

Ein Ansatz zur Ermittlung von Abflussdauerlinien in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen

Andreas Niedermayr

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Auftrags des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU), bei dem es um die Erarbeitung einer Praxishilfe zur „Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter“ ging, wurde durch das Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner ein Ansatz entwickelt, mit dem mittlere jährliche Überschreitungsdauerlinien in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen bestimmt werden können.

Für die Entwicklung des Ansatzes wurden langjährige Datenreihen von 76 Abflussmessstationen, welche über die ganze Schweiz verteilt sind, ausgewertet. Die berücksichtigten Messstationen erfassen Einzugsgebiete von 10 bis 700 km² Fläche, zwischen 450 und 2660 m ü.M. mittlerer Höhenlage und von 0 % bis 36 % Vergletscherungsanteil.

Mit der gewählten Formfunktion der Dauerlinie werden u.a. die Fläche und Form des Einzugsgebiets, der Abflussregimetyp (glazial, nival, pluvial), die mittlere jährliche Niederschlagshöhe und die Starkniederschlagshöhen berücksichtigt. Mit dem Verfahren können aus Messwerten generierte Überschreitungsdauerlinien mit einer hohen Genauigkeit reproduziert werden. In 50 % der Fälle weicht die berechnete Abflussdauerlinie weniger als 10 % von den Messwerten ab.

1 Veranlassung

Für Geschiebefrachtberechnungen sind u.a. Informationen über die Größe und Dauer auftretender Abflüsse erforderlich. Bei der Berechnung von Ereignisfrachten sind Hochwasserganglinien von Interesse. Bei der Berechnung mittlerer jährlicher Geschiebefrachten wird man sich u.a. am Abflussverhalten eines Regeljahres orientieren und die mittlere jährliche Überschreitungsdauerlinie der Abflüsse verwenden. Kontinuierliche, möglichst langjährige Abflussmessungen liegen aber nur an einzelnen Gewässern vor und geben dann jeweils nur die lokalen Verhältnisse an dieser Messstation wieder.

Häufig werden an den zu untersuchenden Gewässern keine Abflussmessungen vorliegen. Für diesen Fall wurde im Rahmen der Erarbeitung einer Praxishilfe des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU) ein Vorgehen entwickelt, um repräsentative mittlere Abflussdauerlinien zu generieren. Bei diesem Vorgehen wurde Wert auf eine einfache und unkomplizierte Anwendung, auf die Verwendung allgemein zugänglicher Daten und auf die Berücksichtigung einzugsgebietsspezifischer Charakteristiken gelegt.

2 Prinzip

Das Abflussverhalten in Einzugsgebieten ist von vielen Faktoren abhängig. Neben u.a. der Größe, Form und Höhenlage des Einzugsgebiets, der Bodenbedeckung und des Vergletscherungsgrades entscheiden die Niederschlagsverhältnisse über Größe, Dauer und Häufigkeit der Abflüsse.

Überschreitungsdauerlinien (vgl. Abb. 1) lassen sich durch zwei wesentliche Informationen charakterisieren:

- Der Mittelwasserabfluss (MQ) definiert die Höhe des Abflussniveaus.
- Die Form der Dauerlinie beschreibt die Häufigkeitsverteilung der Abflüsse und definiert u.a. das Verhältnis von Abflüssen unterschiedlicher Überschreitungsdauer (z.B. Q_{30}/Q_{347}).

Für die Bestimmung des Mittelwasserabflusses können z.B. vorhandene Daten benachbarter Messstationen mittels einer Regionalisierung übertragen werden oder Niederschläge, deren Verluste und evtl. Speicherterme bilanziert werden. Für die Schweiz liegt zusätzlich ein flächendeckender Rasterdatensatz der Abflusshöhen in einer räumlichen Auflösung 500 x 500 m vor (Pfaundler & Zappa, 2006). Der Mittelwasserabfluss lässt sich also mit gängigen Methoden bestimmen.

Die Form der Dauerlinie ergibt sich nach einer Normierung der absoluten Dauerlinie durch den Mittelwasserabfluss MQ . Das Ergebnis ist eine dimensionslose Dauerlinie, welche nicht absolute Abflusswerte, sondern jeweils den Verhältniswert zum MQ angibt.

Der MQ dient somit als Skalierfaktor zur Umrechnung der absoluten in eine dimensionslose Dauerlinie und umgekehrt. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über die Entwicklung und Anwendung der Methode zur Bestimmung dimensionsloser Dauerlinien geliefert. Die Details und weiterführende Erläuterungen sind in der Praxishilfe des BAFU dokumentiert (verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen A-Z > Hydrologie > Publikationen und Studien > Studien).

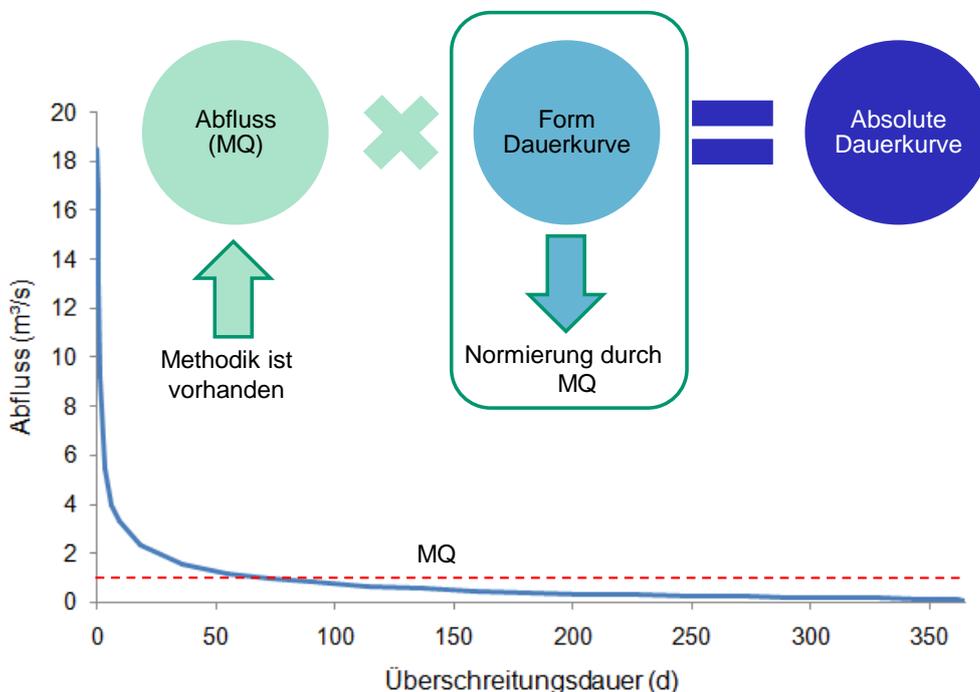


Abb. 1 Aufteilung der Dauerlinie in eine dimensionslose Form und den Skalierfaktor MQ

3 Funktion zur Darstellung der dimensionslosen Dauerlinien

Der erste Schritt bei der Methodenentwicklung war die Suche nach einer Funktion, mit der die dimensionslosen Überschreitungsdauerlinien in einer parametrisierten Form abgebildet werden können. Als Herausforderung erwiesen sich dabei die für Überschreitungsdauerlinien typischen

hohen Werte und steilen Gradienten im Bereich geringer Überschreitungsdauern und der über ansonsten tendenziell flache Kurvenverlauf mit niedrigen Werten, welche nur abschnittsweise mit Funktionen angenähert werden können. Mit dem u.a. bei Post (2004) und Ganora et al (2009) vorgeschlagenen Logarithmieren der Abflusswerte ergibt sich hingegen eine Kurvenform (Abb. 2), welche sich besser annähern lässt.

Mit der in Gl. 1 dargestellten Funktion konnte eine sehr gute Abbildung von verschiedenen gemessenen Dauerkurven im Gültigkeitsbereich von 1 h bis zu 300 d erreicht werden. Für den Geschiebetransport sind in der Regel die Spitzenabflüsse, welche nur an wenigen Tagen im Jahr erreicht oder überschritten werden, entscheidend. Mit dem vorgeschlagenen Ansatz und dem großen Gültigkeitsbereich können aber auch Dauerlinien für andere Fragestellungen bestimmt werden. Der deutliche Abfall der Abflüsse bei Überschreitungsdauern > 300 Tage kann mit der gewählten Formfunktion jedoch nicht abgebildet werden.

$$\log\left(\frac{Q(t)}{MQ}\right) = A \cdot \ln(t) + B \cdot t + C \cdot \frac{1}{t} + D \quad [1]$$

mit t : Überschreitungsdauer (d); $Q(t)$: Abfluss einer bestimmten Überschreitungsdauer; A , B , C , D : Formparameter.

Der Term $A \cdot \ln(t) + D$ definiert dabei über den gesamten Überschreitungsdauerbereich den generellen Funktionsverlauf. Der Parameter A gibt dabei die Gradienten (Verhältnis zwischen seltenen und häufigen Abflüssen) vor. Der Parameter D 'verschiebt' die Funktion in der Höhe.

Der Parameter B korrigiert den Funktionsverlauf bei größeren Überschreitungsdauern und führt zu einer Reduktion mittlerer und kleinerer Abflüsse. Der Einfluss ist erst bei Überschreitungsdauern > 50 Tage von relevanter Bedeutung.

Bei sehr geringen Überschreitungsdauern (< 1 Tag) führt der Term $A \cdot \ln(t) + D$ zu sehr hohen Abflusswerten. Der Parameter C korrigiert diese Abflusswerte nach unten.

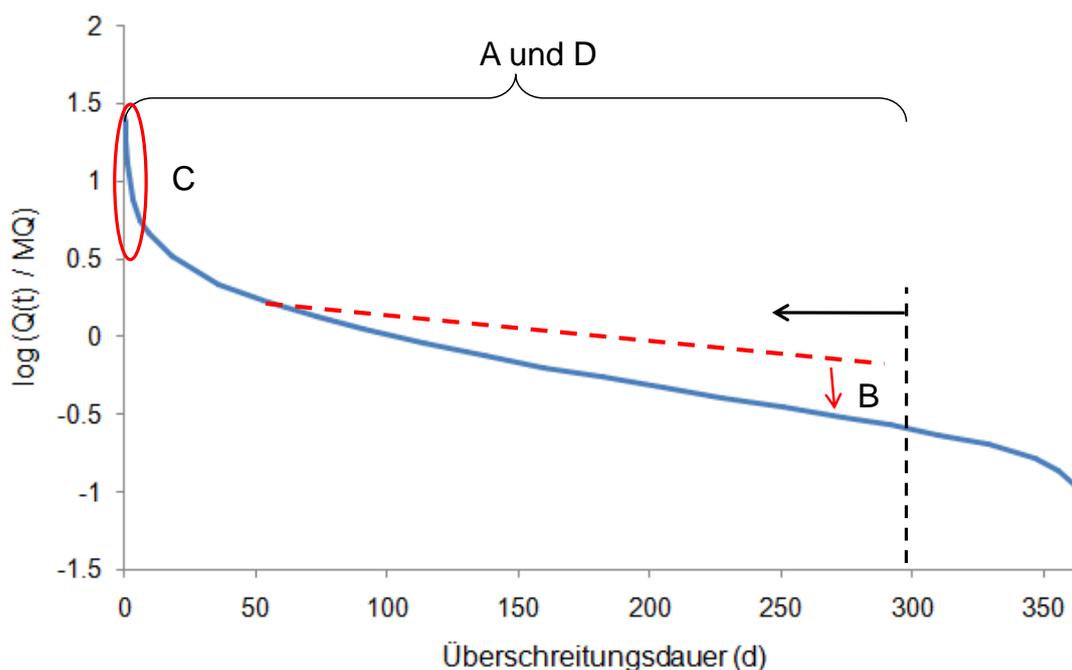


Abb. 2 Logarithmierte Funktion und Einfluss der vier Formparameter

4 Messdatenauswertung

Zur Bestimmung der vier Formparameter wurden von 47 Abflussmessstationen des BAFU und von 29 kantonalen Messstationen die Abflussdaten des Zeitraums 1974 bis 2012 (resp. nach Verfügbarkeit) bezogen. Die zeitliche Auflösung der verwendeten Daten liegt bei einer Stunde. Die durch Messstationen abgedeckten Einzugsgebiete weisen unterschiedliche Gebietseigenschaften auf (vgl. Abb. 3):

- die Einzugsgebietsflächen A_{EZG} liegen zwischen 10 km² und 700 km².
- Die mittlere Höhenlage der Einzugsgebiete liegt zwischen 450 und 2660 m ü. M.
- Der Vergletscherungsgrad liegt zwischen 0 % und 36 %.

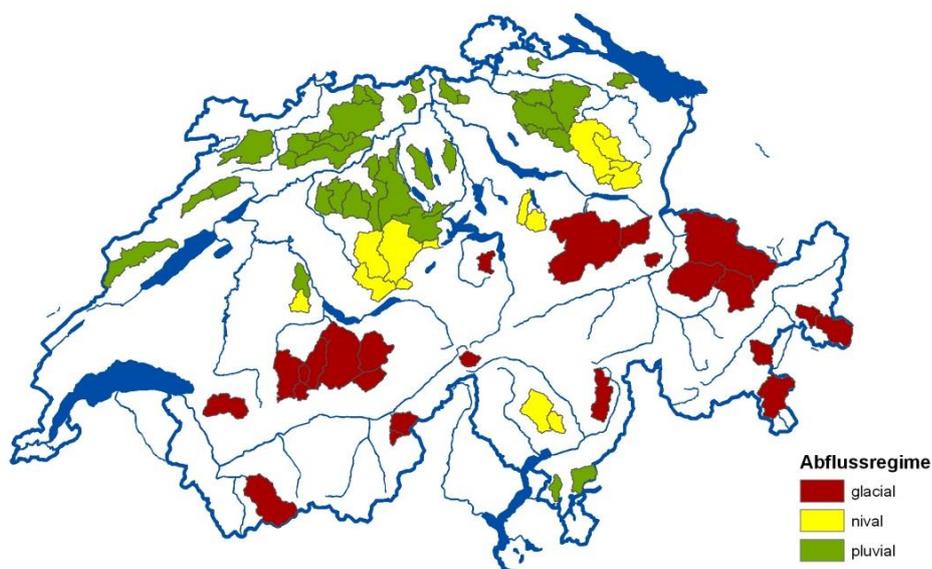


Abb. 3 Lage und Abflussregime der 76 berücksichtigten Einzugsgebiete

Für die 76 Stationen wurde jeweils anhand der gemessenen Abflüsse die mittlere jährliche Überschreitungsdauerlinie bestimmt. Nachdem diese durch den gemessenen Mittelwasserabfluss MQ normiert wurde, konnte die erhaltene Form jeweils mit der gewählten Gl. 1 angenähert und die zugehörigen Parameter A bis D bestimmt werden. Die Parameter liegen innerhalb der in Tab. 1 dargestellten Wertebereiche.

Tab. 1 Wertebereiche der für 76 Dauerlinien ermittelten Formparameter

Formparameter	von	bis
A	- 0.235	-0.057
B	-0.004	-0.0002
C	-0.026	0.005
D	0.55	1.18

5 Bestimmung der Abhängigkeiten

Nach der Auswertung der Abflussdaten wurden die Abhängigkeiten zwischen den vier Parametern und den Eigenschaften der zugehörigen Einzugsgebiete gesucht. Das Hauptaugenmerk lag dabei zunächst auf den beiden Parametern A und D , welche die Grundform definieren.

5.1 Parameter D

Bei einer Überschreitungsdauer von $t = 1\text{d}$ lässt sich die Gl. 1 aufgrund der kleinen Größenordnungen von B und C und der Beziehung $\ln(1) = 0$ deutlich reduzieren:

$$\log\left(\frac{Q_1}{MQ}\right) \sim D \quad [2]$$

Es besteht dementsprechend ein enger Zusammenhang zwischen dem normierten Wert eines übers Jahr gesehen relativ seltenen Abflusses und D . Der Parameter D wird also durch die gleichen Faktoren beeinflusst, welche auch zu hohen normierten Abflusswerten (Q_1/MQ) führen. Es sind dies im Wesentlichen nachfolgende Faktoren, welche auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden können:

- **Niederschlagsverhältnisse:** Von Interesse sind die Starkniederschläge welche sich auf hohe, seltene Abflüsse wie z.B. das Q_1 auswirken. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass bei den interessierenden hohen und relativ seltenen Abflüssen tendenziell das gesamte Einzugsgebiet, oder zumindest ein Großteil davon, an der Abflussbildung beteiligt ist. Die Niederschlagsereignisse müssen somit eine Dauer von mindestens der Konzentrationszeit t_k aufweisen. Zusätzlich interessiert auch das Verhältnis der Starkniederschläge zum mittleren jährlichen Gebietsniederschlag.
- **Fläche und Form des Einzugsgebiets:** Mit zunehmender Größe eines Einzugsgebiets nehmen die erforderlichen Regendauern bei einer flächigen Beregnung zu und die Niederschlagsintensitäten ab. Die abnehmende Wahrscheinlichkeit einer großflächigen Beregnung wird durch eine Abminderung der Punktniederschlagswerte berücksichtigt. Langgestreckte Einzugsgebiete weisen eine längere Konzentrationszeit auf. Mit dem Formfaktor nach Horton (ff), welcher das Verhältnis der Gebietsfläche zum Quadrat der Länge ist, kann die Form der Einzugsgebiete charakterisiert werden (vgl. Abb. 4). Langgestreckte Einzugsgebiete weisen kleine ff -Werte auf.

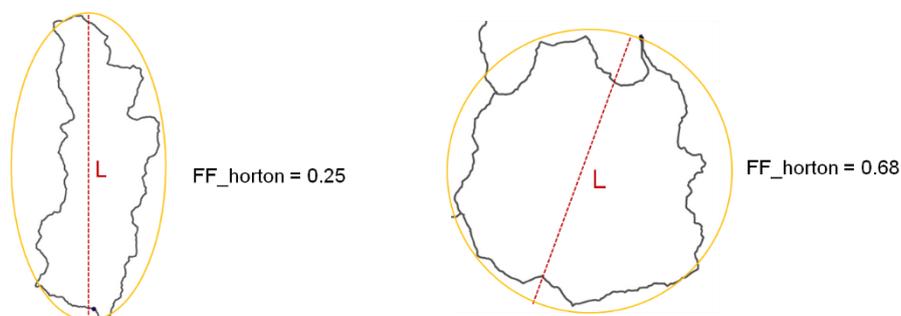


Abb. 4 Vergleich zweier Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Formfaktoren ff

- Die **mittlere Höhenlage** und der **Vergletscherungsgrad** wirken sich auf die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse aus. Die Einzugsgebiete der Schweiz lassen sich jeweils zu einem der drei unterschiedlichen Abflussregimetypen glacial, nival und pluvial zuordnen.

- **Bodenverhältnisse:** Eine exakte Beschreibung der Bodenverhältnisse erfordert einen relativ hohen Aufwand an Grundlagenenerhebungen und ergänzender Feldbegehungen. Für eine einfache und qualitative Erfassung der Bodeneigenschaften wird stattdessen der Abflussbeiwert ψ herangezogen, welcher das Verhältnis aus der Abflusshöhe (A_Q) und dem mittleren Gebietsniederschlag P_{Jahr} darstellt ($\psi = A_Q / P_{Jahr}$). Die pluvial geprägten Einzugsgebiete können zusätzlich noch nach der Höhe der Grundwasserspense unterschieden. Als Maß für die Grundwasserspense kann die Abflussspende q_{347} verwendet werden (z.B. Landeshydrologie und -geologie, 1999)

Für den Parameter D wurden die in Abb. 5 dargestellten Abhängigkeiten festgestellt. Auf der Abszisse ist das Verhältnis der maßgebenden Starkniederschlagsintensität zur Wurzel des Produkts aus Formfaktor ff und Abflussbeiwert dargestellt. In der Tendenz befinden sich große Einzugsgebiete im linken und kleinere Einzugsgebiete im rechten Bereich der Abszisse. Zwischen den verschiedenen Abflussregimetypen sind deutliche Unterschiede erkennbar.

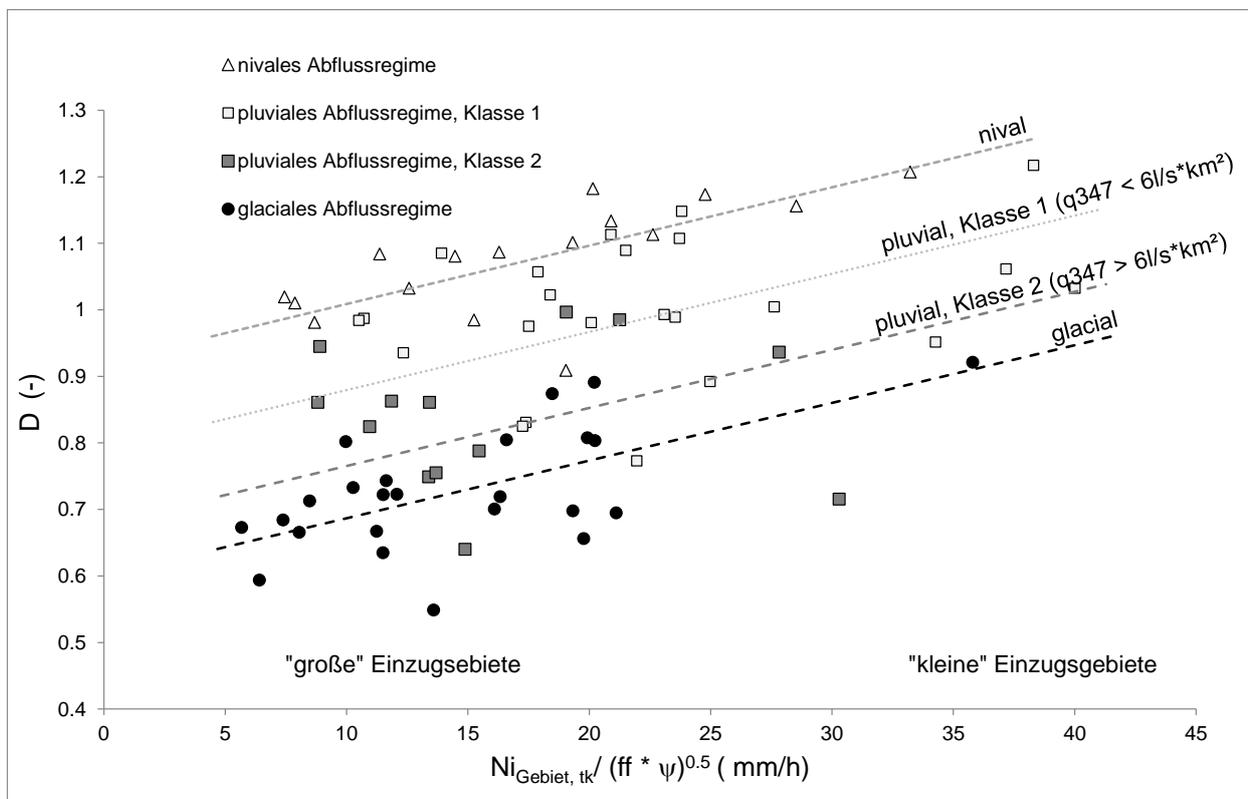


Abb. 5 Abhängigkeiten des Parameters D vom Abflussregimetyp, den Gebietseigenschaften und der Niederschlagsverhältnisse

5.2 Parameter A

Zwischen den Parametern A und D besteht eine relativ enge Korrelation (vgl. Abb. 6). Der Parameter A kann deshalb vereinfachend mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$A = -0.2261 \cdot D + 0.0573$$

[3]

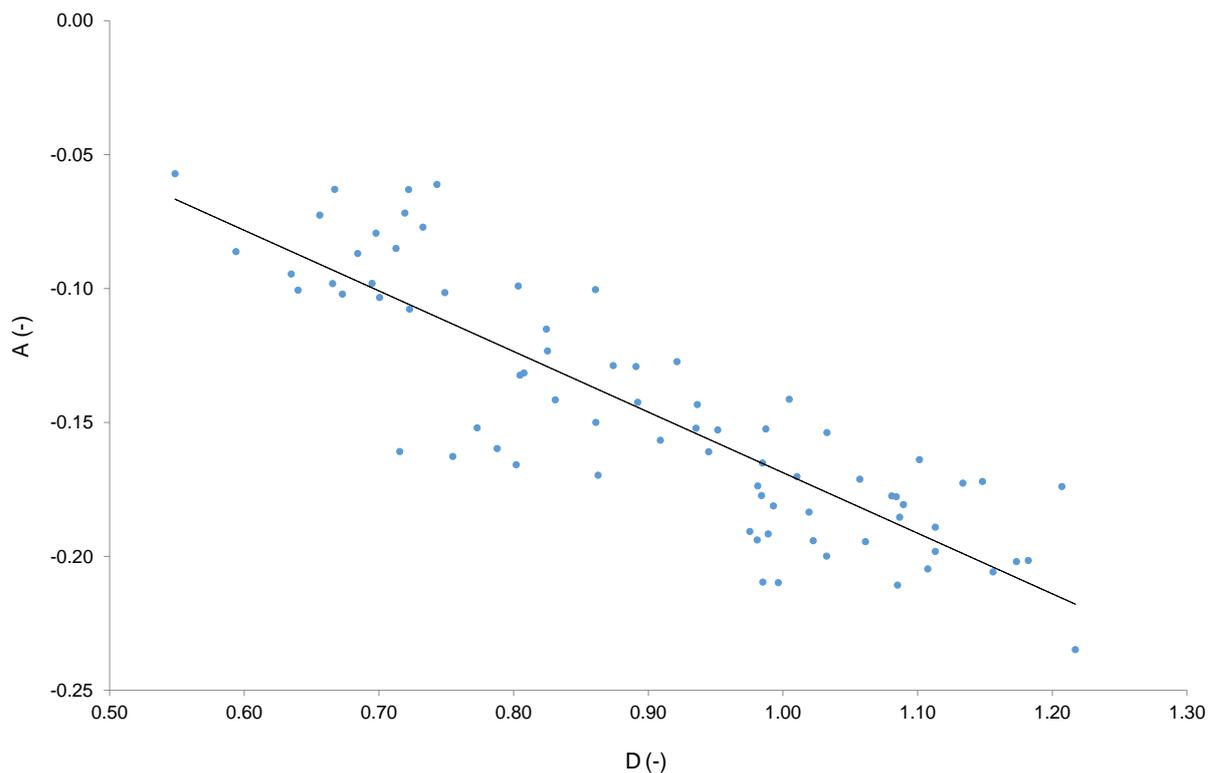


Abb. 6 Abhängigkeit zwischen den Formparametern D und A

5.3 Parameter B

Der Parameter B dient der Korrektur von Abflüssen mit größeren Überschreitungsdauern ($t > 50$ d). Ein wesentlicher Einfluss auf die Dauerkurve ergibt sich tendenziell erst bei Niedrigwasserabflüssen, welche im Rahmen der ursprünglichen Aufgabenstellung, d.h. zur Berechnung von Geschiebefrachten, nicht relevant sind.

5.4 Parameter C

Der Parameter C dient der Korrektur der Spitzenabflüsse mit sehr kurzen Überschreitungsdauern (kürzer als 12 h). Weil keine eindeutige Korrelation zwischen C einerseits und den Parametern A und D sowie anderen Einflussgrößen gefunden wurde, musste ein indirektes Vorgehen gewählt werden.

Anstatt C zu bestimmen und daraus die Spitzenabflüsse zu berechnen, wird der absolute Wert des Spitzenabflusses (dieser entspricht dem mittleren jährlichen Hochwasser MHQ) angenähert und daraus der erforderliche Wert für C , unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten Werte für A und D , rückgerechnet. Die Dauerlinie wird also an den zu erwartenden Spitzenwert „eingehängt“. Das exakte Vorgehen kann der Praxishilfe entnommen werden.

6 Berechnung der absoluten Überschreitungsdauerlinie

Nach Bestimmung der Parameter A , B , C und D sowie des Mittelwasserabflusses MQ kann die mittlere, absolute Dauerlinie mit Gl. 4 bestimmt werden:

$$Q(t) = MQ \cdot 10^{A+B \cdot t + \frac{C}{t} + D}$$

[4]

7 Genauigkeit

Mit dem erläuterten Vorgehen wurden für die 76 zur Herleitung des Verfahrens bezogenen Messstationen die jeweils mittleren Dauerlinien ermittelt und mit den Messwerten verglichen. In Abb. 7 sind für ausgewählte Überschreitungsdauern t in einer Box-Plot-Darstellung die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten dargestellt.

In 50 % der Fälle (Bandbreite des roten Rechtecks) liegt der Fehler absolut unter $\pm 10\%$. Die Abweichungen sind relativ symmetrisch um 0 % verteilt, d.h. mit dem Verfahren werden die wahren Werte etwa gleich häufig über- als auch unterschätzt. Mit dem Verfahren können also in guter Genauigkeit mittlere Überschreitungsdauerlinien ermittelt werden. In einzelnen Fällen erreichen Ausreisser (dargestellt als Kreuze) Abweichungen von über 60 %.

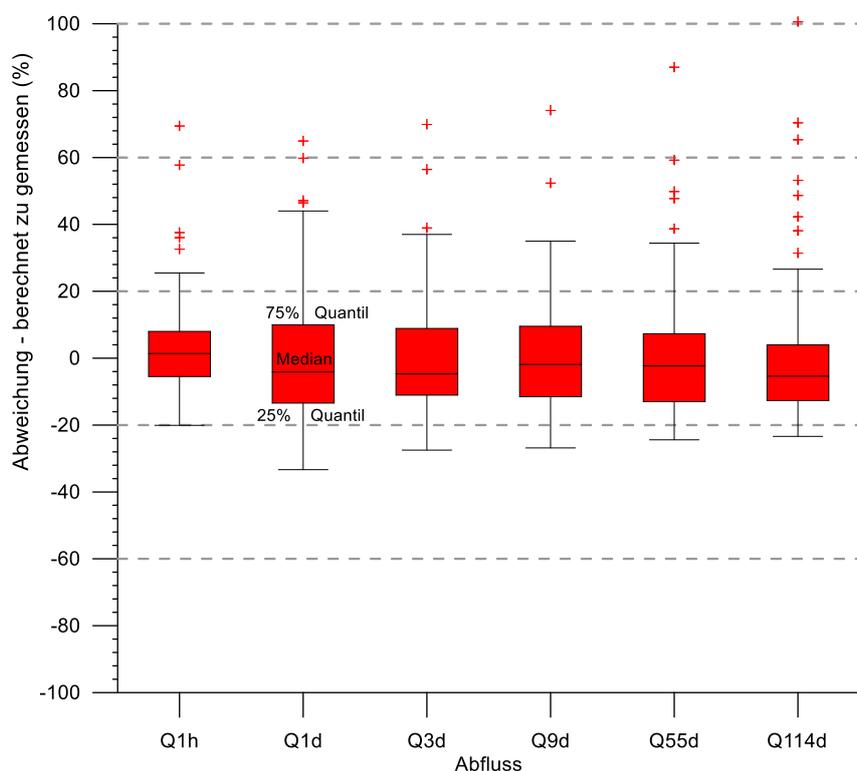


Abb. 7 Box-Plot-Darstellung der Abweichungen berechneter von gemessenen Werten

Literatur

BAFU Praxishilfe (2014). Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) erarbeitet durch Hunziker, Zarn & Partner AG, Dr. Christoph Lehmann und belop GmbH (verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen A-Z > Hydrologie > > Publikationen und Studien > Studien).

Ganora D., Claps P., Laio F. und Viglione A. (2009). An approach to estimate nonparametric flow duration curves in ungauged basins, *Water Resources Research*, Vol. 45.

Landeshydrologie und -geologie (1999): Die Abflussmenge Q347, Eine Standortbestimmung. Hydrologie Mitteilungen Nr. 27. Bern.

Pfaundler M., Zappa M. (2006). Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz. Ein optimierter Datensatz im 500 x 500 m Raster. In: Wasser, Energie, Luft, Heft 4/2006. S. 291–298. (Datensätze verfügbar unter www.bafu.admin.ch > Themen > Hydrologische Daten > Geodaten und Karten > mittlerer monatlicher und jährlicher Abfluss).

Post D.A. (2004). A New Method for Estimating Flow Duration Curves: an Application to the Burdekin River Catchment, North Queensland, Australia, The International Environmental Modelling & Software Society, iEMSs.

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Andreas Niedermayr
Hunziker, Zarn & Partner AG
Schachenallee 29, CH-5000 Aarau
andreas.niedermayr@hzp.ch