

## Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen

### Anlage 5.5 Literaturrecherche – stabile Gerinneformen bei aktiver Verbreiterung

Stand: 20. Juni 2019  
Version: 01

1	Verbreiterung – allgemeine Hinweise .....	2
2	Abschätzung stabiler Gerinnegeometrien .....	3
2.1	Mittels empirischer Regimegleichungen (aus Regressionsanalysen) .....	3
2.2	Mittels Extremalansätzen .....	5
2.3	Vergleich .....	6
2.4	Entstehung verzweigter Gerinneformen .....	7
	Literaturverzeichnis .....	10

## 1 Verbreiterung – allgemeine Hinweise

Bei der aktiven Verbreiterung werden in baulichen Eingriffen Uferbefestigungen entfernt und Hochwasserschutzdämme verlagert. Zu beachten ist dabei, dass Querschnitte nicht zu sehr verbreitert werden. Ist dies der Fall, und wird im Fluss generell Feinsediment transportiert, kann es im verbreiterten Bereich zu sehr geringen Fließgeschwindigkeiten, zur Ablagerung von Feinsedimenten und damit einhergehend zu einer Kolmatierung der Flusssohle kommen. Bei verstärkter landwirtschaftlicher Aktivität in Einzugsgebieten sollte dies beachtet werden.

Wird eine Flussverbreiterung hauptsächlich passiv angegangen, so bedeutet dies, dass lediglich Befestigungsstrukturen entfernt werden, und es dem Fluss überlassen wird sich selbsttätig zu verbreitern. Bei diesem Prozess fällt, vor allem zu Beginn, viel zusätzliches Sediment an. Es ist darauf zu achten, dass dies im Unterlauf zu keinen Problemen führt. Der Verbreiterungsprozess kann unter Umständen sehr lange dauern. Wenn der Abfluss durch Dämme flussauf geregelt ist, und Spitzen gekappt werden, noch umso länger. Auch in Flüssen in denen generell ein Geschiebedefizit besteht, kann es lange dauern bis sich auf passive Weise, ohne viel Nachhelfen, verzweigte, breite Querschnitte ausbilden.

Für solche Fälle wird empfohlen einen Mittelweg zu wählen, bei welchem Flussverbreiterungen künstlich (aktiv) begonnen werden. Der Fluss wird durch Eingriffe verbreitert, allerdings auf ein Maß das unterhalb der Breite liegt, welche sich im Fluss, im natürlichen Gleichgewicht, einstellen würde. Die Ufer werden nicht befestigt. Bei nachfolgenden größeren Abflüssen kommt es zu einer weiteren Verbreiterung, bei welcher sich der Fluss Geschiebe an den Ufern holt. Die Mengen werden aber nicht so groß, wie bei einer komplett natürlichen Verbreiterung und sollten dann weniger Probleme im folgenden Unterlauf verursachen. Außerdem kann so schneller ein gewünschter Zustand erreicht werden, als bei einer komplett passiven Maßnahme.

Bei nur lokalen Aufweitungen ist zu beachten, dass sie allerdings, sowohl flussauf als auch flussab der Maßnahmen zu Erosionen führen können. Flussauf geschieht dies dadurch, dass sich der Wasserspiegel im erweiterten Bereich senkt, und das Gefälle flussauf steigt. Flussab geschieht es da bei vielen Abflüssen mehr Material im erweiterten Bereich liegen bleibt und im weiteren Verlauf ein größeres Defizit entsteht. Um dem Problem der Erosion flussauf entgegenzuwirken wird eine stufenweise Erweiterung empfohlen (Requena et al., 2005). Zur Lösung der Problematik einer verstärkten Erosion flussab empfiehlt Hunzinger (2004), dass im Bereich der Erweiterung Material aus dem umliegenden Vorland dem Fluss zugegeben wird.

Dies wird insbesondere bei Flüssen mit durch die Regulierungen bedingter Erosionstendenz empfohlen.

Um die Dimension einer Verbreiterung richtig wählen zu können ist es wichtig die, im Hinblick auf die Einzugsgebietscharakteristik, stabile Gerinneausformung zu kennen. Es ist wichtig zu wissen ob der Fluss generell eine mäandrierende oder eine verzweigte Form annehmen würde und welche mittlere Breite sich einstellen würde. Die Kenntnis der Parameter ist umso wichtiger, umso „aktiver“ (mittels baulicher Maßnahmen) der Eingriff angelegt ist ([http://wiki.reformrivers.eu/index.php/Widen\\_water\\_courses](http://wiki.reformrivers.eu/index.php/Widen_water_courses), Zugriff am 20.6.2019).

## 2 Abschätzung stabiler Gerinnegeometrien

Die Abschätzung einer stabilen Gerinnegeometrie entsprechend den Einzugsgebietsverhältnissen kann auf verschiedene Arten erfolgen:

### 2.1 Mittels empirischer Regimegleichungen (aus Regressionsanalysen)

Vorteile dabei sind, dass sie meist einfach anzuwenden sind. Es ist allerdings Acht zu geben, dass ihre Gültigkeit auf den Bereich für den sie ermittelt wurden streng begrenzt ist. Beispiele hierfür sind die Gleichungen von Hey and Thorne (1986), Parker et al. (2007) oder Thayer (2016).

Millar (2005) hat den Bereich in dem die meisten so ermittelten Gleichungen liegen zusammengefasst:

$$W = aQ^{0.45-0.55} \quad D = bQ^{0.33-0.40} \quad S = cQ^{-(0.2-0.43)}$$

Für  $Q$  ist ein formbestimmender Durchfluss zu wählen. Oft wird dafür der ein bordvoller Durchfluss angesetzt (i.e. Millar, 2005; Parker et al., 2007). Alternativen sind das Jahresabflussmittel (i.e. Church und Ferguson, 2015), oder ein Abfluss von einer Jährlichkeit von 2. Die Konstante wird zum Beispiel in Hey and Thorne (1986) in Zusammenhang mit dem Geschiebeaufkommen gesetzt und mit dem Uferbewuchs. Sie kann auch in Zusammenhang mit der Korngröße oder dem Ton-Schluffanteil im Ufer zusammenhängen (Millar, 2005). Knighton (1998) wies darauf hin, dass auch die Klimazone von Bedeutung ist, und dass generell Flüsse der humiden Zone größere Sedimenttransportkapazitäten haben und auch größere Gerinnebreiten, zumindest Flüsse mit kleinen bis mittleren Einzugsgebietsgrößen. Er nannte den Durchfluss und das Sedimentaufkommen als die wesentlichen verantwortlichen Einflussfaktoren für die entstehende stabile Gerinneform. Werden kürzere Zeiträume betrachtet ist auch das Talgefälle eine wichtige, unabhängige Variable (Knighton, 1998).

Exemplarisch wird im Folgenden genauer auf die Arbeit von Thayer (2016) eingegangen. Seine Arbeit wurde ausgewählt, da es sich um die aktuellste handelt und da sie in umfassender Weise auf vorangegangene Arbeiten Bezug nimmt.

Thayer (2016) hat Daten einiger vorangegangener Studien (Schumm, 1960; Chitale, 1970; Church and Road, 1983; Hey and Thorne, 1986; Annable, 1996; McCandless, 2003; Lawlor, 2004; Sherwood and Huitger, 2005; Kleinhans and van den Berg, 2011; Thayer, 2012) verwertet um eine eigene Formel abzuleiten. Daher verfügte er über eine größere Datenbasis als dies in den meisten vorangegangenen Arbeiten der Fall war. Von bisherigen Arbeiten die ebenfalls auf Grundlage sehr großer Datenmengen erstellt wurden unterscheidet sich seine Studie darin, dass die Gleichungen speziell für Kiesflüsse oder Sandflüsse entwickelt wurden. Generell gibt er einen Überblick über Formeln verschiedener Autoren, und welche Einflussfaktoren auf den Charakter einer stabilen Gerinnegeometrie sie jeweils berücksichtigen.

- Die Korngröße geht ein bei u. A.: Hey und Thorne (1986), Millar (2005) und Parker (2007)
- Das Geschiebeaufkommen geht ein bei: Millar (2005)
- Der Charakter der Ufervegetation wird berücksichtigt bei: Hey und Thorne (1986), Millar (2005)

Für die Erstellung der Gleichungen wurden die Daten in jene aus Sandflüssen und jene aus Kiesflüssen unterteilt. Die Gleichung die er für Kiesflüsse erhielt liefert folgenden Zusammenhang für eine stabile Breite, ermittelt aus einem maßgebenden Durchfluss, einer Korngröße und einem Gefälle.  $w_{bf}$  steht dabei für „bankfull“ oder bordvoll.

$$w_{bf} = 2.576 Q_{bf}^{0.443} D_{50}^{0.043} S^{-0.109}$$

$w_{bf}$  ist die bordvolle Breite [m].  $Q_{bf}$  ist der bordvolle Abfluss [m<sup>3</sup>/s].  $D_{50}$  ist der Median der Korndurchmesser [m] und  $S$  ist das mittlere Sohlgefälle. Man sieht, dass das Gefälle und der Durchfluss entscheidender für die Größe der stabilen Breite sind als die Korngröße. Allerdings ist dieses Ergebnis umstritten. Thayer (2016) erwähnt, dass andere Autoren auf einen größeren Einfluss der Korngrößen hinwiesen. Er weist auch darauf hin, dass Gleichungen in welchen das Gefälle als unabhängige Variable eingeht, dazu tendieren bessere Ergebnisse für die Breitenabschätzung zu liefern. Vor allem wenn „Engineering timescales“ betrachtet werden, wird von Thayer (2016), wie auch von Millar (2005) empfohlen, das Gefälle als unabhängige Variable anzusetzen.

Ungenauigkeit geht am meisten ein durch ungenaues Wissen über die Uferstabilität und das tatsächliche Sedimentaufkommen. Aus Thayer's (2016) Arbeit ging hervor, dass die tatsächliche Korngröße des Materials demgegenüber von geringerer Bedeutung war. Er gibt an, dass eine grobe Abschätzung der Korngrößen ausreichend und zulässig ist. Der Autor empfiehlt seine Gleichungen als Ansatz um die Dimensionen stabiler Formen künstlich geschaffener Gerinne zu ermitteln.

## 2.2 Mittels Extremalansätzen

„Da es nicht möglich ist unter Ausnutzung allein von bekannten Zusammenhängen, wie jener von Fließformeln, genügend Bestimmungsgleichungen zu formulieren, wird noch die zusätzlich eine Forderung zur Minimierung oder Maximierung einer charakteristischen Größe eingeführt.“ (Schmautz, 2003)

Regimemodelle haben einen breiteren Gültigkeitsbereich. In ihnen ist zum Beispiel auch der Charakter der Ufervegetation explizit berücksichtigt oder die Stabilität des Ufermaterials. Auch sie sind nicht komplett physikalisch basiert, sondern unterliegen immer einer „extremal hypothesis“, wie zum Beispiel der Annahme, dass der Fließwiderstand eines Flusses ein Maximum wird oder die maximale Effizienz im Sedimenttransport erreicht wird. Ein Beispiel hierfür ist die Arbeit von Millar (2005). Sie wurde als Beispiel ausgewählt, da sie sich speziell mit Kiesflüssen mit beweglicher Sohle und relativ stabilen Ufern auseinandersetzt:

Die Gleichungen von Millar (2005) wurden für Kiesflüsse mit beweglicher Sohle und stabilen Ufern entwickelt. Das Gefälle in den Gleichungen kann als abhängige Variable oder als vorgegebene Konstante behandelt werden. Wird es als vorgegebene Konstante angenommen, muss die Geschiebefracht, welche im Feld sehr schwer zu messen ist, nicht bekannt sein um auf eine Lösung zu kommen. Für diesen Fall wurden von ihm folgende Gleichungen entwickelt:

$$W^* = 16.5Q^{*0.7}S^{0.6}\mu'^{-1.10}; D^* = 0.125Q^{*0.16}S^{-0.62}\mu'^{0.64}$$

$Q^*$  ist ein dimensionsloser Durchfluss. Er wird ermittelt als  $Q^* = Q / (d_{50}^2 \sqrt{gd_{50}(s-1)})$ .  $d_{50}$  ist der Median der Korngrößenverteilung des Geschiebes.  $s$  ist dessen spezifisches Gewicht, das mit  $2.65 \text{ kg/cm}^3$  angenommen werden kann.  $\mu'$  steht für  $\tau_{bankc} / \tau_{bedc}$ , mit  $\tau_{bankc}$  [N/m<sup>2</sup>] als die kritische Schubspannung des Ufermaterials, und  $\tau_{bedc}$  [N/m<sup>2</sup>] als die kritische Schubspannung des Sohlmaterials. Bei Ufern ohne Vegetation die ebenfalls aus Kies bestehen, kann der Wert mit 1 angesetzt werden. Eine Alternative bei komplexeren Verhältnissen ist es den Wert an ein paar bekannten stabilen Geometrien, sofern vorhanden, zu kalibrieren.

$W^*$  ist eine dimensionslose Breite, die als  $W/d_{50}$  berechnet wird und  $D^* = D/d_{50}$ .  $S$  ist das mittlere Sohlgefälle. In diesen Gleichungen kommt der Korngrößenverteilung, dem Geschiebeaufkommen und der Stabilität der Ufer Bedeutung zu. Wird die Form mit vorgegebener Sohle verwendet, muss für die erhaltene stabile Querschnittsform aus den Gleichungen dann eine Geschiebetransportkapazität errechnet werden. Damit muss dann überprüft werden ob sie das, im Gerinne tatsächlich anfallende, Geschiebe ausreichend weitertransportieren kann. Nur dann kann eine Stabilität angenommen werden.

Zur Verlässlichkeit: Über alle Ansätze ist die Potenz im Verhältnis zu  $Q$  ähnlich. Was bei verschiedenen Ansätzen mehr variiert ist die Konstante. Ist diese Unbekannt, können auf verschiedene Weisen ermittelte Breiten noch immer über eine Zehnerpotenz variieren. Allerdings liegen auch mehrere Breiten des Gerinnes sehr nahe am Optimum bzw. führen zum Einstellen eines zumindest beinahe optimalen Gefälles. Das bedeutet, dass für einen ganzen Bereich von Breiten damit zu rechnen ist, dass sich stabile Verhältnisse einstellen können (Millar, 2005). Millar (2005) hat auch Gleichungen entwickelt in welchen das Geschiebeaufkommen eingeht, und das Gefälle eine abhängige Variable ist. Das Geschiebeaufkommen muss dafür entweder gemessen oder abgeschätzt werden:

$$W^* = 28.1Q^{0.5}C^{*-1.12}\mu'^{-1.66}$$

$$D^* = 0.0764Q^{0.37}SC^{*1.16}\mu'^{1.22}$$

$$S = 1.98Q^{*-0.33}C^{*-1.86}\mu'^{-0.93}$$

$C^*$  errechnet sich dabei als  $C^* = -\log_{10}C$ .  $C$  ist die Sedimentkonzentration im Abfluss. Millar (2005) verwendete für die Abschätzung des Geschiebetriebs die Formel nach Parker (1990).

### 2.3 Vergleich

Eaton und Church (2007) haben an verschiedenen nordamerikanischen Flüssen verglichen, welche Formeln sie aus empirischen Daten ableiteten und welche Zusammenhänge sie nach der Anwendung rationaler Regimetheorien erhielten. Nach der Regimetheorie erhielten sie die Formeln (Konstanten und Exponenten) in Abhängigkeit vom Gefälle  $S$ , einem charakteristischen Abfluss  $Q$  [ $m^3/s$ ], einem Rauheitsparameter, für den sie Manning's  $n$  [ $s/m^{(1/3)}$ ] verwendeten und einer charakteristischen Korngröße wie den  $D_{50}$  [ $m$ ]. Ihr Kriterium („extremal hypothesis“) war, dass die maximale Sedimenttransportkapazität erreicht wurde.

Die Folgenden Gleichungen zeigen die Ergebnisse, jeweils einmal für die empirisch hergeleiteten Gleichungen aus Feldmessungen am jeweiligen Gerinne, und einmal aus der Regimetheorie abgeleitete Ergebnisse:

Colorado River

$$W^* = 32.4Q^{*0.34} \quad (\text{empirisch aus Feldmessungen})$$

$$W^* = 32.3Q^{*0.34} \quad (\text{basierend auf der Regimetheorie})$$

$$W^* = W/D_{50}, Q^* = Q/(\sqrt{(s-1)gD_{50}D_{50}^2})$$

$s$  ist das spezifische Gewicht des Geschiebes [kg/m<sup>3</sup>].

Fraser River Anabanches

$$W = 2.60Q^{0.60} \quad (\text{empirisch aus Feldmessungen})$$

$$W = 2.60Q^{0.57} \quad (\text{basierend auf der Regimetheorie})$$

Columbia River Anabanches

$$W = 3.24Q^{0.64} \quad (\text{empirisch aus Feldmessungen})$$

$$W = 2.13Q^{0.74} \quad (\text{basierend auf der Regimetheorie})$$

Colorado Mountain Streams

$$W = 4.17Q^{0.50} \quad (\text{empirisch aus Feldmessungen})$$

$$W = 3.38Q^{0.54} \quad (\text{basierend auf der Regimetheorie})$$

## 2.4 Entstehung verzweigter Gerinneformen

Zu einer Verzweigung des Abflusses kommt es wenn der Abfluss sehr seicht wird und schon kleine Unterschiede in der Höhe der Sohlage zu Abflusskonzentrationen an einer Stelle führen können (Church und Ferguson, 2015). Wenn Flüsse ungewöhnlich steil sind für ihren Abfluss, kommt es eher zum Entstehen von Verzweigungen (Leopold und Wolman, 1957, in Church und Ferguson, 2015). Dies erklärt sich dadurch, dass dann die Schubspannungen im Vergleich zu Korngrößen der Sohle größer sind (Carson, 1984) oder im Vergleich zur Stabilität der Ufer (Ferguson, 1987, in Church und Ferguson, 2015). Knighton (1998) erklärte das Entstehen von Verzweigungen oder Mäandern als Alternative zu einer Gefällsanpassung des Flusses, wenn das Talgefälle unveränderlich ist. Parker (1976) definierte einen Schwellenwert für das Produkt aus Gefälle und Breiten-Tiefen Verhältnis, ab welchem es zu Verzweigungen im Gerinne kommt (Abbildung 1). Bei weitgestuften Kornverteilungen kann es schneller zum Entstehen von verzweigten Formen kommen (Knighton, 1998).

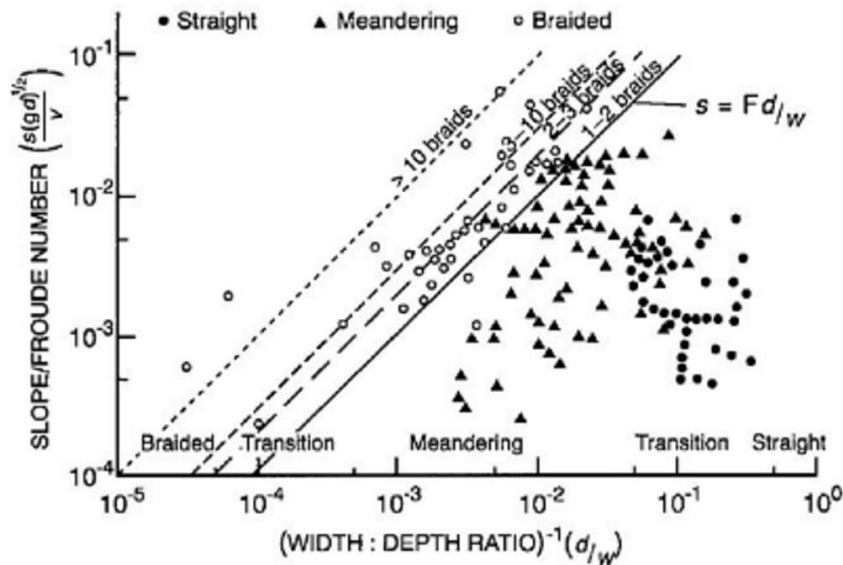


Abbildung 1: Gerinneformen in Abhängigkeit von Gefälle und Breiten-Tiefen Verhältnis (Parker, 1976)

$s$  ist das Gefälle,  $g$  die Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ],  $d$  die Fließtiefe [m],  $w$  die Gerinnebreite [m] und  $v$  die Fließgeschwindigkeit [m/s]. Nach einem ähnlichen Ansatz, in dem allerdings auch die Korngröße berücksichtigt wird, hat auch DaSilva (1991) ein Diagramm zur Einteilung erstellt (Abbildung 2), welches von Zarn (1997) weiterentwickelt wurde (Abbildung 3).

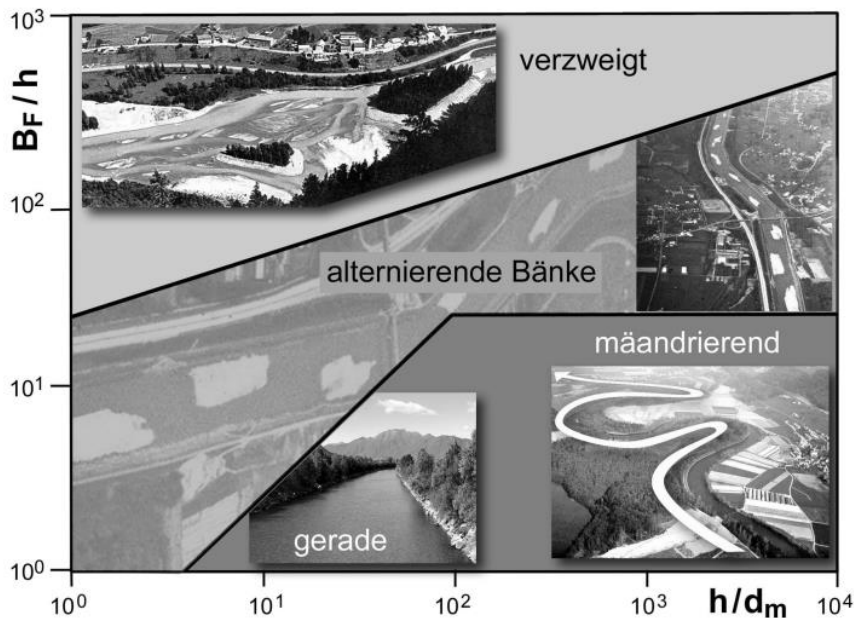


Abbildung 2: Gerinneform in Abhängigkeit von der relativen Flussbettbreite und der relativen Abflusstiefe nach DaSilva (1991) (in Marti und Bezzola, 2003)



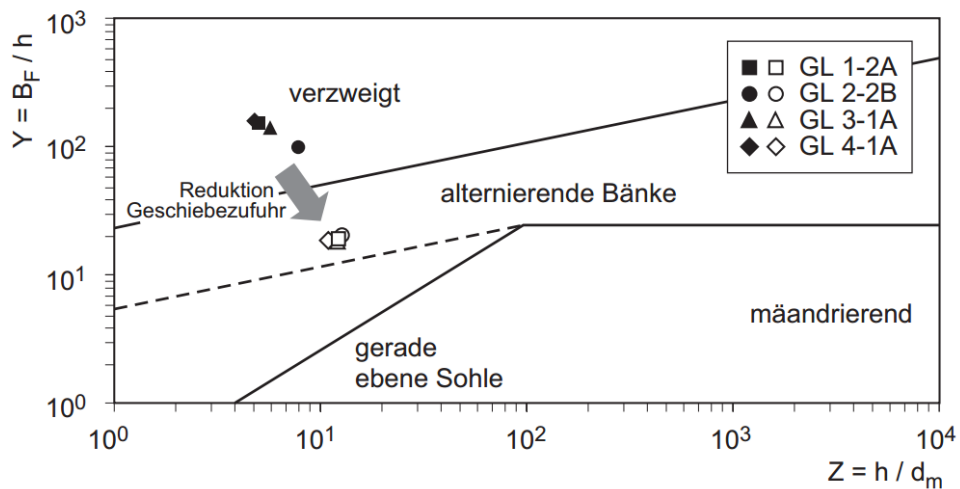


Abbildung 3: Gerinneform in Abhängigkeit von der relativen Flussbettbreite und der relativen Abflusstiefe – Anpassung des Ansatzes von DaSilva (1991) nach Zarn (1997) (in Marti und Bezzola, 2003)

$B_F$  ist die bordvolle Gerinnebreite [m],  $h$  die Fließtiefe [m],  $d_m$  ist der charakteristische Korndurchmesser des Sohlmaterials [m]. Zarn (1997) schlug basierend auf seinen Modellversuchen eine Anpassung der Begrenzungslinie zwischen gerader Sohle und alternierenden Bänken vor (strichlierte Linie in Abbildung 3 (in Marti und Bezzola, 2003)).

## Literaturverzeichnis

- Annable, W.K. (1996): Database of Morphologic Characteristics of Watercourses in Southern Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources: Peterborough.
- Carson, M.A. (1984): The meandering-braided river threshold – A reappraisal. *Journal of Hydrology*, 73, 315-334.
- Chitale, S.V., (1970): River channel patterns. *Journal of the Hydraulics Division*, 96 (HY1), 201-221.
- Church, M., Ferguson, R.I. (2015): Morphodynamics: Rivers beyond steady state. *Water Resources Research*, 51(4).
- Church, M., Rood, K. (1983): Catalogue of Alluvial River Channel Regime Data. Department of Geography, University of British Columbia: Vancouver.
- DaSilva, A.M.A.F. (1991): Alternate bars and related alluvial processes. Thesis of Master of Science, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- Eaton, B.C., Church, M. (2007): Predicting downstream hydraulic geometry: A test of rational regime theory. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 112(F3).
- Ferguson, R.I. (1987): Hydraulic and sedimentary controls of channel pattern, *River Channels: Environment and Process*, edited by K. S. Richards, pp. 129-158, Blackwell, Oxford, U.K.
- Hey, R.D., Thorne, C.R. (1986): Stable Channels with Mobile Gravel Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986, 112(8), 671-689.
- Hunziger, L. (2004): Flussaufweitungen: Möglichkeiten und Grenzen. *Wasser Energie Luft*, 96, 243-249.
- Kleinhans, M.G., van den Berg, J.H. (2011): River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 721-738.
- Knighton, D. (1998): *Fluvial Forms and Processes, A New Perspective*. Hodder Arnold, London.
- Lawlor, S.M. (2004): Determination of channel-morphology characteristics, bankfull discharge, and various design-peak discharges in Western Montana. Report 2004-5263, Water Resources Investigations, United States Geological Survey.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. (1957): River channel patterns: Braided, meandering and straight. U. S. Geological Survey Professional Paper, 282-B, pp. 39-85.

- Marti, C., Bezzola, G.R. (2003): Sohlenmorphologie in Flussaufweitungen. Jahrestagung der SGMG in Erstfeld, Turbulenzen in der Geomorphologie, Organisiert von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- McCandless, T.L., (2003): Maryland stream survey: bankfull discharge and channel characteristics in the Coastal Plain hydrologic region. Report CBFO-S03-02, Chesapeake Bay Field Office, United States Fish and Wildlife Service.
- Millar, R.G. (2005): Theoretical regime equations for mobile gravel-bed rivers with stable banks. *Geomorphology*, 64 (3-4), (2005), pp 207-220.
- Parker, G. (1976): On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. *Journal of Fluid Mechanics*, 76, 457-480.
- Parker, G. (1990): Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 20 (4) (1990), pp. 417-436.
- Requena, P., Bezzola, G. R., Minor, H.-W. (2005): Aufweitungen in erodierenden Flüssen. *Wasser Energie Luft*, 97, 183-189.
- Schmautz, M., (2003): Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke – Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München.
- Schumm, S.A. (1968): River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. United States Geological Survey Professional Paper 598.
- Sherwood, J.M., Huitger, C.A. (2005): Bankfull characteristics of Ohio streams and their relationship to peak streamflows. Scientific Investigations Report 2005-5153. United States Geological Survey.
- Thayer, J.B. (2012): Downstream Variability of Fluvial Form, Process, and Character in a Small Deglaciaded Watershed, Southern Ontario. Masters Thesis, The University of Toronto.
- Thayer, J.B. (2016): Downstream Relations for Single-Thread Channels. River Research and Applications. 2016.
- Zarn, B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilung Nr. 157, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich, Zürich, pp. 240.