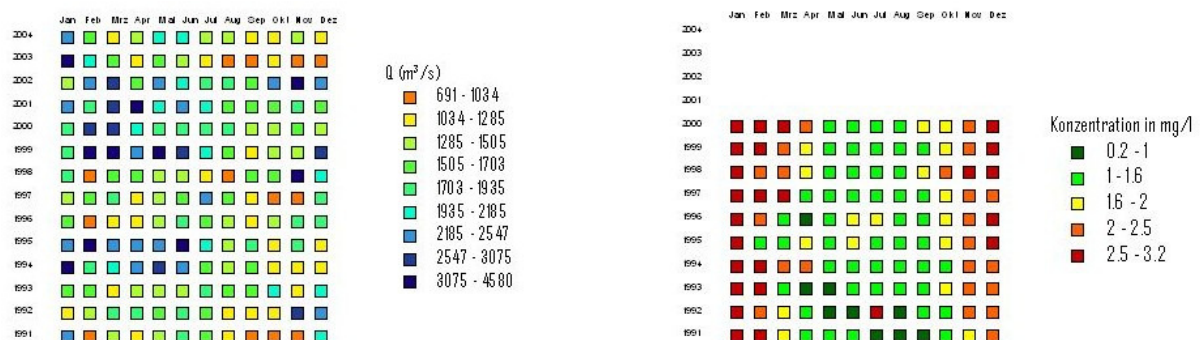


Abbildung 7.7-2: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Kieselsäure-Silizium-Konzentration an der Messstelle Koblenz/Rhein (1991-2004)

7.7.2 Fazit

Die Ergebnisse zeigen dass Kieselsäure-Silizium im Rhein-EZG überwiegend durch die Verwitterung in die Fließgewässer gelangt und kaum anthropogen eingetragen wird. Das weist darauf hin, dass Kieselsäure-Silizium zur Anwendung in der Tracerhydrologie sinnvoll wäre, um den Herkunftsraum des Wassers zu bestimmen. Beim Auftreten von hohen Kieselsäure-Silizium-Konzentrationen, wie hier im Winter, kann man davon ausgehen, dass das Wasser zuvor im Kontakt mit der Erdkruste stand und dadurch überwiegend aus dem Grundwasser stammt. Jedoch sind aber auch hier weitere Untersuchungen nötig, da im Rahmen dieser Arbeit nicht auf die im Gewässer ablaufenden chemischen Reaktionen eingegangen wurde.

7.8 Calcium

7.8.1 Auswertung

Die Auswertung der Calciumkonzentrationen an den einzelnen Messstellen hat eine Zunahme des Calciumgehaltes flussabwärts ergeben (siehe Abbildung A 7.8 im Anhang). Jedoch ist die Konzentrationszunahme mit den Mittelwerten von 50,17 mg/l an der Station Rekingen zu 68,2 mg/l an der Station Koblenz/Rhein relativ gering. Die unten stehende Abbildung 7.8-1 zeigt die Calcium-Konzentrationskurven der beiden Messstationen während 1978-2004.

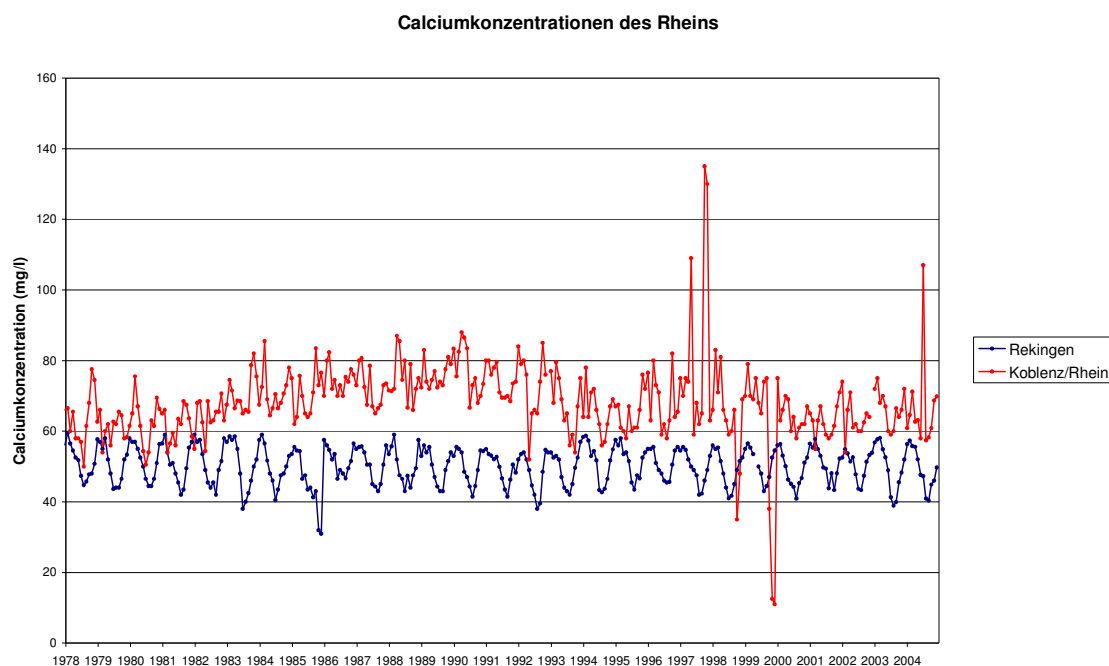


Abbildung 7.8-1: Calciumkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Die Kurve der Messungen an der Station Koblenz weist mehrere Extremwerte im maximalen sowie im minimalen Bereich auf. Diese Unterschiede sind vermutlich auf einen anthropogenen Eintrag zurückzuführen. Die Messstelle Rekingen zeigt einen kontinuierlichen Verlauf der Calciumkonzentration mit niedrigen Werten im Sommer und hohen Werten im Winter.

Dies gibt auch die Abbildung 7.8-2 wieder, in der der Konzentrationsgehalt der Station mit dem Abfluss verglichen wird. Auffallend ist die geringe Calciumkonzentration in den Monaten Juli, August und September in denen das Flusswasser hauptsächlich aus der Gletscherschmelze stammt.

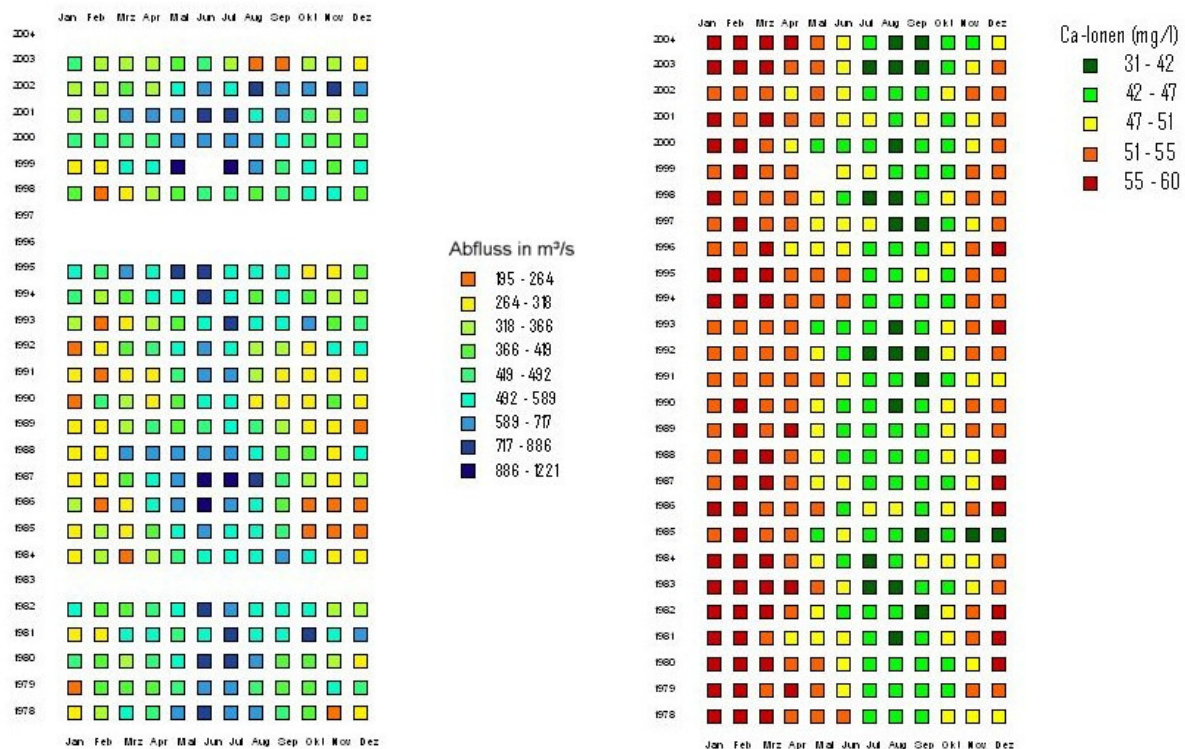


Abbildung 7.8-2: Monatsliche Mittelwerte des Abflusses und der Calciumkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)

Um dieses Ergebnis eingehend zu untersuchen wurden weitere Daten von der Messstation bei Diepoldsau ausgewertet. Die Daten stammen von dem Projekt NADUF. Die Messwerte der NADUF werden wie die Messwerte der IKSr im Internet der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Die Abbildung 7.8-3 zeigt die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Calciumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau von 1978-2004. Die Auswertung der Station Diepoldsau belegt die Aussage, dass die geringen Calciumkonzentrationen den Abfluss aus der Gletscherschmelze wiedergeben. Die geringsten Konzentrationen des

Calciums treten in den Monaten Juni-Juli zeitgleich mit den höchsten monatlichen Mittelwerte des Abflusses auf.

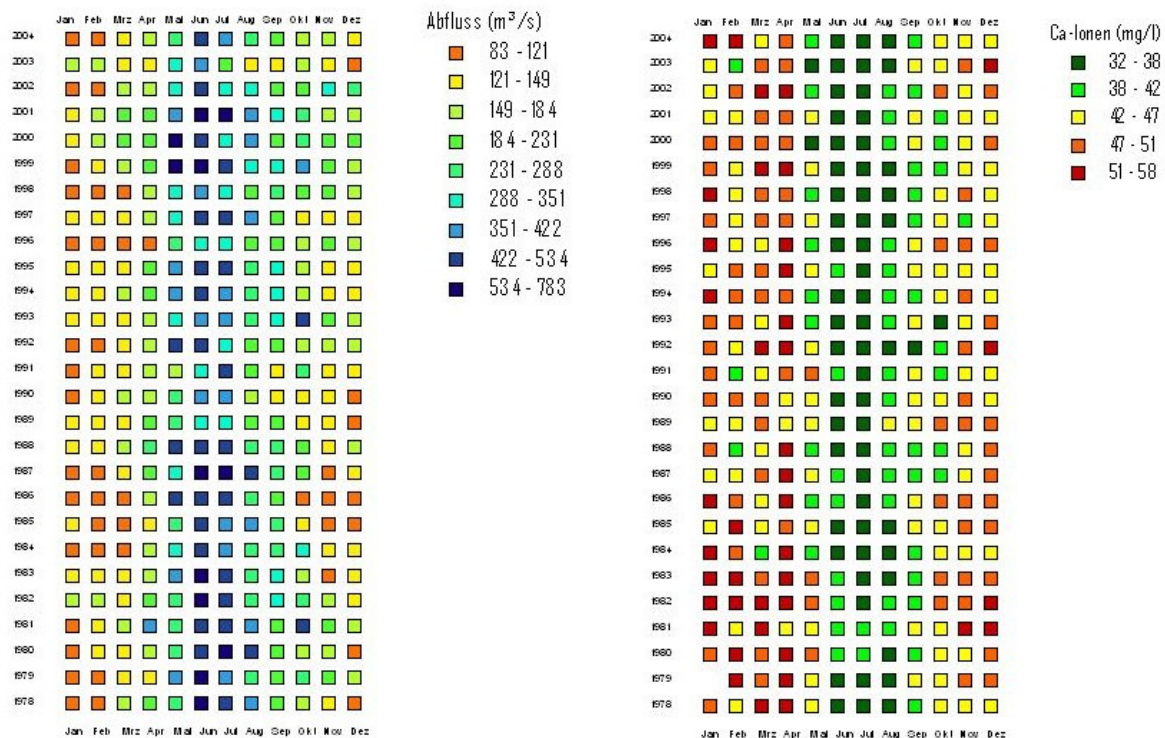


Abbildung 7.8-3: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Calciumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau (1978-2004)

7.8.2 Fazit

Die Ergebnisse bestätigen, dass der Abfluss in den Sommermonaten überwiegend aus den abschmelzenden Gletschern der Alpen besteht. Diese Aussage macht den Einsatz von Calcium als hydrologischen Tracer im Einzugsgebiet des Rheins sinnvoll. Zusätzlich sollten aber auch weitere Untersuchungen gemacht werden, da hier die Extremwerte im maximalen sowie im minimalen Bereich der Station Koblenz nicht erklärt werden konnten. Dafür müssen vermutlich weitere Untersuchungen in einem Einzugsgebiet in dem die ablaufenden hydrologischen Prozesse weiträumig bekannt und die Emissionsquellen detaillierter erfasst werden können, erfolgen.

7.9 Magnesium

7.9.1 Auswertung

In der Darstellung der mittleren jährlichen Magnesium-Konzentrationen ist nur ein sehr geringer Anstieg der Magnesiumkonzentration an den einzelnen Messstationen festzustellen (siehe Abbildung A 7.9 im Anhang). Bei der Betrachtung der Mittelwerte über die Zeitreihe 1978-2004 fällt der erhöhte Magnesiumgehalt an der Messstelle Rekingen auf (9,35 mg/l). Die Messstelle Village-Neuf / Weil am Rhein weist im Vergleich dazu einen Messwert von nur 7,46 mg/l auf. Aufgrund der insgesamt niedrigen Messwerte an den verschiedenen Rheinmessstationen kann man davon ausgehen, dass die Magnesiumeinträge in den Rhein überwiegend aus natürlichen Quellen stammen.

Bei der Auswertung zur Herkunftsraumbestimmung kann der Quotient der molaren Konzentration $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ aufschlussreich sein. Bei überwiegend natürlichem Stoffeintrag liegt dieser häufig zwischen etwa 0,1 und 0,4.

Die Auswertung des Quotienten der molaren Konzentration $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$, der an den einzelnen Messstationen berechnet wurde, liegt durchschnittlich im Bereich zwischen 0,22 und 0,31 und belegt somit die Aussage.

Die Abbildung 7.9-1 gibt die Konzentrationskurven von Magnesium an den Stationen Rekingen und Koblenz/Rhein wieder. Die Mittelwerte von Rekingen mit 9,35 mg/l und Koblenz mit 10,52 mg/l unterscheiden sich kaum, jedoch ist der Schwankungsbereich bei Koblenz mit 2,0 mg/l bis 20,1 mg/l viel größer.

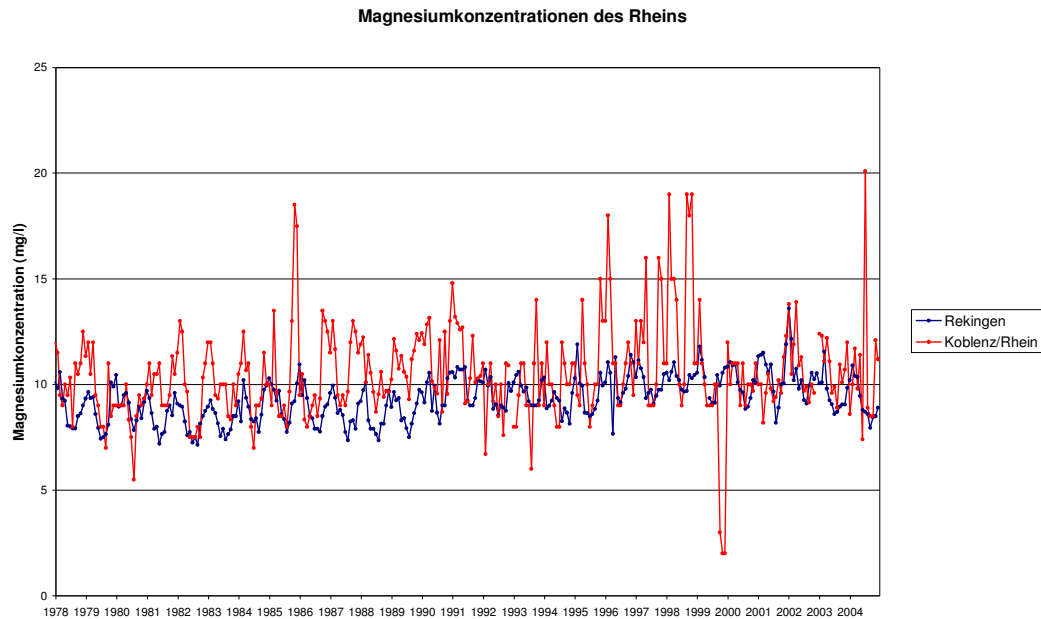


Abbildung 7.9-1: Magnesiumkonzentration bei Rekingen und Koblenz in der Zeitreihe 1978-2004

Die Konzentrationskurve von Magnesium hat einen ähnlichen Verlauf wie die der Calciumkonzentration an der Messstelle Rekingen. Dies zeigt auch die Abbildung 7.9-2. Die höchsten Werte treten im Winter auf, wobei der Maximalwert von 13,6 mg/l im Januar 2002 gemessen wurde. Die niedrigsten Werte wurden in den Sommermonaten Juli, August und September gemessen, wobei der Minimalwert von 7,15 mg/l im September 1982 auftrat. Dies deutet darauf hin, dass der Rhein in diesen Monaten hauptsächlich aus den Schmelzwässern der Gletscher in den Alpen gespeist wird.

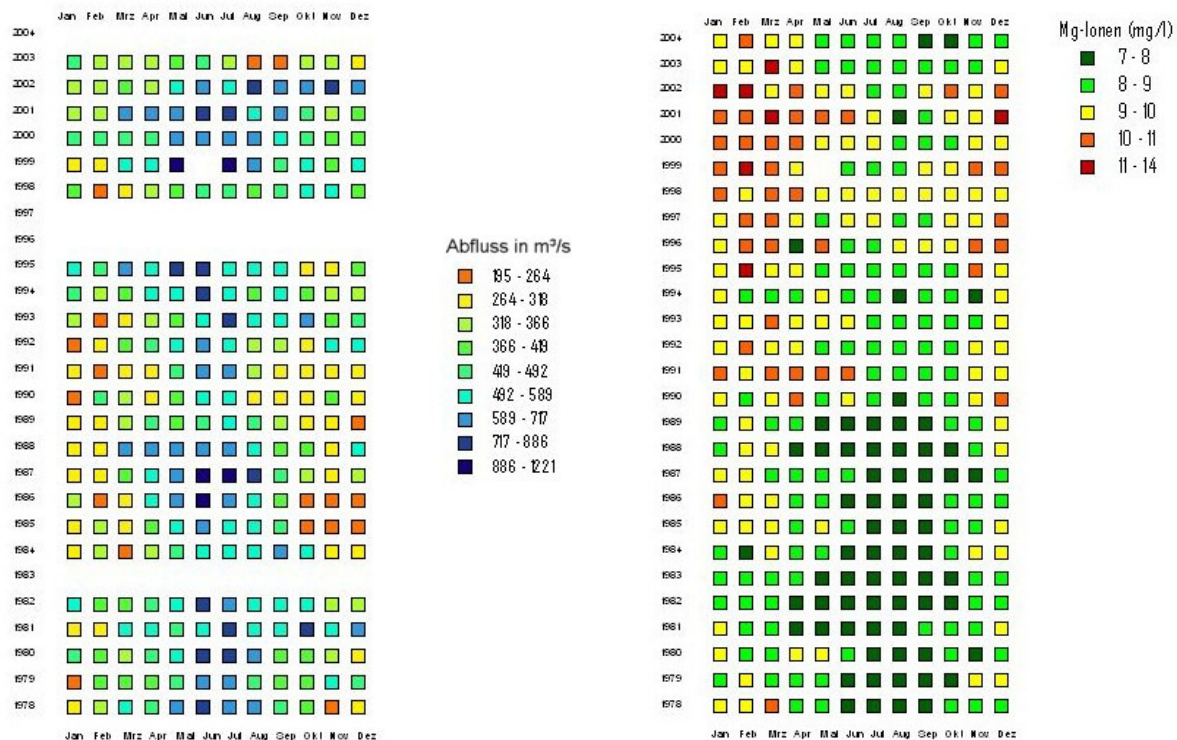


Abbildung 7.9-2: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Magnesiumkonzentration an der Messstelle Rekingen (1978-2004)

Um diese Aussage zu bestätigen wurden zusätzlich die Daten der Messstation Diepoldsau, die aus dem NADUF-Programm stammen, ausgewertet. Da man bei der Messstelle Diepoldsau aufgrund ihrer Lage (siehe Abbildung A 5.2 im Anhang) davon ausgehen kann, dass sie im Vergleich zu den anderen Messstation weit weniger anthropogen beeinflusst ist, müsste sie den natürlichen Magnesium-Konzentrationsgehalt des Rheins besser wiedergeben. Die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Magnesiumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau im Zeitraum 1978 bis 2004 zeigen die Korrelation der Mg-Konzentration mit dem Abfluss (siehe Abbildung 7.9-3).

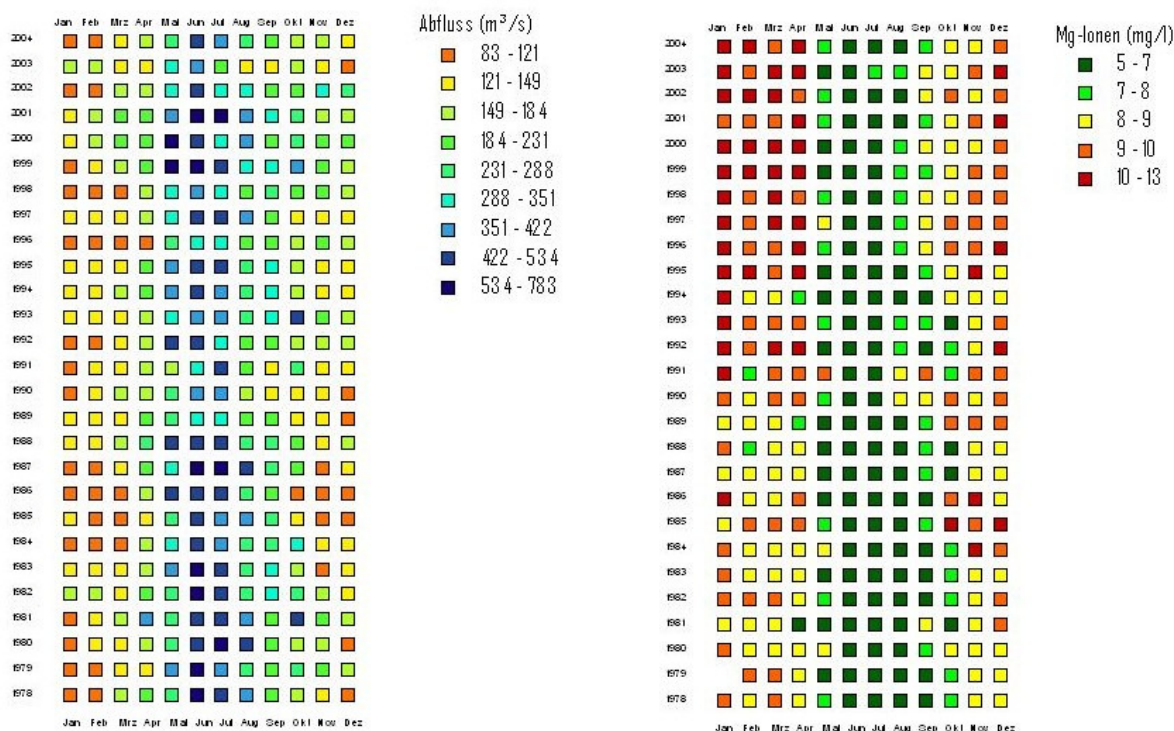


Abbildung 7.9-3: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Magnesiumkonzentration an der Messstelle Diepoldsau (1978-2004)

7.9.2 Fazit

Der Gehalt der Magnesium-Konzentration verhält sich ähnlich wie der der Calcium-Konzentration. In den Monaten Juni und Juli in denen die Abflusswerte deutlich höher sind und der Abfluss hauptsächlich durch die Gletscherschmelze gebildet wird, weisen die Werte der Magnesiumkonzentration ein deutliches Minimum auf. Dies belegt wiederum das Ergebnis, dass im Sommer die Hauptkomponente des Rheinabflusses aus Gletscherwasser besteht.

7.10 Atrazin

7.10.1 Auswertung

Für die Auswertung von Atrazin ($C_8H_{14}ClN_5$) stehen Daten aus der Zeitreihe 1990-2004 zur Verfügung. Die Abbildung A 7.10 zeigt die jährlichen Atrazin-Konzentrationen an den einzelnen Messstellen im Rheineinzugsgebiet. Die jährlichen Mittelwerte schwanken in einem Bereich von 0,01-0,26 $\mu\text{g/l}$. Die Stationen Rekingen und Koblenz an der Mosel weisen jährliche Mittelwerte auf, die den für Atrazin von der Europäischen Gemeinschaft zum Schutz der Trinkwasserversorgung festgelegten Höchstwert von 0,1 $\mu\text{g/l}$ überschreiten.

Die Auswertungen der monatlichen mittleren Atrazin-Konzentration weisen an allen Stationen keine Korrelation zum Abfluss auf.

Die Station an der Mosel weist die höchsten Atrazin-Konzentrationen auf. In der Abbildung 7.10-1 sind die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Stoffkonzentration dargestellt. Sie zeigt deutlich die höchsten Konzentrationswerte im Sommer, in den Monaten Juni und Juli, in denen die landwirtschaftliche Produktion am höchsten ist. Auffällig ist auch die Konzentrationsabnahme über die Jahre hinweg. Dies deutet darauf hin, dass das Anwendungsverbot für Atrazin, das 1992 aufgestellt wurde, seine Wirkung zeigt.

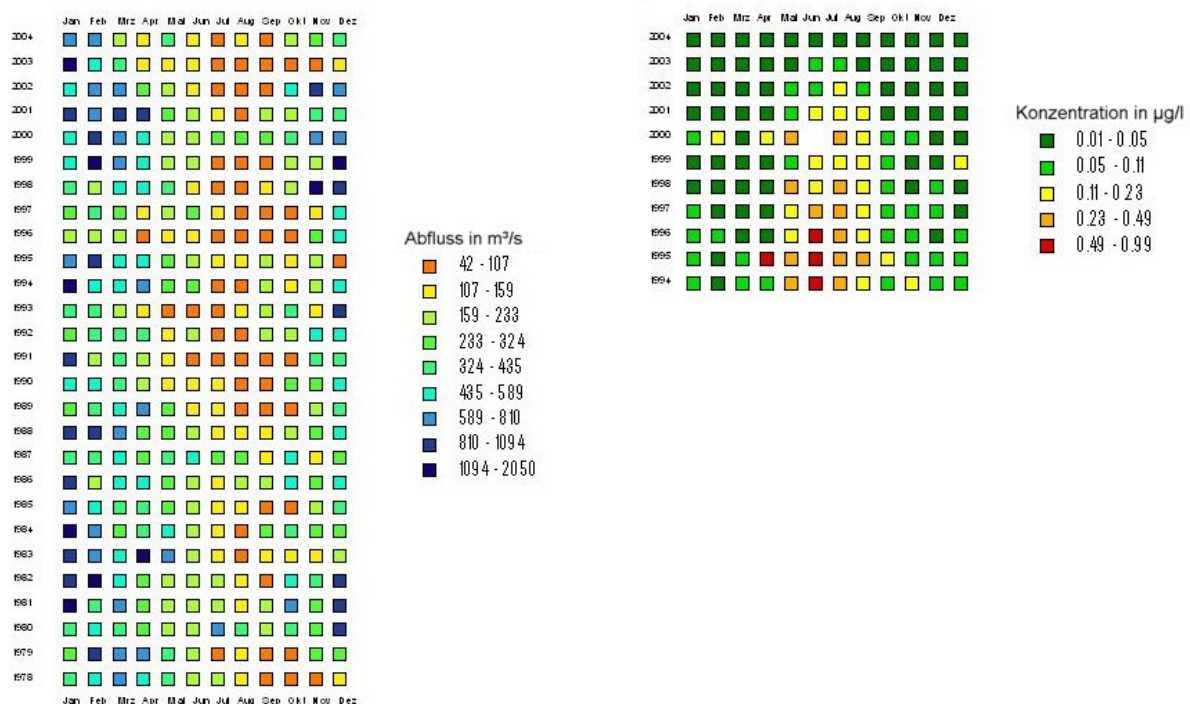


Abbildung 7.10-1: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Atrazin-Konzentration an der Messstelle Koblenz an der Mosel (1978-2004)

7.10.2 Fazit

Alle Stationen zeigen in den Sommermonaten eine minimale Konzentrationserhöhung, die den Austrag von Atrazin auf die landwirtschaftlichen Flächen widerspiegelt. Da das Atrazin jedoch nur in geringen Mengen im Rhein auftritt und durch das Anwendungsverbot von 1992 die Konzentrationen weiter zurückgehen werden, ist die Anwendung von Atrazin als hydrologischer Tracer in den kommenden Jahren wenig aussagekräftig.

7.11 Diuron

7.11.1 Auswertung

Die Zeitreihe die zur Auswertung zur Verfügung stand, beginnt mit dem Jahr 1993 und endet 2004. In der Abbildung A 7.11 im Anhang werden die Jahresmittelwerte der Diuron-Konzentration wiedergegeben. Bei näherer Betrachtung der Messwerte ist keine signifikante Reduktion der Konzentration seit 1995 zu erkennen. Ein Grund dafür sind die geringen Konzentrationen, die im Rhein-EZG vorliegen. Die jährlichen mittleren Konzentrationswerte liegen im Bereich von 0,02-0,14 µg/l. Diese geringen Werte vermindern deutlich die Aussagekraft der Auswertung. Auffällig sind die hohen Konzentrationen an der Station Koblenz an der Mosel (siehe Abbildung A 7.11). Der Grund hierfür könnte der große Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen am Mosel-EZG sein.

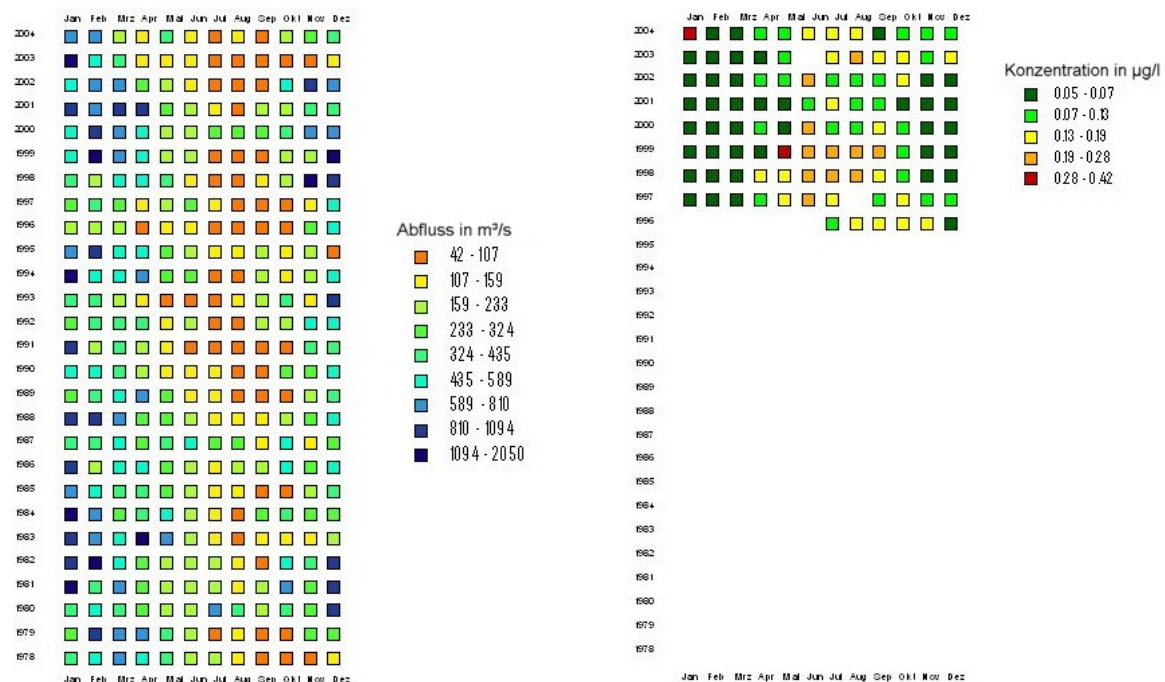


Abbildung 7.11-1: Monatliche Mittelwerte des Abflusses und der Diuron-Konzentration an der Messstelle Koblenz an der Mosel (1978-2004)

Die oben stehende Abbildung gibt die monatlichen Mittelwerte des Abflusses und der Konzentration von Diuron an der Station Koblenz an der Mosel wieder. Aufgrund der geringen Konzentrationen, die auch hier vorliegen, ist die Darstellung nur wenig aussagekräftig. Diuron weist in den Sommermonaten höhere Konzentrationswerte auf und legt damit ein ähnliches Verhalten wie Atrazin zu Tage. Man könnte wegen des abflussarmen

Jahres 2003 eine Korrelation zum Abfluss vermuten, da die niedrigen Abflusswerte bis in den Frühwinter hinein reichen, wodurch höhere Konzentrationen von Diuron auftraten. Die Konzentrationen liegen aber in einem Bereich von 0,07-0,19 µg/l und weisen dadurch keine deutliche Konzentrationserhöhung auf.

7.11.2 Fazit

Der Stoff Diuron ist durch die geringen Konzentrationen im Rhein-EZG nur schwer als Tracer einsetzbar. Es müssten mehr Daten zum Stoffeintrag vorliegen um eine eindeutige Aussagen machen zu können.

Durch die im Rhein allgemein sehr niedrigen Konzentrationen der organischen Mikroverunreinigungen sind diese als Tracer in einem makroskaligen EZG nur schwer einsetzbar. Weitere Untersuchungen anhand organischer Mikroverunreinigungen wären wichtig, um das Verhalten der Mikroverunreinigungen besser analysieren zu können. Dabei müsste darauf geachtet werden, dass in den untersuchten Einzugsgebieten die Emissionsquellen eindeutiger ausgewiesen sind. Wichtig wäre auch, dass in den Untersuchungsgebieten mehr über die dort ablaufenden hydrologischen Prozesse, wie z.B. über das Einsetzen des Oberflächenabflusses während einem Niederschlagsereignisses, bekannt ist.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser wissenschaftlichen Arbeit ging es darum, die Frage ob hydrologische Tracer als Wasserqualitätsparameter geeignet sind oder nicht, zu beantworten. Dabei wurde der Rhein als Untersuchungsgebiet ausgewählt, da die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins seit den 1950er Jahren systematisch am Rhein Daten erhoben hat. Mit Hilfe dieser Fülle von Messdaten, die im Internet einsehbar sind, konnte die weiter oben genannte Fragestellung verfolgt werden.

Bei der näheren Betrachtung des Rheineinzugsgebiets wurde schnell deutlich, dass das Untersuchungsgebiet eingeschränkt werden muss. Zunächst wurde das Rheineinzugsgebiet mit seinen einzelnen Teileinzugsgebieten und den dort vorherrschenden unterschiedlichen geologischen, hydrologischen und klimatischen Verhältnissen genauer betrachtet. Da die IKSR für die Quellflüsse des Rheins und den Alpenrhein keine Daten zur Verfügung stellt und im Einzugsgebiet des Delta-Rheins ein sehr komplizierter geologischer Untergrund vorherrscht, wurde das Untersuchungsgebiet auf die Teileinzugsgebiete Hochrhein, Oberrhein, Mittelrhein und Niederrhein beschränkt.

Um Wasserqualitätsparameter in der Tracerhydrologie sinnvoll einzusetzen zu können, müssen Informationen über die Emissionsquellen der einzelnen Parameter vorhanden sein. Aufgrund dieser Tatsache wurden die möglichen Eintragspfade der einzelnen Stoffe untersucht. Diese Untersuchungen machten deutlich, dass viele Stoffe nicht ausschließlich aus einer Emissionsquelle stammen. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die unterschiedlichen Eintragspfade bei den weiteren Untersuchungen so gut wie möglich berücksichtigt.

Die Eignung der einzelnen Untersuchungsparameter als hydrologische Tracer ist sehr unterschiedlich ausgefallen. Ein Grund hierfür ist die nicht immer deutliche Abgrenzung der Emissionsquellen über die die untersuchten Parameter in den Rhein gelangen.

Der **Schwebstoffgehalt** gelangt sowohl natürlich als auch anthropogen in die Fließgewässer. Da die Ausweisung der unterschiedlichen Eintragspfade im Rheineinzugsgebiet nicht möglich war, konnten die Ergebnisse der Auswertung nicht eindeutig interpretiert werden.

Um den möglichen Einsatz des Schwebstoffgehalts als hydrologischen Tracer bewerten zu können, müssen daher weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Diese Untersuchungen sollten in einem EZG gemacht werden, in dem die Eintragspfade überwiegend bekannt sind.

Im EZG des Rheins werden die Stoffe **Cl, Na und K** zum Teil diffus, aber auch anthropogenen, u.a. durch den Abbau von Salzlagerstätten, eingetragen. Geht man davon aus, dass die anthropogenen Emissionen im Rheineinzugsgebiet überwiegend aus dem Abbau der Salzlagerstätten stammen, kann man eine eindeutige Aussage über ihren Herkunftsraum treffen. Die weiteren Auswertungen belegten diese im Vorfeld aufgestellte Aussage und machen somit deutlich, dass die Stoffe Cl, Na und K als hydrologische Tracer eingesetzt werden können. Allerdings müssen dabei ihre verschiedenen Emissionsquellen bekannt sein.

Sulfat wird über die Verwitterung von Gesteinen teilweise diffus in die Oberflächengewässer eingetragen. Weitere anthropogene Emissionsquellen stammen aus landwirtschaftlichen Flächen oder aus kommunalen und industriellen Abwässern. Im Rheineinzugsgebiet waren die einzelnen Emissionsquellen nicht eindeutig auszuweisen. Dadurch konnte keine Aussage über der Einsatz von Sulfat als hydrologischen Tracer gemacht werden. Somit sind bei Sulfat weitere Untersuchungen nötig. Diese sollten in einem EZG durchgeführt werden, in dem eine räumliche Ausweisung der Emissionsquellen möglich ist und somit der Herkunftsraum der Emissionen bekannt ist.

Die Stoffe **Calcium, Magnesium und Kieselsäure-Silizium** werden v.a. diffus und auf natürlichem Wege, durch die Gesteinsverwitterung, in die Flüsse eingetragen. Dadurch kann man diese Stoffe zur Bestimmung der Hauptkomponente des Abflusses benutzen.

Im Rheineinzugsgebiet stammt der Abfluss in den Sommermonaten überwiegend aus der Gletscherschmelze. Diese Aussage konnte durch die Untersuchungen der Ca-, Mg- und Si-Konzentrationen belegt werden. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich diese Stoffe in einem Einzugsgebiet, in dem sie überwiegend aus natürlichen Emissionsquellen stammen, als hydrologische Tracer eignen.

Die **Pflanzenschutzmittel Atrazin und Diuron** gelangen ausschließlich auf anthropogenem Wege über die landwirtschaftlich genutzten Flächen in die Oberflächengewässer. Daher wurden die beiden Pflanzenschutzmittel zur Bestimmung des Herkunftsraums mit in die Auswertung aufgenommen. Aufgrund der geringen Konzentrationen die im Rhein gemessen wurden, ist es schwer eine Aussage in Bezug auf ihre Eignung als hydrologische Tracer zu machen. Auch hier sind wiederum weitere Untersuchungen nötig, um eine eindeutige Aussage treffen zu können. Diese Untersuchungen sollten in einem kleineren Gebiet vorgenommen werden, in dem die ablaufenden hydrologischen Prozesse, wie z.B. das Einsetzen des Oberflächenabflusses während eines besonderen Niederschlagsereignisses, bekannt sind.

Die Ergebnisse diese Untersuchungen zeigen, dass die Anwendung von Wasserqualitätsparametern in der Tracerhydrologie möglich ist. Jedoch sind weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet nötig. Eine Voraussetzung, um die Parameter sinnvoll als hydrologische Tracer einsetzen zu können, ist die Bestimmung der Stoffquellen im untersuchenden EZG. Um bessere Ergebnisse in diesem Forschungsbereich zu erhalten, sollte nicht nur die räumliche Lage im EZG bestimmt, sondern auch die Stofffracht mit einbezogen werden. Für zukünftige hydrologische Forschungen wären weitere Untersuchungen wichtig, die in einem EZG stattfinden, in dem diese Voraussetzungen vorhanden sind. Des Weiteren wären Untersuchungen in einem Einzugsgebiet, in dem viel über die einzelnen ablaufenden hydrologischen Prozesse bekannt ist, sinnvoll.

Mit der vorliegenden Arbeit ist gezeigt worden, dass der Einsatz von Wasserqualitätsparameter als Tracer in der Hydrologie möglich ist.

Literatur

- CHR/KHR (1993): Der Rhein unter der Entwicklung des Menschen. Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht Nr. 1-11 der KHR
- CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Herg. (DVWK) (1998): Einträge aus diffusen Quellen in die Fließgewässer.- Nähr- und Feststoffe. Arbeitskreis „Diffuse Stoffeinträge“ im DVWK-Fachausschuss „Einflüsse auf die Beschaffenheit der Fließgewässer“. DVWK-Materialien, 5. Wirtschaft- und Verl.-Ges. Gas und Wasser. Bonn
- Bach, M. et al. (2000): Schätzung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer Deutschlands. Berichte / Umweltbundesamt; 2000,3.
- Eisel, M. (2002): Stoffhaushalt und Stoffdynamik in Flusseinzugsgebieten: Ein Beitrag zum Bewertungsverfahren „Hydrologische Güte“. Dissertation. Universität Freiburg.
- Hirner, A., Rehage, H. & Sulkowski, M. (2000): Umweltgeochemie – Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Pedosphäre. Steinkopff Verlag, Darmstadt
- Hellmann, H. (1986): Analytik von Oberflächengewässern. Georg Thieme Verlag. Stuttgart, New York
- Hoffmann, H., Keller, D. (2003): Der Rhein – Unser Weltkulturerbe. Dumont, Köln.
- Höll, K. (1986): Wasser. Untersuchung – Beurteilung – Aufbereitung – Chemie – Bakteriologie – Virologie – Biologie. Walter de Gruyter, Berlin.
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (2004): Der Bodensee. Zustand – Fakten – Perspektiven. Bregenz.
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (1999): Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees. Bericht Nr. 51
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005a): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil A: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Merkmale, Überprüfung der Umweltauswirkungen menschlicher Tätigkeiten und wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005b): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Flussgebietseinheit Rhein. Bearbeitungsgebiet Alpenrhein/Bodensee. Bericht zur Bestandsaufnahme in Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie der EU.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005c): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Hochrhein. Bericht zur Bestandsaufnahme.

- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005d): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Oberrhein. Bericht zur Bestandsaufnahme
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005e): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Mittelrhein. Bericht zur Bestandsaufnahme
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005f): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Niederrhein. Bericht zur Bestandsaufnahme.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2005g): WRRL. Bestandsaufnahme. Bericht Teil B: Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet Deltarhein. Bericht zur Bestandsaufnahme.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2003): Bestandsaufnahme der Emissionen prioritärer Stoffe 2000. Bericht Nr. 134.
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2001): Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein. Druckbetriebe Lettner. München
- Kölle, W. (2003): Wasseranalysen – richtig beurteilt. Wiley-Vch Verlag, Weinheim.
- Lauterborn, Robert (1916): Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstroms, 1. Teil, Heidelberg.
- Lauterborn, Robert (1917): Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstroms, 2. Teil, Heidelberg.
- Lauterborn, Robert (1918): Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstroms, 3. Teil, Heidelberg.
- Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland (2003): Relief, Boden und Wasser. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. Berlin
- Mazor, E. (2004): Chemical and Isotopic Groundwater Hydrologie. Marcel Dekker Inc. New York, Basel
- Runde, I. (1999): Zur Bedeutung und Entwicklung des Rheinhandels im Früh- und Hochmittelalter. In: Schutz des Kulturerbes unter Wasser. Veränderungen europäischer Lebenskultur durch Fluss- und Seehandel. Beiträge zum Internationalen Kongress für Unterwasserarchäologie (IKUWA '99), 18.-21. Februar 1999 in Sassnitz auf Rügen. Lübstorf 2000 (Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mecklenburg-Vorpommerns 35), S. 297–309.
- Steiner, R. (2006): Der Ausbau des Hochrheins zur Schifffahrtsstraße. Die Geschichte eines gescheiterten Großprojekts. Dissertation, Universität Mannheim

- Tietze, W., Boesler, K.-A., Klink H.-J. & Voppel, G. (1990): Geographie Deutschland. Bundesrepublik Deutschland. Staat – Natur – Wirtschaft. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart
- Umwelt Bundes Amt (UBA) (2002): Ermittlung der Quellen für die prioritären Stoffe nach Artikel 16 der Wasserrahmenrichtlinie und Abschätzung ihrer Eintragsmengen in die Gewässer in Deutschland. Texte 68/02.
- Umwelt Bundes Amt (UBA) (2000): Schätzung der Einträge von Pflanzenschutzmitteln aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer Deutschlands. Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Uhlmann, D. (1994) : Die Beschaffenheit der Gewässer als Anzeiger für den Zustand der Umwelt. – Sitzungsberichte der sächsischen Akademie der Wissenschaft zu Leipzig. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, 125, 1. Akademie Verlag, Leipzig.
- Walther, W. (1999): Diffuser Stoffeintrag in Böden und Gewässer. Teubner-Reihe Umwelt., Stuttgart, Leipzig.

URL`s:

- [1] <http://www.bodenseekonferenz.org>
- [2] <http://www.dk-rhein.de>
- [3] <http://www.hvz.baden-wuerttemberg.de>
- [4] <http://www.iksr.org>
- [5] <http://www.naduf.ch>
- [6] <http://www.rivernet.org/rhin>

Anhang:

Verzeichnis der Abkürzungen

HCH	Hexachlorcyclohexan
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
NADUF	Die nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer
PAK	Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe

Verzeichnis der Symbole

Ca^+		Calcium
Cl^-		Chlorid
HQ_{100}	$[\text{m}^3/\text{s}]$	hundertjährige Hochwasser
K^+		Kalium
Mg^+		Magnesium
MHQ	$[\text{m}^3/\text{s}]$	mittlere Hochwasserabfluss
MNQ	$[\text{m}^3/\text{s}]$	mittlere Niedrigwasserabfluss
MQ	$[\text{m}^3/\text{s}]$	mittlere Abfluss
Na^+		Natrium
Q	$[\text{m}^3/\text{s}]$	Abfluss
S	$[\text{mg}/\text{l}]$	Schwebstoffgehalte
Si		Kieselsäure-Silizium
SO_4^{2-}		Sulfat

Tabelle A.1: Wasserqualitätsparameter

Allgemeine Messgrößen:

Abfluss am Tag der Einzelprobenahme in m³/s
Abfluss am Tag der Einzelprobenahme in m³/s (Schwebstoffdaten)
Abflussmittel der Messperioden über 2 Wochen in m³/s
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅) in mg/l
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) in mg/l
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C (25°C: Rekingen, Weil am Rhein) in µS/cm
Kaliumpermanganat (KMnO₄)-Verbrauch in mg/l
Kaliumpermanganat (KMnO₄)-Verbrauch in mg/l O₂
Mittelwert gelöster Sauerstoff in mg/l
Mittlere Wassertemperatur in Grad Celsius
Mittlerer Abfluss der Messperioden über 4 Wochen in m³/s
pH
Sauerstoff gelöst Maxima in mg/l
Sauerstoff gelöst Minima in mg/l
Sauerstoffsättigung in %
Schwebstoffgehalt in mg/l
Temperatur Maxima in Grad Celsius
Temperatur Minima in Grad Celsius

Organische Mikroverunreinigungen:

1,1,1-Trichlorethan in µg/l	1,3,5-Trichlorbenzen in µg/kg
1,2,3,5-Tetrachlorbenzen in µg/kg	1,3,5-Trichlorbenzen in µg/l
1,2,3-Trichlorbenzen in µg/kg	1,3-Dichlorbenzen in µg/kg
1,2,3-Trichlorbenzen in µg/l	1,4-Dichlorbenzen in µg/kg
1,2,4,5-Tetrachlorbenzen in µg/kg	1,4-Dichlorbenzen in µg/l
1,2,4-Trichlorbenzen in µg/kg	1-Chlor-2-Nitrobenzen in µg/kg
1,2,4-Trichlorbenzen in µg/l	1-Chlor-2-Nitrobenzen in µg/l
1,2-Dichlorbenzen in µg/kg	1-Chlor-3-Nitrobenzen in µg/kg
1,2-Dichlorbenzen in µg/l	1-Chlor-3-Nitrobenzen in µg/l
1,2-Dichlorethan in µg/l	1-Chlor-4-Nitrobenzen in µg/kg

1-Chlor-4-Nitrobenzen in µg/l	Atrazin in µg/l
2,4,5-Trichlorphenoxyessigsäure in µg/l	Azinphos-ethyl in µg/l
2,4'-DDD in µg/kg	Azinphos-methyl in µg/l
2,4'-DDE in µg/kg	Bentazon in µg/l
2,4'-DDT in µg/kg	Benzen in µg/l
2,4-DB in µg/l	Benzo(a)anthracen in mg/kg
2,4-Dichlorphenoxyessigsäure in µg/l	Benzo(a)pyren in mg/kg
2,6-Dimethylanilin in µg/l	Benzo(b)fluoranthren in mg/kg
2-Chloranilin in µg/l	Benzo(ghi)perylen in mg/kg
2-Chlortoluen in µg/l	Benzo(k)fluoranthren in mg/kg
2-Nitrotoluen in µg/l	Beta-Endosulfan in µg/kg
3,4-Dichloranilin in µg/l	Beta-Endosulfan in µg/l
3-Chloranilin in µg/l	Beta-Hexachlorcyclohexan in µg/kg
4,4'-DDD in µg/kg	Beta-Hexachlorcyclohexan in µg/l
4,4'-DDE in µg/kg	Bis(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP) in µg/l
4,4'-DDT in µg/kg	Chlorfenvinphos in µg/l
4-Chlor-2,6-Dimethylanilin in µg/l	Chloridazon in µg/l
4-Chloranilin in µg/l	Chlorpyrifos in µg/l
4-Chlortoluen in µg/l	Chlortoluron in µg/l
4-Nonylphenol in µg/l	Chrysen in mg/kg
Acenaphthen in mg/kg	Cis-Heptachlorepoxyd in µg/kg
Acenaphthylen in mg/kg	Deet in µg/l
Alachlor in µg/l	Delta-Hexachlorcyclohexan in µg/kg
Aldicarb in µg/l	Delta-Hexachlorcyclohexan in µg/l
Aldrin in µg/kg	Desethylatrazin in µg/l
Alpha-Endosulfan in µg/kg	Desethylterbutylazin in µg/l
Alpha-Endosulfan in µg/l	Desisopropylatrazin in µg/l
Alpha-Hexachlorcyclohexan in µg/kg	Diazinon in µg/l
Alpha-Hexachlorcyclohexan in µg/l	Dibenz(ah)anthracen in mg/kg
Ametryn in µg/l	Dibutylzinnverbindungen in µg/kg
Anionische Tenside (MBAS) in µg/l	Dichlormethan in µg/l
Anthracen in mg/kg	Dichlorprop in µg/l
Anthranilsäureisopropylamid (AIPA) in µg/l	Dichlorvos in µg/l
	Dieldrin in µg/kg

Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) in µg/l	Mecoprop in µg/l
Dimethoat in µg/l	Metabenzthiazuron in µg/l
Dinoseb in µg/l	Metalaxyl µg/l
Dinoterb in µg/l	Metazachlor in µg/l
Dioctylzinn-Kation in µg/kg	Methoxychlor in µg/kg
Dioxine (PCDD+PCDF) in ng/kg ITEQ	Metolachlor µg/l
Diphenylzinn in µg/kg	Metoxuron in µg/l
Disulfoton µg/l	Mevinfos µg/l
Diuron in µg/l	Mirex in µg/kg
DNOC in µg/l	Monobutylzinn-Kation in µg/kg
EDTA in µg/l	Monolinuron in µg/l
Endosulfan in µg/l	Monophenylzinn in µg/kg
Endrin in µg/kg	N,N-Dimethylanilin in µg/l
Ethofumesat in µg/l	Naphthalin in µg/l
Fenitrothion in µg/l	Naphthalin in mg/kg
Fenoprop in µg/l	Nitrobenzen in µg/l
Fenthion in µg	NTA in µg/l
Fluoranthen in mg/kg	Octachlorstyren in µg/kg
Fluoren in mg/kg	Oktylphenole (para-tert-Oktylphenol) in µg/l
Gamma-Hexachlorcyclohexan in µg/kg	Oxadixyl in µg/l
Gamma-Hexachlorcyclohexan in µg/l	Parathion-ethyl in µg/l
Heptachlor in µg/kg	Parathion-methyl in µg/l
Hexachlorbenzen in µg/kg	PCB 101 in µg/kg
Hexachlorbutadien in µg/kg	PCB 118 in µg/kg
Hexachlorbutadien in µg/l	PCB 138 in µg/kg
Indeno(1,2,3cd)pyren in mg/kg	PCB 153 in µg/kg
iso-Chloridazon in µg/l	PCB 180 in µg/kg
Isodrin in µg/kg	PCB 28 in µg/kg
Isoproturon in µg/l	PCB 52 in µg/kg
Linuron in µg/l	Pentachloranisol in µg/kg
Malathion in µg/l	Pentachlorbenzen in µg/kg
MCPA in µg/l	Pentachlorbenzen in µg/l
MCPB in µg/l	Pentachlorphenol (PCP) in µg/l

Phenanthren in mg/kg
Phenole und Homologe (C₆H₅OH) in µg/l
Propiconazol in µg/l
Pyrazofos in µg/l
Pyren in mg/kg
Simazin in µg/l
Teldrin in µg/kg
Terbuthylazin µg/l
Terbutryn in µg/l
Tetrabutylzinn in µg/kg
Tetrachlorethen in µg/l
Tetrachlormethan (Tetrachlorkohlenstoff)
in µg/l

Tolclophos-Methyl in µg/l
Trans-Chlordane in µg/kg
Trans-Heptachlorepid in µg/kg
Triadimefon in µg/l
Triazofos in µg/l
Tributylzinnverbindungen in µg/kg
Trichlorethen in µg/l
Trichlormethan (Chloroform) in µg/l
Tricyclohexylzinn-Kation in µg/kg
Trifluralin in µg/l
Triphenylzinnverbindungen in µg/kg
Vinclozolin in µg/l

Anorganische Stoffe:

Ammonium-Stickstoff (NH₄-N) in mg/l
(N)
AOX in µg/l
Arsen (As) in mg/kg
Arsen-Gesamt (As) in µg/l
Blei (Pb) in mg/kg
Blei-Gesamt (Pb) in µg/l
Cadmium (Cd) in mg/kg
Cadmium-Gesamt (Cd) in µg/l
Chlorid (Cl) -Ionen in mg/l
Chrom (Cr) in mg/kg
Chrom-Gesamt (Cr) in µg/l
Eisen (Fe) in g/kg
Eisen-Gesamt (Fe) in µg/l
Fluorid(F)-Ionen in µg/l
Gesamtphosphor (P) in g/kg
Kalium (K) -Ionen in mg/l
Kalzium (Ca) -Ionen in mg/l

Kieselsäure-Silizium (Si) in mg/l
Kupfer (Cu) in mg/kg
Kupfer-Gesamt (Cu) in µg/l
Magnesium (Mg) -Ionen in mg/l
Mangan (Mn) in mg/kg
Mangan-Gesamt (Mn) in µg/l
Natrium (Na) -Ionen in mg/l
Nickel (Ni) in mg/kg
Nickel-Gesamt (Ni) in µg/l
Nitrat-Stickstoff (NO₃-N) in mg/l
Nitrit-Stickstoff (NO₂-N) in mg/l
Organischer Kohlenstoff (TOC) in %
Organischer Kohlenstoff gelöst (DOC) in
mg/l
Organischer Kohlenstoff Gesamt (TOC) in
mg/l
Orthophosphat-Phosphor (o-PO₄-P) in
mg/l

Phosphor gesamt (P) in mg/l

Quecksilber (Hg) in mg/kg

Quecksilber-Gesamt (Hg) in µg/l

Stickstoff gesamt (N) in mg/l

Sulfat (SO₄) -Ionen in mg/l

Zink (Zn) in mg/kg

Zink-Gesamt (Zn) in µg/l

Radioaktivität:

Alpha-Aktivität-Gesamt in Bq/l

Beta-Aktivität-Gesamt in Bq/l

Cäsium-137-Aktivität in Bq/l

Kalium-40-Beta-Aktivität in Bq/l

Spezifische Tritiumaktivität (H₃) in Bq/l

Strontium-90-Aktivität in Bq/l

Transporte: Anorganische Stoffe

Ammonium-Stickstoff (NH₄-N) in kg/s (N)

AOX in g/s

Chlorid (Cl) -Ionen in kg/s

Kalium (K) -Ionen in kg/s

Kalzium (Ca) -Ionen in kg/s

Kieselsäure-Silizium (Si) in kg/s

Magnesium (Mg) -Ionen in kg/s

Natrium (Na) -Ionen in kg/s

Nitrat-Stickstoff (NO₃-N) in kg/s

Nitrit-Stickstoff (NO₂-N) in kg/s

Organischer Kohlenstoff gelöst (DOC) in kg/s

Organischer Kohlenstoff Gesamt (TOC) in kg/s

Orthophosphat-Phosphor (o-PO₄-P) in kg/s

Phosphor gesamt (P) in kg/s

Stickstoff gesamt (N) in kg/s

Sulfat (SO₄) -Ionen in kg/s

Tabelle A. 4: Hauptgliederung des Einzugsgebiets des Rheins (aus CHR/KHR 1993)

Rhein		Nebenflüsse		Flächen-	
Teilstrecke	Länge (km)	Fläche (km ²)	Name	Fläche (km ²)	summe (km ²)
Oberhalb des Bodensees	170	6.100			6.100
Bodensee bis Aare	150	9.800	Aare	17.800	15.900
Aare bis III	205	7.500	III	4.800	33.700
III bis Neckar	120	8.500			41.200
Neckar bis Main	70	3.500	Neckar	14.000	46.000
Main bis Nahe	31	1.000	Main	27.200 (davon Regnitz 7.600)	54.500
Nahe bis Mosel (ohne Lahn)	63	800	Nahe	4.100	68.500
			Lahn	5.900	72.000
			Mosel	28.100 (davon Saar 7.400)	99.200
Mosel bis Ruhr	187	10.000			100.200
Ruhr bis Lippe	35	1.700	Ruhr	4.500	104.300
Lippe bis Pannerdense Kop	54	600	Lippe	4.900	105.100
Abwärts Pannerdense Kop (davon Mündungsgebiet Rhein-Maas 1.500 km ²)	161	24.500			111.000
					139.100
					149.100
					153.600
					155.300
					160.200
					160.800
					185.300

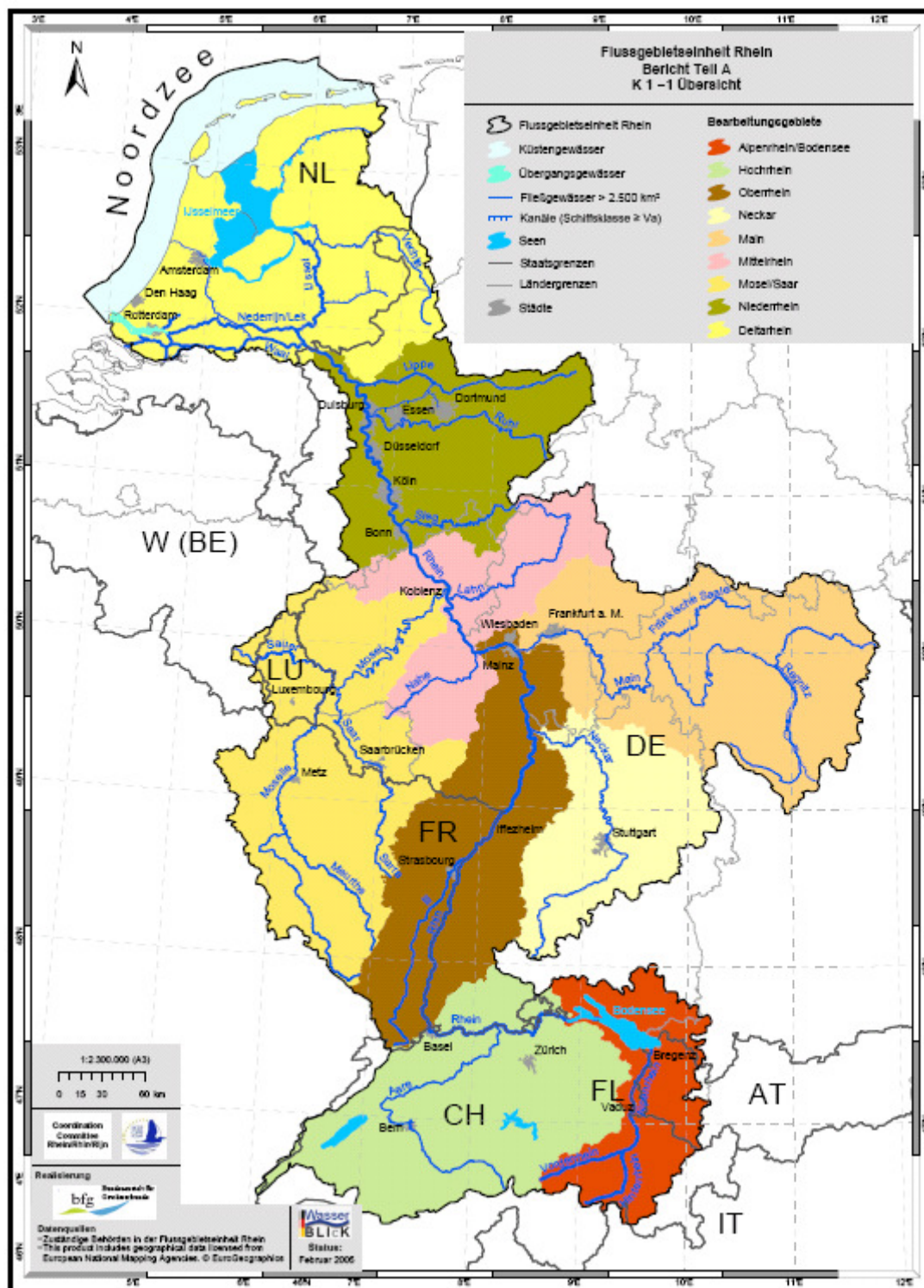


Abbildung A4.2: Teileinzugsgebiete des Rheins (IKSR 2005)

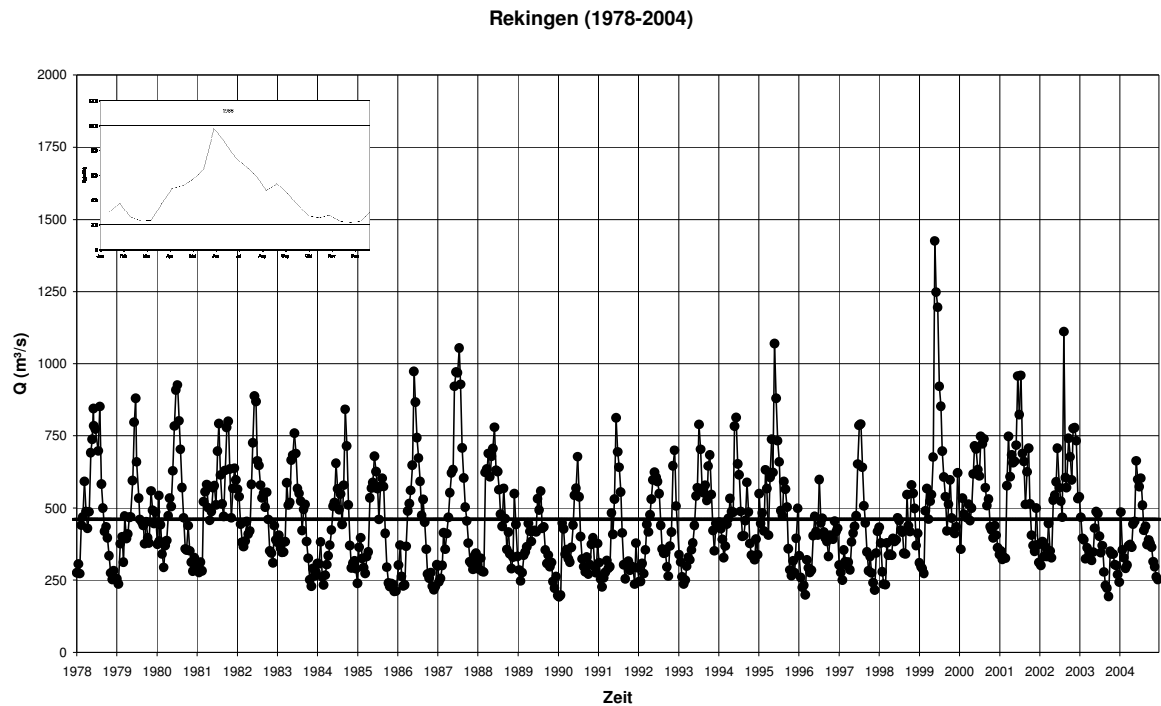


Abbildung A 7.1-1: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Station Rekingen innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit $460 \text{ m}^3/\text{s}$.

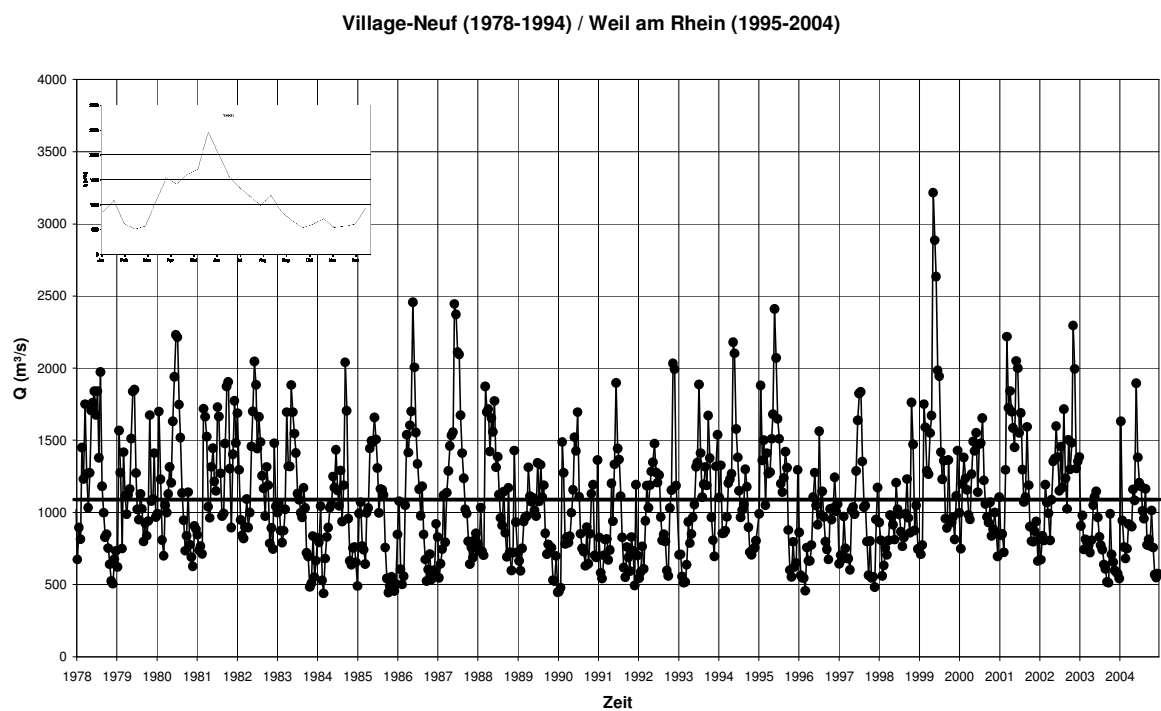


Abbildung A 7.1-2: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Stationen Village-Neuf und Weil am Rhein innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit $1089 \text{ m}^3/\text{s}$.

Seltz (1978-1992) / Lauterbourg (1993-2004)

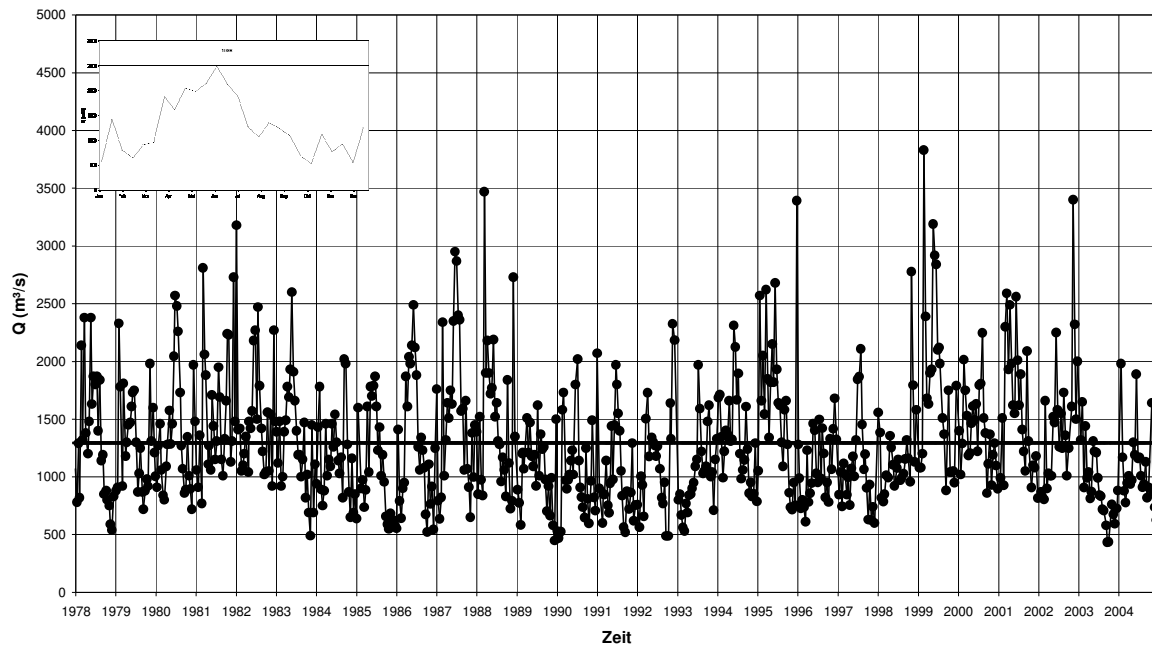


Abbildung A 7.1-3: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Stationen Seltz und Lauterbourg innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit $1293 \text{ m}^3/\text{s}$.

Koblenz/Rhein (1978-2004)

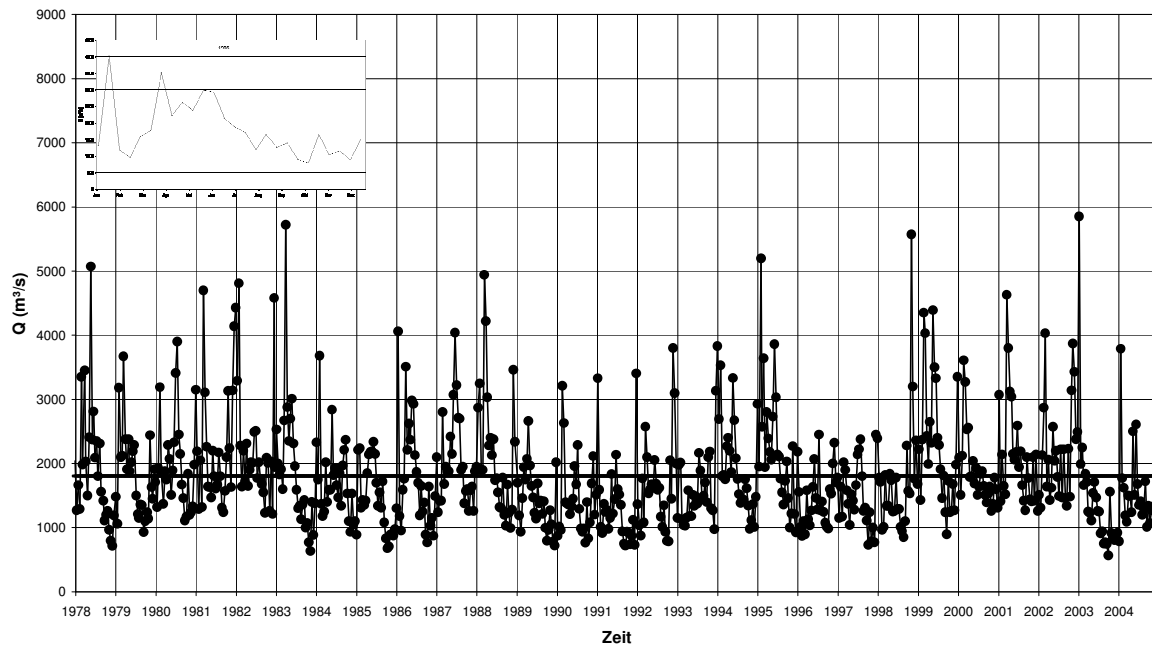


Abbildung A 7.1-4: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Station Koblenz/Rhein innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit $1805 \text{ m}^3/\text{s}$.

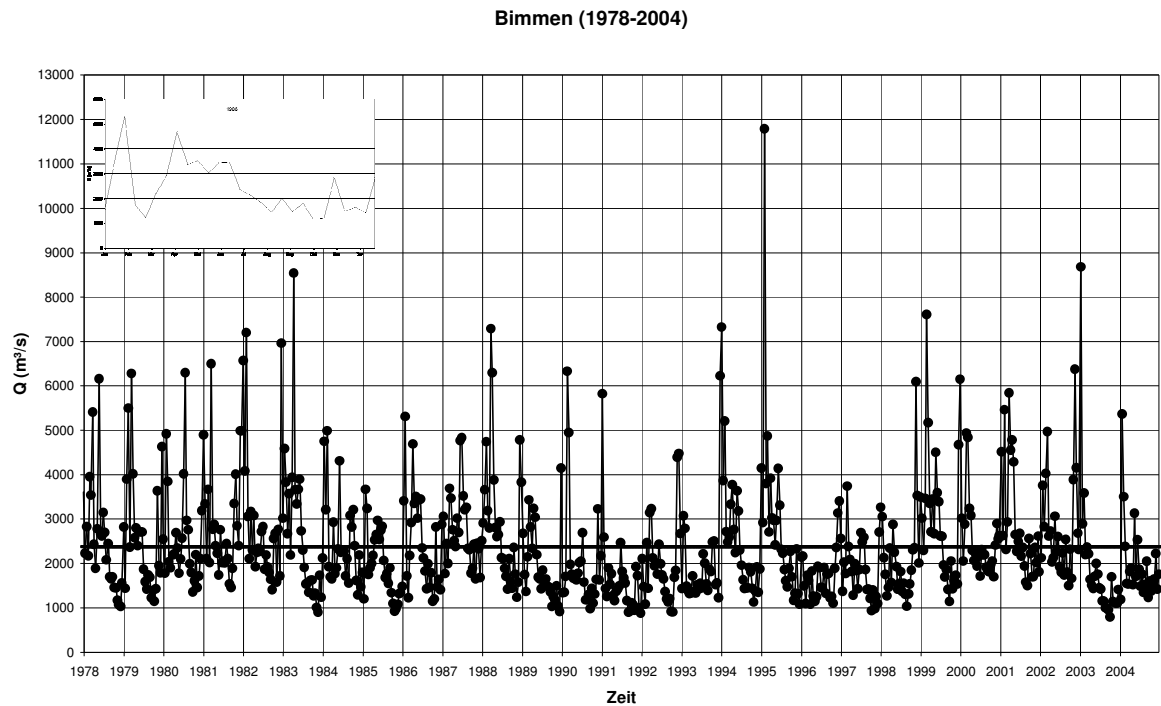


Abbildung A 7.1-5: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Station Bimmen innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit 2377 m^3/s .

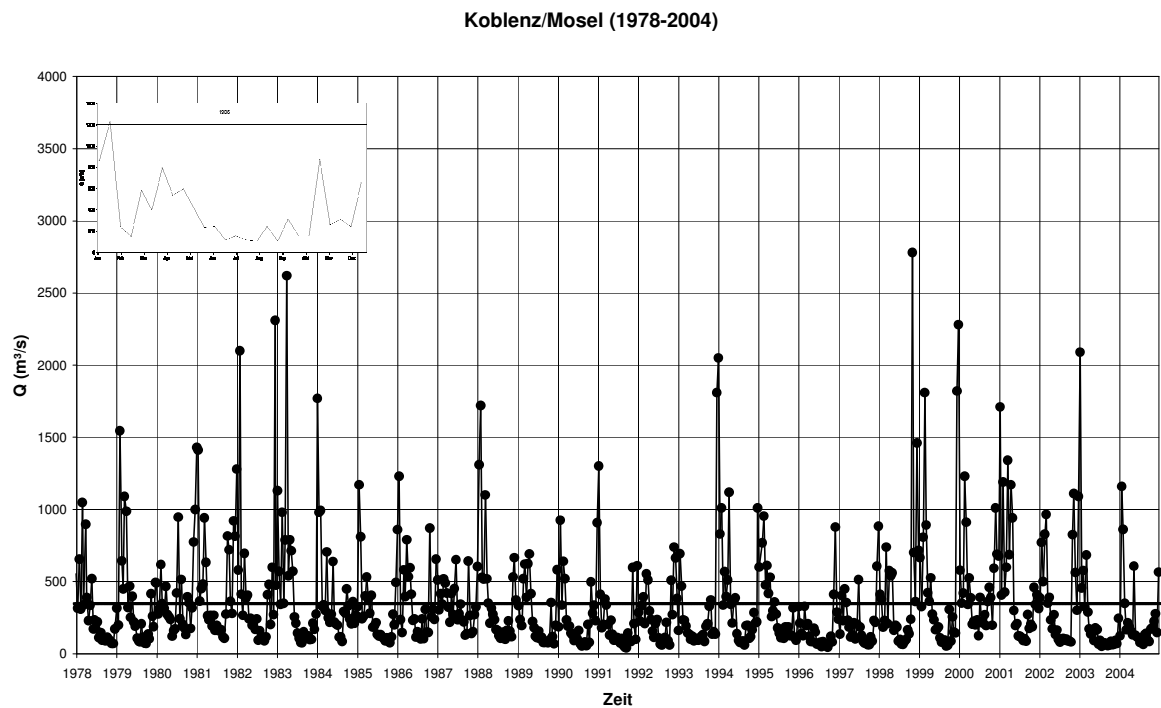


Abbildung A 7.1-6: Das Diagramm zeigt den Abfluss Q (m^3/s) der Station Koblenz/Mosel innerhalb der Zeitspanne von 1978-2004 und MQ mit 347 m^3/s .

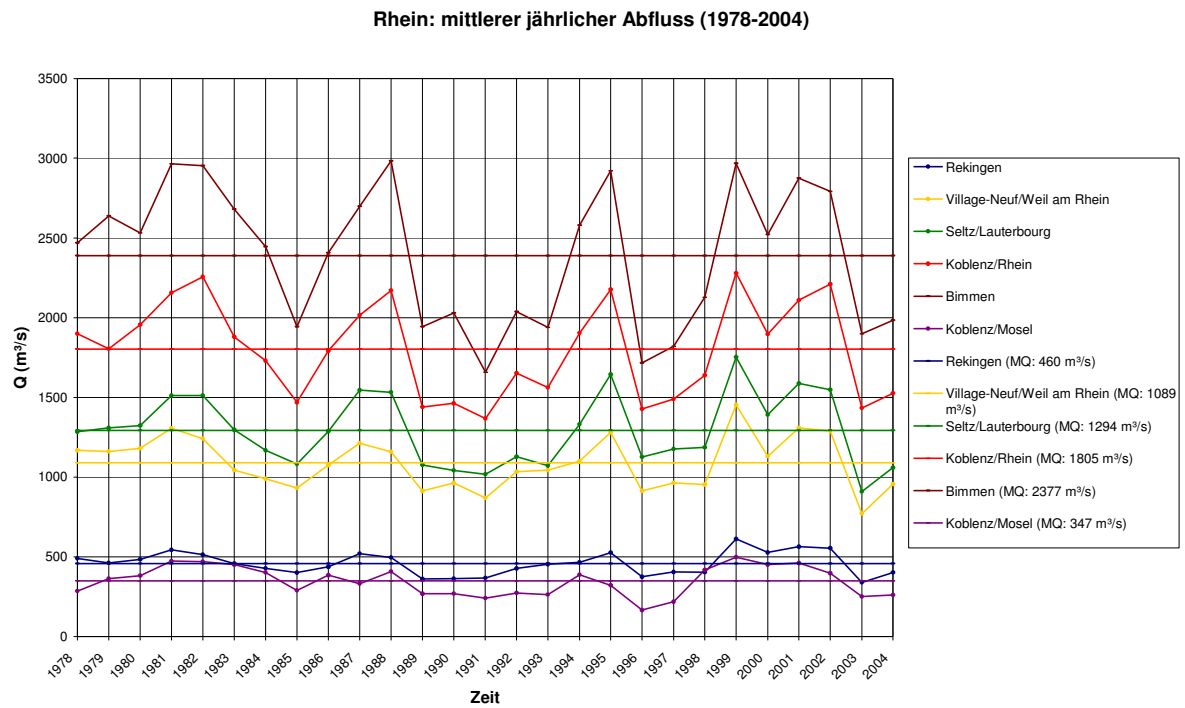


Abbildung A 7.1-7: Das Diagramm zeigt den mittleren jährlichen Abfluss der Station am Rhein und den dazugehörigen MQ der Messperiode von 1978-2004.

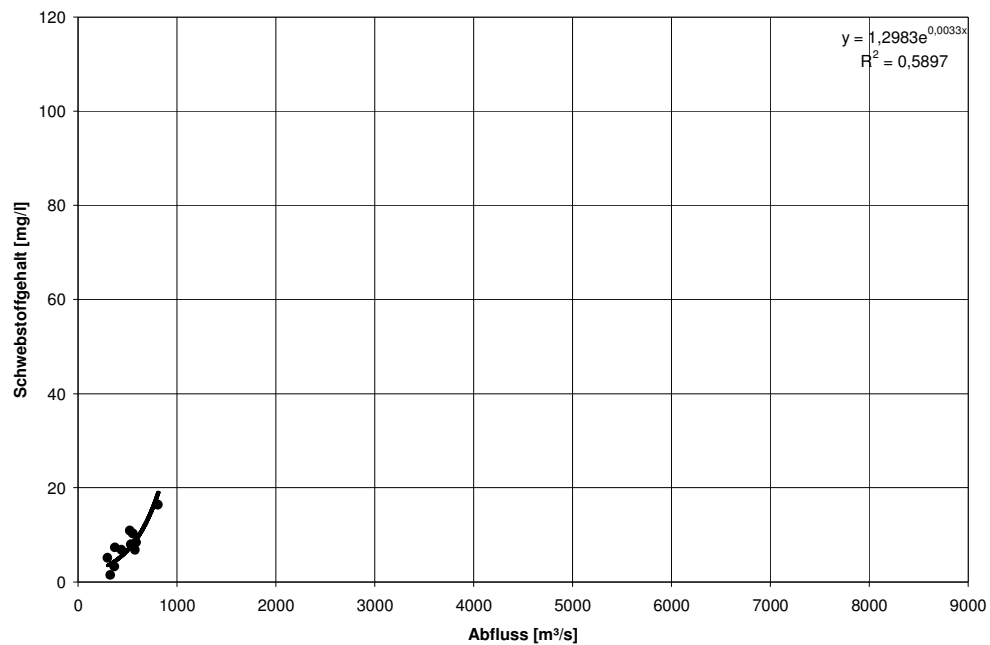


Abbildung A 7.2-1: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Rekingen (1994-1996)

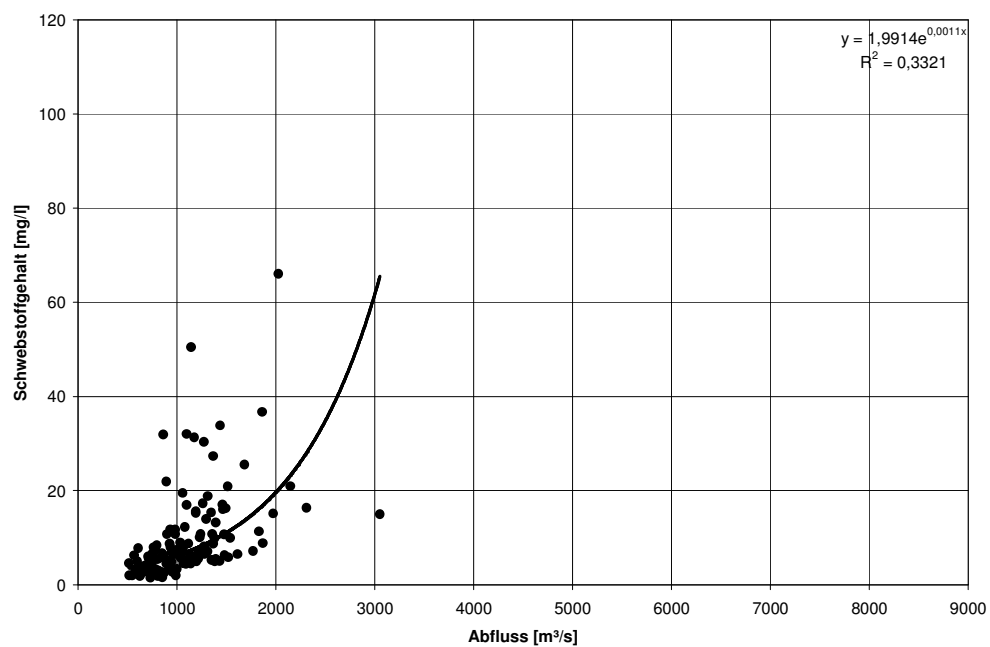


Abbildung A 7.2-2 : Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Village-Neuf / Rekingen (1994-2004)

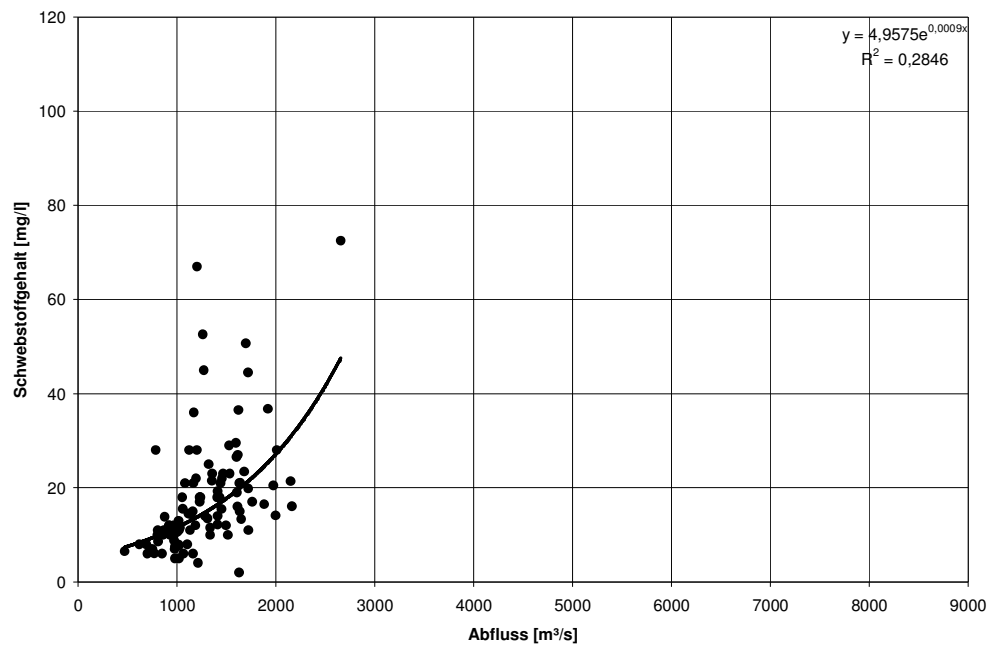


Abbildung A 7.2-3: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Lauterbourg (1994-2004)

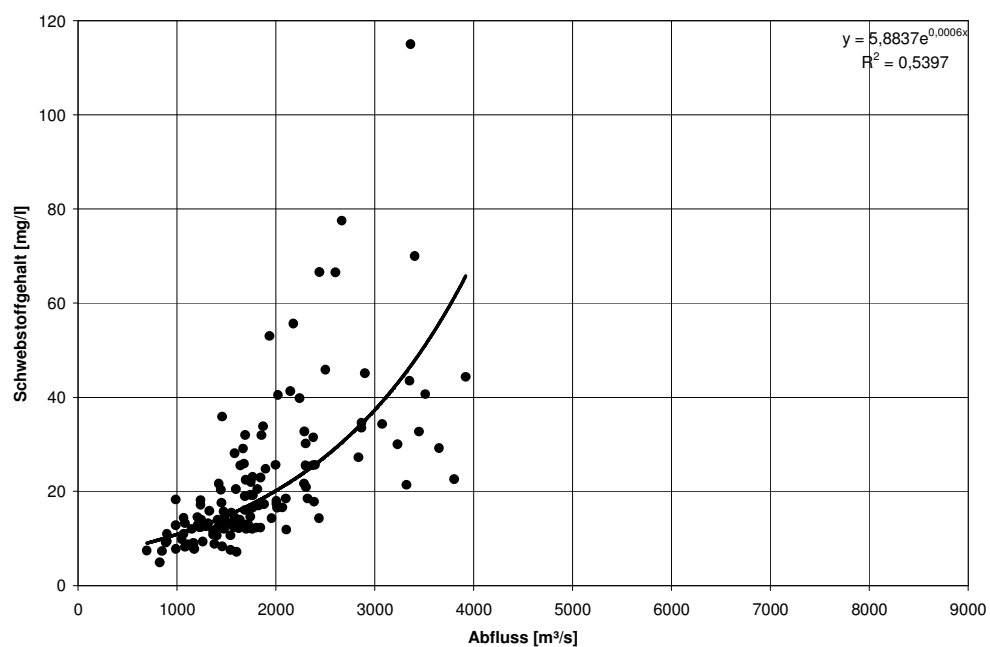


Abbildung A 7.2-4: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Koblenz (1994-2004)

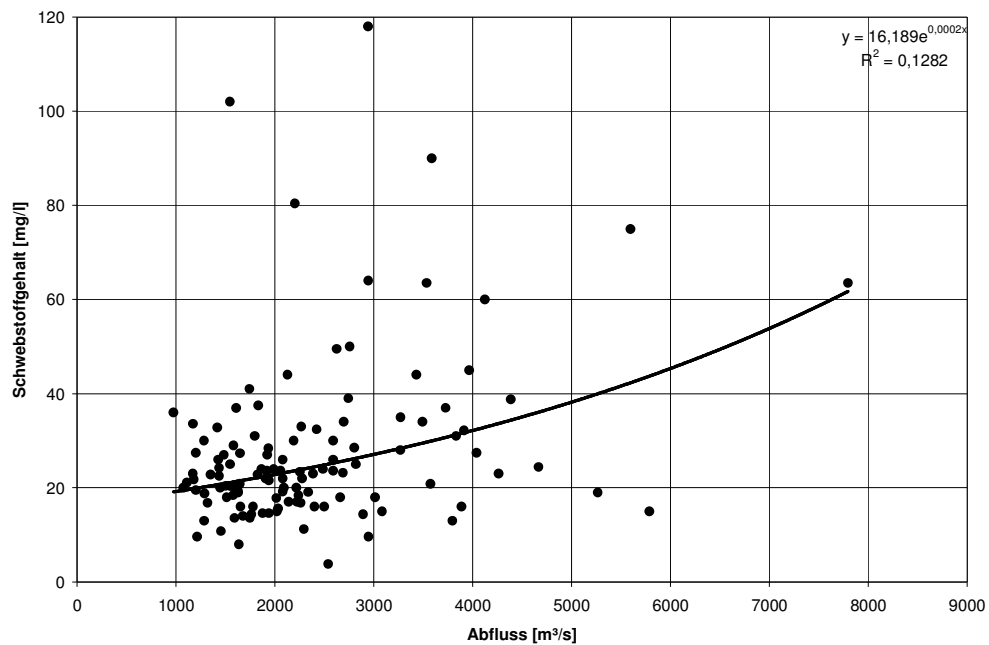


Abbildung A 7.2-5: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss im Rhein bei Bimmen (1994-2004)

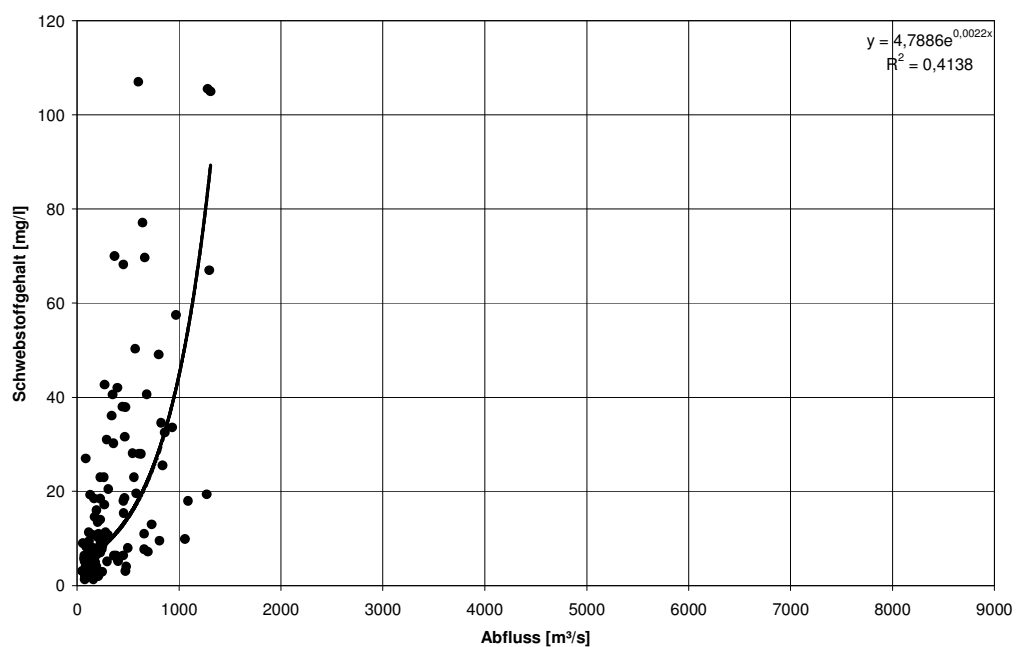


Abbildung A 7.2-6: Korrelation zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluss in der Mosel bei Koblenz (1994-2004)

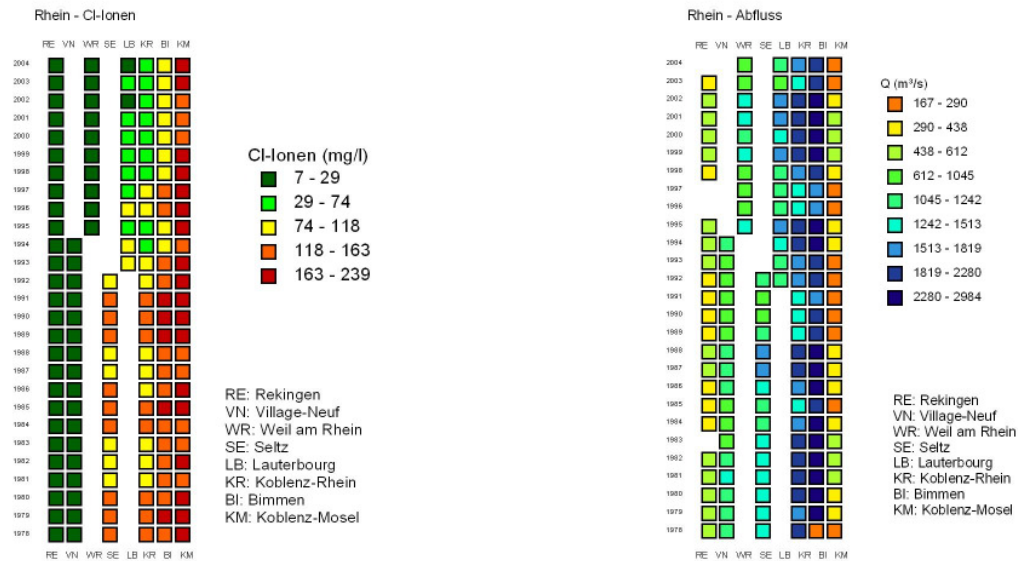


Abbildung A 7.3: Mittlere jährliche Chloridkonzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

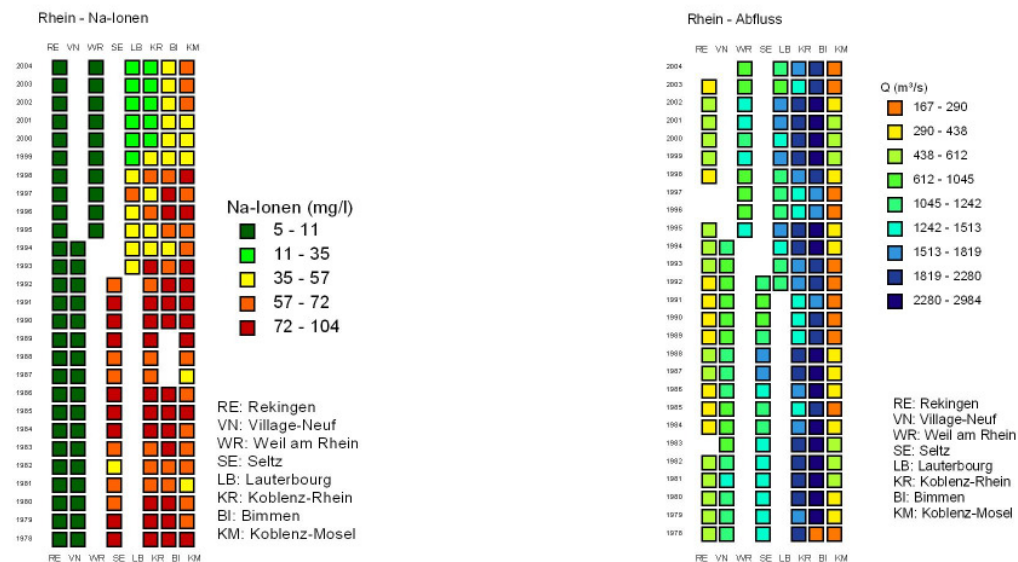


Abbildung A 7.4: Mittlere jährliche Natriumkonzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

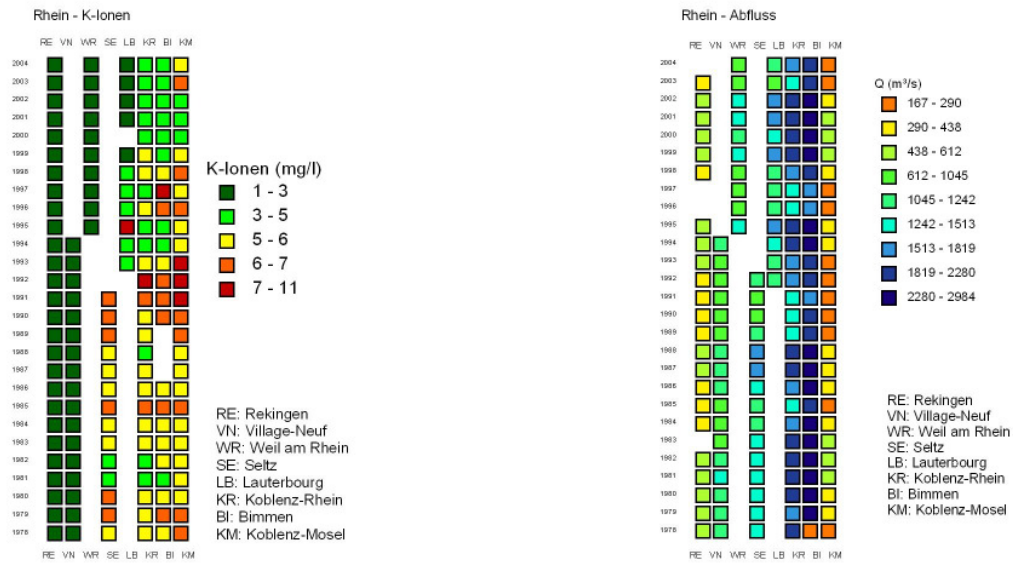


Abbildung A 7.5: Mittlere jährliche Kaliumkonzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

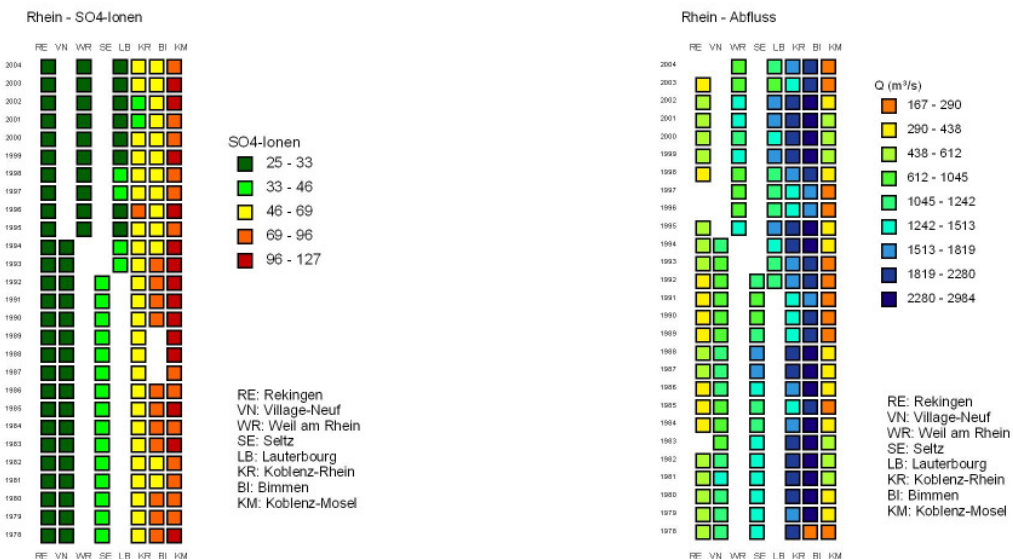


Abbildung A 7.6: Mittlere jährliche Sulfatkonzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

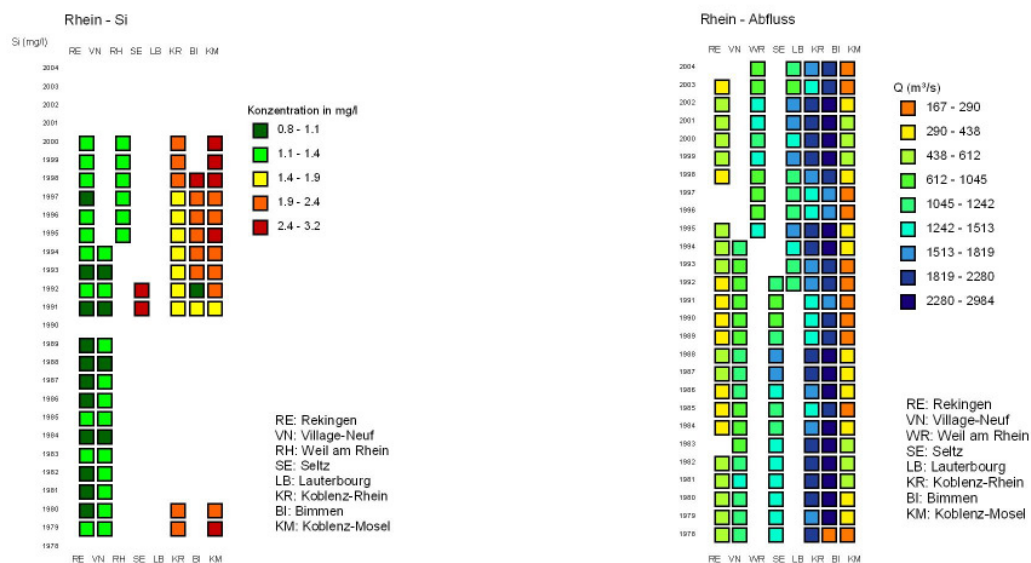


Abbildung A 7.7: Mittlere jährliche Kieselsäuresilicium-Konzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

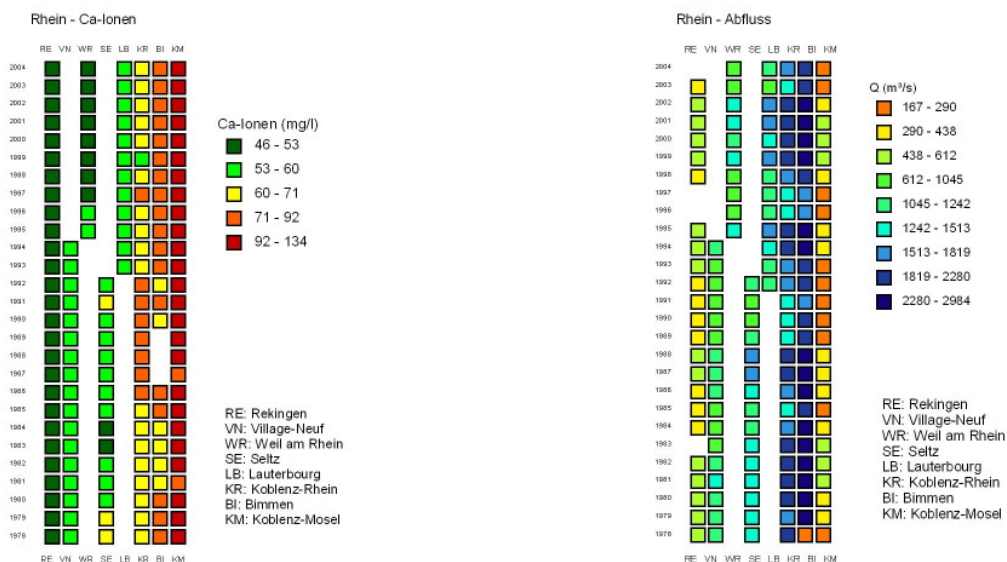


Abbildung A 7.8.: Mittlere jährliche Calcium-Konzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

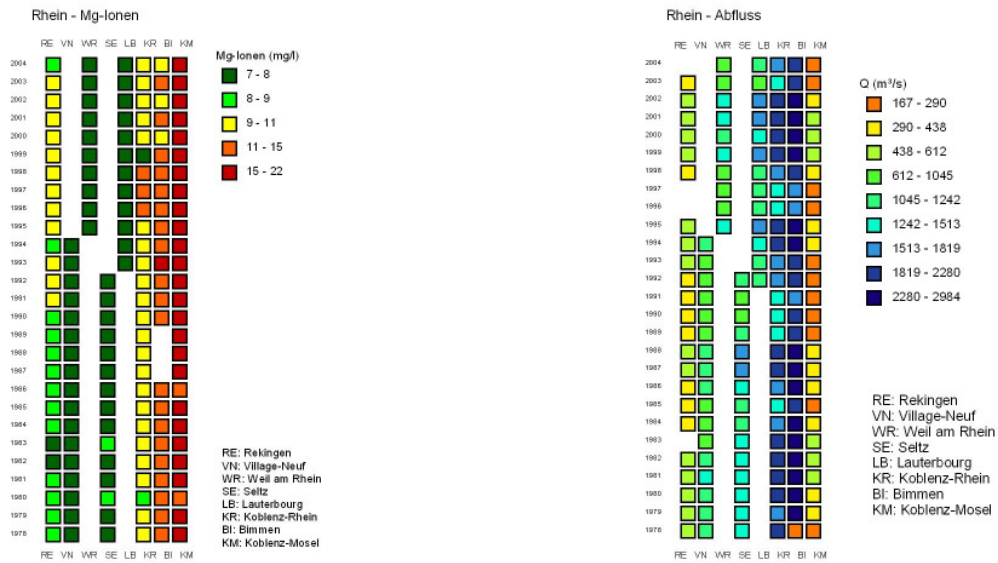


Abbildung A 7.9: Mittlere jährliche Magnesium-Konzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

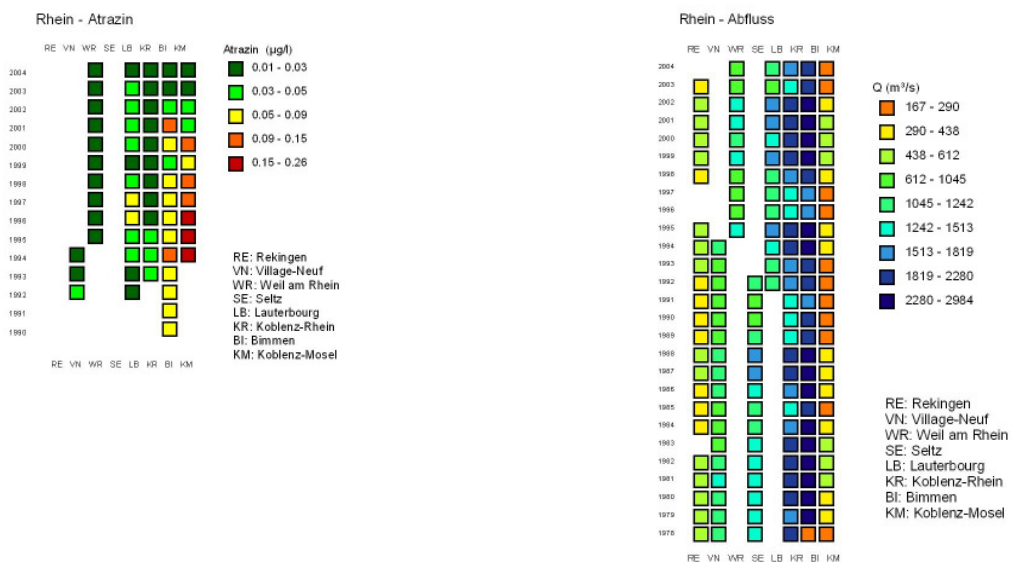


Abbildung A 7.10: Mittlere jährliche Atrazin-Konzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004

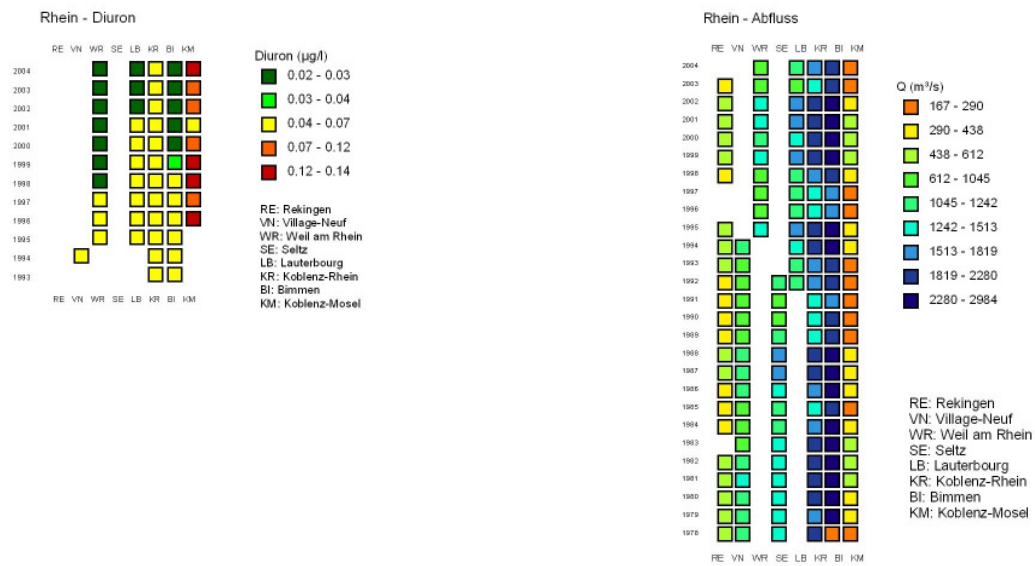


Abbildung A 7.11: Mittlere jährliche Atrazin-Konzentrationen und der mittlere jährlich Abfluss des Rheins an den verschiedenen Stationen während der Zeitreihe 1978-2004