



Diplomarbeit



zum Erwerb
des akademischen Grades Diplomingenieur
der Studienrichtung Bauingenieurwesen
von

Gregor Haas

eingereicht am
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
der Technischen Universität Graz
Vorstand: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Harald Kainz

Thema der Diplomarbeit:

Vergleich und Kalibration von unterschiedlichen Durchflussmessmethoden

Comparison and Calibration of Different
Discharge Measurement Methods

Begutachter: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Harald Kainz

Mitbetreuender Assistent: Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber

Graz, im Januar 2005

ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, dass ich andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Graz, 06. Januar 2005

Gregor Haas eh.

(Gregor Haas)

Danksagung

Ich bedanke mich bei Dr. Robert Schatzl stellvertretend für die Fachabteilung 19 A der Steiermärkischen Landesregierung, die diese Diplomarbeit tatkräftig unterstützt hat.

Weiters bedanke ich mich bei den Firmen Nortek AG, Sommer Ges.m.b.H und UTEK Ges.m.b.H.. für die Bereitstellung der Messinstrumente.

Für die Begutachtung meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Harald Kainz bedanken.

Für die Betreuung während den Untersuchungen zu dieser Arbeit möchte ich Herrn Ass.-Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Günter Gruber meinen Dank aussprechen.

Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und meiner Familie die mir durch Ihre jahrelange Unterstützung die Ausbildung an der Hochschule und den Studienabschluss ermöglicht haben.

Ich widme diese Arbeit meiner langjährigen Lebensgefährtin die einen maßgebenden Wegbereiter im meinem Leben darstellte.

Kurzfassung:

Die Durchflussmenge stellt in der Wasserwirtschaft eine der bedeutendsten physikalischen Größen dar, ist jedoch auf direktem Wege leider nicht messbar, weshalb unterschiedliche Messmethoden zu ihrer Bestimmung entwickelt wurden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Kalibrierung und dem Vergleich von verschiedenen Durchflussmengenmesssystemen und mit deren Einsatzmöglichkeiten in der Praxis. Dafür wurden Untersuchungen an einem natürlichen Fließgewässer in der Weststeiermark und in der Grazer Kanalisation im Bereich einer Mischwasserentlastung durchgeführt und die eingesetzten Messgeräte mit verschiedenen Vergleichsmessverfahren kalibriert und miteinander verglichen.

Abstract:

Discharge is one of the most important physical values in the fields of water management but unfortunately not directly measurable. Therefore different methods have been investigated to measure this value.

This diploma thesis deals with the calibration and the comparison of different discharge measurement methods and their reliability in practice. Therefore comparative investigations and calibrations were carried at a natural stream in Western Styria and in the sewer system of Graz near a combined sewer overflow by using different reference methods.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Motivation und Ziel	1
1.1	Messstelle Stainzbach.....	1
1.2	Kanal- Monitoring- Messstation Graz	2
2	Derzeitiger Stand der Durchflussmessung.....	4
2.1	Übersicht über Messverfahren und deren Einsatzbereiche	4
2.1.1	Begriffe und Definitionen.....	4
2.1.2	Messprinzipien	5
2.1.2.1	Tracer-Messverfahren.....	5
2.1.2.2	Magnetisch Induktive Durchflussmessung (MID)	8
2.1.2.3	Ultraschalldurchflussmessung	10
2.1.2.4	Radar.....	13
2.2	Messbereiche und Messfehler	13
2.2.1	Messabweichungen.....	14
2.2.1.1	Zufällige Abweichungen.....	15
2.2.1.2	Systematische Abweichungen.....	15
2.2.2	Fehler.....	16
2.2.2.1	Fehlergrenzen	16
2.2.3	Justieren, Kalibrieren und Eichen	17
2.3	Der Weg von der Messung zum Durchfluss	18
2.3.1	Numerische Modellierung	18
2.3.1.1	Grundlagen der SIMK-Kalibrierung	19
2.3.2	Empirische Kalibrierung.....	20
3	Messstelle Stainzbach	21
3.1	Situierung	21

3.2	Untersuchungsprogramm	22
3.3	Hydrologische Verhältnisse	23
3.4	Installierte Messgeräte	24
3.4.1	FloDar	25
3.4.2	EasyQ	27
3.4.3	Sommer.....	29
3.5	Untersuchungsperiode.....	30
3.5.1	Profilaufnahme	31
3.6	Auswertungen	33
3.6.1	Höhenstandsvergleich.....	33
3.6.2	Geschwindigkeitsvergleich	36
3.6.2.1	Überprüfung der Geschwindigkeitssensoren	37
3.6.3	Kalibrierfaktor des Stainzbaches.....	42
3.6.3.1	Durchflussvergleich.....	44
3.6.3.2	k- Faktor EasyQ	47
3.6.3.3	k- Faktor FloDar	48
3.6.3.4	Korrektur der Durchflüsse mittels der erhaltenen Kalibrierfaktoren.....	49
3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	52
4	Kanal- Monitoring - Messstation Graz	54
4.1	Allgemeiner Aufbau der Messstation	54
4.2	Untersuchungsprogramm	55
4.3	Stationäre Messgeräte.....	56
4.4	Eingesetzte Messverfahren zur Kalibration.....	56
4.4.1	MID-Sonde Nautilus	56
4.4.1.1	Situierung der Sonde.....	56

4.4.1.2	Aufzeichnungen der Vergleichsmessung	57
4.4.1.3	Aufgetretene Probleme.....	57
4.4.2	Q-Logger.....	57
4.4.2.1	Beschreibung des Messsystems.....	57
4.4.2.2	Situierung der Sonde.....	58
4.4.2.3	Datenaufzeichnung	58
4.4.2.4	Aufgetretene Probleme.....	59
4.4.2.5	Betriebserfahrungen.....	59
4.4.3	Speisesalz als Tracer	59
4.4.3.1	Beschreibung der Tracerversuche.....	60
4.4.3.2	Situierung der Sonde.....	60
4.4.3.3	Datenaufzeichnung	61
4.4.3.4	Aufgetretene Probleme.....	62
4.4.3.5	Korrektur der einzelnen Messungen	62
4.5	Messkampagne I (MK I).....	64
4.5.1	Durchführung	64
4.5.2	Profilaufnahme	65
4.5.3	Auswertungen	67
4.5.3.1	Höhenstandsvergleich	67
4.5.3.2	Geschwindigkeitsvergleich.....	68
4.5.3.3	Durchflussvergleich.....	70
4.6	Messkampagne II (MK II).....	73
4.6.1	Verhältnisse vor Ort	74
4.6.2	Durchführung	74
4.6.3	Aufgetretene Probleme	76
4.6.4	Ergebnisse.....	77

4.7	Messkampagne III (MK III).....	77
4.7.1	Durchführung	77
4.7.2	Erweiterte Tracermessung	78
4.7.3	Profilaufnahme	80
4.7.4	Auswertung.....	80
4.7.4.1	Höhenstandsvergleich	81
4.7.4.2	Geschwindigkeitsvergleich.....	82
4.7.4.3	Durchflussvergleich.....	83
4.8	Ergebnisse.....	87
5	Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick	90
	Abbildungsverzeichnis:	93
	Literaturverzeichnis:	96

1 Einleitung, Motivation und Ziel

Die Durchflussmenge stellt in der Wasserwirtschaft eine der bedeutendsten physikalischen Größen dar, ist jedoch auf direktem Wege leider nicht messbar, weshalb unterschiedliche Messmethoden zu ihrer Bestimmung entwickelt wurden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Kalibrierung und dem Vergleich von verschiedenen Durchflussmengenmesssystemen und mit deren Einbau- und Einsatzmöglichkeiten. Dabei wurden Untersuchungen an einem natürlichen Fließgewässer und in der Kanalisation im Bereich einer Mischwasserentlastung durchgeführt und die eingesetzten Messgeräte mit verschiedenen Vergleichsmessverfahren kalibriert und miteinander verglichen.

1.1 Messstelle Stainzbach

Das Referat Hydrografie der Fachabteilung 19A der Steiermärkischen Landesregierung betreibt ein sehr dichtes Messnetz an Durchflussmessstellen unter anderem um für etwaige Bauvorhaben an, bzw. um diese Gewässer, Durchflussdaten zur Verfügung stellen zu können. Des Weiteren ist es auch für den Katastrophenschutz wichtig, möglichst aktuelle und richtige Abflussdaten der Oberflächengewässer zur Verfügung stellen zu können. Das bis heute eingesetzte Verfahren bedient sich dem Pegelschlüssel, welcher einen Zusammenhang zwischen Pegelstand und Durchfluss darstellt. Wie allerdings in Kapitel 3.6.3 noch gezeigt werden wird, hängt der Durchfluss nicht ausschließlich vom Wasserstand ab, sondern es existieren bei gleichem Wasserstand zum Teil beträchtliche Unterschiede zwischen dem Durchfluss bei ansteigendem und fallendem Pegel. Dieser Hysteresiseffekt kann bei Verwendung eines Pegelschlüssels, wenn überhaupt erst nach einem Abflussereignis berücksichtigt werden, da dessen Größe von der Stärke des Abflussereignisses abhängig ist. Will man dieses Verhalten bei der Durchflussmessung miterfassen, so ist neben dem aktuellen Wasserstand zusätzlich die Kenntnis der mittleren

Durchflussgeschwindigkeit erforderlich. Diese physikalische Größe hat jedoch das große Problem, dass sie nicht direkt messbar ist. Daher muss ein Zusammenhang zwischen einer gemessenen Geschwindigkeit im Querschnitt und der mittleren Geschwindigkeit hergestellt werden. Diesen Zusammenhang stellt der sog. k- Faktor oder Kalibrierfaktor her. Jedes Gewässer, jeder Querschnitt, jeder Ort an dem die Geschwindigkeit gemessen wird und jeder Pegelstand besitzen einen anderen Kalibrierfaktor.

Die vorliegende Arbeit versucht an Hand des Stainzbaches am Pegel Wieselsdorf in der Weststeiermark auf Basis unterschiedlicher Geschwindigkeitsmesssysteme die empirischen Möglichkeiten zur Ermittlung des k- Faktors an einem natürlichen Oberflächengewässer zu beleuchten. Des Weiteren sollten die Leistungsfähigkeit und die Einsetzbarkeit von modernen Geschwindigkeitsmessverfahren an einem offenen Gewässer überprüft werden.

1.2 Kanal- Monitoring- Messstation Graz

In Graz wird von Seiten des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau seit Oktober 2002 eine Online-Messstation an einem Mischwasserüberlauf betrieben. Hauptziel dieser Station ist neben der Erfassung der Häufigkeit und Dauer von Entlastungsereignissen in den Vorfluter Mur die Online- Erfassung von abgeschlagenen Schmutzfrachten.

Das Herzstück der Station ist ein direkt im Abwasserstrom in einem schwimmenden Ponton eingebauter Multi- Spektrometer. Dieser bestimmt mit Hilfe von Absorptionsmessungen Äquivalenzkonzentrationen von Summenparametern wie z.B. den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) oder die Abfiltrierbaren Stoffe (AFS). Neben der Konzentrationsmessung müssen für die Frachtermittlung auch Abflussmengen erfasst werden. Dies geschieht mit einer Durchflussmessung vor der Mischwasserentlastung und einer zweiten im Entlastungskanal.

Der §3 des Entwurfes der Abwasseremissionsverordnung über die Begrenzung von Emissionen aus Mischwasserentlastungen in Mischkanalisationen (AEV Mischwasser, 2001) schreibt vor, dass eine

Mischwassereinleitung in ein Fließgewässer an Hand der bei den Entlastungsvorgängen eingeleiteten Restfrachten der Mischwasserinhaltsstoffe eines Einzugsgebietes zu beurteilen ist.

Grundlagen für die Bemessung solcher Regentlastungsbauwerke können z.B. dem ÖWAV- Regelblatt 19, Richtlinien für die Bemessung von Regentlastung in Mischwasserkanälen, entnommen werden. Dieses Regelwerk wird derzeit überarbeitet, so dass diese Bauwerke in Zukunft die Anforderungen der zu erwartenden AEV Mischwasser erfüllen. In dem neu überarbeiteten ÖWAV- Regelblatt 19 sollen nicht nur konstruktive Vorgaben zur Bemessung von Entlastungsbauwerken, sondern auch Vorgaben über Mindestweiterleitungsgrade gemacht werden. Dies würde aber voraussetzen, dass jedes Mischwasserentlastungsbauwerk über Konzentrationsmessungen und über zwei Durchflussmessungen verfügen müsste. Diese vollkommene messtechnische Überwachung wäre also sehr aufwendig und wohl kaum finanzierbar. Deshalb schreibt der §4 Abs. 3 der AEV Mischwasser vor, dass nur regelmäßige und systematische Aufzeichnungen betreffend der zur Abwasserreinigungsanlage abgeleiteten Mischwassermengen bzw. der Häufigkeit und Dauer der Entlastungsvorgänge an den in der Kanalisation angeordneten Mischwasserentlastungsbauwerken geführt werden müssen. Für diese Datenerhebung würde sich also der erforderliche finanzielle Rahmen in Grenzen halten.

Die Diplomarbeit von Michael Wedenig (2004) beschäftigte sich mit der Kalibrierung des Spektrometer-Messsystems der Messstation Graz zur Erfassung der Schmutzstoffkonzentrationen im Trockenwetterfall und die Diplomarbeit von Christian Dorfer (2005) mit der Kalibrierung bei Mischwasserabfluss. Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit war die Überprüfung bzw. die Kalibrierung der an der Messstation Graz zum Einsatz kommenden Durchflussmesssysteme bei Trockenwetterabfluss (Messkampagne I und Messkampagne III) im Zulaufkanal und während Entlastungsereignissen (Messkampagne II) im Entlastungskanal.

2 Derzeitiger Stand der Durchflussmessung

Im folgenden Kapitel wird kurz auf die zur Anwendung gebrachten Messverfahren eingegangen, sowie deren Genauigkeit näher betrachtet. Weiters werden grundsätzliche Überlegungen zu Messabweichungen und Messfehlern gemacht. Ein Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit dem Übergang vom Gemessenen zum Geforderten, das heißt wie aus Wasserstand und Geschwindigkeit der Durchfluss ermittelt wird.

2.1 Übersicht über Messverfahren und deren Einsatzbereiche

Dieser Abschnitt stellt einen kurzen Abriss der theoretischen Grundlagen der Durchflussmessung dar und soll weiters die verwendeten Messsysteme und Messverfahren kurz beschreiben und vorstellen.

2.1.1 Begriffe und Definitionen

Durchfluss ist der Massestrom eines Fluids durch einen definierten Querschnitt. Beim Fluid Wasser respektive Abwasser wird die Dichte und die Zusammensetzung über den durchströmten Querschnitt als konstant angenommen. Daraus ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang

$Q = \frac{V}{t} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ in SI-Einheiten. Im praktischen Gebrauch findet man auch sehr

häufig die Einheiten $\left[\frac{l}{s} \right]$ oder $\left[\frac{m^3}{h} \right]$. Da man den Durchfluss nicht direkt

messen kann, geht man teilweise sehr komplizierte Wege, um diese sehr wichtige Größe mit hoher Genauigkeit bestimmen zu können.

Dabei misst man die durchflossene Querschnittsfläche $A(H)$ zumeist mittels einer Wasserstandsmessung und die mittlere Geschwindigkeit aus einer im Querschnitt gemessenen Geschwindigkeit v_{mess} und über einen in Kapitel 2.3

beschriebenen Kalibrierfaktor k mittels der Formel $\bar{v} = k * v_{mess}$. Daraus errechnet sich der Durchfluss zu $Q = A(H) * v_{mess} * k$.

2.1.2 Messprinzipien

Im folgenden Abschnitt werden vor allem jene Messverfahren vorgestellt, welche für diese Arbeit relevant waren und auch eingesetzt wurden.

2.1.2.1 Tracer-Messverfahren

Der Begriff Tracer stammt aus dem Englischen und leitet sich vom englischen Wort trace ab, das unter anderem soviel wie Spur oder Fährte bedeutet. Ein Tracer ist eine Substanz, die eine solche Spur oder Fährte zurücklässt. Tracer werden deshalb auch als Markierstoffe oder Indikatoren bezeichnet. Sie dienen dem Zweck, den Gang eines bewegten Mediums erkennbar zu machen. Eine weitere Bedeutung von trace ist in der niedrigen Konzentration des Markierstoffes zu finden.

2.1.2.1.1 Funktionsprinzip

Voraussetzung für die Anwendung dieses Messverfahrens ist, dass zwischen Impf- und Messstelle

- eine vollständige Durchmischung erzielt wird, welche daran erkennbar ist, dass im gesamten Fließquerschnitt die gleiche Tracerkonzentration vorliegt.
- ein Tracerverlust durch Ausleitung, Fällung, Verdampfung, usw. ausgeschlossen werden kann
- der Durchfluss während der Messung konstant ist

Zu unterscheiden ist die Art der Tracerzugabe.

- Momentan Impfung: Zugabe einer bekannten Menge des Indikators zu einem bestimmten Zeitpunkt, der Durchfluss ergibt sich dann aus der Summation der Konzentrationen mit der Formel $Q = \frac{M}{\int_{t_1}^{t_2} C * dt}$.

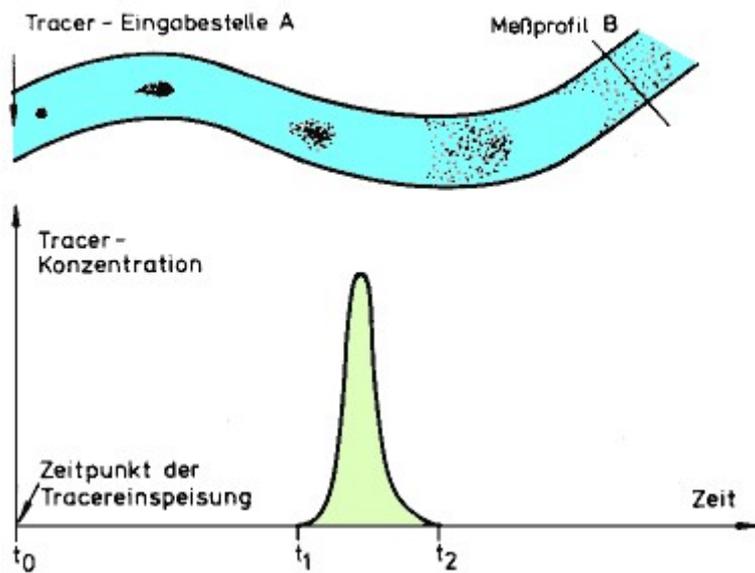


Abbildung 2-1: Impfsystematik (momentane Impfung)

(www.hydroskript.de/)

Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit kam ausschließlich dieses Verfahren zum Einsatz.

- Kontinuierliche Impfung: über einen bestimmten Zeitraum mit zeitlich konstanter Zugabe q des Markierstoffes, der Durchfluss errechnet sich dann aus einem Konzentrationsvergleich $Q = q \cdot \frac{C_1}{C_2}$.

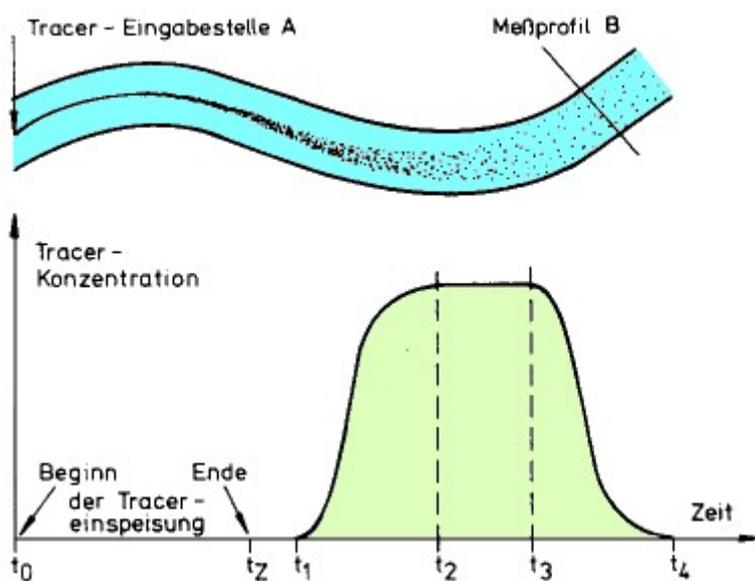


Abbildung 2-2: Impfsystematik (kontinuierliche Impfung)

(www.hydroskript.de/)

Dieses Verfahren wurde bei dieser Arbeit nicht zum Einsatz gebracht, da es konstanten Durchflusses über einen sehr langen Zeitraum bedarf.

2.1.2.1.2 Genauigkeit

Je nach Markierstoff und Randbedingungen schwankt die Genauigkeit dieses Verfahrens. Es ist für diese Methode erforderlich die Konzentrationen des Markierstoffes sehr genau zu erfassen. Deshalb werden Markierstoffe verwendet die im Wasser nicht oder nur in Spuren enthalten sind. Für kleine Gewässer eignet sich die Salztracermethode, da die Tracermengen klein gehalten werden können und über die Leitfähigkeit die Salzkonzentration sehr genau erhoben werden kann. Im Abwasser verwendet man normalerweise Fluoreszenztracer wie Uranin oder radioaktive Substanzen. Diese Substanzen sind sehr leicht zu detektieren aber sie sind sehr teuer, weshalb im Rahmen diese Arbeit versucht wurde, auch im Abwasser Speisesalz als Tracer einzusetzen (siehe dazu Kapitel 4.4.3.). Der größte Unsicherheitsfaktor ist sicherlich die Gewährleistung der totalen Durchmischung mit dem Wasserstrom. Es wird nämlich die Tracerkonzentration nur in einem Stromfaden ermittelt und postuliert, dass in allen anderen Stromfäden derselbe Verlauf vorherrscht. Das heißt, dass die Sonde in einem signifikanten Stromfaden positioniert werden muss. Meist wird die Sonde so positioniert, dass der Tracerverlauf in Gerinnemitte erhoben wird. Da in Abwasserkanälen meist ein sehr gleichmäßiges Strömungsfeld anzutreffen ist, können Tracerverluste, die zu zu großen Abflüssen führen würden, ausgeschlossen werden. Weiters wurde angenommen, dass durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,5 [m/s] eine totale Durchmischung gewährleistet ist und daher der Konzentrationsverlauf in jedem Stromfaden gleich ist. Daher wurde für diese Arbeit angenommen, dass die Auswertung der durchgeführten Tracermessungen einen Durchfluss ergibt, der mit sehr hoher Genauigkeit den tatsächlichen widerspiegelt.

2.1.2.2 Magnetisch Induktive Durchflussmessung (MID)

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche Bauweisen von magnetisch induktiven Durchflussmessern. Bei der einen Bauweise, bei der der MID wie ein Rohrabschnitt in eine bestehende Rohrleitung eingebaut wird, wird eine für die Messung erforderliche Vollfüllung entweder durch entsprechende Leitungsführung oder durch einen aufblasbaren Packer erzwungen. Dieser MID erfasst die gesamte durchflossene Querschnittsfläche und errechnet damit bereits die im Rohr vorherrschende mittlere Geschwindigkeit. Bei der anderen Methode, die im Rahmen dieser Diplomarbeit zum Einsatz kam, wird der Messsensor direkt in das abfließende Medium getaucht und misst vergleichbar mit einem „hydrologischen“ Flügel die Geschwindigkeit nach dem im Folgenden beschriebenen Induktionsprinzip.

2.1.2.2.1 Funktionsprinzip

Die magnetisch induktive Messung beruht auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz, welches besagt, dass in einem Leiter, welcher durch ein Magnetfeld bewegt wird, eine elektrische Spannung induziert wird. Diese Spannung U ist proportional zur mittleren Geschwindigkeit v , zur Länge des Leiters l und zur Stärke des Magnetfeldes B . $U = C * \bar{v} * l * B$. Aus der gemessenen Spannung U lässt sich die mittlere Geschwindigkeit zu

$\bar{v} = \frac{U}{C * l * B}$ ermitteln. Ist der Querschnitt A bekannt, so kann man den

Durchfluss $Q = \frac{U}{C * B * l} * A$ errechnen.

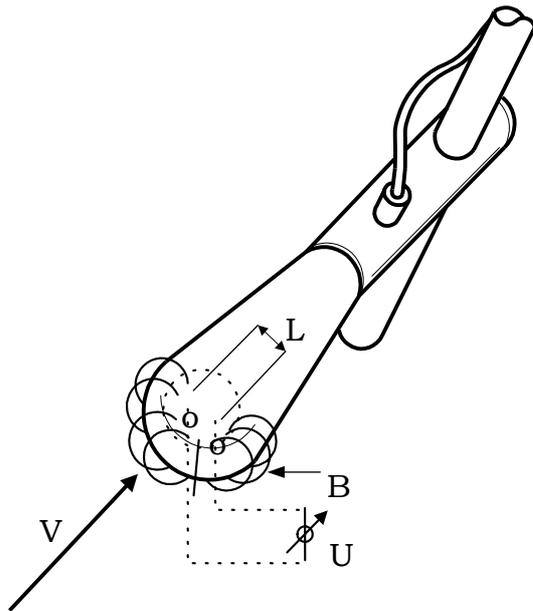


Abbildung 2-3: MID Geräteaufbau

2.1.2.2.2 Genauigkeit

Für die Qualität der Messung mittels MID sind folgende Grundsätze von wesentlicher Bedeutung:

- Die Homogenität des Fluids
- Die Güte des Magnetfeldes
- Gewisse Anforderungen an das Geschwindigkeitsprofil
- Die genaue Definition des Querschnittes

Die besten Voraussetzungen findet man im voll gefüllten Kreisprofil.

Die Systemgenauigkeit für den Messwertaufnehmer und Messwertumformer liegt unter idealen, genormten Laborbedingungen unter 1 % bei Vollfüllung und zwischen 3 % und 5 % bei Teilfüllung. Die reale Genauigkeit dieses Verfahrens wird vor allem von der vorherrschenden Fließgeschwindigkeit beeinflusst.

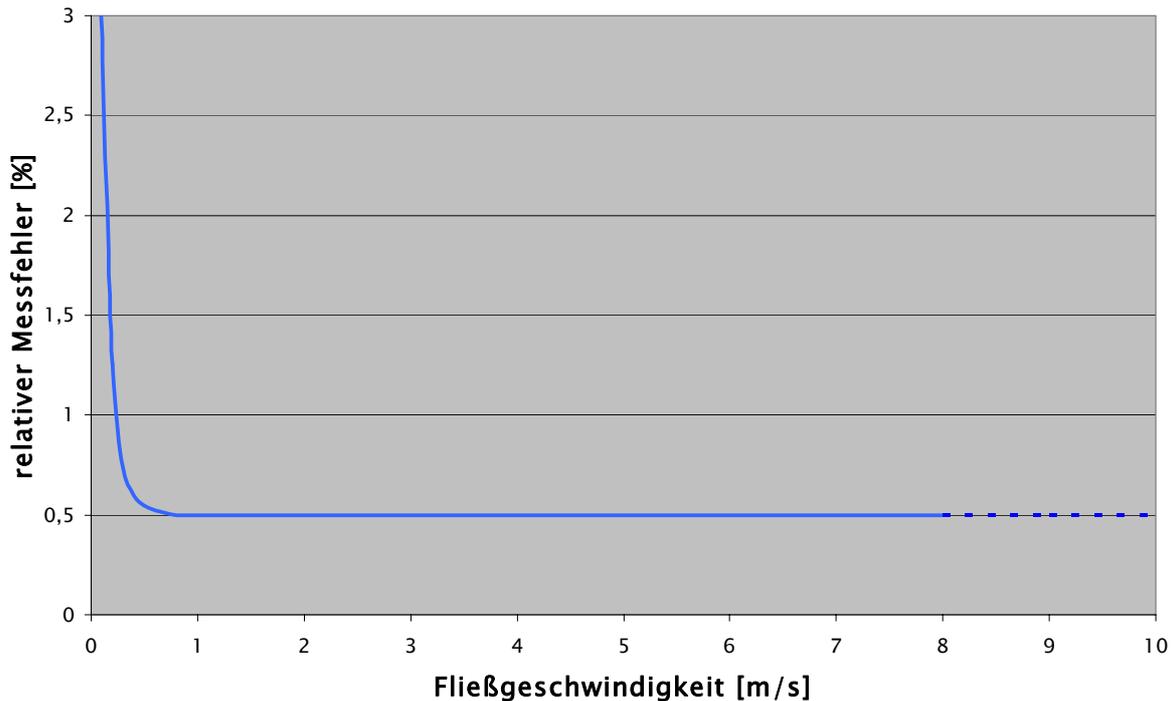


Abbildung 2-4: Systemgenauigkeit VSA (1999)

2.1.2.3 Ultraschalldurchflussmessung

Bei der Ultraschalldurchflussmessung werden Ultraschallimpulse zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit eingesetzt. Grundsätzlich sind hierbei drei Verfahren zu unterscheiden:

- Schalllaufzeit
- Frequenzverschiebung (Doppler-Effekt)
- Kreuzkorrelation

In dieser Arbeit werden nur die Methoden der Frequenzverschiebung und der Kreuzkorrelation behandelt. Der Ultraschall wird mit einem piezoelektrischen Schwinger erzeugt und liegt in einem Frequenzbereich von ca. 100 kHz bis 5 MHz. Der piezoelektrische Schwinger ist ein Kristall, der durch Anlegen einer Wechselspannung zu schwingen beginnt und so Schallwellen aussendet. Umgekehrt kann er durch Schallwellen in Schwingung versetzt werden und dadurch Wechselspannung erzeugen.

Die Fließtiefe wird meist über einen hochsensiblen Druckfühler ermittelt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass 10 [cm] Wassersäule einem

Druckunterschied entsprechen der einem starken Kaltfrontdurchgang (10 [mbar] in 3 h) gleicht. Deshalb muss der Sensor immer mit einem anderen Höhenstandssensor abgeglichen werden.

2.1.2.3.1 Funktionsprinzip

Bei der Ultraschalldurchflussmessung mittels Dopplerverschiebung wird die Frequenzverschiebung des an einem sich bewegenden Schwebstoffteilchen reflektierten Ultraschallsignals gemessen. Dabei wird vorausgesetzt, dass genügend Feststoffe im Medium vorhanden sind und sich diese gleich schnell bewegen wie die Flüssigkeit selbst. In den meisten Abwässern ist der Feststoffgehalt groß genug um eine ausreichende Reflexion zu gewährleisten. Allerdings führt ein zu hoher Feststoffanteil zu großer Schallabsorption, welche das Ergebnis verfälschen kann. Die heutige Elektronik erlaubt das Unterteilen des Fließquerschnittes in mehrere Messfenster, die sich klarerweise durch die unterschiedliche Laufzeit des Ultraschallsignals ergeben. Die mittlere Geschwindigkeit in einem Messfenster errechnet sich

zu $\bar{v} = \frac{\Delta f}{f_0} * \frac{c}{2 * \cos \varphi}$. Dabei muss beachtet werden, dass durch die

unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Schwebstoffe die Frequenz des Reflexionsspektrums mehr oder weniger stark streut. Es ist daher notwendig, aus diesem Spektrum die maßgebende Frequenz und damit die mittlere Geschwindigkeit zu ermitteln. Außerdem geht in das Ergebnis die Schallgeschwindigkeit c direkt ein. Für genaue Messungen ist es daher notwendig, diesen Einfluss durch eine separate Messung der Schallgeschwindigkeit zu eliminieren. Außerdem ist bei Freispiegelabflüssen für die Durchflussermittlung eine Messung der Fließtiefe unerlässlich.

Bei der Ultraschallmessung mittels Kreuzkorrelation wird wie bei dem vorher genannten Verfahren ein auch Ultraschallimpuls ausgesandt. Der Empfänger, der gleichzeitig der Sender sein kann, empfängt das Ultraschallecho und speichert dieses charakteristische Echomuster digital ab. Mit einem zweiten Scan, welcher 0,5 bis 4 μ s später erfolgt, wird erneut ein Echomuster empfangen und digital gespeichert. Die Laufzeit zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt bestimmt die Position des reflektierenden

Teilchens im Fließquerschnitt. Diese beiden Echomuster werden auf Übereinstimmung geprüft. Die zeitliche Verschiebung des Musters im zweiten Scan gegenüber dem ersten lässt sich unter Berücksichtigung des Einstrahlwinkels direkt in eine Fließgeschwindigkeit umrechnen. Bei der Verwendung mehrerer Messfenster lässt sich damit sogar das Strömungsprofil an der Messstelle abbilden.

2.1.2.3.2 Genauigkeit

Die Systemmessfehler sind klarerweise von der Geschwindigkeit v und der Fließtiefe h abhängig und liegen im Bereich von 3 bis 5 %. Rückstau hat große Fehler (10 % oder mehr) zur Folge und ist daher zu vermeiden. Für Randbedingungen, die innerhalb des blau markierten Bereiches der Abbildung 2-5 liegen, ist das Verfahren gut geeignet, für jene die außerhalb liegen übersteigen die Messfehler die 5 % Grenze.

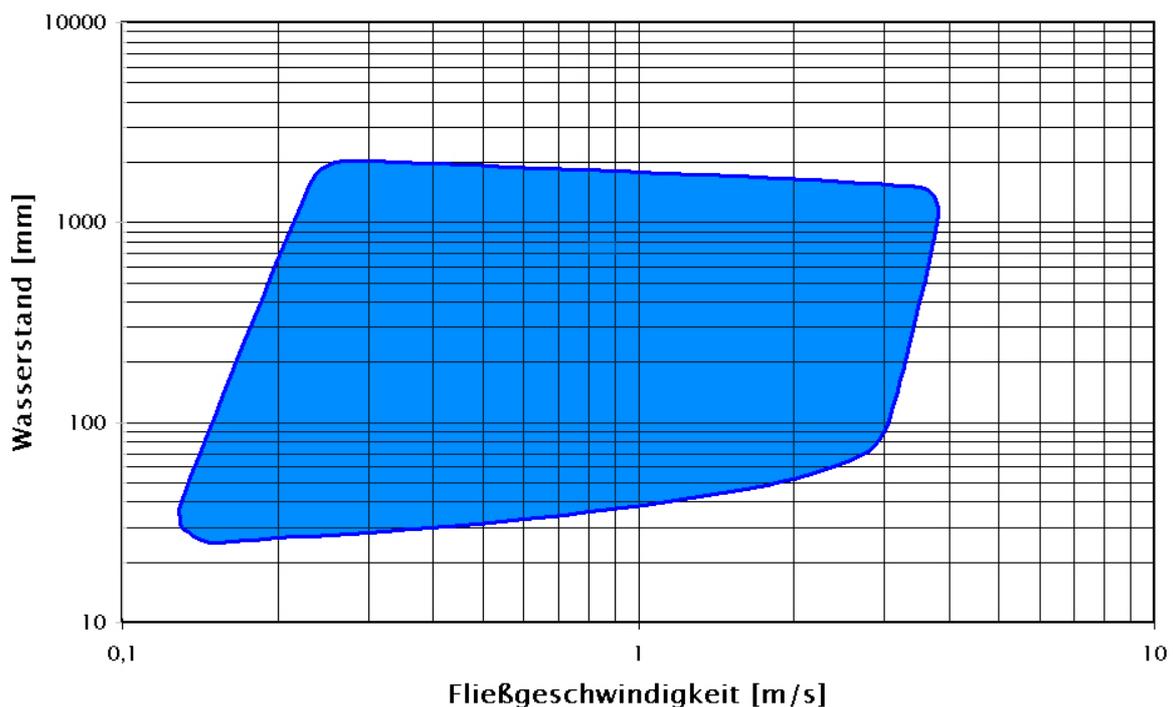


Abbildung 2-5: anzustrebender Einsatzbereich VSA (1999)

2.1.2.4 Radar

Eine der neuesten Technologien ist die berührungslose Messung der Geschwindigkeit mittels Radar. Dabei wird die oberflächennahe Geschwindigkeit bzw. Oberflächengeschwindigkeit des Fluids ermittelt.

2.1.2.4.1 Funktionsweise

Eine Antenne emittiert elektromagnetische Wellen, welche von der bewegten welligen Oberfläche des Messmediums reflektiert werden. Sie muss so ausgerichtet werden, dass die Radarwellen in einem Winkel von 30° bis 70°, gemessen gegen die Horizontale, die Wasseroberfläche schneiden. Die reflektierten Radarwellen haben auf Grund der Dopplerverschiebung eine andere Frequenz, welche von der Geschwindigkeit der Oberflächenwellen abhängig ist. Analog zur Messung mit Ultraschall wird nun die vorherrschende Oberflächengeschwindigkeit im vom Radarstrahl

bestrichenen Bereich mit der Formel $\bar{v} = \frac{\Delta f}{f_0} * \frac{c}{2 * \cos \varphi}$ errechnet. Dabei ist

wieder darauf zu achten, dass die reflektierte Frequenz auf Grund unterschiedlicher Wellenbewegungen an der Oberfläche streut und man für die Auswertung den maßgebenden Teil des Spektrums durch einen Auswertalgorithmus ermitteln muss. Für die Durchflussmessung ist parallel dazu die durchflossene Querschnittsfläche zu ermitteln. Dies geschieht in den meisten Fällen mittels einer Ultraschallecholotmessung.

2.2 Messbereiche und Messfehler

Dieses Kapitel ist sinngemäß den Ausführungen von Prof. Dr. Uhl (2000) entnommen. Es wird in dieser Arbeit nur ein grober Überblick darüber gegeben, um die Grundzusammenhänge, welche für die Untersuchungen dieser Arbeit notwendig waren kurz zu umreißen.

Führt man unter stationären Verhältnissen eine Messung mehrmals durch, so erhält man unterschiedliche Ergebnisse, die um einen Mittelwert streuen. Auch der Mittelwert muss nicht zwangsläufig dem gesuchten Wert

entsprechen. Abweichungen zwischen den gesuchten und gemessenen Werten der Messgröße sind zumeist unvermeidbar.

2.2.1 Messabweichungen

Die Messabweichung ist definiert als die Differenz zwischen Messwert und einem Bezugswert, der durch den unbekanntem wahren Wert oder einen bekannten richtigen Wert gegeben ist. Daraus ergibt sich eine Messabweichungen $\Delta x = x - x_r$. Diese setzt sich zusammen aus einer zufälligen Abweichung und einer systematischen Abweichung $\Delta x = \Delta x_z + \Delta x_s$. Sie entsteht durch Unvollkommenheiten der Messgeräte und Messeinrichtungen, des Messverfahrens und des zu messenden Objektes oder Prozesses. Veränderliche Umwelteinflüsse wie Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Spannung und äußere elektrische oder magnetische Felder verursachen Messabweichungen durch superponierende oder deformierende Störungen. Beobachtereinflüsse wie Aufmerksamkeit, Erfahrung, Seh- und Schätzvermögen sind bei manueller Messung und Datenregistrierung oft entscheidend.

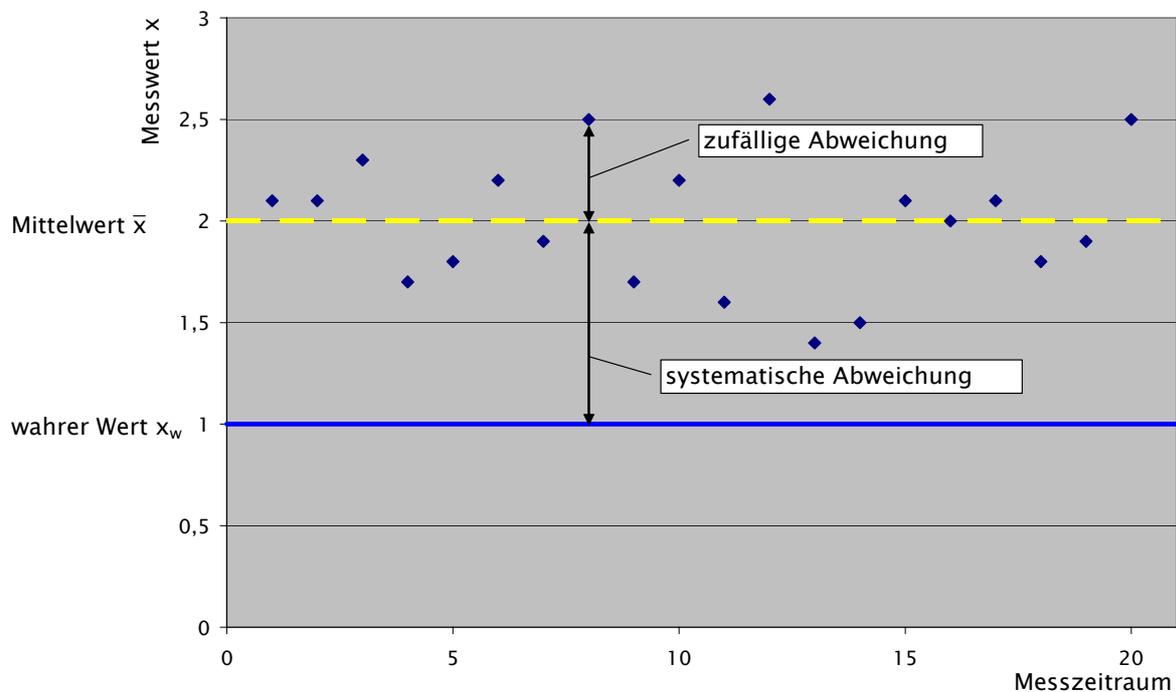


Abbildung 2-6: Grundbegriffe der Messabweichung Uhl (2000)

2.2.1.1 Zufällige Abweichungen

Messergebnisse einer unter stationären Bedingungen durchgeführten Messung schwanken um einen Mittelwert. Die Differenz eines Einzelergebnisses zum Mittelwert wird zufällige Abweichung genannt $\Delta x_z = x - \bar{x}$. Meist können zufällige Abweichungen hinreichend genau durch eine Normalverteilung beschrieben werden. Als Erwartungswert dient das

arithmetische Mittel von n Einzelwerten $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$. Die Varianz stellt die mittlere quadratische Abweichung vom Erwartungswert dar und ist ein Maß für die Streuung des Messwertes $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$.

Zufällige Messabweichungen werden durch zahlreiche, geringfügige, voneinander meist unabhängige, unvermeidbare, nicht quantifizierbare Einflüsse bewirkt, die nicht einseitig gerichtet wirken. Sie machen ein Messergebnis unsicher. Sie lassen sich nicht vermeiden, sondern nur verringern.

2.2.1.2 Systematische Abweichungen

Der Mittelwert ist nicht zwangsläufig der wahre beziehungsweise richtige Wert. Die Differenz des Mittelwertes zum richtigen beziehungsweise wahren Wert wird systematische Abweichung $\Delta x_s = \bar{x} - x_r$ genannt. Systematische Abweichungen haben eine hinsichtlich Betrag und Vorzeichen definierte Größe und eine eindeutige Ursache- Wirkung- Beziehung. Sie machen ein Messergebnis unrichtig und müssen korrigiert werden. Außerdem können sie durch wiederholte Messungen nicht entdeckt werden.

Zu unterscheiden sind

- Systematische Abweichungen, die während der Messung einen zeitlich invariablen Betrag und gleiches Vorzeichen aufweisen. Diese können dabei abhängig oder unabhängig vom Messwert sein.

- Systematische Abweichungen, die zeitlich veränderlich sind, hervorgerufen durch Ursachen, die die Messgröße in eine bestimmte Richtung verändern.

Hinsichtlich der Quantifizierung werden bekannte und unbekannte Messabweichungen unterschieden.

- Bekannte systematische Messabweichungen sind hinsichtlich Betrag und Vorzeichen quantifizierbar und treten in dieser Form immer wieder reproduzierbar auf. Sie machen ein Messergebnis unrichtig und müssen korrigiert werden.
- Unbekannte systematische Abweichungen sind hinsichtlich Betrag und Vorzeichen nicht eindeutig quantifizierbar, daher werden sie wie zufällige Messabweichungen behandelt.

Im Regelfall lassen sich systematische Messabweichungen durch Referenzmessungen quantifizieren. Das bedeutet, dass durch den Vergleich mit anderen Messeinrichtungen die Abweichung dem Betrage und dem Vorzeichen nach erhoben wird. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine präzisere Referenzmessung, welche meist mit großem Aufwand verbunden ist.

2.2.2 Fehler

Abweichungen als solche sind noch keine Fehler. Als Fehler bezeichnet die DIN 1319 eine festgestellte, nicht korrigierte, systematische Abweichung. Um Messeinrichtungen hinsichtlich ihrer möglichen Messabweichungen zu klassifizieren, bedient man sich der Angabe von Fehlergrenzen. Sie gehören zu den fundamentalen Eigenschaften der Messeinrichtungen und sind rechtsverbindlich zu vereinbaren.

2.2.2.1 Fehlergrenzen

Die DIN 1319 besagt, dass Fehlergrenzen vereinbarte Höchstbeträge für positive und negative Abweichungen der Anzeige, beziehungsweise Ausgabe von Messeinrichtungen und Messgeräten sind. Sie dürfen weder von systematischen noch von zufälligen Abweichungen überschritten werden. Sie

gelten für die gesamte Messeinrichtung einschließlich der Messwertverarbeitung im Messwertumformer und in der Ausgabeeinrichtung. Innerhalb der Fehlergrenzen darf das Messergebnis unsicher und unrichtig sein. Oftmals werden Fehlergrenzen nur in Verbindung mit klar zu benennenden Referenzbedingungen angegeben. Die Fehlergrenze gibt die maximal zulässigen positiven und negativen Abweichungen vom Sollwert an. Die Quantifizierung der Fehlergrenze erfolgt unter anzugebenden Nennbedingungen als Relativwert zum Sollwert. Somit gilt $G = \left| \frac{Q - Q_{soll}}{Q_{soll}} \right|$.

Diese Definition macht klar, dass eine **Garantiefehlergrenze** als Relativwert auf den jeweiligen Referenzmesswert anzugeben ist. Unter Garantiefehlergrenze versteht man jene Fehlergrenze, welche sich unter Nennbedingungen auf einem geeigneten Prüfstand ergibt. Für einzelkalibrierte Messgeräte gilt $G_g = G$. Findet keine Einzelkalibrierung statt, sondern eine Bauartkalibrierung und -prüfung des Herstellers, so gilt $G_g = 2 * G$.

Verkehrsfehlergrenzen unter Nennbedingungen gelten, wenn bei Verwendung und Prüfung der Messeinrichtung die festgelegten Nennbedingungen eingehalten werden, es gilt $G_{v,n} = 2 * G_g$. Weichen nun die tatsächlichen Bedingungen von den Nennbedingungen ab, so gelten die Verkehrsfehlergrenzen unter Betriebsbedingungen. Sie errechnen sich zu $G_{v,b} = f * G_{v,n}$. Der Sicherheitsfaktor f berücksichtigt die zusätzlichen Unsicherheiten zufolge der Betriebsbedingungen, er lässt sich schlussendlich nur durch Vergleichsmessungen experimentell ermitteln.

2.2.3 Justieren, Kalibrieren und Eichen

Da in der Praxis diese drei Begriffe häufig unsachgemäß verwendet werden, sollen im nachstehenden Absatz diese Begriffe in Anlehnung an die DIN 1319 erläutert werden.

Unter **Justieren** versteht man das gezielte Einstellen oder Abgleichen eines Messgerätes durch Vergleich mit einem oder mehreren Sollwerten. Ziel

dieses Eingriffes am Messgerät ist, die Messabweichung möglichst klein oder zumindest kleiner als die Fehlergrenze zu halten.

Kalibrieren bedeutet das Feststellen der Messabweichungen eines Messgerätes durch Vergleich mit einem oder mehreren Sollwerten. Es erfolgt allerdings kein Eingriff am Messgerät.

Eichen umfasst Prüfung und Stempelung durch die zuständige Eichbehörde nach den einschlägigen Eichvorschriften. Eichen ist somit ein amtlicher Vorgang. Auch hier erfolgt kein Eingriff am Messinstrument, sondern die Prüfung stellt fest, ob das Gerät hinsichtlich Beschaffenheit und messtechnischer Eigenschaften den Eichvorschriften entspricht. Die Stempelung beurkundet das positive Prüfergebnis. Die Mehrzahl der in der Hydrometrie verwendeten Messgeräte ist nicht eichfähig, da ihre Funktionsfähigkeit und Messabweichung zu sehr von den Einsatzbedingungen abhängen.

2.3 Der Weg von der Messung zum Durchfluss

Alle oben genannten Messverfahren mit Ausnahme der Tracermessung basieren darauf, dass die durchflossene Fläche und eine darin herrschende Geschwindigkeit ermittelt werden. Das dabei auftretende Problem der Unkenntnis der gesuchten mittleren Geschwindigkeit wird durch den so genannten k-Faktor gelöst. Es handelt sich dabei um das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit zur gemessenen Geschwindigkeit $k = \frac{\bar{v}}{v_{mess}}$. Dieser

Faktor, welcher auch Kalibrierfaktor genannt wird, kann entweder über ein numerisches Modell oder empirisch über mehrere Messreihen ermittelt werden.

2.3.1 Numerische Modellierung

Das einzige derzeit verfügbare Modell ist das so genannte SIMK- Modell von Dr. Kölling (2000). Das Verfahren beruht auf der numerischen Simulation der turbulenten dreidimensionalen Geschwindigkeitsverteilung in offenen Gerinnen. Daraus kann man den k-Faktor bestimmen und damit den

aktuellen Durchfluss ermitteln. Die hohe Genauigkeit dieses Systems wird durch die Simulation der wichtigsten physikalischen und geometrischen Effekte der Gerinneströmung erreicht.

2.3.1.1 Grundlagen der SIMK-Kalibrierung

Nach Dr. Kölling (2000) ist die SIMK- Kalibrierung der herkömmlichen Feldkalibrierung überlegen, da keine Vergleichsmessungen zu verschiedenen Abflüssen gemacht werden müssen, welche teuer und gefährlich und oft sogar undurchführbar sein können. Weiters ist sie auch im Rückstau einsetzbar, wenn sich die Geschwindigkeitsverteilung in Fließrichtung nicht allzu stark ändert.

In den betrachteten Fließquerschnitten ist die turbulente Strömung zwangsweise dreidimensional. Selbst in völlig geradlinigen Gerinnen existieren bei idealer stationärer gleichförmiger Strömung so genannte Sekundärströmungen, welche quer zur Gerinneachse gerichtet sind. Die typischen Aufwallungen, die man am Wasserspiegel von Flüssen und auch in geradlinigen Kanälen beobachten kann entstehen durch die in positiver z-Richtung gerichteten Sekundärströmungen.

Nach Dr. Kölling (2000) erzeugen Sekundärgeschwindigkeiten einen konvektiven Impulstransport innerhalb des Querschnittes, der die axiale Geschwindigkeitsverteilung erheblich beeinflusst, obwohl die Sekundärgeschwindigkeiten wesentlich kleiner sind als die axialen Geschwindigkeitskomponenten.

Die Profilform und der Wasserstand beeinflussen die turbulente Geschwindigkeitsverteilung erheblich, weil die anisotropen Turbulenzen und die Sekundärströmungen vor allem in Wand- und Wasserspiegelnähe entstehen. Die globalen Gerinneparameter der traditionellen Hydraulik wie hydraulischer Radius, Wasserspiegelbreite und Querschnittsfläche reichen nicht aus, um diese Sekundärströmungen genau genug zu erfassen. Daher wird auf deren Verwendung pauschal verzichtet. Stattdessen wird der teilgefüllte Querschnitt mit einem detaillierten Finite- Element- Netz diskretisiert.

Die Finite- Element- Analyse stellt ein flexibles Verfahren dar, welche die Berücksichtigung der einflussreichen Randbedingungen in Gerinnen beliebiger Profilform ermöglicht.

2.3.2 Empirische Kalibrierung

Hierbei wird durch möglichst viele Vergleichsmessungen bei verschiedenen Wasserständen der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Kalibrierfaktor ermittelt. Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden die Vergleichsmessungen in Form von Flügelmessungen nach Kreps für das offene Gerinne und Tracermessungen für den Mischwasserkanal zur Anwendung gebracht.

Die gewonnenen Messergebnisse wurden sowohl hinsichtlich Durchfluss als auch Kalibrierfaktor ausgewertet.

3 Messstelle Stainzbach

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, sollte auch die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Messgeräte überprüft werden. Außerdem wurde aus den zur Verfügung stehenden Daten ein Wasserstands- Kalibrierfaktor-Zusammenhang erstellt.

3.1 Situierung

Die betreute Messstelle befindet sich ungefähr 3 km westlich der südweststeirischen Ortschaft Preding und 8 km südöstwärtig von Stainz.

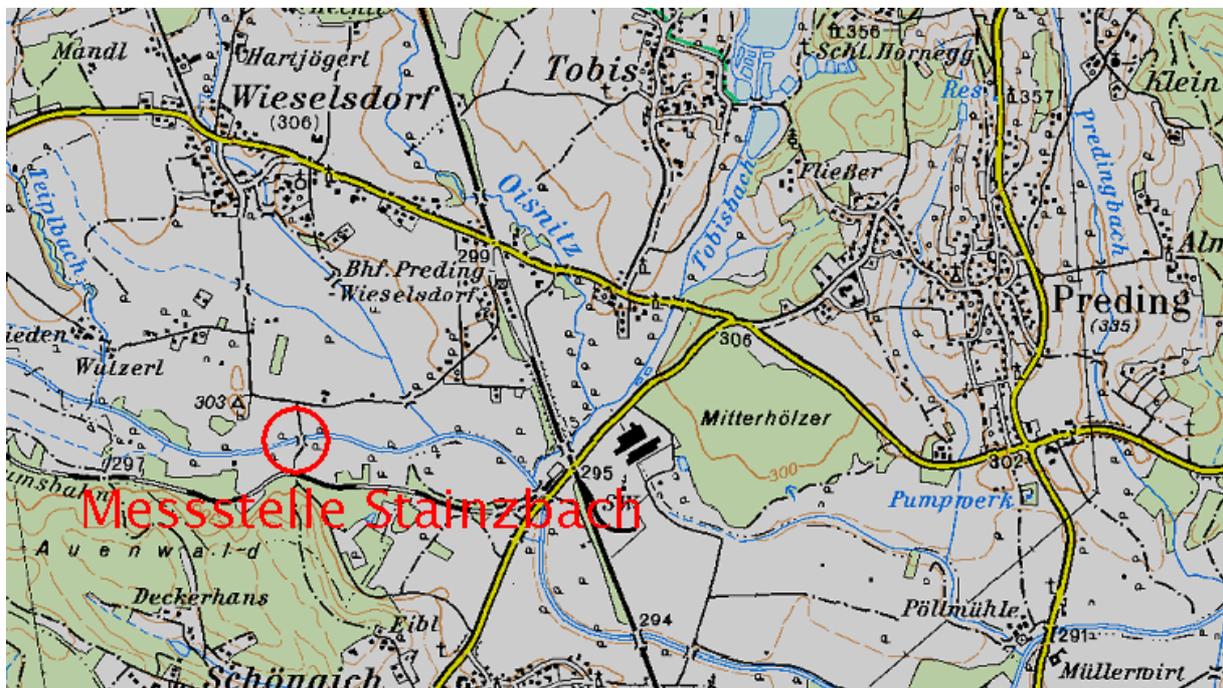


Abbildung 3-1: Messstelle Stainzbach im Kartenblatt Preding (BEV)

Die Messstelle ist mit einer Pegellatte und mit einem Pegelschreiber (Hydrosense Compact) auf Basis einer Drucklufteinperlung ausgerüstet. Der Pegelschreiber ist in einer Hütte untergebracht und die Stromversorgung ist durch eine Solaranlage und mehrere Pufferbatterien sichergestellt. Die Abbildung 3-2 gibt einen Einblick in die Grundausrüstung der Messstelle.



Abbildung 3-2: Verhältnisse vor Ort am Pegel Wieselsdorf

3.2 Untersuchungsprogramm

Die installierten Messinstrumente wurden so miteinander verglichen, dass auf einen plausiblen Kalibrierfaktor geschlossen werden konnte. Deshalb wurden möglichst, viele Messungen bei unterschiedlichen Wasserständen angestrebt, um viele Punkte auf der Schlüsselkurve zu erhalten. Da während des kurzen Beobachtungszeitraumes nicht alle Bereiche erfasst werden konnte, wurde in weiterer Folge auch auf die langjährigen Messreihen der Fachabteilung 19 der Steiermärkischen Landesregierung zurückgegriffen. Aus den von der FA 19 zur Verfügung gestellten Flügelmessungen wurde versucht, auf die zum Erfassungszeitpunkt an den Messorten der Geschwindigkeitssensoren herrschenden Strömungsgeschwindigkeiten zurück zu rechnen. Das heißt, dass der Kalibrierfaktor aus einer theoretisch ermittelten und nicht gemessenen Geschwindigkeit errechnet wurde.

Weiters konnte an Hand zweier sehr dynamischer Abflussereignisse gezeigt werden, dass der herkömmliche Pegelschlüssel (Wasserstands-Durchflussbeziehung) nicht stimmt und daher ein Einsatz von

Messsystemen, welche die Geschwindigkeit erheben, für eine exakte Durchflussmessung unumgänglich ist.

3.3 Hydrologische Verhältnisse

Das natürliche Einzugsgebiet des Stainzbaches ist 148,767 [km²] groß. Die höchste Erhebung ist der Reinischkogel mit 1463 [m.ü.A.] Die Messstelle selbst befindet sich auf einer Höhe von 291,93 [m.ü.A.].

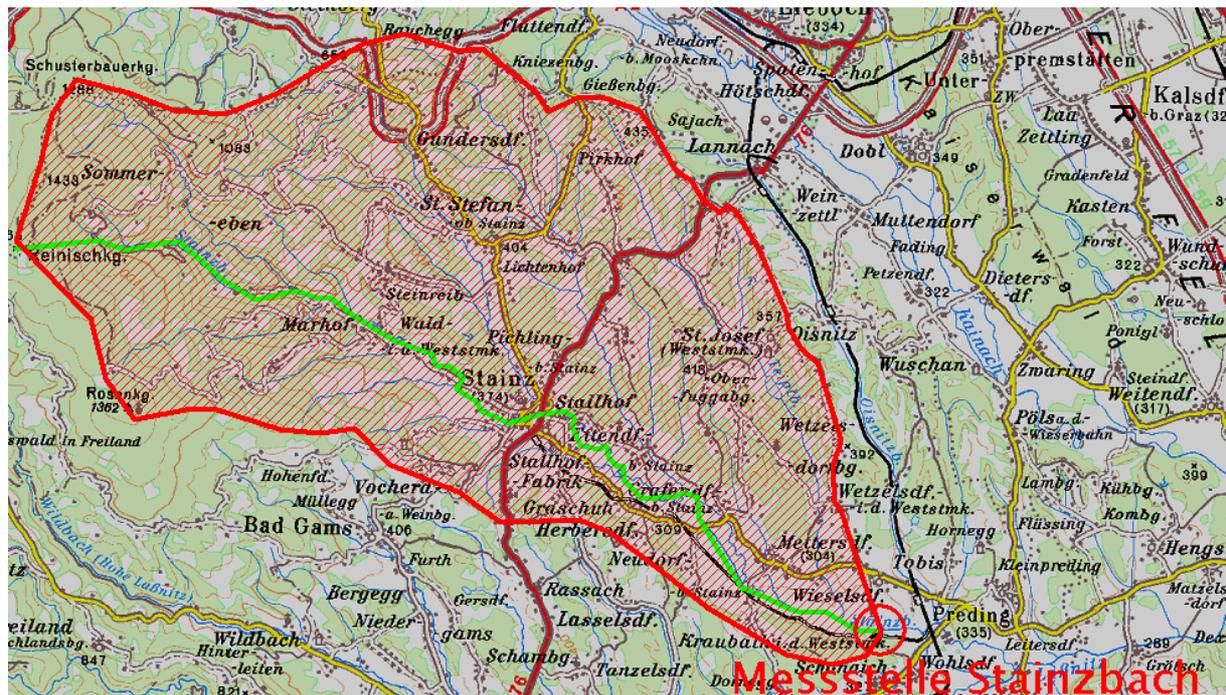


Abbildung 3-3: Einzugsgebiet der Messstelle am Stainzbach

Aus den von der FA19 zur Verfügung gestellten Unterlagen geht hervor, dass die mittlere Geländeneigung im gesamten Gebiet in etwa 10° beträgt und sich das Neigungsmaximum auf 54° beläuft. Der Großteil ist mit Wald bedeckt, davon entfallen 27,3 % auf Laub und Mischwald und 21,9 % auf Nadelwald. Der zweitgrößte Teil besteht aus komplexen Parzellenstrukturen (45,1%), der Rest besteht aus Wiesen und Weiden (3,6%), nicht bewässertem Ackerland (0,7%) und Gebieten von nicht durchgängig städtischer Prägung (0,3%). Die in der Abbildung erkennbare grüne Linie verfolgt den Flusslauf bis zum höchsten Punkt. Der zugehörige Längsschnitt ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

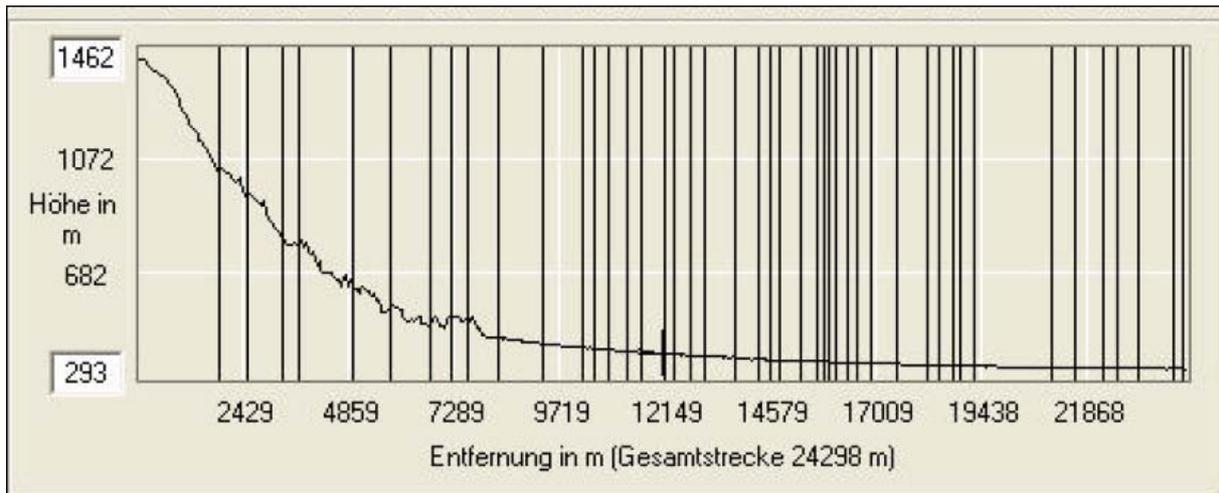


Abbildung 3-4: Längsschnitt Stainzbach (AMAP 3D)

3.4 Installierte Messgeräte

Im Messquerschnitt wurden insgesamt drei verschiedene Messinstrumente installiert. Ein FloDar der Firma Marsh McBirney, welcher von der UTEK GmbH zur Verfügung gestellt wurde, ein EasyQ der Firma Nortek und ein kombinierter Radar- und Ultraschallsensor der Firma Sommer. Die Montage der Messinstrumente wird in nachfolgenden Kapiteln behandelt. Die Abbildung 3-5 zeigt die Einbausituation vor Ort.

Querschnitt Messstelle Wieselsdorf am Staizbach

H_{max} = Höchster Wasserstand während der Untersuchungsperiode

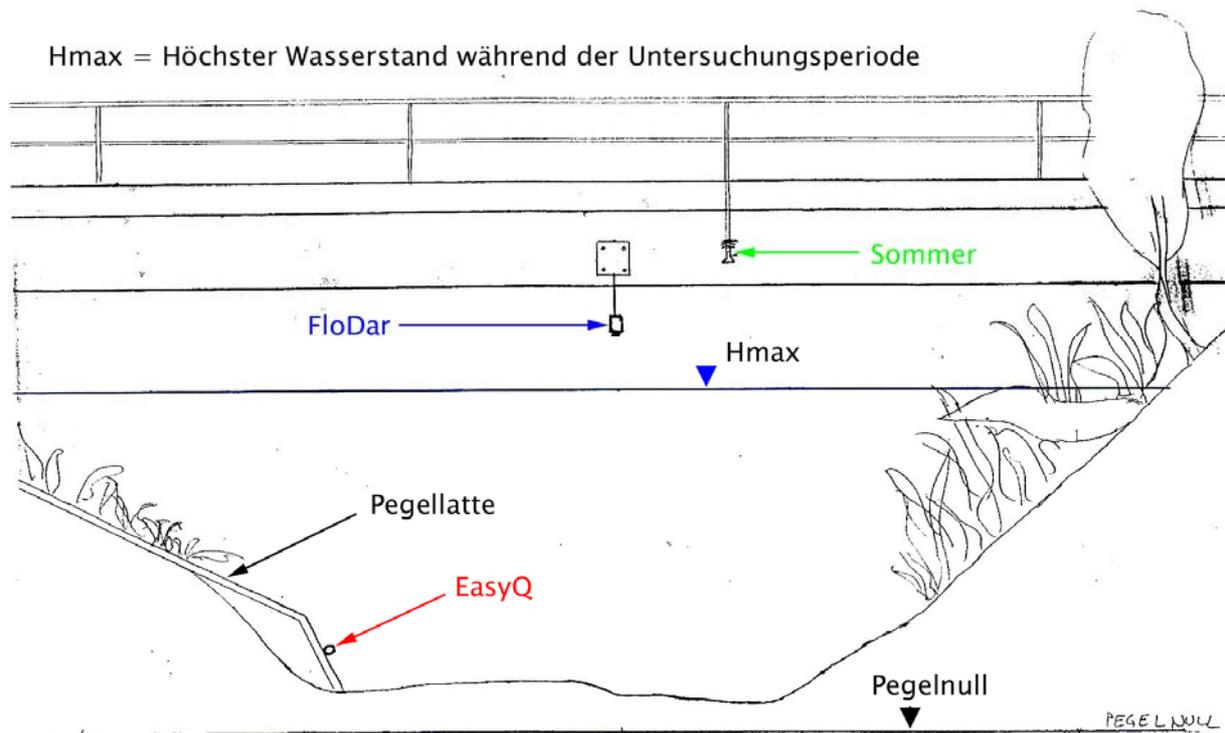


Abbildung 3-5: Querschnitt Messstelle Stainzbach

3.4.1 FloDar

Der kombinierte Radar- Geschwindigkeitssensor und Ultraschall-Höhenstandssensor (Abbildung 3-6) wurde in mit einer dafür vorbereiteten Vorrichtung an den Brückenträger geschraubt. Der Datenlogger wurde in der Pegelhütte montiert, um ihn vor Vandalismus und Umwelteinflüssen zu schützen. Die mitgelieferte Software (FloWare) ermöglichte es, aus den gemessenen Daten den Durchfluss zu errechnen. Dazu war es notwendig, den durchflossenen Querschnitt abhängig vom Pegelstand einzugeben. Weiters verlangt das Programm nach dem Kalibrierfaktor, der auch abhängig vom Pegelstand eingegeben werden konnte. Dieser Kalibrierfaktor birgt sehr viele Unsicherheiten, da er, wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, entweder numerisch modelliert oder empirisch ermittelt werden muss. In erster Näherung wurde der k-Faktor nach den Erfahrungen der Firma UTEK G.m.b.H. mit 0,85 über den gesamten Bereich angenommen. Der Datenlogger speichert nicht nur den Durchfluss, sondern auch die gemessenen Daten, Oberflächengeschwindigkeit und Wasserstand. Daher

war es möglich, alle erhobenen Daten im Nachhinein zu korrigieren und mit dem richtigen Kalibrierfaktor zu versehen.

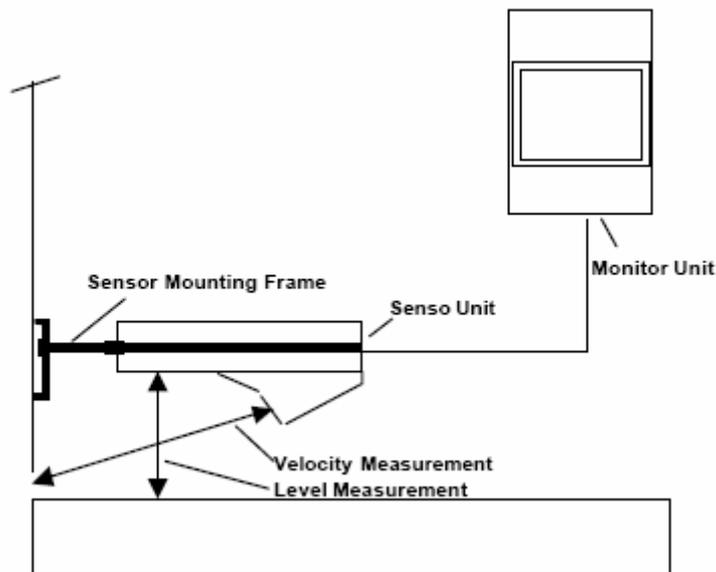


Abbildung 3-6: FloDar- System (FloDar Manual, 2004)

Das eigentliche Know-how der Fa. Marsh McBirney ist die Auswertung des dopplerverschobenen, von der Wasseroberfläche reflektierten Radarstrahls. Da der dafür notwendige Algorithmus nicht preisgegeben wurde, konnten nur Vermutungen bezüglich der Auswertung des Radarsignals angestellt werden.

Wie in Abbildung 3-7 dargestellt, ergeben sich in den meisten Fällen im reflektierten Dopplerspektrum zwei markante Spitzen, von denen eine als relevant bestimmt beziehungsweise ausgewählt werden muss. Aus den Ergebnissen leitet sich die Vermutung ab, dass die FloWare über den Verlauf der Intensität den gleitenden Mittelwert bildet und von den beiden Spitzen jenes Maximum wählt, das im Mittelwert letztlich höher ist.

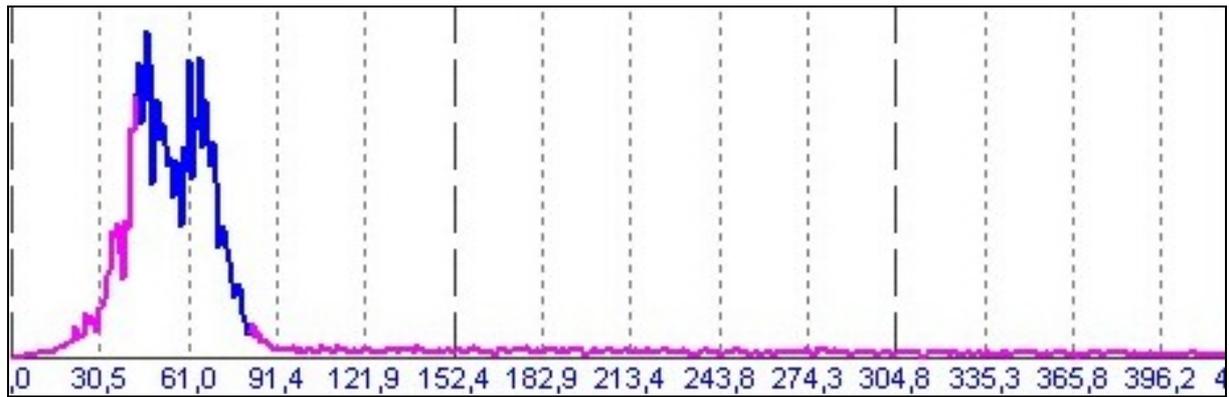


Abbildung 3-7: Dopplerspektrum

Die Vergleichsmessungen durch den Techniker der Firma Utek, welche mit einem kleinen mobilen MID oberflächennah durchgeführt wurden, ergaben immer sehr kleine Abweichungen (unter 1,5 %). Da sich allerdings der Messort der Geschwindigkeit in Gerinnelängsrichtung bei einer Änderung des Wasserstandes verschiebt müsste eigentlich für jede Pegelhöhe ein anderer Querschnitt angenommen werden.

3.4.2 EasyQ

Dieses Messsystem ist im Gegensatz zu dem oben beschriebenen FloDar nicht berührungslos und muss daher im Gewässer eingebaut werden. Die Geschwindigkeitsmessung basiert auf dem Ultraschall- Doppler- Prinzip (siehe Kapitel 2.1.2.3). Das Gerät kann seinen Messbereich in drei Messfenster beliebiger Größe unterteilen und in jedem einen zweidimensionalen mittleren Geschwindigkeitsvektor errechnen. Das heißt, dass nicht nur die Geschwindigkeiten in Gerinnelängsrichtung ermittelt werden sondern auch die horizontalen Sekundärströmungen quer zur Gerinnachse. Das ist für eine numerische Kalibration nach Dr. Kölling (2000) von Vorteil weil diese auf der Simulation der Sekundärströmungen basiert und durch den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Strömungen überprüft werden kann.

Der Sensor wurde mit einer Vorbereiteten Halterung an der vorhandenen Stiege befestigt und um alle Achsen genau eingerichtet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf den so genannten Roll- und Nickwinkel gelegt.

Das Gerät verfügt über einen internen Datenlogger und eine eingebaute Stromversorgung, es kann daher an einen Gewässer über einen bestimmten Zeitraum ohne zusätzliche Infrastruktur selbständig betrieben werden.



Abbildung 3-8: Eingebauter EasyQ

Die messtechnischen Besonderheiten des Systems liegen darin, dass der Messkopf den Ultraschallimpuls nicht nur in eine Richtung aussendet, sondern mit mehreren Sendern und Empfängern einen sehr großen Bereich des Fließquerschnittes sensorisch erfasst. In Abbildung 3-9 sind der Messkopf dargestellt und die Sensoren bezeichnet.

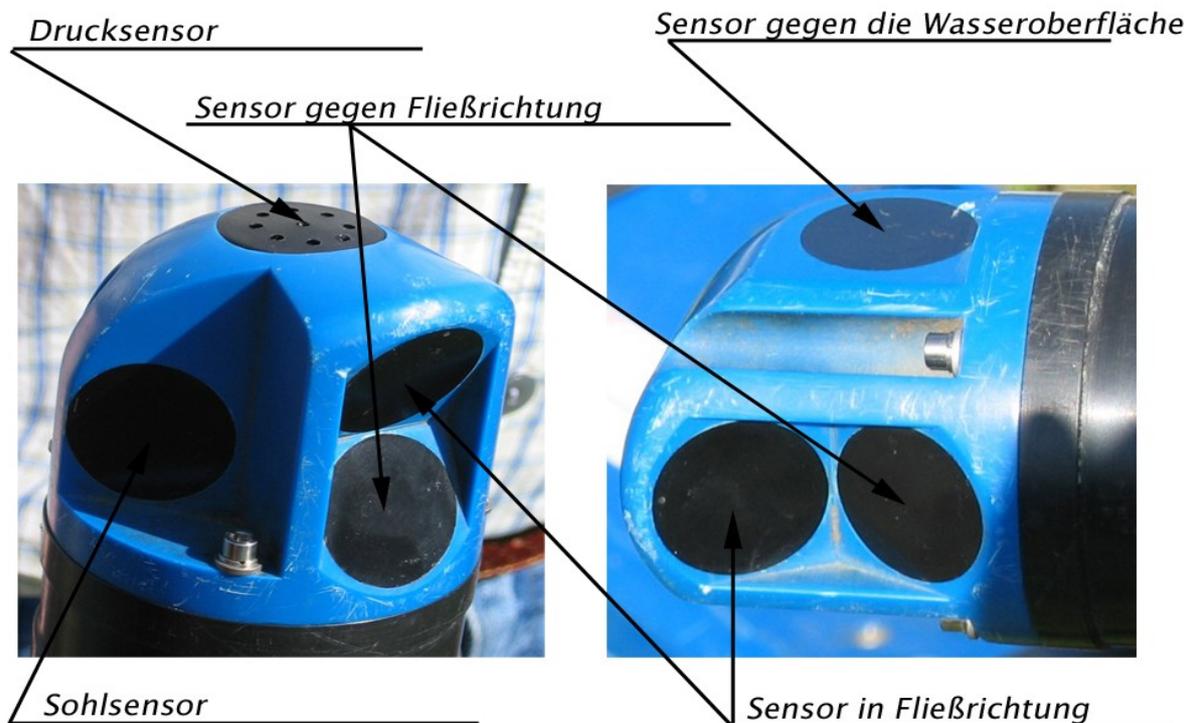


Abbildung 3-9: Messkopf des EasyQ

Der Drucksensor wird beim EasyQ mit dem gegen die Wasseroberfläche gerichteten Ultraschallsensor abgeglichen. Die Wasserstandsmessung mit dem Ultraschallsensor beruht auf der Reflexion des Impulses an der Wasseroberfläche und der Laufzeit des Signals. Grundsätzlich wird das Signal des Ultraschallsensors zur Berechnung der aktuellen Wasserstandshöhe herangezogen und nur bei Ausfällen oder unplausiblen Werten verwendet die Software den Wert des Drucksensors. Der Nachteil des EasyQ ist, dass er nicht berührungslos misst und somit permanent den mechanischen Beanspruchungen im Fließgewässer ausgesetzt ist. Dadurch verschmutzt er sehr leicht durch anhaftende Schwebstoffe oder auch durch Algenbewuchs. Eine Beeinträchtigung der Messergebnisse durch diesen Belag konnte allerdings im Beobachtungszeitraum nicht festgestellt werden.

3.4.3 Sommer

Der Sensor der Fa. Sommer misst nach demselben Prinzip wie der FloDar. Die Oberflächengeschwindigkeit wird über eine Radarmessung erfasst und der Wasserstand über Ultraschalllaufzeit ermittelt. Der Sensor wurde mit einer vorbereiteten Halterung an dem Brückengeländer befestigt.



Abbildung 3-10: Das Messsystem der Firma Sommer

Da es sich bei dem Gerät der Fa. Sommer um einen Prototypen handelte, war der Auswertalgorithmus des Radarsensors zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Diplomarbeit leider noch nicht ausgereift. Wie in Abbildung 3-11 zu erkennen ist, lieferte das Messsystem während des Beobachtungszeitraumes zumeist Werte, welche von den anderen Messsystemen sehr stark abwichen und daher fehlerbehaftet angenommen werden mussten.

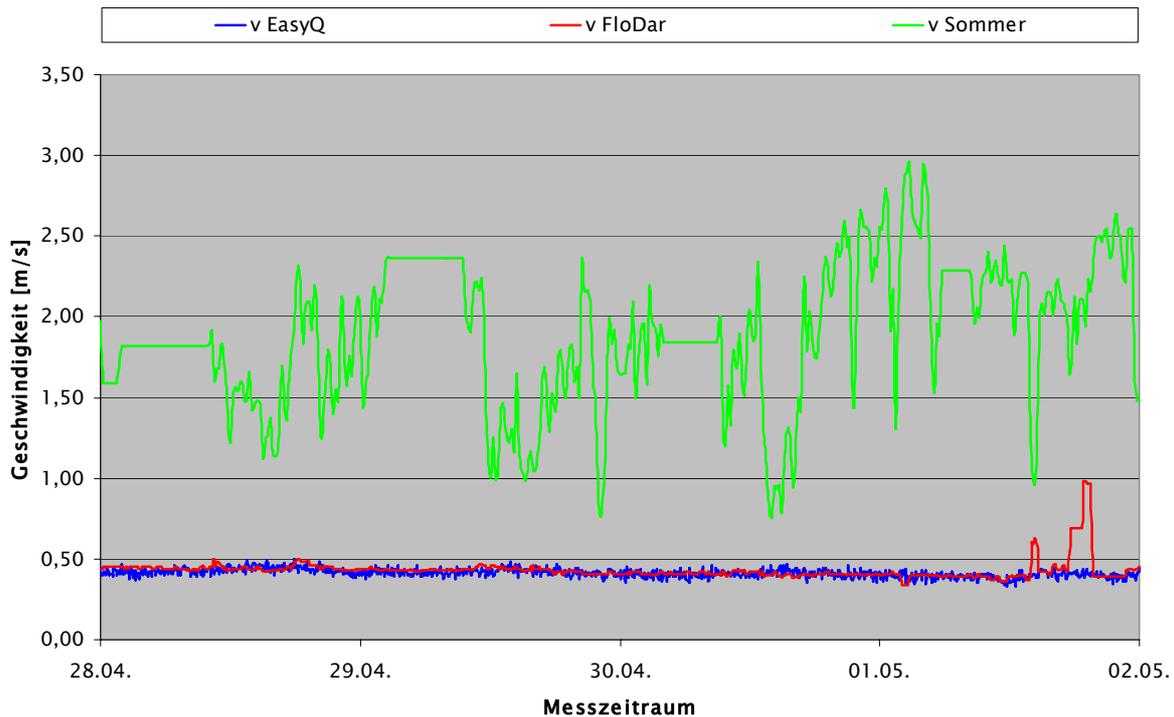


Abbildung 3-11: Geschwindigkeitsvergleich

Aus diesem Grund konnten die Daten des Sommer- Messsystems nicht in der Auswertung berücksichtigt werden. Allerdings wurde das Messsystem in der Zwischenzeit von der Firma Sommer weiterentwickelt und noch während dieser Arbeit einer anderen Messstelle eingebaut. Dort lieferte es sehr viel versprechende Ergebnisse, die jedoch in dieser Arbeit keine Berücksichtigung mehr fanden.

3.5 Untersuchungsperiode

Die Untersuchungsperiode am Stainzbach erstreckte sich vom 22. April 2004 bis zum 21. Juli 2004 (siehe Abbildung 3-12). Während

dieses Zeitraumes traten mehrere größere Abflussereignisse auf, von denen zwei, welche in Abbildung 3-12 durch rote Ellipsen gekennzeichnet sind, näher betrachtet wurden. Das erste Ereignis umfasst den Zeitraum vom 22. Mai 2004 00:00 Uhr bis 25. Mai 2004 00:00 Uhr. Als zweites Ereignis wird der Zeitraum vom 12. Juni 2004 00:00 Uhr bis 13. Juni 2004 12:00 Uhr bezeichnet. Während der gesamten Untersuchungsperiode wurden im Messquerschnitt insgesamt fünf Flügelmessungen nach Krepss durchgeführt, die in Abbildung 3-12 als gelbe Punkte markiert sind. Die Einbauperioden der jeweiligen Messgeräte sind in Abbildung 3-12 als Doppelpfeile über der Zeitachse aufgetragen.

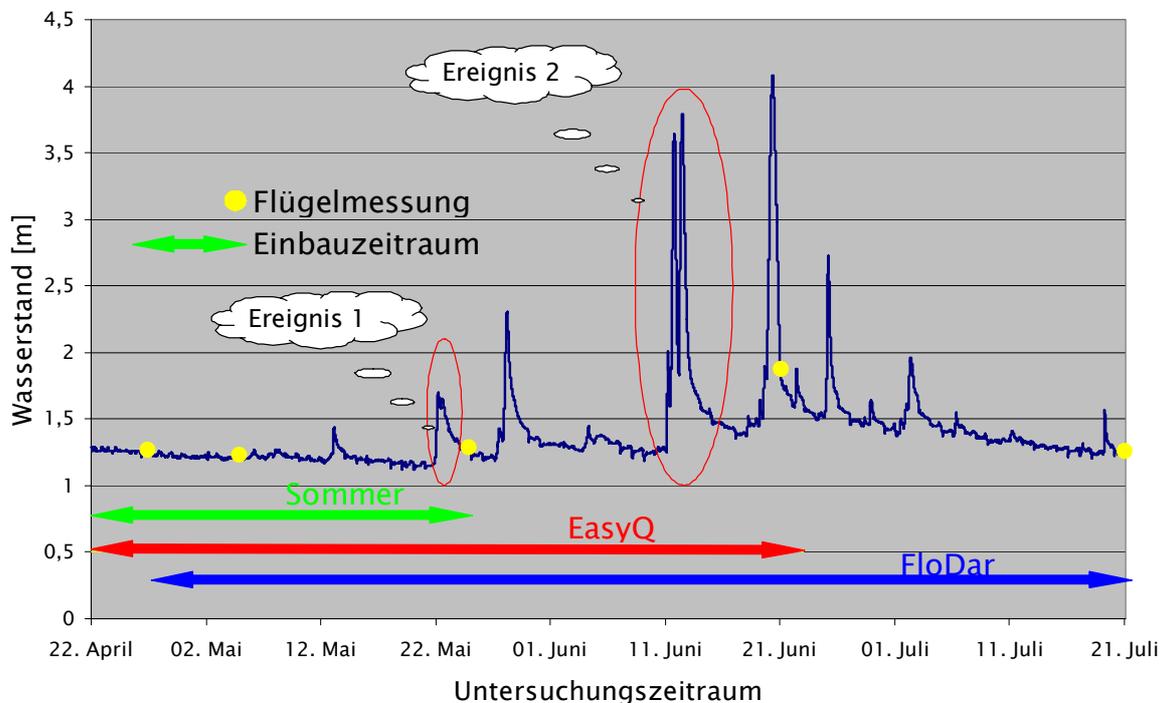


Abbildung 3-12: Untersuchungsperiode am Stainzbach

3.5.1 Profilaufnahme

Zu Beginn und am Ende des Untersuchungszeitraumes wurde das Profil aufgenommen und in Abbildung 3-13 grafisch dargestellt. Während der laufenden Messungen wurde der Querschnitt mittels der fünf Flügelmessungen auf grobe Änderungen überprüft. Am Ende der Untersuchungsperiode wurde das Profil deswegen nochmals aufgenommen, um sicher zu stellen, dass sich während des Beobachtungszeitraumes der

Abflussquerschnitt nicht maßgebend verändert hat. Wie Abbildung 3-13 verdeutlicht, hat sich während des Untersuchungszeitraumes die Gewässersohle nicht wesentlich verändert. Daher konnte für die Durchflussermittlung stets die gleiche Wasserstands- Querschnittsflächen- Beziehung zu Grunde gelegt werden.

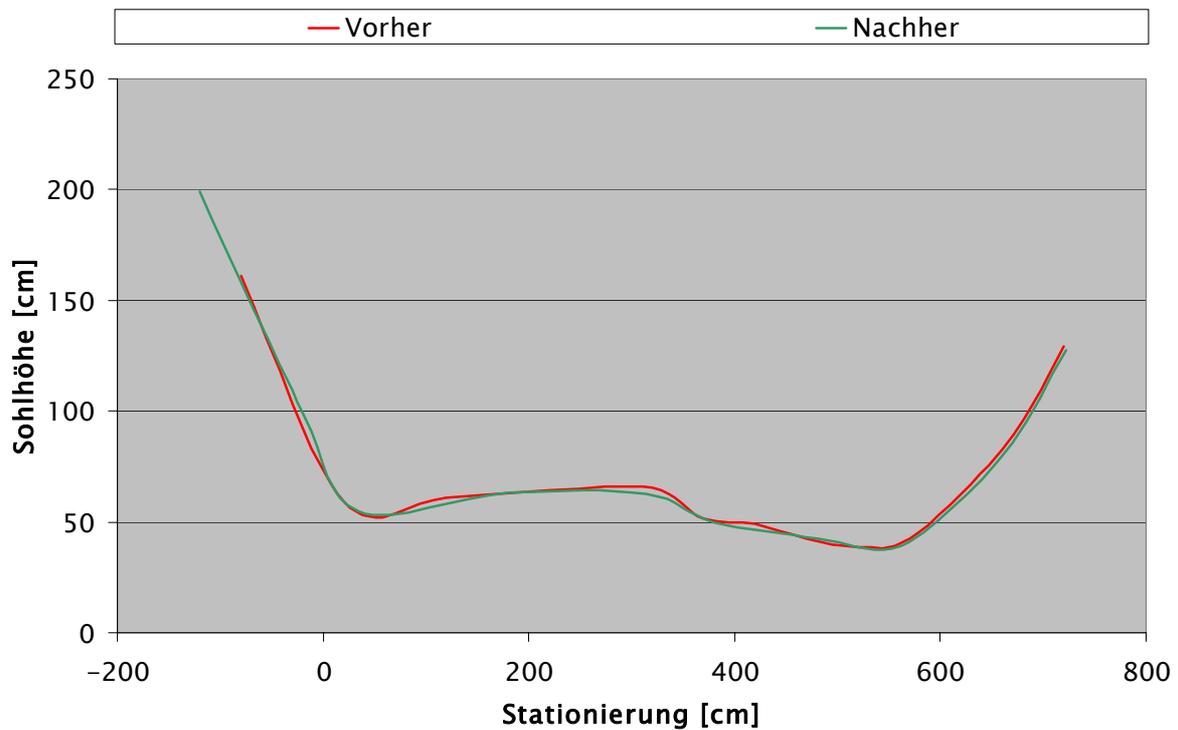


Abbildung 3-13: Profilaufnahme des Messquerschnittes

Aus der langjährigen Messreihe der FA 19 wurde auch ein Pegel-Querschnittfläche- Zusammenhang erstellt. Die in Abbildung 3-14 zu erkennenden blauen Punkte stellen jeweils eine Flügelmessung der FA 19 dar. Diese wurden mit einem quadratischen Trend, der durch die blaue Linie in Abbildung 3-14 dargestellt ist, verbunden. Da das Profil sehr regelmäßig ist wurde angenommen, dass dieser Zusammenhang dem quadratischen Trend genau genug folgt.

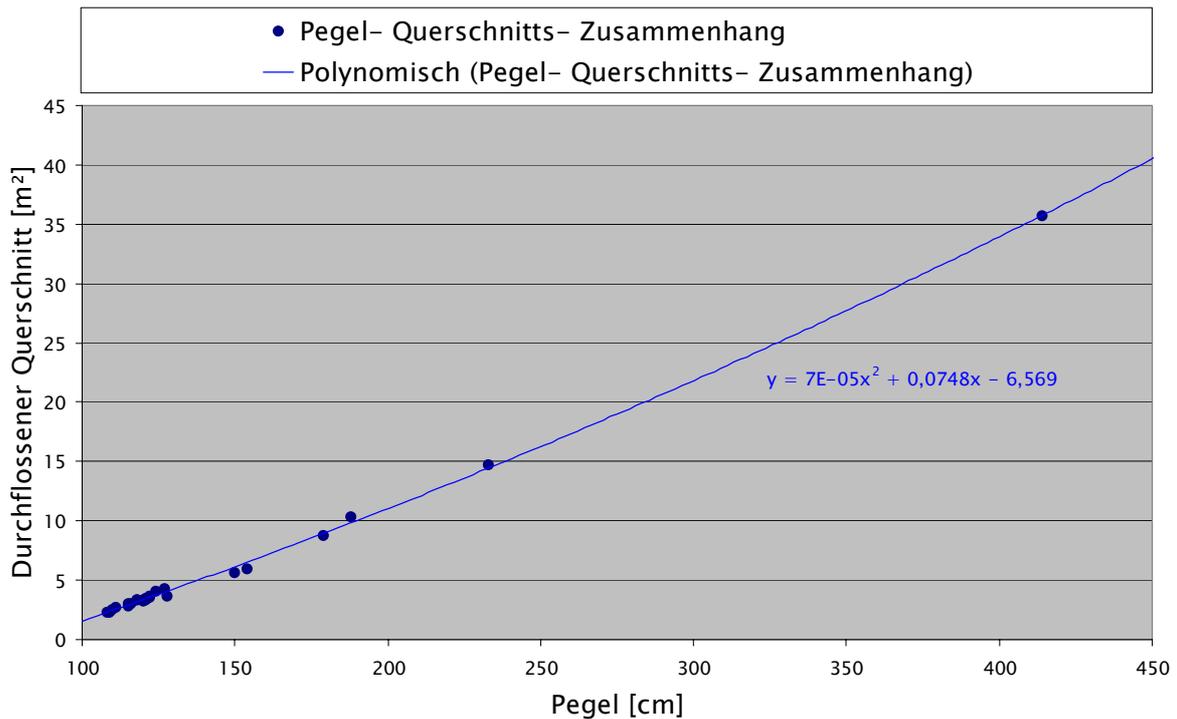


Abbildung 3-14: Pegel- Querschnittsfläche- Zusammenhang im Messquerschnitt Stainzbach

3.6 Auswertungen

Die Daten des gesamten Untersuchungszeitraumes wurden hinsichtlich Wasserstand und Geschwindigkeit verglichen. Es wurde versucht,

- systematische Fehler zu erkennen und zu quantifizieren
- Messausfälle zu erkennen und zu interpretieren
- den Kalibrierfaktor k zu ermitteln (sowohl für FloDar als auch EasyQ).

3.6.1 Höhenstandsvergleich

Für den Höhenstandsvergleich wurden alle eingesetzten Messsysteme herangezogen. Dabei wurde der Wert eines Messsystems als Sollwert festgelegt und die anderen darauf bezogen. In diesem Fall wurden die Messergebnisse des Höhenstandsensors der Fa. Sommer als Bezugswerte herangezogen. In Abbildung 3-15 sind die Pegeldata der verschiedenen Messsysteme gegenübergestellt. Die Differenz (Residuen) der Messdaten der verschiedenen Messgeräte wurde, um sie besser zu verdeutlichen, auf der

Sekundärachse aufgetragen. Für die weitere Betrachtung wurde den Residuen eine Standardnormalverteilung zu Grunde gelegt.

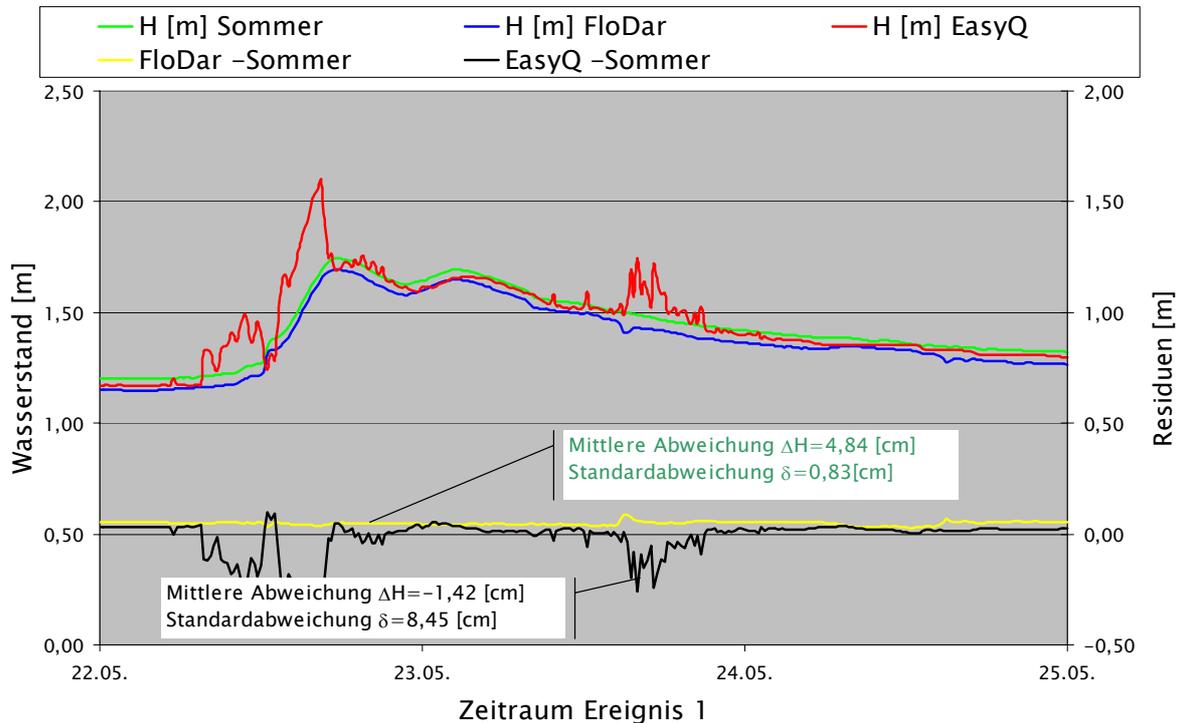


Abbildung 3-15: Höhenstandsvergleich während des Ereignisses 1

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass zwischen den Werten des FloDar und den Werten der Fa. Sommer während dieses ersten größeren Abflussereignisses eine systematische Abweichung aufgetreten ist, welche in Abbildung 3-15 durch die gelbe Linie dargestellt ist. Gekennzeichnet ist diese Abweichung durch eine sehr kleine Standardabweichung der Residuen. Hingegen trat beim Vergleich mit den Werten des EasyQ zwar eine kleinere mittlere Abweichung aber eine sehr große Standardabweichung der Residuen auf, was auf eine systemimmanente zufällige Abweichung schließen lässt. Nach dieser Auswertung wurden am EasyQ einige Einstellungen verändert, um diese zufälligen Abweichungen zu minimieren. Es handelte sich dabei um den so genannten Qualitythreshold, was soviel wie Qualitätsschwelle bedeutet. Wie bereits erwähnt, wurde das Messsystem der Fa. Sommer danach an einem anderen Gewässer eingebaut und konnte für weitere Auswertungen nicht herangezogen werden.

Während des zweiten größeren Abflussereignisses ergaben sich die in Abbildung 3-16 dargestellten Verläufe. Dabei zeigte sich, abgesehen von einigen gekennzeichneten Fehlmessungen des EasyQ, eine sehr gute Übereinstimmung.

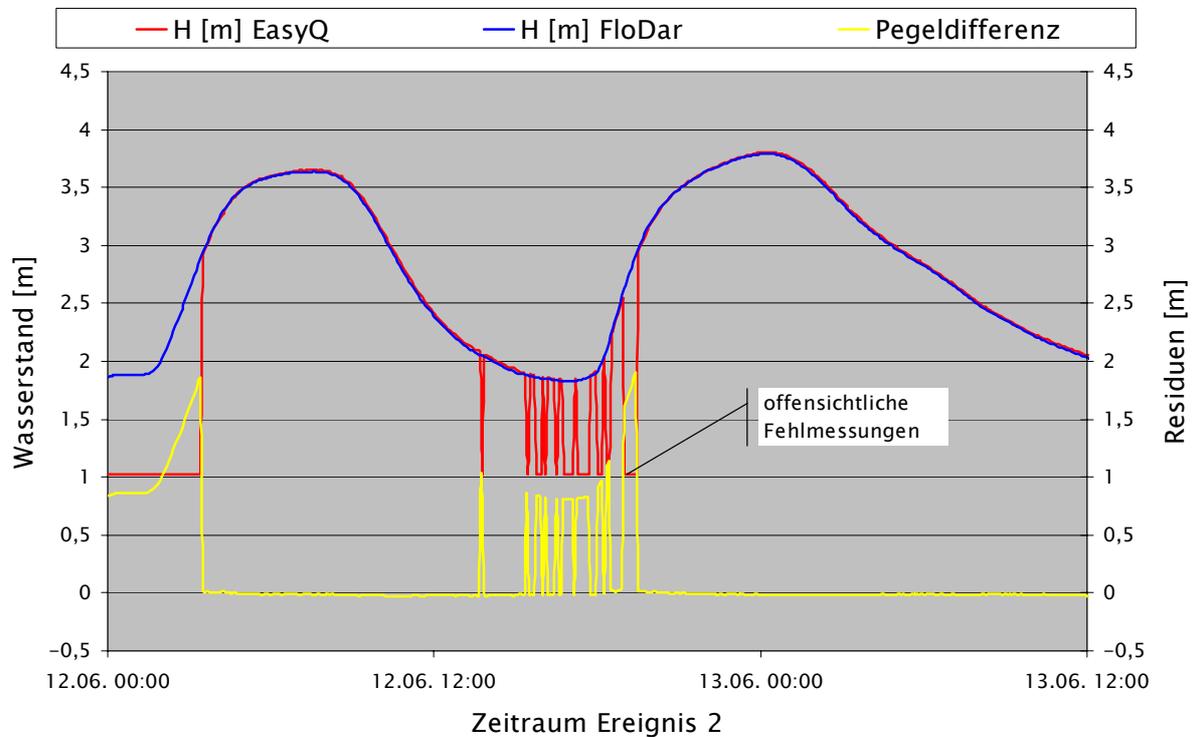


Abbildung 3-16: Höhenstandsvergleich Ereignis 2

Wenn man die gekennzeichneten offensichtlichen Fehlmessungen für die Bildung der Differenz nicht berücksichtigt ergibt sich die in Abbildung 3-17 dargestellte gelbe Linie, wobei die Residuen wieder auf der Sekundärachse aufgetragen wurden. Der Mittelwert der korrigierten Abweichung beträgt 1,1 [cm] und die zugehörige Standardabweichung der Residuen erreicht einen Wert von 1,0 [cm]. Abbildung 3-17 veranschaulicht diese sehr gute Übereinstimmung nach Bereinigung der offensichtlichen Fehlmessungen des EasyQ.

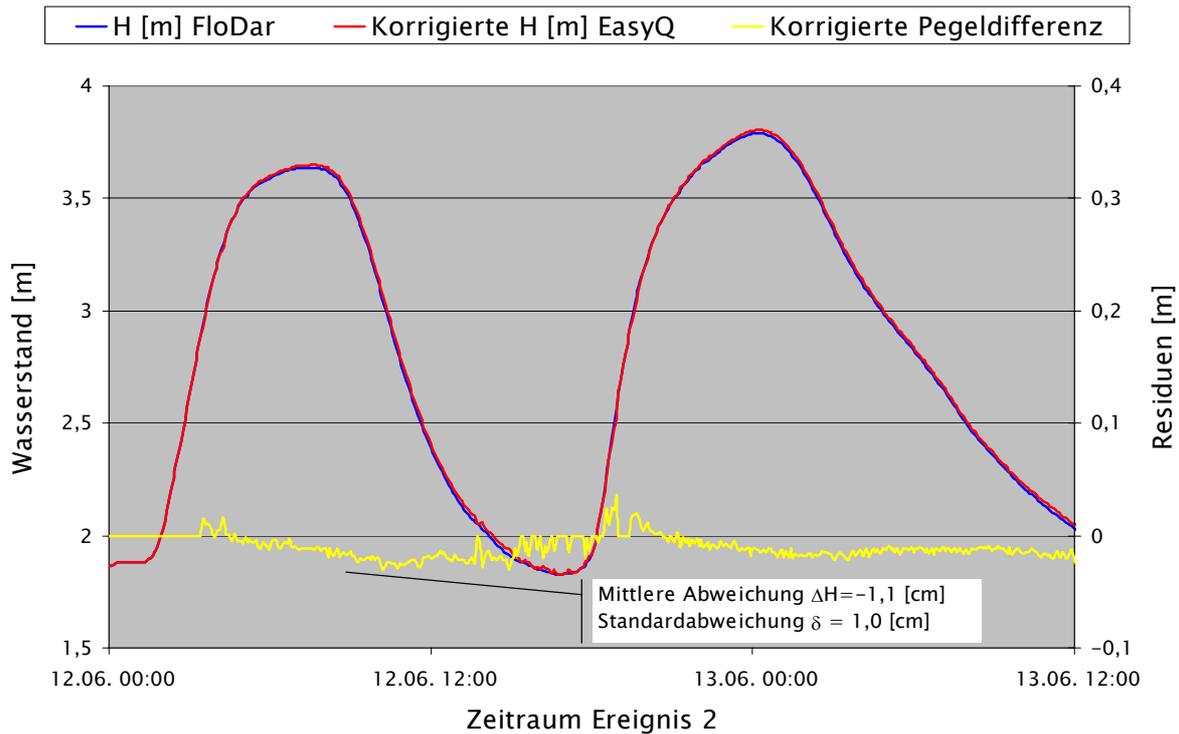


Abbildung 3-17: Korrigierter Höhenstandvergleich des Ereignisses 2

Es konnte also angenommen werden, dass die Höhenstandsdaten den tatsächlichen Verlauf des Pegelstandes hinreichend genau wiedergeben. Daher mussten für die Betrachtungen in Kapitel 3.6.3 die gemessenen Höhenstände nicht korrigiert werden.

3.6.2 Geschwindigkeitsvergleich

Die gemessenen Geschwindigkeiten wurden nicht wie die Höhenstandsdaten direkt miteinander verglichen, da sie an verschiedenen Orten im Querschnitt gemessen wurden und eine direkte Gegenüberstellung daher nicht sinnvoll wäre. Abbildung 3-18 zeigt aber, dass die gemessenen Geschwindigkeiten trotz des unterschiedlichen Messortes relativ gut übereinstimmen. Auffallend dabei ist nur, dass die gemessenen Geschwindigkeiten des EasyQs zumeist höher waren als die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten des FloDars. Ein beobachtetes Phänomen, welches im Kapitel 3.6.3.1, beim Durchflussvergleich, versucht wird zu interpretieren.

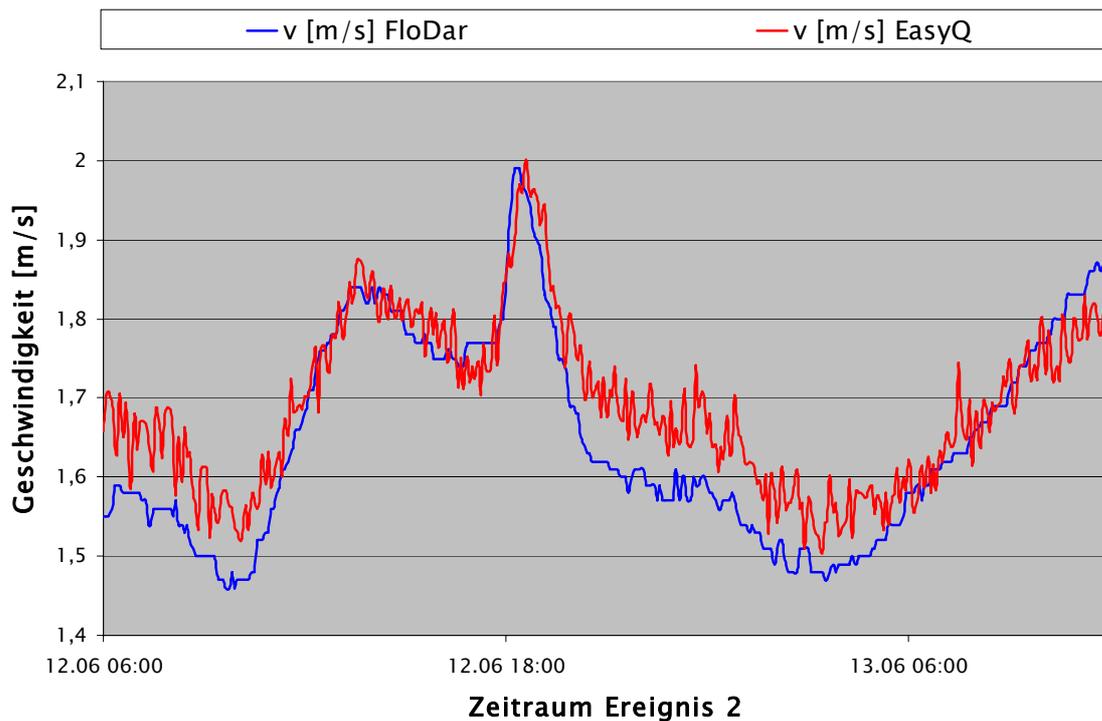


Abbildung 3-18: Geschwindigkeitsvergleich während des Ereignisses 2

Zuerst wurden die gemessenen Daten der einzelnen Messgeräte auf Plausibilität überprüft.

3.6.2.1 Überprüfung der Geschwindigkeitssensoren

Um zu prüfen, ob die gemessenen Geschwindigkeiten mit den vorhandenen Geschwindigkeiten übereinstimmen wurden direkte Vergleichsmessungen durchgeführt. Weiters wurde aus den Flügelmessungen die am jeweiligen Messort vorherrschende Geschwindigkeit der unterschiedlichen Messgeräte zurück gerechnet und den gemessenen Daten gegenübergestellt.

3.6.2.1.1 Direkte Überprüfung des FloDar

Um die vom FloDar gemessenen Geschwindigkeiten zu prüfen, wurden vom Techniker der Firma Utek G.m.b.H. mit einem kleinen mobilen magnetisch induktiven Geschwindigkeitsmesser oberflächennah Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Diese Vergleichsmessungen ergaben Abweichungen von maximal 1,5 %. Weiters wurde bei einigen Flügelmessungen mit der institutseigenen MID- Sonde Nautilus die ausgegebene Oberflächengeschwindigkeit des FloDar überprüft. Auch diese

Vergleichsmessungen ergaben eine sehr kleine Abweichung. Aus diesen Kontrollmessungen wurde abgeleitet, dass die von dem Radar gemessene Oberflächengeschwindigkeit der vorhandenen Oberflächengeschwindigkeit weitestgehend entspricht.

3.6.2.1.2 Indirekte Überprüfung des FloDar

Dabei wurde versucht, aus den bei den Flügelmessungen ermittelten Oberflächengeschwindigkeiten, die am Messort der Radarkeule herrschende Oberflächengeschwindigkeit zurückzurechnen. Dazu wurde zwischen den an den Messort der Radarkeule angrenzenden Messlotrechten interpoliert. Exemplarisch möchte ich das Vorgehen an dem Beispiel der Flügelmessung vom 22. Mai 2004 09:43 Uhr zeigen. Abbildung 3-19 verdeutlicht graphisch die gewählte Vorgangsweise.

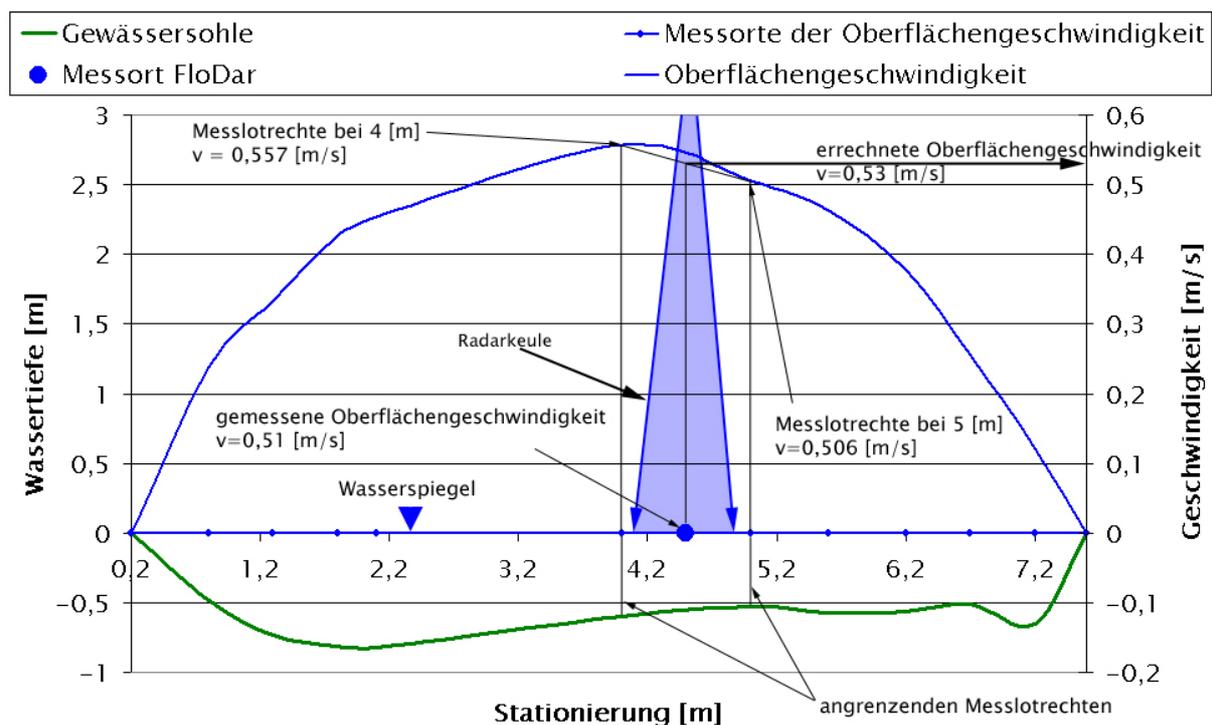


Abbildung 3-19: Auswertung der Flügelmessung für v- FloDar

Die Abbildung 3-19 zeigt den Messquerschnitt im Stainzbach zum Zeitpunkt einer Flügelmessung. Die grüne Linie stellt die Gewässersohle und die blaue Linie das angenäherte Oberflächengeschwindigkeitsprofil dar. Das um die Station 4,5 [m] angeordnete gleichschenklige hellblaue Dreieck deutet die

Radarkeule des FloDar an. Der darin auf dem Wasserspiegel liegende blaue Kreis stellt den Messort des FloDar dar. Bei der linken angrenzenden Messlotrechten wurden eine Stationierung von 4 [m] und eine oberflächennahe Geschwindigkeit von 0,557 [m/s] gemessen. Die rechte angrenzende Messlotrechte hat eine Station von 5 [m] und es herrschte zum Zeitpunkt der Flügelmessung eine oberflächennahe Geschwindigkeit von 0,506 [m/s]. Zwischen diesen beiden Messlotrechten wurde linear interpoliert und die Oberflächengeschwindigkeit im Messort des FloDar zu 0,532 [m/s] errechnet. Die vom FloDar zum Zeitpunkt der Flügelmessung aufgezeichnete Oberflächengeschwindigkeit betrug 0,51 [m/s]. Auch bei den anderen auf diesem Wege ausgewerteten Flügelmessungen unterschieden die aus der Flügelmessung ermittelte Oberflächengeschwindigkeit am Messort des FloDar nicht wesentlich von der FloDar- Messung. Die Tabelle 3-1 zeigt die Gegenüberstellung der ermittelten Daten mit den zur Verfügung stehenden Daten.

Zeitpunkt der Flügelmessung [TT.MM.JJJJ hh:mm]	Geschwindigkeit [m/s]		
	von FloDar gemessen	aus Flügelmessung errechnet	Abweichung [%]
05.05.2004 10:11	0,34	0,31	-9%
25.05.2004 09:43	0,51	0,53	-2%
21.06.2004 14:00	1,81	1,78	-2%

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten der zurückgerechneten Flügelmessungen und dem FloDar

Daraus wurde geschlossen, dass einerseits die vom FloDar gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten plausibel sind und andererseits das Verfahren zur Ermittlung der Oberflächengeschwindigkeit am Messort des FloDar für die Auswertung der Datensätze der FA19 hinreichend genaue Werte liefert.

3.6.2.1.3 Überprüfung EasyQ

Da der EasyQ wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, in drei Messfenstern misst und das Gerät die im jeweiligen Messfenster vorherrschende mittlere Geschwindigkeit ermittelt, konnte keine direkte Überprüfung der Geschwindigkeit durchgeführt werden

Es wurden jedoch versucht aus den im Messzeitraum des EasyQ durchgeführten Flügelmessungen die mittlere Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Flügelmessung in den drei Messfenstern des EasyQ zu errechnen. Da sich die einzelnen Messfenster überlappen wurden, sie zu einem zusammengefasst welches in Abbildung 3-20 als rot hinterlegte Fläche dargestellt ist. der mögliche Erfassungsbereich ist in Abbildung 3-20 durch die beiden roten Pfeile dargestellt Die roten Punkte zeigen die Messorte der Flügelmessungen in 38 % der Wassertiefe. Die Flügelmessungen in dieser Tiefe waren Teil der Durchflussermittlung nach Kreps.

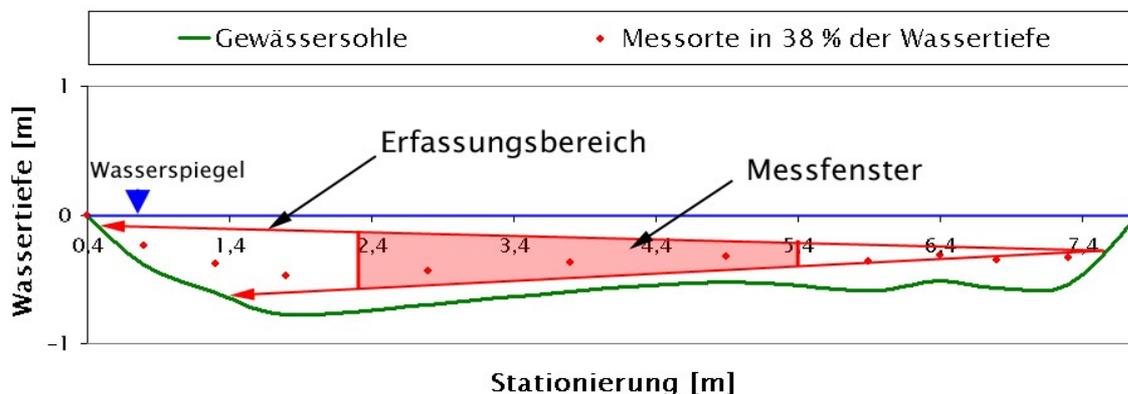


Abbildung 3-20: Erfassungsbereich und Messfenster des EasyQ

Die Vorgangsweise zur Ermittlung der mittleren Tiefengeschwindigkeit ist in Abbildung 3-21 gezeigt. Die roten Punkte stellen wieder die Messorte in 38 % der Fließtiefe dar und die rote Linie zeigt die angenäherte Geschwindigkeitsverteilung in dieser Tiefe. Es wurde jeder Messungen, innerhalb des Messfensters eine Einflussbreite b_i zugeordnet und mit dieser

das gewichtete Mittel über die Geschwindigkeiten v_i gebildet. Die errechnete

Geschwindigkeit ergibt sich somit aus der Formel
$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i * b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}.$$

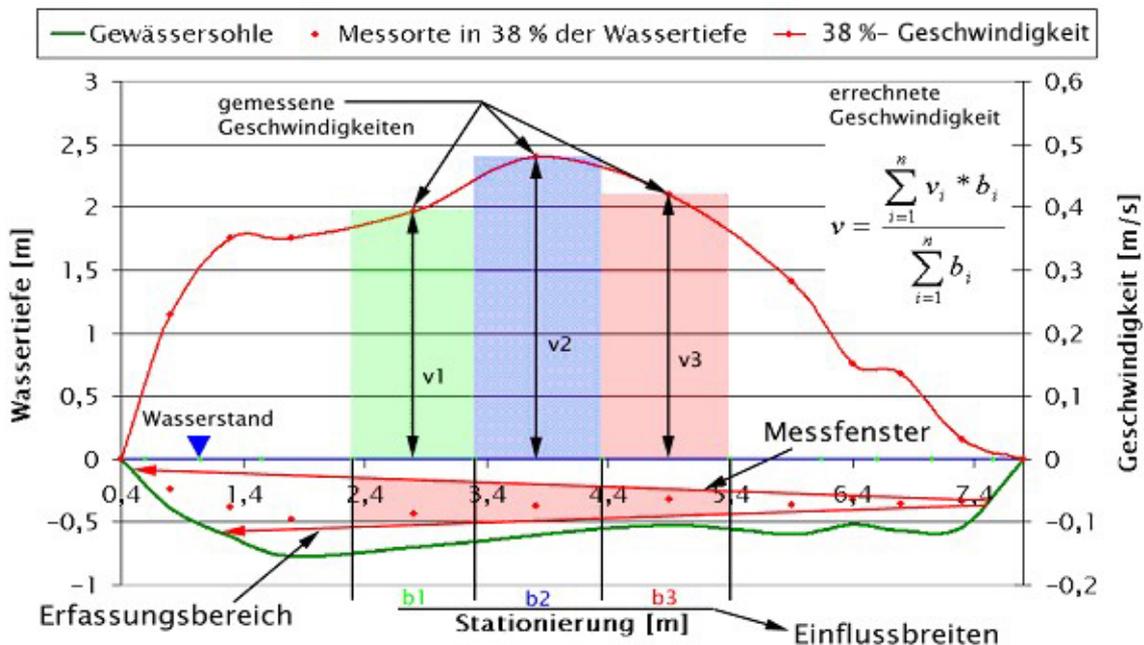


Abbildung 3-21: Auswertung der Flügelmessungen für v- EasyQ

Das grüne, blaue und rote Rechteck stellen das Produkt der gemessenen Geschwindigkeit mit der zugehörigen Einflussbreite und damit auch das Gewicht der einzelnen Messung am Mittelwert dar. Die vergleichbaren Daten sind in Tabelle 3-2 gegenübergestellt.

Zeitpunkt der Flügelmessung [TT.MM.JJJJ hh:mm]	Geschwindigkeit [m/s]		
	von EasyQ gemessen	aus Flügelmessung errechnet	Abweichung [%]
27.04.2004 10:28	0,45	0,43	-4 %
05.05.2004 10:11	0,38	0,32	-17 %
25.05.2004 09:43	0,52	0,51	-1 %

Tabelle 3-2: Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten der zurückgerechneten Flügelmessungen und dem EasyQ

Auf Grund der relativ guten Übereinstimmung der Geschwindigkeiten und der leider sehr geringen Datenmenge wurde angenommen, dass das Verfahren zur Ermittlung der Geschwindigkeit im zusammengefassten Messfenster des EasyQ hinreichend genau ist und , dass die vom EasyQ ausgegebenen Geschwindigkeiten mit der im zusammengefassten Messfenster vorherrschenden mittleren Geschwindigkeit weitestgehend übereinstimmt. Ab einem gewissen Wasserstand versagt dieses Verfahren jedoch, da die bei der Flügelmessung nach Krepss erhobenen 38%-Geschwindigkeiten nicht mehr in den Messfenstern des EasyQ liegen und daher eine richtige Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit im zusammengefassten Messfenster nicht mehr möglich ist. Dieser Effekt wurde allerdings bei den Auswertungen in den nächsten Kapiteln nicht berücksichtigt.

3.6.3 Kalibrierfaktor des Stainzbaches

Um zu verdeutlichen, warum man den Kalibrierfaktor benötigt, soll zunächst das Ereignis 2 genauer betrachtet werden. Die Abbildung 3-22 und die Abbildung 3-23 verdeutlichen bei beiden Messsystemen, dass beim Ansteigen des Wasserspiegels jeweils größere Geschwindigkeiten vorherrschen als beim Absinken. Dieser instationäre Effekt kann ohne die Kenntnis des k-Faktors erst im Nachhinein berücksichtigt werden. Der Faktor um den sich die Geschwindigkeit verändert beträgt zwischen 1,16 und 1,21. Dieser kann auch direkt auf den Durchfluss umgelegt werden. Das heißt, dass bei gleichen Wasserständen der Durchfluss um 20 % schwanken kann.

Die offensichtliche Fehlmessung des EasyQ zu Beginn des Ereignisses (Abbildung 3-23) wurde nicht in diesen Faktor miteinbezogen.

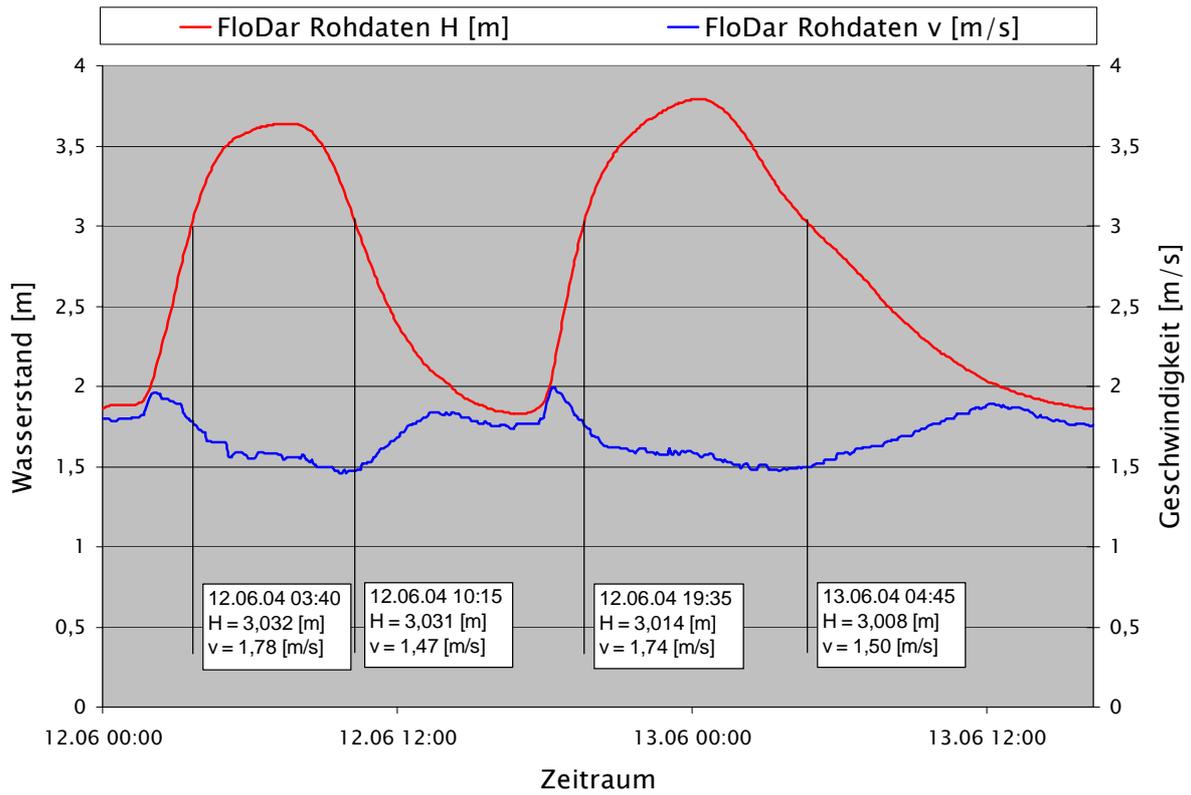


Abbildung 3-22: Ereignisauswertung FloDar

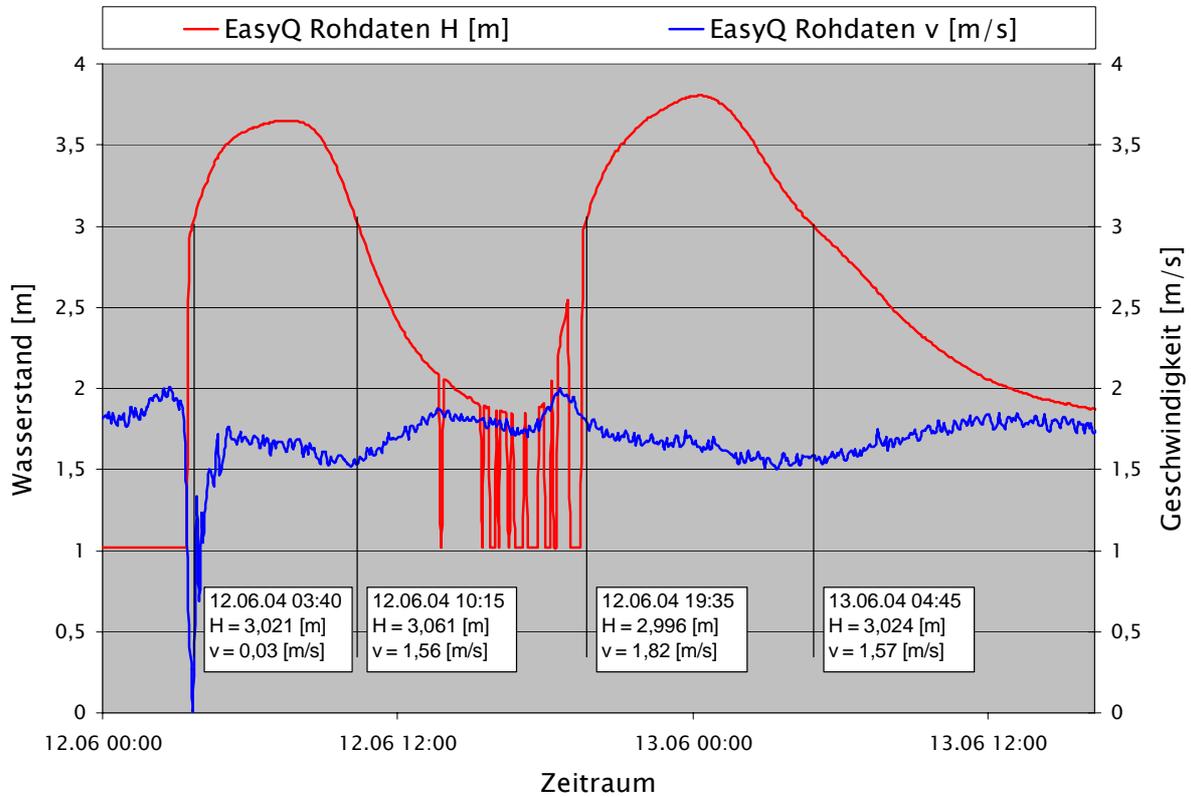


Abbildung 3-23: Ereignisauswertung EasyQ

3.6.3.1 Durchflussvergleich

Wie in Kapitel 2.1.1 gezeigt wurde, errechnet sich der Durchfluss mit der Formel $Q = A * v_{mess} * k$. Die Messgeräte ermitteln aus der gemessenen Pegelhöhe über den in Abbildung 3-14 dargestellten Pegel-Querschnittszusammenhang die durchflossene Querschnittsfläche. Die firmenseitige Grundeinstellung des FloDar beinhaltet einen über die Pegelhöhe konstanten k- Faktor von $k=0,85$. Daher errechnete der FLoDar den Durchfluss mit der Formel $Q_{FloDar} = v_{FloDar} * A(H) * 0,85$. Der voreingestellte Kalibrierfaktor des EasyQ beträgt $k=1,0$, woraus sich der Durchfluss somit mit der Formel $Q_{EasyQ} = v_{EasyQ} * A(H) * 1,0$ errechnet.

Abbildung 3-24 zeigt, dass die von den installierten Durchflussmessgeräten aufgezeichneten Durchflüsse sehr gut miteinander und mit den durch die Flügelmessungen ermittelten Durchflüssen korrelieren.

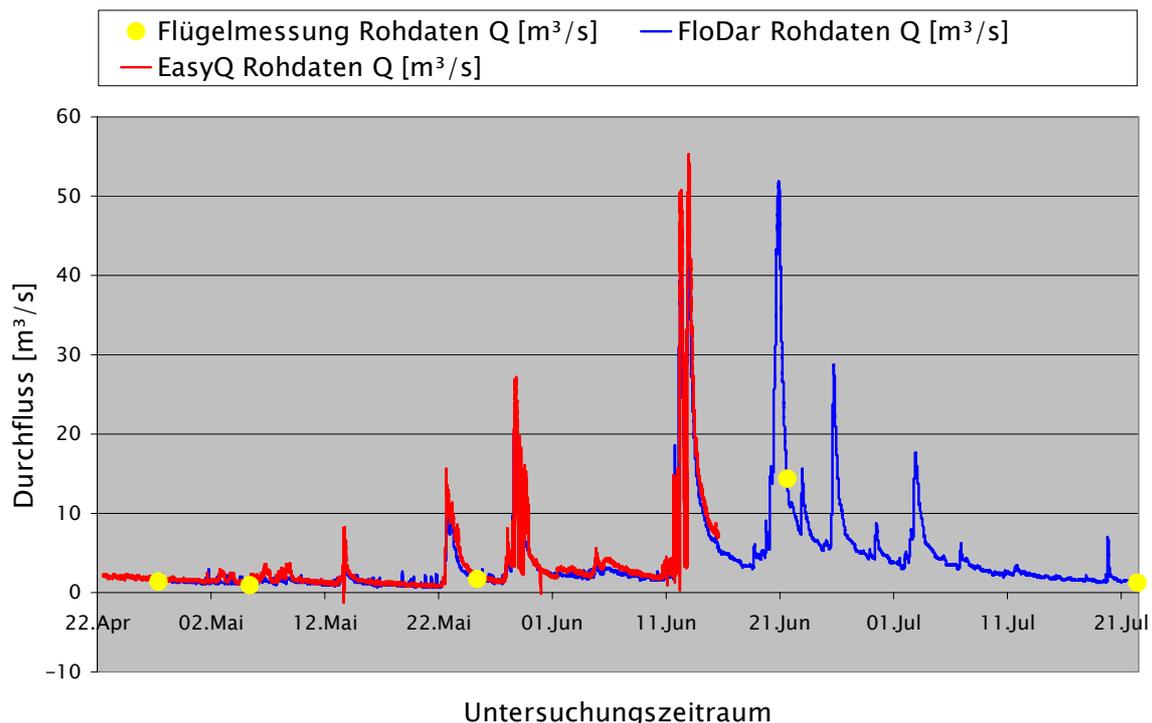


Abbildung 3-24: Durchflussvergleich über den Untersuchungszeitraum

Um die aus Abbildung 3-24 nicht ersichtliche Differenz zwischen den einzelnen gemessenen Durchflüssen besser zeigen zu können, wird das in Abbildung 3-12 gekennzeichnetes Ereignis 2 näher betrachtet und in

Abbildung 3-25 dargestellt. Die rote Kurve entspricht der Durchflussganglinie des EasyQ. Die Durchflussganglinie des FloDar ist blau dargestellt. Die gelbe Linie stellt die auf Basis des Pegelschlüssels der FA19 ermittelte Durchflussganglinie dar.

Auffallend dabei ist, dass die gemessenen Durchflüsse des EasyQs bedeutend höher waren als die Durchflüsse des FloDars, ein Phänomen, das man nach den Gesetzen der Hydraulik nicht unbedingt erwartet hätte und sich auch bereits im Geschwindigkeitsvergleich in Abbildung 3-18 gezeigt hat. Bei einem laminaren Strömungsbild geht man nämlich von einem parabelförmigen Geschwindigkeitsverlauf und einer maximalen Geschwindigkeit an der Oberfläche aus. Dieses Phänomen, dass am Stainzbach die Oberflächengeschwindigkeiten zumeist geringer sind als z.B. die 38%-Geschwindigkeiten bei den Flügelmessungen, wurde auch durch unsere selbst durchgeführten Flügelmessungen immer wieder bestätigt.

Letztendlich ist dies jedoch sicherlich ein Hinweis dafür, dass das Strömungsbild am Messquerschnitt eben nicht rein laminar ist und sicherlich durch die Gerinnegeometrie und durch Sekundärströmungen bedingt beeinträchtigt ist, was zu diesen Phänomenen führt.

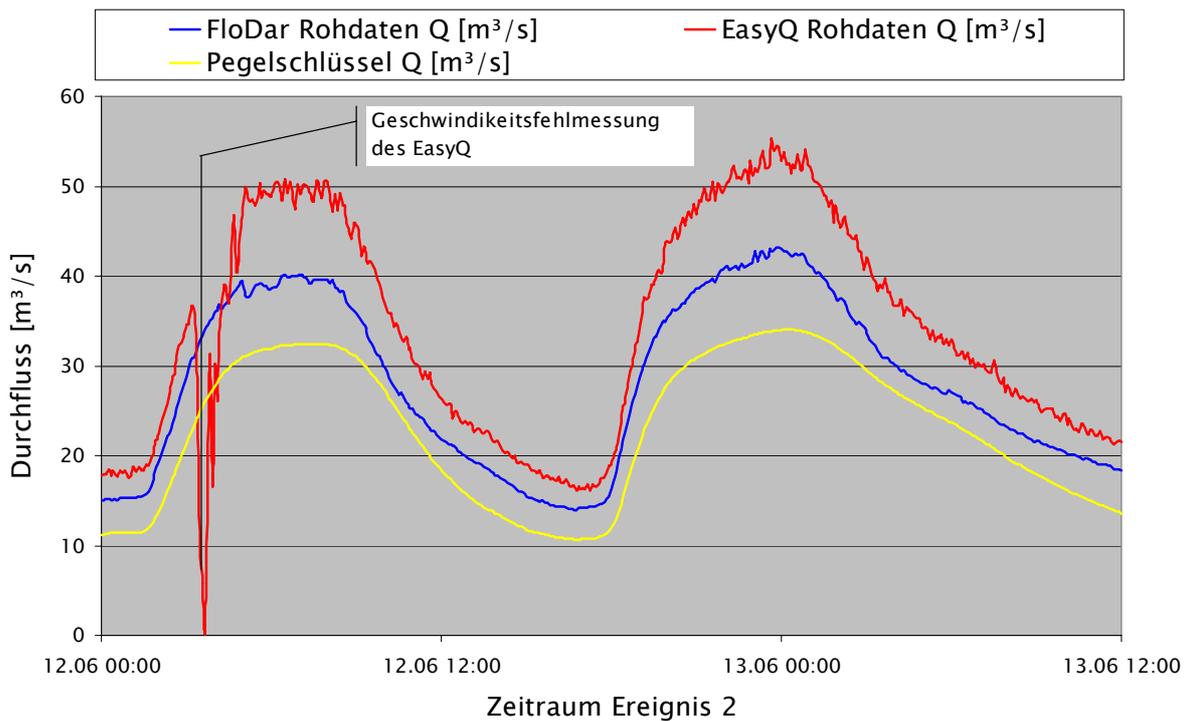


Abbildung 3-25: Durchflussvergleich während des Ereignisses 2

Die aus den Flügelmessungen ermittelten Durchflüsse sind in Tabelle 3-3 den von den eingesetzten Messgeräten aufgezeichneten Durchflüsse gegenübergestellt.

Zeitpunkt der Messung [TT.MM.JJJJ hh:mm]	Durchfluss [m³/s]		
	Flügelmessung	FloDar	EasyQ
27.04.2004 10:28	1,332	-*	1,788
05.05.2004 10:11	0,936	1,149	1,392
25.05.2004 09:43	1,728	1,909	2,174
21.06.2004 14:00	14,440	15,787	-*
22.07.2004 10:03	1,24	-*	-*

Tabelle 3-3: Gegenüberstellung der Durchflüsse

* kein Messsystem vorhanden

In den folgenden Kapiteln wurde versucht, mittels mehrerer Kalibrierfunktionen die Durchflussganglinien aneinander anzugleichen. Weiters wurde versucht, die Differenz zwischen dem durch die Flügelmessung ermittelten Durchfluss und dem durch die Messgeräte ermittelten Durchfluss zu minimieren.

3.6.3.2 k- Faktor EasyQ

Die einzelnen Kalibrierfaktoren $k = \frac{\bar{v}}{v_{mess}}$ wurden einerseits aus den selbst durchgeführten Flügelmessungen und andererseits aus den durch das in Kapitel 3.6.2.1.3 beschriebene Verfahren errechneten Geschwindigkeiten ermittelt. In Abbildung 3-26 sind die Kalibrierfaktoren in Abhängigkeit vom Pegelstand dargestellt. Die aus den eigenen Flügelmessungen ermittelten k-Faktoren sind als grüne Punkte eingetragen. Die aus den zurückgerechneten Geschwindigkeiten ermittelten Kalibrierfaktoren wurden durch rote Punkte dargestellt. Auf Grund der geringen Datenmenge und des regelmäßigen Profils wurde angenommen, dass der k-Faktor über den Pegelstand konstant ist. Legt man allen ermittelten k-Faktoren eine Normalverteilung zu Grunde, ergibt sich bei einer Standardabweichung von 0,12 [-], ein Mittelwert von 0,86 [-]. Der Median der ermittelten k-Faktoren beträgt ebenso 0,86 [-]. Für die weiteren Auswertungen wurde daher für den EasyQ ein Kalibrierfaktor von 0,86 [-] mit einem Schwankungsbereich von $\pm 0,12$ [-] angenommen.

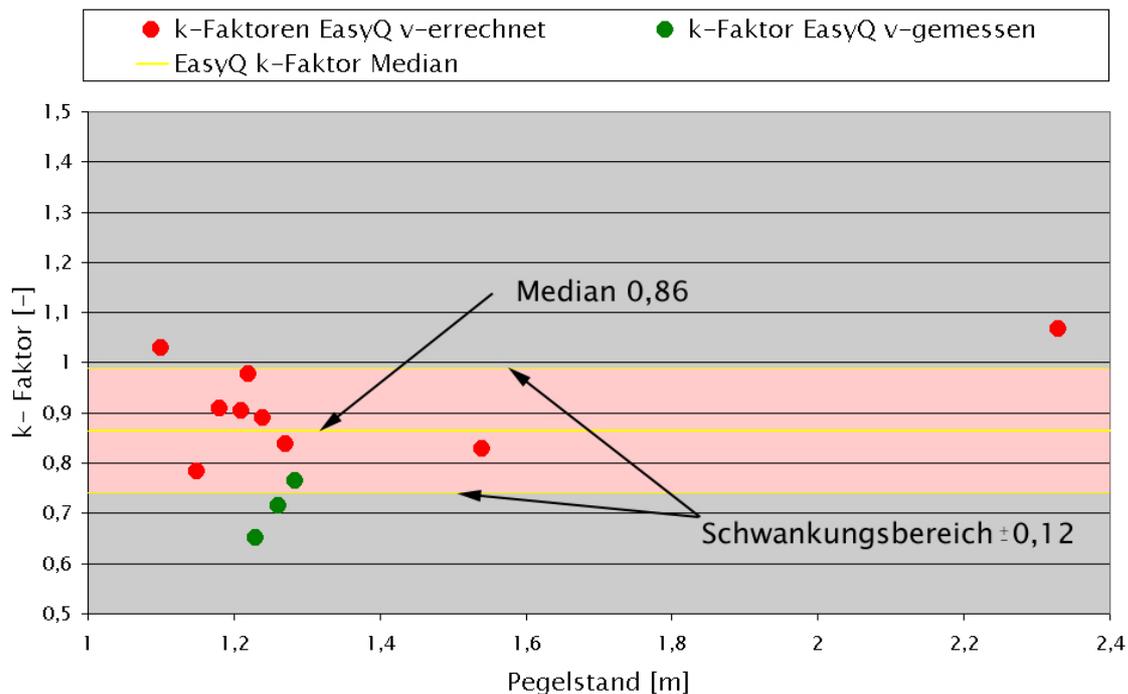


Abbildung 3-26: Kalibrierfaktor k für den EasyQ

Die erhaltene Kalibrierfunktion wird anschließend in Kapitel 3.6.3.4 überprüft, indem die mit der Kalibrierfunktion korrigierten Durchflussganglinien miteinander verglichen werden.

3.6.3.3 k- Faktor FloDar

Auch für den FloDar wurde auf die gleiche Art und Weise eine Kalibrierfunktion ermittelt. Die daraus sich ergebenden k- Faktoren sind in Abbildung 3-27 über dem zugehörigen Pegelstand aufgetragen. Bei den in Abbildung 3-27 in grünen dargestellten Punkten handelt es sich um die Kalibrierfaktoren, die aus den selbst durchgeführten Flügelmessungen ermittelt wurden. Die aus den zur Verfügung gestellten Datensätzen der FA19 ermittelten k- Faktoren sind in Abbildung 3-27 als blaue Punkte dargestellt. Dabei ergab sich beim FloDar unter Ausklammerung eines Ausreißers im untersuchten Wasserstandsbereich eine weitestgehende Wasserstandsunabhängigkeit für den k-Faktor. Legt man den ermittelten k-Faktoren wieder eine Normalverteilung zu Grunde, so ergibt sich beim FloDar ein Mittelwert von 0,68 [-] und eine Standardabweichung von 0,05 [-]. Auch der Median hat mit 0,68 [-] denselben Wert wie der Mittelwert. Für die

weiteren Auswertungen wurde daher für den FloDar ein Kalibrierfaktor von 0,68 [-] mit einem Schwankungsbereich von $\pm 0,05$ [-] angenommen.

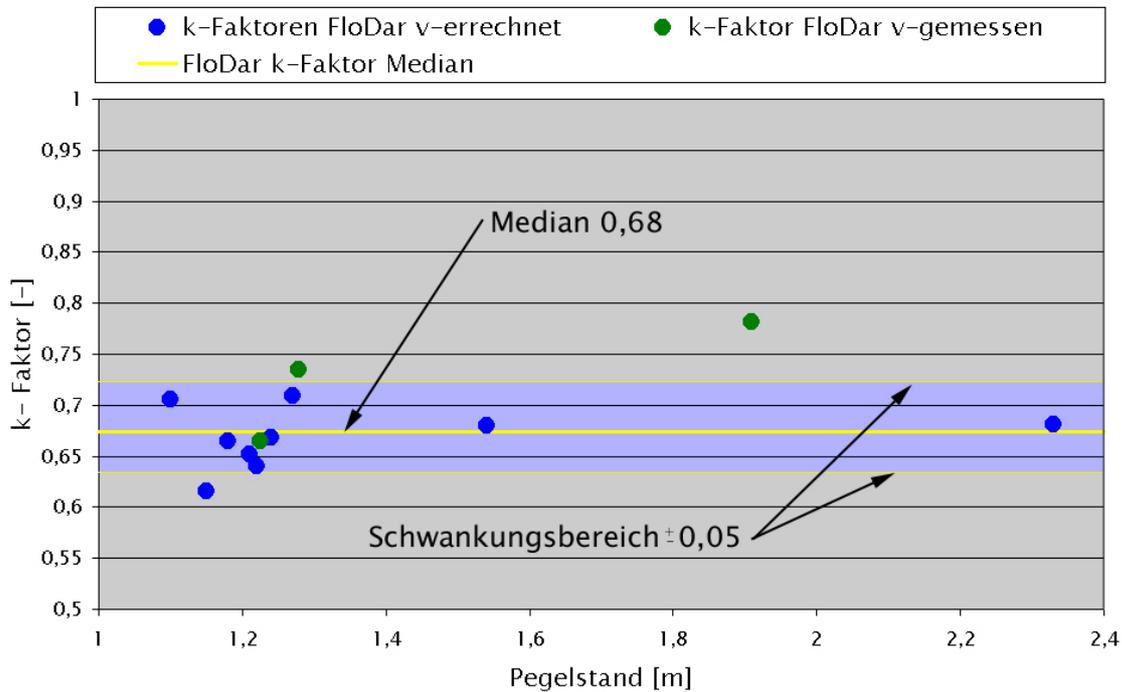


Abbildung 3-27: Kalibrierfaktor k für den FloDar

3.6.3.4 Korrektur der Durchflüsse mittels der erhaltenen Kalibrierfaktoren

In Tabelle 3-4 sind die mit den Schwankungsbereichen der jeweiligen Kalibrierfaktoren korrigierten Durchflüsse den aus den Flügelmessungen resultierenden Durchflüssen gegenübergestellt.

Flügelmessung		EasyQ		FloDar	
Rohdaten		korrigierte Durchflüsse Q [m ³ /s]		korrigierte Durchflüsse Q [m ³ /s]	
Zeit	Q [m ³ /s]	von	bis	von	bis
27.April 10:28	1,332	1,248	1,668	-	-
05.Mai 10:11	0,936	1,031	1,378	0,851	0,972
25.Mai 09:43	1,728	1,610	2,151	1,409	1,609
21.Juni 14:00	14,440	-	-	11,697	13,354

Tabelle 3-4: Gegenüberstellung der Durchflüsse aus den Flügelmessungen und den korrigierten Durchflüssen

In Tabelle 3-5 und in Tabelle 3-6 sind die relativen Differenzen der Durchflüsse vor und nach der Anwendung der ermittelten Kalibrierfaktoren dargestellt.

Flügelmessungen		relative Durchflussdifferenz	relative Differenzen nach Kalibration	
Zeit	Q [m ³ /s]	Rohdaten EasyQ	von	bis
27.April 10:28	1,332	34%	-6%	25%
05.Mai 10:11	0,936	49%	10%	47%
25.Mai 09:43	1,728	26%	-7%	25%

Tabelle 3-5: Relative Differenzen der EasyQ- Daten vor und nach der Kalibration

Damit konnten die relativen Differenzen des EasyQs zu den Flügeldaten deutlich reduziert werden. Die Messungen vom 27. April 2004 und vom 25. Mai 2004 liegen sogar innerhalb des Schwankungsbereiches des k-Faktors.

Mit den Flügelmessungen noch besser überein, stimmen die mit dem k-Faktor korrigierten Durchflüsse des FloDars (Tabelle 3-6).

Flügelmessungen		relative Durchflussdifferenz	relative Differenzen nach Kalibration	
Zeit	Q [m ³ /s]	Rohdaten FloDar	von	bis
27.April 10:28	1,332	34%	-9%	4%
05.Mai 10:11	0,936	49%	-18%	-7%
25.Mai 09:43	1,728	26%	-19%	-8%

Tabelle 3-6: Relative Differenzen der FLoDar- Daten vor und nach der Kalibration

Die bessere Übereinstimmung der Korrektur der FloDar- Durchflüsse mit den Flügelmessungen ist sicherlich darauf zurückzuführen, dass das Rückrechnungsverfahren mit den Datensätzen der FA19 insbesondere bei größeren Wasserständen, wie schon in Kapitel 3.6.2.1.3 erläutert, unsicherer wird, da die höheren Wasserschichten vom EasyQ nicht mehr erfasst

werden. Dies kommt auch in der deutlich größeren Schwankungsbreite der auf den EasyQ -Messungen basierenden k-Faktoren -Ermittlung zum Ausdruck.

Abbildung 3-28 zeigt die mit den zugehörigen Kalibrierfaktoren korrigierten Durchflussganglinien während des Ereignisses 2. Bei den beiden Durchflussganglinien der Geschwindigkeitsmessgeräte ist jeweils der sich aus der Unsicherheit bei der Bestimmung der k-Faktoren ergebende Schwankungsbereich der Durchflüsse dargestellt. Die in Abbildung 3-28 gelb dargestellte Linie entspricht den aus dem Pegelschlüssel für den Messquerschnitt ermittelten Durchflüssen. Die korrigierte Ganglinie des FLoDars deckt sich sogar nahezu mit der Pegelschlüsselganglinie. Die durch den EasyQ ermittelten Durchflüsse unterscheiden sich hingegen doch deutlich von den anderen beiden Ganglinien, was auf eine unbefriedigende Kalibrationsfunktion schließen lässt.

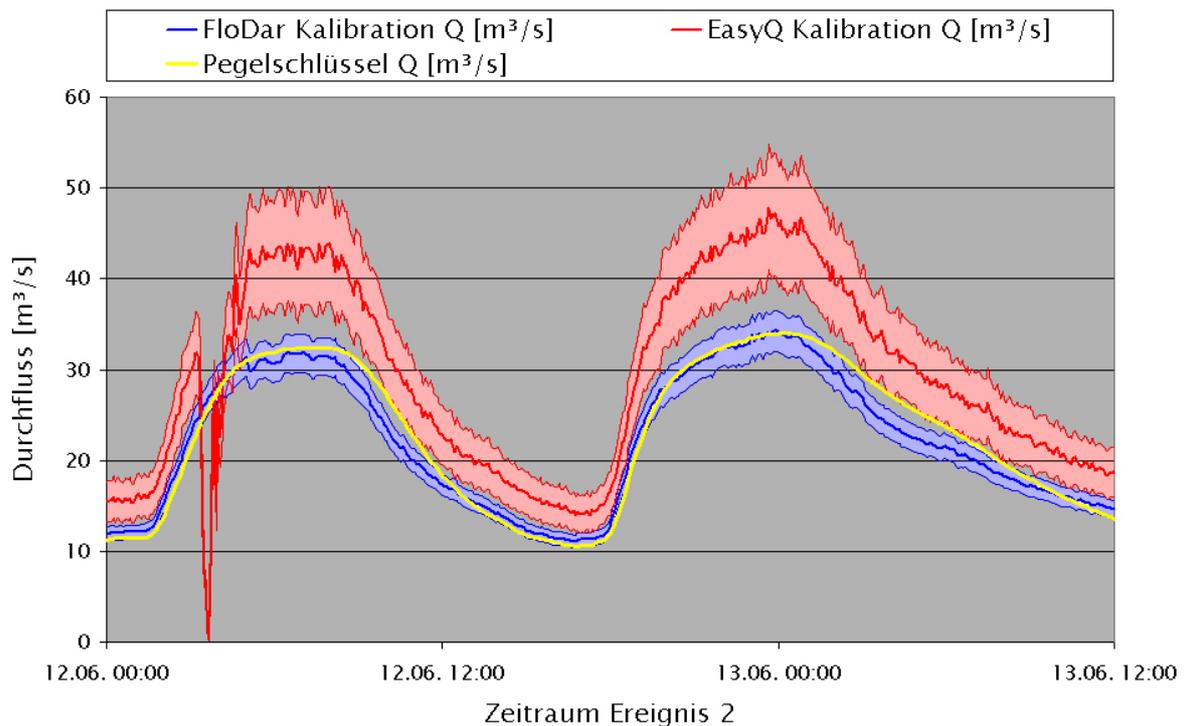


Abbildung 3-28: Vergleich der korrigierten Durchflüsse während des Ereignisses 2

Mit Abbildung 3-29 wird nochmals der große Vorteil der Geschwindigkeitsmessung bei der Echtzeit- Durchflussermittlung gegenüber

einer herkömmlichen Pegelschlüsselauswertung verdeutlicht. Die durch die roten Pfeile in Abbildung 3-29 markierten Abweichungen im Bereich der abfallenden Durchflusswellen resultieren daraus, dass der Pegelschlüssel die in diesem Bereich auftretenden Hysteresiseffekte (unterschiedliche Durchflüsse bei denselben Wasserständen) nicht erfassen kann, wohingegen die auf den Geschwindigkeitsmessungen des FloDars basierende Durchflussganglinie die tatsächlich auftretenden Abflüsse im Gewässer sehr gut abbilden kann.

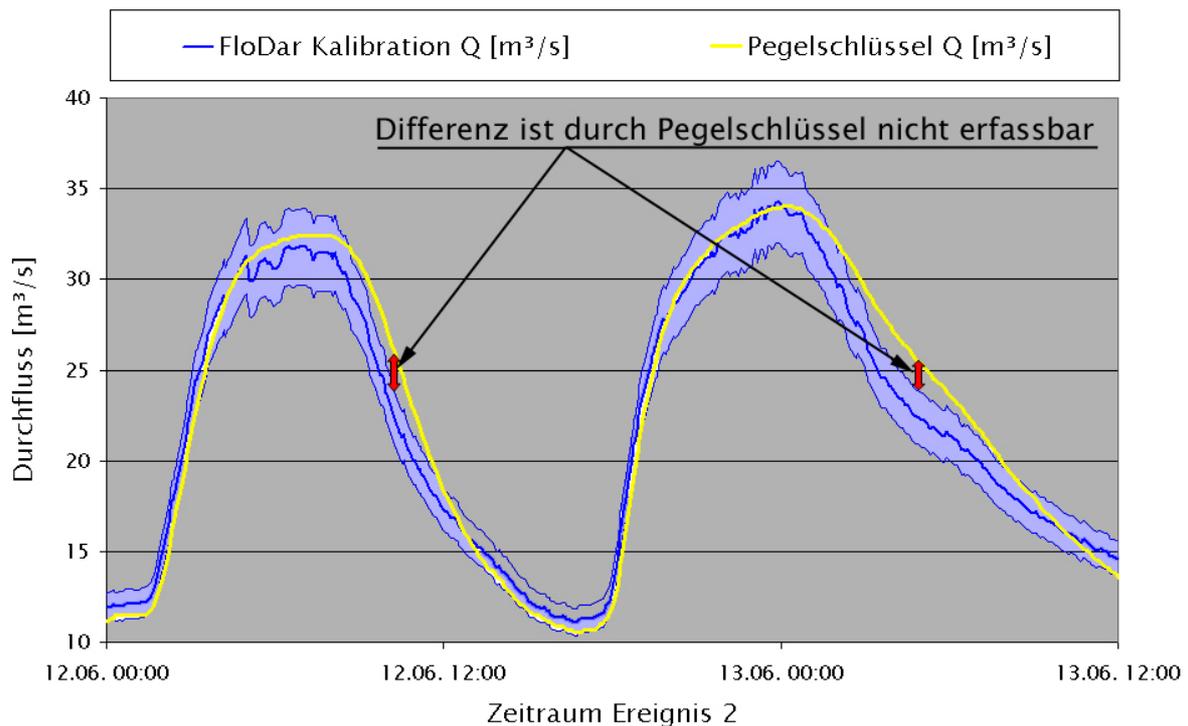


Abbildung 3-29: Vergleich der korrigierten FloDar- Ganglinie und der Pegelschlüsselganglinie

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Als Zusammenfassung und als Ergebnis bzw. als Erkenntnis der Messreihe am Stainzbach kann festgehalten werden, dass die Messsysteme bis auf das Sommer- Messsystem einwandfrei funktioniert haben. Der von der Firma Sommer zur Verfügung gestellte Prototyp war im untersuchten Messquerschnitt zum Zeitpunkt der durchgeführten Vergleichsmessungen noch nicht in der Lage die Oberflächengeschwindigkeit plausibel zu messen.

Eine in der Zwischenzeit durchgeführte Weiterentwicklung des Auswertalgorithmus scheint jedoch sehr viel versprechend zu sein.

Auf Basis selbst durchgeführter Flügelmessungen und auf Basis von der Fachabteilung 19A der steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellter Datensätze wurde für die zum Einsatz gekommenen Geschwindigkeitsmesssysteme versucht, die Kalibrierfaktoren zu ermitteln. Dafür mussten aus den zur Verfügung gestellten Datensätzen die Geschwindigkeiten an den Messorten der Geschwindigkeitsmesssysteme zurückgerechnet werden, was insbesondere beim EasyQ nicht ganz einfach war, da er einen großen Querschnittsbereich für seine Messungen erfasst, wohingegen der FloDar nur einen Teil der Oberflächengeschwindigkeit aufnimmt. Dies mag wahrscheinlich auch einer der Gründe dafür sein, dass der ermittelte k-Faktor für den EasyQ keine so gute Übereinstimmung mit der Pegelschlüsselkurve während eines ausgewerteten Abflussereignisses zeigte wie der FloDar und zu dem auch stärker streute.

Letztendlich konnte bei der Auswertung des Abflussereignisses zwischen dem 12. und 13. Juni 2004 aber auch der große Vorteil der auf Geschwindigkeitsmessungen beruhenden Durchflussmessmethoden gegenüber herkömmlichen Pegelschlüsseln gezeigt werden, da sie die tatsächlichen Abflussvorgänge im Gewässer einfach realitätsnäher darstellen und so z.B. auch den bei fallendem Wasserspiegel tatsächlich stattfindenden Hysteresiseffekt (unterschiedliche Durchflüsse bei gleichem Wasserstand) erfassen.

4 Kanal- Monitoring - Messstation Graz

In Graz wird von Seiten des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau seit Oktober 2002 eine Online-Messstation an einem Mischwasserüberlauf betrieben. Hauptziel dieser Station ist neben der Erfassung der Häufigkeit und Dauer von Entlastungsereignissen in den Vorfluter Mur die Online- Erfassung von abgeschlagenen Schmutzfrachten.

4.1 Allgemeiner Aufbau der Messstation

Einer der inhaltlichen Schwerpunkte des IMW – Projektes bezüglich der Messtechnik war es, eine modulare Messstation zu entwickeln, welche an unterschiedlichen wasserwirtschaftlichen Themenstellungen einsetzbar ist. Eine Übersicht über die installierten Mess- bzw. Überwachungssysteme Messstation Graz zeigt die Abbildung 4-1.

Das Herzstück der Station ist ein direkt im Abwasserstrom in einem schwimmenden Ponton eingebauter Multi- Spektrometer. Dieser bestimmt mit Hilfe von Absorptionsmessungen Äquivalenzkonzentrationen von Summenparametern wie z.B. den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) oder die abfiltrierbaren Stoffe (AFS). Neben der Konzentrationsmessung müssen für die Frachtermittlung auch Abflussmengen erfasst werden. Dies geschieht mit einer Durchflussmessung vor der Mischwasserentlastung und einer zweiten im Entlastungskanal.

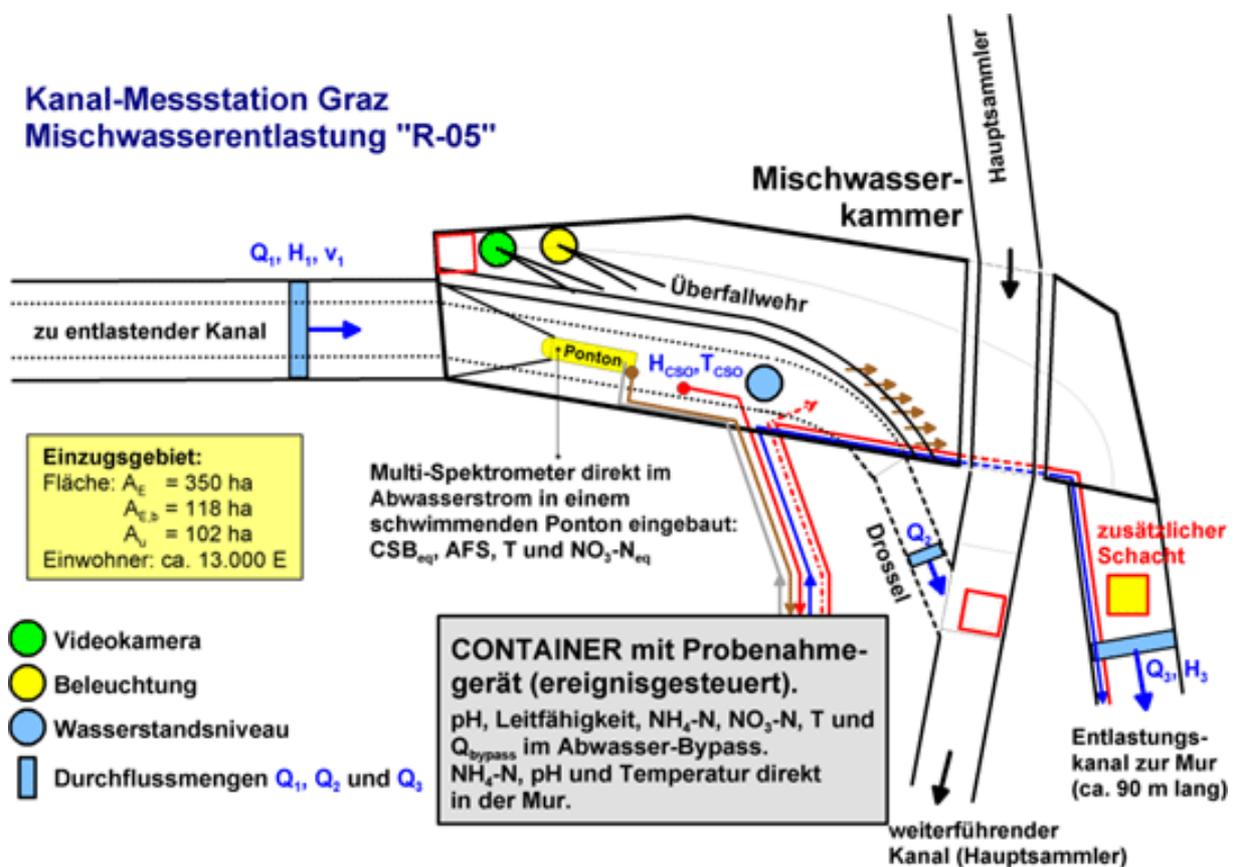


Abbildung 4-1: Übersicht über die Mess- und Überwachungssysteme in der Kanal-Monitoring-Messstation Graz (Gruber et al., 2003)

4.2 Untersuchungsprogramm

Die stationären Durchflussmessgeräte, die im Rahmen des IMW Projektes in der Messstation Graz installiert wurden, sollten im Rahmen dieser Arbeit kalibriert werden. Weiters sollte eine nachfolgende Justierung vorbereitet und auch durchgeführt werden. Dazu wurden insgesamt drei Messkampagnen durchgeführt. Bei der ersten Kampagne wurde eine 24h-Trockenwetterganglinie aufgenommen, bei der vier verschiedene Messverfahren eingesetzt wurden. Die zweite Messkampagne zielte darauf ab, während eines Entlastungsereignisses das Messsystem im Entlastungsgerinne zu kalibrieren. Hierfür konnte als Vergleichsmessung jedoch nur eine Tracermessung verwendet werden. Die dritte Messkampagne wurde nach dem Austausch des Messsystems im Zulaufkanal durchgeführt und diente auch der Validierung der Ergebnisse der ersten Messkampagne.

4.3 Stationäre Messgeräte

Zur Ermittlung des Zuflusses zur Messstation, in Abbildung 4-1 als Q_1 bezeichnet, ist im Zulaufkanal ein FloDar der Firma Marsh McBirney eingebaut. Dieses Gerät bedient sich des Radarmessverfahrens, welches bereits im Kapitel 2.1.2.4 beschrieben wurde. Im Entlastungsgerinne befindet sich ein OCM Pro der Firma Nivus, der im Falle von Entlastungsereignis den abgeschlagenen Durchfluss Q_3 misst. Hierbei handelt es sich um eine Kanalmaus, welche die mittlere Fließgeschwindigkeit im erfassten Messfenster mittels Ultraschallkreuzkorrelation bestimmt und mit einer externen Ultraschalllaufzeitsonde den Wasserstand und damit die durchflossene Querschnittsfläche bestimmt.

4.4 Eingesetzte Messverfahren zur Kalibration

4.4.1 MID-Sonde Nautilus

Diese Sonde bedient sich des magnetisch induktiven Messprinzips (siehe Kapitel 2.1.2.2).

4.4.1.1 Situierung der Sonde

Anfänglich haben wir versucht, eine Durchflussmessung nach dem Verfahren von Kreps durchzuführen. Die Dauer für eine Messung überstieg jedoch schließlich mit 19 Minuten den dafür vorgesehenen Zeitrahmen deutlich. Deshalb haben wir uns darauf beschränkt, den Wasserstand und die Geschwindigkeit in Gerinnemitte zu erfassen. Um sicherzustellen, dass die Geschwindigkeit immer an derselben Stelle gemessen wird, haben wir ein Formrohr über dem Gerinne montiert und konnten damit die Sonde im Abwasserstrom fixieren.



Abbildung 4-2: Montage und Situierung der MID-Sonde

4.4.1.2 Aufzeichnungen der Vergleichsmessung

Die Geschwindigkeit und der Wasserstand wurden zu bestimmten Zeiten abgelesen und handschriftlich mitprotokolliert.

4.4.1.3 Aufgetretene Probleme

Die Messung des Wasserstandes wurde händisch mit einem Meterstab vorgenommen, der bei geringfügigen aber nicht erkennbaren Schiefstellungen des Messinstruments bereits einen erheblichen Fehler zur Folge hatte. Weiters gab das Gerät wegen einer zu schwachen Stromversorgung einen viel zu großen Wert für die gemessene Geschwindigkeit aus. Außerdem verfangen sich permanent WC-Papierfetzen und andere Toilettartikel am Messgerät, was die Messung ebenfalls stark beeinträchtigte. Aus den oben genannten Gründen wurde die Messung am 31. April schließlich um 17:30 abgebrochen, weil im Rohabwasser und an dieser Messstelle damit einfach keine plausiblen Vergleichsmessungen zu erzielen waren.

4.4.2 Q-Logger

4.4.2.1 Beschreibung des Messsystems

Der Q-Logger basiert auf dem Ultraschall- Doppler- Verfahren, welches die Geschwindigkeit auf Basis der Dopplerverschiebung ermittelt. Die Geschwindigkeit wird dabei nicht in einem einzelnen Punkt, sondern in einer schrägen „Messkeule“ vor dem Sensor erhoben. Die Fließtiefe wird mit einem

integrierten Drucksensor gemessen, der jedoch die Schwankungen des umgebenden Luftdruckes nicht kompensiert. Der in Kapitel 2.1.2.3 beschriebene Effekt der Wasserstandsabhängigkeit vom Luftdruck konnte jedoch nicht beobachtet werden, da während der Messkampagne sehr stabile Wetterbedingungen herrschten.

4.4.2.2 Situierung der Sonde

Die Sonde wurde mit einem dafür vorbereiteten Stahlgewicht an der Gerinnesohle so fixiert, dass sie sich im selben Messquerschnitt wie der darüber am First des Kanals eingebaute FloDar befand.



Abbildung 4-3: Situierung der Q- Loggers

4.4.2.3 Datenaufzeichnung

Die gemessenen Daten des Sensors wurden im angeschlossenen Datenlogger (Abbildung 4-4) aufgezeichnet. Dieser musste mit externer Stromversorgung betrieben werden, da das integrierte Akku-System bereits sehr schwach war.



Abbildung 4-4: Datenlogger und Energieversorgung des Q- Loggers

4.4.2.4 Aufgetretene Probleme

Auch an diesem Messsystem verfiel sich am Daten- und Stromkabel immer wieder WC-Papier, was jedoch die Messung nicht beeinträchtigte, da diese Verzopfungen während der Vergleichsmessungen ständig entfernt wurden.

4.4.2.5 Betriebserfahrungen

Der Q-Logger ist ein sehr gutes und handliches Messsystem, welches sich für den mobilen und temporären Einsatz ausgezeichnet eignet. Allerdings muss bei sensiblen Wasserstands- Querschnitts- Zusammenhängen auf den Luftdruck geachtet werden, da sonst zu große bzw. zu kleine Durchflussquerschnitte zur Ermittlung des Abflusses herangezogen werden.

4.4.3 Speisesalz als Tracer

Dieses Verfahren kommt normalerweise nur an kleinen, sehr turbulenten und schwer zugänglichen Gewässern zum Einsatz. In dieser Arbeit wurde jedoch versucht, unter Verwendung von Speisesalz als Tracer Durchflüsse im Kanal zu messen.

4.4.3.1 Beschreibung der Tracerversuche

Circa 20 Minuten nach jeder vollen Stunde wurden eine oder zwei Tracermessungen durchgeführt. Die Salzzugabemenge wurde dabei so gewählt, dass der obere Messbereich der Leitfähigkeitssonde (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) durch die Zugabe nicht überschritten wurde. Dafür sollte der erforderliche Tracereintrag zwischen drei und acht Gramm Salz je Liter pro Sekunde betragen. Der maximale durch Tracerzugabe aufgezeichnete Durchfluss betrug 65,3 [l/s] und der minimale Durchfluss 10,0 [l/s]. Die Zugabemenge wurde schließlich einheitlich mit 100 [g] für jede Messung gewählt woraus sich keinen Messbereichsüberschreitungen ergaben. Um von der Leitfähigkeit des Abwassers auf die Salzkonzentration schließen zu können, wurde vor jeder Messung mittels eines so genannten Aufstockversuchs der für diesen Leitfähigkeitsbereich lineare Leitfähigkeits- Salzkonzentrations-Zusammenhang ermittelt.

Anschließend positionierten wir die Sonde im Abwasserstrom und starteten die Leitfähigkeitsaufzeichnung. Um eine vollständige Durchmischung der Salzlösung mit dem Abwasser zu erzielen, wurde die Impfung ca. 40 Meter von der Leitfähigkeitsmessstelle entfernt vorgenommen. Die Dauer des Tracerdurchganges betrug vom ersten merklichen Leitfähigkeitsanstieg bis zum Rückgang auf die Hintergrundleitfähigkeit ca. 40 Sekunden. Da die Hintergrundbelastung im Kanal sehr stark schwankte, musste bei fast allen Messungen eine Korrektur vorgenommen werden. Dies geschah indem der Verlauf der Leitfähigkeit um die Schwankung der Grundbelastung verändert wurde. Die genaue Vorgangsweise wird im Kapitel 4.4.3.5 näher beschrieben. Die korrigierten Ergebnisse der Messkampagne I werden mit den Ergebnissen der anderen Messverfahren im Kapitel 4.5.3 verglichen.

4.4.3.2 Situierung der Sonde

Die Leitfähigkeitssonde wurde in Gerinnemitte situiert und so an einem Formrohr montiert, dass sie frei hängend in den Abwasserstrom eintauchen konnte. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Messelektroden ständig

im Abwasserstrom befanden und dass ein Verzopfen mit Toiletteartikel so gut wie möglich hinten gehalten werden konnte.



Abbildung 4-5: Montage der Leitfähigkeitssonde in der Trockenwetterrinne des Mischwasserkanals

4.4.3.3 Datenaufzeichnung

Die Aufzeichnung der Leitfähigkeit erfolgte mit einem Datenlogger der Firma Sommer in Sekundenabständen. Dieser wurde nach jeder vierten Tracermessung ausgelesen, um einen Datenverlust zu verhindern. Die Daten wurden kontrolliert und erforderlichenfalls korrigiert (siehe dazu Kapitel 4.4.3.5). Die vom Datenlogger nach der Beendigung der Aufzeichnungen ausgegebenen Ergebnisse wurden auch händisch mitprotokolliert, um einen unvorhersehbaren Datenverlust auszuschließen und um sie mit den aufgezeichneten Daten zu vergleichen.

4.4.3.4 Aufgetretene Probleme

Eines der angesprochenen Probleme war die leicht schwankende Hintergrundbelastung des Abwassers. Weiters verhängten sich fallweise an der Sonde Toilettepapier und andere die Leitfähigkeit beeinträchtigende Feststoffe. Dieses Problem konnte allerdings für den Zeitraum der Messungen durch ständiges Bewegen der Sonde bis auf einige Ausnahmen verhindert werden. Leider verloren wir trotz häufigen Datenauslesens vier Messungen.

4.4.3.5 Korrektur der einzelnen Messungen

An einem Extrembeispiel möchte ich das Verfahren zur Korrektur der schwankenden Hintergrundbelastung zeigen. Die Abbildung 4-6 zeigt das grundsätzliche Vorgehen. Wenn die Messsignale zu Beginn und nach Ende des Tracerdurchganges nach ca. 40 Sekunden nicht übereinstimmten, konnte angenommen werden, dass sich die Hintergrundbelastung des Abwassers geändert hat. Diese Schwankungen entstehen durch die sich ständig ändernde Abwassermatrix bzw. Abwasserzusammensetzung. Es wurde angenommen, dass diese Änderungen im Messzeitraum linear verlaufen und keine Unstetigkeiten aufweisen.

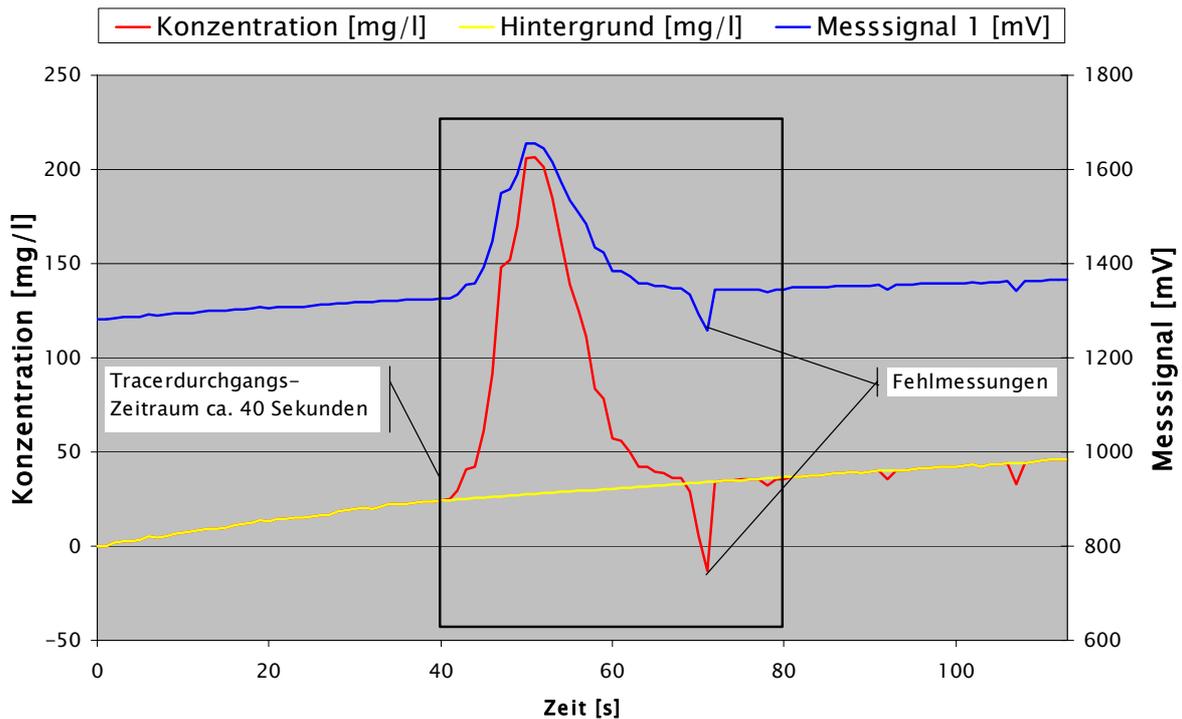


Abbildung 4-6: Korrektur der einzelnen Tracermessungen

Die in Abbildung 4-6 blau dargestellte Linie entspricht dem durch den Datenlogger aufgezeichneten Messsignal in [mV], der daraus mittels dem Messsignal- Leitfähigkeitszusammenhang errechnete Salzkonzentrationsverlauf ist rot dargestellt. Wie zu erkennen ist, beträgt die errechnete Salzkonzentration zu Beginn des durch das Rechteck dargestellten Tracerdurchgangszeitraumes nicht denselben Wert wie am Ende. Die gelbe Linie in Abbildung 4-6 stellt die sich im Zeitraum des Tracerdurchganges linear ändernde so genannte Grundbelastung dar. Ein weiteres Phänomen waren kurze vereinzelte Messaussetzer, welche ebenso linear „überbrückt“ wurden. Diese Fehlmessungen kamen möglicherweise durch die angesprochenen kurzzeitigen Verzopfungen an der Sonde zustande. Der Salzkonzentrationsverlauf wurde um die angesprochenen erforderlichen Korrekturen berichtigt und in Abbildung 4-7 dargestellt. Die gelb markierte Fläche in Abbildung 4-7 stellt das Äquivalent für den Durchfluss dar.

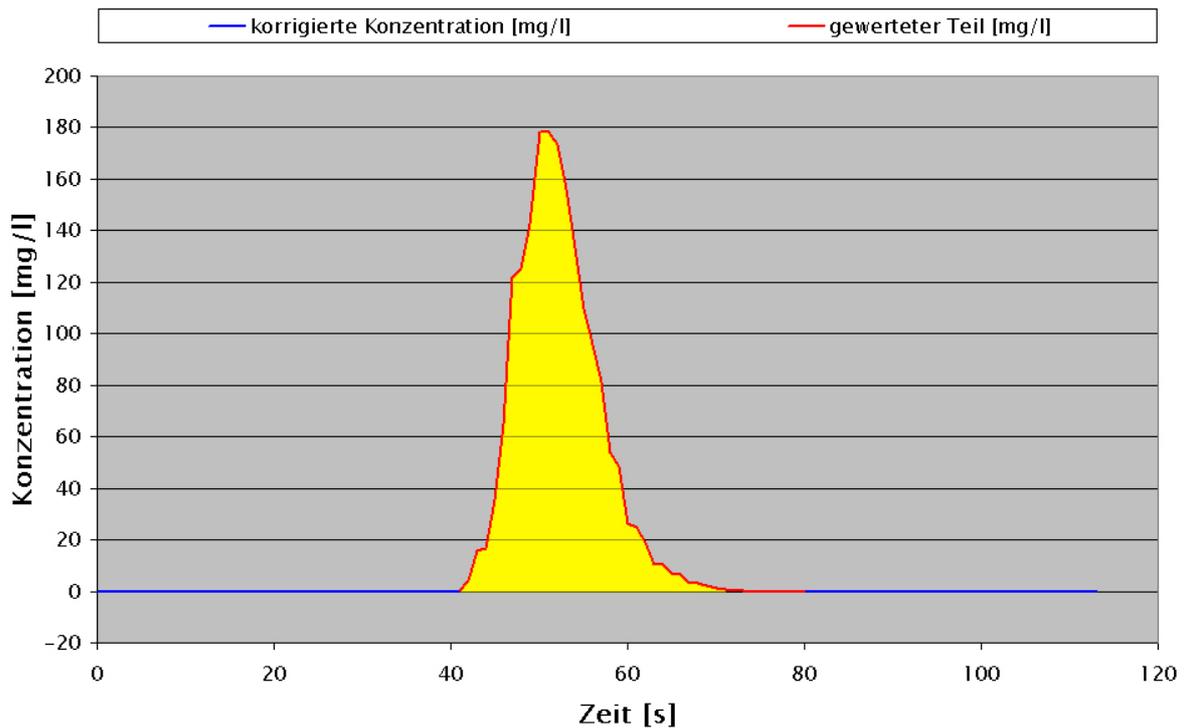


Abbildung 4-7: Korrigierter Verlauf der Tracerkonzentration

Es wurden nahezu alle Messungen nach diesem Verfahren händisch korrigiert und schließlich die damit erhaltenen Durchflüsse mit jenen der anderen Messsysteme verglichen.

4.5 Messkampagne I (MK I)

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Kalibrierung und der Justierung der fest eingebauten Messsysteme im Trockenwetterfall. Es wird die grundsätzliche Vorgangsweise beschrieben und das in Kapitel 2.3.2 beschriebene Verfahren der empirischen Kalibration zur Anwendung gebracht.

4.5.1 Durchführung

Im Rahmen einer IMW- Messkampagne I wurde von 31. März 2004 06:00 Uhr bis 01. April 2004 06:00 eine 24-Stunden- Trockenwetterganglinie aufgenommen. Dafür wurden vom Kanalprofil unter anderem die Naturmaße genau aufgenommen, um diese mit den Planungsunterlagen zu vergleichen

und daraus letztendlich einen genauen Wasserstands- Querschnittsflächen-Zusammenhang zu ermitteln.

4.5.2 Profilaufnahme

Da die Durchflussmessung des ständig eingebauten Messsystems den tatsächlich durchflossenen Querschnitt benötigt, war ein genaues Aufmaß des Messquerschnittes unumgänglich, um daraus eine genaue Wasserstands- Querschnittsflächen- Beziehung ermitteln zu können. Dazu wurden die Naturmaße des Querschnitts aufgenommen und mit den Planunterlagen aus dem Jahr 1914 verglichen. Die Abbildung 4-8 zeigt das Ergebnis dieses Vergleiches. Die rote Linie stellt das aufgemessene, tatsächlich Profil dar. Es fällt auf, dass die beiden Profile sehr schlecht übereinstimmen! Ich nehme an, dass das Profil nicht so hoch gebaut wurde wie es geplant war und dass sich die Trockenwetterrinne im Lauf der Jahre sehr stark eingetieft hat. Möglicherweise ist die Trockenwetterrinne auch durch Reparatur- und Renovierungsarbeiten schmaler geworden und die Höhenlage der Berme hat sich durch diese Arbeiten nach oben verschoben.

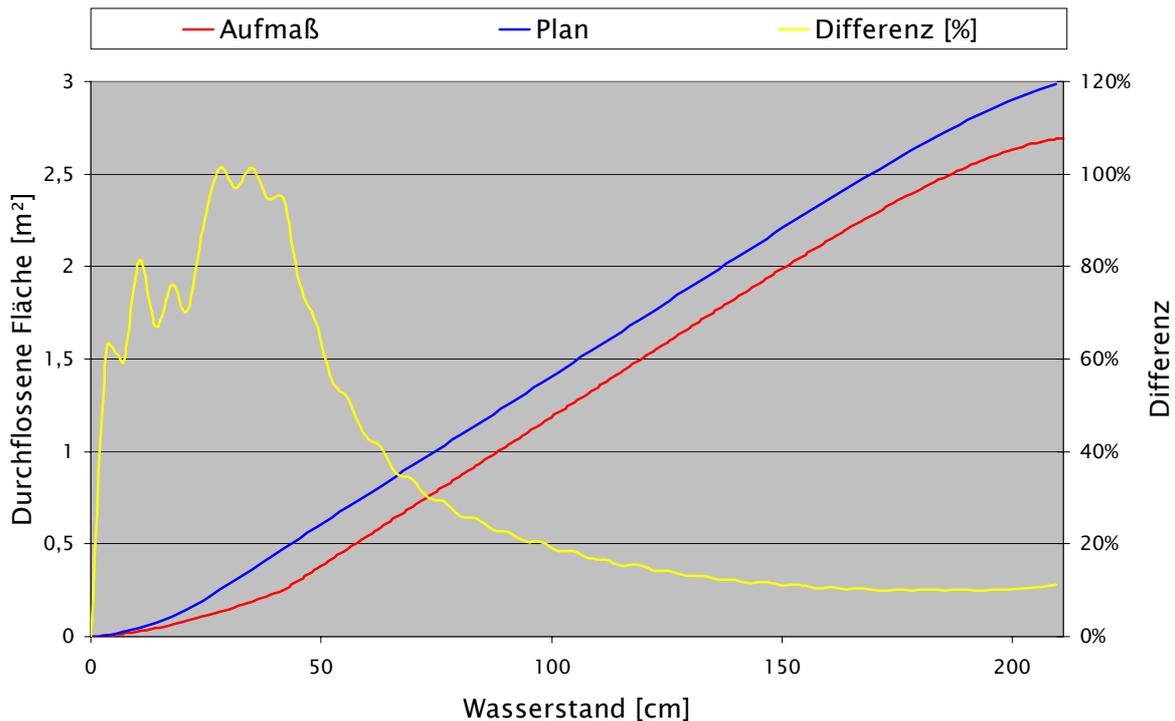


Abbildung 4-9: Wasserstands- Querschnittszusammenhang

Die blaue Linie stellt den bisherigen Zusammenhang auf Basis der Planunterlagen dar, die rote Linie entspricht dem Zusammenhang der sich nach dem Aufmaß ergab. Die gelbe Kurve veranschaulicht die relative Differenz, die für den Trockenwetterfall im Allgemeinen sehr groß ausfällt und für einen Wasserstand von 28 [cm] bis 35 [cm] sogar die 100% Marke überschritten. Das heißt, dass bei diesen Wasserständen in etwa der doppelte Durchfluss aufgezeichnet wurde.

4.5.3 Auswertungen

Dieses Kapitel behandelt den Vergleich der verschiedenen Messergebnisse, die sich während der ersten Messkampagne ergeben haben. Weiters werden aus den Fehlern und aufgetretenen Problemen Schlüsse gezogen, die bei den weiteren Messungen vermieden wurden.

4.5.3.1 Höhenstandsvergleich

Die beiden Messsysteme, die mit einem Höhenstandssensor ausgerüstet sind, waren der FloDar und der Q-Logger. Da die Messungen mit dem Q-Logger erst um 19:30 gestartet wurde, konnte auch nur der Zeitraum von

19:30 bis 06:00 verglichen werden. Abbildung 4-10 zeigt die sehr gute Übereinstimmung der beiden Verläufe, die kaum zufällige Abweichungen erkennen lässt. Die aufgetretene Abweichung ist systematischer Natur und resultiert zum einen aus den leicht unterschiedlichen Messorten und zum anderen aus einer offensichtlich fehlerhaften Justierung des Q-Loggers, die nur mit einem Meterstab als Referenzmessmethode durchgeführt wurde.

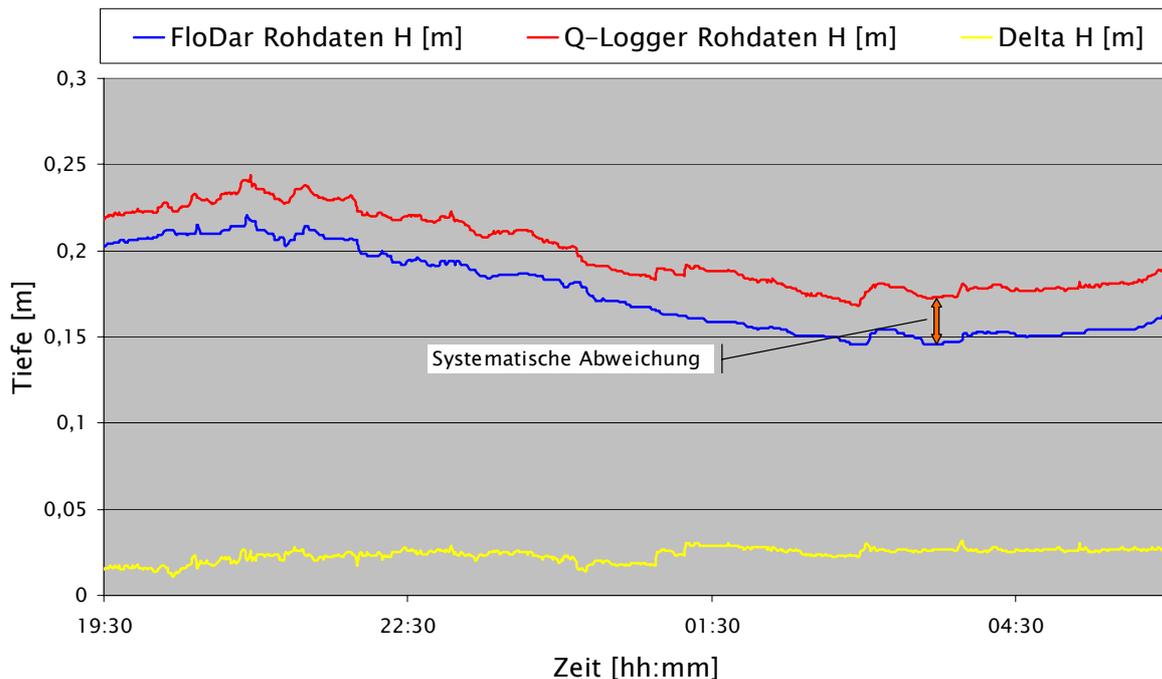


Abbildung 4-10: Höhenstandsvergleich (MK I)

Die Standardabweichung betrug bei einer mittlere Abweichung von 2,4 [cm] nur 0,4 [cm]. Daraus kann man schließen, dass bei einer exakten Justierung des fest eingebauten FloDar die Wassertiefe sehr genau erfasst werden kann und damit die durchflossene Fläche sehr zuverlässig berechnet werden kann.

4.5.3.2 Geschwindigkeitsvergleich

Der Vergleich der Geschwindigkeiten ist in der Abbildung 4-11 dargestellt. Bedingt durch das Messverfahren wurde wie am Stainzbach an unterschiedlichen Orten im Querschnitt gemessen, weshalb auch in diesem Fall die Daten nur bedingt miteinander verglichen werden konnten. Die in

Abbildung 4-11 dargestellte blaue Linie entspricht der vom FloDar gemessenen Oberflächengeschwindigkeit. Die rote Linie stellt die durch den Q-Logger gemessene Geschwindigkeit dar. Die Differenz zwischen den gemessenen Daten ist als gelbe Linie dargestellt.

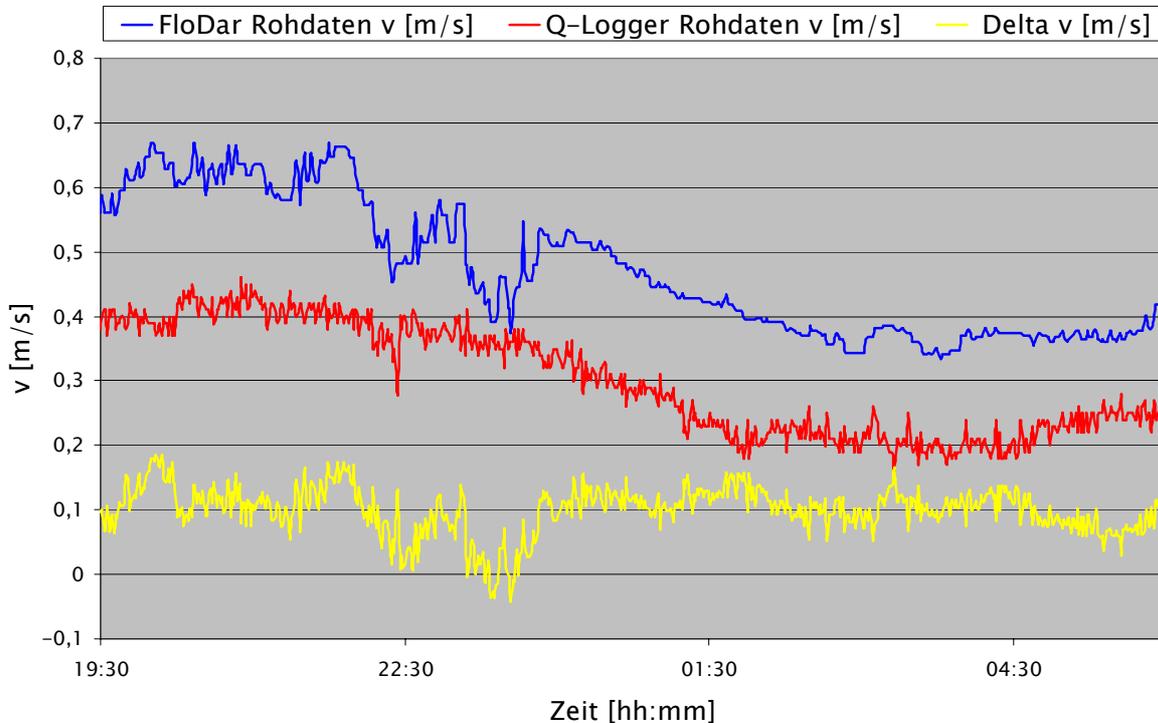


Abbildung 4-11: Geschwindigkeitsvergleich (MK I)

Wie Abbildung 4-11 zeigt, korrelieren die gemessenen Geschwindigkeiten sehr gut. Wenn der Differenz eine Standardnormalverteilung zu Grund gelegt wird, beträgt der Mittelwert der Abweichung 0,17 [m/s] und die Standardabweichung 0,04 [m/s]. Daher kann von einem sehr gleichmäßigen Geschwindigkeitsfeld und von einer sehr zuverlässigen Geschwindigkeitsmessung ausgegangen werden.

Allerdings haben die bisherigen Langzeitaufzeichnungen gezeigt, dass beim FloDar bei niedrigen Wasserständen sehr häufig Messausfälle zu verzeichnen sind. Das kommt meines Erachtens daher, dass die Radarkeule bei geringen Abflüssen nur mehr einen sehr kleinen Teil der Wasseroberfläche für die Auswertung der Oberflächengeschwindigkeit erfasst und im Gegensatz dazu eine sehr große Fläche, nämlich den nicht

benetzten Bereich der Trockenwetterrinne, bestreicht, der sich in Ruhe befindet.

4.5.3.3 Durchflussvergleich

Schlussendlich befasst sich dieses Kapitel mit dem Vergleich der erhaltenen Durchflussdaten. In Abbildung 4-12 sind die nicht korrigierten Ganglinien der einzelnen Messverfahren dargestellt. Die blaue Linie entspricht den vom FloDar berechneten Durchflüssen auf Basis der falschen Querschnittsgeometrie. Die gelben Punkte stellen jeweils den aus einer nicht korrigierten Tracermessung ermittelten Durchfluss dar. Die rote Linie zeigt den Verlauf der vom Q-Logger ermittelten Durchflussganglinie.

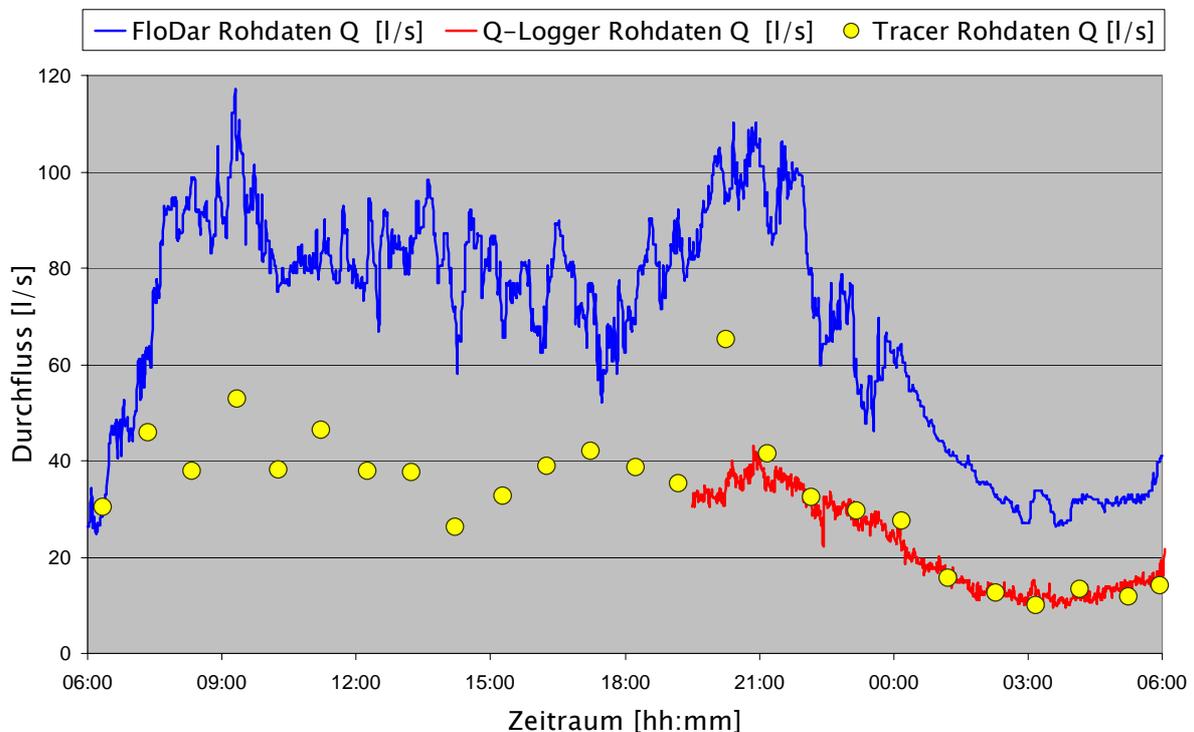


Abbildung 4-12: Nicht korrigierte Ganglinien während der MK I

Der FloDar ermittelt den Durchfluss mit der Formel $Q_{FloDar} = v_{FloDar} * A(H_{FloDar}) * k_{FloDar}$. Die Grundeinstellungen des FloDar beinhalten einen k-Faktor von 0,85. Wie im Kapitel 4.5.2 bereits erwähnt wurde, war der Durchflussermittlung ein auf Basis der Planunterlagen von 1914 erstellter Wasserstands- Querschnittszusammenhang zu Grunde gelegt. Dieser falsche Zusammenhang wurde in einem ersten Schritt auf

Basis der durchgeführten Profilaufnahme korrigiert. Der Q-Logger ermittelt den Durchfluss aus der Beziehung $Q_{Q-Logger} = v_{Q-Logger} * A(H_{Q-Logger}) * k_{Q-Logger}$. Da der Wasserstandssensor des Q-Loggers nur mit einem Meterstab justiert wurde, wurde der ermittelte Wasserstand durch den durch den FloDar gemessenen Wasserstand ersetzt. Dadurch änderte sich auch der durchflossene Querschnitt. Der k-Faktor des Q-Loggers betrug während dieser Messkampagne 1,0. Schließlich wurden die Tracermessungen in der in Kapitel 4.4.3.5 beschriebenen Weise berichtigt und den anderen berichtigten Daten gegenübergestellt und in Abbildung 4-13 dargestellt.

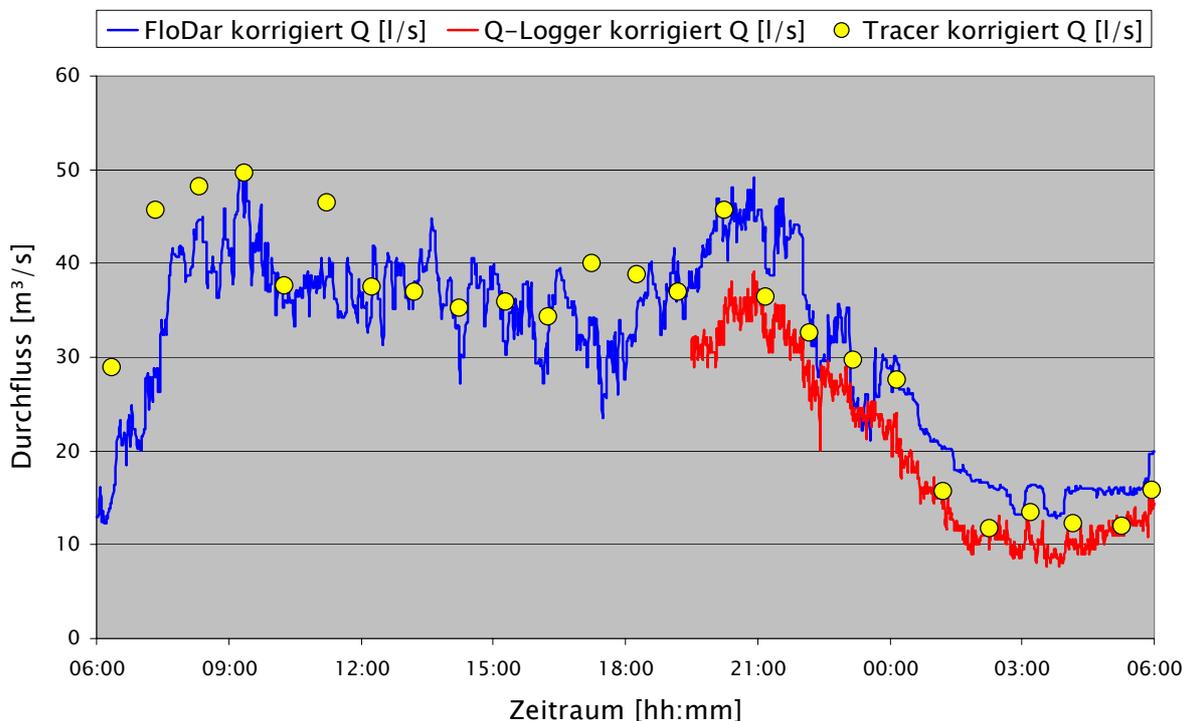


Abbildung 4-13: Korrigierte Ganglinie während der MK I nach Berücksichtigung der Profilaufnahme

Wird angenommen, dass die Tracermessungen dem richtigen Durchfluss am nächsten kommen, so müssen die Daten noch mit dem sich daraus ergebenden k-Faktor berichtigt werden. Dieser wurde aus der Beziehung

$$k = \frac{v_{tracer}}{v_{mess}}$$

errechnet wobei die Geschwindigkeit v_{tracer} aus der Formel

$$v_{tracer} = \frac{Q_{tracer}}{A(H_{FloDar})}$$

ermittelt wurde und in weiterer Folge auch als mittlere

Geschwindigkeit im Messquerschnitt angenommen wurde. Die daraus resultierenden k-Faktor- Wasserstands- Zusammenhänge sind in Abbildung 4-14 dargestellt.

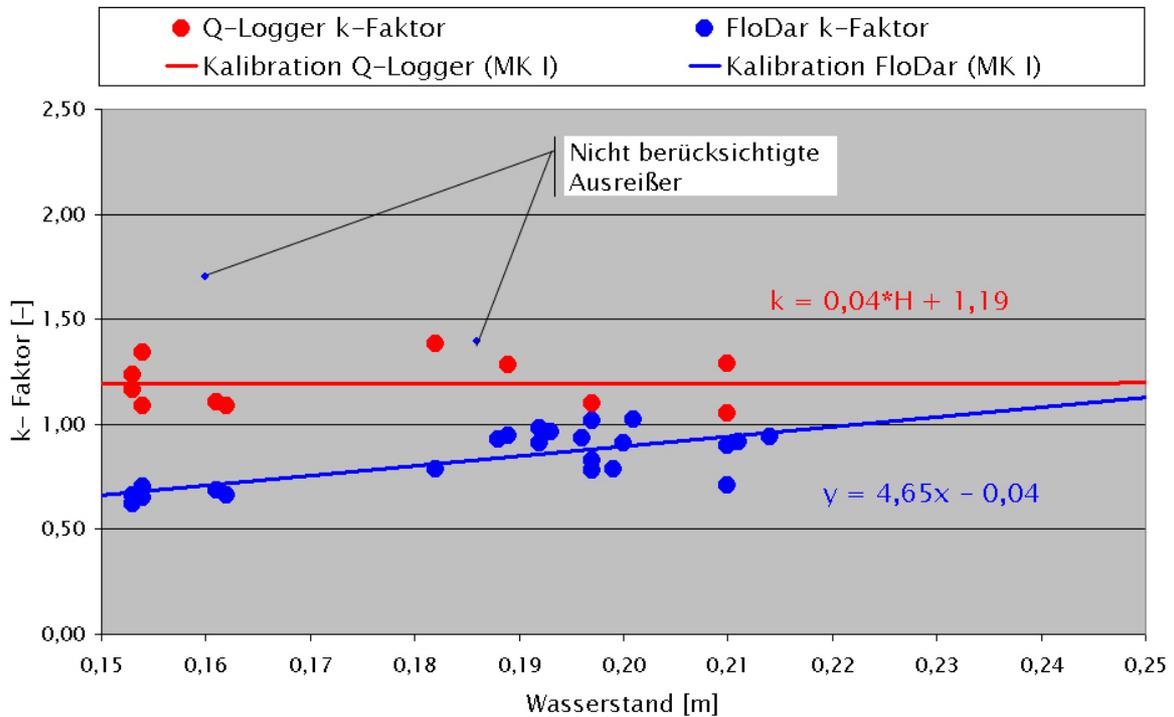


Abbildung 4-14: Aus MK I ermittelte k-Faktoren

Die Verläufe wurde linear angenähert. Die sich daraus ergebende Regressionsgeraden sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Die rote Linie stellt die Kalibriergerade des Q-Loggers dar und wird in Folge Q-Logger (MK I) genannt. Man kann erkennen, dass der Mittelwert des k-Faktors, der für den Q-Logger ermittelt wurde, in etwa 1,2 beträgt und die Geradengleichung eine zu vernachlässigende Steigung besitzt. Die Kalibrierfunktion des FloDar, im weiteren FloDar (MK I) genannt, ist in Abbildung 4-14 als blaue Gerade dargestellt.

Die ermittelten Geschwindigkeiten wurden mit den zugehörigen Kalibrierfunktionen berichtigt und die so korrigierten Durchflussganglinien wurde in Abbildung 4-15 dargestellt.

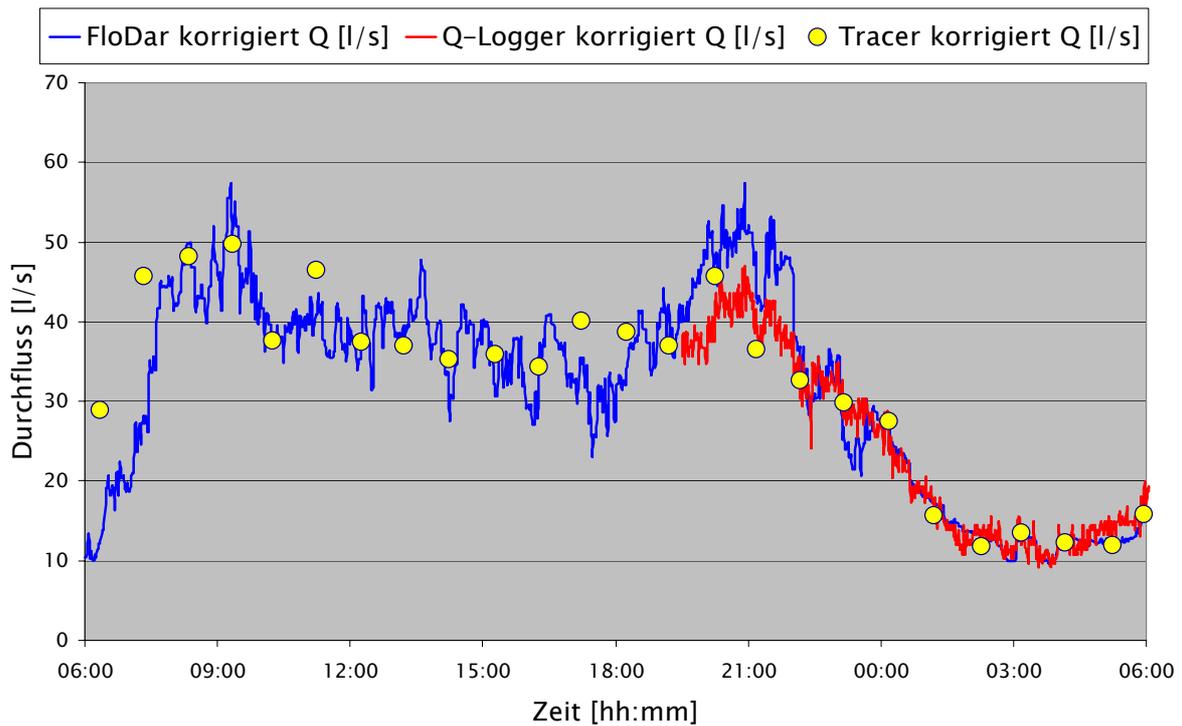


Abbildung 4-15: Korrigierte Ganglinie während der MK I nach Berücksichtigung der Kalibrierfunktionen

In Abbildung 4-15 wird deutlich, wie sehr sich die einzelnen Ganglinien der verschiedenen Messsysteme durch diese Korrektur nahe kommen und sich in Teilbereichen decken. Dennoch war es erforderlich, die getroffenen Annahmen nochmals im Rahmen einer dritten Messkampagne (MK III) zu validieren und vor allem für den Q-Logger mehrere Datenpunkte für diesen Vergleich zur Verfügung zu haben, um eine mögliche Fehlinterpretation der Ergebnisse zu vermeiden. Näheres dazu ist im Kapitel 4.7 zu finden.

4.6 Messkampagne II (MK II)

Da die entlasteten Durchflussmengen im Entlastungskanal der Messstelle Graz während eines Entlastungsereignisses von sehr großem Interesse sind, sollte im Rahmen der Messkampagne II der im Entlastungskanal installierte OCM- Pro kalibriert werden.

4.6.1 Verhältnisse vor Ort

Die Abbildung 4-16 zeigt, den Weg, der pro Messung mindestens 6- Mal zurückgelegt werden musste.

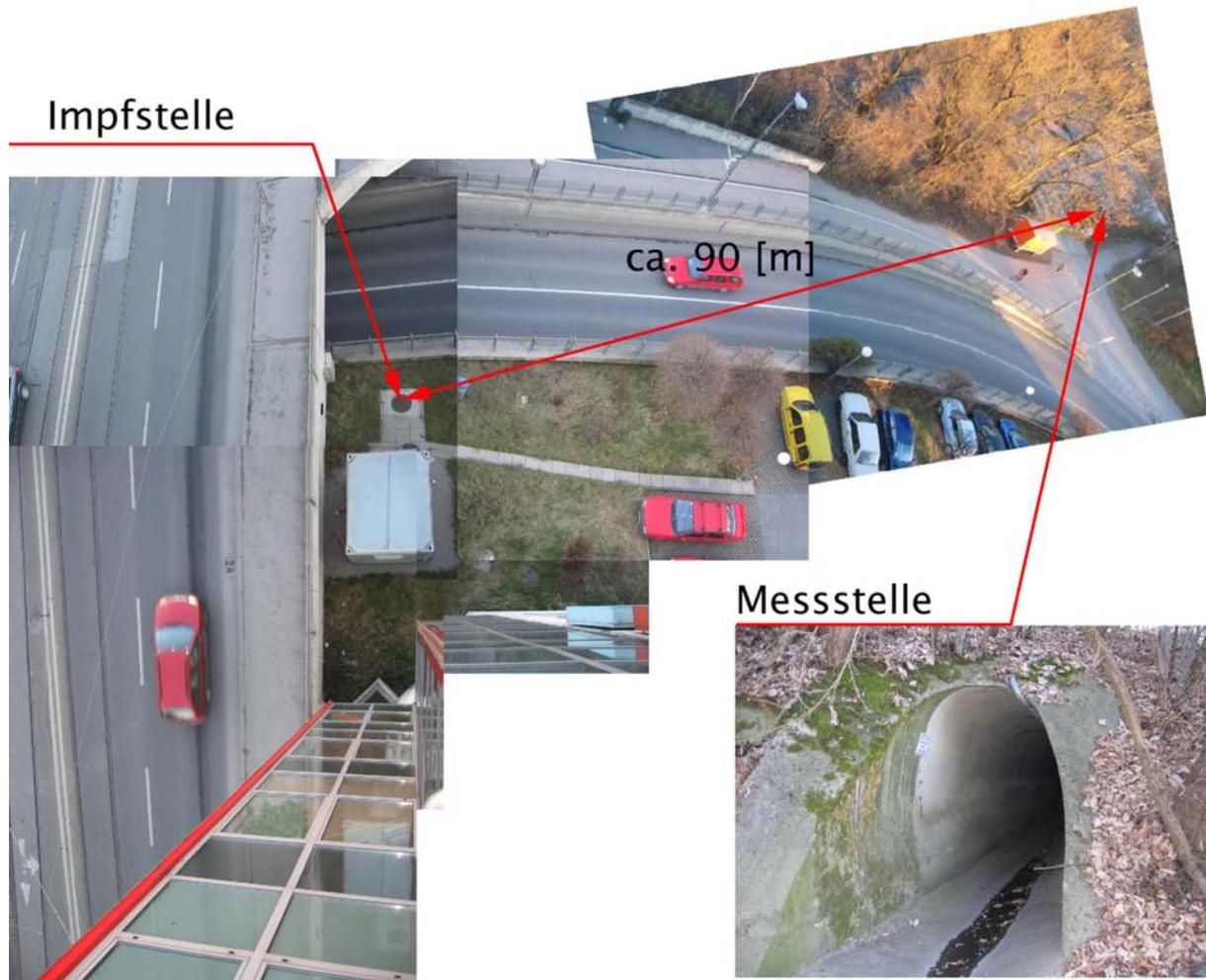


Abbildung 4-16: Übersicht der Messstation Graz aus der Vogelperspektive inklusive der Impf- und Messstelle.

4.6.2 Durchführung

Da der Entlastungskanal zumeist trocken ist und keine Möglichkeit bestand, eine so große Wassermenge in das Entlastungsgerinne zu pumpen, musste auf Regen gewartet werden, der kräftig und lange genug war, um eine Entlastung hervorzurufen. Vom Beginn der Diplomarbeit bis zum Ende der Datenerhebung wurden insgesamt während drei Entlastungsereignissen Messungen durchgeführt. Ein Aufenthalt während Entlastungen im Entlastungskanal war nicht möglich, weil es einfach zu gefährlich wäre. Die

Geräte konnten auch nicht im Vorhinein installiert werden, weil der Überlaufkanal frei zugänglich ist und die Geräte möglicherweise Vandalismus oder Diebstahl zum Opfer gefallen wären. Außerdem konnte nicht ausgeschlossen werden, dass die Geräte während eines nicht beobachteten Ereignisses beschädigt worden oder verloren gegangen wären. Aus diesen Gründen konnte nur mit der Tracermessmethode als Referenzmethode gearbeitet werden. Dafür wurde vom Labor des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau ca. 40 Liter gesättigte Salzlösung vorbereitet. Die Lösung enthielt 291 [g NaCl/l], das heißt, dass für eine Entlastung von circa 500 [l/s] bei einem erforderlichen Tracereintrag von 5 Gramm je [l/s] 8,59 Liter Lösung benötigt wurden. Die Sonde wurde am Ende des Entlastungskanals in den Abwasserstrom gehängt. Um sicherzustellen, dass die Sonde bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten gesichert im Wasser bleibt, wurde sie mit einem aufschraubbaren Gewicht beschwert. Der Datenlogger wurde in unmittelbarer Nähe der Messstelle, am Rand eines Radweges positioniert. Dann musste die richtige Lösungsmenge vorbereitet und der Datenlogger auf die in der Lösung enthaltene Salzmenge eingestellt werden. Danach wurde die Aufzeichnung der Leitfähigkeit gestartet. Bevor der Tracer durch den geöffneten Zugangsschacht im Bereich des Messcontainers eingebracht wurde, wurde der vom OCM- Pro angezeigte Durchfluss notiert. Um sicherzustellen, dass während des Tracerdurchganges annähernd stationäre Verhältnisse herrschten, wurde nach der Tracerzugabe nochmals der Durchfluss abgelesen und notiert. Exemplarisch möchte ich dieses Vorgehen an Hand einer Messung vom 11.11.04 tabellarisch darstellen. Als Messstelle wird in der Tabelle 4-1 das Ende des Entlastungsgerinnes bezeichnet und als Impfstelle der Zugangsschacht zum Entlastungsgerinne, der sich in etwa 90 Meter vor dem Auslauf in die Mauer und in unmittelbarer Nähe des Messcontainers des IMW- Projektes befindet.

Zeit	Ort	Tätigkeit
02:10	Messstelle	Positionieren der Leitfähigkeitssonde
02:12	Impfstelle	Ablesen des Durchflusses
02:12	Impfstelle	Vorbereiten der Lösungsmenge in Abhängigkeit des aktuellen Durchflusses
02:14	Messstelle	Starten der Datenaufzeichnung
02:16	Impfstelle	Ablesen und Notieren des Durchflusses vor der Impfung
02:17	Impfstelle	Tracerzugabe (Impfung)
02:19	Impfstelle	Ablesen und Notieren des Durchflusses nach der Impfung
02:21	Messstelle	Beenden der Datenaufzeichnung

Tabelle 4-1: Ablauf einer Tracermessung im Entlastungskanal

4.6.3 Aufgetretene Probleme

Da angenommen wurde, dass der Datenlogger wasserdicht ist, wurde er bei der ersten Messung ohne Spritzwasserschutz an der Messstelle positioniert. Leider drang jedoch während der Aufzeichnungen Wasser in das Gerät ein, was zu einem Datenverlust und in weiterer Folge zu einem totalen Geräteausfall führte. Damit gingen leider alle Daten der ersten Messung verloren. Bei der zweiten Messung wurde der Datenlogger unter einer Plastikkiste vor dem Regenwasser geschützt. Bei diesem Ereignis schaltete sich jedoch der Datenlogger auf Grund von Strommangel während der Messungen aus. Deshalb standen auch von diesem Ereignis keine Daten zur Verfügung. Bei der dritten Messung waren die Batterien des Datenloggers voll aufgeladen und zuzüglich waren auch Reservebatterien vor Ort. Weiters war wie bei der zweiten Messung der Datenlogger unter der Plastikkiste vor

Wasser geschützt. Dieses Ereignis war jedoch durch einen sehr stark schwankenden instationären Abfluss gekennzeichnet. Dadurch musste die Messung mehrmals abgebrochen werden und die Menge der Salzlösung an den jeweiligen Abfluss angepasst werden, um eine Messbereichsüberschreitung der Leitfähigkeitssonde zu verhindern. Es wurden während dieses Ereignisses insgesamt drei Messungen durchgeführt, wovon jedoch zwei Messungen bei der Auslesung verloren gingen und bei der dritten der obere Messbereich von 2000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] überschritten wurde.

4.6.4 Ergebnisse

Die beschriebenen Probleme führten leider dazu, dass bis zum Ende der Diplomarbeit keine brauchbaren Daten für die Kalibrierung des OCM- Pro gewonnen werden konnten. Allerdings glaube ich, dass die Tracermethode auch für den Entlastungskanal prinzipiell geeignet ist. Es sollten jedoch mindestens zwei Personen vor Ort sein, um die Messungen durchzuführen und damit eine gesicherte Datenaufzeichnung zu gewährleisten. Leider war es mir während dieser Arbeit nicht möglich, plausible Messreihen zu erfassen und damit eine Grundlage für die Kalibrierung des Messgerätes im Entlastungsgerinne zu schaffen.

4.7 Messkampagne III (MK III)

Dieses Kapitel behandelt die Überprüfung der Annahmen und Kalibrierfunktionen aus den Ergebnissen der ersten Messkampagne (siehe Kapitel 4.5.). Außerdem wurde zuvor ein neuer FloDar mit einer größeren Blockdistanz an einer anderen Stelle im Kanal installiert. Dieser sollte nun im Rahmen der dritten Messkampagne kalibriert werden.

4.7.1 Durchführung

Am 07. Dezember 2004 um 04:30 Uhr begannen ein Mitarbeiter des Institutes und ich mit den Vorbereitungen für die Messungen an diesem Tag. Der Grund für den frühen Beginn war, dass der niedrigste Abfluss während

der Nachtstunden und die markante Morgenspitze erfasst werden sollten, um für die Vergleichsmessungen ein möglichst großes Spektrum an Durchflüssen abzudecken. Wie schon bei der ersten Messkampagne wurden der Q-Logger und das Tracermessverfahren als Referenzverfahren zum Einsatz gebracht. Da der FloDar in der Zwischenzeit an einer neuen Stelle im Kanal, welche weiter von der Entlastungskammer entfernt war, montiert wurde, konnten dieses Mal wegen eines zu kurzen Datenkabels des Q-Loggers die beiden Messsysteme jedoch nicht im selben Messquerschnitt positioniert werden. Da während dieser Messkampagne keine anderen Messungen außer Durchflussmessungen vorgesehen waren, konnten von 05:30 bis 09:48 insgesamt 18 Tracermessungen durchgeführt und die Wasserstandssensoren mehrfach manuell überprüft werden. Weiters wurde eine abgewandelte Methode des Tracerverfahrens angewandt, welche im Folgenden genauer beschrieben wird.

4.7.2 Erweiterte Tracermessung

Bei der herkömmlichen Methode wird wie in Kapitel 2.1.2.1 erläutert wurde, dem Flüssigkeitsstrom entweder einmal eine Tracerimpfung zugegeben oder der Markierstoff kontinuierlich beigemischt. Bei dieser, von mir „erweiterten Tracermessung“ genannten Methode wurde dem Abwasser eine momentane Tracerzugabe hinzugefügt und im Zeitabstand einer normalen Tracerdurchgangsdauer und einer Zeitreserve von 20 Sekunden ein zweites Mal geimpft. Damit konnte für den Zeitbereich von 1 Minute jeweils dreimal der Durchfluss errechnet werden, auf Basis der ersten Zugabe, der zweiten Zugabe und der beide Zugaben in Summe. Die Summenauswertung der beiden Einzelzugaben diente der Validierung der beiden Einzelauswertung und der richtigen Berücksichtigung der Hintergrundbelastung. Abbildung 4-17. zeigt den Ablauf einer erweiterten Tracermessung.

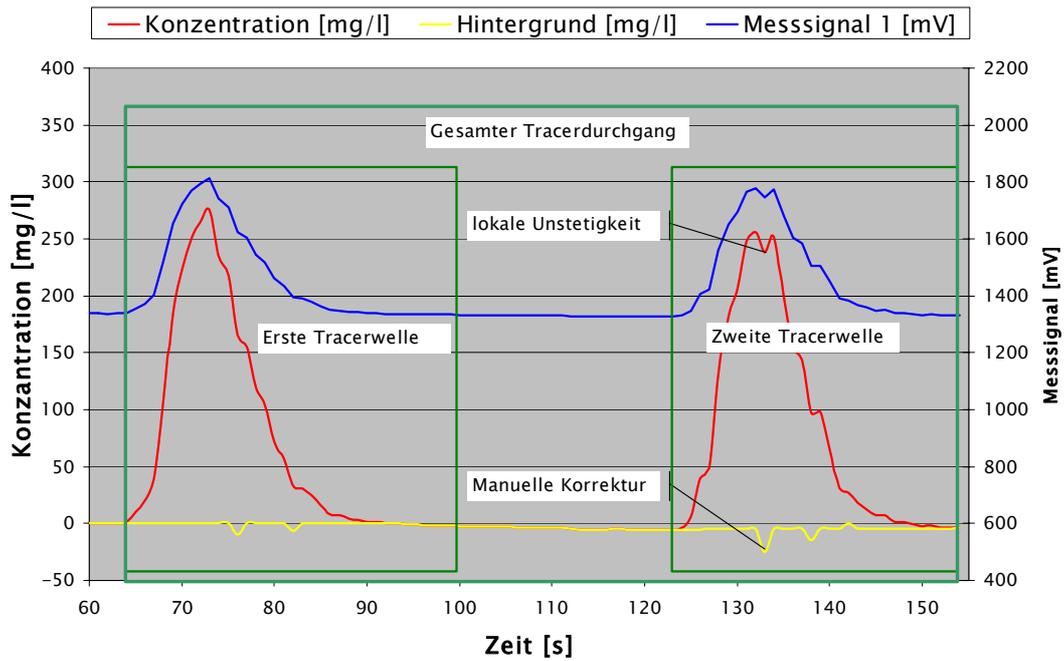


Abbildung 4-17: Ablauf einer erweiterten Tracermessung

Die sich nach der Korrektur der Hintergrundbelastung und der einzelnen Messausfälle ergebenden Kurven sind in der Abbildung 4-18 dargestellt. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf einen glatten und stetigen Verlauf der Kurven Wert gelegt.

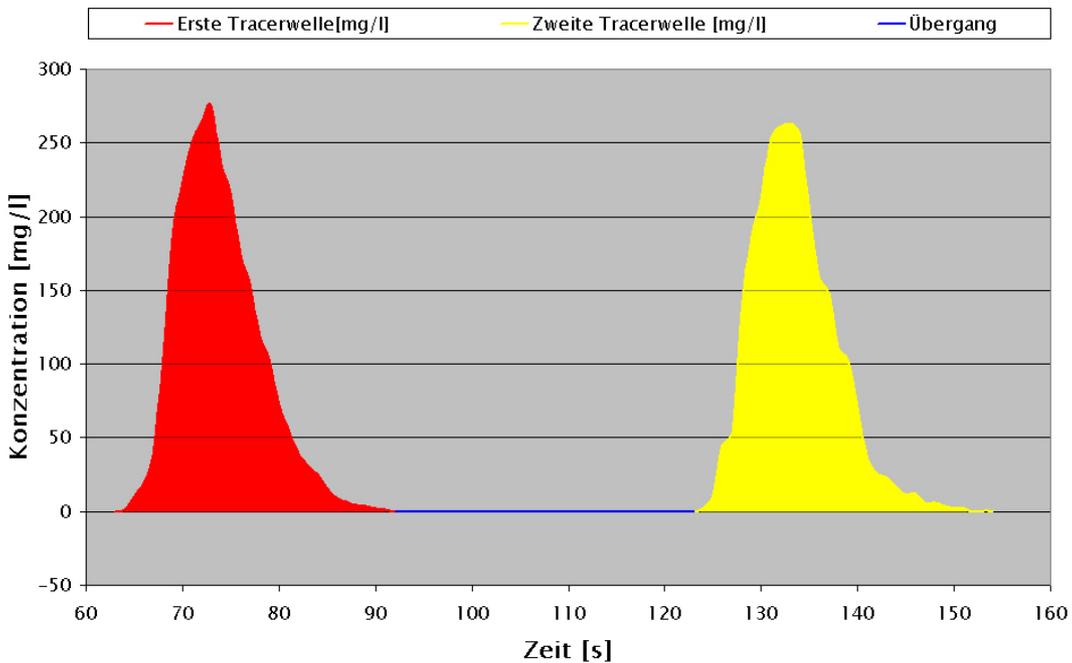


Abbildung 4-18: Korrigierter Konzentrationsverlauf einer erweiterten Tracermessung

In diesem konkreten Fall ergab die Auswertung der ersten Kurve einen Durchfluss von 37,85 [l/s], die der zweiten einen Durchfluss von 38,16 [l/s] und die Auswertung des gesamten Tracerdurchganges führte zu einem Durchfluss von 38,01 [l/s]. Dies lässt den Eindruck entstehen, dass das Integral über die gesamte Messdauer dem Mittelwert der beiden einzelnen Kurven entspricht. Dies stimmt nur dann, wenn man die Tracerdurchgangszeiten richtig gewählt hat und die Hintergrundschwankungen richtig eliminiert hat. Deshalb trägt dieses etwas aufwendigere Verfahren zur Erhöhung der Genauigkeit und damit der Absicherung der Messergebnisse bei.

4.7.3 Profilaufnahme

Auch das Profil des neuen Messquerschnittes wurde noch einmal aufgenommen, wobei sich jedoch herausstellte, dass er nahezu deckungsgleich zur ersten Profilaufnahme war. Dieses Mal wurden auch die Schotterablagerungen und die Sielhaut miterfasst. Da diese im untersuchten Querschnitt nur einen sehr kleinen Teil ausmachten und permanenter Änderung unterliegen, wurden sie für die Abflussquerschnittsermittlung vernachlässigt. Es wurde daher mit denselben Profildaten wie bei der ersten Messkampagne gerechnet.

4.7.4 Auswertung

Wie bei der ersten Messkampagne wurden auch diesmal die für die Durchflussermittlung notwendigen Randbedingungen auf Richtigkeit überprüft. Abbildung 4-19 stellt den Verlauf der erfassten Abflussganglinie in dieser Untersuchungsperiode dar. Die unplausiblen hohen Durchflüsse zu Beginn der Periode resultieren aus den durch die Profilaufnahme verursachten fehlerhaften Höhenstandsmessungen.

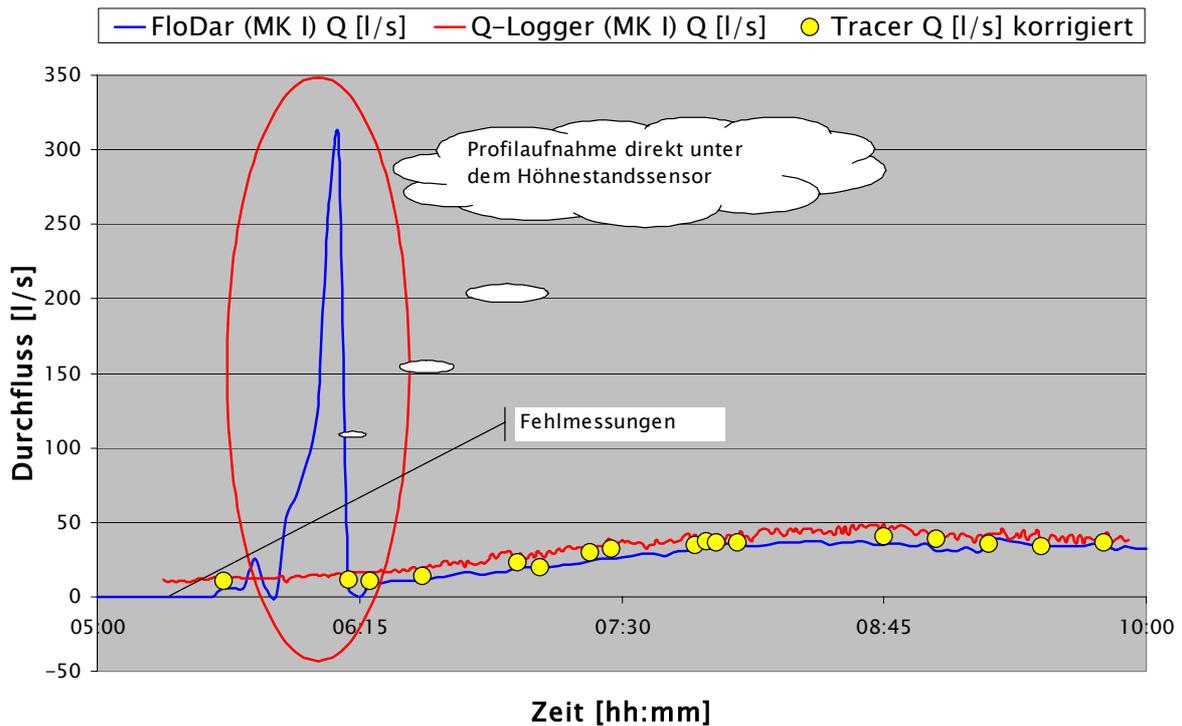


Abbildung 4-19: Ablauf der Messkampagne III

Weiters kann man die durch den geringen Abfluss in den Nachtstunden verursachten Fehlmessungen vor der Untersuchungsperiode erkennen. Bedingt durch diese Fehlmessungen wurden die erhobenen Daten erst ab 06:18 Uhr miteinander verglichen.

4.7.4.1 Höhenstandsvergleich

Der Höhenstandssensor des Q-Loggers und des FloDars wurde während der Messungen im Abwasser mehrmals manuell überprüft. Abbildung 4-20 zeigt die gemessenen Verläufe des Wasserstandes zwischen 06:18 Uhr und 09:54 Uhr.

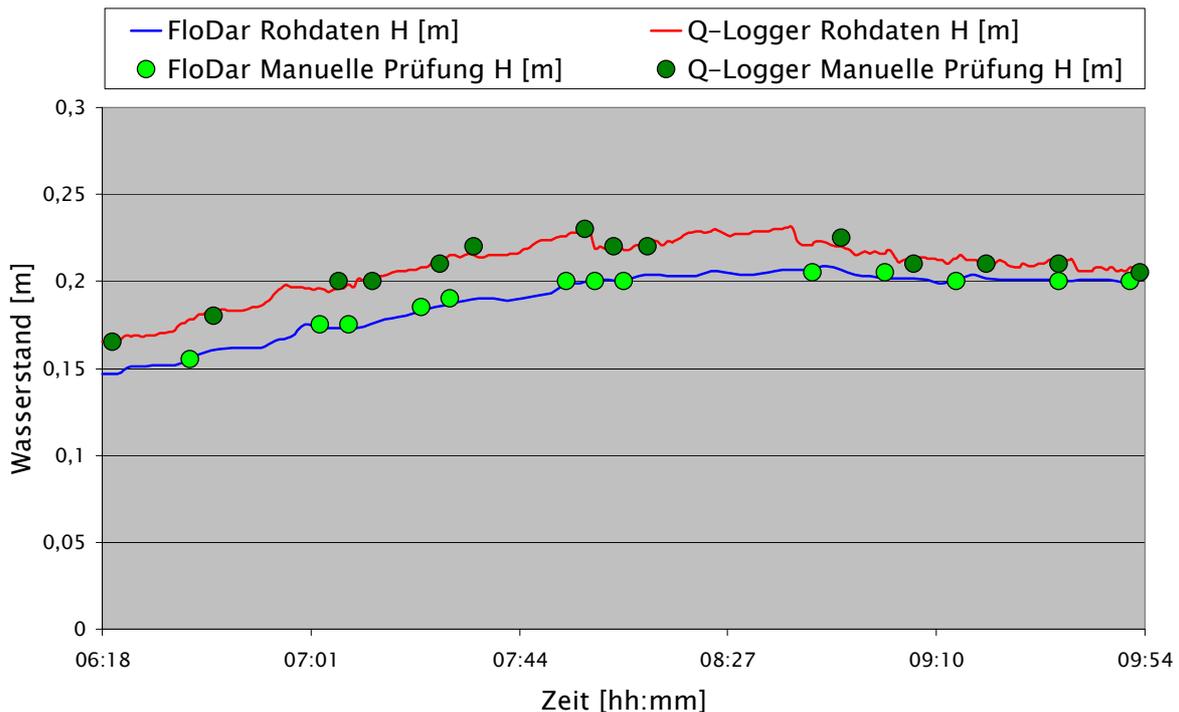


Abbildung 4-20: Höhenstandsvergleich (MK III)

Auch hier ist wieder eine kleine systematische Abweichung zu erkennen, die sicherlich daher kommt, dass die Messquerschnitte nicht dieselben waren. Die grünen Punkte symbolisieren die einzelnen Kontrollmessungen und veranschaulichen, dass die beiden Messverfahren sehr gut funktionieren und es zur manuellen Überprüfung mit dem Meterstab keine Abweichungen gab. Der mittlere Wasserstandsunterschied zwischen den beiden Messsystemen betrug 1,87 [cm]. Wenn der Differenz eine Standardnormalverteilung zu Grunde gelegt wird beträgt die Standardabweichung dieser 0,7 [cm], was ebenfalls auf sehr zuverlässige Messverfahren hinweist.

4.7.4.2 Geschwindigkeitsvergleich

Abbildung 4-21 zeigt die systematischen Abweichungen zwischen der durch den FloDar ermittelten Oberflächengeschwindigkeit und der Geschwindigkeit in der Messkeule des Q-Loggers. Die mittlere Abweichung beträgt 1,9 [cm/s] und die Standardabweichung 2,9 [cm/s]. Das höhere Rauschen des Q-Logger-Signals ist auf die höhere Messfrequenz von 1 Messung pro Minute zurückzuführen, während der FloDar nur alle 3 Minuten die Werte

aufzeichnete. Wie man sieht, korrelieren diese Daten nicht so gut wie die Höhenstandsdaten, was zum einen aus den unterschiedlichen Messorten resultiert und zum anderen auf die unterschiedliche Messmethodik zurückzuführen ist.

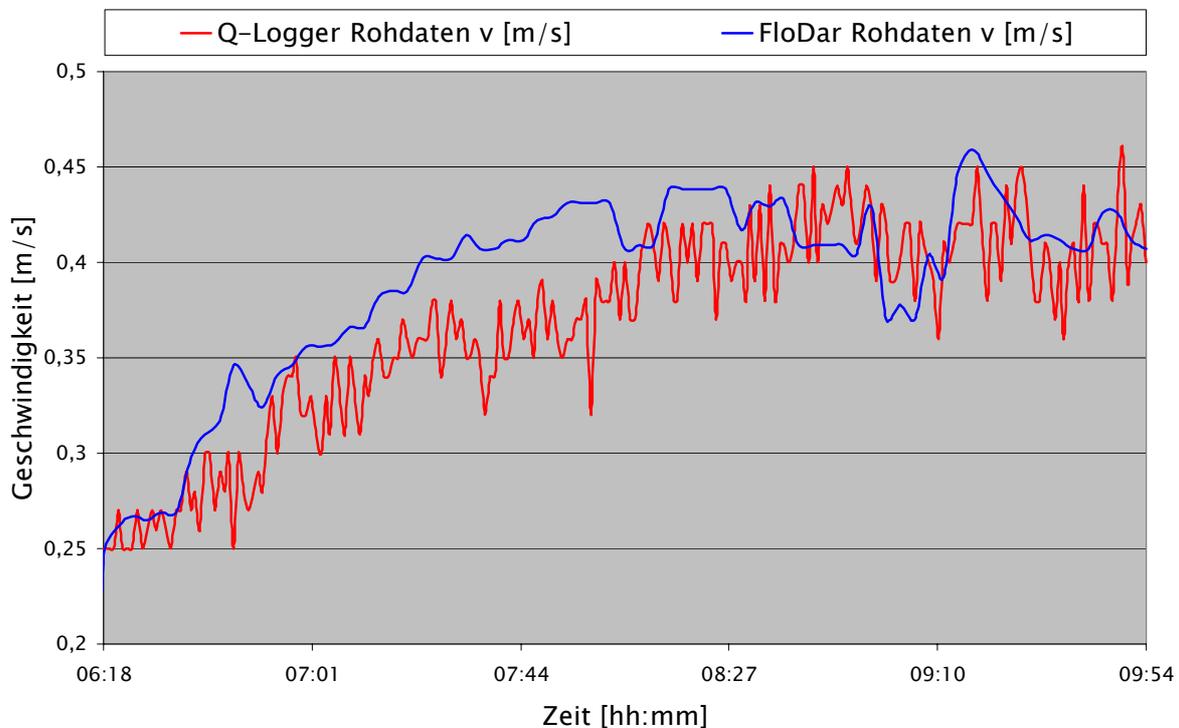


Abbildung 4-21: Geschwindigkeitsvergleich (MK III)

4.7.4.3 Durchflussvergleich

Dieses Kapitel soll Aufschluss über die Richtigkeit der Kalibrationen der ersten Messkampagne geben. Es wurden mit den gemessenen Geschwindigkeits- und Höhenstandsdaten der jeweiligen Messgeräte und mit den Kalibriergeraden „Q-Logger (MK I)“ und FloDar (MK I) Durchflussganglinien errechnet. Der Verlauf der einzelnen Durchflussganglinien während der vergleichbaren Untersuchungsperiode ist in Abbildung 4-22 dargestellt. Die rote Linie stellt die vom Q-Logger ermittelten und mit der Kalibrierfunktion „Q-Logger (MK I)“ korrigierten Durchflüsse dar. Die gelben Punkte symbolisieren die korrigierten Tracermessungen. Die Abflussganglinie, die durch den FloDar ermittelt und mit der „FloDar (MK I)“ korrigiert wurde, ist in Abbildung 4-22 als blaue Linie dargestellt.

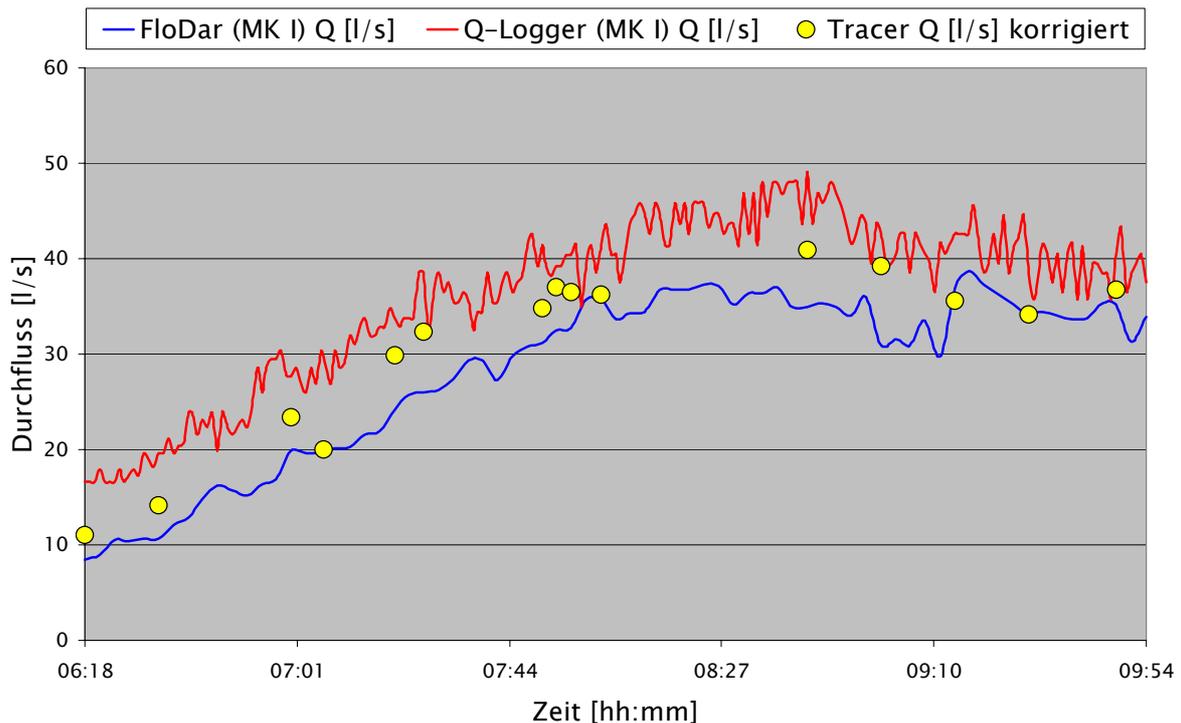


Abbildung 4-22: Die mit den Kalibrierfunktionen der MK I korrigierten Durchflussganglinien während der MK III

Es ist deutlich zu erkennen, dass die durch den FloDar gemessenen und mit der Kalibration „FloDar (MK I)“ korrigierten Durchflüsse im Vergleich zu den durch Tracermessung ermittelten Durchflüssen zu klein sind. Dagegen sind die durch den Q-Logger ermittelten und mit der Kalibrierfunktion „Q-Logger (MK I)“ korrigierten Durchflüsse größer als die Durchflüsse aus den korrigierten Tracermessungen.

Deshalb wurde für den FloDar eine neue Kalibrierfunktion auf Basis der Messergebnisse der dritten Messkampagne ermittelt. Diese als Kalibration FloDar MK(III) bezeichnete Kalibriergerade ist in Abbildung 4-23 als blaue Linie dargestellt. Die blauen Punkte entsprechen den k-Faktoren der einzelnen Messungen.

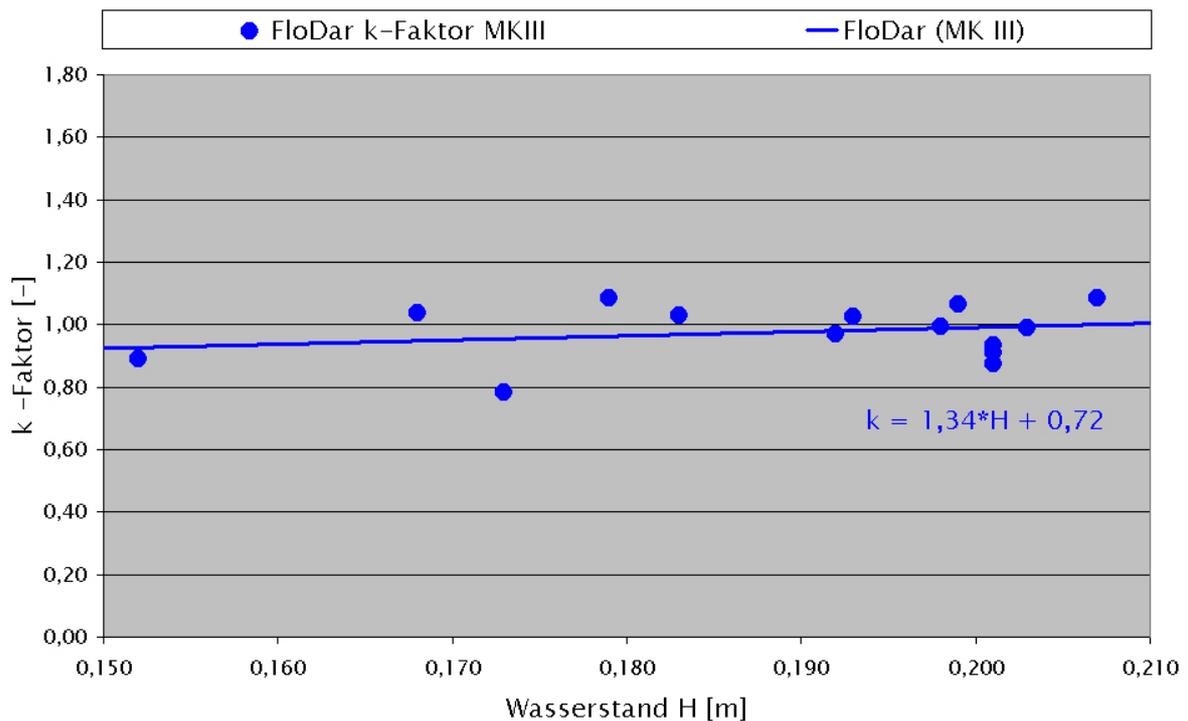


Abbildung 4-23: Kalibration FloDar (MK III)

Die ermittelte Kalibrierfunktion verläuft bedeutend flacher als die Kalibration „FloDar (MK I)“, das heißt, dass der Wasserstand nicht mehr so viel Einfluss auf das Errechnen der mittleren Geschwindigkeit hat.

Da der Q-Logger im annähernd gleichen Messquerschnitt positioniert war wie beider ersten Messkampagne wurden für die Ermittlung Kalibration „Q-Logger (MK III)“ auch die dort ermittelten k-Faktoren herangezogen. Die roten Punkte in Abbildung 4-24 stellen die während der dritten Messkampagne ermittelten k-Faktoren dar. Die k-Faktoren die sich im Rahmen der ersten Messkampagne ergaben sind in Abbildung 4-24 durch grüne Punkte gezeigt. Die dünne strichlierte Linie symbolisiert die Kalibration „Q-Logger (MK I)“. Die rote Kalibriergerade entspricht dem aus allen k-Faktoren gebildeten Trend und wird in Folge Kalibration „Q-Logger (MK III)“ genannt.

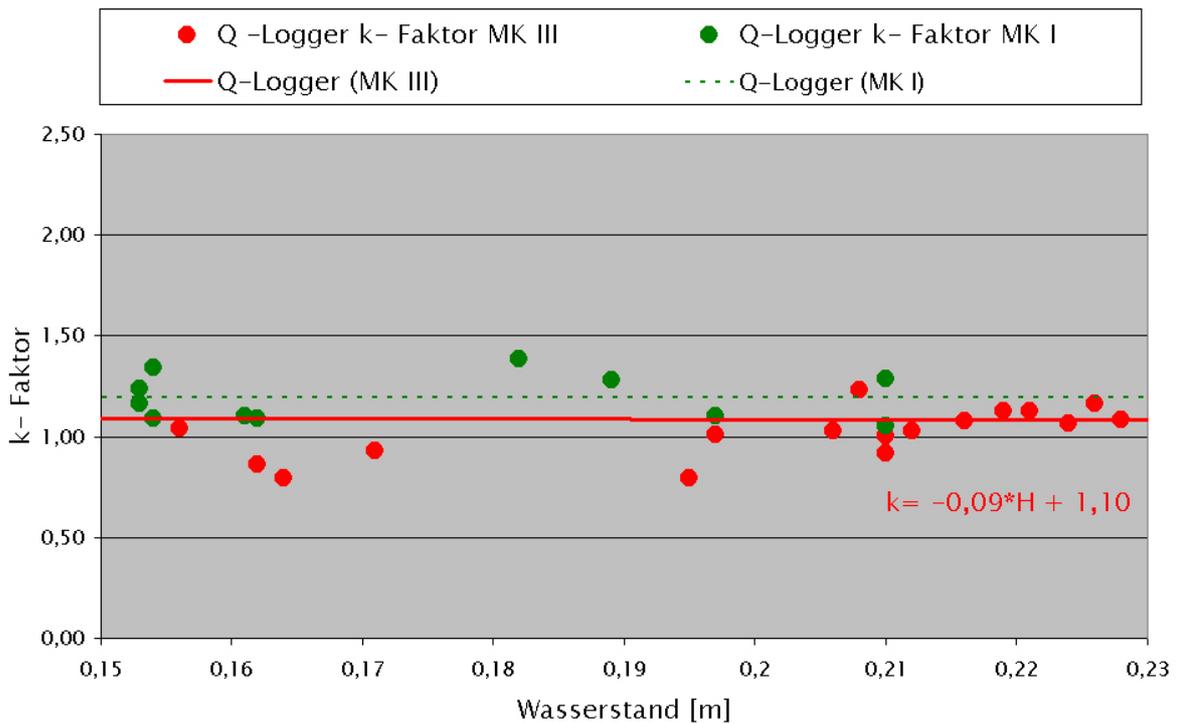


Abbildung 4-24: Kalibration Q-Logger (MK III)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die neue Funktion keine Änderung über die Wassertiefe beinhaltet und fast den Wert 1,1 annimmt. Das bedeutet, dass der Q-Logger eine Geschwindigkeit misst die kleiner ist als die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt.

Geht man allerdings davon aus, dass die Ultraschallmesskeule den gesamten Fliessquerschnitt erfasst und damit die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt ermittelt entspricht diese Abweichung von 10 % der von Thoman (2002) erwähnten systematischen Abweichung der Tracermessung zu anderen Messverfahren (siehe Kapitel 2.1.2.1.2).

Trotz der Überlegungen des vorherigen Absatzes wurden die durch die Messgeräte erhobenen Durchflussdaten mit der jeweiligen aus der dritten Messkampagne ermittelten Kalibriergeraden korrigiert und in Abbildung 4-25 dargestellt. Die Durchflussganglinie die durch den FloDar ermittelt und mit der Kalibration FloDar (MK III) korrigiert wurde ist als blaue Linie dargestellt. Die rote Linie zeigt die mit der Kalibration Q-Logger (MK III) korrigierte vom Q-Logger aufgezeichnete Durchflussganglinie im Untersuchungszeitraum der Messkampagne III. Die durch die

durchgeführten Tracermessungen ermittelten Durchflüsse wurden wie in Kapitel 4.7.2 beschrieben korrigiert und sind als gelbe Punkte in Abbildung 4-25 dargestellt.

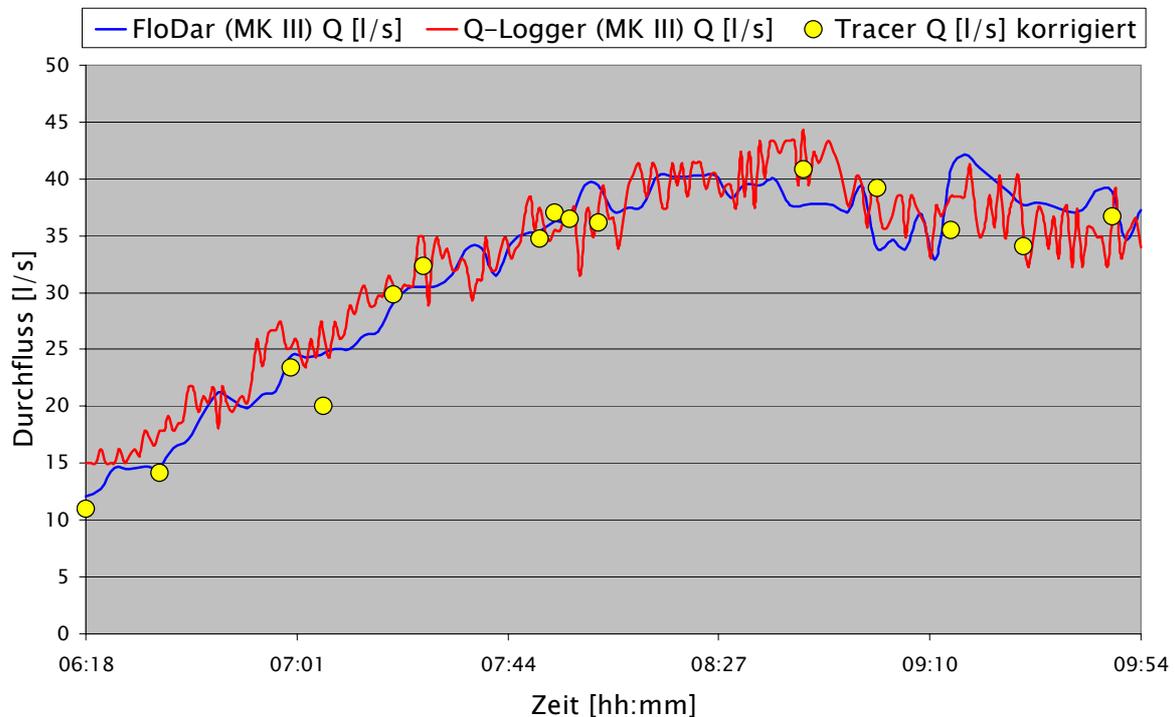


Abbildung 4-25: Mit Kalibrationen (MK III) korrigierte Durchflüsse während der Messkampagne III

Man sieht, dass die dargestellten Ganglinien sehr gut korrelieren und in manchen Bereichen vollkommen identisch sind. Das heißt, dass die Korrektur mit den errechneten Kalibrationsgeraden für diesen Untersuchungszeitraum sehr gute Werte liefert.

4.8 Ergebnisse

Der Durchfluss setzt sich aus den Multiplikanden durchflossene Querschnittsfläche, gemessene Geschwindigkeit und k- Faktor zusammen. Die Grundlage jeder Durchflussermittlung muss es daher sein, diese drei einzelnen Komponenten mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Deshalb wurde für die Kalibrierung der Durchflusssysteme zunächst ein genaues Aufmaß des Kanalprofils vorgenommen und daraus ein abgesicherter Wasserstands- Querschnitts- Zusammenhang ermittelt. Dabei

zeigte sich insbesondere beim Zulaufquerschnitt zur Mischwasserkammer wie wichtig diese Überprüfung ist, da sich hierbei sehr große Unterschiede zu der Planvorlage ergeben haben, was bei Trockenwetterbedingungen Abweichungen bis zu 100 % bedingte.

Die Geschwindigkeits- bzw. Durchflussmessungen wurden mittels zweier unterschiedlicher Referenzmessverfahren überprüft, einer Ultraschallkanalmaus und Salztracerversuche. Aus beiden Vergleichsmessungen wurde im Anschluss daran versucht, einen wasserstandsabhängigen k-Faktor zu ermitteln und damit die Durchflussermittlungen zu korrigieren.

Aus den Messkampagnen I und III, die sich mit der Trockenwetterkalibration des im Zulaufkanal eingebauten FloDar beschäftigten, konnte damit ein linearer Wasserstands- k-Faktor- Zusammenhang für den FloDar ermittelt werden, wobei sich eine eher geringe Wasserstandsabhängigkeit des k-Faktors zeigte und auch im Bereich der Voreinstellung durch den Hersteller lag.

Die ermittelten Kalibrierfunktionen basieren jeweils auf der Annahme, dass die aus den Tracermessungen ermittelten Durchflüsse den tatsächlich stattfindenden Durchflüssen entsprechen. Als zweites Referenzmessverfahren kam ein so genannter Q-Logger zum Einsatz. Für diesen wurde angenommen, dass die von ihm gemessene Geschwindigkeit bereits der mittleren Geschwindigkeit entspricht, da die Ultraschallmesskeule nahezu den gesamten Abflussquerschnitt bei Trockenwetter erfasste. Das heißt, dass der k-Faktor den Wert 1,0 annehmen müsste. Der ebenso auf Basis der Tracermessungen ermittelte Wasserstands- Kalibrierfaktor- Zusammenhang ergab jedoch mit 1,10 über die gesamte untersuchte Fließtiefe einen etwas höheren Wert.

Die Messkampagne zur Ermittlung einer Kalibrierfunktion für den im Entlastungskanal installierten OCM-Pro lieferte leider keine Ergebnisse, da während der Bearbeitung der Diplomarbeit leider keine plausiblen Datensätze während Entlastungsvorgängen gewonnen werden konnten. Prinzipiell erscheint die Salztracermethode aber auch hier geeignet zu sein.

Voraussetzung dafür ist allerdings, dass man weitgehend stationäre Zeitabschnitte für die Tracereinbringung und Auswertung benötigt.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

Die Durchflussmenge stellt in der Wasserwirtschaft eine der bedeutendsten physikalischen Größen dar, ist jedoch auf direktem Wege leider nicht messbar, weshalb unterschiedliche Messmethoden zu ihrer Bestimmung entwickelt wurden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der Durchflussmenge sowohl an einem natürlichen Oberflächengewässer als auch im Bereich einer Mischwasserentlastung in der Grazer Kanalisation miteinander verglichen und kalibriert.

Das von der Fachabteilung 19A (FA19A) der steiermärkischen Landesregierung zurzeit noch eingesetzte Verfahren zur Durchflussermittlung an Gewässern bedient sich nach wie vor dem herkömmlichen Pegelschlüssel, welcher einen Zusammenhang zwischen Pegelstand und Durchfluss darstellt. Es konnte an Hand einer detaillierten Auswertung eines größeren Abflussereignisses gezeigt werden, dass der Durchfluss in einem Gewässer nicht ausschließlich vom Wasserstand abhängt, da bei Anwendung moderner Geschwindigkeitsmessmethoden bei gleichen Wasserständen unterschiedliche Abflussmengen zu beobachten waren. Dieses als Hysteresiseffekt bekannte Phänomen kann von Durchflussmesssystemen auf Basis von Pegelschlüsseln nicht erfasst werden.

Da die mittlere Geschwindigkeit in einem Messquerschnitt jedoch nicht direkt messbar ist, muss ein Zusammenhang zwischen der von einem Messgerät ermittelten Geschwindigkeit und der mittleren Geschwindigkeit hergestellt werden. Dieser Zusammenhang wird k-Faktor oder Kalibrierfaktor genannt. Jedes Gewässer, jeder Querschnitt, jeder Ort an dem die Geschwindigkeit gemessen wird und jeder Pegelstand besitzt einen anderen Kalibrierfaktor.

In der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel des weststeirischen Stainzbaches versucht, auf Basis der während der Untersuchungsperiode

durchgeführten Flügelmessungen und auf Basis von der FA19A zur Verfügung gestellten Datensätzen jeweils einen k-Faktor für die im Messquerschnitt installierten Geschwindigkeitsmessgeräte zu ermitteln.

Dafür mussten aus den zur Verfügung gestellten Datensätzen die Geschwindigkeiten an den Messorten der Geschwindigkeitsmesssysteme rückgerechnet werden, was insbesondere beim EasyQ nicht ganz einfach war, da er einen großen Querschnittsbereich für seine Messungen erfasst, wohingegen der FloDar nur einen Teil der Oberflächengeschwindigkeit aufnimmt. Dies mag wahrscheinlich auch einer der Gründe dafür sein, dass der ermittelte k-Faktor für den EasyQ keine so gute Übereinstimmung mit der Pegelschlüsselkurve während eines ausgewerteten Abflussereignisse zeigte wie der FloDar und zu dem auch stärker streute. Da die Mehrzahl der zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten jedoch auf Rückrechnungen von Flügelmessungen beruht, könnte sich dieser Umstand bei Vorliegen einer größeren Zahl von tatsächlich gemessenen Vergleichsdaten auch beim EasyQ besser darstellen.

Durch Auswertung eines größeren Abflussereignisses konnte auch der große Vorteil der auf Geschwindigkeitsmessungen beruhenden Durchflussmessmethoden gegenüber herkömmlichen Pegelschlüsseln gezeigt werden, da sie die tatsächlichen Abflussvorgänge im Gewässer einfach realitätsnäher darstellen und so z.B. auch den bei fallendem Wasserspiegel tatsächlich stattfindenden Hysteresiseffekt (unterschiedliche Durchflüsse bei gleichem Wasserstand) erfassen.

Die dankenswerterweise von drei Firmen am Stainzbach zur Verfügung gestellten Durchflussmengenmesssysteme haben sich bis auf das Messsystem der Firma Sommer sehr gut bewährt und einwandfrei funktioniert. Der von der Firma Sommer zur Verfügung gestellte Prototyp war im untersuchten Messquerschnitt und zum Zeitpunkt der durchgeführten Vergleichsmessungen noch nicht in der Lage die Oberflächengeschwindigkeit plausibel zu messen. Eine in der Zwischenzeit durchgeführte Weiterentwicklung des Auswertalgorithmus scheint jedoch sehr viel versprechend zu sein.

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau betreibt seit Oktober 2002 eine Kanalmonitoring-Messstation im Bereich einer Mischwasserentlastung, mit der in Echtzeit die zufließenden und abgeschlagenen Schmutzfrachten mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden.

Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit war, die für die Frachtermittlung notwendigen Durchflussmesssysteme zu kalibrieren und die ermittelten Kalibrierfunktionen zu validieren.

Für den Trockenwetterfall und damit für die Kalibration des im Zulaufkanals zur Mischwasserentlastung installierten Messsystems wurden zum einen in Summe 45 Referenzmessungen mit Speisesalz als Tracer durchgeführt und zum anderen eine Ultraschallkanalmaus als Referenzmesssystem in der Trockenwetterrinne verwendet.

Auf Basis der Tracermessungen wurde ein Wasserstands- k- Faktor-Zusammenhang ermittelt, der durch eine abschließende weitere Messkampagne validiert und nochmals verbessert wurde.

Auch für die im Entlastungsgerinne installierte Ultraschall-Kreuzkorrelation- Kanalmaus OCM-Pro sollte mittels einer eigenen Messkampagne eine Kalibrierfunktion ermittelt werden. Diese Messkampagne lieferte jedoch leider keine Ergebnisse, da während der Bearbeitung der Diplomarbeit aus den verschiedensten Gründen keine plausiblen Datensätze während Entlastungsvorgängen gewonnen werden konnten. Prinzipiell erscheint die Salztracermethode, welche sich im Kanal bei Trockenwetterbedingungen und stationären Abflussverhältnissen als sehr genaues Referenzmessverfahren erwiesen und bewährt hat, auch im Entlastungskanal geeignet zu sein, den OCM-Pro zu kalibrieren. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass man weitgehend stationäre Durchflüsse während der Tracermessung vorliegen.

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 2-1: Impfsystematik (momentane Impfung) (www.hydroskript.de/)	6
Abbildung 2-2: Impfsystematik (kontinuierliche Impfung) (www.hydroskript.de/)	6
Abbildung 2-3: MID Geräteaufbau.....	9
Abbildung 2-4: Systemgenauigkeit VSA (1999)	10
Abbildung 2-5: anzustrebender Einsatzbereich VSA (1999).....	12
Abbildung 2-6: Grundbegriffe der Messabweichung Uhl (2000)	14
Abbildung 3-1: Messstelle Stainzbach im Kartenblatt Preding (BEV)	21
Abbildung 3-2: Verhältnisse vor Ort am Pegel Wieselsdorf	22
Abbildung 3-3: Einzugsgebiet der Messstelle am Stainzbach.....	23
Abbildung 3-4: Längsschnitt Stainzbach (AMAP 3D)	24
Abbildung 3-5: Querschnitt Messstelle Stainzbach	25
Abbildung 3-6: FloDar- System (FloDar Manual, 2004).....	26
Abbildung 3-7: Dopplerspektrum	27
Abbildung 3-8: Eingebauter EasyQ.....	28
Abbildung 3-9: Messkopf des EasyQ.....	28
Abbildung 3-10: Das Messsystem der Firma Sommer	29
Abbildung 3-11: Geschwindigkeitsvergleich	30
Abbildung 3-12: Untersuchungsperiode am Stainzbach.....	31
Abbildung 3-13: Profilaufnahme des Messquerschnittes	32
Abbildung 3-14: Pegel- Querschnittsfläche- Zusammenhang im Messquerschnitt Stainzbach	33
Abbildung 3-15: Höhenstandsvergleich während des Ereignisses 1.....	34

Abbildung 3-16: Höhenstandsvergleich Ereignis 2	35
Abbildung 3-17: Korrigierter Höhenstandvergleich des Ereignisses 2	36
Abbildung 3-18: Geschwindigkeitsvergleich während des Ereignisses 2 ...	37
Abbildung 3-19: Auswertung der Flügelmessung für v- FloDar	38
Abbildung 3-20: Erfassungsbereich und Messfenster des EasyQ	40
Abbildung 3-21: Auswertung der Flügelmessungen für v- EasyQ	41
Abbildung 3-22: Ereignisauswertung FloDar	43
Abbildung 3-23: Ereignisauswertung EasyQ	43
Abbildung 3-24: Durchflussvergleich über den Untersuchungszeitraum ..	44
Abbildung 3-25: Durchflussvergleich während des Ereignisses 2	46
Abbildung 3-26: Kalibrierfaktor k für den EasyQ	48
Abbildung 3-27: Kalibrierfaktor k für den FloDar	49
Abbildung 3-28: Vergleich der korrigierten Durchflüsse während des Ereignisses 2	51
Abbildung 3-29: Vergleich der korrigierten FloDar- Ganglinie und der Pegelschlüsselganglinie	52
Abbildung 4-1: Übersicht über die Mess- und Überwachungssysteme in der Kanal-Monitoring-Messstation Graz (Gruber et al., 2003)	55
Abbildung 4-2: Montage und Situierung der MID-Sonde	57
Abbildung 4-3: Situierung der Q- Loggers	58
Abbildung 4-4: Datenlogger und Energieversorgung des Q- Loggers	59
Abbildung 4-5: Montage der Leitfähigkeitssonde in der Trockenwetterrinne des Mischwasserkanals	61
Abbildung 4-6: Korrektur der einzelnen Tracermessungen	63
Abbildung 4-7: Korrigierter Verlauf der Tracerkonzentration	64
Abbildung 4-8: Tatsächlicher Messquerschnitt der Zulaufmessung der Messstelle Graz	66

Abbildung 4-9: Wasserstands- Querschnittszusammenhang	67
Abbildung 4-10: Höhenstandsvergleich (MK I)	68
Abbildung 4-11: Geschwindigkeitsvergleich (MK I).....	69
Abbildung 4-12: Nicht korrigierte Ganglinien während der MK I	70
Abbildung 4-13: Korrigierte Ganglinie während der MK I nach Berücksichtigung der Profilaufnahme.....	71
Abbildung 4-14: Aus MK I ermittelte k-Faktoren.....	72
Abbildung 4-15: Korrigierte Ganglinie während der MK I nach Berücksichtigung der Kalibrierfunktionen	73
Abbildung 4-16: Übersicht der Messstation Graz aus der Vogelperspektive inklusive der Impf- und Messstelle.	74
Abbildung 4-17: Ablauf einer erweiterte Tracermessung	79
Abbildung 4-18: Korrigierter Konzentrationsverlauf einer erweiterten Tracermessung.....	79
Abbildung 4-19: Ablauf der Messkampagne III.....	81
Abbildung 4-20: Höhenstandsvergleich (MK III)	82
Abbildung 4-21: Geschwindigkeitsvergleich (MK III).....	83
Abbildung 4-22: Die mit den Kalibrierfunktionen der MK I korrigierten Durchflussganglinien während der MK III	84
Abbildung 4-23: Kalibration FloDar (MK III).....	85
Abbildung 4-24: Kalibration Q-Logger (MK III)	86
Abbildung 4-25: Mit Kalibrationen (MK III) korrigierte Durchflüsse während der Messkampagne III	87

Literaturverzeichnis:

- ABWASSEREMISSIONSVERORDNUNG über die Begrenzung von Emissionen aus Mischwasserentlastungen in Mischkanalisationen (AEV Mischwasser), Entwurf des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, März 2001, [CELEX-Nr.: 376L0464, 391L0271].
- ATV (1977): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. ATV Arbeitsblatt A128
- DORFER, C. (2004), Transportvorgänge in Mischwasserkanälen auf Basis von Online-Messungen, Diplomarbeit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz
- GRUBER ET AL. (2004): Kanal-Messstation: Aufbau und Betriebserfahrungen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 42, Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft, Graz, Seite E1-E28
- DIN 1319 TEIL 1, Grundbegriffe der Messtechnik, Allgemeine Grundbegriffe, Beuth- Verlag, Berlin/ Köln (1985)
- DIN 19559 TEIL 1, Durchflussmessung von Abwasser in offenen Gerinnen und Freispiegleitungen- Allgemeinen Angaben, Beuth- Verlag, Berlin/ Köln (1983)
- UHL (2000), Durchflussmessung an Regenüberlaufbecken, ATV-DVWK-Schriftenreihe BAND 19, Hennef (2000), Seite 111 bis Seite 132
- VSA (1999), Messtechnik in der Siedlungswasserwirtschaft, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute; Zürich (1999)
- KÖLLING, C. (2000), Durchflussmessung an Regenüberlaufbecken, ATV-DVWK-Schriftenreihe BAND 19, Hennef (2000), Seite 35 bis Seite 47
- WEDENIG, M. (2004), Quantifizierung von abgeschlagenen Schmutzfrachten aus einer Mischwasserentlastung in einen Vorfluter, Diplomarbeit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz