

Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr. 1 – Bern 2001



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern

M. Spreafico, H.P. Hodel, H. Kaspar

Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque
Nr 1. – Bern 2001

Zu beziehen unter Art. 804.501d bei BBL/EDMZ, 3003 Bern, www.admin.ch/edmoz



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Vorwort

Die Kenntnis der Fließwiderstände in natürlichen Gerinnen ist von fundamentaler Bedeutung für die Lösung mannigfaltiger Probleme des Wasserbaues. So beinhalten alle hydraulischen Berechnungen in irgendeiner Form die Rauigkeitswerte des Gerinnes.

Im Gegensatz zu den künstlichen Gerinnen, für die Rauigkeitswerte vielfach aus Tabellen oder Diagrammen abgeschätzt werden können, braucht es bei den natürlichen Gerinnen langjährige Erfahrung, um brauchbare Abschätzungen der Rauigkeit machen zu können. Und sogar diese Abschätzungen sind mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Erschwerend kommt hinzu, dass es in der Schweiz sehr wenige Flussabschnitte gibt, deren Rauigkeit aufgrund von Felduntersuchungen experimentell bestimmt worden ist.

Das Ziel der vorliegenden Publikation ist das Schliessen dieser Lücken. An ausgesuchten, unterschiedlichen Flussabschnitten in der Schweiz werden die Rauigkeiten aufgrund von Feldmessungen mit verschiedenen Methoden bestimmt und dargestellt. Diese Rauigkeitswerte und die zugehörigen Beschreibungen der Flussstrecke sollen helfen, die Abschätzung der Rauigkeit an ungemessenen natürlichen Gerinnen besser vornehmen zu können.

Seitens der Landeshydrologie waren neben verschiedenen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen insbesondere die Herren Prof. M. Spreafico und Dr. H.P. Hodel verantwortlich für die Durchführung der Untersuchungen. Sie wurden von den Herren H. Kaspar, Basler & Hofmann, R. Bezzola, Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH-Zürich und M. Schilling, Ingenieurbüro Hunziker, Zarn & Partner AG tatkräftig unterstützt. Ihnen allen sprechen wir unseren Dank aus.

Dr. Ch. Furrer

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	3
INHALTSVERZEICHNIS	5
ZUSAMMENFASSUNG	9
RÉSUMÉ	11
RIASSUNTO	13
SUMMARY	15
1. EINLEITUNG	17
1.1 PROBLEMBESCHREIBUNG.....	17
1.2 ZIEL DER PUBLIKATION.....	17
1.3 VORGEHEN.....	17
1.4 ÜBERSICHT DER AUSGEWÄHLTEN FLIESSSTRECKEN	16
1.5 WASSERSPIEGELMESSUNGEN.....	18
1.6 ABFLUSSMESSUNGEN	20
1.7 GERINNGEOMETRIE	20
1.8 BERECHNUNG DER FLIESSWIDERSTÄNDE	20
1.9 BESTIMMUNG DER FLIESSWIDERSTÄNDE MIT SALZVERDÜNNUNGS- MESSUNGEN, VERSUCHSSTRECKEN 9 UND 10	21
1.10 BESTIMMUNG DER FLIESSWIDERSTÄNDE MIT SALZVERDÜNNUNGS- MESSUNGEN UND PHOTOGRAMMETRISCHEN AUFNAHMEN , VERSUCHSSTRECKEN 11 UND 12.....	21
1.11 DOKUMENTATION DER FLIESSWIDERSTÄNDE	22
2. DER RAUIGKEITSKOEFFIZIENT NACH STRICKLER	23
2.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER FLIESSFORMELN	23
2.2 BESTIMMUNG DES K_{ST} -WERTES	23
2.2.1 <i>Einfluss der Querprofilform</i>	24
2.2.2 <i>Einfluss ungleichmässig über den benetzten Umfang verteilter Rauigkeit</i>	24
2.2.3 <i>Einfluss der relativen Überdeckung (relative Rauigkeit)</i>	26
2.3 ANWENDUNGSBEREICH DER FORMEL VON STRICKLER.....	28
3. FLIESSWIDERSTÄNDE IN AUSGEWÄHLTEN GEWÄSSERN	31
3.1 MINSTER BEI EUTHAL.....	31
3.1.1 <i>Übersicht</i>	31

3.1.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	32
3.1.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	34
3.1.4	<i>Berechnungen</i>	34
3.1.5	<i>Bemerkungen</i>	35
3.2	SUZE BEI SONCEBOZ	37
3.2.1	<i>Übersicht</i>	37
3.2.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	38
3.2.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	40
3.2.4	<i>Berechnungen</i>	40
3.2.5	<i>Bemerkungen</i>	41
3.3	GÜRBE BEI BELP	43
3.3.1	<i>Übersicht</i>	43
3.3.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	44
3.3.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	47
3.3.4	<i>Berechnungen</i>	47
3.3.5	<i>Bemerkungen</i>	47
3.4	EMME BEI BURGDORF	49
3.4.1	<i>Übersicht</i>	49
3.4.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	50
3.4.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	52
3.4.4	<i>Berechnungen</i>	52
3.4.5	<i>Bemerkungen</i>	52
3.5	GLATT BEIM AUSFLUSS DES GREIFENSEES	55
3.5.1	<i>Übersicht</i>	55
3.5.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	56
3.5.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	58
3.5.4	<i>Berechnungen</i>	58
3.5.5	<i>Bemerkungen</i>	58
3.6	LÜTSCHINE BEI GSTEIG	61
3.6.1	<i>Übersicht</i>	61
3.6.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	62
3.6.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	64
3.6.4	<i>Berechnungen</i>	64
3.6.5	<i>Bemerkungen</i>	65
3.7	BIRSE BEI MOUTIER	67
3.7.1	<i>Übersicht</i>	67
3.7.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	68
3.7.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	71
3.7.4	<i>Berechnungen</i>	71
3.7.5	<i>Bemerkungen</i>	72
3.8	THUR BEI STEIN	73
3.8.1	<i>Übersicht</i>	73
3.8.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	74
3.8.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	76
3.8.4	<i>Berechnungen</i>	77
3.8.5	<i>Bemerkungen</i>	78
3.9	BRÜTTENBACH IM BRÜTTENTAL (UMLAGERUNGSSTRECKE)	79
3.9.1	<i>Übersicht</i>	79
3.9.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	80
3.9.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	82
3.9.4	<i>Berechnungen</i>	83
3.9.5	<i>Bemerkungen</i>	83

3.10	BRÜTTENBACH IM BRÜTTENTAL (FELSSTRECKE).....	85
3.10.1	<i>Übersicht</i>	85
3.10.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	86
3.10.3	<i>Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit</i>	88
3.10.4	<i>Berechnungen</i>	89
3.10.5	<i>Bemerkungen</i>	90
3.11	KRUMMBACH BEI KLUSMATTEN	91
3.11.1	<i>Übersicht</i>	91
3.11.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	92
3.12	WALIBACH BEI HOMATTA.....	95
3.12.1	<i>Übersicht</i>	95
3.12.2	<i>Hydrologische, morphologische und hydraulische Berechnungen</i>	96
4.	SCHLUSSBEMERKUNGEN	99
5.	LITERATURVERZEICHNIS	101

Zusammenfassung

Bei der Beurteilung und Planung von Hochwasserschutzmassnahmen gilt es immer wieder Wasserspiegelberechnungen auszuführen. Dabei kommen vielfältige Theorien und Rechenprogramme zur Anwendung. Bei allen diesen Berechnungsmethoden ist es immer noch nötig, für die Fliesswiderstände Parameter zu schätzen und die Berechnungsmodelle zu kalibrieren. Der Anwender von solchen Berechnungsmodellen ist auf Hinweise in Handbüchern und Fachliteratur angewiesen, doch selten finden sich in diesen Hilfsmitteln Angaben zu Messungen in der Natur, mit Hilfe derer eine zuverlässige Schätzung der Fliesswiderstände möglich wäre.

Die vorliegende Publikation liefert einen Beitrag zur Schliessung dieser Lücke:

Ausgesuchte Gewässerstrecken wurden derart instrumentiert und vermessen, dass mit den daraus resultierenden Informationen bezüglich Abflussmengen, Wasserspiegellagen, Sohlenlagen, mittleren Fliessgeschwindigkeiten und Gerinnegeometrie die Fliesswiderstände mit hydraulischen Modellen bestimmt werden konnten.

Ziel der Publikation ist die Vermittlung von Resultaten und Erkenntnissen dieser langjährigen Untersuchung an eine breite Anwenderschaft. Sie soll dem Praktiker eine Hilfe sein bei der Festlegung von Rauigkeitswerten und mithelfen, die Unsicherheiten bei der Abschätzung zu verkleinern. Dem Leser werden dabei anhand von

- Bildern der Versuchsstrecken
- Beschreibung der hydrologischen, morphologischen und hydraulischen Gegebenheiten
- Berechnungsabläufen
- Beschreibung der Probleme und Erfahrungen

die wichtigsten Grundlagen und Resultate vermittelt.

In einem speziellen Kapitel wird auf die historische Entwicklung der Fliessformeln eingegangen und dann eingehend das Fliessgesetz von Strickler diskutiert. Insbesondere werden auch die Einflüsse der Querprofilform, unterschiedlicher Rauigkeit über den benetzten Umfang und der relativen Überdeckung auf den Rauigkeitskoeffizienten von Strickler dargestellt.

Die Untersuchungen wurden in 8 kleineren Flüssen unterschiedlicher Grösse, Abflussregimes und Gerinnemorphologie durchgeführt. Zudem wurden 4 Gerinnestrecken in Bergbächen untersucht.

Die Rauigkeitskoeffizienten k_{St} wurden für unterschiedliche Abflussmengen bestimmt. Generell wurde versucht die Fliesswiderstände für höhere Abflüsse zu berechnen (Hochwasser).

Versuchsstrecke	Abfluss [m ³ /s]	K_{st} [m ^{1/3} /s]
Minster - Euthal	30	36
	60	38
	100	38
	140	38
Suze - Sonceboz	10	29
	20	29
	40	36
Gürbe - Belp	4.3	32
	20	33
	30	31
	40	30
	50	28
Emme - Burgdorf	100	32
	250	31
Glatt - Fällanden	2	29
	4	30
	6	31
	8	31
	10	31
Lütschine - Gsteig	60	24
	90	26
	120	27
Birse - Moutier	2	8
	30	17
	50	19
Thur - Stein	10	10
	40	13
	60	16
Brüttenbach – Brüttental (Umlagerung)	0.02	7
	0.10	14
	0.23	18
	0.36	19
	0.59	23
	0.92	27
Brüttental – Brüttental (Felsstrecke)	0.02	3
	0.17	11
	0.24	13
	0.37	13
	0.63	16
	0.96	17
Krumbach - Klusmatten	0.52 - 0.55	5 - 6
Walibach - Homatta	0.21 - 0.22	9 - 10
	0.34 - 0.39	10 - 11

Übersicht über die berechneten Strickler-Beiwerte

Résumé

Pour l'estimation et la planification des mesures de protection contre les crues, le calcul du niveau d'eau est toujours de rigueur. Pour cela diverses théories et programmes de calcul peuvent être appliqués. Chacune de ces méthodes nécessite pour l'estimation de la résistance à l'écoulement des paramètres et le calibrage des modèles. Les utilisateurs de ces modèles sont contraints alors de se référer aux instructions données dans les manuels et la littérature spécialisés. Ceux-ci donnent toutefois de rares indications concernant les mesures dans un contexte naturel de la résistance à l'écoulement, ce qui serait pourtant utile pour obtenir une estimation fiable.

La présente publication contribue à combler ce manque. Des tronçons choisis de cours d'eau ont été instrumentés et relevés. Ainsi les résistances aux écoulements ont pu être déterminées à partir des modèles hydrauliques en utilisant les informations récoltées concernant les débits écoulés, les niveaux d'eau, les vitesses moyennes d'écoulement, l'état du lit de la rivière et la géométrie du canal.

Le but de cette publication est de communiquer à un grand nombre d'utilisateurs les résultats et les connaissances de ces longues années de recherche. Elle doit constituer une aide au praticien pour la détermination de la valeur de la rugosité et elle doit permettre de réduire l'incertitude de cette estimation.

Les principes et les résultats majeurs sont présentés au lecteur à l'aide

- de représentations des tronçons expérimentaux,
- de la description des conditions hydrologiques, morphologique et hydraulique des sites,
- du développement des calculs, et
- de la description des problèmes rencontrés et des expériences acquises.

Un chapitre en particulier s'étend sur l'historique du développement des formules d'écoulement. En suite la loi d'écoulement de Strickler est discutée de façon détaillée.

Plus particulièrement l'influence sur le coefficient de rugosité de Strickler du profil en travers, des différentes rugosités du périmètre mouillé et de la charge hydraulique relative est présentée.

Les investigations ont été conduites sur 8 petits ruisseaux dont la taille, le régime et la morphologie sont différents. De plus, 4 tronçons de cours d'eau de montage ont été étudiés.

Les coefficients de rugosité k_{St} ont été déterminés pour des débits variés. D'une manière générale, la résistance à l'écoulement a été calculée pour de grands débits (cas de crues).

Tronçon de cours d'eau	débit [m ³ /s]	K _{st} [m ^{1/3} /s]
Minster - Euthal	30	36
	60	38
	100	38
	140	38
Suze - Sonceboz	10	29
	20	29
	40	36
Gürbe - Belp	4.3	32
	20	33
	30	31
	40	30
	50	28
Emme - Burgdorf	100	32
	250	31
Glatt - Fällanden	2	29
	4	30
	6	31
	8	31
	10	31
Lütschine - Gsteig	60	24
	90	26
	120	27
Birse - Moutier	2	8
	30	17
	50	19
Thur - Stein	10	10
	40	13
	60	16
Brüttenbach – Brüttental (Débit solide charrié)	0.02	7
	0.10	14
	0.23	18
	0.36	19
	0.59	23
	0.92	27
Brüttental – Brüttental (Tronçon rocheux)	0.02	3
	0.17	11
	0.24	13
	0.37	13
	0.63	16
	0.96	17
Krummbach - Klusmatten	0.52 - 0.55	5 - 6
Walibach - Homatta	0.21 - 0.22	9 - 10
	0.34 - 0.39	10 - 11

Résumé des valeurs Strickler

Riassunto

La valutazione e la pianificazione delle misure di protezione contro le piene necessita sempre del calcolo del livello d'acqua. A tal fine differenti teorie e programmi di calcolo sono disponibili. Per il computo della resistenza allo scorrimento dell'acqua, insieme ai programmi di calcolo, è sempre necessaria la stima dei parametri e la calibrazione del modello di calcolo.

L'utilizzatore di tali modelli, spesso, non ha altro aiuto che le indicazioni dei manuali e dei testi specialistici. In tali pubblicazioni raramente si trovano le istruzioni sulle misurazioni in condizioni naturali. La disponibilità di tali istruzioni permetterebbe una stima più attendibile della resistenza allo scorrimento dell'acqua.

La presente pubblicazione contribuisce a colmare questa lacuna:

Alcuni tratti di corsi d'acqua, scelti, sono stati provvisti di strumentazione e misurati. Grazie alle informazioni sulla portata, sulle condizioni della superficie d'acqua, sullo stato del letto del corso d'acqua, oltre alle misure di velocità di flusso e alla conoscenza della geometria del letto del fiume, è possibile determinare la resistenza allo scorrimento dell'acqua mediante dei modelli idraulici.

Lo scopo della presente pubblicazione è di diffondere ampiamente i risultati e le informazioni di questa pluriennale ricerca. Questa ricerca vuole essere un aiuto per tutti gli operatori nel momento dell'estimazione del valore della rugosità in modo da diminuirne l'incertitudine.

I più importanti risultati e principi di base saranno presentati al lettore con l'aiuto di:

- Rappresentazioni dei tratti dei corsi d'acqua studiati;
- Descrizione dei fattori idrologici, morfologici e idraulici;
- Descrizione dell'esecuzione dei calcoli;
- Descrizione dei problemi e delle esperienze.

In un capitolo speciale viene presentata la storia dello sviluppo delle formule di idraulica e discussa in dettaglio la legge del flusso di Strickler. In particolare vengono mostrate le influenze sul coefficiente di rugosità di Strickler del profilo trasversale, dei differenti tipi di rugosità intorno al perimetro bagnato, del carico idraulico relativo.

La ricerca è stata condotta su 8 piccoli corsi d'acqua di differenti dimensioni, regimi di flusso, morfologie del letto del corso d'acqua. Inoltre sono stati studiati quattro tratti di torrenti di montagna.

Il coefficiente di rugosità k_{St} è stato determinato per differenti portate. In generale si è cercato di calcolare le resistenze allo scorrimento dell'acqua per delle portate elevate (portate di piena).

Tratti di corsi d'acqua	portata [m ³ /s]	K _{st} [m ^{1/3} /s]
Minster - Euthal	30	36
	60	38
	100	38
	140	38
Suze - Sonceboz	10	29
	20	29
	40	36
Gürbe - Belp	4.3	32
	20	33
	30	31
	40	30
	50	28
Emme - Burgdorf	100	32
	250	31
Glatt - Fällanden	2	29
	4	30
	6	31
	8	31
	10	31
Lütschine - Gsteig	60	24
	90	26
	120	27
Birse - Moutier	2	8
	30	17
	50	19
Thur - Stein	10	10
	40	13
	60	16
Brüttenbach – Brüttental (portata del materiale di fondo)	0.02	7
	0.10	14
	0.23	18
	0.36	19
	0.59	23
	0.92	27
Brüttental – Brüttental (Tratto roccioso)	0.02	3
	0.17	11
	0.24	13
	0.37	13
	0.63	16
	0.96	17
Krummbach - Klusmatten	0.52 - 0.55	5 - 6
Walibach - Homatta	0.21 - 0.22	9 - 10
	0.34 - 0.39	10 - 11

Riassunto dei coefficienti di rugosità di Strickler.

Summary

When planning and assessing flood protection measures, flow computations are generally required to determine water surface levels. A wide range of theories and computer programs are available for this purpose. All these calculation methods require the parameters of flow resistance to be estimated. This dictates the need to calibrate computational models. Comparative values for flow resistance parameters can be found in reference books and technical literature. Reliable estimates of flow resistance are however difficult to make, as the available values seldom relate directly to field measurements.

This publication makes a contribution towards the closure of this gap: by gathering information on discharge, water surface elevation, bed level elevation, mean flow velocity and cross section geometry and applying this to hydraulic models, the flow resistance of selected test river reaches has been determined.

The objective of this publication is to make the results of this lengthy study – conducted over many years – known to a broad scope of potential users. For applications in practice, it should assist in the assessment of resistance parameters and reduce the uncertainty associated with the estimation of these values.

The relevant data and main results of the study are conveyed to the reader by means of:

- Photographs and diagrams of the test river reaches
- A description of their hydrological, morphological and hydraulic characteristics
- A description of the calculations performed
- A description of the problems encountered and the experiences made.

In a dedicated chapter, the historical development of the equations available for flow computation is discussed. The Strickler equation (a form of the Manning's equation) is also dealt with in detail in this chapter. In particular, the influence on the roughness coefficient of cross sectional shape, of non-uniform roughness characteristics along the wetted perimeter, and of relative flow depths are examined.

The investigation was performed for eight non-major Swiss rivers and four mountainous streams of differing size, flow regime and reach morphology. The Strickler roughness coefficient k_{St} was determined for each of these reaches for various discharge values. In general, emphasis was placed on determining the roughness coefficients at high flow volumes (as would be relevant to flood situations).

Test Reach	Discharge [m ³ /s]	K _{st} [m ^{1/3} /s]
Minster - Euthal	30	36
	60	38
	100	38
	140	38
Suze - Sonceboz	10	29
	20	29
	40	36
Gürbe - Belp	4.3	32
	20	33
	30	31
	40	30
	50	28
Emme - Burgdorf	100	32
	250	31
Glatt - Fällanden	2	29
	4	30
	6	31
	8	31
	10	31
Lütschine - Gsteig	60	24
	90	26
	120	27
Birse - Moutier	2	8
	30	17
	50	19
Thur - Stein	10	10
	40	13
	60	16
Brüttenbach – Brüttental (with bed load transport)	0.02	7
	0.10	14
	0.23	18
	0.36	19
	0.59	23
	0.92	27
Brüttental – Brüttental (naked rock)	0.02	3
	0.17	11
	0.24	13
	0.37	13
	0.63	16
	0.96	17
Krummbach - Klusmatten	0.52 - 0.55	5 - 6
Walibach - Homatta	0.21 - 0.22	9 - 10
	0.34 - 0.39	10 - 11

Summary of the calculated roughness coefficients according to Strickler

1. Einleitung

1.1 Problembeschreibung

Für die Beurteilung des Verhaltens von natürlichen Flussstrecken und die Projektierung von Hochwasserschutzmassnahmen entlang von Flüssen ist die Kenntnis der Fliesswiderstände unbedingt notwendig. Leider ist die Abschätzung dieser Fliesswiderstände in der Praxis sehr schwierig und bereitet selbst erfahrenen Wasserbauern Mühe. Erschwerend kommt hinzu, dass es in der Schweiz nur wenig Flussstrecken gibt, in welchen die Rauigkeit tatsächlich experimentell bestimmt worden ist. Zudem ist der Fliesswiderstand keine feste Grösse für eine bestimmte Flussstrecke. Dieser Beiwert variiert u.a. in Funktion des Abflusses.

1.2 Ziel der Publikation

Durch die Publikation sollen die Erkenntnisse einer langjährigen Untersuchung der Fliesswiderstände in schweizerischen Gewässern einem fachkundigen Publikum zugänglich gemacht werden. Dieses Nachschlagewerk soll dem Ingenieur in der Praxis eine Hilfe bei der Festlegung der Rauigkeitswerte sein und helfen, die zum Teil grossen Unsicherheiten bei der Abschätzung zu reduzieren.

Die vorliegende Publikation ergänzt ähnliche Veröffentlichungen wie zum Beispiel diejenige von Chow (1959) und von Barnes (1967) über nordamerikanische sowie von Hicks & Mason (1991) über neuseeländische Gewässer. Sie schliesst die Lücke für schweizerische Verhältnisse mit den vielfältigen geologischen und topografischen Verhältnissen zwischen den Alpen und dem Jura und kann auch Aufschluss geben über die Verhältnisse in Fliessgewässern im Ausland.

1.3 Vorgehen

Ausgehend von Wasserstands- und Abflussmessstationen der Landeshydrologie wurden in deren Bereich Versuchsstrecken für die Untersuchungen festgelegt. Die Auswahl der Versuchsstrecken deckt möglichst unterschiedliche hydraulische Begebenheiten ab.

Die ausgewählten Versuchsstrecken wurden mit zusätzlichen Messeinrichtungen für die Wasserstandsmessung ausgerüstet, um das Wasserspiegelgefälle bestimmen zu können. Die sehr detailliert ausgeführten Vermessungen zeigen die genaue Geometrie der Gewässerstrecken auf. Die Abflussmengen lieferten die Stationen der Landeshydrologie aufgrund geeigneter sorgfältiger Messmethoden.

Mithilfe hydraulischer Modelle und den erhobenen Daten berechnete man anschliessend die Rauigkeitswerte nach Strickler für unterschiedliche Abflüsse.

Die in die Untersuchung einbezogenen Arbeiten von Hodel (1993) ergänzen die Aussagen bezüglich Bergbäche.

1.4 Übersicht der ausgewählten Fliessstrecken

Die 12 Versuchsstrecken sind über die Schweiz verteilt und unterscheiden sich im Abflussregime, in der Gerinnemorphologie und in der Grösse des Fliessgewässers.

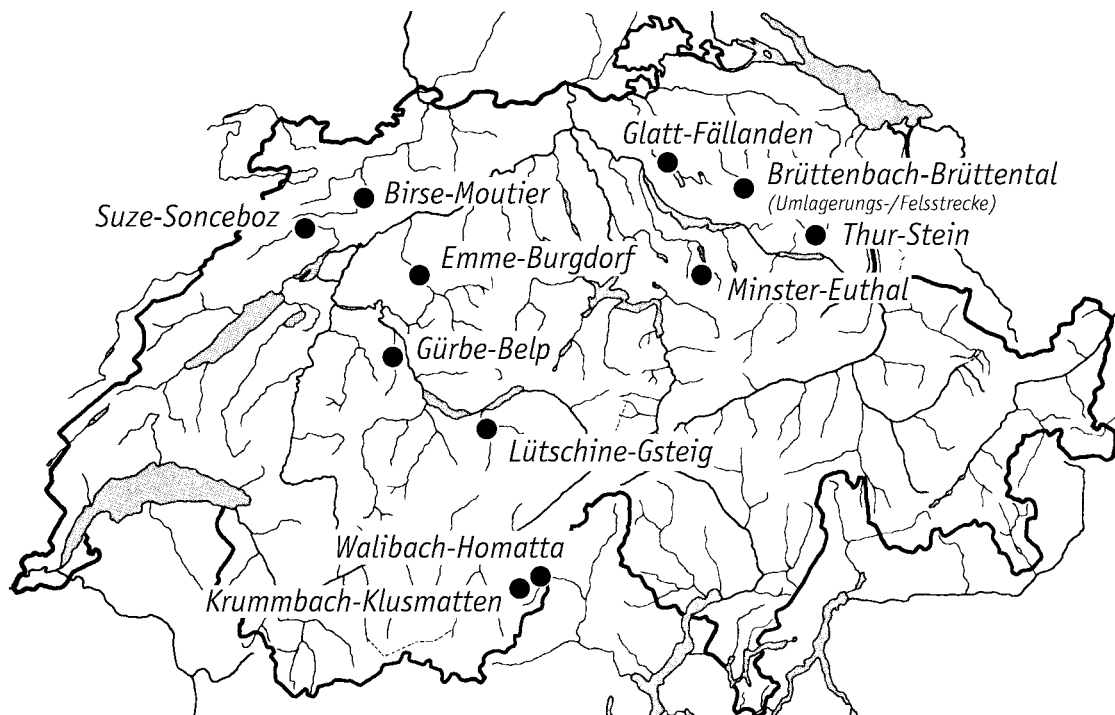
Sie umfassen Gewässerstrecken in 8 kleineren Flüssen und in 3 Bergbächen mit insgesamt 4 Versuchsstrecken.

Die Untersuchungsstrecken enthalten je eine hydrometrische Station mit Wasserstand- und Abflussmessung. Nur die Strecken am Brüttenbach und Walibach verfügen über keine permanente Abflussmessstation. Hier wurden die Abflüsse mit Tracermethoden stichprobenartig erhoben. Die Abflussregimeangaben entsprechen der Klassifizierung im Hydrologischen Atlas der Schweiz.

Die 8 Versuchsstrecken der kleineren Flüsse liegen in mehr oder weniger prismatischen Gerinnen ohne Vorländer. Die Ufer sind mehrheitlich verbaut und teilweise bewachsen. Das Gefälle, die Uferverbauungen und die Zusammensetzung des Geschiebes sind unterschiedlich. Die 8 Versuchsstrecken sind auf Hochwasser ausgerichtet, was eine ausreichende Länge verlangt. Gewählt wurden Strecken, in denen gleichförmige Fließverhältnisse herrschen und keine örtlichen Verluste, wie sie bei Brückenfeilern oder Aufweitungen vorhanden sind, auftreten.

Die Versuchsstrecken im Brüttenbach entsprechen einer Umlagerungsstrecke und einer Felsstrecke.

Die Länge der Versuchsstrecke wurde in Abhängigkeit des Fließgefälles so gewählt, dass die zufälligen Messfehler bei der Pegelmessung unbedeutend klein sind. Dies ist im Allgemeinen dann der Fall, wenn die Wasserspiegeldifferenz innerhalb der Versuchsstrecke mehr als 0.5 m beträgt.



Standorte der Versuchsstrecken

Gewässer	Mittlerer Abfluss [m ³ /s]	Gefälle [%]	Breite [m]	k-Wert Strickler [m ^{1/3} /s]
Minster - Euthal	3	8.0	12	36 - 38
Suze - Sonceboz	4	3.0	12	29 - 36
Gürbe - Belp	3	1.7	12	28 - 33
Emme - Burgdorf	17	3.6	40	31 - 32
Glatt - Fällanden	4	0.3	15	29 - 31
Lütschine - Gsteig	19	7.0	22	24 - 27
Birse - Moutier	3	18	12	17 - 19
Thur - Stein	4	17	10	10 - 16
Brüttenbach - Umlagerungsstrecke	-	22	16	7 - 27
Brüttenbach - Felsstrecke	-	38	8	3 - 17
Krumbach - Klusmatten*	0.7	52	25	5 - 6
Walibach - Homatta*	-	135	10	9 - 11

**Keine Messungen im Hochwasserbereich*

Übersicht der ausgewählten Flussstrecken

1.5 Wasserspiegelmessungen

Für die Untersuchungen an Flussstrecken mit hydrometrischen Stationen wurden die Wasserspiegelmessungen der Stationen verwendet. Zudem wurden für die Dauer des Versuchsbetriebes zusätzliche Wasserstandsmessgeräte installiert. Entweder wurden kontinuierlich registrierende Druckdosen mit Data Loggern oder Grenzwertpegel mit wasserlöslichen Messbändern eingesetzt.

Aufgrund der gemachten Erfahrungen kann folgendes festgehalten werden:

Strömende Abflussverhältnisse vorausgesetzt, ist am oberen Ende der Versuchsstrecke mindestens ein Pegel nötig, besser wären zwei oder sogar drei. Die Anordnung von je einem Pegel an beiden Ufern im selben Profil ist bei nicht horizontalem Wasserspiegel sinnvoll, so dass die Werte von beiden Pegeln gemittelt werden können. Pegel in einem zweiten Profil vermindern den durch die Wahl der Profile bedingten Modellfehler. Am unteren Ende und eventuell in zusätzlichen Querprofilen der Versuchsstrecke sind mit der gleichen Argumentation ebenfalls ein, besser zwei Pegel nötig. Bei der Bestimmung der Fließwiderstände werden die Messungen von allen Pegeln gleich gewichtet und ausgeglichen, was einen mittleren Rauigkeitswert über die ganze Versuchsstrecke ergibt.

Grundsätzlich ist es möglich, die Versuchsstrecke mit nur einem einzigen Pegel, welcher sich am oberen Ende befindet, auszurüsten. Die auf diese Weise ermittelten Fließwiderstände sind jedoch ungenauer als bei einer Versuchsstrecke mit mehreren Pegeln und gelten nur für die Fließstrecke im Bereich des Pegels. Auch muss der kleinere Aufwand für das Installieren und Auswerten von Pegeln mit einer längeren Versuchsstrecke und mehr Querprofilen erkauft werden.

1.6 Abflussmessungen

Die Abflüsse in den 8 Untersuchungsstrecken der kleineren Flüsse konnten an den hydrometrischen Stationen der Landeshydrologie bestimmt werden. Die Abflussbestimmung erfolgte vorwiegend mit Flügeln an Seilflügelanlagen und Messstangen. Die Spitzenabflüsse mussten mit Hilfe von Pegelstand-Abflusskurven berechnet werden.

Für die Bestimmung der Abflüsse in den 4 Wildbach-Versuchsstrecken kam die Salzverdünnungsmethode zum Einsatz.

1.7 Gerinnegeometrie

Bei den betreffend Querschnittform und Gefälle gleichmässigen Versuchsstrecken genügen in der Regel 5 Querprofile, welche sorgfältig auszuwählen und zu vermessen sind. In Flussstrecken mit unregelmässigen Formen und somit unregelmässigen Fliessgeschwindigkeiten waren entsprechend mehr Querprofile nötig. Die Lage der Querprofile repräsentiert die jeweilige Flussstrecke zwischen zwei Profilen möglichst gut. Um eine genügende Genauigkeit zu erreichen sind pro Querprofil 15-20 Sohlenpunkte einzumessen.

1.8 Berechnung der Fliesswiderstände

Die Bestimmung der Fliesswiderstände in den Flüssen erfolgte mit den Programmen FLOOD und HEC RAS, welche normalerweise für die Berechnung der Wasserspiegel im Zusammenhang mit Bach- und Flussbauprojekten eingesetzt werden. Es sind eindimensionale Staukurvenprogramme zur Berechnung der Wasserspiegel über mehrere Querprofile in offenen Gerinnen mit strömenden Abflussverhältnissen. Die Berechnung erfolgte für stationäre Abflüsse, d.h. ohne zeitliche Änderung der Abflussmenge. Auf die Aufteilung der Querprofile in das Hauptgerinne und die angrenzenden Vorländer wurde wegen dem Fehlen eines eigentlichen Vorlandes verzichtet.

Das hydraulische Modell beruht auf der Energiegleichung nach Bernoulli. Die Berechnung der Rauigkeitsverluste erfolgt mit der Gleichung von Manning-Strickler. Die Programme berechnen die örtlichen Verluste bei Erweiterungen, bei Brücken und bei Pfeilern etc. separat, wobei einzelne Parameter vorgegeben werden können. Da die Versuchsstrecken in vorwiegend gleichmässigen, prismatischen Gerinneabschnitten mit ähnlicher Rauigkeit und Sohlenneigung liegen, spielt die Berücksichtigung der örtlichen Verluste nur eine untergeordnete Rolle. Dies gestattete die Bestimmung eines einzigen, für die ganze Versuchsstrecke zutreffenden Rauigkeitswertes über den ganzen benetzten Umfang der Fliesstrecke.

Für die ganze Messperiode werden gleichbleibende Rauigkeiten angenommen. Dies lässt sich vertreten, weil in den Versuchsstrecken keine wesentlichen Verkrautungen auftreten (Ausnahme: Gürbe - Belp). Die Messungen der ganzen Messperiode eines Messprofils werden somit für die Anpassung des Staukurvenmodelles vorgängig ausgeglichen.

1.9 Bestimmung der Fliesswiderstände mit Salzverdünnungsmessungen, Versuchsstrecken 9 und 10

Mit Salzverdünnungsmessungen werden die mittleren Fliessgeschwindigkeiten und die entsprechenden Abflussmengen gemessen. Der Quotient aus diesen beiden Grössen (Q/v) ergibt die mittlere durchflossene Querschnittsfläche zwischen der Tra-

cereingabestelle und dem Profil mit der Leitfähigkeitssonde. Die Einmessung der Querprofile erfolgt mit zirka 20 Sohlenpunkten. Der benetzte Umfang kann aus den Querprofilen und der Berücksichtigung der mittleren benetzten Querschnittsfläche berechnet oder graphisch bestimmt werden. Um in einer unregelmässigen Wildbachstrecke einen statistisch gut abgesicherten Mittelwert für den mittleren benetzten Umfang einer Versuchsstrecke zu erhalten, müssen mindestens 4 bis 6 Querprofile aufgenommen werden. Je unregelmässiger eine Versuchsstrecke ist, desto mehr Querprofile müssen erfasst werden (Brüttenbach: Umlagerungsstrecke: 4 Querprofile, Felsstrecke: 5 Querprofile). Aus dem Quotienten der mittleren durchflossenen Querschnittsfläche und dem mittleren benetzten Umfang resultiert ein mittlerer hydraulischer Radius für die gesamte Versuchsstrecke. Zur Einmessung des Längsgefälles eines Wildbach- oder Gebirgsflussabschnittes werden Aufnahmen mit dem Theodoliten durchgeführt.

Das Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Fliesswiderständen ist bei guten Datengrundlagen betreffend Fliesszeit- und Abflussmessungen zu empfehlen. Die Schwäche des Verfahrens liegt in der Bestimmung des mittleren benetzten Umfanges. Deshalb ist es wichtig, dass charakteristische Querprofile in genügender Anzahl erfasst werden. Infolge der ausgezeichneten Datengrundlage im Brüttenbach (genaue Erfassung der Fliessgeschwindigkeiten und der Abflüsse bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasserständen durch die automatische Fliesszeitmessanlage des Institutes für Kulturtechnik der ETH Zürich), kann die Genauigkeit der ermittelten Rauigkeitskoeffizienten nach Strickler für die beiden Versuchsstrecken mit +/- 5 – 10 % angegeben werden.

1.10 Bestimmung der Fliesswiderstände mit Salzverdünnungsmessungen und photogrammetrischen Aufnahmen, Versuchsstrecken 11 und 12

Das Verfahren mit Hilfe photogrammetrischer Bestimmung der Wasseroberflächen und simultan durchgeführter Tracermessungen wurde von Hodel (Hodel 1993) entwickelt, zur repräsentativen und reproduzierbaren Erfassung extremer Rauheiten von Wildbach- und Gebirgsflussstrecken. Die beiden Hauptmerkmale des Verfahrens liegen in der Mittelbildung der unregelmässigen Gerinneprofile über einer Strecke sowie der anschliessenden Transformation dieses gemittelten Bachprofils in ein geometrisch definiertes Idealgerinne.

Mit Salzverdünnungsmessungen werden die korrespondierenden Parameter Abflussmenge und Translationsgeschwindigkeit (mittlere Fliessgeschwindigkeit) ermittelt. Der Quotient aus der Abflussmenge und der zugehörigen mittleren Fliessgeschwindigkeit ergibt den gemittelten Wert der Querschnittsfläche.

Die Wasserspiegelfläche wird durch photogrammetrische Stereoaufnahmen (gleichzeitig mit der Salzverdünnungsmessung) und digitaler Auswertung am analytischen Plotter ermittelt. Die in der Bachstrecke vom Wasser zurückgelegte Länge wird als Fliessweglänge bezeichnet und ist mit dem Messband, das in die Hauptströmung gelegt wird, einzumessen. Die mittlere Wasserspiegelbreite resultiert mittels Quotient aus der Wasserspiegelfläche und der mittleren Fliessweglänge.

Diese Messungen und Aufnahmen sollten bei möglichst unterschiedlichen Wasserständen durchgeführt werden. Mittels graphischer Gegenüberstellung der Abflüsse und der entsprechenden mittleren Wasserspiegelbreiten wird die fiktive Grösse "minimale Wasserspiegelbreite" b_{Wsp0} bestimmt.

Durch die Transformation der Bachstrecke in eine idealisierte Gerinneform und die Umformung der Kontinuitätsgleichung kann für jeden Wasserstand die mittlere Bachtiefe bestimmt werden. Nachstehend ist die Herleitung dieser Hilfsgrösse bei der Approximation an ein Trapezgerinne dargestellt.

$$\begin{aligned} & \text{Kontinuitätsgleichung:} & Q &= V_T \cdot A \\ & \text{Fließquerschnitt bei Trapezgerinne:} & A &= h_m \cdot 0.5(b_{Wsp} + b_{Wsp0}) \\ \Rightarrow & \text{Mittlere Bachtiefe (Trapezgerinne):} & h_m &= 2Q / [v_T \cdot (b_{Wsp} + b_{Wsp0})] \end{aligned}$$

Durch graphische Gegenüberstellung der mittleren Wasserspiegelbreite und der mittleren Bachtiefe aller gemessenen Wasserstände kann die Wahl der idealisierten Gerinneform kontrolliert werden. Ist die getroffene Wahl der idealisierten Gerinneform geeignet, erfolgt die Bestimmung des benetzten Umfanges aus der Grafik. Muss die gewählte Gerinneform verworfen werden, kommen Rechteck-, Dreieck- oder Parabelprofil als Alternativen in Frage.

Die Anwendung dieser Methode in lediglich 2 Bachabschnitten und das Fehlen von Messungen im Hochwasserbereich zeigt leider, dass die vorhandene Datengrundlage keine Zusammenstellung idealisierter Querprofile mit den entsprechenden Strickler-Beiwerten erlaubt. Würde das Verfahren an möglichst vielen typischen Bergbachabschnitten bei Hoch- Mittel- und Niedrigwasserabflüssen kalibriert, ergäbe dies für die Praxis der Alpinhydrologie eine wertvolle Arbeitshilfe. Mögliche Weiterentwicklungen der photogrammetrischen Wasserflächenbestimmung sind in Kersten (1992) beschrieben.

1.11 Dokumentation der Fließwiderstände

In der vorliegenden Publikation sind die ermittelten Gesamtwiderstandsbeiwerte für die betreffenden Versuchsstrecken wiedergegeben. Auf eine Aufteilung des Widerstandsbeiwertes auf die Sohle, die Ufer und eventuell auf die Trennflächen zum Uferbewuchs oder zu den Vorländern wurde bewusst verzichtet. In diesem Sinne gilt es, für die Annahme des Rauigkeitswertes eines Gewässers das Flussbett als Gesamtes zu beurteilen, wobei die Korngrößen der Sohle, die Form und Gestaltung der Ufer und die Ufervegetation zu beachten sind.

Die Fließwiderstände wurden vorwiegend für Hochwasserabflüsse ermittelt und enthalten somit die Einflüsse des Geschiebetriebes und in einem gewissen Mass auch die Wellenbildung. Zur Anwendung kommt ausschliesslich der Rauigkeitswert nach Strickler. Eine kurze Einführung zum Fließgesetz von Strickler mit geschichtlichem Rückblick und Erwähnung der neuesten Forschungsarbeiten finden sich im Kapitel 2.

Die Untersuchungen basieren auf einer generellen Grundlagenarbeit zur Thematik "Erforschung der Fließwiderstände in kleinen schweizerischen Fließgewässern (LHG, 1999).

Für die Anwendung in der Praxis ist die Dokumentation der verwendeten Versuchsstrecken von zentraler Bedeutung, um Vergleiche und Analogieschlüsse ziehen zu können. In der vorliegenden Publikation sind deshalb die Versuchsstrecken umfassend dargestellt. Neben der hydrologischen, morphologischen und hydraulischen Beschreibung finden sich umfangreiche Skizzen und Bilder.

2. Der Rauigkeitskoeffizient nach Strickler

2.1 Historische Entwicklung der Fliessformeln

Chézy schlug 1768 als erster eine den heute verwendeten Fliessgesetzen vergleichbare Formel vor:

$$v_m = C J^{1/2} R^{1/2} \quad (1)$$

Der Ansatz von Chézy zur Bestimmung der mittleren Fliessgeschwindigkeit hat die Form einer Potenzfunktion, wobei das Gefälle der Energielinie J und der hydraulische Radius R mit dem Exponent $1/2$ in das Fliessgesetz eingehen. Die mittlere Geschwindigkeit v_m ist direkt proportional zum Widerstandsbeiwert C . Die empirisch gefundene Formel von Chézy basiert auf dem quadratischen Widerstandsgesetz ($v_m^2 \propto R J$). Rund 100 Jahre nach Chézy führten die Franzosen Darcy und Bazin umfangreiche Experimente in Druckrohren und offenen Kanälen durch. Unter Zuhilfenahme der Dimensionsanalyse und der Ähnlichkeitsgesetze aus physikalischen Messungen wurden in der Folge eine Anzahl von empirischen Fliessformeln entwickelt.

Die Entwicklung einer Formel auf der Basis einer reinen Potenzfunktion oder der Nachweis der Gültigkeit einer bereits bestehenden Formel anhand einer grossen Anzahl von Messungen an offenen Gerinnen und Rohrleitungen war das Hauptziel der Untersuchungen von Strickler (1923). Bei der Auswahl der Messungen wählte Strickler Messstrecken, die einen möglichst grossen Variationsbereich von Gefälle, hydraulischem Radius und Rauigkeit abdecken. Ein Grossteil der Messungen stammt aus schweizerischen Fliessgewässern. Das von Strickler vorgeschlagene Fliessgesetz wurde erstmals von Gauckler und Manning im 19. Jahrhundert formuliert und hat in der Praxis – vor allem wegen seiner Einfachheit – eine sehr grosse Verbreitung gefunden. Die Formel entspricht wie diejenige von Chézy einer Potenzfunktion und lautet:

$$v_m = k_{St} J^{1/2} R^{2/3} \quad (2)$$

Das Fliessgesetz von Strickler bedeutet, dass die Fliessgeschwindigkeit v_m und damit der Durchfluss proportional zum Rauigkeitskoeffizienten k_{St} ist. Der k_{St} -Wert ist dimensionsbehaftet, was die Übertragbarkeit der Formel grundsätzlich erschwert. Für verschiedene Gerinnetypen und Rauigkeiten ist jedoch im Lauf der Zeit viel Erfahrungsmaterial zusammengekommen, was die Bestimmung von k_{St} erleichtert.

2.2 Bestimmung des k_{St} -Wertes

In einem Gerinne kann der Rauigkeitskoeffizient von Strickler anhand von Messungen zurückgerechnet werden. Für die Bestimmung der Parameter J , R und v_m ist die Auswertung von topographischen Aufnahmen und Geschwindigkeitsmessungen notwendig. Voraussetzung ist allerdings, dass die Verhältnisse möglichst dem Normalabfluss entsprechen. In der vorliegenden Publikation wird eingehend auf diese Methode zur Bestimmung des Rauigkeitskoeffizienten eingegangen.

Für Geschwindigkeits- oder Wasserspiegelberechnungen in einem Gerinne muss jedoch in der Regel der k_{St} -Wert geschätzt werden. Für die Schätzung stehen Hilfsmittel wie Tabellen, Vergleiche oder Formeln zur Verfügung. Verschiedene Einflussgrößen bestimmen die Wahl des zutreffenden k_{St} -Wertes.

2.2.1 Einfluss der Querprofilform

Bei gleichmässig über den Umfang des benetzten Querschnitts verteilter Rauigkeit ergeben sich bei gleicher Rauigkeit für unterschiedliche Querschnittsformen verschiedene k_{St} -Werte. Der Einfluss der Querprofilform kann zum Beispiel mittels eines Formbeiwerts quantifiziert werden (Schröder, 1990 oder Wallisch, 1990). Die Berücksichtigung von Formbeiwerten ist erforderlich, wenn die Anforderungen an die Genauigkeit der Berechnung sehr hoch sind.

2.2.2 Einfluss ungleichmässig über den benetzten Umfang verteilter Rauigkeit

Die Rauigkeit eines Fliessgewässers setzt sich aus der Sohl- und Wandrauigkeit zusammen. Bei der Sohlrauigkeit muss zwischen Korn- und Formrauigkeit unterschieden werden. Die Kornrauigkeit entsteht durch jedes einzelne Korn, welches in die Strömung ragt und örtlich eine Querschnittsverengung mit anschliessender Erweiterung und damit Energieverluste verursacht. In den kiesführenden, meist korrigierten Flüssen des schweizerischen Mittellandes macht die Kornrauigkeit den grössten Anteil an der Sohlrauigkeit aus. In voralpinen und alpinen Flüssen und in flachen Flüssen mit feinerem Sohlenmaterial (z.B. in Sandflüssen) kann dagegen die Formrauigkeit überwiegen. Im Steilbereich sind es oft die im Längenprofil zu Stufen gruppierten Blöcke (Stufen-Becken-Morphologie) und die Veränderung der Querschnittsbreite, welche die Rauigkeit eines Gerinnes bestimmt (im wesentlichen durch Kontraktions- und Expansionsverluste). In den flacheren Flüssen sind Formverluste aufgrund von Dünen oder anderer Sohlenformen möglich. Zur Bestimmung der Formrauigkeit kann zum Beispiel auf Yalin (1992), Zeller (1996) oder Rickenmann (1996) verwiesen werden.

Im weiteren wird nur der Fall der ebenen Sohle betrachtet, der in kiesführenden Flüssen oft massgebend ist.

Weit verbreitet ist eine Formel, welche eine Schätzung der Sohlrauigkeit anhand eines charakteristischen Korndurchmessers des Sohlenmaterials ermöglicht. Strickler setzte den Rauigkeitskoeffizienten k_{St} in Beziehung zum massgebenden Rauigkeitselement ε :

$$k_{St} = \frac{A_{St}}{\sqrt[6]{\varepsilon}} \quad (3)$$

wobei er für die Konstante A_{St} den Wert 21.1 fand. Meyer-Peter (1948) schlägt den Wert 26 und Schöberl (1981) den Wert 23.5 vor. Für das massgebende Rauigkeitselement ε wird je nach Autor der charakteristische Korndurchmesser d_{65} , d_{84} oder d_{90} gewählt. Als Näherung für den mittleren Korndurchmesser einer natürlichen Deckschicht kann d_{90} der Unterschicht angesehen werden. Diese Grösse entspricht in kiesführenden Flüssen am ehesten einem repräsentativen Wert. Die Formel (3) kann für Korndurchmesser bis maximal rund 0.25 m empfohlen werden. Für grössere Korndurchmesser sind Ansätze, wie sie in Kap. 2.3 vorgestellt werden, zu empfehlen.

Die k_{St} -Werte der Ufer müssen geschätzt werden. Eine Zusammenstellung von Richtwerten ist z.B. bei Schröder (1990) zu finden.

Ist die Rauigkeit von Ufer und Sohle sehr unterschiedlich, so kann der Wandeinfluss mit Hilfe des Verfahrens von Einstein (1951) berücksichtigt werden. Dazu wird der durchströmte Querschnitt in verschiedene Teilflächen unterteilt und die Rauigkeit der Berandung dieser Teilflächen (zum Beispiel für die Ufer und die Sohle) gesondert bestimmt. Für jede Teilfläche werden die Querschnittsfläche, der benetzte Umfang und der hydraulische Radius bestimmt und mit Hilfe eines Fließgesetzes die mittlere Fließgeschwindigkeit berechnet. Mit der Forderung, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit in allen Teilflächen gleich gross sein soll, lassen sich die einzelnen Teilflächen, beziehungsweise der mittlere Rauigkeitskoeffizient bestimmen. Wird für alle Teilflächen das Fließgesetz von Strickler angewendet, ergibt sich für den mittleren k_{St} -Wert des Profils:

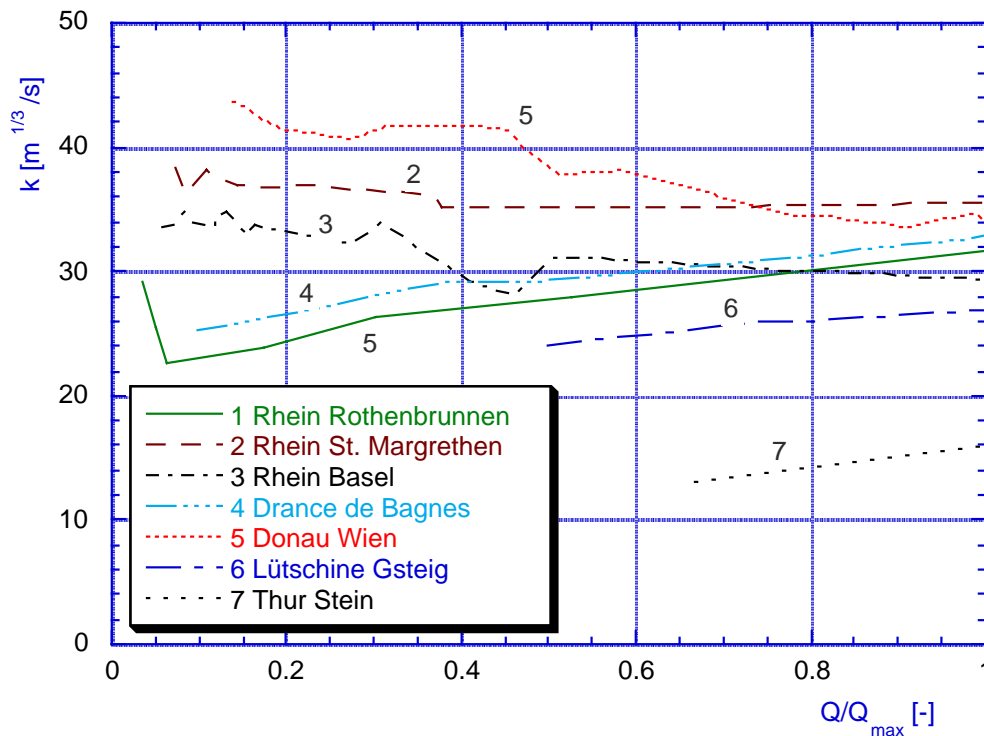
$$k_m = \frac{P^{\frac{2}{3}}}{\left(\sum \frac{P_i}{k_i^{\frac{3}{2}}} \right)} \quad (4)$$

Die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m berechnet sich dann zu:

$$v_m = k_m J^{1/2} R^{2/3} \quad (5)$$

2.2.3 Einfluss der relativen Überdeckung (relative Rauigkeit)

Schon Strickler stellte fest, dass der Widerstandskoeffizient in ein und demselben Gewässer variieren kann. In Flüssen mit Gebirgscharakter nehmen die k_{St} -Werte mit steigendem Abfluss eher zu, in Flüssen mit kleineren Gefällen eher ab:



Verlauf von k_{St} in Abhängigkeit der Wasserführung verschiedener Gebirgs- und Flachlandflüsse aus Strickler (1923). Flüsse:

1 Rhein Rothenbrunnen ($Q_{max} = 352 \text{ m}^3/\text{s}$), 2 Rhein St. Margrethen ($Q_{max} = 649 \text{ m}^3/\text{s}$), 3 Rhein Basel ($Q_{max} = 5'500 \text{ m}^3/\text{s}$), 4 Drance de Bagnes Chables ($Q_{max} = 37 \text{ m}^3/\text{s}$), 5 Donau Wien ($Q_{max} = 7'018 \text{ m}^3/\text{s}$), 6 Lüttschne Gsteig ($Q_{max} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$), 7 Thur Stein ($Q_{max} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$).

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass der k_{St} -Wert von der relativen Abflusstiefe h/d abhängt. Dieser Einfluss ist vor allem bei kleinen relativen Abflusstiefen ($h/d < 4 - 6$) gross und hängt mit der Veränderung des Strömungsfeldes im Bereich der einzelnen Rauigkeitselementen zusammen. Als Gültigkeitsbereich der Formel von Strickler bezeichnet Dallwig (1974) den Bereich $2.5 < R/d < 500$ und Jäggi (1983) definiert ihn mit $10 < R/d < 500$. Für Wasserspiegelberechnungen in Flüssen mit kleinen relativen Abflusstiefen muss deshalb immer zuerst abgeklärt werden, ob die Anwendung der Formel von Strickler zulässig ist.

In der Folge werden vier Ansätze für kleine relative Abflusstiefen vorgestellt, welche als Alternative zum traditionellen Strickler-Gesetz betrachtet werden können. Zwei Ansätze basieren auf der Formel von Strickler, die Formeln 10 und 11 basieren auf dem logarithmischen Fließgesetz.

Zeller (1996) verwendete über 200 Messdaten und fand eine Abhängigkeit des k_{St} -Wertes vom Gefälle. Er formulierte zur Bestimmung des k_{St} -Wertes je eine einfache Formeln für das Flachland und das Gebirge. Die Formeln liefern für Verhältnisse mit

kleiner relativen Überdeckung und Korndurchmesser grösser als rund 0.25 m die zuverlässigeren k -Werte als die Formel (3).

$$J < 1 \%, J \text{ in } \% \quad k_{St} = 19 J^{-0.208} \quad (6)$$

$$J > 4 \%, J \text{ in } \% \quad k_{St} = 25 J^{-0.823} \quad (7)$$

Aufgrund einer Dimensionsanalyse von gegen 400 Einzelmessungen hat Rickenmann (1996) einen Ansatz hergeleitet, welcher den k_{St} -Wert in Abhängigkeit des Abflusses, des Gefälles und des Korndurchmessers d_{90} angibt:

$$J < 0.8 \% \quad k_{St} = 4.36 g^{0.41} Q^{0.02} J^{-0.03} d_{90}^{-0.23} \quad (8)$$

$$J > 0.8 \% \quad k_{St} = 0.97 g^{0.41} Q^{0.19} J^{-0.19} d_{90}^{-0.64} \quad (9)$$

In einem idealen Gerinne (ebene Sohle, unendlich breit und grosse relative Abflusstiefe) ist die Fliessgeschwindigkeit logarithmisch über die Tiefe verteilt. Keulegan (1938) formulierte für die mittlere Fliessgeschwindigkeit die Beziehung:

$$v_m = \sqrt{gRJ} \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{A_\kappa R}{\varepsilon} \right) \quad (10)$$

Für ein Gerinne mit Trapezprofil ergibt sich für die Konstante A_κ ein Wert von 12.3. Für Reinwasser, d.h. für Abflüsse ohne hohen Schwebstoffgehalt ist die Kármán-Konstante $\kappa = 0.4$. Für das massgebende Rauigkeitselement ε wird oft $\varepsilon = \beta d_{90}$ angesetzt, wobei für β Werte zwischen 1.5 und 3.0 vorgeschlagen werden. Somit wird die Formel (10) zu:

$$v_m = \sqrt{gRJ} 2.5 \ln \left(\frac{12.3R}{\beta d_{90}} \right) \quad (11)$$

Das Fliessgesetz von Strickler in der Form einer Potenzfunktion entspricht im Bereich von relativen Abflusstiefen zwischen 10 und 1000 einer guten Näherung an das logarithmische Fliessgesetz von Keulegan.

Für relative Abflusstiefen kleiner als 10 empfiehlt Jäggi (1983) eine Korrektur des Fliessgesetzes von Keulegan, da die Geschwindigkeitsverteilung nur noch bedingt logarithmisch ist. Anstelle des Gefälles J wird ein reduziertes Gefälle J' in die Formel (11) eingeführt, wodurch berücksichtigt wird, dass die grössten Sohlenkomponenten zusätzliche Energieverluste verursachen. Die Bestimmung von J' erfolgt mit der empirischen Formel:

$$J' = J \left(1 - e \left[-\alpha \frac{R}{d_{90} J^{0.5}} \right] \right) \quad (12)$$

Der materialabhängige Koeffizient α wurde aufgrund von Modellversuchen mit 0.5 bestimmt.

2.3 Anwendungsbereich der Formel von Strickler

Bis heute kann das Fliessgesetz von Strickler für Wasserspiegelberechnungen in Gewässern, wie sie im schweizerischen Mittelland, im Jura und teilweise in voralpinen Regionen anzutreffen sind, empfohlen werden. Die Formel ist in der Praxis sehr verbreitet und liefert in der Regel mit geringem Berechnungsaufwand genügend genaue Resultate.

Die Hauptschwierigkeit liegt in der Schätzung des Rauigkeitskoeffizienten k_{St} . Ist die Kornreibung vorherrschend und der Einfluss der Ufer unbedeutend, wird zur Bestimmung des Rauigkeitskoeffizienten die Formel (3) empfohlen. Bei schmalen Gerinnen und Strecken mit rauen Ufern ergibt sich der mittlere Rauigkeitskoeffizient des Profils aus der Formel (4), wobei die Rauigkeiten der Sohle und der Ufer mit der Formel (3), beziehungsweise anhand von Tabellen ermittelt werden müssen.

Als Anwendungsbereich der Formel von Strickler liegt in natürlichen Gerinnen mit einem Gefälle bis 2.5 % und Korndurchmessern des Sohlenmaterials bis etwa 25 cm. Die relative Abflusstiefe soll einen Wert zwischen 10 und 500 aufweisen. Unterschreitet das Verhältnis der Wassertiefe zum massgebenden Korndurchmesser den Wert 10, ist zur Bestimmung des Rauigkeitskoeffizienten eine der Formeln (6) bis (12) zu verwenden.

Symbole

A_{St}	[-]	Konstante nach Strickler
A_K	[-]	Konstante für das Fließgesetz von Keulegan
C	$[m^{1/2}/s]$	Reibungsbeiwert nach Chézy
d_x	[m]	Korndurchmesser, der von x Gewichtsprozenten einer Mischung unterschritten wird
e	[-]	natürlicher Logarithmus
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
J	[-]	Gefälle
J'	[-]	reduziertes Gefälle
k_{St}	$[m^{1/3}/s]$	Rauigkeitskoeffizient nach Strickler
k_m	$[m^{1/3}/s]$	mittlerer Rauigkeitskoeffizient nach Strickler
P	[m]	benetzter Umfang
R	[m]	hydraulischer Radius (benetzte Fläche / benetzter Umfang)
Q	$[m^3/s]$	Abfluss
Q_{max}	$[m^3/s]$	maximal gemessener Abfluss
α	[-]	Materialkonstante
β	[-]	Konstante zum massgebenden Rauigkeitselement
ε	[m]	massgebendes Rauigkeitselement
κ	[-]	Karman - Konstante

3. Fließwiderstände in den ausgewählten Gewässerstrecken

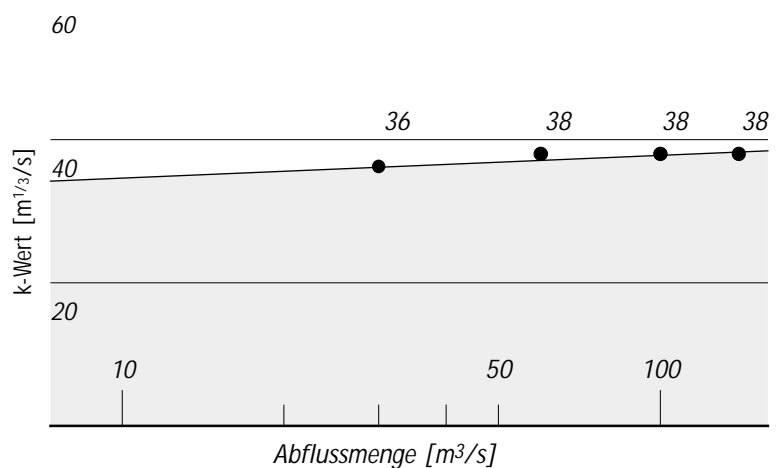
3.1 Minster bei Euthal

3.1.1 Übersicht



Versuchsstrecke Minster - Euthal, in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge 5 m³/s, Aufnahme vom 9.12.1993

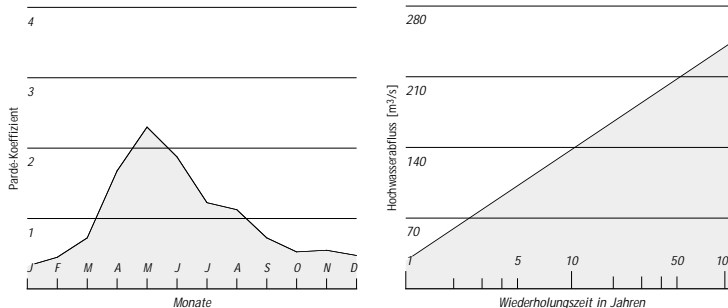
Hydrometrische Station:	Minster – Euthal, Rüti
Einzugsgebiet:	59 km ²
Regimetyp:	nival de transition
Mittlerer Abfluss:	3.2 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser:	140 m ³ /s
Gefälle:	8 ‰
Abflussgerinne:	Geradliniger Kanal mit Trapezprofil. Ufer und Sohle aus Blocksatz mit engen Fugen. Geschiebetrieb vorhanden



Rauigkeitswerte nach Strickler

3.1.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
nival de transition*

*Hochwasserfrequenzen
(Vereinfachte Darstellung)*

b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke liegt im trapezförmigen Kanal, welcher im Rahmen des Aufstaus des Sihlsee in den 1930er Jahren gebaut wurde. Das Gerinne besteht seitlich und an der Sohle aus einem sauber verlegten Blocksatz mit schmalen Fugen und ebener Oberfläche.

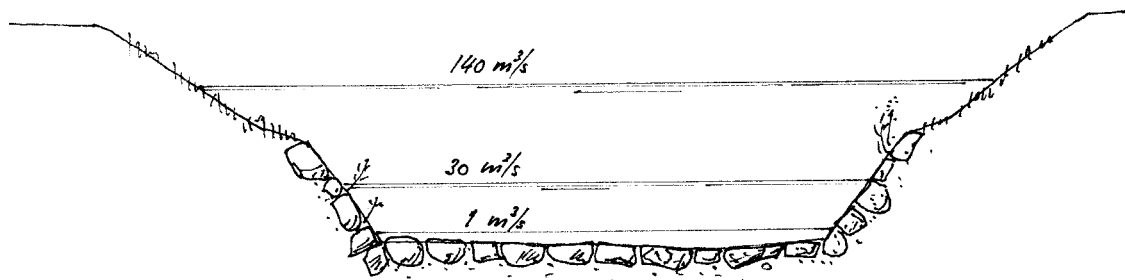
Die ca. 80 m lange Versuchsstrecke liegt oberhalb des Kiesfanges vor der Einmündung in den Sihlsee. Der Seewasserspiegel kann in seltenen Fällen bis auf die Höhe der Versuchsstrecke ansteigen, was jedoch keinen Einfluss auf die Hochwasserabflüsse hat. Die geradlinige Versuchsstrecke befindet sich unterhalb einer Linkskurve.

Die Sohle ist teilweise verkrautet. Der Blocksatz an den Ufern ist ca. 1.9 m hoch, in den Fugen wachsen vereinzelt Pflanzen. Über dem Blocksatz ist die etwas flachere Böschung mit Gras bewachsen. Bei niedriger Wasserführung bleiben Steinblöcke und Kies auf der Sohle liegen. Bei Hochwasser ist Geschiebetrieb vorhanden.

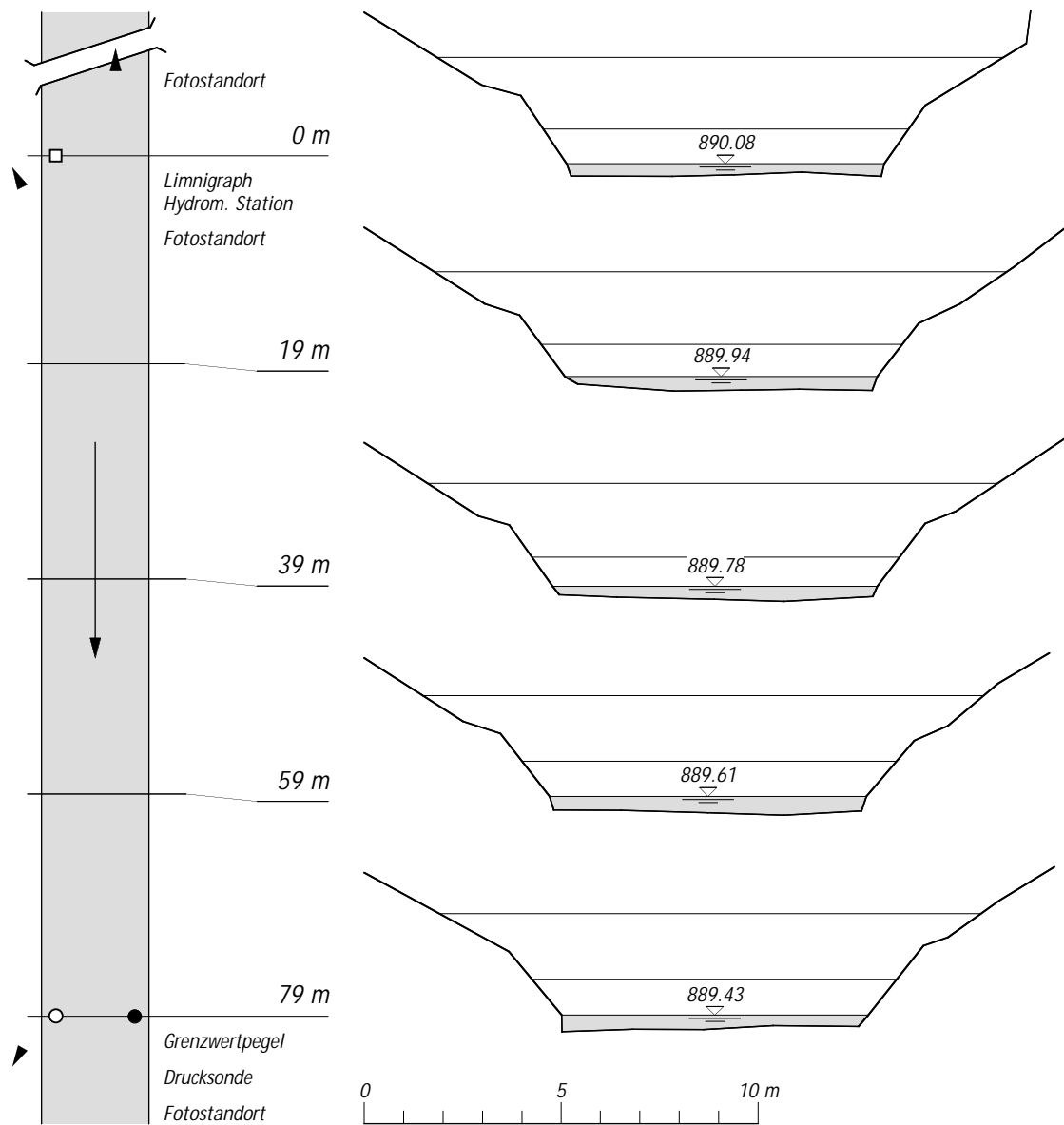


Oberer Teil der Versuchsstrecke in Fließrichtung mit $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 3.9.1993

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Minster - Euthal



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Minster – Euthal

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydraulischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
30 m³/s						
0	9.9	9.3	1.1	3.0	0.9	0.9
19	9.5	9.2	1.1	3.2	0.9	1.0
39	9.8	9.4	1.0	3.1	0.9	1.0
59	11.0	9.5	1.2	2.7	1.0	0.8
79	10.3	9.3	1.1	2.9	1.0	0.9
140 m³/s						
0	30.8	14.4	2.1	4.5	1.8	1.0
19	30.8	14.5	2.1	4.6	1.8	1.0
39	30.6	14.4	2.1	4.6	1.8	1.0
59	30.4	14.2	2.1	4.6	1.8	1.0
79	28.8	13.8	2.1	4.9	1.8	1.1

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Minster - Euthal

3.1.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
13.08.1994	48	28.08.1996	51
08.09.1994	49	08.06.1997	71
12.07.1995	145	18.07.1997	58
19.08.1995	48	28.08.1997	64
28.08.1995	67	13.09.1997	109
08.07.1996	83		

3.1.4 Berechnungen

Die Berechnungen für die Abflussmengen von 60 bis 140 m³/s ergeben für die Versuchsstrecke einen mittleren k-Wert nach Strickler von 38 m^{1/3}/s.

Die Resultate für 30 m³/s ergeben einen mittleren k-Wert von 36 m^{1/3}/s.

3.1.5 Bemerkungen

Die Versuchsstrecke ist typisch für einen in Blocksatz erstellten Kanal. Die ermittelten Fliesswiderstände sind gegenüber den herkömmlichen Angaben von mehr als $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ für gemauerte oder betonierte Gerinne verhältnismässig gross. Dies kann durch den Geschiebetrieb oder auch den Bewuchs der Blocksatzfugen erklärt werden.

Die Hochwasserspiegel in der 80 m langen Versuchsstrecke liegen im Bereich der Grenztiefe zwischen schiessenden und strömenden Abflussverhältnissen. Dies erschwert die Berechnung der Stau- und Senkungskurven, welche je nach Fliesszustand in Fliessrichtung oder gegen die Fliessrichtung erfolgen muss.

Mit den Wasserstandsmessungen an beiden Enden der Versuchsstrecke ist der Wasserspiegel genügend genau bekannt. Die Versuchsstrecke erweist sich als genügend lang. Die Mittelung der Berechnungen ergibt mittlere k-Werte, welche jeweils für die ganze Versuchsstrecke gelten.

Im unteren Messprofil liegen die Messungen des Grenzwertpegels bei Hochwasser durchschnittlich 10 cm höher als diejenige der Drucksonde. Die Ursache könnte auf die unterschiedlichen Anströmungen der Messgeräte bei den hohen Fliessgeschwindigkeiten respektive auf die starke Wellenbildung zurückzuführen sein.

Der grössere Fliesswiderstand bei kleinen Abflussmengen kann durch die im Verhältnis zur Abflusstiefe grössere Rauheit des Blocksatzes erklärt werden, (vergleiche hierzu Kapitel 2.2.3).

Bei vollem Gerinne nimmt mit zunehmender Abflussmenge der Fliesswiderstand nicht mehr weiter ab. Der kleinere Fliesswiderstand des Hauptgerinnes wird durch die zusätzlichen Fliesswiderstände über dem Blocksatz kompensiert. Die zusätzlichen Fliesswiderstände können durch die flacheren Böschungen mit Abtrennung der Strömung vom Hauptgerinne und Bildung von Turbulenzen bei den Trennflächen erklärt werden.



Versuchsstrecke Minster - Euthal, gegen die Fliessrichtung, Abflussmenge $33 \text{ m}^3/\text{s}$, 31.5.2000

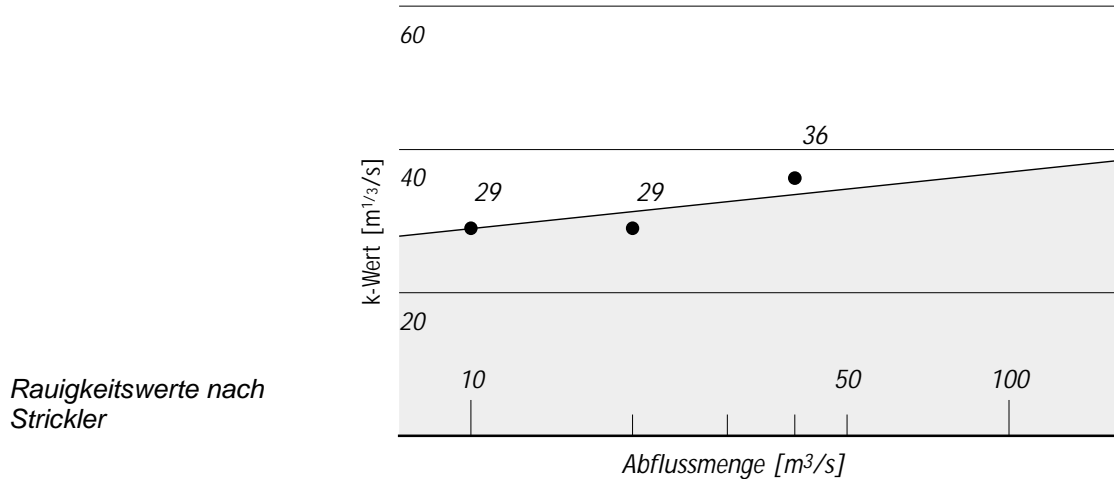
3.2 Suze bei Sonceboz

3.2.1 Übersicht



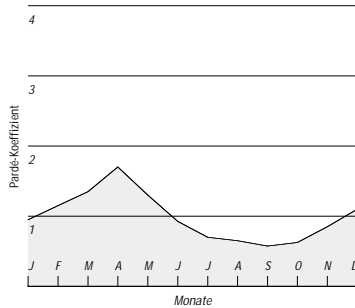
Versuchsstrecke Suze - Sonceboz mit Grenzwertpegel am rechten Ufer, in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 18.5.1989

Hydrometrische Station:	Suze – Sonceboz
Einzugsgebiet:	195 km^2
Regimetyp:	nivo-pluvial jurassien
Mittlerer Abfluss:	$4.3 \text{ m}^3/\text{s}$
10-jährliches Hochwasser:	$37 \text{ m}^3/\text{s}$
Gefälle:	3 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches geradliniges Trapezprofil mit flach verputztem Uferschutz, welcher teilweise überwachsen ist. Im Abflussprofil wachsen vereinzelt grössere Büsche. In der Kiessohle liegen grössere Blöcke

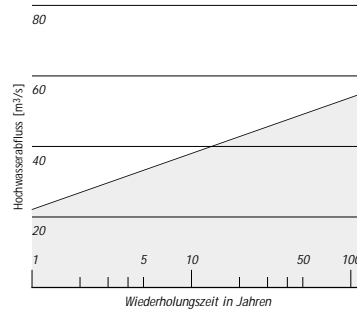


3.2.1 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

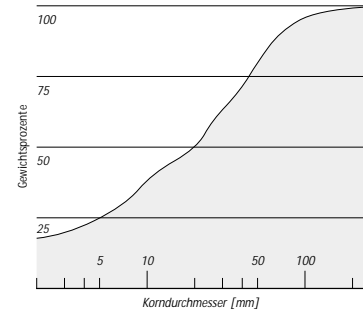
a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
nivo-pluvial jurassien*



*Hochwasserfrequenzen
(Vereinfachte Darstellung)*



*Kornverteilung der
Flusssohle*

b) Versuchsstrecke

Die ca. 100 m lange Versuchsstrecke liegt oberhalb der Überfallschwelle, welche als Messschwelle der hydrometrischen Station dient. Ca. 40 m oberhalb der Versuchsstrecke befindet sich eine weitere Schwelle.

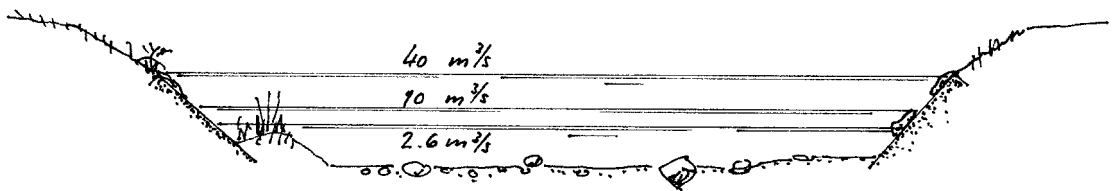
Die Flusssohle besteht aus Kies mit größeren Steinen. Das geradlinige trapezförmige Gerinne ist seitlich mit einem glatt verputzten Uferschutz eingefasst.

Das rechte Ufer ist vorwiegend mit Moos und Gras bewachsen. Vor dem linken Ufer haben sich im Abflussgerinne grössere Auflandungen mit Grasbüscheln gebildet, auf welchen teilweise auch grosse Büsche wachsen.

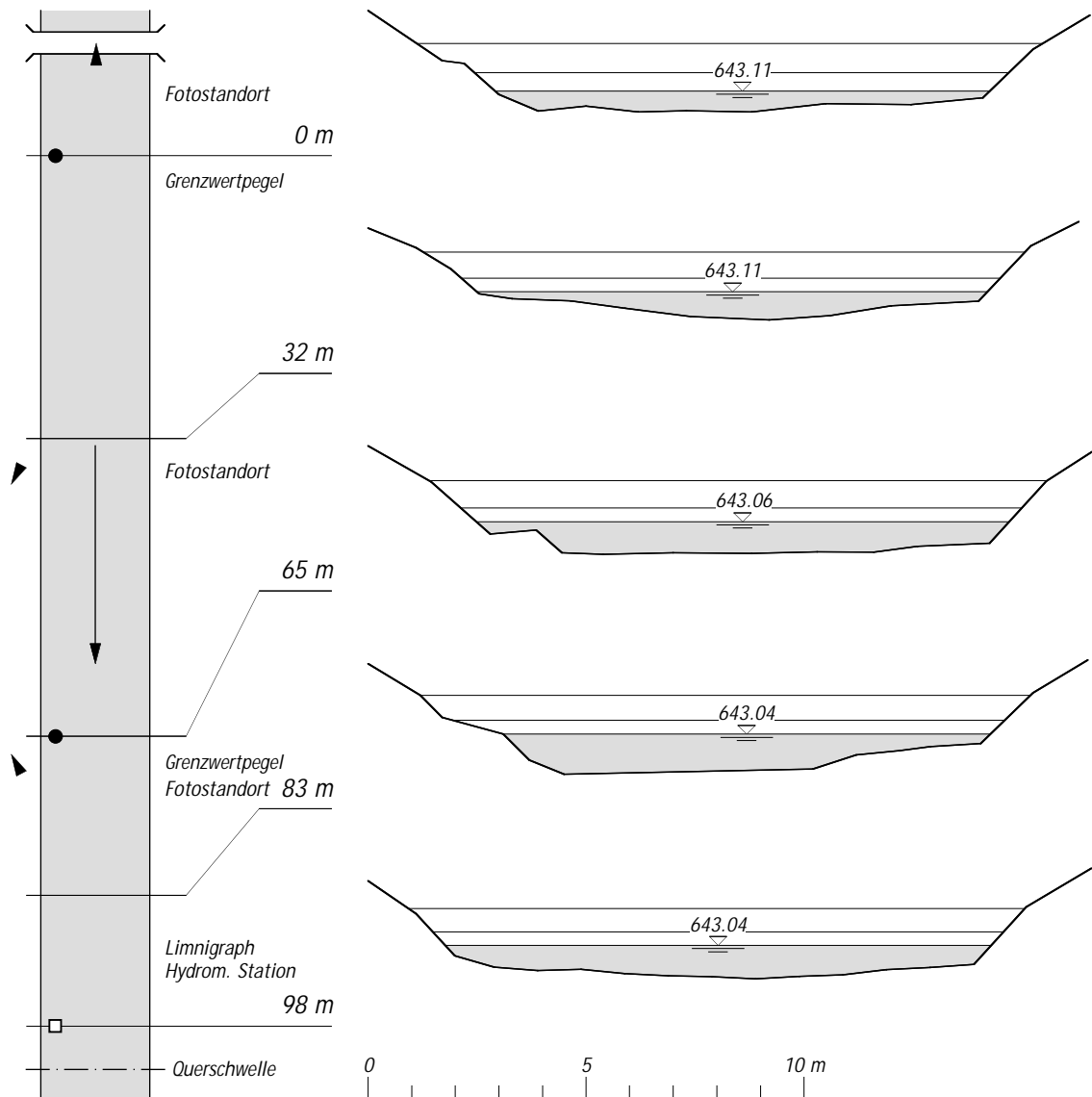


Versuchsstrecke Suze – Sonceboz gegen die Fließrichtung mit 2.4 m³/s, 18.5.1989

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Suze - Sonceboz



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Suze - Sonceboz

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydrau- lischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
10 m³/s						
0	9.0	12.2	0.7	1.1	0.7	0.4
32	8.3	12.4	0.7	1.2	0.6	0.5
65	11.5	12.9	0.9	0.9	0.8	0.3
83	11.1	12.7	0.9	0.9	0.8	0.3
98	11.3	13.1	0.9	0.9	0.8	0.3
40 m³/s						
0	17.9	14.2	1.3	2.2	1.2	0.6
32	16.1	13.8	1.2	2.5	1.1	0.7
65	19.7	14.1	1.4	2.0	1.3	0.5
83	18.6	14.0	1.3	2.1	1.2	0.6
98	18.6	14.1	1.3	2.1	1.2	0.6

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Suze - Sonceboz

3.2.2 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
29.12.1984	10.5	23.11.1986	10.8
11.01.1986	19.2	19.12.1986	33.8
24.01.1986	25.1	26.03.1987	10.8
03.04.1986	31.8	07.07.1987	24.4
08.05.1986	15.7	26.09.1987	53.1
04.06.1986	18.5		

3.2.4 Berechnungen

Die Auswertung der Versuchsstrecke ergibt für 40 m³/s einen mittleren k-Wert nach Strickler von 36 m^{1/3}/s. Die Berechnungen zeigen bei beiden Grenzwertpegeln sehr ähnliche Resultate mit nur kleinen Abweichungen zu den Messungen, weshalb dieser Wert für die ganze Versuchsstrecke festgelegt wird.

Die Resultate für 20 m³/s ergeben einen mittleren k-Wert von 29 m^{1/3}/s. Dieser Wert entspricht dem Mittel aus dem Wert für den unteren Streckenabschnitt von 26 m^{1/3}/s und dem Wert für den oberen Streckenabschnitt von 32 m^{1/3}/s.

Für 10 m³/s ergeben die Berechnungen einen mittleren k-Wert von 29 m^{1/3}/s. Wie bei der Berechnung für 40 m³/s stimmt dieser Wert sowohl für den unteren als auch für den oberen Abschnitt.

3.2.5 Bemerkungen

Die Versuchsstrecke ist typisch für einen korrigierten Fluss, in welchem der Unterhalt vernachlässigt oder im Sinne einer Renaturierung ein gewisser Bewuchs zugelassen wurde. Die aus der Versuchsstrecke gewonnenen Erkenntnisse können für ähnliche Gewässer mit wenig Gefälle im schweizerischen Mittelland gelten.

Im unteren Teil der Versuchsstrecke sind die Abflussverhältnisse durch die Schwelle beeinflusst. Beim Limnigraphen liegt der Wasserspiegel infolge der Absenkung der Überfallströmung vergleichsweise tief. Zudem ist das Flussbett vor der Schwelle ausgekolkt. Dies erschwert die Bestimmung des Fliesswiderstandes im unteren Streckenabschnitt und könnte auch die Widersprüche bei der Auswertung bei einer Abflussmenge von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ erklären.

Mit der Pegelmessung der hydrometrischen Station ist der Wasserspiegel am unteren Streckenende genau bekannt. Die Versuchsstrecke erweist sich als genügend lang.

Der mittlere k -Wert von $29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bei der Abflussmenge von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ geht von einer Ausgleichung der Messungen von beiden Grenzwertpegeln aus. Die Abweichungen betragen maximal 4 cm und werden auf die ungleichförmigen Strömungen, welche vom Modell nicht genügend genau simuliert sind, oder ungenaue Messungen infolge ungünstiger Anströmung der Grenzwertpegel zurückgeführt.

Die Abnahme des Fliesswiderstandes bei sehr grossen Abflussmengen kann durch die grössere Abflusstiefe und auch die geradlinigen und glatten Ufer im Hochwasserbereich erklärt werden.

Der Vergleich der Querprofilaufnahmen aus den Jahren 1985 und 1989 zeigt, dass die Sohle Veränderungen unterliegt und vermutlich bei grösseren Hochwassern in Bewegung gerät.



Unterer Teil der Versuchsstrecke Suze - Sonceboz in Fliessrichtung mit $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 18.5.1989

3.3 Gürbe bei Belp

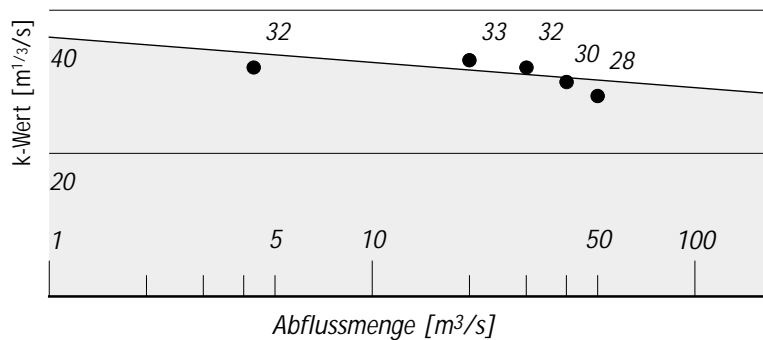
3.3.1 Übersicht



Versuchsstrecke Gürbe - Belp, gegen die Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 18.10.1985

Hydrometrische Station:	Gürbe – Belp, Stockmatt
Einzugsgebiet:	124 km^2
Regimetyp:	pluvial supérieur
Mittlerer Abfluss:	$2.6 \text{ m}^3/\text{s}$
10-jährliches Hochwasser:	$44 \text{ m}^3/\text{s}$
Gefälle:	1.7 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches Trapezprofil mit Sohle aus Sand und Kies. Ufer mit Gras bewachsen, vereinzelt mit Schilfpflanzen

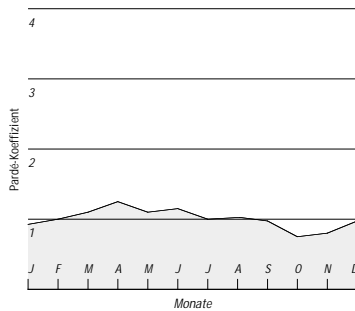
60



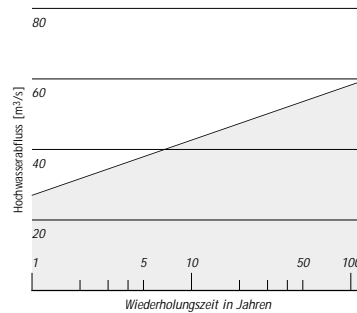
Rauigkeitswerte nach Strickler

3.3.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

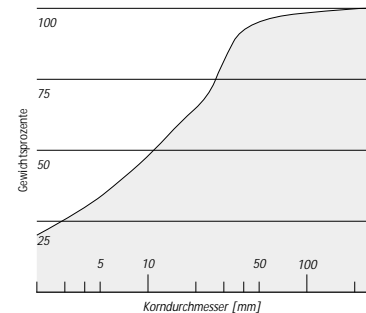
a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
pluvial supérieur*



*Hochwasserfrequenz
(Vereinfachte Darstellung)*



*Kornverteilung der
Flusssohle*

b) Versuchsstrecke

Die Gürbe ist im Bereich der Versuchsstrecke rund 12 Meter breit. Die geradlinige trapezförmige Teststrecke ist seitlich mit einem mehr oder weniger mit Gras überwachsenen Blocksatz eingefasst. Die Flusssohle besteht aus Sand, feinem Kies der Größe 10 - 15 mm und Steinen bis 10 cm Durchmesser.

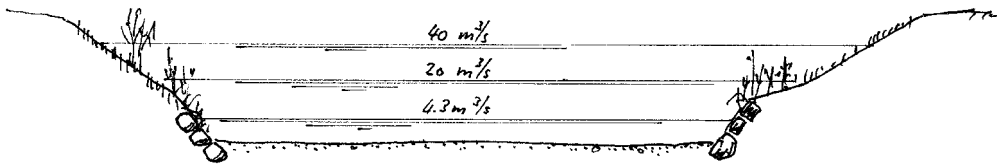
Die Verkräutung der Flusssohle verändert sich mit den Jahreszeiten. Während der Messperiode erhöhte sich der Wasserspiegel im Sommer infolge Verkräutung bis maximal 11 cm, im Mittel ca. 5 cm.

Die Flusssohle ist stabil.

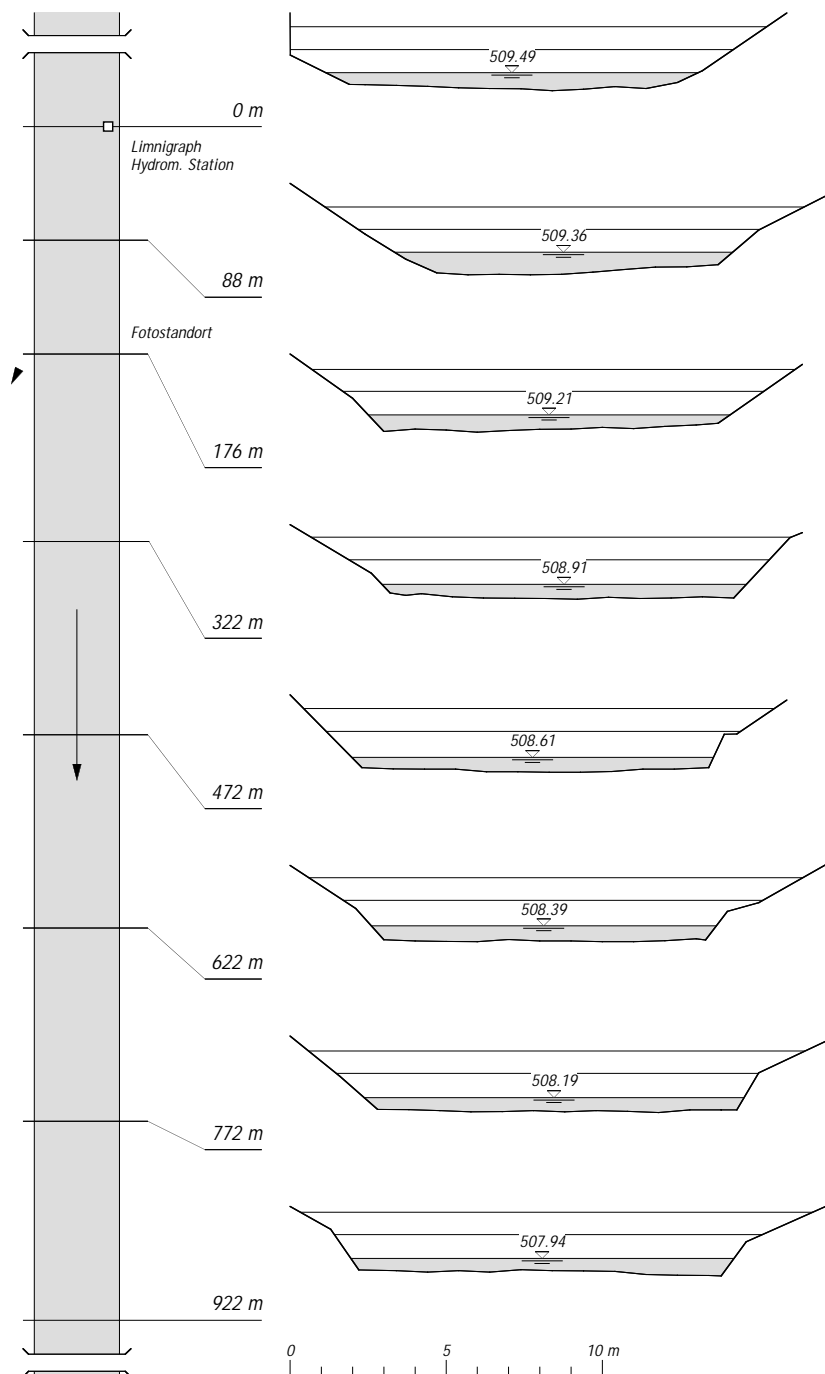


Unterhalb der Versuchsstrecke Gürbe – Belp gegen die Fließrichtung 0.6 m³/s, 18.10.1985

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil in der Versuchsstrecke Gürbe - Belp



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Gürbe - Belp

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydrau- lischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
20 m³/s						
0	15.0	14.2	1.1	1.3	1.0	0.4
88	14.7	12.9	1.1	1.4	1.1	0.4
176	14.4	13.5	1.1	1.4	1.0	0.4
322	14.3	13.5	1.1	1.4	1.0	0.4
472	14.8	13.3	1.1	1.4	1.0	0.4
622	14.8	13.4	1.1	1.3	1.0	0.4
772	14.9	13.5	1.1	1.3	1.0	0.4
922	14.6	13.5	1.1	1.4	1.0	0.4
40 m³/s						
0	25.8	15.3	1.7	1.6	1.5	0.4
88	24.9	15.3	1.6	1.6	1.5	0.4
176	25.0	15.6	1.6	1.6	1.5	0.4
322	24.7	15.3	1.6	1.6	1.5	0.4
472	25.1	15.1	1.7	1.6	1.5	0.4
622	25.5	15.8	1.6	1.6	1.5	0.4
772	25.5	15.9	1.6	1.6	1.5	0.4
922	25.3	16.2	1.6	1.6	1.4	0.4

Hydraulische Parameter der Querprofile der Versuchsstrecke Gürbe - Belp



Unterer Teil der Versuchsstrecke Gürbe - Belp in Fließrichtung mit 0.6 m³/s, 18.10.1985

3.3.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
01.12.1983	30	22.07.1985	29
15.08.1984	38	14.11.1985	25
25.10.1984	28	27.01.1986	28
23.05.1985	29		

3.3.4 Berechnungen

Die Berechnungen ergeben für die Abflussmenge von 40 m³/s einen mittleren k-Wert nach Strickler von 30 m^{1/3}/s, wobei von einem Zustand der Gewässersohle ohne Verkräutung ausgegangen wird. Bei einer mittleren Verkräutung, welche den Wasserspiegel um 5 cm anhebt, beträgt der k-Wert noch 29 m^{1/3}/s. Diese Resultate gelten für den oberen Bereich der Versuchsstrecke, wo die gerechneten Staukurven den Wasserspiegelmessungen angepasst sind. Im unteren Bereich der Teststrecke wurden keine Wasserspiegelmessungen vorgenommen.

Für 20 m³/s ergeben die Berechnungen einen k-Wert von 33 m^{1/3}/s und mit Verkräutung von 5 cm Wasserspiegelahebung 31 m^{1/3}/s.

Die versuchsweise vorgenommenen Berechnungen mit 4.3 m³/s und den Wasserspiegelahebungen bei Niederwasser ergeben für die verschiedenen Flussabschnitte zwischen den Profilen k-Werte von 32 bis 38 m^{1/3}/s und mit Verkräutung von 5 cm Wasserspiegelahebung von 27 bis 30 m^{1/3}/s.

3.3.5 Bemerkungen

Die Versuchsstrecke musste wegen dem sehr kleinen Gefälle mit 922 m relativ lang gewählt werden, damit die am unteren Ende mit unterschiedlichen Anfangshöhen gestarteten Staukurvenberechnungen am oberen Ende die selben Wasserspiegelhöhen ergeben. Für die Berechnungen mit 40 m³/s erweist sich die Versuchsstrecke als genügend lang. Für noch grössere Abflussmengen wäre die Länge jedoch eher knapp.

Die Berechnungen stützen sich allein auf die hydrometrische Station ab, welche sich am oberen Ende der Versuchsstrecke befindet und deren Pegelmessung in die Versuchsstrecke integriert ist. Die Verwendung des Limnigraphen ist möglich, da keine Messschwelle vorhanden ist.

Die Zunahme des Fließwiderstandes mit zunehmender Abflussmenge lässt sich mit dem vermehrten Einfluss der Ufervegetation erklären.

Von speziellem Interesse an dieser Versuchsstrecke ist die Verkräutung der Flusssohle. Die Berücksichtigung von einer Verkräutung mit 5 cm Wasserspiegelahebung reduziert den k-Wert um 1 m^{1/3}/s. Demnach dürfte die während der Messperiode ausgewiesene maximale Verkräutung von 11 cm eine Reduktion des k-Wertes um rund 2 m^{1/3}/s verursachen. Dies unter der Voraussetzung, dass der Einfluss der Verkräutung unabhängig von der Abflussmenge und somit von der Abflusstiefe ist.

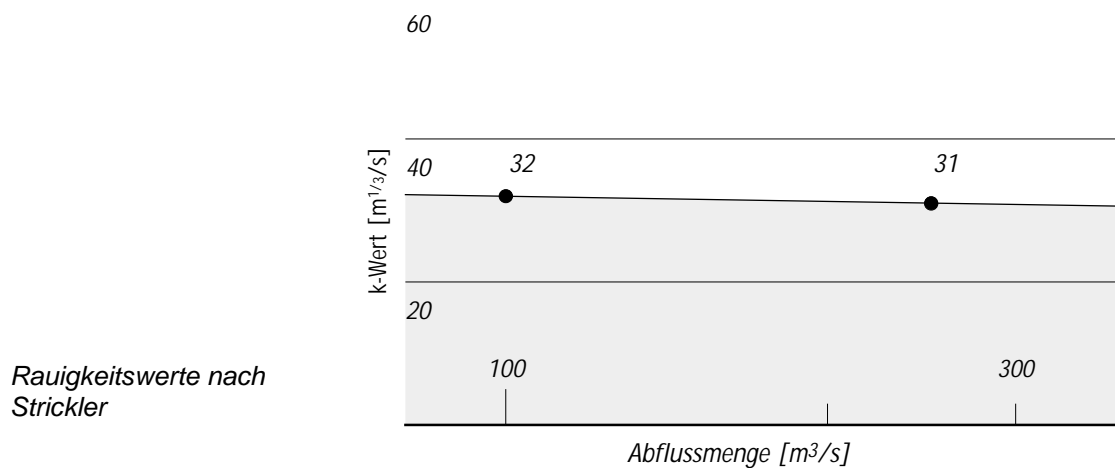
3.4 Emme bei Burgdorf

3.4.1 Übersicht



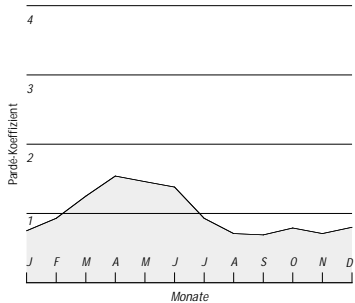
Untere Sperre der Versuchsstrecke Emme - Burgdorf, gegen die Fliessrichtung betrachtet. Abflussmenge 2.1 m³/s, Aufnahme vom 20.6.2000

Hydrometrische Station:	Emme – Burgdorf, Lochbach
Einzugsgebiet:	673 km ²
Regimetyp:	nivo-pluvial préalpin
Mittlerer Abfluss:	17 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser:	360 m ³ /s
Gefälle:	3.6 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches Trapezprofil mit Kiessohle. Uferschutz aus Blocksatz, überwachsen

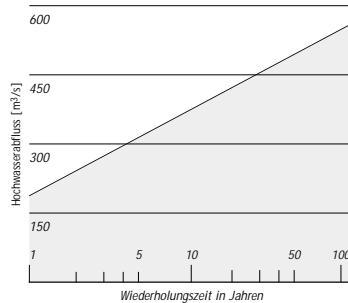


3.4.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

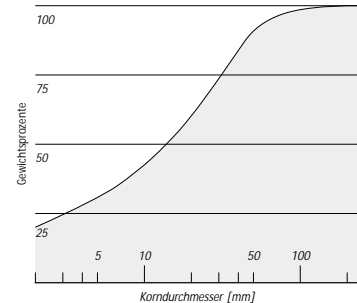
a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
nivo-pluvial préalpin*



*Hochwasserfrequenzen
(Vereinfachte Darstellung)*



*Kornverteilung der
Flusssohle*

b) Versuchsstrecke

Das Hauptgerinne der Emme ist im Bereich der Versuchsstrecke ca. 40 m breit. Das geradlinige trapezförmige Gerinne ist seitlich mit einem mehr oder weniger überwachsenen Blocksatz eingefasst. Die Flusssohle besteht aus Kies der mittleren Größe von 1 bis 2 cm.

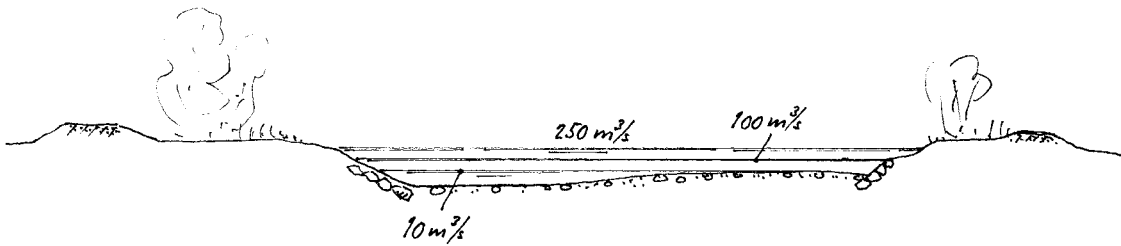
Die 540 m lange Versuchsstrecke liegt oberhalb der 1963 gebauten Sperre mit einer Fallhöhe von rund einem Meter, welche als Messschwelle der hydrometrischen Station dient. Ca. 40 m oberhalb der Versuchsstrecke befindet sich eine weitere Sperre.

Der Vergleich der Querprofilaufnahmen aus den Jahren 1959, 1969 und 1982 zeigt, dass der Auflandungsprozess oberhalb der neuen, gegenüber der Sohle angehobenen Sperre, noch nicht abgeschlossen war.

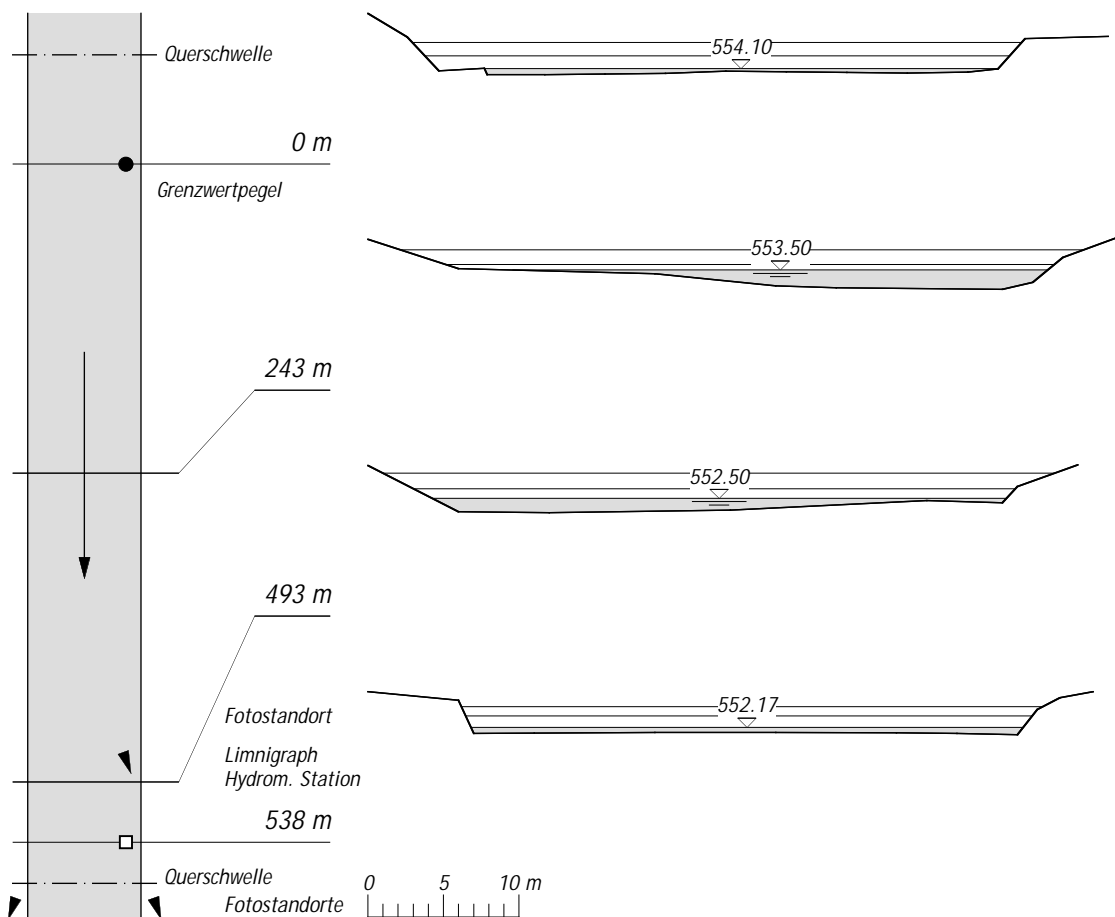


Versuchsstrecke Emme - Burgdorf gegen die Fließrichtung mit 2.1 m³/s, 20.6.2001

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Emme – Burgdorf



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Emme - Burgdorf

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydrau- lischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
100 m³/s						
0	41.5	38.7	1.1	2.4	1.0	0.7
243	41.7	40.3	1.0	2.4	1.0	0.8
493	48.3	39.8	1.2	2.1	1.2	0.6
538	41.5	37.5	1.1	2.4	1.1	0.7
250 m³/s						
0	76.7	40.3	1.9	3.3	1.8	0.8
243	82.6	45.2	1.8	3.0	1.8	0.7
493	92.1	44.5	2.1	2.7	2.0	0.6
538	65.0	38.2	1.7	3.8	1.6	0.9

Hydraulische Parameter der Querprofile der Versuchsstrecke Emme - Burgdorf

3.4.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
10.11.1985	145	28.02.1987	193
25.03.1986	112	26.06.1987	188
04.06.1986	197	22.03.1988	221
24.07.1986	100	14.06.1988	163
23.08.1986	96	10.10.1988	244
23.10.1986	130		

3.4.4 Berechnungen

Die Berechnungen ergeben für die Abflussmenge von 250 m³/s einen mittleren k-Wert nach Strickler von 31 m^{1/3}/s.

Für 100 m³/s ergeben die Berechnungen einen k-Wert von 32 m^{1/3}/s.

3.4.5 Bemerkungen

Die Versuchsstrecke ist typisch für einen korrigierten Gebirgsfluss mit breitem Gerinne, in welchem das Ufer nur einen kleinen Einfluss auf den Fliesswiderstand hat. Die ermittelten Fliesswiderstände sind vergleichsweise klein, was auf das Fehlen jeglicher grossen Steine und residualen Blöcken zurückgeführt werden kann.

Im unteren Teil der Versuchsstrecke sind die Abflussverhältnisse durch die Sperre beeinflusst. Beim Limnigraph liegt der Wasserspiegel infolge der Absenkkurve der

Überfallströmung vergleichsweise tief, und das Flussbett ist vor der Schwelle ausgekolk.

Die Wasserstandsmessung der hydrometrischen Station am unteren Streckenende liegt im Bereich der abfallenden Überfallströmung, was die Bestimmung der Energiehöhe erschwert. Diese Ungenauigkeit kann durch eine ausreichende Streckenlänge kompensiert werden, was bei einer Länge von 540 m der Fall sein dürfte.

Allerdings gelten so die Resultate nur für den oberen Teil der Versuchsstrecke mit dem Grenzwertpegel. Vermutlich variiert der k-Wert in der Versuchsstrecke aber nicht gross.

Die Berechnungsergebnisse stützen sich ausschliesslich auf den Grenzwertpegel am oberen Streckenende. Die Messungen des Grenzwertpegels für die 5 höchsten Hochwasserereignisse stimmen unter sich gut überein, weshalb der für die Abflussmenge von 250 m³/s bestimmte k-Wert als zuverlässig gilt. Die Messungen der kleineren Hochwasser weisen eine Streuung auf, was eine Ausgleichung mit Korrekturen von bis zu 15 cm erforderte. Deshalb ist die Genauigkeit des k-Wertes für die Abflussmenge von 100 m³/s niedriger.



Untere Sperre der Versuchsstrecke Emme – Burgdorf gegen die Fließrichtung, ca. 150 m³/s, 14.2.1990

3.5 Glatt beim Ausfluss des Greifensees

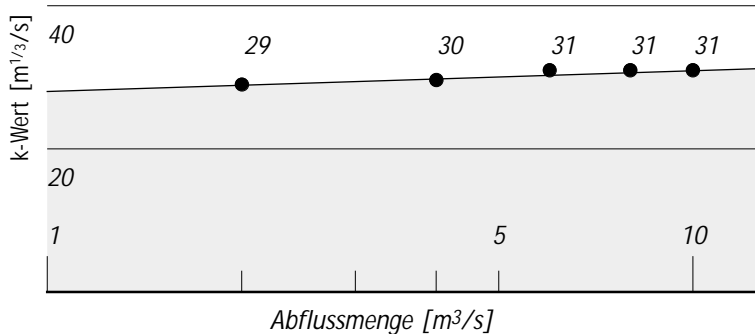
3.5.1 Übersicht



Versuchsstrecke Glatt beim Ausfluss des Greifensees, in Fließrichtung betrachtet.
Abflussmenge 1.7 m³/s, Aufnahme vom 21.2.1989

Hydrometrische Station:	Glatt – Fällanden (Kanton Zürich)
Einzugsgebiet:	167 km ²
Regimetyp:	Seeausfluss
Mittlerer Abfluss:	4 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser:	16 m ³ /s
Gefälle:	0.3 ‰
Abflussgerinne:	Geradliniges Trapezprofil. Uferschutz bis auf die Höhe des mittleren Wasserstandes aus Blockwurf, darüber abwechselungsweise Gras und Schilf. Sohle aus Kies und Steinen

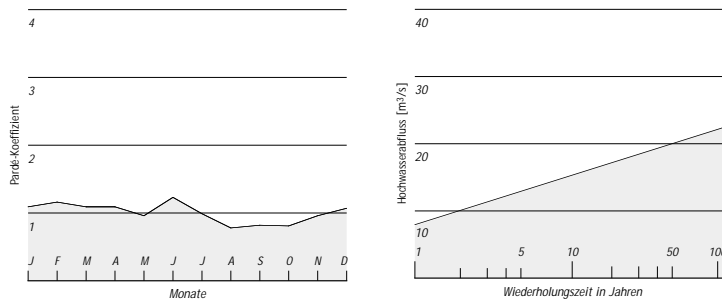
60



Rauigkeitswerte nach Strickler

3.5.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
Seeausfluss*

*Hochwasserfrequenzen
(vereinfachte Darstellung)*

b) Versuchsstrecke

Das obere Ende der Versuchsstrecke liegt einige Meter vom Wehr des Greifensees entfernt, mit welchem der Seeausfluss reguliert werden kann. Die 897m lange Versuchsstrecke liegt im geradlinig in der Riedlandschaft angelegten Gerinne.

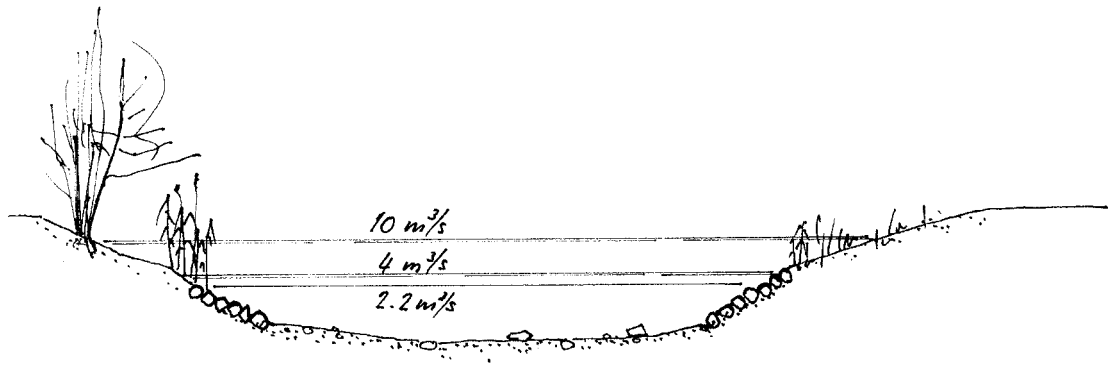
Im 15m breiten, trapezförmigen Gerinne mit Hochwasserdämmen ist der Dammfuss mit einer Steinschüttung (Rollierung) geschützt. Im Hochwasserbereich ist das Ufer streckenweise mit Schilf oder Gras bewachsen. Die Büsche und Bäume wachsen über diesem Bereich. Die Flusssohle besteht aus Sand und Kies. Vereinzelt liegen grössere Steine, welche von der Rollierung stammen dürften, auf der Flusssohle.

Im unteren Streckenteil zwischen dem Grenzwertpegel und dem Limnigraphen befinden sich drei Querswellen aus quaderförmigen Steinen, welche ca. 0.2 m über die Sohle vorstehen. Diese Schwellen sind immer vollständig eingestaut und somit hydraulisch nur wenig wirksam. Als Ausfluss des Greifensees führt die Glatt im Bereich der Versuchsstrecke weder Geschiebe noch Schwebstoffe. Der Wasserspiegel ist immer sehr glatt und weist selbst bei Hochwasser keine Wellen auf.

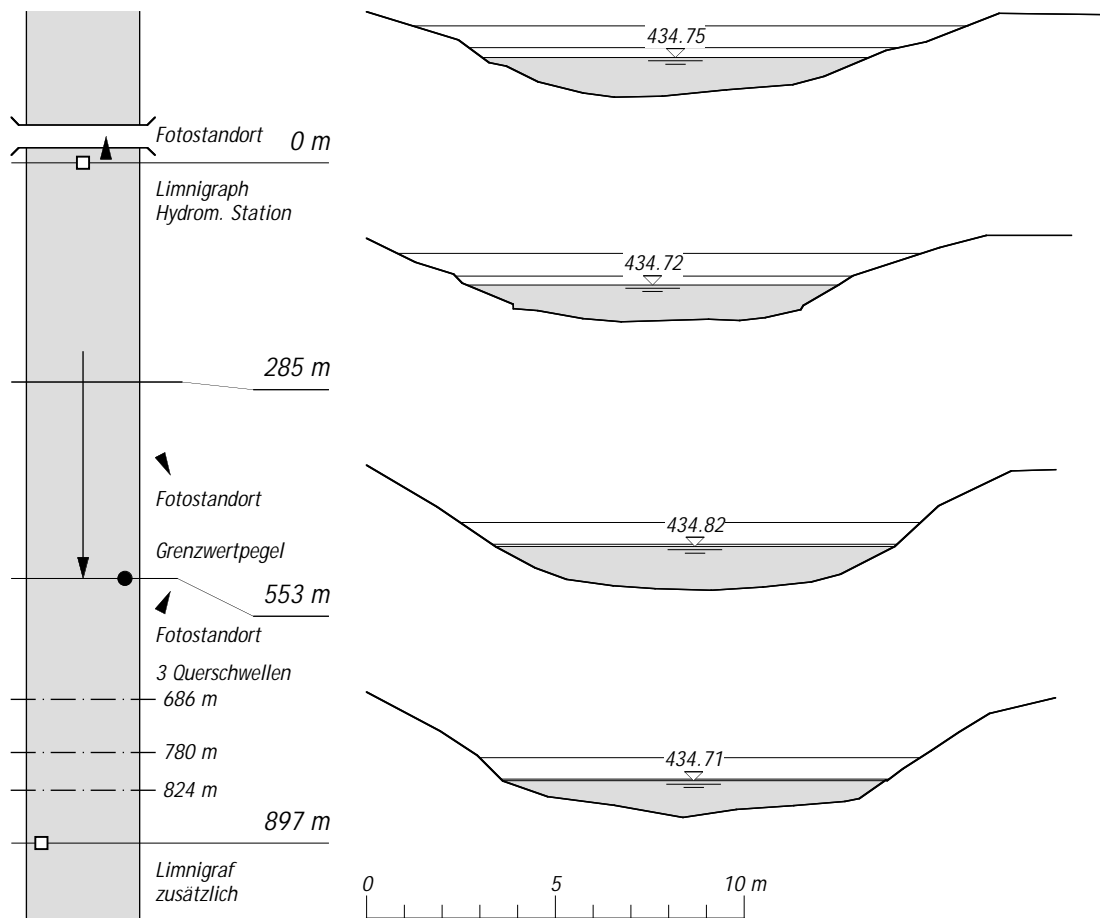


Versuchsstrecke Glatt - Fällanden gegen die Fließrichtung mit $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 29.5.1989

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Glatt - Fällanden



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Glatt - Fällanden

d) Hydraulik

Profil Distanzen [m]	Fläche [m ²]	Breite [m]	Mittlere Tiefe [m]	Mittlere Geschwin- digkeit [m/s]	Hydrau- lischer Radius [m]	Froude- Zahl [-]
4 m³/s						
0	10.1	11.4	0.9	0.4	0.9	0.1
285	9.6	10.5	0.9	0.4	0.9	0.1
553	9.6	10.7	0.9	0.4	0.9	0.1
897	6.6	10.2	0.6	0.6	0.6	0.2
10 m³/s						
0	17.8	14.7	1.2	0.6	1.2	0.2
285	16.9	13.9	1.2	0.6	1.1	0.2
553	16.2	12.2	1.3	0.6	1.2	0.2
897	12.8	11.7	1.1	0.8	1.0	0.2

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Glatt - Fällanden

3.5.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
09.07.1990	6.8	20.01.1991	6.7
05.11.1990	7.9	20.06.1991	9.9
23.11.1990	8.8	23.12.1991	7.0
02.12.1990	7.3	16.02.1992	6.8
07.01.1991	9.1	03.04.1992	6.2

3.5.4 Berechnungen

Die Berechnungen für die Abflussmengen von 2, 4, 6, 8 und 10 m³/s ergeben k-Werte von 29, 30, 31, 31 und 31 m^{1/3}/s.

3.5.5 Bemerkungen

Mit dem sehr kleinen Gefälle von lediglich 0.3 ‰ sind die Abflusstiefen auch bei mittlerer Wasserführung verhältnismässig gross. Die Versuchsstrecke eignet sich deshalb auch für die Auswertung von mittleren Wassermengen.

Die 897 m lange Versuchsstrecke ist mit 21 Querprofilen vermessen. Die hohe Profilhöhe ist für die grosse Länge und für die Querswellen nötig. Da in der gleichförmigen Versuchsstrecke die hydraulischen Parameter nur wenig variieren, sind in Kap. 3.5.2 nur 4 Profile dargestellt.

Die Staukurvenberechnungen zeigen, dass sich schon kleine Störungen von wenigen cm Höhe am unteren Ende auf die ganze Strecke auswirken. Deshalb ist es unum-

gänglich, bei dieser Versuchsstrecke die Wasserspiegellage am unteren Ende zu messen. Mit dieser Pegelmessung erweist sich die Versuchsstrecke genügend lang.

Im verwendeten Staukurvenmodell sind die 3 Schwellen nachgebildet. Bei der Abflussmenge von $2 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt der maximale Rückstau 3 cm, bei der Hochwassermenge von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ nur noch wenige mm. Trotz der rechnerischen Nachbildung der Schwellen sind die Resultate für die Abflussmengen von 2 bis $6 \text{ m}^3/\text{s}$ tendenziell etwas ungenauer.

Bei grossen Abflüssen liegt der teilweise vorhandene Schilfgürtel, in welchem das Wasser wesentlich langsamer als in Flussmitte fliesst, im Abflussprofil. Der hohe Widerstand des Schilfgürtels bewirkt, dass der k-Wert bei grossen Hochwassern nicht mehr weiter zunimmt.

Für die geradlinige und gleichmässige Versuchsstrecke ohne grössere Steinblöcke scheint der k-Wert im Bereich von $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ verhältnismässig klein. Die grossen Fließwiderstände sind auf die rauhen Ufer zurückzuführen, welche im relativ schmalen Gewässer einen grossen Einfluss haben. Die Versuchsstrecke ist somit für verhältnismässig schmale, korrigierte Flüsse im Mittelland mit wenig Gefälle typisch.

Andererseits ist die Versuchsstrecke mit dem ausgeglichenen Abflussregime, dem Geschiebe und schwebstofffreien Abfluss und dem sehr kleinen Gefälle beinahe ein Sonderfall, der für Analogieschlüsse für Kanäle herangezogen werden kann.



Mittlerer Teil der Versuchsstrecke Glatt – Fällanden in Fliessrichtung mit $11.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 6.12.1992

3.6 Lütschine bei Gsteig

3.6.1 Übersicht

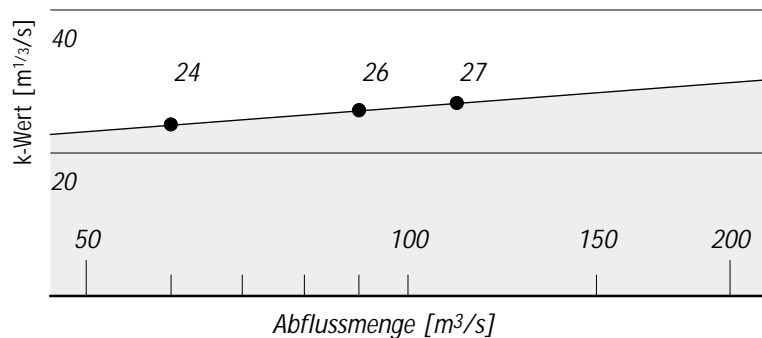


Versuchsstrecke Lütschine - Gsteig, gegen die Fließrichtung betrachtet.
Abflussmenge $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 8.12.1993

Hydrometrische Station:	Lütschine – Gsteig
Einzugsgebiet:	379 km^2
Regimetyp:	a-glacio-nival
Mittlerer Abfluss:	$19 \text{ m}^3/\text{s}$
10-jährliches Hochwasser:	$150 \text{ m}^3/\text{s}$
Gefälle:	7 ‰
Abflussgerinne:	Künstlicher Kanal mit leichter S-Kurve. Trapezprofil mit Ufermauern aus Blocksatz und abschnittsweise Vorgrund-sicherung aus grossen Steinblöcken. Kiessohle.

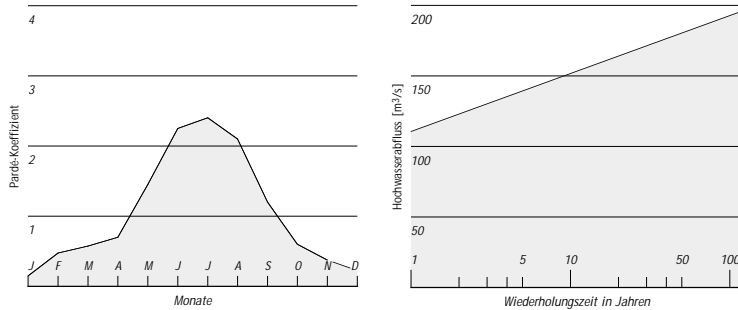
60

Rauigkeitswerte nach
Strickler



3.6.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
a-glacio-nival*

Hochwasserfrequenzen

b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke liegt im künstlichen, zwischen 18 und 25 m breiten Kanal mit offener Kieselsohle und einer leichten S-Kurve. Die beinahe senkrechten Kanalmauern sind aus sorgfältig verlegten Steinblöcken, welche eine ebene Mauerfläche bilden, gebaut. Die Mauern sind abschnittsweise mit einer Vorgrundsicherung aus Steinblöcken bis 2 m Grösse geschützt.

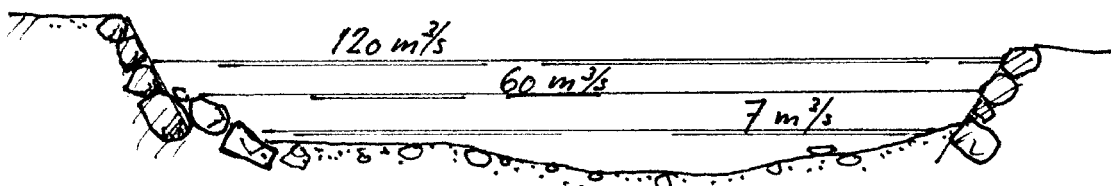
Die Messschwelle der hydrometrischen Station am unteren Ende der Strecke ist die einzige Querverbauung.

Die Kieselsohle wird aufgrund der gleichbleibenden Pegelrelation der Abflussmessstation als stabil angenommen.

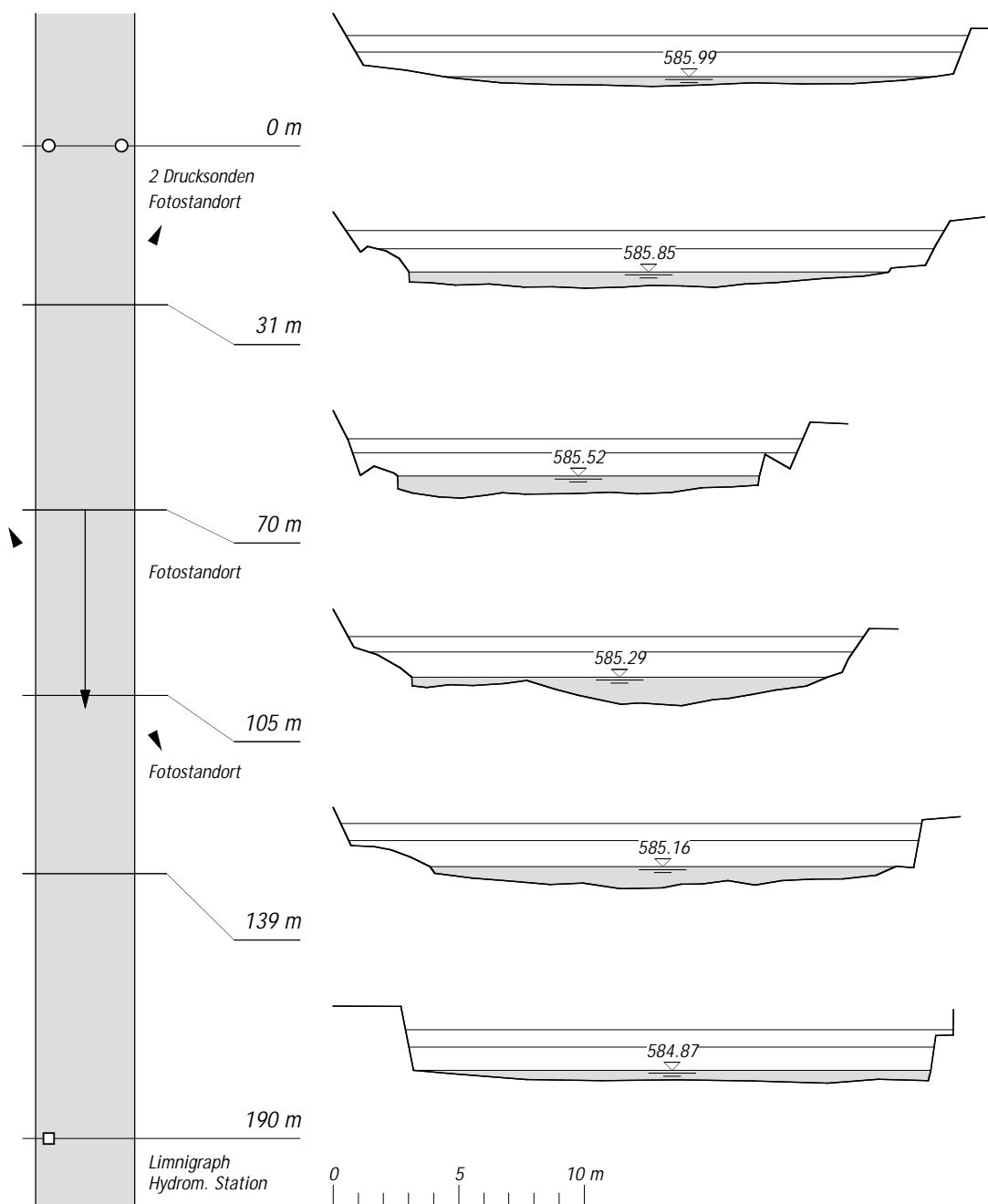


Versuchsstrecke Lutschine - Gsteig in Fließrichtung mit 20 m³/s, 30.8.1993

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Lütschine - Gsteig



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Lütschine - Gsteig

d) Hydraulik

Profil Distanzen [m]	Fläche [m ²]	Breite [m]	Mittlere Tiefe [m]	Mittlere Geschw. [m/s]	Hydraul. Radius [m]	Froude- Zahl [-]
60 m³/s						
0	27.6	24.1	1.1	2.2	1.1	0.7
31	28.6	23.0	1.2	2.1	1.2	0.6
70	24.6	17.8	1.4	2.4	1.2	0.7
105	28.2	19.8	1.4	2.1	1.3	0.6
139	32.5	22.7	1.4	1.8	1.3	0.5
190	26.6	20.9	1.3	2.3	1.2	0.6
120 m³/s						
0	43.7	24.8	1.8	2.7	1.6	0.7
31	45.5	23.8	1.9	2.6	1.7	0.6
70	34.5	18.2	1.9	3.5	1.6	0.8
105	40.7	20.6	2.0	2.9	1.8	0.7
139	48.0	23.1	2.1	2.5	1.9	0.6
190	41.1	21.1	1.9	2.9	1.7	0.7

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Lutschine - Gsteig

3.6.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
27.06.1994	99	30.05.1995	103
18.07.1994	110	03.07.1995	118
19.07.1994	101	23.07.1995	105
06.08.1994	106	08.08.1995	103
08.08.1994	119	29.06.1997	104
11.08.1994	116	18.07.1997	118
14.08.1994	102	26.07.1997	119
25.08.1994	107	28.08.1997	99

3.6.4 Berechnungen

Die Auswertung der Versuchsstrecke ergibt für die Abflussmenge von 120 m³/s einen mittleren k-Wert nach Strickler von 27 m^{1/3}/s.

Die Resultate für 90 m³/s ergeben einen mittleren k-Wert von 26 m^{1/3}/s und für 60 m³/s 24 m^{1/3}/s. Die Werte gelten für die ganze Versuchsstrecke.

3.6.5 Bemerkungen

Die beiden Drucksonden an den beiden Ufern am oberen Ende der Versuchsstrecke zeigen unterschiedliche Messungen. Die höheren Werte der linken Drucksonde können durch die schiefe Lage des Wasserspiegels in der leichten Rechtskurve erklärt werden. Für die Auswertung werden die Messungen gemittelt.

Die ermittelten Fliesswiderstände gelten für die ganze Versuchsstrecke.

Mit der Pegelmessung der hydrometrischen Station ist der Wasserspiegel am unteren Streckenende genau bekannt. Die Versuchsstrecke erweist sich als genügend lang.

Die Abnahme des Fliesswiderstandes mit zunehmenden Abflussmengen kann durch die im Verhältnis zur Korngrösse grössere Abflusstiefe erklärt werden.

Die Fliesswiderstände in der Lutschine sind vergleichsweise kleiner als in der Birse bei Moutier, in welcher grössere Steinblöcke auch in Flussmitte liegen. Im verhältnismässig breiten Gerinne der Lutschine haben die Steinblöcke am Ufer nur einen kleinen Einfluss. Trotzdem dürfen die Steinblöcke nicht vernachlässigt werden, sind doch die Fliesswiderstände in der Lutschine – Gsteig immer noch wesentlich grösser als z.B. bei der Emme – Burgdorf, wo keine Steinblöcke vorhanden sind.



Versuchsstrecke Lutschine -Gsteig in Fliessrichtung mit 4.3 m³/s, 8.12.1993

3.7 Birse bei Moutier

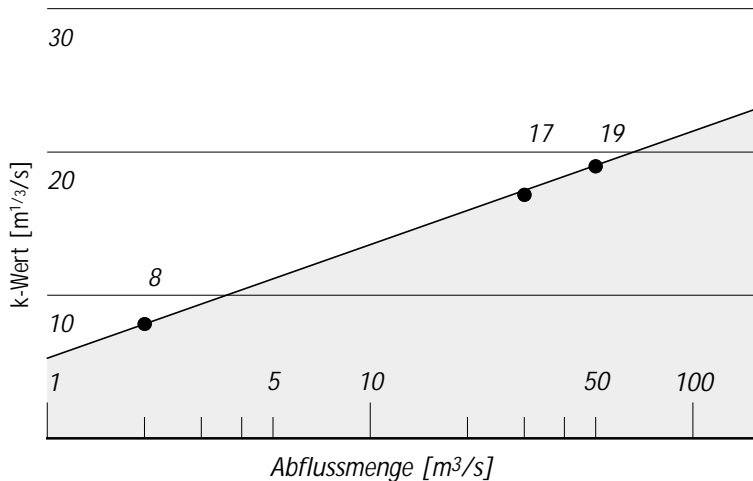
3.7.1 Übersicht



Versuchsstrecke Birse - Moutier, in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge 2.6 m³/s , Aufnahme vom 8.12.1993

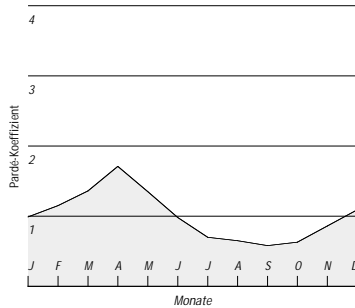
Hydrometrische Station:	Birse – Moutier, La Charrue
Einzugsgebiet:	183 km ²
Regimetyp:	nivo-pluvial jurassien
Mittlerer Abfluss:	3.3 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser:	45 m ³ /s
Gefälle:	18 ‰
Abflussgerinne:	Künstliches geradliniges Trapezprofil mit Ufern aus Blocksatz. Kiessohle mit Blöcken. Am Ufer vereinzelt Büsche und Bäume.

Rauigkeitswerte nach Strickler

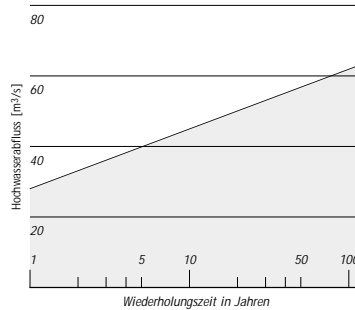


3.7.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

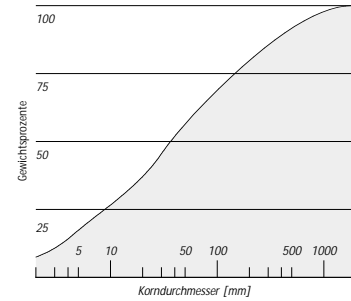
a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
nivo-pluvial jurassien*



*Hochwasserfrequenzen
(Vereinfachte Darstellung)*



*Kornverteilung der
Flusssohle*

b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke liegt in einer geradlinigen Flussstrecke mit einem Trapezprofil. Die Stützmauer am linken Ufer ist verputzt und hat eine glatte Oberfläche. Am Mauerfuss liegen kantige Blöcke bis 1 m. Am rechten Ufer wechseln sich anstehender Fels und Blockwurf aus kantigen Blöcken bis 1 m gegenseitig ab. In der Kiessohle liegen kantige Blöcke bis 1 m Grösse.

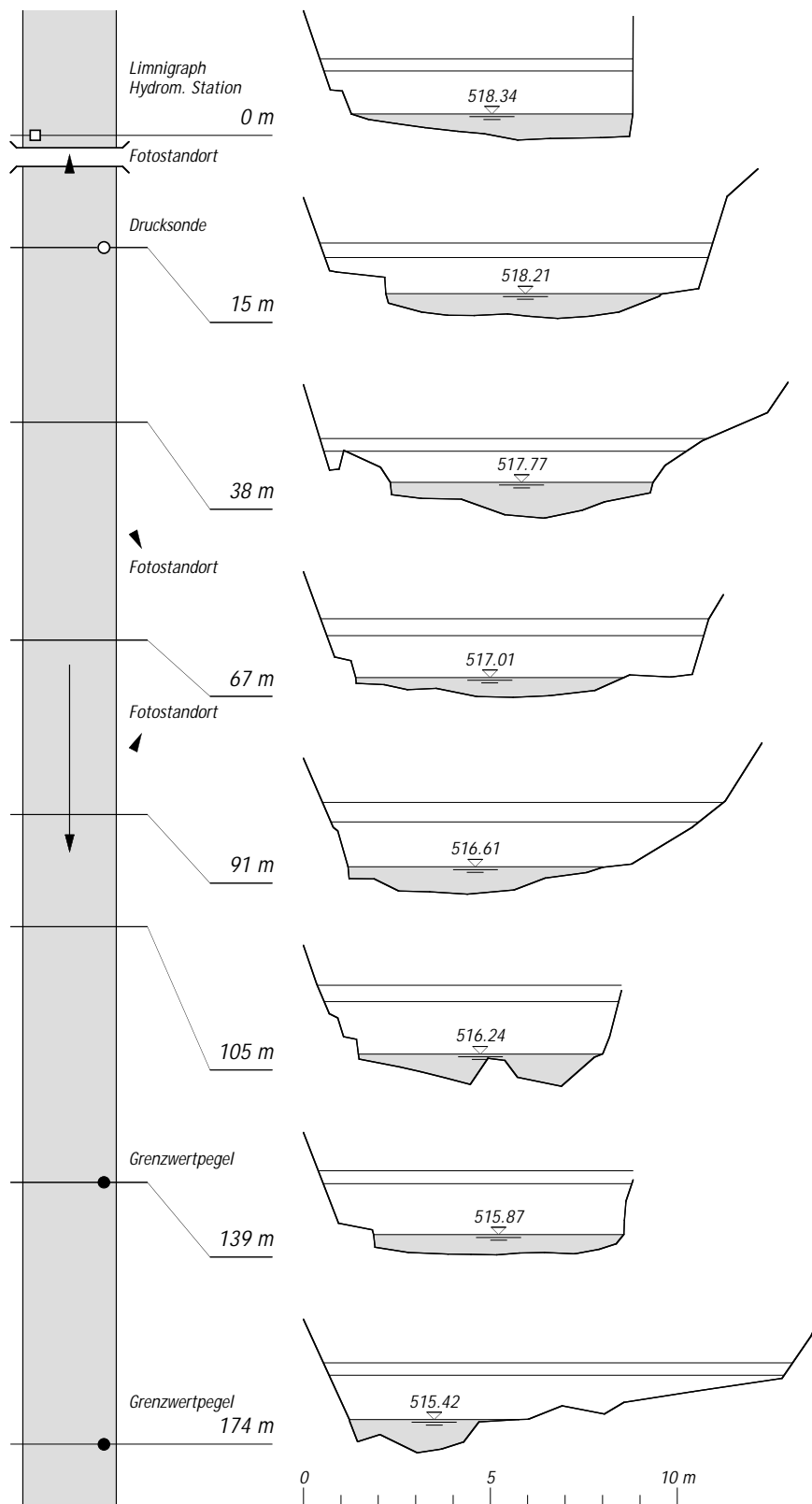
Am Ufer wachsen vereinzelt kleine Büsche, welche bei Hochwasser durchströmt sind.

Die Kiessohle wird aufgrund der gleichbleibenden Pegelrelation der Abflussmessstation als stabil angenommen.

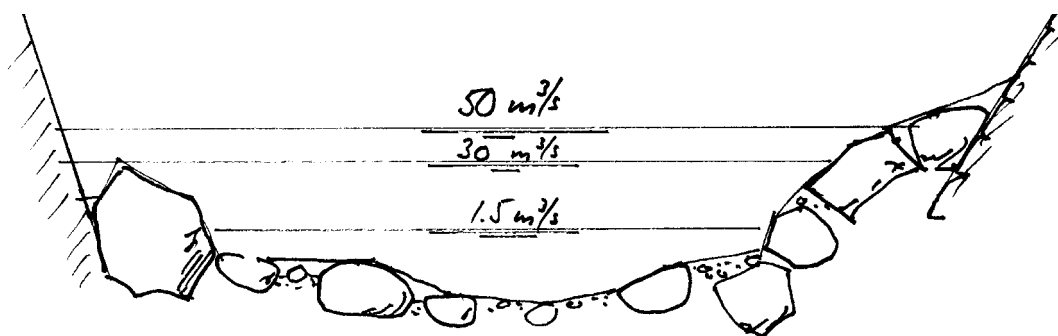


Versuchsstrecke Birse - Moutier gegen die Fließrichtung mit $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 8.12.1993

c) Querprofile und Situation



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Birse - Moutier



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Birse - Moutier

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydrau- lischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
30 m³/s						
0	12.2	8.3	1.5	2.5	1.2	0.6
15	12.6	10.3	1.2	2.4	1.1	0.7
38	11.0	9.1	1.1	2.7	1.0	0.8
67	13.2	10.1	1.3	2.3	1.1	0.6
91	13.7	9.8	1.4	2.2	1.2	0.6
105	13.2	7.9	1.7	2.3	1.3	0.6
139	13.6	8.3	1.6	2.2	1.3	0.5
174	12.0	12.2	1.2	2.5	1.0	0.8
50 m³/s						
0	14.9	8.4	1.8	3.4	1.4	0.8
15	16.6	10.5	1.6	3.0	1.3	0.8
38	14.4	10.4	1.4	3.5	1.2	0.9
67	17.8	10.4	1.7	2.8	1.4	0.7
91	19.0	10.7	1.8	2.6	1.5	0.6
105	16.7	8.2	2.1	3.0	1.5	0.7
139	16.5	8.5	2.0	3.0	1.5	0.7
174	15.8	12.6	1.5	3.2	1.2	0.9

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Birse – Moutier

3.7.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
19.05.1994	38	01.06.1995	49
09.12.1994	24	13.09.1995	25
11.01.1995	28	16.07.1995	33
25.01.1995	40	24.12.1995	49
19.03.1995	28	08.07.1996	48

3.7.4 Berechnungen

Die Berechnungen für 50 m³/s ergeben für die Strecke einen mittleren k-Wert nach Strickler von 19 m^{1/3}/s. Die Berechnungen zeigen im oberen Streckenteil einen etwas tieferen und im unteren Streckenteil einen etwas höheren k-Wert. Dies kann mit dem anstehenden Fels am rechten Ufer und eher weniger Steinblöcken am linken Ufer im unteren Streckenteil erklärt werden.

Für 30 m³/s ergeben die Berechnungen einen k-Wert von 17 m^{1/3}/s. Dies ist auch ein mittlerer Wert für die ganze Strecke, welche im oberen Teil rauer ist als im unteren Streckenabschnitt.

Die versuchsweise vorgenommenen Berechnungen mit 1.5 m³/s und den Wasser-spiegelangaben bei Niederwasser ergeben k-Werte von 5 – 10 m^{1/3}/s. Diese Resultate müssen jedoch vorsichtig interpretiert werden, hängt doch der Wasserspiegel zu stark von der Form und Lage einzelner Steinblöcke ab.



Unterer Teil der Versuchsstrecke Birse – Moutier in Fließrichtung mit 17 m³/s, 6.6.2000

3.7.5 Bemerkungen

Die im unteren Profil mit unterschiedlichen Anfangshöhen gestarteten Staukurvenberechnungen ergeben schon nach wenigen Profilen die selben Wasserspiegelhöhen. Für die Berechnung des oberen Streckenteiles erweist sich die Versuchstrecke somit als genügend lang und hätte sogar etwas kürzer ausgelegt werden können.

Die Variation der Querprofilbreite erschwert die Nachbildung des Gerinnes mit dem Staukurvenmodell. Bei der Anpassung der gerechneten Staukurven an die Wasserspiegelmessungen traten Abweichungen auf, welche nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen wurden. Die ausgeglichenen Abweichungen betragen bis zu 10 cm. Im Hinblick auf die unebene Wasseroberfläche mit teilweise stehenden Wellen, welche bei den Pegelmessgeräten angenommen werden müssen, sind diese Abweichungen akzeptabel.

Die Messungen der zwei Grenzwertpegel am unteren Ende der Versuchsstrecke erweisen sich als plausibel und stimmen untereinander gut überein. Am oberen Ende der Versuchsstrecke konnten die Abweichungen der Druck-Sonde vom Limnigrafen der Station nicht abschliessend geklärt werden. Als Gründe werden verschiedene Anströmbedingungen der zwei Standorte und Messungenauigkeiten der Drucksonde vermutet.

Die Abnahme des Fließwiderstandes mit zunehmender Abflussmenge kann durch die grössere Abflusstiefe und auch die glatten Ufer im Hochwasserbereich (Mauer, Fels) erklärt werden.

Die Versuchsstrecke zeichnet sich durch die im Verhältnis zur Abflusstiefe grossen Steinblöcke in der Sohle und an den Ufern aus. Die aus der Versuchsstrecke gewonnenen Erkenntnisse können für ähnliche Gewässer im Jura und den Voralpen wertvoll sein.

3.8 Thur bei Stein

3.8.1 Übersicht

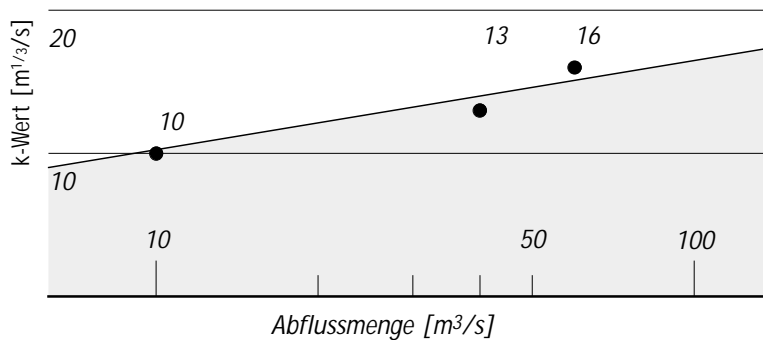


Versuchsstrecke Thur - Stein, in Fließrichtung betrachtet.
Abflussmenge 2.3 m³/s, Aufnahme vom 3.9.1993

Hydrometrische Station:	Thur – Stein, Iltishag
Einzugsgebiet:	84 km ²
Regimetyp:	nival de transition
Mittlerer Abfluss:	4 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser:	83 m ³ /s
Gefälle:	17 ‰
Abflussgerinne:	Natürliches Bachbett mit teilweise verbauten Ufern. Links- ufriger Blockwurf mit Büschen und Bäumen bewachsen. Am rechten Ufer streckenweise kleine Ufermauer. Kiessohle mit grossen Steinen.

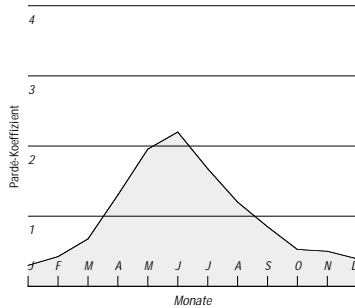
30

Rauigkeitswerte nach
Strickler

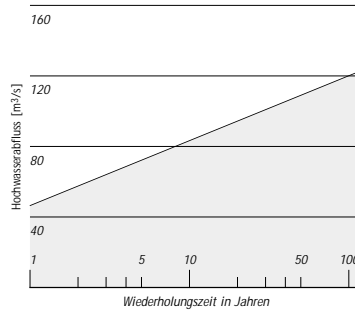


3.8.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

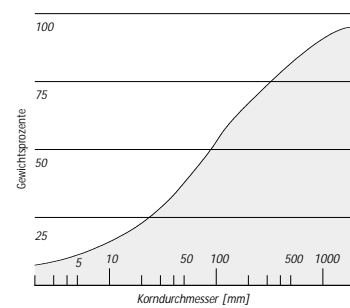
a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
nival de transition*



*Hochwasserfrequenzen
(Vereinfachte Darstellung)*



*Kornverteilung der
Flusssohle*

b) Versuchsstrecke

Die Thur ist im Bereich der Versuchsstrecke rund 15 m breit. Das Bachbett ist beinahe noch in einem natürlichen Zustand. An der linken Seite mit der Strasse ist das Ufer mit einem Blockwurf geschützt, welcher mit Sträuchern und Bäumen bewachsen ist. Im unteren Streckenabschnitt ist das rechte Ufer durch eine niedere Steinmauer, welche bei Hochwasser überflutet ist, verbaut. Im oberen Streckenteil ist das Ufer flach. Die Flusssohle besteht aus Kies mit grossen Steinblöcken.

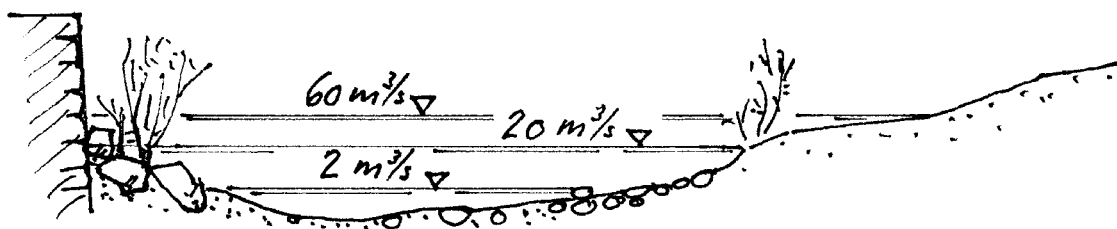
Ungefähr in der Mitte der 52 m langen Versuchsstrecke befinden sich mehrere Steinblöcke, welche eine Querschwelle bilden. Die Messschwelle der hydrometrischen Station liegt 6 m oberhalb der Versuchsstrecke.

Gemäss der nicht stabilen Pegelstands-Abflussbeziehung an der hydrometrischen Station verändert sich die Sohle mit den Hochwasserabflüssen. Wasserspiegeländerungen sind schon nach kleineren Hochwassern feststellbar. Dies hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der ermittelten Fließwiderstände.

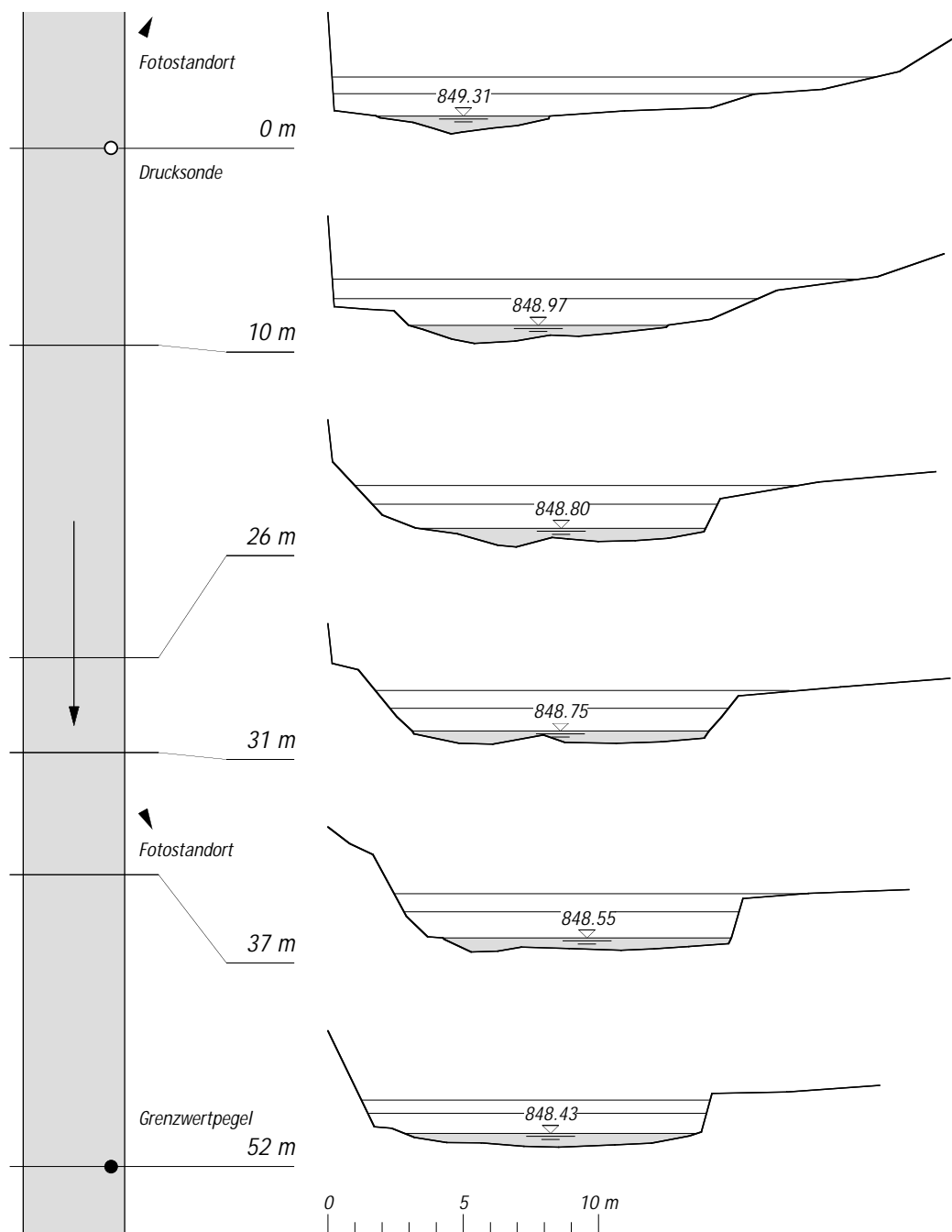


Versuchsstrecke Thur – Stein gegen die Fließrichtung mit $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 9.12.1993

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Thur - Stein



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Thur - Stein

d) Hydraulik

Profil Distanzen	Fläche	Breite	Mittlere Tiefe	Mittlere Geschwin- digkeit	Hydrau- lischer Radius	Froude- Zahl
[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[-]
20 m³/s						
0	12.8	15.8	0.8	1.6	0.8	0.6
10	16.3	15.7	1.0	1.2	1.0	0.4
26	14.7	12.8	1.1	1.4	1.1	0.4
31	13.8	12.5	1.1	1.5	1.0	0.4
37	15.3	12.4	1.2	1.3	1.1	0.4
52	12.5	12.5	1.0	1.6	0.9	0.5
60 m³/s						
0	24.1	20.1	1.2	2.5	1.1	0.7
10	28.5	19.5	1.5	2.1	1.4	0.6
26	24.5	16.4	1.5	2.5	1.4	0.6
31	22.6	15.7	1.4	2.7	1.3	0.7
37	24.0	15.2	1.6	2.5	1.4	0.6
52	18.8	12.9	1.5	3.2	1.3	0.8

Hydraulische Parameter der Querprofile in der Versuchsstrecke Thur - Stein

3.8.3 Hochwasserabflussspitzen während der Versuchszeit

Datum	Abflussspitze [m ³ /s]	Datum	Abflussspitze [m ³ /s]
10.12.1994	22	12.08.1996	19
06.04.1995	16	28.08.1996	17
26.04.1995	30	14.09.1996	20
09.05.1995	15	21.10.1996	27
01.06.1995	41	26.02.1997	19
07.06.1995	16	28.03.1997	25
11.06.1995	18	06.04.1997	18
03.07.1995	11	30.04.1997	22
09.08.1995	19	22.06.1997	16
30.08.1995	59	06.07.1997	40
23.03.1996	15	20.07.1997	39
20.05.1996	23	26.07.1997	33
28.05.1996	54	02.08.1997	17
23.06.1996	12	29.08.1997	19
08.07.1996	50		

3.8.4 Berechnungen

Die Auswertung der Versuchsstrecke ergibt für die Abflussmenge von $60 \text{ m}^3/\text{s}$ einen mittleren k -Wert nach Strickler von $16 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Die Resultate für 40 und $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben mittlere k -Werte von 13 und $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.



Versuchsstrecke Thur – Stein, in Fließrichtung mit $20 \text{ m}^3/\text{s}$ am 18.6.1991

3.8.5 Bemerkungen

Die Versuchsstrecke ist charakteristisch für geschiebeführende Gebirgsbäche.

Mit der Pegelmessung am unteren Ende ist die 52 m lange Versuchsstrecke ausreichend lang. Die natürliche Schwelle in der Streckenmitte wirkt wie ein Kontrollquerschnitt und beeinflusst die Abflüsse in der oberen Streckenhälfte. Die ermittelten k -Werte gelten deshalb vorwiegend für den oberen Bereich der Strecke.

Die Messungen über die fast 4 Jahre dauernde Messperiode streuen mehr als bei den anderen Versuchsstrecken. Die unterschiedlichen Pegelhöhen können durch die bewegliche Kiessohle und den Geschiebetrieb erklärt werden. Die Wasserspiegelmessungen am Anfang der Versuchszeit liegen tendenziell höher, was auf eine Sohle-eintiefung während der Messperiode zurückzuführen ist. Da die Profilvermessung am Anfang der Messperiode erfolgte, könnten die ermittelten k -Werte tendenziell zu hoch sein.

Andererseits sind mit den 29 grösseren Hochwasserspitzen während der fast 4 -jährigen Messperiode die Sohlenbewegungen vermutlich gut ausgeglichen und die ermittelten k -Werte können als gute Mittelwerte interpretiert werden. Bei der Wasserspiegelberechnung in ähnlichen Bachbetten ist jedoch von einer Streuung der Rauigkeitswerte auszugehen, welche die Veränderungen an der beweglichen Sohle wieder spiegelt.

Die Abnahme des Fließwiderstandes mit zunehmenden Abflussmengen kann durch die grössere Abflusstiefe erklärt werden.

3.9 Brüttenbach im Brüttental (Umlagerungsstrecke)

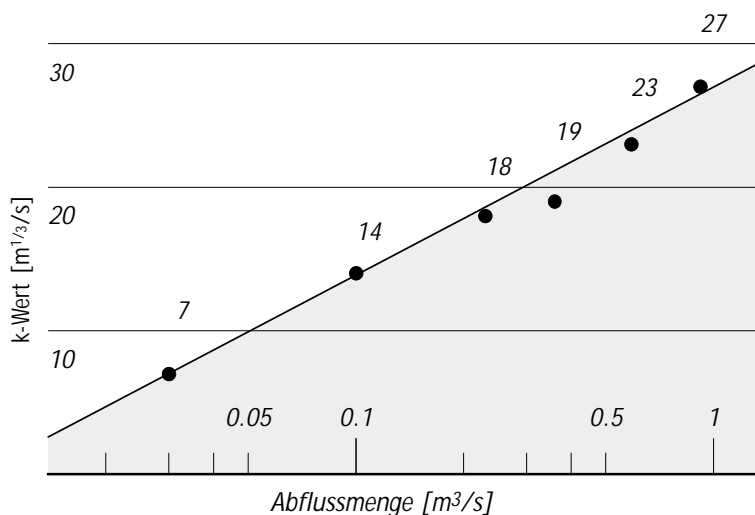
3.9.1 Übersicht



Versuchsstrecke Brüttenbach (Umlagerungsstrecke) – Brüttental, unterer Abschnitt in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge: $0.022\text{m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 18.9.2000

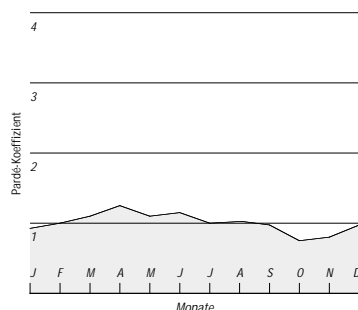
Hydrometrische Station:	Teststation des Institutes für Kulturtechnik, ETH-Zürich (IfK)
Einzugsgebiet:	1.8 km ²
Regimetyp:	pluvial superieur
Gefälle:	22 ‰
Abflussgerinne:	Trapezprofil mit natürlicher Sohle in Rechtskurve. Umlagerungsstrecke mit stark mäandrierendem Fließverlauf bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen. An beiden Ufern sind Bäume und Sträucher. Infolge der Strasse ist die Böschung am linken Ufer steiler als am Rechten

Rauigkeitswerte nach Strickler

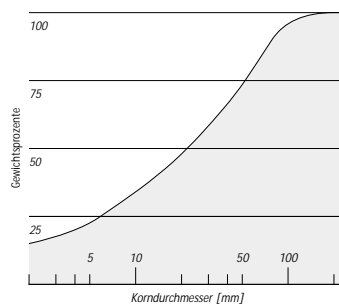


3.9.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abfluss und Feststoffe



*Abflussregime
pluvial supérieur*



*Kornverteilung der Fluss-
sohle*

b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke liegt in der Umlagerungsstrecke, die unterhalb des Quellgebiets liegt. Diese in einer Rechtskurve gelegenen Strecke ist charakterisiert durch ein breites Bachbett mit natürlicher Sohle. Bei Niedrig- und Mittelwasserabflüssen wird nur ein kleiner Teil des Querprofils benetzt. Dadurch weist der Bach bei den kleineren Abflüssen ein stark mäandrierender Verlauf auf, der erst bei Hochwasserabflüssen in einen gestreckten Fließverlauf übergeht. Nach jedem Hochwasserereignis ist der Verlauf des Bachlaufes verändert. Das mittlere Gefälle ist 22‰ und stellt für einen Bergbach einen niedrigen Wert dar.

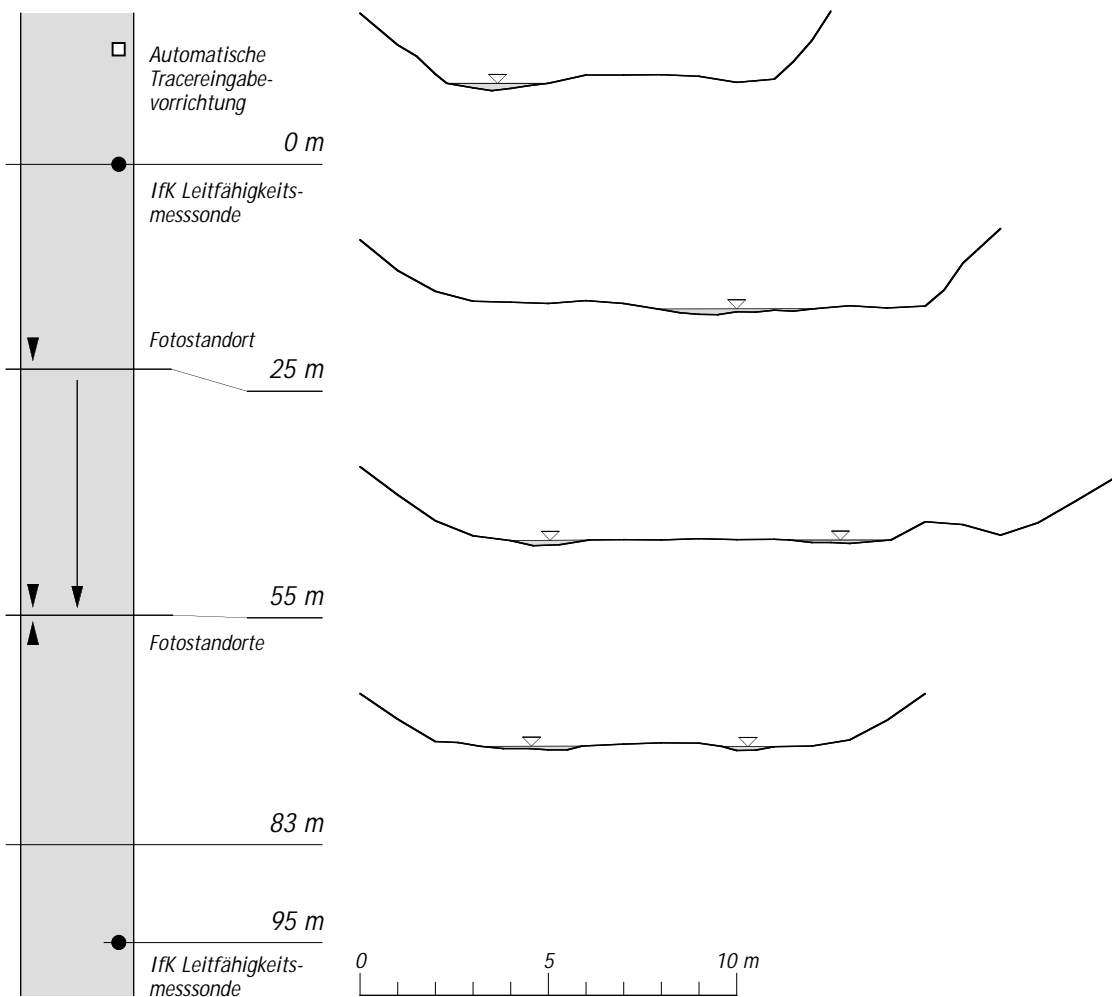


Versuchsstrecke Brüttenbach (Umlagerungsstrecke) – Brüttental, mittlerer Abschnitt gegen die Fließrichtung mit $0.022\text{m}^3/\text{s}$, 18.9.2000

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Brüttenbach (Umlagerungsstrecke) – Brüttental



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Brüttenbach (Umlagerungsstrecke) – Brüttental

d) Hydraulik

Abfluss- menge	Mittlere Geschwin- digkeit	Durchflos- sener Quer- schnitt	Benetzter Umfang 0m	Benetzter Umfang 25m	Benetzter Umfang 55m	Benetzter Umfang 83m	Benetzter Umfang Mittel
[m ³ /s]	[m/s]	[m ²]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.917	0.93	0.986	4.9	8.8	11.2	10.6	8.9
0.592	0.72	0.822	4.6	7.6	10.8	10.3	8.3
0.355	0.56	0.634	4.2	6.5	9.4	8.3	7.1
0.229	0.51	0.449	3.8	5.1	6.8	5.9	5.4
0.169	0.44	0.384	3.6	4.5	6.0	5.5	4.9
0.104	0.35	0.297	3.0	4.0	5.1	4.8	4.2
0.083	0.32	0.259	2.8	3.5	4.3	4.2	3.7
0.051	0.25	0.204	2.5	3.1	3.4	3.7	3.2
0.033	0.18	0.183	2.3	2.5	3.0	3.5	2.8
0.020	0.15	0.133	1.9	2.2	2.4	2.9	2.4

Resultate der Tracermessungen sowie Parameter zur Bestimmung des hydraulischen Radius der Umlagerungsstrecke Brüttenbach – Brüttental.

3.9.3 Salzverdünnungsmessungen

Zur Bestimmung der Rauigkeitswerte nach Strickler mussten im Feld die folgenden Messungen durchgeführt werden:

Abflussmessungen

Bei der Versuchsstrecke Brüttental (Umlagerung) wurden 98 Abflussmessungen mit dem Salzverdünnungsverfahren durchgeführt. Mit Hilfe der automatischen Tracereinspeisung konnten auch Messungen bei hohen Abflüssen während der Nacht oder am Wochenende realisiert werden. Mit Hilfe des am IfK entwickelten Auswerteprogrammes wurden die Abflussmengen sowie die mittleren Fließgeschwindigkeiten (aus den Schwerpunktszeiten der Tracerganglinien) für die Versuchsstrecke berechnet.

Sohlengefällsmessungen

Mit dem Theodolit wurde das Sohlengefälle gemessen und für die gesamte Teststrecke ein mittleres Sohlengefälle errechnet.

Zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeiten müssen die effektiven Fließweglängen (Hochwasserabfluss: gestreckter Fließweg -> kürzere Fließweglänge, Niedrigwasserabfluss: mäandrierender Fließweg) mit dem Messband gemessen werden. Dies ist vor allem für die Umlagerungsstrecke wichtig, reduziert sich doch die Fließweglänge der Umlagerungsstrecke zwischen Niedrigwasser- und Hochwasserabfluss um 2.9%.

Querprofilmessungen

Die mittlere durchflossene Querschnittsfläche der Versuchsstrecken kann aus den Tracermessungen bestimmt werden (Quotient aus Abflussmenge und mittlerer Fließgeschwindigkeit). Bei der Umlagerungsstrecke im Brüttental wurden zur Bestimmung eines mittleren benetzten Umfanges 4 Querprofile aufgenommen. Mit dem Theodoliten wurde pro Querprofil zwischen 20 und 25 Sohlenpunkte eingemessen.

3.9.4 Berechnungen

Zur experimentellen Bestimmung der Rauigkeitswerte nach Strickler wurden die 3 Parameter mittlere Fließgeschwindigkeit, Sohlgefälle und hydraulischer Radius mittels Messungen im Feld ermittelt.

Mit den Salzverdünnungsmessungen wird die Abflussmenge und die mittlere Fließgeschwindigkeit bestimmt. Der Quotient dieser beiden Größen ergibt den Mittelwert der durchflossenen Querschnittsfläche zwischen der Eingabe- und der Messstelle. Mit Hilfe der Querprofile und der mittleren durchflossenen Querschnittsfläche kann der benetzte Umfang graphisch bestimmt werden. Um für den benetzten Umfang einen gut abgesicherten Mittelwert zu erhalten, müssen für die Versuchsstrecke 4 bis 5 Querprofile aufgenommen werden. Der hydraulische Radius kann anschliessend durch den Quotienten aus der mittleren durchflossenen Querschnittsfläche und dem mittleren benetzten Umfang bestimmt werden.

Abflussmenge [m ³ /s]	Mittlere Geschwindigkeit [m/s]	Durchflossener Querschnitt [m ²]	Sohlgefälle [-]	Benetzter Umfang Querprofile [m]	Hydraulischer Radius Querprofile [m]	Strickler-Rauigkeitsbeiwert [m ^{1/3} /s]
0.917	0.93	0.986	0.022	8.9	0.111	27.1
0.592	0.72	0.822	0.022	8.3	0.099	22.7
0.355	0.56	0.634	0.022	7.1	0.089	18.9
0.229	0.51	0.449	0.022	5.4	0.083	18.1
0.169	0.44	0.384	0.022	4.9	0.078	16.2
0.104	0.35	0.297	0.022	4.2	0.071	13.8
0.083	0.32	0.259	0.022	3.7	0.070	12.7
0.051	0.25	0.204	0.022	3.2	0.064	10.5
0.033	0.18	0.183	0.022	2.8	0.065	7.5
0.020	0.15	0.133	0.022	2.4	0.055	7.0

Berechnung der Strickler-Rauigkeitswerte der Umlagerungsstrecke Brüttenbach – Brüttental.

3.9.5 Bemerkungen

Die Umlagerungsstrecke des Brüttenbachs ist charakteristisch für flache, in Umlagerungsbereichen gelegenen Bachstrecken. Mit Hilfe der automatischen Fließzeitmessanlage des Institutes für Kulturtechnik (IfK) der ETH Zürich konnten bei beiden Versuchsstrecken im Brüttental zusätzlich zu den Salzverdünnungsmessungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich auch Messungen während Hochwasserereignissen durchgeführt werden. Dadurch resultiert eine Datengrundlage mit einer grossen Variation der erfassten Abflussmengen.



Versuchsstrecke Brüttenbach (Umlagerungsstrecke) – Brüttental, oberer Abschnitt gegen die Fließrichtung mit $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 18.9.2000

3.10 Brüttenbach im Brüttental (Felsstrecke)

3.10.1 Übersicht

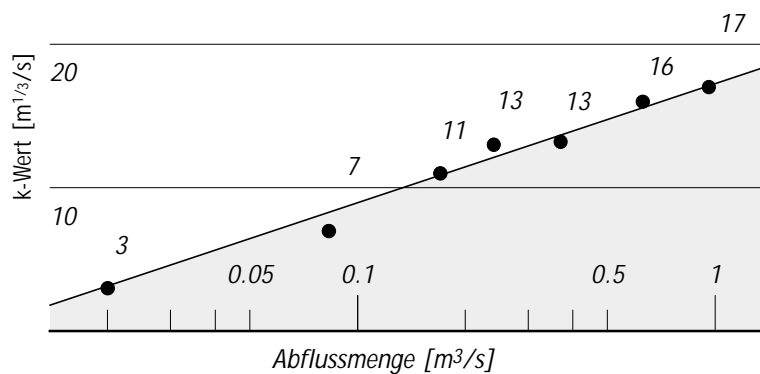


Versuchsstrecke Brüttenbach (Felsstrecke) – Brüttental, oberer Abschnitt in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge: $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 18.9.2000

Hydrometrische Station:	Teststation des Institutes für Kulturtechnik, ETH-Zürich (IfK)
Einzugsgebiet:	1.9 km^2
Regimetyp:	pluvial superieur
Gefälle:	38 ‰
Abflussgerinne:	Natürliche Fließstrecke auf Fels (U-Profil), rasche Abfolge von Becken und Schussrinnen, viele Fließrichtungswechsel, beidseitig bewaldet.

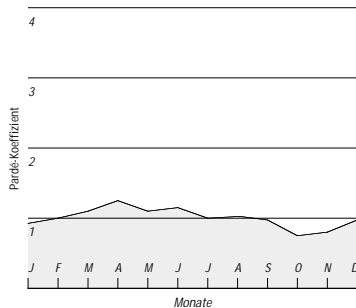
30

Rauigkeitswerte nach Strickler



3.10.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abflüsse



*Abflussregime
pluvial supérieur*

b) Versuchsstrecke

Die zweite Versuchsstrecke im Brüttental befindet sich in einer Felsstrecke. Das Wasser dieses Bachabschnittes fließt meistens auf dem anstehenden Felsen. Die bei Hochwasserabflüssen transportierten Geschiebemassen werden meistens weitertransportiert, so dass nur wenige Steine auf dieser Versuchsstrecke zwischengelagert werden. Die Bachprofile sind schmal und weisen in der Regel ein U-Profil auf. Das Längsgefälle ist fast doppelt so gross wie dasjenige in der Umlagerungsstrecke. Schnelle Wechsel zwischen Becken und Schusrrinnen charakterisieren den Abflussprozess. Dies ergibt bei kleinen Durchflussmengen eine schnelle Abfolge von Fallen und Verweilen der Wassermengen. Mit zunehmenden Wassermengen werden die einzelnen Becken stärker überströmt, so dass der Einfluss der Becken auf den Abflussprozess reduziert wird.

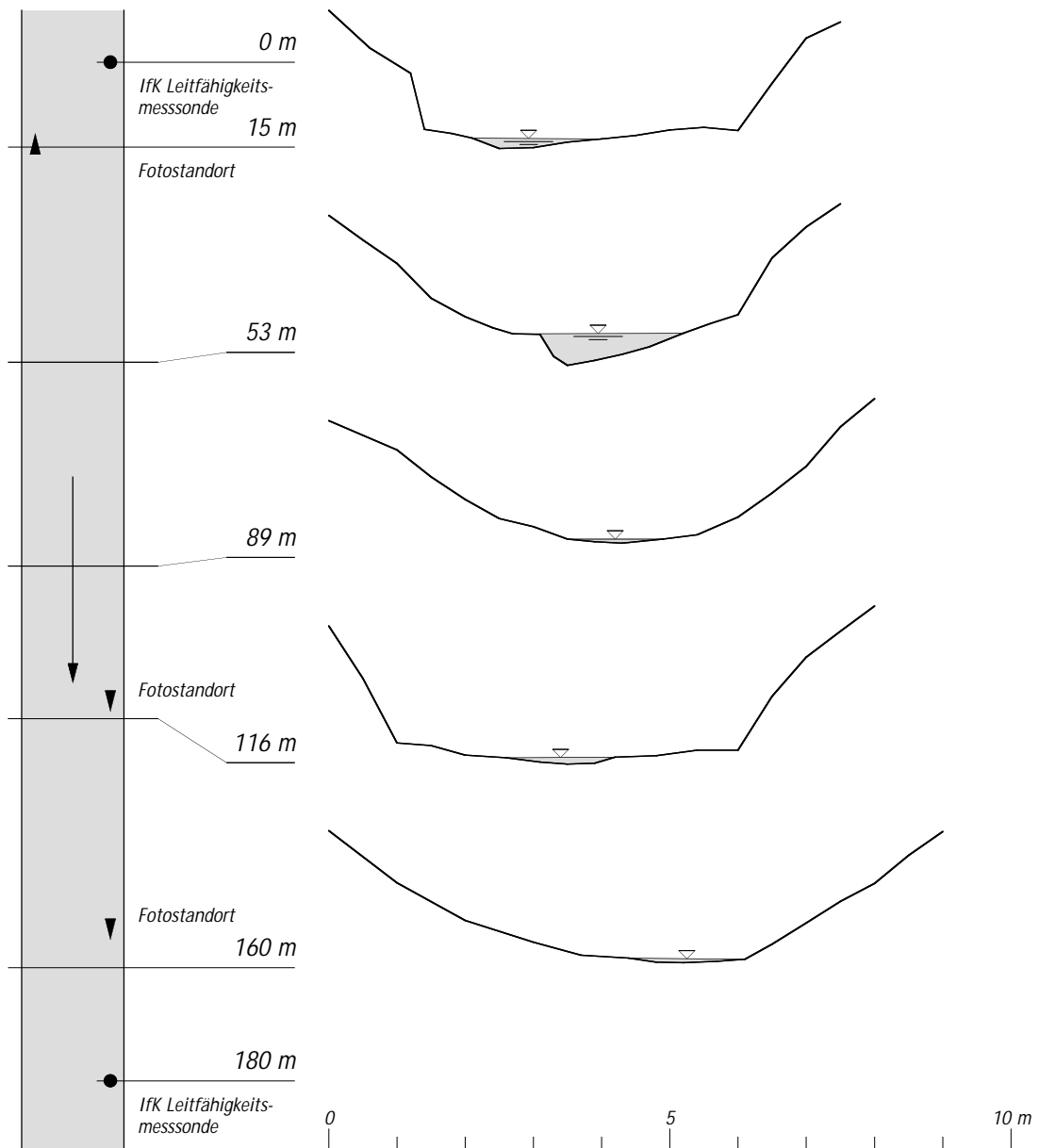


Versuchsstrecke Brüttenbach (Felsstrecke) – Brüttental, mittlerer Abschnitt gegen die Fließrichtung mit $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, 18.9.2000

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Brüttenbach (Felsstrecke) – Brüttental



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Brüttenbach (Felsstrecke) – Brüttental

d) Hydraulik

Abfluss- menge [m ³ /s]	Mittlere Geschwin- digkeit [m/s]	Durchflos- sener Quer- schnitt [m ²]	Benetzter Umfang 15m [m]	Benetzter Umfang 53m [m]	Benetzter Umfang 89m [m]	Benetzter Umfang 116m [m]	Benetzter Umfang 160m [m]	Benetzter Umfang Mittel [m]
0.964	1.11	0.826	5.10	3.36	3.52	5.04	3.69	4.14
0.629	0.95	0.623	5.02	2.91	3.14	4.39	3.38	3.77
0.367	0.71	0.500	4.70	2.25	2.86	4.26	3.15	3.44
0.240	0.62	0.369	4.10	1.97	2.58	3.44	2.90	3.00
0.169	0.51	0.331	3.84	1.88	2.49	3.32	2.80	2.87
0.104	0.35	0.297	3.66	1.80	2.42	3.22	2.75	2.77
0.083	0.29	0.286	3.51	1.77	2.40	3.18	2.72	2.72
0.051	0.21	0.243	2.97	1.67	2.31	3.04	2.62	2.52
0.033	0.17	0.194	2.42	1.49	2.19	2.83	2.43	2.27
0.020	0.11	0.182	2.30	1.47	2.16	2.71	2.37	2.20

Resultate der Tracermessungen sowie Parameter zur Bestimmung des hydraulischen Radius der Felsstrecke Brüttenbach – Brüttental.

3.10.3 Messungen

Zur Bestimmung der Rauigkeitswerte nach Strickler mussten im Feld die folgenden Messungen durchgeführt werden:

Salzverdünnungsmessungen

Bei der Versuchsstrecke Brüttental (Felsstrecke) wurden ebenfalls 98 Abflussmessungen mit dem Salzverdünnungsverfahren durchgeführt. Mit Hilfe der automatischen Tracereinspeisung konnten auch Messungen bei hohen Abflüssen während der Nacht oder am Wochenende realisiert werden. Mit Hilfe des am IfK entwickelten Auswerteprogrammes wurden die Abflussmengen sowie die mittleren Fließgeschwindigkeiten (aus den Schwerpunktszeiten der Tracerganglinien) für die Versuchsstrecke berechnet.

Sohlengefällsmessungen

Mit dem Theodolit wurde das Sohlengefälle gemessen und für die gesamte Teststrecke ein mittleres Sohlengefälle errechnet.

Zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeiten müssen die effektiven Fließweglängen (Hochwasserabfluss: gestreckter Fließweg -> kürzere Fließweglänge, Niedrigwasserabfluss: mäandrierender Fließweg) mit dem Messband gemessen werden. Dies ist für die Felsstrecke weniger wichtig, reduziert sich doch die Fließweglänge dieser Versuchsstrecke zwischen Niedrigwasser- und Hochwasserabfluss nur um 0.9%.

Querprofilmessungen

Die mittlere durchflossene Querschnittsfläche der Versuchsstrecken kann aus den Tracermessungen bestimmt werden (Quotient aus Abflussmenge und mittlerer Fließgeschwindigkeit). Bei der Felsstrecke im Brüttental wurden zur Bestimmung eines mittleren benetzten Umfanges 5 Querprofile aufgenommen. Mit dem Theodoliten wurde pro Querprofil zwischen 20 und 25 Sohlenpunkte eingemessen.

3.10.4 Berechnungen

Zur experimentellen Bestimmung der Rauigkeitswerte nach Strickler müssen die 3 Parameter mittlere Fließgeschwindigkeit, Sohlgefälle und hydraulischer Radius mittels Messungen im Feld ermittelt werden (Vorgehen siehe unter 3.9.4).

Abfluss- menge [m ³ /s]	Mittlere Geschwin- digkeit [m/s]	Durchflos- sener Quer- schnitt [m ²]	Sohlenge- fälle [-]	Benetzter Umfang Querprofile [m]	Hydrauli- scher Radius Querprofile [m]	Strickler- Rauigkeits- beiwert [m ^{1/3} /s]
0.964	1.11	0.826	0.038	4.14	0.199	16.7
0.629	0.95	0.623	0.038	3.77	0.165	16.2
0.367	0.71	0.500	0.038	3.44	0.145	13.2
0.240	0.62	0.369	0.038	3.00	0.123	12.9
0.169	0.51	0.331	0.038	2.87	0.116	11.0
0.104	0.35	0.297	0.038	2.77	0.107	8.0
0.083	0.29	0.286	0.038	2.72	0.105	6.7
0.051	0.21	0.243	0.038	2.52	0.096	5.1
0.033	0.17	0.194	0.038	2.27	0.085	4.5
0.020	0.11	0.182	0.038	2.20	0.083	3.0

Berechnung der Strickler-Rauigkeitswerte der Felsstrecke Brüttenbach – Brüttental.



Versuchsstrecke Brüttenbach (Felsstrecke) – Brüttental, unterer Abschnitt gegen die Fließrichtung mit 0.022 m³/s, Aufnahme vom 18.9.2000

3.10.5 Bemerkungen

Die Felsstrecke des Brüttenbachs ist charakteristisch für steilere Wildbachstrecken auf anstehendem Fels mit einer raschen Abfolge von kleineren Abstürzen und Becken sowie häufigen Richtungswechseln. Verglichen mit der oberliegenden Versuchsstrecke in der Umlagerungsstrecke resultieren bei der Felsstrecke deutlich tiefere Strickerbeiwerte.

3.11 Krummbach bei Klusmatten

3.11.1 Übersicht

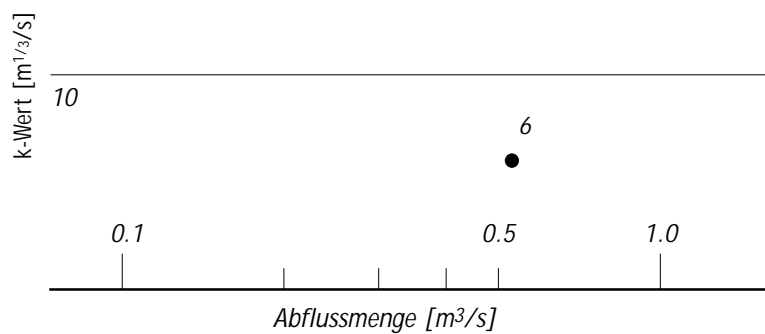


Versuchsstrecke Krummbach - Klusmatten, in Fließrichtung betrachtet.
Abflussmenge 0.46 m³/s, Aufnahme vom 22.10.2001

Hydrometrische Station:	Krummbach - Klusmatten
Einzugsgebiet:	19.8 km ²
Regimetyt:	nival méridional
Mittlerer Abfluss	0.7 m ³ /s
10-jährliches Hochwasser	18 m ³ /s
Gefälle:	52 ‰
Abflussgerinne:	Natürliche Fließstrecke mit Blocksatz am linken Ufer, im oberen Abschnitt einige kleine Abstürze, beidseitig bewaldet

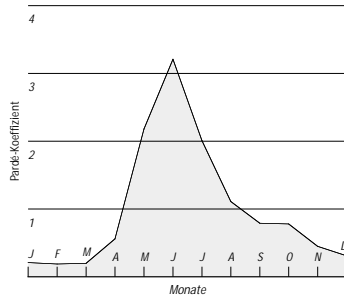
20

Rauigkeitswerte nach Strickler

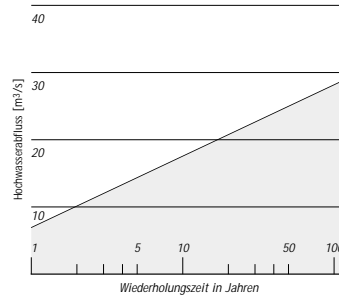


3.11.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

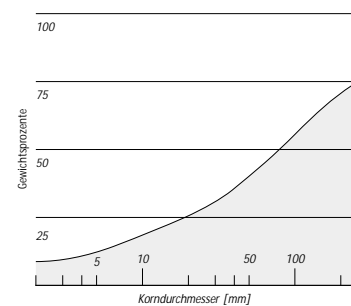
a) Abflüsse



Abflussregime
nival méridional



Hochwasserfrequenzen



Korngrößenverteilung

b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke Krummbach bei Klusmatten befindet sich in einem Waldabschnitt und liegt zirka 50 m abwärts der gleichnamigen Abflussmessstation. Die Böschung des linken Ufers ist mit Blocksatz geschützt. Die Böschung im unteren Teil des rechten Ufers ist kleinräumig abgeglitten. Die Steine und Blöcke des Bachbettmaterials sind wenig gerundet und weisen ein grosse Variabilität bezüglich ihrer Größe auf.

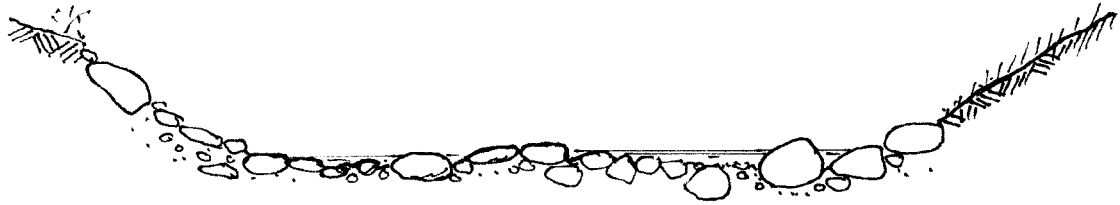
Das mittlere Sohlengefälle von 52‰ ist charakteristisch für einen Wildbach in einer Umlagerungsstrecke.

Für die photogrammetrischen Stereoaufnahmen wurde zwischen den Bäumen ein Drahtseil über den Krummbach gespannt. Je nach Messhöhe und Breite des aufzunehmenden Bachabschnittes konnte der Abstand der beiden Kameras variiert werden.

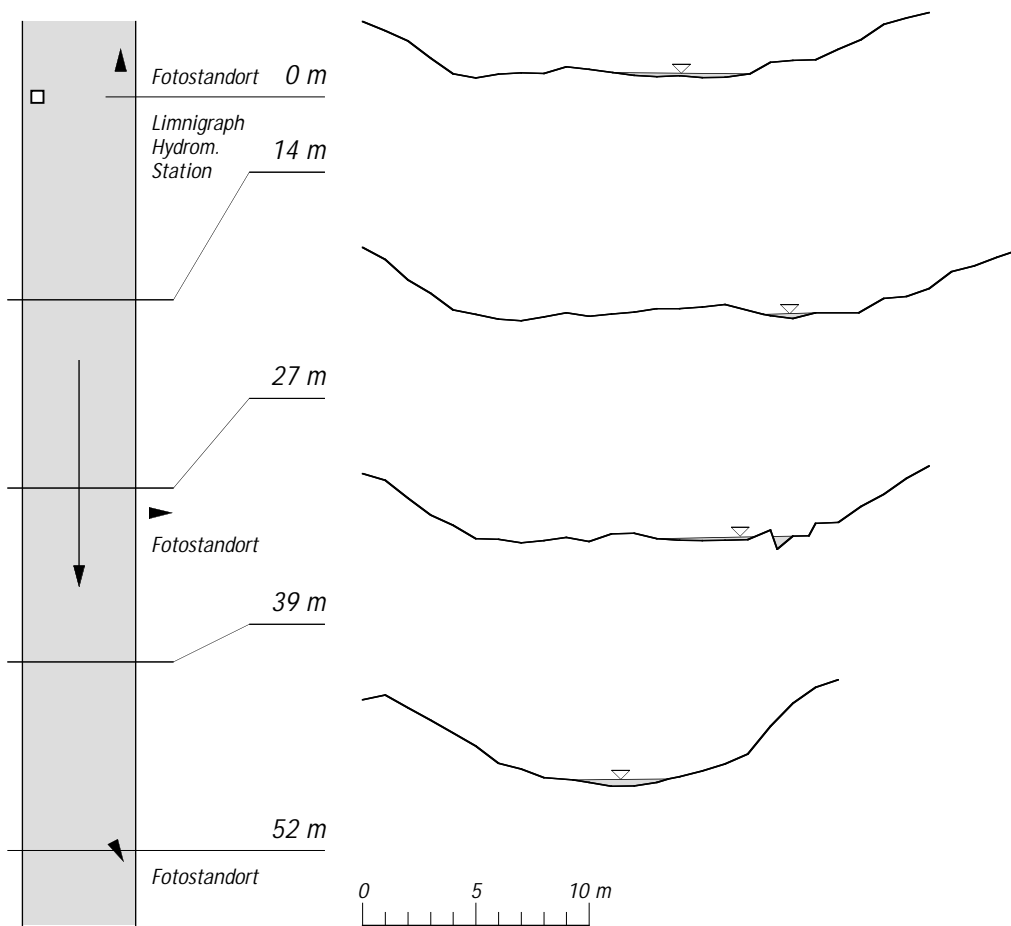


Unterer Teil der Versuchsstrecke Krummbach-Klusmatten gegen die Fließrichtung mit $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 22.10.2001

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Krummbach – Klusmatten



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Krummbach - Klusmatten



Versuchsstrecke Krummbach – Klusmatten vom linken Ufer aus mit $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 22.10.01

3.12 Walibach bei Homatta

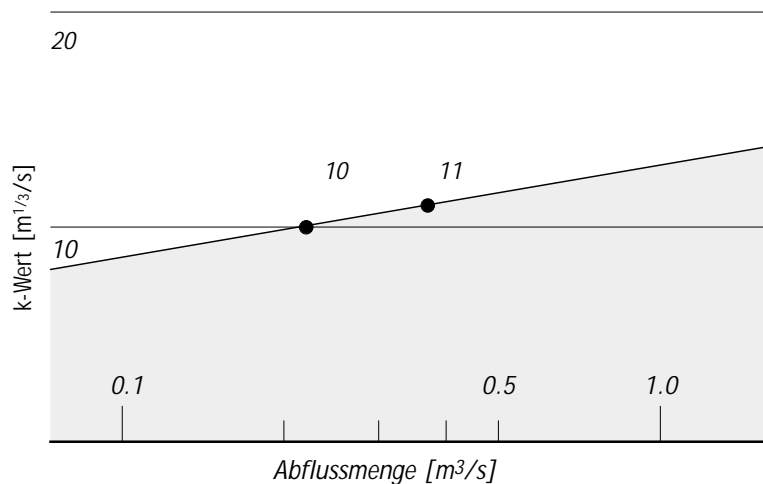
3.12.1 Übersicht



Versuchsstrecke Walibach - Homatta, in Fließrichtung betrachtet. Abflussmenge $0.18\text{m}^3/\text{s}$, Aufnahme vom 22.10.01

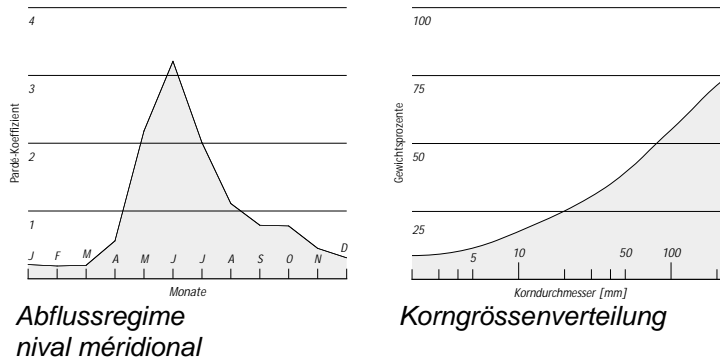
Hydrometrische Station:	Testgebiet des Institutes für Kulturtechnik der ETH Zürich
Einzugsgebiet:	3.4 km^2
Regimetyp:	nival méridional
Gefälle:	135 ‰
Abflussgerinne:	Natürliche Fließstrecke in steilem Gebirgsbach, der sich tief in den Fels eingefressen hat. Kleinere und grössere Abstürze charakterisieren die gesamte Versuchsstrecke. Beidseitig Alpwiesen.

Rauigkeitswerte nach Strickler



3.12.2 Hydrologische, morphologische und hydraulische Beschreibung

a) Abfluss und Feststoffe



b) Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke Walibach – Homatta ist eine natürliche Felsstrecke, wo sich der Wildbach tief in den Fels eingefressen hat. Der Abflussvorgang wird durch die rasche Abfolge von meist kleineren Abstürzen und Pools bestimmt. Die niedrigen Rundungsgrade der grobkantigen Steine und Blöcke weist auf die kurzen Transportwege des Bachbettmaterials hin. Der höhergelegene Teil der linksufrigen Böschung besteht vorwiegend aus Sträuchern; Alpwiesen dominieren die höhergelegenen Bereiche der rechtsufrigen Böschung.

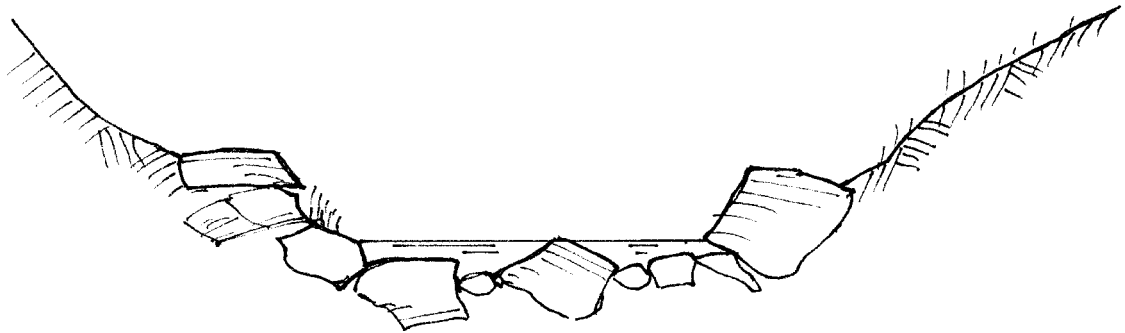
Das mittlere Sohlengefälle von 135‰ ist charakteristisch für einen Wildbach in einer Tobelstrecke.

Für die photogrammetrischen Stereoaufnahmen erleichterte die V-Form des Tales die Installation des Drahtseils in der erforderlichen Höhe. Durch das Einschlagen von Befestigungsankern kann das Drahtseil einfach und schnell befestigt werden. Je nach Messhöhe und Breite des aufzunehmenden Bachabschnittes konnte der Abstand der Kameras gewählt werden.

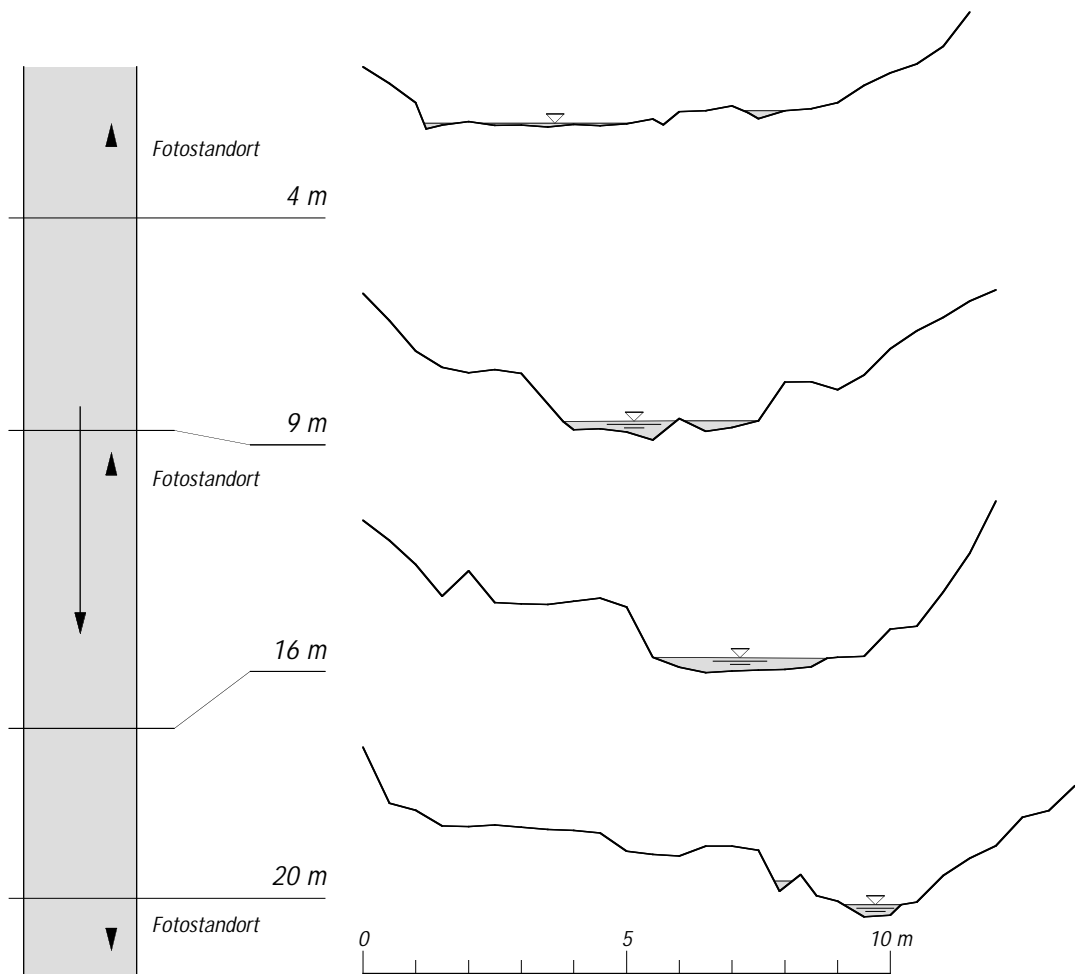


Versuchsstrecke Walibach - Homatta, in Fließrichtung mit $0.18\text{m}^3/\text{s}$, 22.10.01

c) Querprofile und Situation



Typisches Querprofil der Versuchsstrecke Walibach – Homatta



Situation und Querprofile der Versuchsstrecke Walibach - Homatta



Versuchsstrecke Walibach - Homatta gegen die Fließrichtung mit $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, 22.10.01

4. Schlussbemerkungen

Die Genauigkeit der Resultate hängt sowohl von der Genauigkeit der für die Berechnungen verwendeten Messungen als auch vom Rechenmodell ab. Dabei ist die Abflussmengenmessung von zentraler Bedeutung, weil ein Fehler an der Abflussmenge sich linear auf das Resultat fortpflanzt. Hingegen nehmen die Einflüsse der Pegelmessungen, welche mit zufälligen Fehlern behaftet sind, mit der Zahl der Messungen und der Zahl der Pegel ab und können verschwindend klein werden. Weitere Fehler entstehen mit der Festlegung der Querprofile (Modellfehler). Gesamthaft gesehen sind die ermittelten Rauigkeitsangaben mit zufälligen Fehlern in der Größenordnung von $\pm 5 - 10\%$ behaftet. Dies gilt für die vorliegenden Untersuchungen der Hochwasserabflüsse. Bei mittleren Abflussverhältnissen könnten die Resultate wesentlich genauer sein, sofern eine entsprechend verfeinerte Vermessung der Versuchsstrecken vorliegt.

Aus den Angaben des Rauigkeitswertes für verschiedene Abflussmengen können Rückschlüsse über den Einfluss der höher gelegenen Uferbereiche gezogen werden. Es ist auch zu berücksichtigen, dass eine Variation der Rauheit in Funktion der Abflusstiefe vorliegen kann.

Für die praktische Anwendung kann durchaus von einem mittleren Strecken-k-Wert ausgegangen werden, z.B. im Falle der Bemessung eines Gerinnes für einen 100-jährlichen Abfluss im Rahmen eines Projektes. Variationen innerhalb einer Strecke und Ungenauigkeiten am k-Wert sind durch bauliche Massnahmen wie z.B. der Höhe des Freibordes zu berücksichtigen. Oder es kann generell ein etwas tieferer k-Wert angewendet werden, beispielsweise um 5 bis 10 % entsprechend den Genauigkeitsüberlegungen in diesem Bericht.

Die Abweichungen bei den Staukurvenanpassungen lassen den Schluss zu, dass die Rauigkeit nicht beliebig genau ermittelt werden kann oder dass sie nicht nur eine physikalische Eigenschaft der Gerinneoberfläche darstellt. Die verschiedenen Berechnungsformeln und deren Umsetzung in Computerprogrammen können geringfügig zu verschiedenen Resultaten führen bzw. in einem geringen Masse unterschiedliche Rauigkeitsdefinitionen fordern.

5. Literaturverzeichnis

Barnes, H. H., 1967: Roughness characteristics of natural channels, Geological Survey Water-Supply Paper 1849. United States government printing office, Washington.

Chow, V. T., 1959: Open-channel hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York.

Dallwig, H. J., 1974: Fließformeln und Formbeiwerte - Eine kritische Untersuchung üblicher Berechnungsmethoden für Gerinneströmung, Institut für Wasserbau, TH Darmstadt, Nr. 12.

Einstein, H. A., Barbarossa, N. L., 1951: River Channel Roughness, American Society of Civil Engineers (ASCE), Proceedings Vol. 77, Separate No. 78.

Hicks, D. M., Mason, P. D., 1993: Roughness Characteristics of New Zealand Rivers, Water Resources Survey, Wellington, New Zealand.

Hodel, H.-P., 1993: Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit, des Strömungswiderstandes und des Fließvorganges in Bergbächen, Dissertation der ETH-Zürich, Nr. 9830, Zürich.

Jäggi, M., 1983: Alternierende Kiesbänke, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 62, Zürich.

Kersten, Th., Botteri, A., Lutz, S., 1992: Photogrammetrie für Anwendungen in der Ingenieurgeologie, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 4/92.

Keulegan, G., 1938: Laws of Turbulent Flow in Open Channels, Journal of Research of the National Bureau of Standards.

Landeshydrologie und -geologie, 1999: Grundlagenerarbeitung zur Thematik Erforschung der Fließwiderstände in kleinen schweizerischen Fließgewässern, Bericht 1623.20, Basler & Hofmann, Zürich.

Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948: Formulae for bedload transport, 2nd Congr. IAHSR, Stockholm.

Rickenmann, D., 1996: Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen, Zeitschrift Wasser, Energie, Luft, Heft 11/12.

Schöberl, F., 1981: Abpflasterungs- und Selbststabilisierungsvermögen erodierender Gerinne, Österreichische Wasserwirtschaft, 33 (7/8).

Schröder, R., 1990: Bestimmung von Rauheiten, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) Nr. 92, Teil I, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.

Strickler, A., 1923: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern.

Wallisch, S., 1990: Äquivalente Sandrauheiten und Stricklerbeiwerte fester und beweglicher Strömungsberandungen, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) Nr. 92, Teil II, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.

Yalin, M. S., 1992: River Mechanics, Pergamon Press, Oxford.

Zeller, J., 1996: Der Kstr-Koeffizient in der Geschwindigkeitsgleichung von Strickler und dessen Problematik, Internationales Symposium Interpraevent Garmisch-Partenkirchen.