# Mittlerer jährlicher Abfluss und Abflussvariabilität

Ralf Busskamp und Karl-Heinz Schmidt





Die Ruhr bei Bochum bei Trockenwetterabfluss und bei einem Hochwasserabfluss von 802 m³/s am 6.2.1980. Die beiden Bilder zeigen denselben Ausschnitt. Zur Orientierung kann der Baum in der linken Bildmitte dienen.

Das vielfältige Spektrum der Nutzung des Wassers durch den Menschen und die wasserbaulichen Eingriffe in die natürlichen Fließgewässersysteme z.B. durch die Anlage von Talsperren, durch Wassertransfer über Einzugsgebietsgrenzen hinweg, durch Flussbegradigungen und Flächenversiegelung, durch Bergbau oder Deichbau haben dazu geführt, dass sich das Abflussgeschehen in seiner räumlichen Verteilung und seinem zeitlichen Ablauf erheblich verändert hat

und einen z.T. stark anthropogen modifizierten Charakter trägt.

Die Karte 3 zeigt anschaulich die Unterschiede in der Wasserführung. Die mittleren jährlichen Abflüsse (MQ) werden in einer Bänderdarstellung entlang der Flussläufe dargestellt, wobei die Bandbreite proportional zur Wassermenge in den Gewässerabschnitten ist und die farbliche Gestaltung Informationen über die Abflussvariabilität der Gewässerabschnitte vermittelt. (Die in der Tabelle 2 genannten Abflussmessstellen (Pegel) sind in der Karte namentlich aufgeführt.)

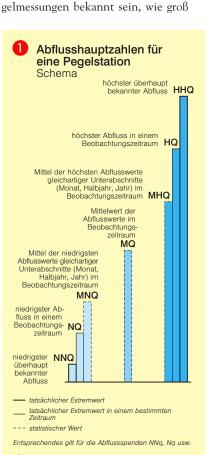
# Abflussmessung und Abflussregistrierung

Der Abfluss wird mit Hilfe der Registrierung der Wasserstände an Pegeln ermittelt. Das amtliche Pegelnetz in Deutschland besteht gegenwärtig aus mehr als 4000 Messstellen. Die ältesten Überlieferungen von Wasserständen liegen in Form von Hochwassermarken vor, die die Bewohner von flussnahen Siedlungen schon seit dem Mittelalter an Brückenpfeilern und Gebäuden angebracht haben ( Foto), um verheerende Überschwemmungen zu dokumentieren. In Deutschland begannen die ersten regelmäßigen Wasserstandsmessungen durch Lattenpegel im Jahre 1727 bei Magdeburg an der Elbe. Es folgten die Pegel Barby/Elbe (1753), Düsseldorf/ Rhein (1766) und Stettin/Oder (1771). Heute werden an Pegeln die Wasserstände automatisch registriert oder durch Datenfernübertragung an die zuständigen Behörden weitergeleitet. Zur Berechnung des Abflusses (Q: m³/s) benötigt man neben der Fläche des durchflossenen Querschnitts (F: m²) den Wert der mittleren Geschwindigkeit (v: m/s), mit der das Wasser den Querschnitt passiert. Zur Messung der Fließgeschwindigkeit

werden in der Hydrometrie Präzisionsmessflügel eingesetzt.

### Räumliche und zeitliche Verteilung

Als Datenbasis der Kartendarstellung wurden im Wesentlichen die für die amtlichen Pegel verfügbaren Abflusshauptzahlen herangezogen. Das regionale Verteilungsmuster des mittleren Abflusses (MQ) bietet eine wertvolle Basisinformation über die Verfügbarkeit von Wasser für den öffentlichen, industriellen und privaten Wasserverbrauch sowie für die Schifffahrt. Allerdings ist das Abflussgeschehen nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich ausgesprochen variabel. Großanlagen und Siedlungen mit hohem Wasserverbrauch benötigen deswegen Informationen darüber, ob die Versorgung mit der von ihnen benötigten Wassermenge ohne längere Ausfallsgefährdung gewährleistet ist. Dazu muss über langjährige Pegelmessungen bekannt sein, wie groß



die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein bestimmter Mindestabfluss in einem Fließgewässer unterschritten wird. Dasselbe Prinzip lässt sich auch auf die Häufigkeit des Auftretens von Hochwassern bestimmter Gefährdungsstufen im Rahmen des Hochwasserschutzes anwenden. Zusätzlich gibt es an den großen Flüssen spezielle Hochwasserwarnsysteme

( Beitrag Busskamp/Wilke, S. 132).



Historische Hochwassermarken der Saale dokumentiert an der Mühlpforte in Halle

Der **Begriff Abfluss** bezeichnet in Hydrologie und Wasserwirtschaft die Wassermenge, die je Zeiteinheit einen definierten Querschnitt in einem Fließgewässer durchfließt. Als Maßeinheiten werden je nach Größe der Flüsse und Bäche m³/s oder l/s verwendet. Wird der Abfluss auf die zugehörige Fläche des Einzugsgebietes bezogen, spricht man von der Abflussspende (l/s/km²).

In der Wasserhaushaltsgleichung:

N (Niederschlag) = A (Abfluss) + V (Verdunstung in mm)

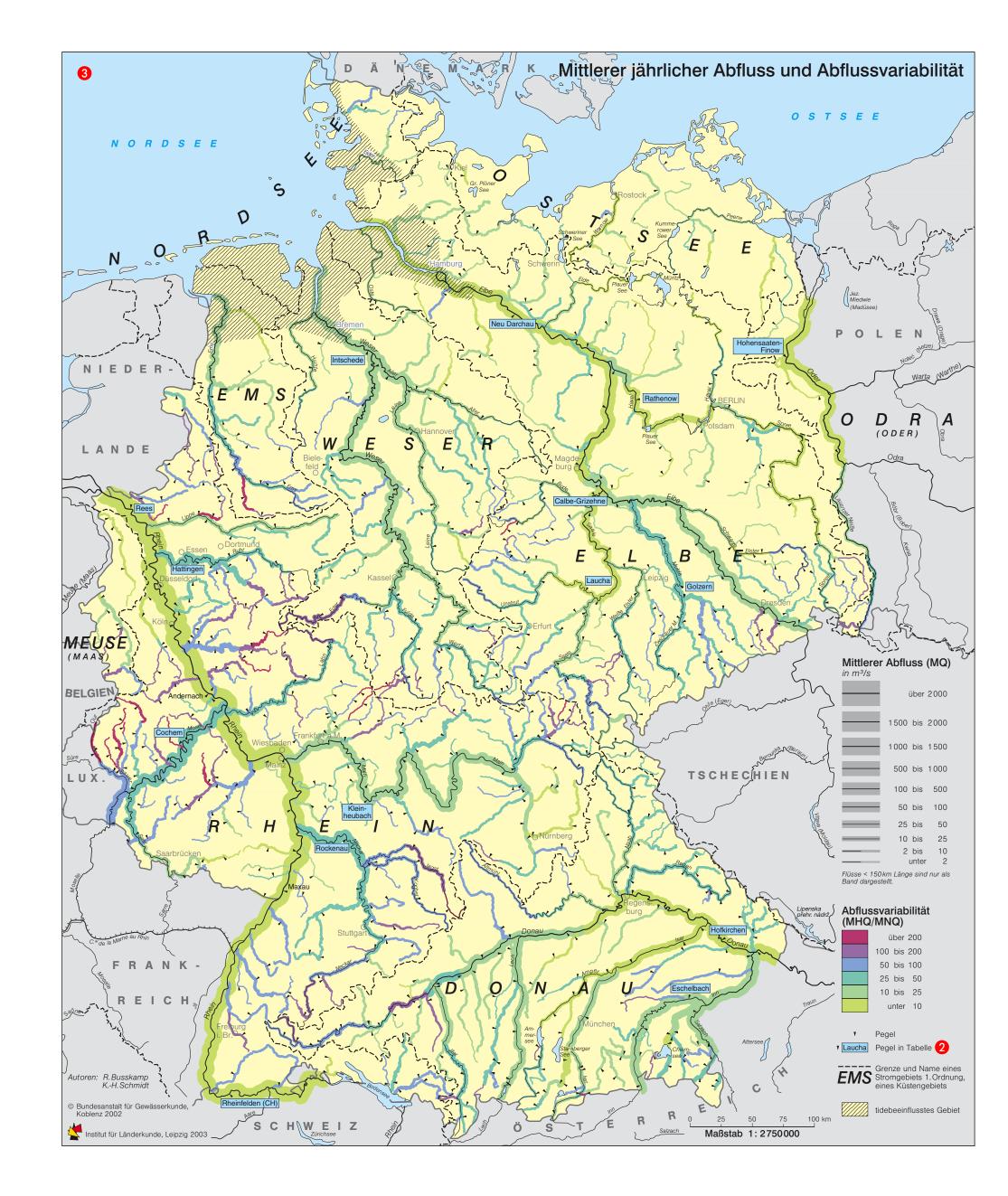
wird der Abfluss als Abflusshöhe (mm pro Zeiteinheit), meist in mm/a, ausgedrückt (\*) Beitrag Glugla/Jankiewicz, S. 130). Bei der Grundwasserneubildung (\*) Beitrag Neumann/Wycisk, S. 144) und in der Wasserbilanz (\*) Beitrag Jankiewicz/Krahe, S. 148) erscheint der Abfluss ebenfalls als Abflusshöhe.

Bei den Flüssen in Deutschland nimmt der Abfluss mit zunehmender Einzugsgebietsgröße und Lauflänge zu, was in der Bänderdarstellung der Karte gut zum Ausdruck kommt. Diese Zunahme wird auch in hydrologischen Längsschnitten verdeutlicht 6. Die Längsschnitte beinhalten, bezogen auf die Flusslänge, die Darstellung des mittleren Abflusses (MQ), des mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ), des mittleren Hochwasserabflusses (MHQ) sowie der mittleren Hochwasserabflussspende (MHq). Bei den Spenden liegt meist eine Abnahme in Fließrichtung vor, u.a. weil die Flüsse im Unterlauf in niedrigere Höhen mit geringeren Niederschlägen gelangen. Stellenweise kann es zu einer starken Zunahme des Abflusses infolge der Einmündung eines abflussreichen Nebenflusses (z.B. Aare, Mosel) kommen. Besonders ausgeprägt ist die sprunghafte Abflusszunahme an der Mündung

## Hauptzahlen und Abflussvariabilität ausgewählter Pegelstationen

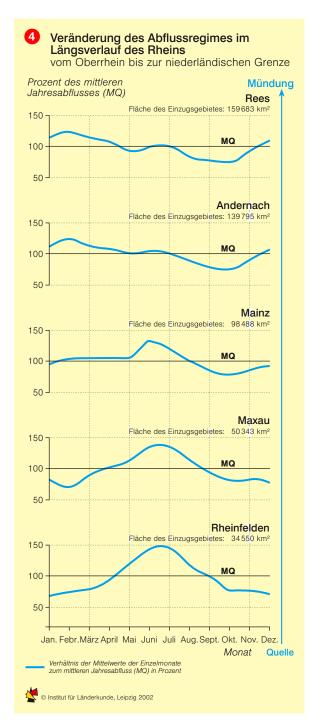
Einzugsgebiet (mit Pegelstation)	Fläche	Reihe	MQ	MHQ	MNQ	Variabilität	HHQ	NNQ	Variabilität der Extrema
(IIIII regelstation)	km²	Jahre	m³/s	m³/s	m³/s	MHQ/MNQ	m³/s	m³/s	HHQ/NNQ
Rhein (Rheinfelden)	34550	66	1 030,0	2760	453	6	4270	267,0	16,0
Rhein (Rees)	159300	65	2280,0	6620	1040	6	12200	590,0	20,7
Donau (Hofkirchen)	47 496	96	636,0	1870	302	6	4470	165,0	27,1
Elbe (Neu Darchau)	131950	72	712,0	1870	274	7	3840	128,0	30,0
Oder (Hohensaaten-F.)	109564	54	521,0	1224	259	5	3480	111,0	31,4
Inn (Eschelbach)	13354	66	368,0	1 460	127	11	2900	82,0	35,4
Saale (Calbe-Grizehne)	23719	66	115,0	379	44	9	680	11,5	59,1
Weser (Intschede)	37720	57	324,0	1250	125	10	3500	59,0	59,3
Unstrut (Laucha)	6218	53	30,5	105	11	10	363	4,6	78,9
Havel (Rathenow)	19288	44	91,6	165	25	7	295	3,0	98,3
Neckar (Rockenau)	12710	46	135,0	1200	36	33	2690	18,4	146,2
Main (Kleinheubach)	21505	38	158,0	790	48	16	1800	11,0	163,6
Mosel (Cochem)	27088	65	315,0	2060	60	34	4170	10,0	417,0
Ruhr (Hattingen)	4118	54	70,7	524	18	29	1950	1,6	1189,0
Mulde (Golzern)	5442	87	61,4	497	13	38	1740	1,4	1242,9
zur Lage der Pegel siehe									

ar Lago dor r ogor



des Inn in die Donau. Der mittlere Abfluss der Donau beträgt hier etwa 665 m³/s, der des Inn liegt bei etwa 765 m³/s. Gemessen am Abflussvolumen müsste die Donau unterhalb von Passau eigentlich Inn heißen.

Als Beispiellängsschnitt dient die Darstellung des Rheins unterhalb des Bodensees 6. Sein Einzugsgebiet beträgt bei Konstanz 10.922 km², der mittlere Abfluss (MQ) liegt bei etwa 350 m<sup>3</sup>/s und die mittlere Abflussspende über 30 l/s x km². Der disproportional große Anstieg des mittleren Hochwasserabflusses an der Moselmündung weist auf das hohe Hochwasser-Gefährdungspotenzial der Mosel für den Rheinunterlauf hin. Die Hochwasseranfälligkeit der Mosel ist wesentlich durch das starke Relief und die geringe Durchlässigkeit der Gesteine im Mittelgebirgsteil ihres Einzugsgebietes begründet. Bei Emmerich nahe der deutsch-niederländischen Grenze hat das Einzugsgebiet des Rheins eine Größe von 159.784 km<sup>2</sup> und einen mittleren Abfluss von weit über 2000 m³/s erreicht, was einer mitt-



leren Abflussspende von mehr als 14 l/s/km² entspricht.

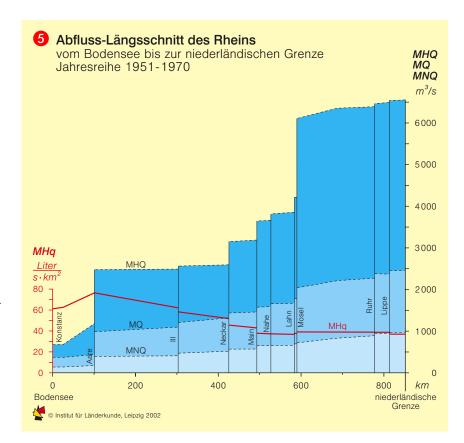
#### Das Abflussregime des Rheins

Der durchschnittliche jahreszeitliche Verlauf des Abflussgeschehens an einem Fließgewässer wird als Abflussregime bezeichnet. Abbildung 4 zeigt das Abflussregime des Rheins für verschiedene Pegelstationen in seinem Längsverlauf. Je nach Höhenlage und Klima der Einzugsgebietsteile herrscht ein glaziales (Gletscherabfluss), nivales (Schneeschmelze) oder pluviales (Abfluss aus Niederschlag) Regime vor. Die Alpenzuflüsse sind noch durch starke saisonale Unterschiede gekennzeichnet, wesentlich beeinflusst durch die Abschmelzvorgänge (glazial) im Sommer (Pegel Rheinfelden). Stromab gewinnt der nivale Einfluss zunehmend an Bedeutung, die Winterabflüsse werden höher und das Sommermaximum wird reduziert. Zwischen Mainz und Andernach (verstärkter Einfluss der Mittelgebirge) verschiebt sich das Maximum vom Sommer auf den Winter. Mit zunehmendem Flachlandanteil wächst der Einfluss des pluvialen Regenregimes, dessen Jahresgang von Niederschlagsund Verdunstungshöhe bestimmt wird. Im Sommer entsteht hier ein Feuchtedefizit durch die stärkere Evapotranspiration. Die ausgleichende Wirkung der unterschiedlichen Regimetypen führt im Unterlauf zu einer recht gleichmäßigen Wasserführung und damit zu günstigen Bedingungen für die Rheinschifffahrt.

### **Abflussvariabilität**

Fließgewässer mit hoher Abflussvariabilität sind einerseits durch starke Hochwassergefährdung, andererseits aber auch durch zeitweilige Wasserknappheit gekennzeichnet. Im Verlauf von Hochwassern durchströmen große Wassermengen die Flüsse, ohne dass sie für wasserwirtschaftliche Nutzung herangezogen werden könnten. Zudem ist mit den Hochwassern ein erhebliches Schadenpotenzial verbunden.

In den mitteleuropäischen Flüssen können Hochwasser zu allen Jahreszeiten auftreten, wobei es regional und wetterlagenbedingt zu Häufungen in bestimmten Zeiträumen kommen kann. Bedingt durch über das Mittelmeer nach Norden ziehende Tiefdruckgebiete treten an den Alpenflüssen Hochwasser vor allem im Frühling und Frühsommer auf, in den Mittelgebirgen insbesondere in den Wintermonaten in Zusammenhang mit der Schneeschmelze und West- und Südwestwindlagen. Am Rhein wirkt sich auch die Zugbahn der Niederschlagsfronten auf die Größenordnung von Hochwassern aus. Bei Südund Südwestwindlagen verlaufen die Fronten in derselben Richtung wie die Hochwasserwellen, und die Einzelwellen der Nebenflüsse können sich stapeln. Durch die Klimaerwärmung scheint es in jüngster Zeit zu einer Häufung und Verstärkung der Hochwasser zu kommen.



Die Abflussvariabilität eines Gewässers kann man quantitativ relativ einfach mit Hilfe der Abflusshauptzahlen 1 charakterisieren, indem man den Quotienten aus dem mittleren höchsten und dem mittleren niedrigsten beobachteten Abfluss (MHQ/MNQ) berechnet. Diese Verhältniszahl wurde zur graphischen Wiedergabe der regionalen Variabilität des Abflussgeschehens für die Kartendarstellung herangezogen 3. Es zeigt sich die generelle Tendenz, dass die Abflussvariabilität mit zunehmender Einzugsgebietsgröße abnimmt, denn mit zunehmender Größe wächst auch der Ausgleichseffekt auf lokale Extrembedingungen. Die großen Flusssysteme Rhein, Elbe, Oder, Donau und Weser haben daher recht niedrige Variabilitäten, während die kleinflächigeren Nebengewässer im Allgemeinen höhere Werte aufweisen.

Obwohl die Pegelstationen Eschelbach (Inn), Rathenow (Havel), Kleinheubach (Main) und Cochem (Mosel) mit Flächen zwischen 10.000 und 30.000 km² vergleichbar große Einzugsgebiete haben, unterscheiden sich ihre Variabilitäten (MHQ/MNQ und HHQ/ NNQ) erheblich 2. Der Inn zeigt – obwohl er die kleinste Fläche einnimmt eine geringe Variabilität; hier macht sich der Einfluss des Alpenvorlandes mit den reichhaltigen, den Abflussgang ausgleichenden Grundwasservorräten in den glazialen Schmelzwasserablagerungen bemerkbar. In Bezug auf die MHQ/ MNQ-Variabilität reagiert die Havel

ähnlich mit ihrem in Dglazialen und Dglazifluvialen Lockersedimenten entwickelten Einzugsgebiet. Bei der Variabilität der Extremwerte (HHQ/NNQ) weist die Havel, bedingt durch anthropogene Eingriffe (Braunkohletagebau an der Spree), einen höheren Wert auf.

Die Mittelgebirgsflüsse (Main, Mosel) haben im Vergleich zu Inn und Havel wesentlich höhere Variabilitäten. Ihre Einzugsgebiete werden von unterschiedlich stark verfestigten Gesteinen mit vielfach niedrigen Speicherkapazitäten unterlagert. Besonders die Mosel hat einen hohen Wert, da der Untergrund des Rheinischen Schiefergebirges im Wesentlichen aus wenig durchlässigen, für die Grundwasserneubildung ( Beitrag Neumann/Wycisk, S. 144) ungünstigen Schiefern besteht. Ähnliches Verhalten zeigen die meisten Gewässer in den Daläozoischen und kristallinen Gebirgskomplexen, was im Maßstab kleinerer Einzugsgebiete durch die Beispiele von Ruhr (> Fotos S. 126) und Mulde verdeutlicht wird. Gerade in diesen Gebieten mit hoher Abflussvariabilität musste in den natürlichen Wasserhaushalt durch Talsperrenbau eingegriffen werden ( Beiträge Busskamp/Wilke, S. 132 und Kern/Leibundgut, S. 138), um die Gewässer bei Niedrigwasserabfluss aufzufüllen und um Hochwasserspitzen aufzufangen.

# Hochwasserkatastrophen

Eines der schwersten Hochwasser an deutschen Fließgewässern ereignete sich

im Juli 1997 an der Oder. In den Sudeten und Westbeskiden fielen extreme Niederschläge mit sehr ergiebigem und intensivem Dauerregen. Südlich von Frankfurt/Oder brach der Hochwasserdeich und bedingte die Evakuierung der Ziltendorfer Niederung.

In seinen Schadensauswirkungen noch übertroffen wurde dieses Ereignis durch das Sommerhochwasser 2002 an Elbe und Mulde. Im Südosten Deutschlands werden derartige Katastrophenhochwasser häufig ausgelöst durch Tiefdruckgebiete, die als so genannte Vb-Wetterlagen über das Mittelmeer heranziehen (vgl. Satellitenbild vom 12.08.02 6),

sich dort mit Wasser voll saugen, am Ostrand der Alpen vorbeiziehen und sich dann an den höheren östlichen Mittelgebirgen (Böhmerwald, Erzgebirge, Sudeten) abregnen. Innerhalb von nur 72 Stunden fielen im August 2002 in Zinnwald im Erzgebirge mehr als 400 mm (400 l/m²) Niederschlag. Eine größere Menge wurde niemals zuvor gemessen. Die starken Niederschläge führten zu einem plötzlichen Anstieg der Wasserstände an der Mulde und den kleineren Erzgebirgsgewässern (z.B. Weißeritz); an der Elbe wirkte sich zusätzlich der starke Zufluss aus den Hochwassergebieten in Tschechien (Moldau) aus. Durch die Fluten verloren Menschen ihr Leben; Gebäude, Kulturschätze und Infrastruktur wurden beschädigt und zerstört. Die finanziellen Schäden beliefen sich auf ca. 10 Mrd. Euro.

Das Satellitenbild 7 veranschaulicht das Ausmaß des Hochwassers an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Dessau und an der Mulde stromab von Bad Düben. Zum Zeitpunkt der Aufnahme war das Hochwasser der Mulde allerdings bereits weitgehend abgelaufen. Weite Landstriche sind überflutet. Die eigentlichen Flussläufe wären kaum noch zu erkennen, wenn sie nicht graphisch hervorgehoben worden wären.



