

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Grundlagen der Durchflussmessung.....</b>	<b>7</b>
2.1 Der Durchfluss.....	7
2.1.1 Parameter.....	7
2.1.2 Wasserbilanz.....	8
<b>2.2 Der Abflussprozess.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Abflussbildung.....	10
2.2.2 Abflusskonzentration.....	10
2.2.3 Fließvorgang im offenen Gerinne.....	11
2.2.3.1 Flusslauf.....	12
2.2.4 Fließgeschwindigkeit.....	12
<b>3. Die Durchflussermittlung.....</b>	<b>13</b>
3.1 Einführung.....	13
<b>3.2 Der Wasserstand.....</b>	<b>14</b>
3.2.1 Ermittlung des Wasserstandes.....	14
3.3 Verschiedene Arten von Messpegel.....	15
3.3.1 Nichtregistrierende Pegel.....	15
3.3.1.1 Lattenpegel.....	15
3.3.2 Selbstregistrierende Pegel.....	16
3.3.2.1 Schwimmscheibpegel.....	16
3.3.2.2 Hydrostatische Pegelmessung.....	17
3.3.2.3 Vor- und Nachteile der hydrostatischen Pegelmessung.....	18
3.3.3 Berührungslose Pegelmessung.....	18
3.3.3.1 Pulsradar.....	18
3.3.3.2 Ultraschall.....	19
3.3.3.3 Vor- und Nachteile der berührungslosen Pegelmessungen.....	19
3.4 Gegenüberstellung der wichtigsten Pegelmessmethoden.....	19
<b>4. Direkte Durchflussmessung.....</b>	<b>20</b>
4.1 Volumetrische Messung mittels Messgefäß.....	20
4.1.1 Messprinzip.....	20
4.1.2 Vor- und Nachteile der Gefäßmessung.....	20
4.2 Messwehre.....	21
4.2.1 Messprinzip.....	21
4.2.2 Rechtecküberfall.....	22
4.2.2.1 Durchflussberechnung.....	22
4.2.3 Dreiecksüberfall.....	23
4.2.3.1 Durchflussberechnung.....	24
4.2.4 Vor- und Nachteile der Durchflussmessung mittels Messwehr.....	25
4.3 Messrinnen.....	25
4.3.1 Venturi-Kanal.....	25
4.3.1.1 Messprinzip.....	25
4.3.1.2 Vor- und Nachteile von Messrinnen.....	26

<b>5. Indirekte Durchflussmessung.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Durchflussmessung mit dem hydrometrischen Flügeln.....</b>	<b>27</b>
5.1.1 Messprinzip.....	27
5.1.2 Meßflügel und zugehörige Ausrüstung.....	29
5.1.2.1 Stangenflügel.....	30
5.1.2.2 Messflügel mit Schwimmflügelausrüstung.....	31
5.1.3 Wahl des Messstandortes.....	32
5.1.4 Messarten.....	33
5.1.4.1 Punktmessungen.....	33
5.1.4.2 Integrationsmethode.....	35
5.1.5 Auswertemethoden.....	35
5.1.6 Vor- und Nachteile von hydrometrischen Messflügeln.....	38
<b>5.2 Elektromagnetische Messmethode.....</b>	<b>39</b>
5.2.1 Messprinzip.....	39
5.2.2 Messvorgang.....	40
5.2.3 Vor- und Nachteile der elektromagnetischen Messsonde.....	41
<b>5.3 Durchflussmessung mit Markierungsstoffen (Tracern).....</b>	<b>41</b>
5.3.1 Messprinzip.....	41
5.3.1.1 Verdünnungsverfahren mit kontinuierliche Injektion.....	43
5.3.1.2 Verdünnungsverfahren mit Momentaninjektion.....	44
5.3.2 Durchflussmessung mit der Salzverdünnungsmethode.....	45
5.3.2.1 Messvorgang.....	45
5.3.2.2 Praxisbeispiel eines Salzverdünnungsverfahrens.....	49
5.3.3 Radioaktive Tracer.....	52
5.3.3.1 Messprinzip.....	52
5.3.4 Fluoreszenztracer.....	52
5.3.4.1 Messprinzip.....	52
5.3.5 Vor- und Nachteile der Tracermessung.....	53
<b>5.4 Ultraschallmessung.....</b>	<b>54</b>
5.4.1 Messprinzip.....	54
5.4.1.1 Laufzeitdifferenz-Verfahren.....	54
5.4.1.2 Doppler-Verfahren.....	55
5.4.2 Akustik-Doppler-Current-Profiler (ADCP).....	57
5.4.3 Vor- und Nachteile von Ultraschallmessgeräten.....	57
<b>6. Vergleichsmessung.....</b>	<b>58</b>
<b>6.1 Vergleichsmessung: Hydrometrischer Flügel / elektromagnetische     Messsonde(Nautilus) / Salzverdünnungsmethode.....</b>	<b>59</b>
6.1.1 Einleitung.....	59
6.1.2 Ergebnisse.....	59
6.1.3 Schlussfolgerungen.....	64
<b>6.2 Vergleichsmessung: Hydrometrischer Flügel/Salzverdünnungsmethode..</b>	<b>64</b>
6.2.1 Einleitung.....	64
6.2.2 Ergebnisse.....	64
6.2.3 Schlussfolgerungen.....	65
<b>6.3 Vergleich von verschiedenen Auswertemethoden.....</b>	<b>65</b>
6.3.1 Einleitung.....	65
6.3.2 Messmethodiken.....	66

6.3.3 Ergebnisse.....	66
6.3.4 Schlussfolgerungen.....	71
<b>6.4 Durchflussmessung an der Mur mittels ADCP Sonde.....</b>	<b>71</b>
6.4.1 Einleitung.....	71
6.4.2 Messergebnisse.....	73
<b>7. Gesamtbewertung und Ausblick.....</b>	<b>76</b>
7.1 Gegenüberstellung der einzelnen Messverfahren.....	71
7.2 Bewertung von Auswerteverfahren.....	78
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>79</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zur Erläuterung der Begriffe Abfluss und Durchfluss (nach Dyck u. Peschke 1995, S. 72).....	8
Abbildung 2: Der Abflussprozess (Baumgartner u. Liebscher 1990, S.476).....	9
Abbildung 3: Der Abflussprozess (nach Mendel 2000, S. 19, verändert).....	10
Abbildung 4: Querschnitt eines Flusslaufes mit Vorland (Baumgartner u. Liebscher 1990, S.472).....	12
Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung $v_0$ (siehe violette Linie) in m/s in einem Messquerschnitt (Messstelle Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003).....	13
Abbildung 6: Zur Erklärung des Begriffs Wasserstand (Dyck u. Peschke 1995, S. 89).....	14
Abbildung 7: E-Teilung einer Pegellatte (Dyck u. Peschke 1995, S. 90).....	15
Abbildung 8: Schreibpegelstation (nach Dyck u. Peschke 1995, S. 91, verändert).....	16
Abbildung 9: Aufbau einer Druckmesssonde (Wyder 1998, S. 48).....	17
Abbildung 10: Pneumatische Druckmessung (Wyder 1998, S. 43, verändert).....	17
Abbildung 11: Druckmesspegelstation, (siehe Abb. 9), Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2004.....	17
Abbildung 12: Scharfkantiges Messwehr in einem Rechteckgerinne ohne Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99).....	22
Abbildung 13: Scharfkantiges Messwehr in einem Rechteckgerinne ohne Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99).....	22
Abbildung 14: Scharfkantiges Messwehr in einem Dreieckgerinne mit Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99).....	23
Abbildung 15: Dreieckswehr mit Seitenkontraktion, Annabach am 29.04.2004.....	24
Abbildung 16: Venturikanal (nach Dyck u. Peschke 1995, S. 101 verändert).....	25
Abbildung 17: Räumliche Darstellung des Durchflussquerschnittes und der Geschwindigkeitsverteilung (Dyck u. Peschke 1995, S.95).....	27
Abbildung 18: Graphische Darstellung des Messquerschnittes und der Durchflusswassermenge (Handbuch für die Abflussmengenmessung 1982, S.3).....	28
Abbildung 19: Einteilung eines Messquerschnitts in Lamellen: $B$ Wasserspiegelbreite, $b_i$ Breite der $i$ -ten Lamelle, $h_{i1}$ , $h_{i3}$ Tiefen an den Grenzen der $i$ -ten Lamelle, $h_{i2}$ Tiefe der Messlotrechten (Dyck u. Peschke 1995, S. 93).....	28
Abbildung 20: Messflügel (Pegelvorschrift Anlage D 1998, S. 10).....	29
Abbildung 21: Messflügel in Stangenflügelausrüstung (Pegelvorschrift Anlage D, S. 11, leicht verändert).....	31
Abbildung 22: Messflügel mit Schwimmflügelausrüstung (Foto vom 25.11.2003, Messstelle Bruck/Mur).....	31
Abbildung 23: Seilkrananlage mit Messflügel als Schwimmflügelausrüstung an Laufkatze (Foto vom 25.11.2003, Bruck/Mur).....	32

Abbildung 24: Graphische Auswertung einer Flügelmessung (Messstelle Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003).....	37
Abbildung 25 und 26: Elektromagnetische Messsonden (Nautilus), (Messstation Saifen bei Pöllau am 15.10.2003) .....	40
Abbildung 27: Messausrüstung: Nautilus – Messsonde, Auswertegerät, Kabel (Messstation Saifen bei Pöllau am 28.04.2004) .....	40
Abbildung 28: Tracer-Verdünnungsverfahren mit kontinuierlicher Injektion (Durchflusshandbuch 2003, S. 186) .....	43
Abbildung 29: Tracer-Verdünnungsverfahren mit Momentaninjektion - Integrationsmethode, (Durchflusshandbuch 2003, S. 184) .....	44
Abbildung 30: Leitfähigkeitskurve einer Durchflussmessung mit Grundleitfähigkeit (siehe techn. Bericht 2000, S. 12) .....	49
Abbildung 31: Durchführung der Feldeichung an der Messstelle Saifen in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003.....	50
Abbildung 32: Einbringung des aufgelösten Salzes an der Messstelle Prätisbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003.....	50
Abbildung 33: Messsonden zur Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit an der Messstelle Prätisbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003.....	51
Abbildung 34: Durchgangskurve der Integrationsmessung (Verlauf der Leitfähigkeit in Funktion zur Zeit) an der Messstelle Prätisbach / Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003 (rote Linie: Messung Sonde 1 (37,94 l/s), grüne Linie: Messung Sonde 2 (37,45 l/s))51	
Abbildung 35: Ultraschall-Durchflussmessung mittels Laufzeitdifferenz-Verfahrens, Grundriss eines Flusslaufes), (Durchflusshandbuch 2003, S. 133).....	55
Abbildung 36: Ultraschall-Durchflussmessung mittels Doppler-Effekt, (Grundriss eines Flusslaufes), (Durchflusshandbuch S. 131) .....	56
Abbildung 37: Messstellen der Durchflussmessungen: Leoben/Mur, Bruck/Mur, Reinberg/Voraubach, Pöllau 1/Prätisbach, Pöllau 2/Dürre Saifen, Pöllau 3/Saifenbach, Wörth/Lafnitz, Mureck/Mur, (Karte der Hydrografischen Landesabteilung Steiermark, DI Dr. Robert Schatzl) .....	58
Abbildung 38: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	60
Abbildung 39: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	60
Abbildung 40: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	61
Abbildung 41: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	61
Abbildung 42: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	61
Abbildung 43: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	62
Abbildung 44: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003.....	62
Abbildung 45: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003.....	63
Abbildung 46: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003.....	63
Abbildung 47: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss.....	67
Abbildung 48: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss.....	69
Abbildung 49: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss.....	71

Abbildung 50: ADCP Messgerät des hydrographischen Dienstes Slowenien bei der Messung am Pegel Mureck/Mur.....	72
Abbildung 51: Darstellung der Auswertesoftware.....	73
Abbildung 52: Vergleich der gemessenen Wassertiefen aus ADCP- und Flügelmessung.	74
Abbildung 53: Vergleich der gemessenen mittleren Geschwindigkeiten aus ADCP- und Flügelmessung.....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abhängigkeit des Überfallbeiwertes $\mu$ von den Verhältnissen $b/b_0$ und $h/w$ für das Thomson-Wehr.....	24
Tabelle 2: Ermittelte Durchflussmenge (l/s) und mittlere Geschwindigkeit $v_m$ nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	59
Tabelle 3: Ermittelte Durchflussmenge (l/s) und mittlere Geschwindigkeit $v_m$ nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003.....	61
Tabelle 4: Ermittelte Durchflussmenge (l/s) und mittlere Geschwindigkeit $v_m$ nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003.....	62
Tabelle 5: Vergleich der Durchflussmengen (l/s) nach 3 verschiedenen Verfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau / Prätisbach bei Pöllau / Dürre Saifen vom 15.10.2003, (Flügelmessung = 100 %)......	63
Tabelle 6: Vergleich der Durchflussmengen (l/s) nach 2 verschiedenen Messverfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau und Reinberg/Voraubach vom 12.11.2003, (Flügelmessung = 100 %)......	65
Tabelle 7: Ermittelte Durchflussmenge [ $m^3/s$ ] und der Durchschnittsgeschwindigkeit $v_m$ [ $m/s$ ] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Wörth an der Lafnitz vom 12.11.2003.....	66
Tabelle 8: Abweichung der mittleren Fließgeschwindigkeit nach Kreps (100 %) zu den übrigen Methoden.....	67
Tabelle 9: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Kreps zu den übrigen Methoden.....	67
Tabelle 10: Ermittelte Durchflussmenge [ $m^3/s$ ] und der Durchschnittsgeschwindigkeit [ $m/s$ ] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Bruck an der Mur vom 25.11.2003.....	68
Tabelle 11: Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nach Kreps (100 %) zu den übrigen Methoden.....	68
Tabelle 12: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Kreps (100 %) zu den übrigen Methoden.....	68
Tabelle 13: Ermittelte Durchflussmenge [ $m^3/s$ ] und der Durchschnittsgeschwindigkeit [ $m/s$ ] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Leoben an der Mur vom 25.11.2003.....	70
Tabelle 14: Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nach Kreps (100 %) zu den übrigen Methoden.....	70
Tabelle 15: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Kreps (100 %) zu den übrigen Methoden.....	70
Tabelle 16: Vergleich der gemessenen Durchflüsse bzw. mittleren Geschwindigkeiten aus ADCP- und Flügelmessung.....	74

# 1. Einleitung und Zielsetzung

Diese Diplomarbeit wurde von der Hydrographischen Landesabteilung Steiermark (Fachabteilung 19A - Referat I – Hydrographie) in Auftrag gegeben. Ziel dieser Arbeit ist es, unterschiedliche Auswertemethoden und Messgeräte zur Durchflussermittlung an Oberflächengewässern zu vergleichen und deren Praktikabilität zu prüfen. Zusätzlich sollen noch die Vor- bzw. Nachteile der untersuchten Methoden aufgezeigt werden. Es stellte sich auch die Frage, inwieweit die einzelnen Messergebnisse bzw. Auswertemethoden miteinander vergleichbar sind.

Die Arbeitsmethodik bestand zum Ersten darin, eine Vielzahl von Fachliteratur und Arbeitsberichte von Durchflussmessungen auszuarbeiten, um einen Überblick über die Thematik zu erhalten. In weiterer Folge wurden die im europäischen Raum im operationellen Dienst verwendeten Methoden sowie Messgeräte nach verschiedenen Gesichtspunkten gegenübergestellt und Vergleichsmessungen an mehreren Messstellen in der Steiermark mit ausgewählten Messgeräten durchgeführt. Zur Auswertung der Messdaten wurde vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz eine spezielle Software (BIBER V 3.0) zur Verfügung gestellt.

Insgesamt wurden an acht verschiedenen Messstellen (Leoben/Mur, Bruck/Mur, Reinberg/Voraubach, Pöllau/Prätisbach, Pöllau/Dürre Saifen, Pöllau/Saifenbach, Wörth/Lafnitz, Mureck/Mur) Vergleichsmessungen durchgeführt. Dabei kam der hydrometrische Flügel als Stangenflügel wie auch als Schwimmflügel (Delphin) zum Einsatz. Zusätzlich wurden Durchflussmessungen mit Hilfe einer elektromagnetischen Messsonde (Nautilus-Messsonde der Firma OTT), dem Salzverdünnungsverfahren (Integrationsverfahren) und einem Akustik-Doppler-Current Profiler durchgeführt.

Die Messergebnisse der Durchflussmessungen wurden verglichen und ausgewertet. Zusätzlich wurden an ausgewählten Pegelprofilen verschiedene Auswertemethoden angewendet und die Ergebnisse gegenübergestellt. Dabei kam das Verfahren der verringerten Messpunkte, sowie die Drei-, Fünf-, Sechs- und die Vielpunktmethode zum Einsatz.

## 2. Grundlagen der Durchflussmessung

Die folgenden Abschnitte sind, falls nicht anders angegeben, eng an BAUMGARTNER und LIEBSCHER (1990) angelehnt.

### 2.1 Der Durchfluss

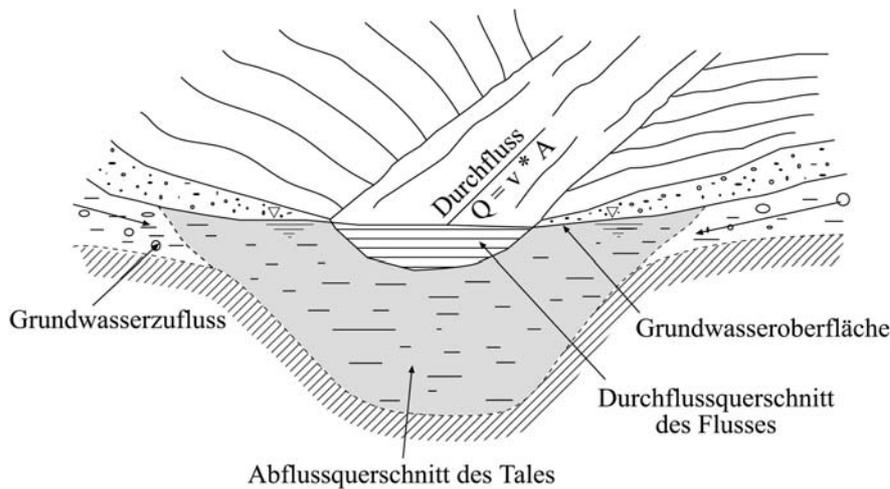
#### 2.1.1 Parameter

Ziel der Durchflussmessung ist es, das Dargebot an Oberflächenwasser in ausgewählten Flussquerschnitten zu bestimmen (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 92).

Früher wurde die Wasserführung eines fließenden Gewässers durch den Wasserstand des Gerinnes gekennzeichnet. Da der Wasserstand selbst beim Vergleich von Fließgewässern bzw. verschiedener Fließgewässerabschnitte nichts über die Wasserführung aussagt, ist man dazu übergegangen, die Wasserführung eines oberirdischen Fließgewässers durch den sogenannten Durchfluss zu kennzeichnen.

Unter dem Begriff Durchfluss ( $Q$ ) wird in der Hydrologie das Wasservolumen, welches pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt durchfließt, verstanden (*siehe Abbildung 1*). Dabei errechnet sich der Durchfluss  $Q$ , indem die Fließgeschwindigkeit  $v$  mit der Gewässerquerschnittsfläche  $A$  multipliziert wird. Als Maßeinheit werden üblicherweise  $\text{m}^3/\text{s}$  oder auch  $\text{l/s}$  verwendet. Das durch einen Durchflussquerschnitt fließende Wasservolumen kommt aus einem dieser Stelle zugeordneten Gebiet, das als Einzugsgebiet ( $A_E$ ) bezeichnet wird. Jedem Punkt eines Wasserlaufs kann ein bestimmtes Einzugsgebiet [ $\text{km}^2$ ] zugeordnet werden.

In der Literatur werden die Begriffe Durchfluss (engl. discharge) und Abfluss (engl. runoff) oft nicht klar voneinander unterschieden. Nachfolgende *Abbildung 1* soll den Unterschied dieser beiden Begriffe verdeutlichen:



**Abbildung 1: Zur Erläuterung der Begriffe Abfluss und Durchfluss (nach Dyck u. Peschke 1995, S. 72)**

Als Abfluss wird der gesamte Volumenfluss je Zeiteinheit, der das Einzugsgebiet ober- bzw. unterirdisch durch den Abflussquerschnitt oder an anderer Stelle unterirdisch verlässt, verstanden. Im Gegensatz dazu wird unter dem Begriff Durchfluss der Volumenfluss, der je Zeiteinheit durch einen Oberflächengewässerquerschnitt fließt, verstanden (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 72).

Im Zusammenhang mit Durchflussmessungen wird somit der Begriff Durchfluss verwendet.

Mit Hilfe von Durchflussmessungen in Verbindung mit Wasserstandsaufzeichnungen kann die Abflussganglinie im Gewässer ermittelt werden, welche die Ausgangsgrundlage für die Erfassung des oberirdischen Wasserdargebotes ist (MANIAK 1993, S. 58).

Für jeden Durchflussquerschnitt ist der Durchfluss ( $Q$ ) eine Funktion des Wasserstandes ( $W$ ) und umgekehrt  $W = f(Q)$ .

Ein Fließgewässer mit ständiger Wasserführung wird je nach Wasserführung und Größe als Bach, Fluss oder auch als Strom bezeichnet. In der Wasserwirtschaft wie auch in der Hydrologie wird häufig der Begriff Vorfluter verwendet. Wasser, das mit dem natürlichen Gefälle oder durch künstliche Hebung oberirdisch abfließt, bezeichnet man als Vorflut. Daher nennt man ein der Vorflut dienendes Gewässer Vorfluter.

### 2.1.2 Wasserbilanz

Ein Fundamentalgesetz der Hydrologie beruht auf der Kontinuitätsbeziehung (= Massenerhaltungssatz). Dieses Gesetz besagt, dass die Summe des einem Raum oder Körper in einem bestimmten Zeitabschnitt zugeführten Wasservolumens gleich dem abgeführten

Wasservolumen und der Änderung des gespeicherten Wasservolumens ist, unabhängig von der Größe des Raumes oder des Körpers und der Länge des Zeitabschnittes. Das bedeutet, dass das im Umlauf befindliche Wasser nicht verbraucht, sondern lediglich umverteilt wird. Daraus kann man folgende mathematische Gleichung, die sogenannte Wasserbilanzgleichung ableiten:  $P = E + R + \Delta S$  wobei

- P = Niederschlag (engl. precipitation)
- E = Verdunstung (engl. evaporation)
- R = Abfluss (engl. runoff)
- $\Delta$  = Änderungsbetrag
- S = Speicherung (engl. storage)

Die Speicherung S kann dabei als Eis, Schnee, Oberflächenwasser und unterirdisch Wasser (Boden- und Grundwasser) erfolgen. Für lange Zeiträume kann die Änderung der Speicherung unberücksichtigt bleiben, d.h.  $\Delta S = 0$  (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 25).

## 2.2 Der Abflussprozess

Der Abflussprozess kann unterteilt werden in Abflussbildung, Abflusskonzentration und Fließvorgang im offenen Gerinne. Diese Prozesse laufen parallel nebeneinander ab und lassen sich in zahlreiche Unterprozesse aufgliedern. Aus *Abbildung 2* wird die Entstehung und das Zusammenwirken dieser Prozesse ersichtlich.

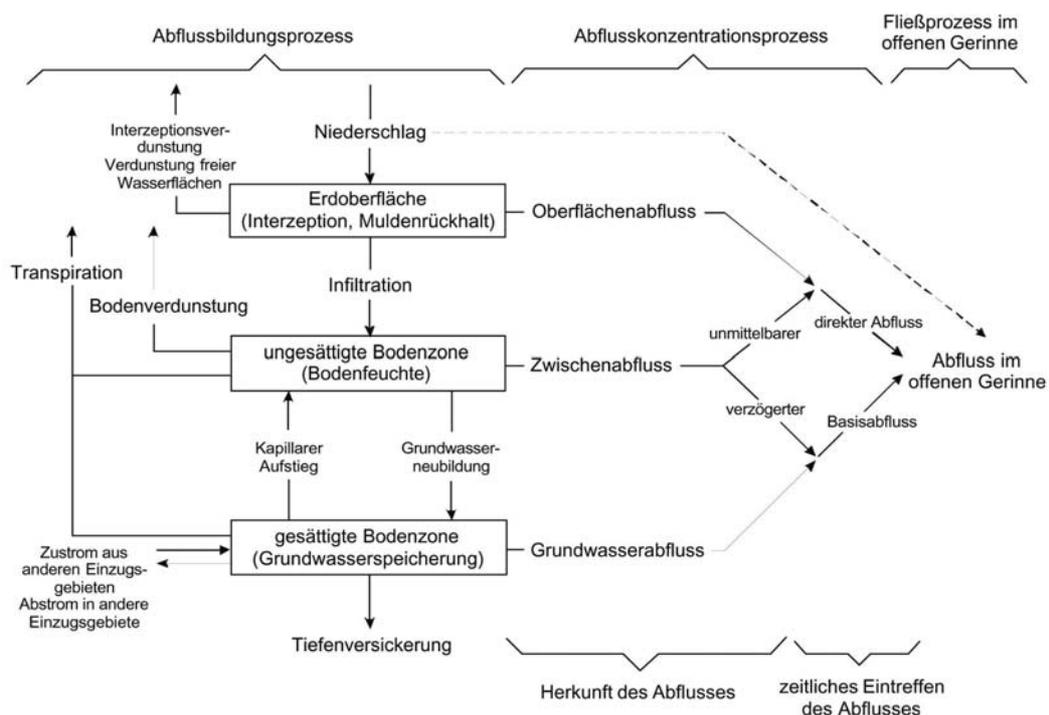


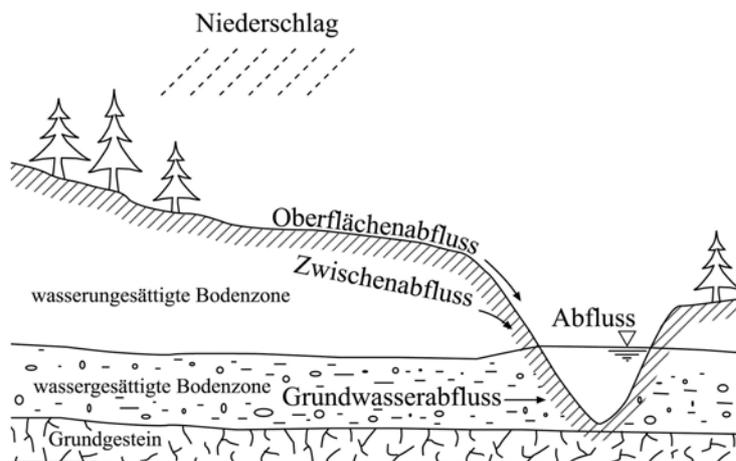
Abbildung 2: Der Abflussprozess (Baumgartner u. Liebscher 1990, S.476)

### 2.2.1 Abflussbildung

Unter der Abflussbildung wird der Prozess verstanden, bei dem aus dem den Erdboden erreichenden Niederschlag der zum Abfluss gelangende Anteil des Niederschlagswassers (abflusswirksamer bzw. „effektiver Niederschlag“) gebildet wird. Dabei spielen die Prozesse Interzeption, Verdunstung, Infiltration, Oberflächen-, Bodenfeuchte- und Grundwasserspeicherung eine Rolle (siehe *Abbildung 2*). Verluste an die Vegetationsdecke (Interzeption) oder Zwischenspeicherung in der Schneedecke verhindern bzw. verzögern den Abfluss des Niederschlagswassers. Jener Niederschlag, der die Erdoberfläche erreicht, infiltriert in den Boden. Die Intensität der Infiltration ist wiederum abhängig von der Wasseraufnahmefähigkeit und der Durchlässigkeit des Bodens. Ein weiterer Teil des Niederschlagswassers kann durch Verdunstung verloren gehen.

### 2.2.2 Abflusskonzentration

Beim Prozess der Abflusskonzentration wird der flächenmäßig verteilte effektive Niederschlag durch Fließvorgänge auf oder unter der Erdoberfläche zum nächstgelegenen Vorfluter geleitet. In *Abbildung 3* ist dieser Prozess grafisch dargestellt:



**Abbildung 3: Der Abflussprozess (nach Mendel 2000, S. 19 verändert)**

Das Niederschlagswasser fließt oberflächlich ab, falls die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationsrate ist. Diese Art von Abfluss wird als Oberflächenabfluss bezeichnet. Die Fließzeit zum nächstgelegenen Vorfluter ist dabei in der Regel nur kurz. Der Oberflächenabfluss setzt mit dem Niederschlag ein, sofern dessen Intensität die Infiltrationsrate übersteigt. Nach dem Niederschlagsereignis klingt der Oberflächenabfluss schnell wieder ab.

Das in das Erdreich infiltrierte Wasser kann entweder in das Grundwasser gelangen, oder es trifft auf weniger durchlässige Schichten, wo es zunächst gestaut wird und sich ein mit Wasser gesättigter Horizont bildet. Unter dem Einfluss der Schwerkraft bewegt sich das Wasser aus diesen Bereichen parallel zu der weniger durchlässigen Schicht, dem Weg des größten Gefälles folgend. Diese Art von Abfluss wird als Zwischenabfluss (engl. interflow) bezeichnet.

Wenn das Wasser entweder direkt oder auch über den Zwischenabfluss das Grundwasser erreicht, trägt es zur Neubildung des Grundwassers bei und bewegt sich gleichfalls dem größten Gefälle des gesättigten Bodenwasserbereichs folgend, als sog. Grundwasserabfluss dem Vorfluter zu. Der Grundwasserabfluss bestimmt in niederschlagsarmen Zeiten die Wasserführung eines Fließgewässers.

### **2.2.3 Fließvorgang im offenen Gerinne**

Durch das Eintreten von Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss in das Gewässerbett kommt es dort zu einer Ansammlung von Wasser. Dieses folgt dem größten Gefälle und es bildet sich ein Fließvorgang im offenen Gerinne.

Der Abflussvorgang wird durch topographische Verhältnisse beeinflusst. Das Abflussregime, d.h. der charakteristische Verlauf des Abflusses eines Fließgewässers wird geprägt durch klimatologische, geologische, geomorphologische, pedologische, vegetative und anthropogene Gegebenheiten des Einzugsgebietes. Auf die zuvor genannten Einflussfaktoren möchte ich nicht näher eingehen und verweise deshalb auf (BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1990, S 504 – 537).

Durch das Gefälle (Wasserlaufgefälle) eines Gerinnes wird ein natürlicher Fließvorgang im Gewässerbett ermöglicht. Es wird zwischen dem Sohlengefälle und dem Wasserspiegelgefälle unterschieden, wobei beide Gefällearten das Verhältnis des Höhenunterschiedes zweier Punkte der Gewässersohle bzw. des Wasserspiegels zur zugehörigen Flusslänge darstellen. Der Unterschied zwischen dem Sohlengefälle und dem Wasserspiegelgefälle ist, dass das Wasserspiegelgefälle nicht nur vom Sohlengefälle, sondern auch von der Wasserführung (steigend oder fallend) abhängig ist. Näheres dazu siehe Baumgartner und Liebscher S.494: *Arten der Gerinneströmung*).

Die Art des Fließens in einem Gerinne kann laminar oder auch turbulent sein. Beim laminaren Fließvorgang kommt es zu keiner Vermischung des Wassers bei parallel zueinander verlaufenden Stromlinien, d.h. es ist keine Turbulenz vorhanden. Der laminare Abfluss kommt in natürlichen Gerinnen nur selten vor (LESER 1984, Band 1, S. 341).

Im Gegensatz dazu versteht man unter einem turbulenten Abfluss eine unregelmäßige, unter Wirbelbildung erfolgende Strömung in fließenden Gewässern (LESER 1984, Band 2, S. 313).

### 2.2.3.1 Flusslauf

Das Wasser bewegt sich in einer Eintiefung der Landschaft welche als Fließgewässerbett bezeichnet wird. Die Begrenzungslinie eines Fließgewässers bei mittlerer Wasserführung nennt man Uferlinie. Der untere Teil des Gewässerbettes wird als Gewässersohle und der seitlichen Teil als Ufer bezeichnet. Wenn das Wasser das Gewässerbett übertritt, spricht man von Ausufern. Die zusätzlich eingenommene Landfläche beim Ausufern wird Überschwemmungsgebiet genannt. Der Bereich der über dem mittleren Wasserstand liegt, wird als Vorland bezeichnet (*siehe Abbildung 4*).

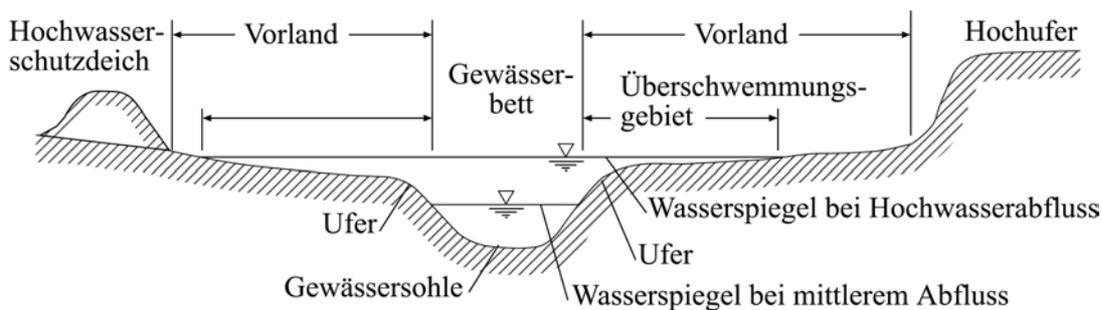


Abbildung 4: Querschnitt eines Flusslaufes mit Vorland (Baumgartner u. Liebscher 1990, S.472)

### 2.2.4 Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit ist von der Wasserführung, der Reibung und dem Gefälle im Gewässerbett abhängig. Durch die unterschiedliche Gewässertiefe im Gewässerbett ist die Fließgeschwindigkeit sehr ungleichmäßig über den Gewässerquerschnitt verteilt (*siehe Abbildung 5*).

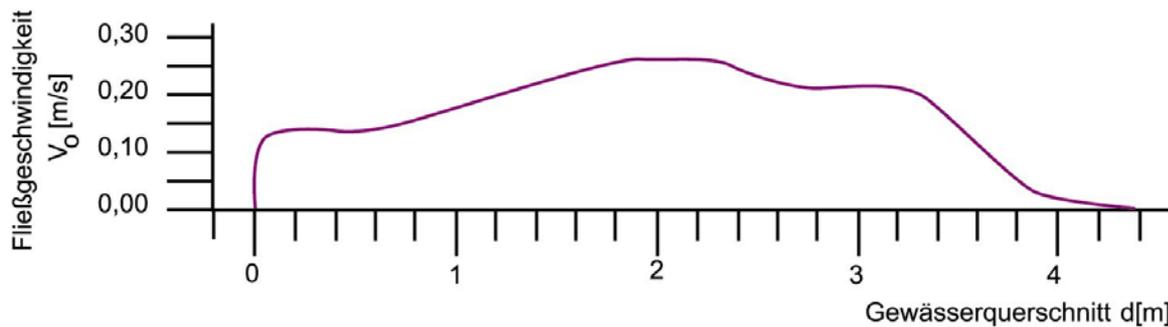


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung  $v_0$  (siehe violette Linie) in m/s in einem Messquerschnitt (Messstelle Saifenfach bei Pöllau am 15.10.2003)

### 3. Die Durchflussermittlung

#### 3.1 Einführung

Wie bereits in *Kap. 2.1.1* erwähnt, versteht man unter dem Durchfluss das Wasservolumen, welches pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt durchfließt.

Der Durchfluss kann direkt oder auch indirekt ermittelt werden. Die direkte Ermittlung des Durchflusses kann durch Messwehre oder Messgerinne, oder selten auch volumetrisch mit einem Messbehälter erfolgen. Die volumetrische Methode kann nur bei geringen Wassermengen eingesetzt werden.

Um den Durchfluss indirekt zu ermitteln, benötigt man die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit  $v$  und die dazugehörigen Durchflussfläche  $A$ . Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit  $v$  kann nur aus zahlreichen Geschwindigkeitsmessungen im Messquerschnitt ermitteln werden. Die am häufigsten angewendete Methode bei der Durchflussmessung ist die Geschwindigkeitsmessung mittels hydrometrischen Messflügels in unterschiedlichen Messtiefen und in verschiedenen Messlotrechten. Genaueres dazu siehe *Kapitel 5.1*.

Die Gleichung  $Q = v \cdot A$  dient zur Ermittlung des Durchflusses, wobei:

$Q$  = Durchfluss  $\text{m}^3/\text{s}$

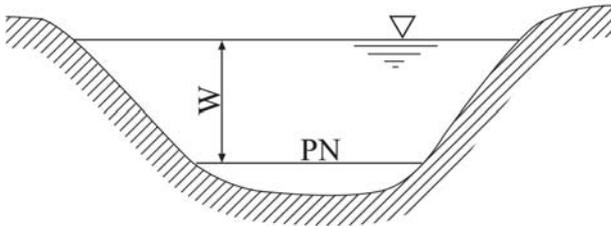
$v$  = Fließgeschwindigkeit  $\text{m}/\text{s}$

$A$  = durchflossener Querschnitt in  $\text{m}^2$

(DYCK u. PESCHKE 1995, S. 93)

## 3.2 Der Wasserstand

Unter dem Begriff Wasserstand ( $W$ ) wird der lotrechte Abstand eines Punktes des Wasserspiegels von einem festgelegten Bezugshorizont (Pegelnnull, PN) verstanden (siehe *Abbildung 6*). Wasserstände können relativ einfach mittels Pegels erfasst werden. (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 88)



**Abbildung 6:** Zur Erklärung des Begriffs Wasserstand (Dyck u. Peschke 1995, S. 89)

Um das oberirdische Wasserdargebot in ausgewählten Gewässern ermitteln zu können, sind Wasserstandsaufzeichnung und zusätzlich Durchflussmessungen Voraussetzung (MANIAK 1993, S. 58).

### 3.2.1 Ermittlung des Wasserstandes

Die Ermittlung des Wasserstandes ist relativ einfach mit Hilfe von Pegeln möglich.

Bereits vor 4000 Jahren wurden in Ägypten Pegel zur Beobachtung des Nilwasserstands (Nilometer) errichtet. Der Nilometer auf der Insel Elephantine war nur Priestern zugänglich, welche für jedes Jahr in Abhängigkeit vom Nilwasserstand die Steuern festlegten (DYCK und PESCHKE 1995, S. 76). Genaueres zur Geschichte der Hydrologie siehe *Dyck und Peschke 1995, S. 76-79*.

Regelmäßige Beobachtungen des Wasserstandes wurden erst seit Beginn des 19. Jahrhundert durchgeführt. Als Beispiel sind Pegelbeobachtungen am Rhein in Basel ab 1808 zu nennen (WYDER 1998, S. 11).

## 3.3 Verschiedene Arten von Messpegeln

### 3.3.1 Nichtregistrierende Pegel

#### 3.3.1.1 Lattenpegel

Die einfachste Form einer Wasserstandsmessstelle, auch als Pegelmessstelle oder kurz Pegel bezeichnet, ist der Lattenpegel, an dem ein Beobachter in regelmäßigen Zeitabständen den Wasserstand abliest. Im Normalfall wird der Wasserstand einmal täglich abgelesen. Bei Hochwasser erfolgt die Ablesung in kürzeren Zeitintervallen, z.B. alle 2 Stunden. Jede Pegelstelle sollte mit einem Lattenpegel ausgestattet sein, um den Wasserstand zu kontrollieren.

Die Pegellatte ist immer zweifärbig, meistens gelb-schwarz oder auch weiß-rot gefärbt, und trägt dezimeterweise eine E-Teilung, welche abwechselnd aus kurzen und langen Balken mit einer Höhe von 2 cm besteht (*siehe Abbildung 7*). Durch diese Art der Höheneinteilung wird eine Ablesegenauigkeit von 1 cm ermöglicht. (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 89)

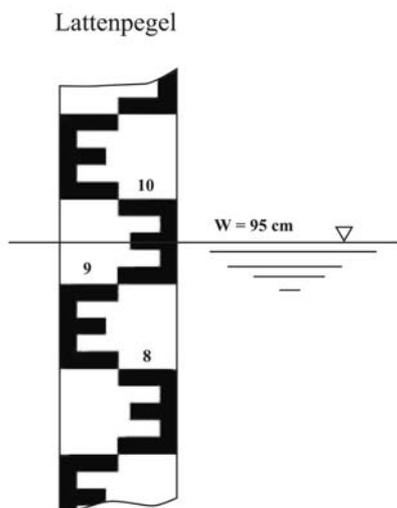


Abbildung 7: E-Teilung einer Pegellatte (Dyck u. Peschke 1995, S. 90)

Es kann zwischen folgenden drei Arten von Lattenpegeln unterschieden werden:

- Senkrecht-Lattenpegel
- Staffelpegel (Spezialfall der senkrechten Lattenpegel)
- Geneigter Lattenpegel (Böschungspegel)

Eine genaue Beschreibung zu den verschiedenen Arten von Lattenpegeln ist im *WYDER 1998* zu finden.

### 3.3.2 Selbstregistrierende Pegel

Da Lattenpegelablesungen durch Wellenwirkungen oder Brückenstau oft zu ungenau sind und die tägliche Ablesung des Wasserstandes durch einen Beobachter relativ aufwändig ist, kommen heutzutage zur kontinuierlichen Wasserstandsmessung meist selbstregistrierende Pegel zum Einsatz. Zu den selbstregistrierenden Pegeln zählen mechanische Schwimmschreibpegel, aber auch pneumatisch oder elektrisch arbeitende Pegel (WYDER 1998, S. 11).

Zur Kontrolle der Schreibpegel sollte trotzdem jede Pegelstelle zusätzlich mit einem Lattenpegel ausgestattet sein.

#### 3.3.2.1 Schwimmschreibpegel

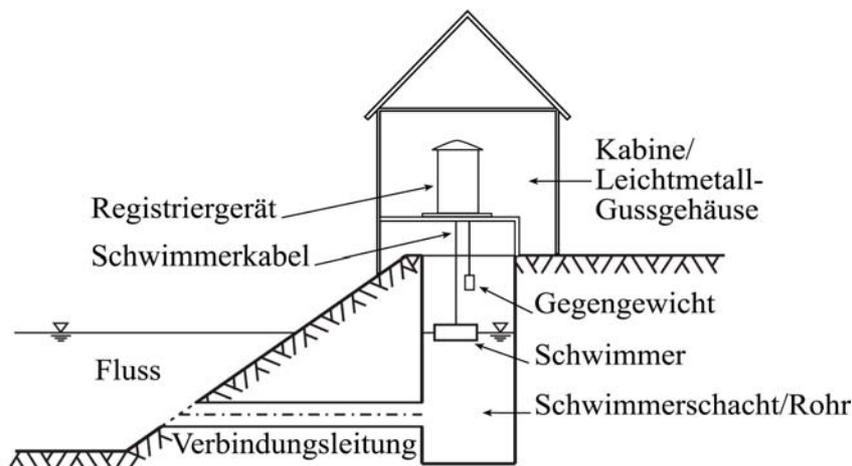


Abbildung 8: Schreibpegelstation (nach Dyck und Peschke 1995, S. 91 verändert)

Schwimmschreibpegel (siehe Abbildung 8) werden schon seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Sie sind einfach in der Handhabung und durch die robuste Konstruktion sehr günstig in der Wartung und Erhaltung. Von Vorteil ist auch, dass Schwimmregistriergeräte keinen Stromanschluss benötigen. Durch die leichte Bedienung, die einfache Mechanik und die hohe Genauigkeit der Messwerte konnten diese Messgeräte trotz vieler neuer Messtechniken nicht verdrängt werden (WYDER 1998, S. 45).

### 3.3.2.2 Hydrostatische Pegelmessung

Da der Druck proportional zur Flüssigkeitshöhe ist, kann durch eine Druckmesszelle der dem Wasserstand entsprechenden Druck gemessen werden.

Es gibt zwei Messverfahren um den hydrostatischen Druck zu messen:

- Druckmessumformer, die direkt über eine Messmembrane den Flüssigkeitsdruck in ein elektrisches Signal umwandeln (*siehe Abbildung 9*).
- Einperleinrichtungen, die den Flüssigkeitsdruck über eine Luftsäule im Perlrohr einem Druckmessumformer zuführen (*siehe Abbildung 10*). (WYDER 1998, S. 47)

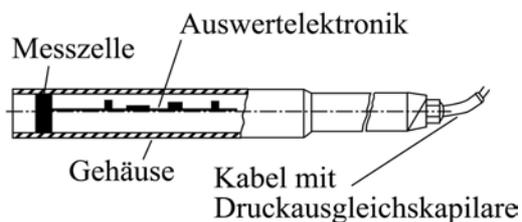


Abbildung 9: Aufbau einer Druckmesssonde (WYDER 1998, S. 48)

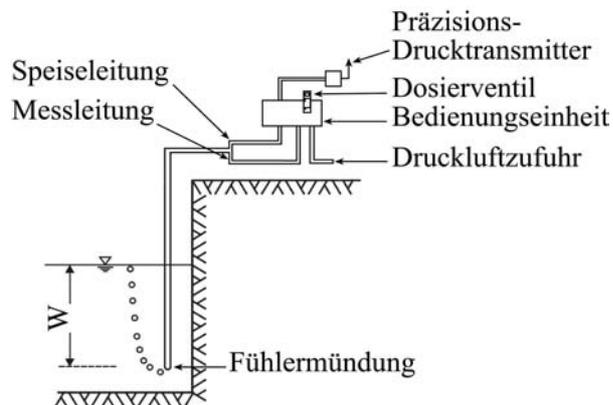


Abbildung 10: Pneumatische Druckmessung (WYDER 1998, S. 43 verändert)



Abbildung 11: Druckmesspegelstation (siehe Abb. 9), Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2004

### **3.3.2.3 Vor- und Nachteile der hydrostatischen Pegelmessung**

Drucksonden sind sehr einfach zu installieren. Der Einsatz von Drucksonden ist für große Wasserstandsschwankungen besonders geeignet. Von großem Nachteil ist, dass durch Verschmutzung und Verkalkung Messfehler auftreten können, und deshalb eine ständige Kontrolle und Wartung notwendig ist. Drucksonden sind zwar zuverlässig aber oft zu ungenau.

Bei Einperleinrichtungen kommen die empfindlichen Messinstrumente nicht in direkten Kontakt mit dem Wasser und sind somit geschützt. Nur die Luftleitung ist dem Wasser direkt ausgesetzt und muss dementsprechend geschützt werden. Der Wartungsaufwand bei Einperleinrichtungen ist relativ gering. Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Messgeräte sind als gut zu bezeichnen (WYDER 1998, S. 59-60)

### **3.3.3 Berührungslose Pegelmessung**

Der große Vorteil der berührungslosen Pegelmessung gegenüber den bereits erwähnten Pegelarten ist, dass ohne Kontakt mit dem Wasser aus der Luft gemessen werden kann. Dadurch kommt es zu keinen Beschädigungen oder Beeinträchtigungen der Messeinrichtung durch Kalk, Geschiebe, Muscheln, Sand, etc.

Die Geräte senden Schall- oder Mikrowellenimpulse aus, die von der Wasseroberfläche reflektiert werden und dann als Echo wieder empfangen werden können. Aus der Zeit, die zwischen dem gesendeten und dem empfangenen Signal vergeht, kann die Entfernung zwischen Sensor und Wasseroberfläche berechnet werden. Die Messgeräte werden senkrecht über dem Gewässer oberhalb der Hochwassergrenze angebracht (WYDER 1998, S. 61-67).

#### **3.3.3.1 Pulsradar**

Bei diesem Verfahren werden Mikrowellen-Impulse im Bereich von 5.8 Gigahertz ausgesendet und nach der Reflexion an der Wasseroberfläche vom Sensor wieder empfangen (Echo). Dieser Wellenbereich wird nicht durch Temperatur, Wind, Regen und Schnee beeinflusst. Die Laufzeit der Mikrowellenimpulse ist proportional zur Distanz zwischen Sensor und Wasseroberfläche.

Der Messbereich beträgt 0 - 35 Meter. Durch eine Plausibilitätsprüfung werden die einzelnen Echos überprüft (WYDER 1998, S. 61).

### **3.3.3.2 Ultraschall**

Das Ultraschallgerät sendet Schallwellen (16-33 Kilohertz) aus, die von der Wasseroberfläche reflektiert und wie bei der Radarmessung als Echo wieder empfangen werden. Dieser Wellenbereich wird durch Temperatur, Wind, Regen und Schnee beeinflusst. Durch einen am Gerät montierten Referenzstab versucht man dem Rechnung zu tragen. Im Winter sind die Messung bei Schnee und Eis trotzdem oft zu ungenau (WYDER 1998, S. 66).

### **3.3.3.3 Vor- und Nachteile der berührungslosen Pegelmessungen**

Der große Vorteil der berührungslosen Pegelmessung liegt wie bereits erwähnt darin, dass die Geräte nicht mit dem Wasser in Berührung kommen. Dadurch besteht keine Gefahr der Zerstörung durch Hochwasser oder Treibgut. Es kommt auch zu keiner Versandung bzw. Verkalkung des Gerätes. Weder Wasserqualität noch Randeffekte im Uferbereich beeinflussen die Messung.

Nachteil der Ultraschallmessung ist, dass die Messung durch Temperatur, Wind, und Niederschlag beeinflusst werden kann. Besonders bei größerem Abstand zwischen Messgerät und Wasserspiegel steigt die Wahrscheinlichkeit von Messfehlern. Radargeräte können durch Fremdsignale nicht beeinflusst werden, was ein großer Vorteil gegenüber Ultraschallmessgeräten ist (WYDER 1998, S. 67).

## **3.4 Gegenüberstellung der wichtigsten Pegelmessmethoden**

Alle der genannten Pegelmessmethoden haben ihre Stärken und Schwächen. Für stehende oder langsam fließende Gewässer zeigt sich das Pulsradar bzw. die Einperlmessung am besten geeignet. Diese zwei Methoden haben eine hohe Genauigkeit und die Geräte sind einfach zu montieren. Drucksonden sind zwar einfach in der Montage, aber im Vergleich zur Einperlmessung bzw. zum Pulsradar nicht so. Schwimmer sind zwar sehr genau doch mit sehr hohen Unterhaltskosten verbunden.

Betrachtet man mittlere und große Flüsse sind wiederum die Einperlmessung und das Pulsradar zu empfehlen. Die Einperlmessung ist etwas teurer als das Pulsradar doch einfacher einzubauen. Drucksonden sind für mittlere und große Flüsse zu ungenau und auch zu teuer.

Bei Wildbächen sind das Pulsradar und die Schwimmermethode am genauesten (WYDER 1998, S. 73).

## **4. Direkte Durchflussmessung**

### **4.1 Volumetrische Messung mittels Messgefäß**

#### **4.1.1 Messprinzip**

Zur volumetrischen Messung (Gefäßmessung) werden speziell angefertigte Messkästen aber auch handelsübliche Behälter wie Eimer, Wannen oder Tonnen verwendet, die kalibriert werden müssen. Das Messgefäß sollte ein möglichst geringes Gewicht aufweisen. Die Oberfläche sollte im Verhältnis zum Volumen gering sein. Um eine genaue Messung zu gewährleisten, sollte der obere Rand des Messgefäßes möglichst schmal und scharfkantig sein. Der Wasserstrahl muss verlustfrei aufgefangen werden können (PEGELVORSCHRIFT 1998, Anlage D, S. 20).

Die Gefäßmessung kann bis zu einem Durchfluss von ca. 50 l/s verwendet werden. Der Durchfluss wird in einen Behälter mit bekanntem Gefäßvolumen umgeleitet, wobei die Zeit der Füllung gemessen wird. Die Größe des Gefäßes ist so zu wählen, dass die Messzeit mindestens 5 Sekunden beträgt. Der Durchfluss kann aus der Division des gefüllten Behältervolumens  $V$  durch die Füllzeit  $t$  ermittelt werden. Voraussetzung ist, dass der Durchfluss während der Füllungsphase keinen starken Schwankungen unterliegt (MANIAK1993, S.62).

Ein Beispiel:

Werden zur Füllung eines 50-Liter-Gefäßes 25 Sekunden benötigt, so beträgt der Durchfluss 2 l/s, d.h.  $Q = V/t$

#### **4.1.2 Vor- und Nachteile der Gefäßmessung**

Diese Art der Durchflussmessung ist verhältnismäßig genau und einfach zu handhaben. Von Nachteil ist, dass Messgefäße nur bei einem bestimmten Gefälle und der notwendigen Überfallhöhe eingesetzt werden können. Die Gefäßmessung eignet sich besonders gut zur Messung kleinerer Quellschüttungen und kleinerer Abflüsse. Mit Messgefäßen können dabei genauere Ergebnisse erzielt werden als mit Messflügeln (PEGELVORSCHRIFT 1998, Anlage D, S. 21).

## 4.2 Messwehre

### 4.2.1 Messprinzip

Messwehre finden in kleinen Bächen, Flüssen und künstlichen Kanälen bis ca.  $1\text{m}^3/\text{s}$  Verwendung (MANIAK1993, S. 62).

Messwehre werden innerhalb des Gerinnes eingebaut und durch Verengung des Durchflussquerschnittes kommt es zu einer Wasserstandshebung. Der angestaute Wasserstand (Überfallhöhe) kann direkt am Wehr abgelesen oder an einer bestimmten Stelle oberhalb des Messwehres z.B. mit Hilfe eines Schreibpegels aufgezeichnet werden. Da die Überfallhöhe des Wassers über einem Wehr in gesetzmäßiger Beziehung zur Durchflussmenge steht, kann anhand der Überfallhöhe  $h$  und einen zusätzlichen Wert  $\mu$ , der sich aus der definierten Geometrie des Wehres ergibt, der Durchfluss ermitteln werden. Die Beziehung zwischen  $\mu$  und  $h$  wird meistens vom Hersteller angegeben, andernfalls muss das Messwehr mit Hilfe von Vergleichsmessungen geeicht werden (DYCK u. PESCHKE 1995 S. 100).

Wenn Messwehre bei entsprechendem Zufluss überströmt werden, spricht man von einem Überfall. Falls der Durchfluss über die Wehrkrone vom Unterwasser nicht beeinflusst wird, spricht man von einem vollkommenen Überfall. Durch scharfkantige Wehre löst sich der Überfallstrahl gut ab, was durch eine Belüftung (*siehe Abbildung 12*) der Strahlunterseite zusätzlich noch unterstützt werden kann.

Nach der Art des Gerinnequerschnitts werden Messwehre mit (*siehe Abbildung 12*) und ohne (*siehe Abbildung 13*) Seitenkontraktion unterschieden. Nach der Form des Überfallquerschnitts kann zwischen Rechteck- (nach REHBOCK) und Dreiecksüberfällen (nach THOMSON) unterschieden werden. Andere geometrische Formen sind zwar möglich, kommen aber kaum zum Einsatz (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 99).

Ein Messwehr sollte in einem rückstaufreien Abschnitt eines Gewässers mit schwachem Gefälle, einem einheitlichen Profil und einer verhältnismäßig gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung liegen. Das Oberwasser sollte ungefähr um das zehnfache länger als die Wehrbreite sein und einen geradlinigen Verlauf aufweisen, um eine gleichförmige Anströmung zu gewährleisten. Bei Messwehren sollte der rechteckförmig ausgekleidete Oberwasserquerschnitt wenigstens so lang wie die maximale Überfallhöhe sein. Der Messquerschnitt soll vertikal zur Anströmung liegen und sollte keine größere Rauigkeit

aufweisen. Zur Berechnung des Durchflusses benötigt man die genauen Abmessungen des Wehres. Vorgefertigte Messgerinne oder Messwehre werden, bevor sie zum Einsatz kommen, in Laborversuchen geeicht. (MANIAK 1993, S. 64).

#### 4.2.2 Rechtecküberfall

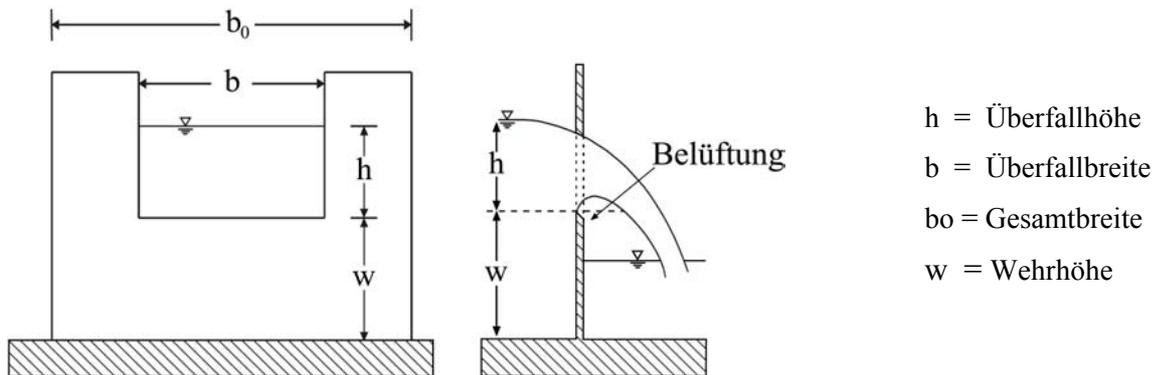


Abbildung 12: Scharfkantiges Messwehr in einem Rechteckgerinne mit Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99)

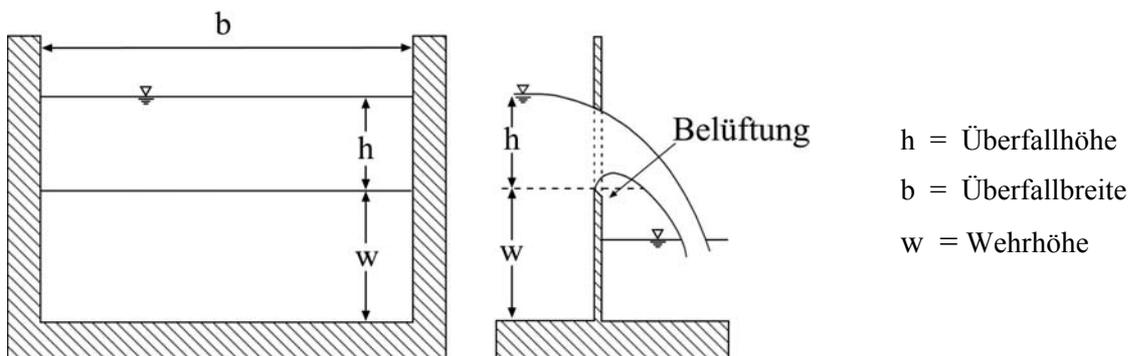


Abbildung 13: Scharfkantiges Messwehr in einem Rechteckgerinne ohne Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99)

##### 4.2.2.1 Durchflussberechnung

Bei Wehren mit rechteckigem Querschnitt gilt im allgemeinen die *Weisbach'sche Überfallformel*. Beim Rehbock-Wehr lässt sich diese Formel, bei Vernachlässigung der Zuflussgeschwindigkeit, in die in der Praxis sehr gebräuchliche Formel von *Poleni* überführen.

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h^{3/2}$$

Q = Durchfluss

h = Überfallhöhe

b = Überfallbreite

g = Erdbeschleunigung

$\mu$  = Überfallbeiwert

Der Überfallbeiwert ist von den Verhältnissen Wehrbreite zu Gerinnebreite ( $b/b_0$ ) und Überfallhöhe zu Wehrhöhe ( $h/w$ ) abhängig (siehe Abbildung 12 u. 13). Dieser schwankt zwischen 0.61 und 0.65. Für Rechteckwehre ohne

Seitenkontraktion ( $b = b_0$ ) gilt zur Berechnung des Überfallbeiwertes folgende Formel, wobei die Überfallshöhe h in Meter m angegeben wird.

$$\mu = 0.615 \left( 1 + \frac{1}{1000 \cdot h + 1.6} \right) \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{h}{h + w} \right)^2 \right]$$

#### 4.2.3 Dreiecksüberfall

Für sehr kleine Durchflussmengen sind Messwehre mit waagrechter Überfallkante zu ungenau. Hier liefern Dreiecksüberfälle wie das Thomson-Wehr die genauesten Messwerte (siehe Abbildung 14).

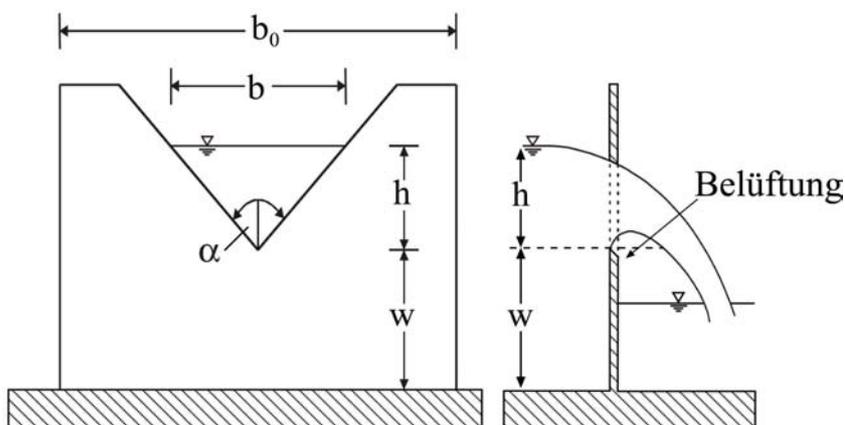


Abbildung 14: Scharfkantiges Messwehr in einem Dreieckgerinne mit Seitenkontraktion (Dyck u. Peschke 1995, S. 99)

### 4.2.3.1 Durchflussberechnung

Die Durchflussformel zur Durchflussberechnung lautet:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \tan \alpha \sqrt{2g} h^{5/2}$$

$\alpha$  = halber Öffnungswinkel des Dreieckwehrs



Abbildung 15: Dreieckwehr mit Seitenkontraktion, Annabach am 29.04.2004

Auch hier gibt es eine Abhängigkeit des Überfallbeiwertes  $\mu$  von den Verhältnissen  $b/b_0$  und  $h/w$  (siehe Tabelle 1). Für einen rechtwinkligen Ausschnitt ( $\alpha = 45^\circ$ ) vereinfacht sich die Formel zu:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} h^{5/2} = 2.362 \mu h^{5/2}$$

$b/b_0$	$\mu$
1.0	$0.602 + 0.075 h/w$
0.9	$0.599 + 0.064 h/w$
0.8	$0.597 + 0.045 h/w$
0.7	$0.595 + 0.030 h/w$
0.6	$0.593 + 0.018 h/w$
0.5	$0.592 + 0.011 h/w$
0.4	$0.591 + 0.0058 h/w$
0.3	$0.590 + 0.0020 h/w$
0.2	$0.589 - 0.0018 h/w$
0.1	$0.588 - 0.0021 h/w$
0.0	$0.587 - 0.0023 h/w$

Tabelle 1: Abhängigkeit des Überfallbeiwertes  $\mu$  von den Verhältnissen  $b/b_0$  und  $h/w$  für das Thomson-Wehr

#### 4.4.4 Vor- und Nachteile der Durchflussmessung mittels Messwehr

Messwehre finden in kleinen natürlichen Wasserläufen ohne starke Geschiebe- und Treibgutführung Verwendung. Sie werden dann eingesetzt, wenn eine sehr hohe Genauigkeit erforderlich ist, z.B. in hydrologischen Versuchsgebieten oder bei Bewässerungen (MANIAK 1993, S. 62).

Der Einsatz von Messwehren kann nur durch zu hohe Durchflussmengen oder durch zu hohe Schwebstoff- oder Geschiebefracht des Gewässers und die daraus folgende Verlandung des Stauraumes eingeschränkt werden. Rechteckwehre können bis zu einer Durchflussmenge von 1000 l/s eingesetzt werden, Dreiecksüberfälle hingegen nur bis zu einem Durchfluss von ca. 100 l/s (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 100).

### 4.3 Messrinnen

#### 4.3.1 Venturi-Kanal

##### 4.3.1.1 Messprinzip

Beim Venturikanal, einem dreiteiligen Gerinne bestehend aus Einlauf-, Einschnürungs- (Kontraktion) und Nachlaufstrecke, beruht die Durchflussmessung auf der Messung der Wasserspiegeldifferenz, die sich in Abhängigkeit vom Durchfluss an der Querschnittsverengung  $b$  bildet. Die Querschnittseinengung kann durch eine Sohlschwelle zusätzlich noch erhöht werden (siehe Abbildung 16) (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 100-101).

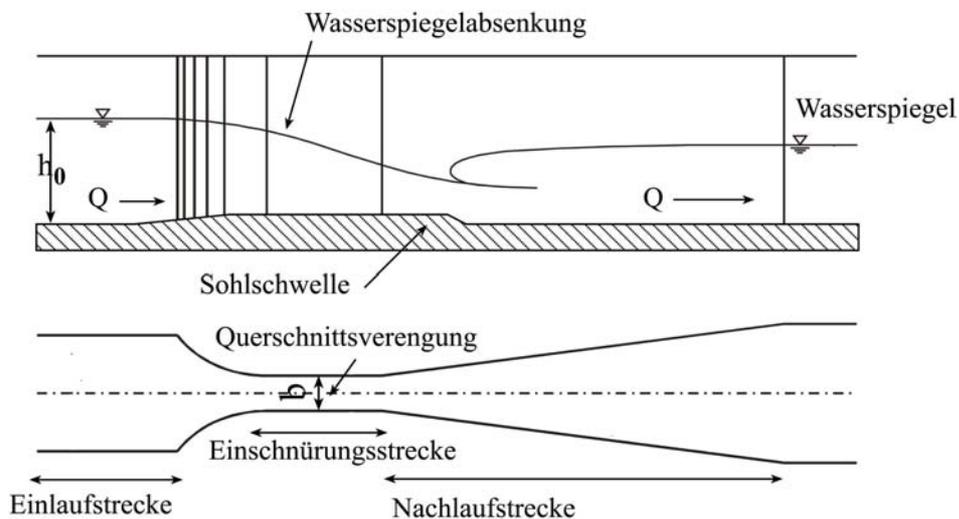


Abbildung 16: Venturikanal (nach Dyck u. Peschke 1995, S. 101 verändert)

In der *Abbildung 16* ist die Wasserspiegelabsenkung im Venturikanal deutlich zu sehen. Um den Durchfluss zu ermitteln werden die Oberwassertiefe  $h_0$  und die Wassertiefe in der Querschnittsverengung  $b$  benötigt. Dabei ist die Oberwassertiefe  $h_0$  einfach zu messen. Da der Wasserstand an der Querschnittsverengung  $b$  eher schwierig zu ermitteln ist, wird der Durchflussquerschnitt im Venturikanal soweit reduziert, dass die Strömungsgeschwindigkeit an der engsten Stelle einen gewissen Grenzwert überschreitet und der Fließwechsel vom Strömen zum Schießen erzwungen wird. Durch diesen Fließwechsel kommt es zu keiner Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im Oberwasser durch das Unterwasser und zur Ermittlung des Durchflusses genügt es, die Oberwassertiefe  $h$  zu messen. Ein Venturikanal mit Fließwechsel hat somit den Vorteil, dass der Durchfluss einfach und genau ermittelt werden kann. Die Berechnungsformel für einen Venturikanal lautet:

$$Q = C * C_v \sqrt{g} b * h_0^{3/2}$$

Dabei ist  $C$  der Beiwert, der den Einfluss der Reibung berücksichtigt und  $C_v$  der Geschwindigkeitsbeiwert, welcher vom Einschnürungsverhältnis abhängt. Zur Messung der Oberwassertiefe  $h$  werden an der Messstation Lattenpegel und zum Teil auch Schwimmerschreibpegel angebracht (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 101).

Neben dem Venturikanal wären noch Parshall-, Palmer Bowlus oder Khafagi-Messrinnen zu nennen. In Europa kommen hauptsächlich Venturi-Messrinnen zum Einsatz, während in Nordamerika Parshall-Messrinnen weit verbreitet sind (DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 169).

#### **4.3.1.2 Vor- und Nachteile von Messrinnen**

Ein großer Vorteil des Venturikanals ist, dass der Durchflussquerschnitt im Gegensatz zu Messwehren nicht verbaut wird, und dadurch auch keine Verlandungsgefahr besteht. Dadurch kann der Venturikanal auch zur Messung in stark verschmutzten Gewässern eingesetzt werden. Weniger geeignet sind Gewässer mit starken Wasserstandsschwankungen (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 101)

Die Messunsicherheit bei Messrinnen liegt bei 3-5%. Von Vorteil ist, dass Messrinnen gegenüber Verschmutzung unempfindlich und einfach zu warten sind. Von Nachteil sind die

erforderlichen umfangreichen Baumaßnahmen. Zusätzlich sind die Installationskosten im Vergleich zu Messwehren sehr hoch (DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 170).

## 5. Indirekte Durchflussmessung

### 5.1 Durchflussmessung mit dem hydrometrischen Flügel

#### 5.1.1 Messprinzip

Das am häufigsten angewendete Verfahren zur Durchflussmessung beruht auf der Messung der Fließgeschwindigkeit mit dem hydrometrischen Flügel (Woltmann-Flügel).

Der hydrometrische Flügel kann bei kleinsten Gewässern wie auch bei großen Strömen eingesetzt werden. Um ein genaues Messergebnis zu erhalten, ist ein laminares Fließverhalten des Wassers Voraussetzung (KREPS 1975, S.23).

Um den Durchfluss  $Q$  ermitteln zu können, benötigt man den Durchflussquerschnitt  $A$  (=Wassertiefe mal Bachbreite), den Wasserstand am Bezugspegel, wie auch die Durchschnittsgeschwindigkeit  $v$ . Aus folgender Gleichung errechnet sich dann der Durchfluss:

$$Q = v * A \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (\text{DYCK u. PESCHKE 1995, S. 93})$$

Da die Geschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt sehr unregelmäßig ist, wird mit Hilfe des Messflügels in verschiedenen Tiefen an mehreren Messlotrechten über den gesamten Gerinnequerschnitt die Fließgeschwindigkeit  $v$  gemessen. Aus den Einzelwerten kann dann das räumliche Geschwindigkeitsprofil ermittelt werden (siehe Abbildung 17 und 18).

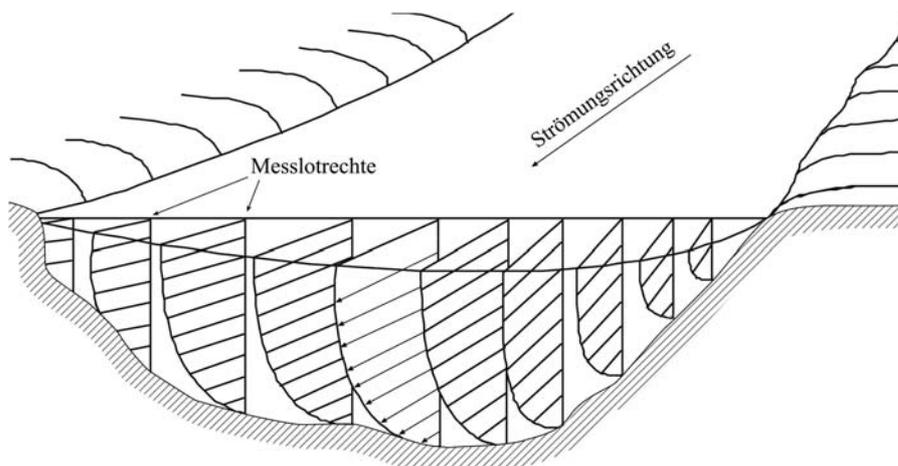


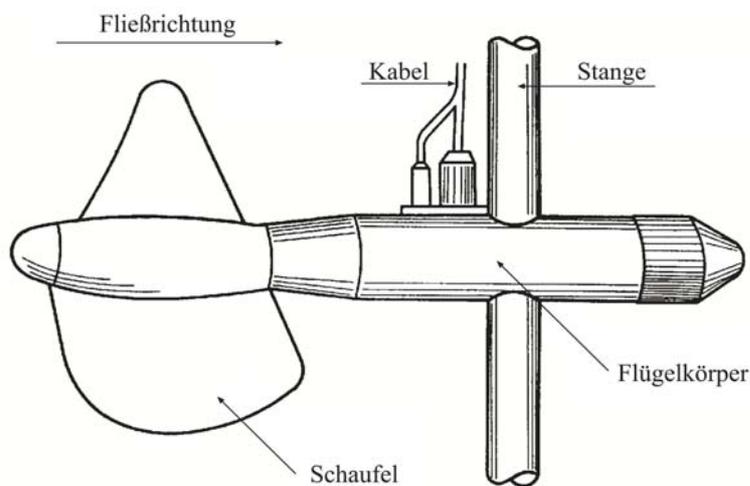
Abbildung 17: Räumliche Darstellung des Durchflussquerschnittes und der Geschwindigkeitsverteilung (Dyck u. Peschke 1995, S.95)



Lamellenbegrenzungen und Messlotrechten können durch die Peilstange, das Tiefenlot, das Echolot oder durch den Messflügel selbst bestimmt werden. Um die Lage der Messlotrechten verteilt über die Gerinnebreite zu bestimmen, wird entweder ein Messband, eine Peilleine oder ein optisches Entfernungsmessgerät eingesetzt (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 93).

### 5.1.2 Meßflügel und zugehörige Ausrüstung

Wie aus der *Abbildung 20* ersichtlich, besteht ein Messflügel aus einem an einer Stange befestigten Flügelkörper, an dem eine Schaufel durch die Strömung angetrieben wird.



**Abbildung 20: Messflügel (Pegelvorschrift Anlage D 1998, S. 10)**

Die Fließgeschwindigkeit wird nicht direkt gemessen, sondern ergibt sich aus der Umdrehungszahl der Messschaufel. Die Beziehung zwischen der Umdrehungszahl der Schaufel und der Fließgeschwindigkeit des Wassers ist durch Eichverfahren bekannt. In der Kontaktkammer wird bei jeder Schaufelumdrehung ein elektrischer Impuls erzeugt. Dies geschieht magnetisch, bzw. bei älteren Flügeln mechanisch. Messflügel mit magnetischen Impulsen haben eine berührungslose Kontaktgabe und deshalb eine geringere Anlaufgeschwindigkeit als ältere Modelle. Über ein Kabel werden die Impulse dann an ein Zählgerät weitergeleitet (PEGELVORSCHRIFT Anlage D 1998, S. 10).

Der Zusammenhang zwischen der Drehzahl  $n$  des Flügels und der Geschwindigkeit  $v$  [m/s] des fließenden Wassers im Messpunkt wäre im Idealfall linear und nur von der Ganghöhe  $b$  [m] der Schraube (durch Laboreichung bestimmt) abhängig. Da jedoch der Flügel wegen der

Lagerreibung erst nach Überschreitung eines Schwellenwertes  $a$  [m/s] sich zu drehen beginnt, wird für jede Flügelschaukel eine Eichgleichung aufgestellt:

$$v = a + b \cdot n$$

Durch diese Gleichung wird aus der Messgröße  $n$  die gesuchte Größe  $v$  bestimmt. Umso größer die Anzahl der gemessenen Impulse in jedem der Messpunkte einer Messlotrechten ist, desto genauer fällt die Geschwindigkeitsmessung aus (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 94)

Um Messfehler zu vermeiden, muss der Flügel einwandfrei funktionieren. Schon kleine Beschädigungen der Schaukel können zu beträchtlichen Fehlern in der Messung führen. Aus diesem Grund muss ein Messflügel regelmäßig gewartet und kontrolliert werden. Bei Verdacht einer Beschädigung (z. B. durch Kratzer an der Schaukel) sollte der Messflügel zur Sicherheit neu kalibriert werden (PEGELVORSCHRIFT Anlage D 1998, S. 16).

#### **5.1.2.1 Stangenflügel**

Ein Stangenflügel besteht aus einer Stange, meistens mit Zentimetereinteilung, die gemäß der erforderlichen Länge aus Einzelstücken zusammengesetzt wird, sowie eventuell auch aus Überschiebrohren. Am unteren Ende der Messstange befindet sich eine Grundplatte, die das Einsinken der Stange verhindert. Zusätzlich verhindert ein Dorn das seitliche Wegrutschen der Stange. Am Messflügel kann auch ein Steuerblech und eine Senkdruckfläche angebracht werden (*siehe Abbildung 21*).

Es gibt verschiedene Arten den Messflügel an der Stange zu befestigen. Die einfachste Methode ist den Flügel direkt an der Stange zu befestigen. Nachteil dabei ist, dass die Stange für jeden neuen Messpunkt der Lotrechten aus dem Wasser genommen, und der Flügel in der entsprechenden Höhe neu festgeklemmt werden muss.

Wenn der Flügel direkt an Überschiebrohren befestigt wird, kann man die Höhe des Flügels während der Messung einer Lotrechten verschieben. Als Nachteil ist die Gewichtszunahme des Messgerätes zu erwähnen.

Bei hohen Geschwindigkeiten kann durch das Anbringen einer Senkdruckfläche das Absenken des Flügels erleichtert werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Senkdruckfläche die Messung nicht beeinflusst.

Der Flügel muss mit einem Steuerblech zur Ausrichtung der Schaufel gegen die Fließrichtung ausgerüstet sein, da sich der Flügelkörper um die Stange drehen kann.

Es ist kein Steuerblech erforderlich, wenn die Durchstecköffnung des Flügelkörpers mit einer Nut und die Stange mit einer Führungsleiste ausgestattet ist. Dadurch kann der Flügel durch Drehen der Stange in Fließrichtung ausgerichtet werden (PEGELVORSCHRIFT Anlage D 1998, S. 10-11).

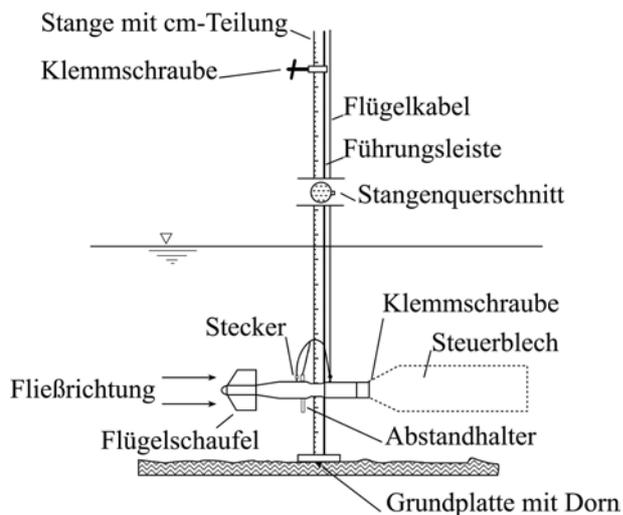


Abbildung 21: Messflügel in Stangenflügelausrüstung (Pegelvorschrift Anlage D 1998, S. 11 leicht verändert)

### 5.1.2.2 Messflügel mit Schwimmflügelausrüstung

Ein Schwimmflügel (Delphin) besteht aus dem Schwimmsteuer mit den Gewichten zum Austarieren in die Waagrechte in eingetauchtem Zustand.



Abbildung 22: Messflügel mit Schwimmflügelausrüstung (Foto vom 25.11.2003, Messstelle Bruck/Mur)

Das Mittelstück ist mit einem Grundtaster ausgestattet, der beim Aufsetzen auf die Sohle einen Kontakt auslöst. Dieser Kontakt wird von einem Zählgerät in ein akustisches Signal



können. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, sollten so wenig wie möglich Wasserpflanzen und Algen (Verkrautung) im Messquerschnitt vorhanden sein. Um die Geometrie des Messquerschnittes möglichst genau erfassen zu können, ist eine ebenmäßig und nicht zu stark gegliederte Stelle im Flussbett von Vorteil. Die Messstelle sollte jederzeit und leicht zugänglich sein (HANDBUCH für die ABFLUSSMENGENMESSUNG 1982, S. 5-6).

#### **5.1.4 Messarten**

Für die Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit mittels Messflügel werden verschiedenen Messarten angewendet. Grundsätzlich sind hier die Punkt- und die Integrationsmethode zu nennen.

##### **5.1.4.1 Punktmessungen**

Bei den Punktmessungen werden die Fließgeschwindigkeiten an festgelegten Punkten des Durchflussprofils ermittelt. Hierfür werden, wie bereits erwähnt, an mehreren Stellen des Querschnitts mehrere Messungen in unterschiedlichen Tiefen der festgelegten Messlotrechten durchgeführt. Die Anzahl bzw. der gegenseitige Abstand der einzelnen Messpunkte hängen von der geometrischen Form des Durchflussquerschnittes ab (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 95).

#### **Verfahren der verringerten Messpunkte**

Diese Verfahren sind zwar nicht so genau wie jene Verfahren, die das gesamte Geschwindigkeitsfeld benutzen, kommen aber wegen der Zeitersparnis relativ oft zum Einsatz. Zum Verfahren der verringerten Messpunkte zählt die 1-Punkt- und die 2-Punkt Methode.

##### **1-Punkt Methode**

Bei der 1-Punkt-Methode wird die Fließgeschwindigkeit nur in 60 % der Wassertiefe in den einzelnen Messlotrechten von der Oberfläche aus gemessen. Dabei wird der ermittelte Wert der mittleren Geschwindigkeit gleichgesetzt. Diese Methode findet bei geringen Wassertiefen Anwendung. Sie wird aber auch bei schnell ansteigendem Durchfluss verwendet, da hier eine kurze Messzeit verlangt wird.

## **2-Punkt-Methode**

Bei der 2-Punkt-Methode wird zwischen der Amerikanischen Methode und der Methode nach Kreps unterschieden. Bei der Amerikanischen 2-Punkt-Messung wird das Fließgeschwindigkeitsmessgeräte in das 0,2-fache und das 0,8-fache der Tiefe unter die Wasseroberfläche eingebracht und die Fließgeschwindigkeiten ( $v$ ) in jeder Messlotrechten gemessen, d.h. die Fließgeschwindigkeiten werden in 80% und 20% der Wassertiefe gemessen. Die mittlere Fließgeschwindigkeit ( $v_m$ ) errechnet sich nach folgender Formel (ÖNORM EN ISO 748 2000, S.10-11):

$$v_m = (v_{0,2} + v_{0,8}) / 2$$

Dagegen wird bei der Methode nach Kreps die Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) knapp unter der Wasseroberfläche ( $v_0$ ) und in 38 % der Wassertiefe gemessen (KREPS 1975, S. 28). Die mittlere Fließgeschwindigkeit ( $v_m$ ) wird nach folgender Formel berechnet:

$$v_m = (v_0 + v_{0,38}) / 2$$

## **Andere Verfahren**

### **3-Punkt-Methode**

Bei der 3-Punkt-Methode wird die Geschwindigkeit ( $v$ ) in 20 %, 60 % und 80 % Wassertiefe von der Wasseroberfläche aus gemessen. Hierbei ergibt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit ( $v_m$ ) aus folgender Formel:

$$v_m = 0,25 (v_{0,2} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8})$$

### **5-Punkt-Methode**

Bei der 5-Punkt-Methode misst man die Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) unmittelbar unterhalb der Oberfläche ( $v_0$ ), unmittelbar über der Sohle ( $v_{bed}$ ) und in 20 %, 60 % und 80 % Tiefe. Dieses Verfahren findet bei unregelmäßiger Geschwindigkeitsverteilung in der Vertikale Verwendung, wie es z.B. bei Eisbildung der Fall ist.

$$v_m = 0,1 (v_0 + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{bed})$$

## **6-Punkt-Methode**

Bei dieser Methode wird die Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) in 20 %, 40 %, 60 % und 80 %, unmittelbar über der Sohle ( $v_{\text{bed}}$ ) und möglichst nahe an der Wasseroberfläche ( $v_0$ ) gemessen (ÖNORM EN ISO 748 2000, S.11-12).

$$v_m = 0,1 (v_0 + 2v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{bed}})$$

## **Vielpunktmethode**

Falls noch genauere Werte benötigt werden, findet die Vielpunktmethode Verwendung. In diesem Fall wird in 6 bis 10 Messpunkten je Messlotrechte (*siehe Abbildung 18*) gemessen (MANIAK 1993, S. 70).

### **5.1.4.2 Integrationsmethode**

Bei der Integrationsmethode wird die mittlere Fließgeschwindigkeit über eine gleichmäßige Auf- und Abbewegung des Flügels im Messquerschnitt mit kontinuierlicher Messung der Umdrehungszahlen ermittelt. Die Geschwindigkeit, mit der das Messgerät bewegt wird, sollte 5 % der mittleren Wassergeschwindigkeit nicht überschreiten und in jedem Fall größer als 0,04 m/s sein. Zur Kontrolle sollten immer zwei vollständige Messungen durchgeführt werden, und falls die Ergebnisse um mehr als 10 % voneinander abweichen, muss der Messvorgang wiederholt werden. Bei einer Messdauer von 60 s bis 100 s führt das Integrationsverfahren zu guten Ergebnissen. Dieses Verfahren kommt meist in Tiefen größer als 1 m zum Einsatz.

### **5.1.5 Auswertemethoden**

Aus den ermittelten Fließgeschwindigkeiten kann der Durchfluss entweder analytisch über die Berechnung von Einzellamellen oder graphisch über das Planimetrieren von Geschwindigkeits- und Durchflussflächen ermittelt werden (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 94).

#### **Analytische Auswertung**

Die Querschnittsfläche der  $i$ -ten Lamelle kann mit nachfolgender Formel errechnet werden:

$$A_i = h_i * b_i \quad [\text{m}^2]$$

Dabei wird die mittlere Lamellentiefe  $h_i$  als gewichtetes arithmetisches Mittel aus den drei gemessenen Tiefen (*siehe Abbildung 19*) bestimmt.

$$h_i = 0,25 (h_{i1} + h_{i2} + h_{i3}) \quad [\text{m}]$$

Bei der Sechspunktmethode kommt für die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_i$  in der i-ten Messlotrechten folgende Bestimmungsformel zur Anwendung:

$$v_i = 0,1(v_{i,0} + 2v_{i,0,8h} + 2v_{i,0,6h} + 2v_{i,0,4h} + 2v_{i,0,2} + v_{i,s}) \quad [\text{m s}^{-1}]$$

Falls weniger als 6 Messpunkte je Messlotrechte gewählt werden, z.B. bei einer geringen Wassertiefe, berechnet sich die mittlere Lamellengeschwindigkeit als einfaches arithmetisches Mittel aus den Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Messpunkten

Der Durchfluss der i-ten Lamelle lässt sich dann mit nachfolgender Gleichung berechnen:

$$Q_i = A_i * v_i \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$$

Den Gesamtdurchfluss des Messquerschnitts erhält man, indem die einzelnen Lamellendurchflüsse aufsummiert werden.

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$$

Folgende Hilfsgrößen werden bei der Auswertung zusätzlich noch benötigt:

der Messquerschnitt  $A = \sum_{i=1}^m A_i \quad [\text{m}^2]$

die Wasserspiegelbreite  $B = \sum_{i=1}^m B_i \quad [\text{m}]$

die mittlere Querschnittstiefe  $h = A/B \quad [\text{m}]$

die größte Tiefe  $h_{\max}$  im Messquerschnitt aus allen Messwerten für  $h$

die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit  $v = Q/A$   $[m\ s^{-1}]$

die mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $v_0 = 1/B \sum_{i=1}^m B_i * v_{i0}$   $[m\ s^{-1}]$

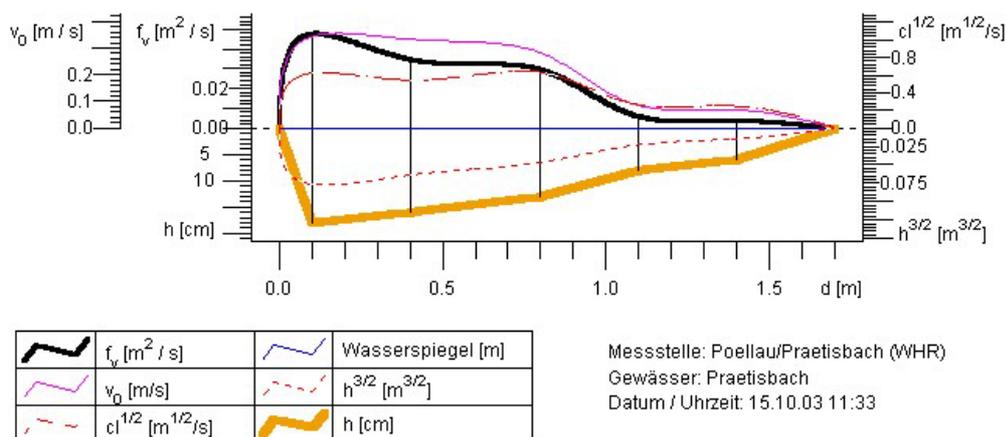
die maximale Oberflächengeschwindigkeit  $v_{0\max}$  aus allen Messwerten

der Bezugswasserstand  $W = 1/Q \sum_{i=1}^m Q_i * W_i$   $[cm]$

Den Bezugswasserstand benötigt man, falls sich während der Durchflussmessung der Wasserstand ändern sollte. Falls der Wasserstand während der Messung konstant bleibt, wird dieser als Bezugswasserstand herangezogen (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 94-95).

### Graphische Auswertung

Die graphische Auswertung hat den Vorteil der größeren Anschaulichkeit für den Betrachter (siehe Abbildung 24). Trotzdem kommt diese Art der Auswertung durch den erhöhten Arbeitsaufwand meist nur bei komplizierten Durchflussverhältnissen zur Anwendung, wie z.B. bei einer unregelmäßigen Geometrie des Querschnittsprofils (DYCK u. PESCHKE 1995, S. 95-97). Zum genauen Ablauf einer graphischen Auswertung siehe *ÖNORM EN ISO 748 2000, S. 15-16!*



**Abbildung 24: Graphische Auswertung einer Flügelmessung (Messstelle Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003)**

$v_0$ =Geschwindigkeitsverteilung im Gerinnequerschnitt  $[m/s]$ ,  $d$ =Wasserspiegelbreite  $[m]$ ,  $h$ =Gerinnetiefe  $[cm]$ ,  $f_v$ =vertikale Geschwindigkeitsfläche  $[m^2/s]$ ,  $h^{3/2}$ =Tiefe zur Potenz  $^{3/2}$   $[m^{3/2}]$ ,  $c_l^{1/2}$ = Rauigkeit und Gefälle  $[m^{1/2} / s]$

Um den relativ hohen Aufwand für die Auswertung der Flügelmessung zu reduzieren und auch um schneller zu einem Endergebnis zu gelangen, wurden spezielle Programme zur Auswertung der Messungen entwickelt. Auch die in dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen wurden mit Hilfe einer speziell dafür entwickelten Software (*Software: BIBER V 3.0* der Firma KISTERS AG in Aachen, Deutschland) durchgeführt (*siehe Abbildung 24*). Details zur Software bzw. der Auswertemethodik siehe: <http://www.kisters.de>.

### **5.1.6 Vor- und Nachteile von hydrometrischen Messflügeln**

Wie bereits anfangs erwähnt, ist das am häufigsten eingesetzte Messgerät zur Durchflussmessung der Messflügel. Der Messflügel kann in allen Messquerschnitten eingesetzt werden, in denen die Wassertiefe ein volles Eintauchen der Flügelschaukel erlaubt, die Schaukelumdrehung nicht durch Verkräutung behindert wird und die Fließgeschwindigkeit die Anlaufgeschwindigkeit des Flügels überschreitet. (3 bis 5 cm/s).

Von Vorteil ist, dass es Flügelschaukeln in verschiedenen Formen und Größen gibt, um sie der jeweiligen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit anpassen zu können. Schaukeln mit kleiner Schraubensteigung sprechen schon bei geringen Fließgeschwindigkeiten an, erreichen aber bei hohen Fließgeschwindigkeiten eine sehr hohe Umdrehungsgeschwindigkeit. Durch Verwendung von Schaukeln mit hoher Schraubensteigung kann dieser Effekt herabgesetzt werden. Darauf ist vor allem bei älteren Geräten mit mechanischer Zählung zu achten, da bei hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten keine korrekte Zählung mehr erfolgt (ab etwa 10 U/s). Um ein genaues Messergebnis zu erhalten ist zu beachten, dass in der Regel Schaukeln mit größerem Durchmesser eine geringere Anlaufgeschwindigkeit aufweisen als Schaukeln kleineren Durchmessers, auch dann, wenn letztere eine kleinere Schraubensteigung besitzen.

Die Verwendung als Stangenflügel oder auch als Schwimmflügel hängt von der Gewässergröße, der Wassertiefe und der Fließgeschwindigkeit ab. Zusätzlich spielen auch die benötigten Hilfseinrichtungen eine Rolle.

Stangenflügel werden bei kleinen Fließgewässern eingesetzt. Seine Einsatzmöglichkeit ist beschränkt auf ca. 1 m Wassertiefe und 2 m/s Fließgeschwindigkeit. Bei einer größeren Wassertiefe ist auch eine Messung bei einer geringeren Fließgeschwindigkeit möglich.

Bei geringer Wassertiefe und Strömung ist es möglich im Wasser stehend zu messen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der Abstand zum Flügel groß genug ist, um die Messung

durch Strömungsveränderungen nicht zu beeinflussen. Bei größeren Wassertiefen erfolgt die Messung von einem Messsteg, einem Boot oder von Brücken aus.

In größeren Gewässern wird der Schwimmflügel eingesetzt. Da beim Einsatz von Schwimmflügeln eine Messwinde erforderlich ist, werden zusätzlich auch Hilfseinrichtungen wie Seilkrananlagen, Messwagen oder Messschiffe benötigt. Bei Messungen von Brücken kommen fahrbare Messausleger oder besonders ausgerüstete Messfahrzeuge zum Einsatz. Mit tragbaren Handwinden ist die Messung von einem Boot aus möglich (PEGELVORSCHRIFT Anlage D 2000, S. 17-19).

Von Nachteil ist, dass mittels Messflügel bei stark turbulenten Strömungen, wie es oft in Gebirgsbächen vorkommt, nicht mehr gemessen werden kann.

## **5.2 Elektromagnetische Messmethode**

### **5.2.1 Messprinzip**

Alternativ zu Messflügeln kann die Fließgeschwindigkeit in Gewässern auch mit Hilfe von elektromagnetischen Messsonden ermittelt werden. Bereits seit 1939 kommt das magnetisch-induktive Durchfluss-Messgerät zum Einsatz. Entdecker dieses physikalischen Phänomens war der englische Physiker Michael Faraday (1791 – 1867). Er fand heraus, dass in einem leitfähigen Metallstab mit einer Länge  $L$ , den man mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  durch ein Magnetfeld  $B$  bewegt, elektrische Ladungen verschoben und dadurch zwischen den Enden der Metallstäbe eine Spannung  $U_e$  von einigen Millivolt erzeugt werden. Dabei ist die Größe der induzierten Messspannung direkt proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit  $v$ , zur Stärke des Magnetfeldes  $B$  und zur Länge des Metallstabes.

$$U_e = B * L * v$$

$U_e$  = Induzierte Spannung

$B$  = Stärke des Magnetfeldes

$L$  = Länge des elektrischen Leiters, welche dem Elektrodenabstand entspricht

$V$  = Geschwindigkeit des Leiters, welche der Fließgeschwindigkeit des Wassers entspricht

Bei einer konstanten Magnetfeldstärke  $B$  ist die Größe der induzierten Messspannung  $U_e$  direkt proportional zur Durchflussgeschwindigkeit  $v$ . Bei bekanntem Messquerschnitt  $A$  kann der Durchfluss  $Q$  wie folgt errechnet werden (DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 115 – 121):

$$Q = v * A = (U_e / B * L) * A$$

### 5.2.2 Messvorgang

Der magnetisch induktive Sensor (z.B. Nautilus-Sensor der Firma OTT) wird wie bei der Flügelmessung an einer Stange montiert (siehe *Abbildung 25 und 26*).



**Abbildung 25 und 26: Elektromagnetische Messsonden (Nautilus), (Messstation Safen bei Pöllau am 15.10.2003)**

Die Messsonde wird in Stromrichtung ausgerichtet. Die Fließgeschwindigkeit wird direkt in m/s am Auswertegerät angezeigt. Es kann eine Fließgeschwindigkeit bis zu 2,5 m/s gemessen werden.



**Abbildung 27: Messausrüstung: Nautilus – Messsonde, Auswertegerät, Kabel (Messstation Safen bei Pöllau am 28.04.2004)**

Messprinzip und Durchführung der Messung können, wie bei der Flügelmessung, nach der Punkt- oder der Integrationsmethode erfolgen. *Siehe dazu Kapitel 5.1 Durchflussmessung mit dem hydrologischen Flügeln.*

### **5.2.3 Vor- und Nachteile der elektromagnetischen Messsonde**

Elektromagnetische Messgeräte können bereits bei einem Wasserstand von 3 cm eingesetzt werden. Das Messgerät ist unabhängig von Temperatur und Schwebstoffen bzw. Verkrautung. Der Wartungsaufwand ist sehr gering. Es ist lediglich darauf zu achten, dass sich keine Ablagerungen auf den Messelektroden befinden. Diese können zu Messfehlern führen.

Elektromagnetische Sonden kommen meist dann zum Einsatz, wenn mittels hydrometrischen Flügel nicht mehr gemessen werden kann, wie z.B. bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten und bei sehr starker Verkrautung, extrem kleinen Fließgeschwindigkeiten und verschmutzten Gewässern der Fall ist (Prospekt der Firma OTT Hydrometrie, Nautilus C 2000, S. 1-4).

## **5.3 Durchflussmessung mit Markierungsstoffen (Tracern)**

### **5.3.1 Messprinzip**

Das Wort „Tracer“ stammt aus dem Englischen und leitet sich von „trace“ ab, das u.a. auch Spur oder Fährte bedeutet. In der Hydrologie versteht man unter dem Tracerverfahren die Möglichkeit, mit Hilfe von bestimmten Zusatzstoffen die Bewegung und den Verbleib von Wasseranteilen in Gewässern und im Wasserkreislauf erkennbar zu machen. Tracer werden auch als Leitstoffe, Markierungssubstanzen oder Indikatoren bezeichnet (BEHRENS 1982, S. 18).

Die Durchflussmessung mit Hilfe von Tracern wird dann angewendet, wenn mittels Messflügel nicht mehr gemessen werden kann, wie es z.B. in Gebirgsbächen mit geringen Wassertiefen, starker Turbulenz, hohen Fließgeschwindigkeiten und relativ schwacher Wasserführung der Fall ist (MANIAK 1993, S. 71).

Auch bei Hochwasser ist die Anwendung der Flügelmessung oft durch zu starke Turbulenzen, großer Geschiebmassen, Laub und Solenvertiefungen nicht mehr möglich (HODEL 1992 S. 23-2).

Bei der Messung mit Markierungsstoffen wird dem Fließgewässer an einer sog. Einspeisungsstelle (Impfquerschnitt) eine bestimmte Menge eines Markierungsstoffes (Indikator bzw. Tracer) zugesetzt und dessen Verdünnung nach Durchlaufen der Messstrecke strömungsabwärts bestimmt. Voraussetzung ist eine vollständige Durchmischung des Markierungsstoffes mit dem fließenden Wasser. Aus dem gemessenen Verdünnungsverhältnis kann auf die Durchflussmenge rückgeschlossen werden, da die Verdünnung des Markierungsstoffes dem Durchfluss des Gewässers proportional ist.

Nach der Art der Eingabe kann zwischen zwei Methoden der Verdünnungsmessung unterschieden werden, der Momentaninjektion und der kontinuierlichen Injektion. Beim Verdünnungsverfahren mit Momentaninjektion (Integrationsverfahren) wird der Markierungsstoff momentan in das Gewässer eingespeist, während beim Verdünnungsverfahren mit kontinuierlicher Injektion der Markierungsstoff über eine gewisse Impfzeit mit einer konstanten Menge eingegeben wird. Das Verdünnungsverfahren wird mit Hilfe von Dosierungspumpen oder Einspritztanks, die nach dem Prinzip der Mariotteschen Flasche arbeiten, umgesetzt. Als Markierungsstoffe (Tracer) werden Elektrolyte, radioaktive Stoffe wie auch Farbstoffe in wässriger Lösung eingesetzt. Die Verdünnung wird bei Elektrolyten über die Leitfähigkeit, bei radioaktiven Isotopen durch Aktivitätsmessung mittels Geigerzählgeräts und bei Farbstoffen kolorimetrisch bestimmt.

Um eine vollständige Durchmischung des Markierungsstoffes zu gewährleisten, wird zunächst die Entfernung zwischen Impf- und Messquerschnitt (Messstrecke) bestimmt. Die Entfernung der Durchmischungsstrecke kann durch dafür abgeleitete empirische Formeln oder einen einfachen Färbeversuch festgestellt werden. Dafür eignen sich Farbstoffe wie Fluoreszinnatrium oder Eosinnatrium (DYCK u. PESCHKE 1995, S.97).

Um ein genaues Messergebnis zu erhalten müssen folgende Randbedingungen eingehalten werden (LUDER, B., 1994, S. 3).

- Es muss darauf geachtet werden, dass der Durchfluss während der gesamten Messdauer konstant ist. (Pegel beobachten)

- Die eingesetzte Tracer-Menge muss in gelöster Form den Messquerschnitt passieren, d.h. es darf zu keinen Verlusten, keiner Adsorption und keiner chemische Reaktion kommen.
- Der Tracer muss gut vermischt sein, d.h. dass summiert über den ganzen Zeitraum des Tracer-Durchgangs an jedem Punkt des Probeentnahmequerschnittes die gleiche Menge Tracer vorbeifließt.

Für die Verdünnungsmessung ist weder die Bestimmung des Messquerschnitts noch eine Geschwindigkeitsmessung erforderlich (DYCK u. PESCHKE 1995, S.97).

### 5.3.1.1 Verdünnungsverfahren mit kontinuierlicher Injektion

Bei dieser Methode wird der Tracer über eine bestimmte Zeit mit einer festen Einspritzrate ( $q$ ) und der Konzentration  $C_1$  eingepflegt. Der Tracer vermischt sich mit der Strömung und seine Konzentration steigt so lange an, bis die gemessene Tracer-Konzentration ( $C_2$ ) am Entnahmepunkt einen konstanten Wert erreicht hat, d.h. die Verdünnung bleibt dann konstant (siehe Abbildung 28).

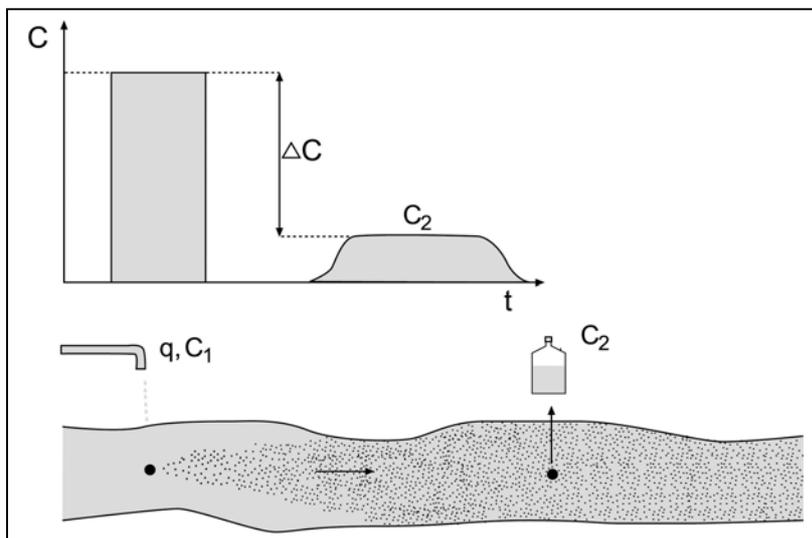


Abbildung 28: Tracer-Verdünnungsverfahren mit kontinuierlicher Injektion (Durchflusshandbuch 2003, S. 186)

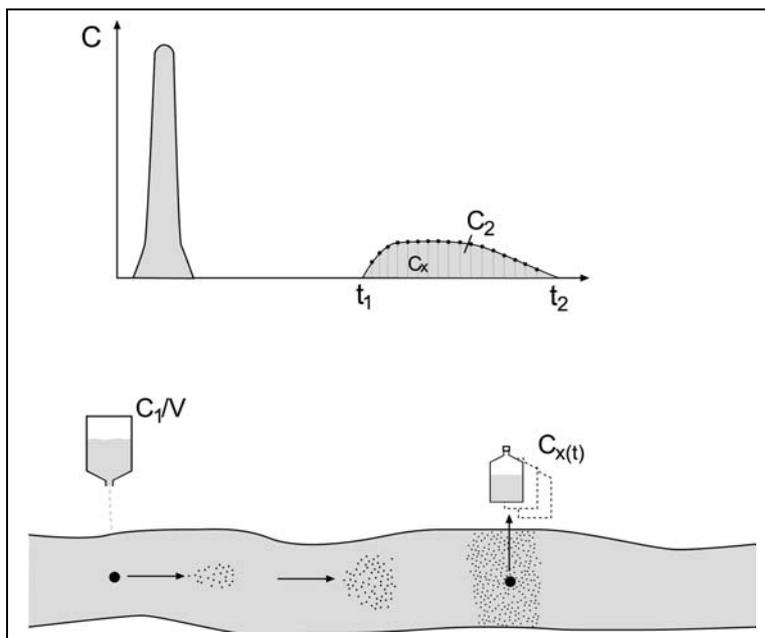
Jetzt können Wasserproben entnommen werden, um den Gesamtdurchfluss ( $Q$ ) aus der Tracer-Konzentration vor und nach der Vermischung mit folgender Formel zu berechnen:

$$Q = q * (C_1/C_2)$$

- Q Durchflussmenge
  - q Einspritzmenge
  - C1 Unverdünnte Tracer-Konzentration am Eingabepunkt
  - C2 Tracer-Konzentration am Entnahmepunkt (konstant)
- (DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 185-187)

### 5.3.1.2 Verdünnungsverfahren mit Momentaninjektion (Integrationsverfahren)

Wie bereits erwähnt wird bei dieser Methode ein bekanntes Volumen (V) des Tracers mit der Konzentration C1 momentan in das Gewässer eingespeist. Nach der Durchmischungsstrecke misst man strömungsabwärts die zeitabhängigen verdünnten Konzentrationen (siehe *Abbildung 29*).



**Abbildung 29: Tracer-Verdünnungsverfahren mit Momentaninjektion - Integrationsmethode, (Durchflusshandbuch 2003, S. 184)**

Der sich aus dem Probenprofil ergebende Mittelwert (C2) der Einzelkonzentrationen (Cx) wird mit der anfänglichen Konzentration am Eingabepunkt verglichen. Dabei lässt sich der Durchfluss mit nachfolgender Formel berechnen:

$$Q = (V * C_1) / (T * C_2); \quad C_2 = \int_{t_1}^{t_2} (C_x * dt)$$

- Q Durchflussmenge
- V Eingespeistes Tracer-Volumen

C1 Unverdünnte Tracer-Konzentration am Eingabepunkt

Cx Zeitabhängige ( $t_1 \dots t_2$ ) verdünnte Tracer-Konzentration am Entnahmepunkt

C2 Mittlere (integrierte) Tracer-Konzentration am Entnahmepunkt über die Entnahmezeit (T)

T Entnahmezeit der Wasserproben ( $t_1 - t_2$ )

(DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 183-184)

### **5.3.2 Durchflussmessung mit der Salzverdünnungsmethode**

#### **5.3.2.1 Messvorgang**

(LUDER, B., 1994, S. 7-19)

Bei der Salzverdünnungsmethode wird Kochsalz (NaCl) als Tracer verwendet. Dabei wird zur Durchflussbestimmung (Q) der Verlauf der Tracerkonzentration indirekt über die elektrische Leitfähigkeit mit Hilfe von Leitfähigkeitsmesssonden gemessen und die daraus erhaltene Durchgangskurve integriert. Die Messsonden ermitteln zusätzlich zur Leitfähigkeit auch die Wassertemperatur, da diese die Leitfähigkeitsmesswerte beeinflusst. Die Leitfähigkeitsmesswerte werden automatisch auf eine Referenztemperatur von 20 bis 25°C angeglichen, und somit hat die Wassertemperatur keinen Einfluss auf die gemessenen Leitfähigkeitswerte. Die gemessenen Leitfähigkeiten können mit Hilfe des Eichkoeffizienten in Salzkonzentrationen umgerechnet werden.

#### **Leitfähigkeitsmessgerät**

Das Messgerät sollte einen Messbereich von mindestens 0 – 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mit einer Auflösung von 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufweisen. Zusätzlich sollte das Gerät die Temperatur erfassen können. Das Messkabel sollte eine Länge von ~10m aufweisen. Das Leitfähigkeitsmessgerät muss feldtauglich sein, d.h. mit eigener Stromversorgung arbeiten. Die Messsonde sollte laut Hersteller gereinigt und mit Essig oder Durgol entkalkt werden.

#### **Die Grundleitfähigkeit**

Bei der Durchflussberechnung ist zu beachten, dass das Gewässer bereits ohne Salzzugabe eine elektrische Leitfähigkeit aufweist. Die sog. Grundleitfähigkeit ist auf die Mineralisierung des Gewässers zurückzuführen.

Bei den Leitfähigkeitsmessungen wird die effektive Leitfähigkeit erfasst, d.h. die Grundleitfähigkeit des Gewässers und die durch die Salzzugabe bewirkte Leitfähigkeit. Die Grundleitfähigkeit kann oberhalb der Salzeingabestelle gesondert gemessen werden. Da es aber oft zu aufwändig ist die Grundleitfähigkeit gesondert zu erfassen, wird diese in der Praxis meist rechnerisch von der effektiven Leitfähigkeit abgezogen. Dabei wird angenommen, dass die erste und die letzte Messminute der Durchflussmessung von der Salzzugabe unbeeinflusst sind und somit der Grundleitfähigkeit gleichgesetzt werden können.

### **Salzvorbereitung**

Das zu verwendende Salz muss auf mind. 1% genau gewogen werden. Als Salze eignen sich Natriumchloridsalze, die möglichst wenige Zusätze wie Fluor, Jod oder Antiklumpmittel aufweisen sollten, um die Umwelt nicht zu belasten. Salze sollen in größeren Mengen eingekauft werden, damit der Eichkoeffizient nicht immer wieder neu bestimmt werden muss. Um 1 m<sup>3</sup>/s zu messen, werden 2-5 kg Salz benötigt. Vor der Messung muss deshalb der Durchfluss geschätzt werden.

### **Eichkoeffizient**

Da beim Salzverdünungsverfahren die Salzkonzentrationen nicht direkt, sondern über die elektrische Leitfähigkeiten gemessen werden, muss für die Umrechnung der Leitfähigkeitsmesswerte in Salzkonzentrationswerte ein sogenannter Eichkoeffizient [/(mg/l)/( $\mu$ S/cm)] bestimmt werden. Zur Ermittlung des Eichkoeffizienten muss vor der Durchflussmessung eine Feldeichung durchgeführt werden. Dabei wird mit einem Messkolben das Ausgangsvolumen des Gerinnewassers bestimmt. Zuerst wird mit Hilfe eines Leitfähigkeitsmessgerätes die Grundleitfähigkeit des Ausgangsvolumens erfasst.

Danach gibt man schrittweise mit einem geeigneten Volumenmessgerät (z.B. Glaspipette, automatische Pipette) eine bestimmte Menge der Eichlösung mit bekannter Konzentration bei und misst bei jedem Schritt die Leitfähigkeit. Der Leitfähigkeitsbereich der Eichkurve muss innerhalb des Leitfähigkeitsbereichs der Durchflussmessung liegen. Die Eichlösung besteht aus einer bekannten Menge des zu verwendenden Salzes und Aqua bidest (Reinstwasser mit einer Leitfähigkeit < 1  $\mu$ S/cm).

Durch die einzelnen Messungen ergeben sich mehrere Punkte auf einer Salzkonzentrations-Leitfähigkeits-Eichgerade. Daraus ergibt sich für jeden Messschritt der Eichkoeffizient, resultierend aus dem Quotienten von Salzkonzentrationserhöhung zu Leitfähigkeitserhöhung. Den bei der Durchflussmessung gemessenen Leitfähigkeiten kann nun mittels Eichkurve die entsprechende Salzkonzentration zugeordnet werden.

### **Durchmischungsstrecke**

Die sog. Durchmischungsstrecke wird am Anfang durch die Salzeingabestelle und am Ende durch die Messstelle begrenzt. Um ein genaues Messergebnis zu erhalten, ist die Auswahl der Durchmischungsstrecke entscheidend. Es sollte ein möglichst turbulenter Gewässerabschnitt gewählt werden, um eine vollständige Durchmischung zu gewährleisten. Totwasserbereiche sind zu meiden, da es hier zu Tracerverlusten kommen kann. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass innerhalb der Durchmischungsstrecke keine Zu- oder Abflüsse vorhanden sind. Die Durchmischungsstrecke kann mit 20 - 50 mal mittlere Gerinnebreite oder 100 mal der engsten Gerinnebreite festgelegt werden.

### **Festlegen der Messstelle (Positionierung der Sonden)**

Da von vollständiger Durchmischung ausgegangen wird, spielt die Positionierung der Messsonden im Messquerschnitt keine Rolle. Um die Messdauer zu verkürzen, werden die Messsonden jedoch meist im Bereich der größten Fliessgeschwindigkeit positioniert. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass die Messsonden nicht in Mitten von Wasserpflanzen oder schäumendem Wasser platziert werden, da es durch Luftblasen und Blätter zu Leitfähigkeitsschwankungen kommen kann.

### **Salzeinspeisung**

Das Salz muss in einem Kunststoffbehälter (z.B. Eimer) vollständig aufgelöst werden (Salzlöslichkeit ~300 g/l). Danach wird die Salzlösung in einem Zug an der Eingabestelle in das Gewässer eingegeben.

### **Messung der Salzkonzentration**

An der Messstelle wird der gesamte Salzdurchgang mit Hilfe eines bzw. mehrerer Leitfähigkeitsmessgeräte erfasst. Die Messwerte können online über einen Datenlogger, von

Hand oder mit Hilfe eines Feldcomputers erfasst werden. Bevor und nachdem die Salzwolke den Messquerschnitt passiert hat, wird eine Minute lang die Grundleitfähigkeit erfasst. Dabei ist es wichtig die Messung zum richtigen Zeitpunkt abzuschließen. Da die Grundleitfähigkeit Schwankungen unterliegen kann, ist es oft nicht eindeutig, ob noch gelöstes Salz den Messquerschnitt passiert oder nicht. Diese Schwankungen treten besonders nach Niederschlagsereignissen auf. Da eine Messung nur 10-30 Minuten dauert, sind die Grundleitfähigkeitsänderungen über diesen Zeitraum linear und können vernachlässigt werden. Unterhalb von Abwasserzuflüssen sollte nicht gemessen werden, da es hier zu nichtlinearen Schwankungen der Grundleitfähigkeit kommen kann und dadurch falsche Messergebnisse erzielt werden.

### **Registrierung der Leitfähigkeitsmesswerte und Auswertung**

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Leitfähigkeitswerte zu registrieren. Es können Protokollblätter verwendet werden, wobei die Messwerte alle zwei, drei oder fünf Sekunden vom Leitfähigkeitsmessgerät abgeschrieben werden. Meist wird jedoch ein Datenlogger eingesetzt. Die Daten können nach der Messung auf einen PC überspielt und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet und graphisch dargestellt werden. Es gibt auch Kompaktgeräte, die die Daten erfassen und gleichzeitig auswerten.

Salzmenge M in [mg]

Eichkoeffizient e in [(mg/l)/( $\mu$ S/cm)]

Summe aller Messwerte  $\Sigma_{xi}$  in [ $\mu$ S/cm]

Anzahl aller Messwerte  $\Sigma_x$

Gemittelte Leitfähigkeit der ersten Messminute  $t_1$  in [ $\mu$ S/cm]

Gemittelte Leitfähigkeit der letzten Messminute  $t_2$  in [ $\mu$ S/cm]

Messintervall in Sekunden [s]

Nach folgender Formel lässt sich der Durchfluss (Q) berechnen:

$$Q = \frac{M}{e * (\Sigma_{xi} - \Sigma_x * \frac{(t_1 + t_2)}{2}) * s}$$

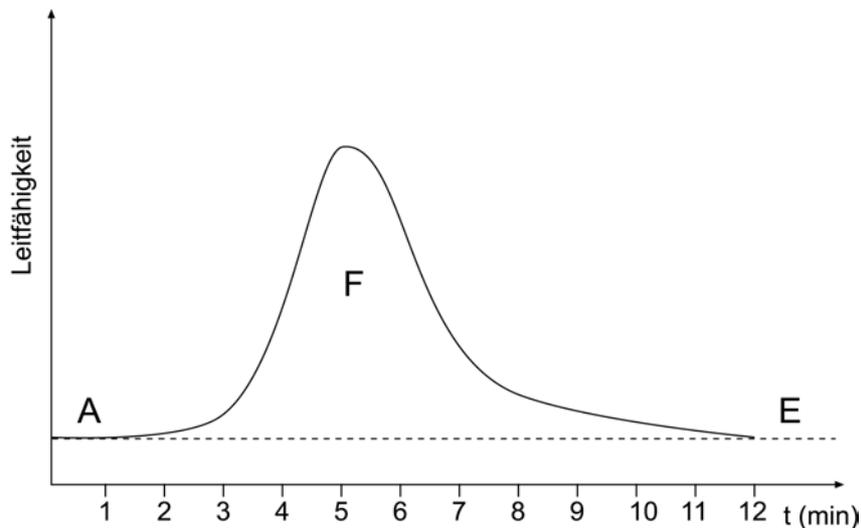


Abbildung 30: Leitfähigkeitskurve einer Durchflussmessung mit Grundleitfähigkeit (LUDER, B., 1994, S. 12)

A = Anfangsleitfähigkeit (gemittelte Leitfähigkeit der ersten Messminute)

E = Endleitfähigkeit (gemittelte Leitfähigkeit der letzten Messminute)

G = gemittelte Grundleitfähigkeit  $[(A+E) / 2]$

F = Fläche unter der Kurve in  $[(\mu\text{S}/\text{cm}) * \text{min}]$

Leitfähigkeit in  $(\mu\text{S}/\text{cm})$

Zur Durchflussberechnung siehe Formel in *Kap. 5.3.1.2.*

### 5.3.2.2 Praxisbeispiel eines Salzverdünnungsverfahrens an der Messstelle Saifenbach/Pöllau bei Hartberg

Im Herbst 2003 wurden im Zuge dieser Arbeit Durchflussmessungen mit dem Salzverdünnungsverfahren an mehreren Messstellen in der Umgebung von Pöllau in der Steiermark durchgeführt. Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Graz und der Hydrographischen Landesabteilung Steiermark durchgeführt.

Im Zuge dieser Arbeit wurden zur Durchflussmessung 500g NaCl (Kochsalz) als Tracer bei einem geschätzten Durchfluss von 100 l/s und 2 Leitfähigkeitsmesssonden zur Messung der Leitfähigkeit verwendet.

#### Messablauf

Vor Beginn der Durchflussmessung wurde eine Feldeichung (*siehe Abbildung 31*) durchgeführt um den Eichkoeffizienten zu ermitteln.



**Abbildung 31: Durchführung der Feldeichung an der Messstelle Saifenbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003**

Die Messstrecke wurde laut Erfahrungswert mit ca. 50m festgelegt. Es wurde darauf geachtet, dass die Fließstrecke lang und turbulent genug ist, damit sich die Salzlösung mit dem Bachwasser auf der ganzen Bachbreite gleichmäßig durchmischen konnte. Danach wurden die 2 Sonden am Ende der Messstrecke in Position gebracht.

Die Salzeingabe erfolgte ca. 1 Minute nach Beginn der Leitfähigkeitsmessung. Die Kochsalzlösung wurde momentan in das Fließgewässer entleert (*siehe Abbildung 32*).



**Abbildung 32: Einbringung des aufgelösten Salzes an der Messstelle Prätisbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003**

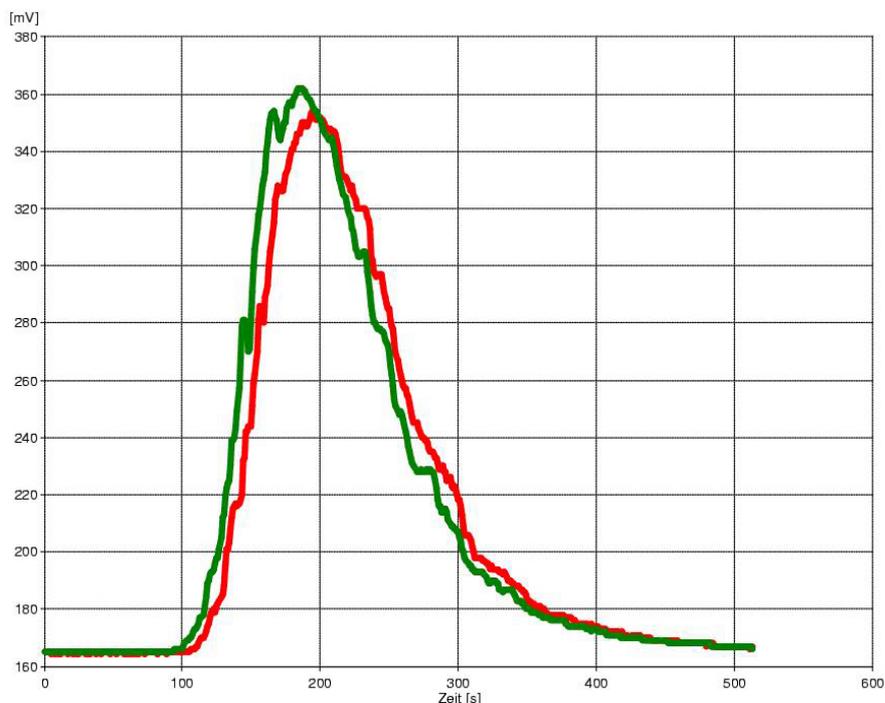
Vom Zeitpunkt der Salzeingabe an wurde am Ende der Messstrecke sekundlich die Leitfähigkeit des Gewässers mit Hilfe der 2 Sonden gemessen. Am Beginn der Messung wurde dabei die Grundleitfähigkeit erfasst. Beim Durchgang der Salzwolke wurde der Verlauf

der Leitfähigkeit registriert. Sobald die gemessene Salzkonzentration wieder auf den Wert der Grundleitfähigkeit zurückgegangen war, konnte die Messung abgeschlossen werden .



**Abbildung 33: Messsonden zur Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit an der Messstelle Prätisbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003**

Aus dem Integral der Leitfähigkeitsfunktion über die Zeit (*Abbildung 34: Fläche der roten bzw. grünen Kurve*) konnte der gesuchte Durchfluss berechnet werden.



**Abbildung 34: Durchgangskurve der Integrationsmessung (Verlauf der Leitfähigkeit in Funktion zur Zeit) an der Messstelle Prätisbach in Pöllau bei Hartberg am 15.10.2003 (rote Linie: Messung Sonde 1 (37,94 l/s), grüne Linie: Messung Sonde 2 (37,45 l/s))**

Bei der Verwendung von 2 Messsonden sollten, bei vollständiger Durchmischung, die beiden Kurven annähernd identisch sein. Daraus lässt sich auch die Qualität der Vermischung

feststellen. Würden die beiden Kurven zu stark voneinander abweichen, wäre die Durchmischung nicht ausreichend und der Messvorgang müsste wiederholt werden.

### **5.3.3 Radioaktive Tracer**

(DYCK u. PESCHKE 1995, S. 98-99)

#### **5.3.3.1 Messprinzip**

Hierbei wird dem fließenden Wasser eine konstante Menge pro Zeiteinheit  $q$  der radioaktiven Indikatorsubstanz mit einer spezifischen Aktivität  $A_1$  beigegeben. Am Ende der Durchmischungsstrecke werden Proben entnommen und die spezifische Aktivität  $A_2$  gemessen. Geht man davon aus, dass das unbelastete Wasser eine spezifische Aktivität von  $A_0$  aufweist, kann folgende Formel zur Durchflussbestimmung angewendet werden:

$$Q = q \frac{A_1 - A_2}{A_2 - A_0}$$

Bei der Verwendung von radioaktiven Tracern müssen bestimmte Kriterien eingehalten werden. Sie müssen eine geringe Halbwertszeit aufweisen, die maximal zulässige Aktivität in Trink- und Brauchwasser nicht überschreiten, im Wasser gut löslich sein, geringe Adsorptionseigenschaften aufweisen und zusätzlich noch preisgünstig sein. Folgende Isotope erfüllen die zuvor genannten Bedingungen: Tritium,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{82}\text{Br}$  und  $^{131}\text{I}$ .

Radioaktive Tracer kommen zur Durchflussermittlung in Oberflächengewässern eher selten zum Einsatz.

### **5.3.4 Fluoreszenztracer**

#### **5.3.4.1 Messprinzip**

Fluoreszenzfarbstoffe sind organische Verbindungen und zählen zu den leistungsfähigsten hydrologischen Tracerarten. Für Verdünnungsmessungen mit Farbstoffen kommen hauptsächlich Fluoreszenztracer wie Uranin oder Rhodamin zum Einsatz, deren Konzentration am Messquerschnitt mit entsprechenden Geräten (Lichtleitfluorometer) kolorimetrisch ermittelt werden kann. Da bei einer geringen Farbstoffkonzentration ein linearer Zusammenhang zwischen der Fluoreszenzintensität und der Tracerkonzentration

besteht, kann durch die Intensität der Fluoreszenz auf die Tracerkonzentration rückgeschlossen werden. (GEES, A., ROCHAT, R., 1992, Bern)

Der am häufigsten zum Einsatz kommende Fluoreszenztracer für Messungen in Oberflächengewässern ist Amidorhodamin G, da dieser Farbstoff in unbelasteten Gewässern sehr stabil ist. Da Uranin sehr lichtempfindlich ist, werden Messungen mit Uranin nachts sehr erfolgreich durchgeführt. (BEHRENS, H., 1982, S. 6)

### **5.3.5 Vor- und Nachteile der Tracermessung**

Mit der Salzverdünnungsmethode kann eine Durchflussmenge bis zu einigen  $\text{m}^3/\text{s}$  bestimmt werden. Begrenzt wird dieses Verfahren durch den relativ hohen Salzeinsatz. Bei stark belasteten Gewässern kann es zu größeren Schwankungen der Grundleitfähigkeit kommen oder zu Tracerverlusten in Totwasserbereichen. Je genauer die Grundleitfähigkeit erfasst wird, um so genauer ist das Ergebnis der Durchflussmessung.

Die Messgeräte, die heutzutage Verwendung finden, liefern sehr genaue Messergebnisse. Messfehler ergeben sich hauptsächlich durch unvollständige Durchmischung des Tracers (zu wenig Turbulenzen). Es ist daher sehr wichtig, einen guten Standort für die Messung festzulegen. Ein großer Vorteil dieser Messart ist, dass die Messergebnisse unmittelbar nach der Messung vorliegen. Zusätzlich halten sich die Kosten in Grenzen (abhängig vom verwendeten Tracer). (LUDER, B., 1994, S. 20)

Fluoreszierende Farbstoffe können mit Spektralfluorometern bis hinunter zu Konzentrationen von  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nachgewiesen werden. Die Einspeisemengen sind dadurch extrem klein (wenigen Gramm Tracer pro  $\text{m}^3/\text{s}$  Durchfluss), was ein großer Vorteil gegenüber der Salzverdünnung ist. Das Hauptproblem besteht zur Zeit noch darin, dass die vorgesehenen Nachweisgeräte (Lichtleit-Fluorometer) für den rauen Feldeinsatz noch zuwenig ausgereift sind. In den letzten Jahren haben sich jedoch Lichtleit-Fluorometer stark verbessert (GEES, A., ROCHAT, R., 1992, S. 5-9).

Bei Hochwasser kann es durch den oft sehr hohen Schwebstoffanteil zu großen Messfehlern kommen. Zusätzlich kann es zu Tracerverlusten durch Adsorption, photolytischen Zerfall, oder bei der Laborauswertung und Fluoreszenzunterdrückung durch pH-Wert-Änderungen kommen. Wenn diese Fehlerquellen erkannt und berücksichtigt werden, können mit dem

Einsatz von Fluoreszenztracern sehr genaue Messergebnisse erzielt werden (HODEL 1992, S. 16).

## **5.4 Ultraschallmessung**

### **5.4.1 Messprinzip**

Seit Beginn der 70er Jahre kommt zur Ermittlung des Durchflusses die Ultraschallmethode zur Anwendung. Diese Methode beruht auf der Erkenntnis, dass sich ein Schallsignal im fließenden Wasser mit der Strömung schneller als gegen die Strömung ausbreitet (DYCK u. PESCHKE 1995, 102).

Bei der Ultraschallmessung wird mit Hilfe hochfrequenter Schallwellen der Durchfluss ermittelt. Dabei wird zwischen zwei Messverfahren unterschieden:  
(DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 131)

Doppler-Verfahren

Laufzeitdifferenz-Verfahren

#### **5.4.1.1 Laufzeitdifferenz-Verfahren**

Bei diesem Verfahren wird die mittlere Fließgeschwindigkeit in mehreren Teilebenen gemessen und daraus der Gesamtdurchfluss integriert (MANIAK 1993, S.70).

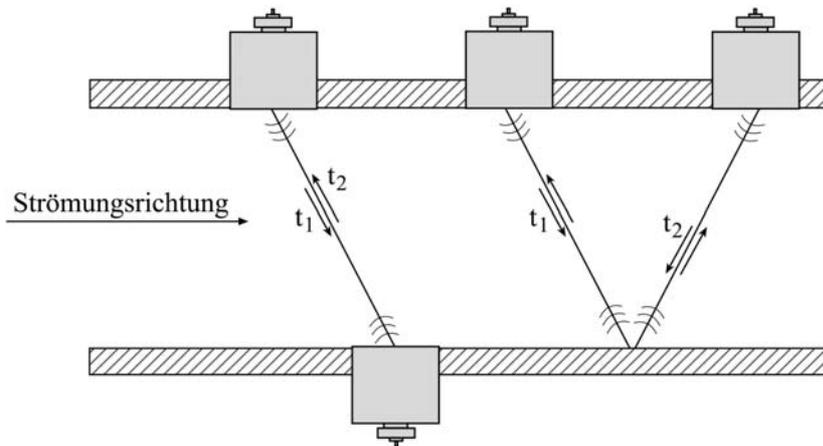
Zwei Sensoren senden und empfangen gleichzeitig Ultraschallimpulse (akustische Signale). Im fließenden Wasser benötigen die Ultraschallwellen strömungsbedingt unterschiedliche Laufzeiten, um den jeweils anderen Sensor zu erreichen. Bei bekanntem Sensorabstand ist die gemessene Laufzeitdifferenz direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit. Mit Hilfe eines Messumformers werden die Ultraschallsensoren zur Ultraschallaussendung angeregt, und zusätzlich misst dieser auch die Laufzeitdifferenz (DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 132-133).

$$Q = (t_1 - t_2) / (t_1 * t_2)$$

$t_1$  = Laufzeit  $t_1$  mit dem Flüssigkeitsstrom

$t_2$  = Laufzeit  $t_2$  gegen dem Flüssigkeitsstrom

$K$  =  $K=f$  (Länge des akustischen Pfades, Verhältnis zwischen radialem und axialem Sensorabstand, Geschwindigkeitsverteilung im Strömungsprofil, Querschnittsfläche)



**Abbildung 35: Ultraschall-Strömungsmessung mittels Laufzeitdifferenz-Verfahrens, (Grundriss eines Flusslaufes), (Durchflusshandbuch 2003, S. 133).**

Die linke Darstellung in *Abbildung 35* zeigt eine „Einzelpfad-Anordnung“ welche den einfachsten Aufbau darstellt. Die messbare Gewässerbreite liegt hier bei 5 – 150m.

Die rechte Darstellung in *Abbildung 35* zeigt die „Einzelpfad-Reflektor-Anordnung“. Diese findet hauptsächlich in Gewässern mit ungünstigen Zulaufbedingungen und mittlerer Gewässerbreiten (5 – 20m) Verwendung (Prospekt der Firma OTT Hydrometrie, Sonicflow, S. 3).

#### **5.4.1.2 Doppler-Verfahren**

(DURCHFLUSSHANDBUCH 2003, S. 131-132)

Bei diesem Verfahren erfolgt die Durchflussermittlung mit Hilfe des „Doppler-Effektes“. Die Dopplerverschiebung ist eine Zu- bzw. Abnahme der Schallwellenfrequenz. Sie entsteht, wenn sich Schallquelle und Beobachter aufeinander zu- bzw. voneinander weg bewegen.

Durch Verunreinigungen im Wasser werden bei der Doppler-Ultraschall-Durchflussmessung die ausgesendeten Ultraschallwellen reflektiert. Das Messgerät besteht aus zwei Sensoren. Dabei sendet der erste Sensor Ultraschallwellen mit einer bestimmten Frequenz ( $f_1$ ) aus. Der zweite Sensor empfängt die an Partikeln (Schwebstoffe) oder Gasblasen reflektierten Schallwellen ( $f_2$ ). Die Frequenz der reflektierten Schallwellen ist von der

Partikelgeschwindigkeit abhängig. Die Größe der Frequenz- oder Dopplerverschiebung ist dabei proportional zur Fließgeschwindigkeit der Verunreinigungen im Gewässer. Daraus lässt sich der Durchfluss wie folgt ermitteln:

$$Q = K * \Delta f$$

$\Delta f$  = Frequenzverschiebung ( $f_1 - f_2$ )

K = konstante = f (Einfallswinkel/Brechungswinkel, Position des reflektierten Partikels, Querschnittsfläche)

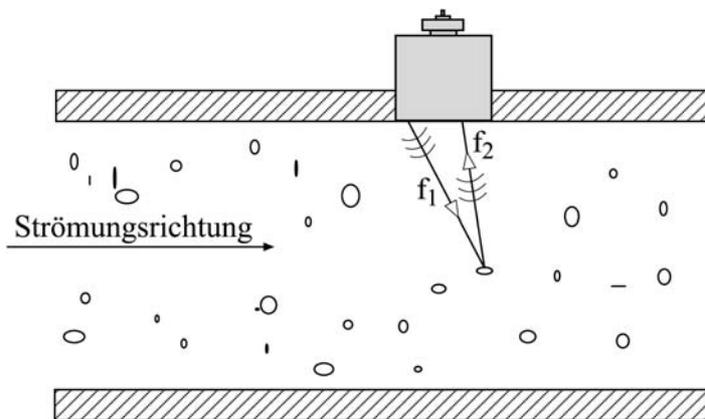


Abbildung 36: Ultraschall-Durchflussmessung mittels Doppler-Effekt, (Grundriss eines Flusslaufes), (Durchflusshandbuch 2003, S. 131)

Beim Doppler-Verfahren kann die Fließgeschwindigkeit einfach und genau ermittelt werden, solange die Geschwindigkeit eines Partikels gemessen wird. Da die Geschwindigkeit der transportierten Teilchen unterschiedlich ist, müssen die Messergebnisse entsprechend „gewichtet“ werden. Dabei wird angenommen, dass sich die Partikel im Mittel wie die sie tragende Strömung bewegen. Zusätzlich ist zu beachten, dass das reflektierte Ultraschallsignal aus seinem Rückweg durch andere Partikel beeinflusst werden kann.

Es gibt unterschiedliche Typen und Bauarten von Sensoren (*Details dazu siehe Durchflusshandbuch 2003, S. 133-136*). Details zur Handhabung und Wartung siehe *Pegelvorschrift Anlage D 1998, S. 37-39*.

Auf dem Akustik-Doppler Prinzip basierende Messgeräte sind z.B. StreamPro ADCP der Firma RD Instruments, Qliner und EasyQ river flow monitor der Firma Nortek AS. Details siehe: [www.rdistruments.com](http://www.rdistruments.com), [www.nortek-as.com](http://www.nortek-as.com) , *User Manual Qliner 2003, S. 1-32*, *User Manual EasyQ river flow monitor 2003, S. 1-56*.

#### **5.4.2 Akustik-Doppler-Current-Profiler (ADCP)**

Dieses Messgerät funktioniert nach dem Akustik-Doppler-Prinzip. Das ADCP-Messgerät eignet sich am besten für Gewässerbreiten von 1 – 30m und 0,3 – 5m Tiefe, kann aber auch bei größeren Gewässern eingesetzt werden.

Mit Hilfe eines kleinen Bootes wird das ADCP-Messgerät von Ufer zu Ufer über den Messquerschnitt geführt. Dabei werden die Strömungsgeschwindigkeiten in „Messzellen“, die Geschwindigkeit des Bootes und die Wassertiefe gemessen. Die vom ADCP-Messgerät ausgesandten Ultraschallimpulse werden von Partikeln im Wasser reflektiert und dann als Echo vom Messgerät wieder empfangen. Nach dem Dopplerprinzip wird die Bewegung der Partikel aus der Frequenzverschiebung zwischen dem gesendeten und empfangenen Signal ermittelt. Die Berechnung des Durchflusses basiert auf Messungen vertikaler Geschwindigkeitsprofile. Je langsamer die Überfahrtsgeschwindigkeit ist, desto mehr Daten können aufgenommen werden und desto genauer wird das Messergebnis. Die Ergebnisse liegen sofort nach Beendigung der Messung vor. Die mit der Software durchgeführte Durchflussberechnung basiert auf den gemessenen Strömungsprofilen und dem ebenfalls direkt gemessenen Gewässerprofil sowie Extrapolationen für die flachen Uferbereiche, in denen nicht gemessen werden kann.

Der große Vorteil dieses Messgerätes liegt darin, dass während der Fahrt gemessen werden kann. Zusätzlich kann der Messweg von Ufer zu Ufer beliebig gewählt werden.

Für die Durchflussermittlung von Hochwasserabflüssen stellt die ADCP-Technik besonders an kleineren Fließgewässern das einzige Verfahren da, mit dem sinnvolle Ergebnisse erzielt werden können. Die Bestimmung eines Durchflusswertes ist innerhalb von wenigen Minuten abgeschlossen. Bei Pegeldifferenzen der Hochwasserpegel von mehreren Zentimetern pro Stunde würde eine mehrere Stunden dauernde Flügelmessung nicht mehr zu verlässlichen Ergebnissen führen (*User Manual Qliner 2003, S.7ff*).

#### **5.4.3 Vor- und Nachteile von Ultraschallmessgeräten**

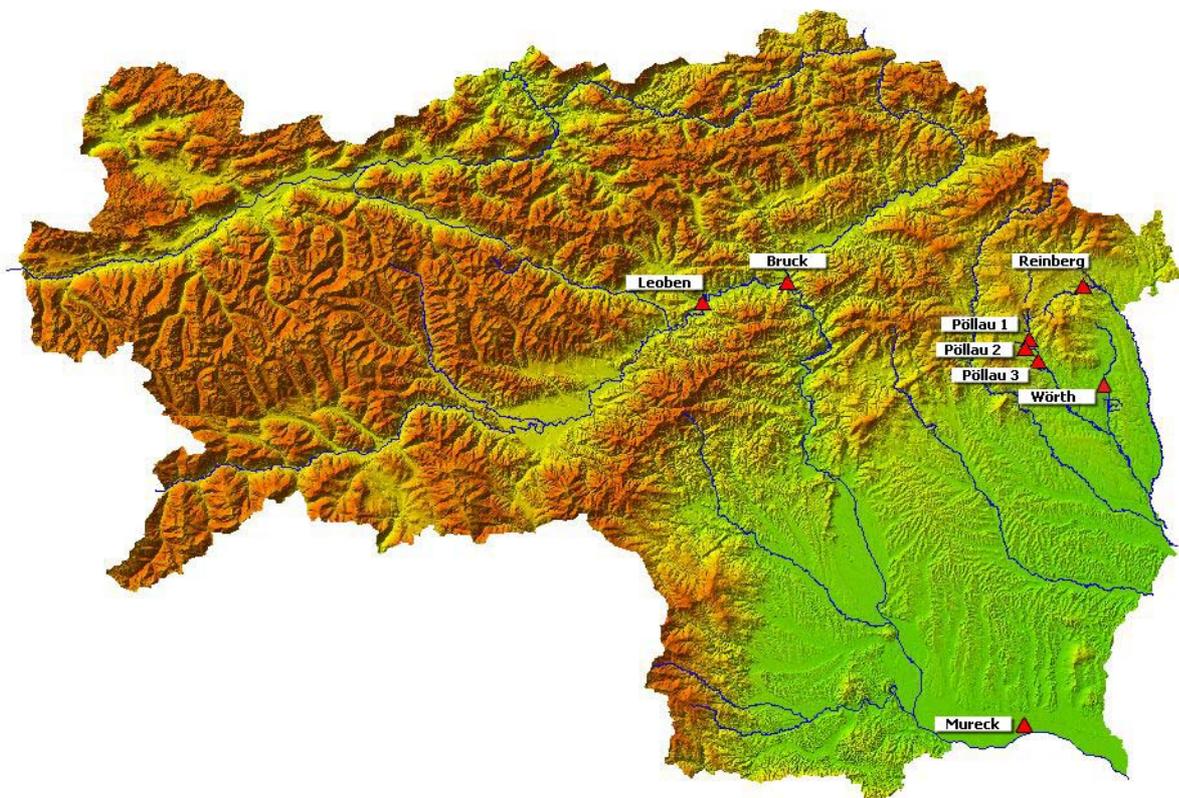
Heutzutage werden Ultraschallmessgeräte unterschiedlichster Art angeboten. Dadurch sind Messung in Gewässern mit einer Breite von einigen Metern bis zu 2000m möglich.

Ultraschallmessgeräte eignen sich besonders zur Durchflussmessung in staugeregelten Gewässern wie z.B. Hochwasser-Rückhaltebecken oder Flüssen. Sie können aber auch starken Turbulenzen und instationärem Durchfluss eingesetzt werden. Zusätzlich können Ultraschallmessgeräte auch bei Niedrigwasser eingesetzt werden, da nur eine geringe Sensorenüberdeckung notwendig ist. Ultraschallmessgeräte sind einfach in der Installation und in der Wartung.

Von Nachteil ist der hohe Anschaffungspreis, und besonders bei Hochwasser kann es bei sehr starker Schwebstoffführung zu Messfehlern kommen. Die Messergebnisse sind stark vom Strömungsprofil abhängig, und Ablagerungen am Wandler können auch zu ungenauen Messergebnissen führen (PEGELVORSCHRIFT Anlage D 1998, S. 39).

## 6. Vergleichsmessung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Vergleichsmessungen an 8 verschiedenen Messstationen durchgeführt (siehe dazu *Abbildung 37*).



**Abbildung 37: Messstellen der Durchflussmessungen: Leoben/Mur, Bruck/Mur, Reinberg/Voraubach, Pöllau 1/Prätisbach, Pöllau 2/Dürre Saifen, Pöllau 3/Saifenbach, Wörth/Lafnitz, Mureck/Mur, (Karte der Hydrografischen Landesabteilung Steiermark, DI Dr. Robert Schatzl)**

## 6.1 Vergleichsmessung: Hydrometrischer Flügel / elektromagnetische Messsonde (Nautilus) / Salzverdünnungsmethode

### 6.1.1 Einleitung

Am 15.10.2003 wurden Durchflussmessungen mit dem hydrometrischen Flügel, elektromagnetisch mittels Nautilus und mit dem Salzverdünnungsverfahren an drei verschiedenen Messstellen (Pegel Saifenbach bei Pöllau, Prätisbach bei Pöllau, Dürre Saifen bei Pöllau) durchgeführt. Ziel der Vergleichsmessungen war es, einen Vergleich der genannten Messmethoden zu erhalten. Die Auswertungen der Geschwindigkeitsmessungen mittels Messflügel und Nautilus erfolgten nach der Zweipunktmethode nach Kreps (*siehe dazu Kap. 5.1.5*).

### 6.1.2 Ergebnisse

Die Flügelmessung erfolgte mittels Gestänge und Ott-Flügel (Nr. 121239). Bei der elektromagnetischen Messung kam die sog. Nautilus Sonde 2000 der Firma OTT, die wie bei der Flügelmessung am Gestänge befestigt war, zum Einsatz. Beim Salzverdünnungsverfahren (Integrationsverfahren) wurden zur Durchflussmessung 500g NaCl (Kochsalz) als Tracer und 2 Leitfähigkeitsmesssonden zur Messung der Leitfähigkeit verwendet (*siehe dazu Kap. 5.3.2*).

Die drei Vergleichsmessungen zeigten folgendes Ergebnis:

#### Messstation Saifenbach bei Pöllau

Messmethode	Durchfluss (l/s)	Mittlere Geschw. $v_m$ (m/s)
Flügelmessung	138,0	0,101
Nautilus - Messsonde	146,0	0,107
Salzverdünnungsverfahren	127,93	-

Tabelle 2: Ermittelte Durchflussmenge (l/s) und mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003

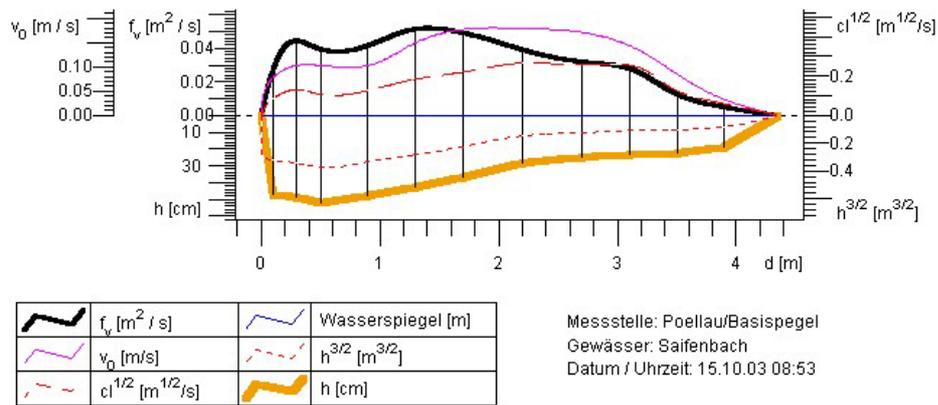


Abbildung 38: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003

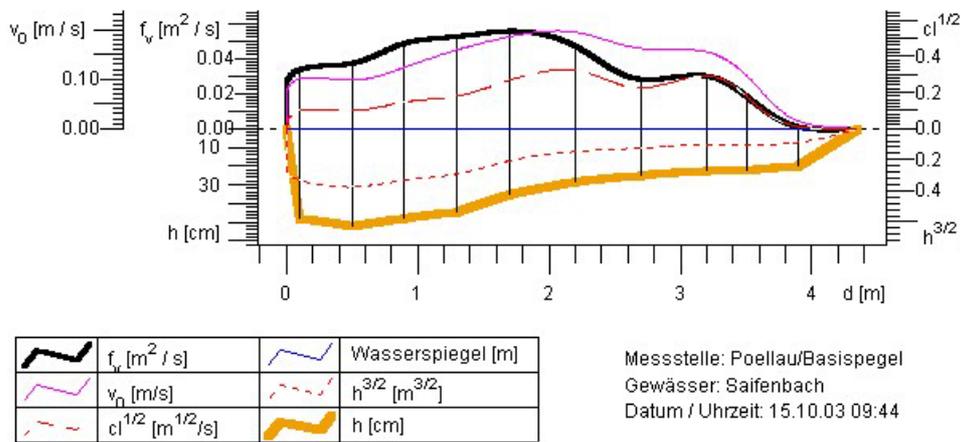


Abbildung 39: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003

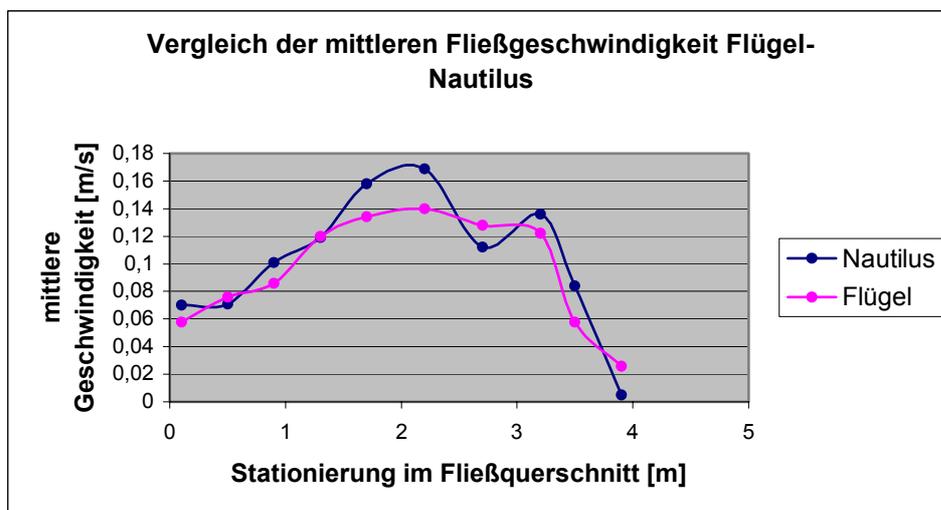


Abbildung 40: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Saifenbach bei Pöllau am 15.10.2003

Abbildung 40 zeigt einen Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeiten mittels Nautilus-Messsonde und Flügelmessung. Es ist zu erkennen, dass die mittleren Fließgeschwindigkeiten, außer im mittleren Bereich, relativ gut übereinstimmen.

### Messstation Prätisbach bei Pöllau

Messmethode	Durchfluss (l/s)	Mittlere Geschwindigkeit $v_m$ (m/s)
Flügelmessung	37,0	0,204
Nautilus - Messsonde	39,0	0,230
Salzverdünnungsverfahren	37,69	-

Tabelle 3: Ermittelte Durchflussmenge (l/s) und mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003

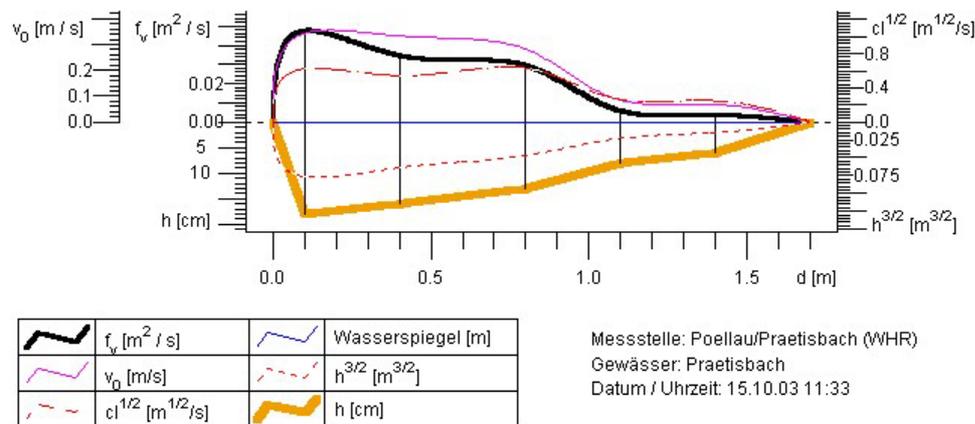


Abbildung 41: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003

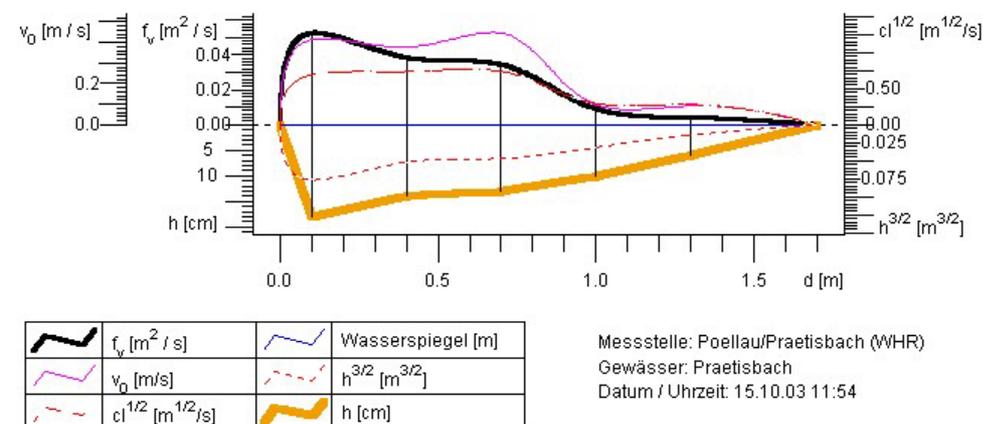


Abbildung 42: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003

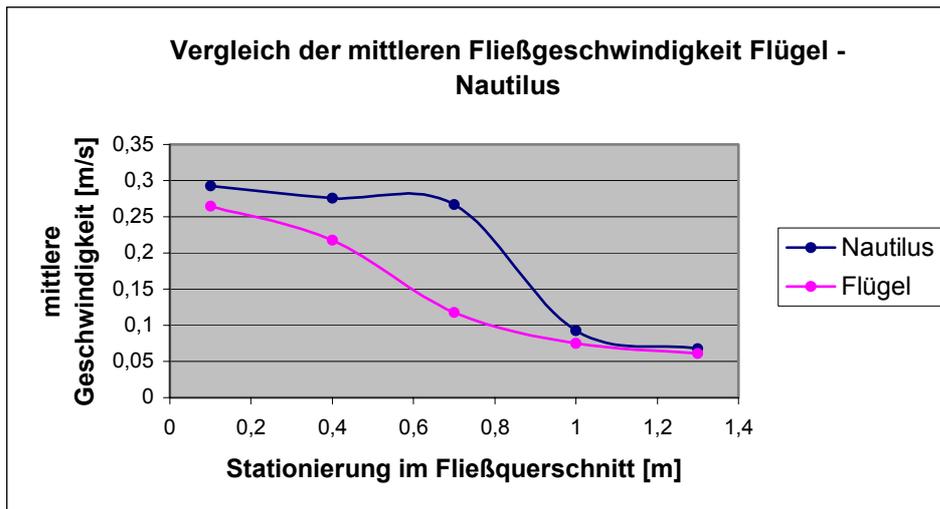


Abbildung 43: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Prätisbach bei Pöllau am 15.10.2003

Abbildung 43 zeigt wiederum den Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeiten mittels Nautilus-Messsonde und Flügelmessung. Auch hier ist zu erkennen, dass die mittleren Fließgeschwindigkeiten, außer im mittleren Geschwindigkeitsbereich, gut übereinstimmen.

#### Messstation Dürre Saifen bei Pöllau

Messmethode	Durchfluss ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Mittlere Geschwindigkeit $v_m$ (m/s)
Flügelmessung	92,0	0,272
Nautilus - Messsonde	93,0	0,273
Salzverdünnungsverfahren	94,2	-

Tabelle 4: Ermittelte Durchflussmenge ( $\text{l/s}$ ) und mittlere Geschwindigkeit  $v_m$  nach 3 verschiedenen Messverfahren am Pegel Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003

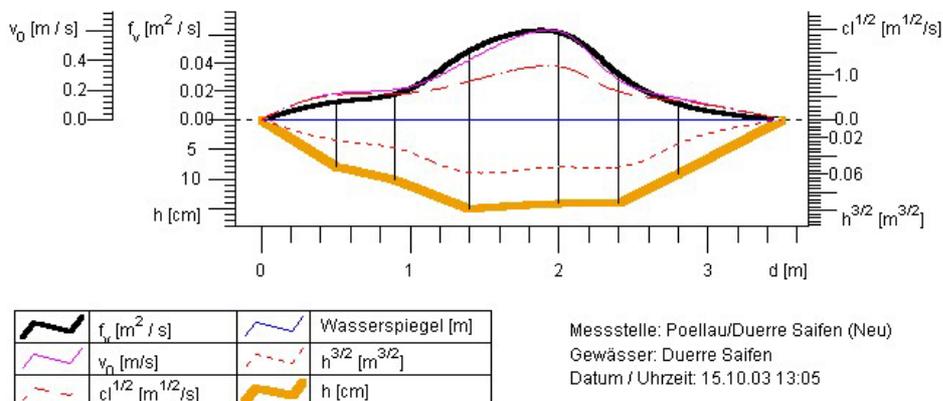


Abbildung 44: Geschwindigkeitsverteilung der Flügelmessung (siehe violette Linie) an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003

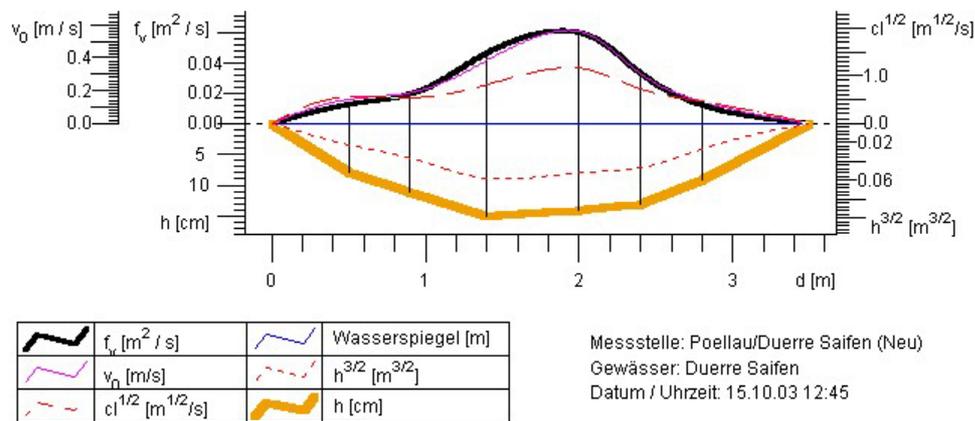


Abbildung 45: Geschwindigkeitsverteilung der Messung mit Nautilus (siehe violette Linie) an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003

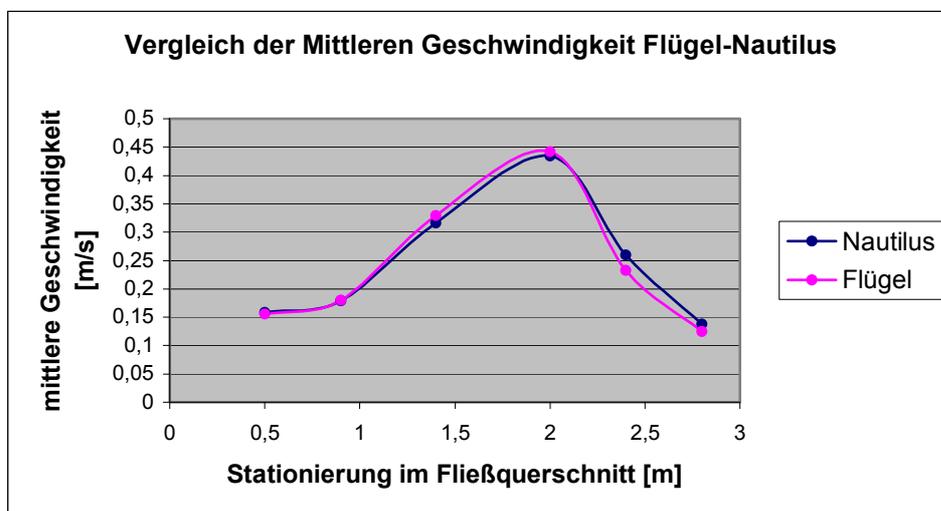


Abbildung 46: Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeit aus Nautilus- und Flügelmessung an der Messstation Dürre Saifen bei Pöllau am 15.10.2003

Abbildung 46 zeigt wiederum den Vergleich der gemessenen mittleren Fließgeschwindigkeiten mittels Nautilus-Messsonde und Flügelmessung. An dieser Messstation stimmten die gemessenen Fließgeschwindigkeiten fast völlig überein.

#### Vergleich der einzelnen Messverfahren:

	Flügel	Nautilus	Salzverdünnungs- -verfahren	Abweichung [%] Nautilus/Flügel	Abweichung [%] Salzv./Flügel
<b>Durchfluss [l/s] Saifenbach</b>	138,0	146,0	127,93	+5,5	-7,3
<b>Durchfluss [l/s] Prätisbach</b>	37,0	39,0	37,69	+5,1	+1,8
<b>Durchfluss [l/s] Dürre Saifen</b>	92,0	93,0	94,2	+1,1	+2,3

Tabelle 5: Vergleich der Durchflussmengen (l/s) nach 3 verschiedenen Verfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau / Prätisbach bei Pöllau / Dürre Saifen vom 15.10.2003, (Flügelmessung = 100%)

Die Messergebnisse des Salzverdünnungsverfahrens und der Nautilus-Messsonde wurden den Ergebnissen der Flügelmessung gegenübergestellt. *Tabelle 5* zeigt die Ergebnisse der Messungen in bezug auf die ermittelten Durchflussmengen. Zusätzlich sind in *Tabelle 5* die prozentuellen Abweichungen der angewendeten Messverfahren dargestellt. Dabei zeigt sich, dass an allen drei Messstationen die Durchflussermittlung mittels Nautilus-Messsonde höhere Werte ergaben als die Messungen mittels Flügelmessung. Die Abweichungen lagen bei maximal 5,5% und waren somit gering (Messstation Saifenbach). Beim Vergleich zwischen dem Salzverdünnungsverfahren und der Flügelmessung lag die höchste Abweichungen bei - 7,3 % (Messstelle Saifenbach).

### **6.1.3 Schlussfolgerungen**

In welcher Größenordnung die einzelnen Ergebnisse der Vergleichsmessungen maximal voneinander abweichen dürfen, ist in der Literatur nicht festgelegt. Die Genauigkeit ist jeweils vom Verwendungszweck der einzelnen Durchflussmessungen abhängig. Die Abweichungen der einzelnen Messergebnisse die im Zuge dieser Arbeit berechnet wurden lagen, laut DI Dr. Robert Schatzl, im vertretbaren Bereich. Die mittlere Abweichung sollte nicht mehr als 10 % betragen.

Die Messungen an den drei ausgewählten Pegelprofilen haben gezeigt, dass die ermittelten Durchflussmengen der angewandten Messverfahren nur gering voneinander abweichen. Besonders der Vergleich von Flügelmessung und Durchflussmessung mittels Nautilus-Messsonde zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse.

## **6.2 Vergleichsmessung: Hydrometrischer Flügel / Salzverdünnungsmethode**

### **6.2.1 Einleitung**

Am 12.11.2003 wurden Durchflussmessungen mit dem hydrometrischen Flügel und dem Salzverdünnungsverfahren an zwei Messstellen (Pegel Reinberg/Voraubach, Saifenbach bei Pöllau) durchgeführt. Ziel der Messungen war es wiederum, einen Vergleich der Messverfahren zu erhalten. Die Auswertungen der Geschwindigkeitsmessungen mittels Messflügel erfolgte nach der Zweipunktmethode nach Kreps (*siehe dazu Kap. 5.1.5*).

## 6.2.2 Ergebnisse

Die Flügelmessung erfolgte wieder mittels Gestänge und Ott-Flügel (Nr. 121239). Beim Salzverdünungsverfahren (Integrationsverfahren) wurden 500g NaCl (Kochsalz) als Tracer und 2 Leitfähigkeitsmesssonden zur Messung der Leitfähigkeit verwendet (*siehe dazu Kap. 5.3.2*).

Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Ergebnisse der zwei Vergleichsmessungen:

### Vergleich der zwei Messverfahren:

	Flügel	Salzverdünungs- verfahren	Abweichung [%] Salzv./Flügel
Durchfluss [l/s] Saifenbach	216,0	213,59	-1,1
<b>Durchfluss [l/s] Reinberg/Voraubach</b>	208,0	215,0	+3,3

Tabelle 6: Vergleich der Durchflussmengen (l/s) nach 2 verschiedenen Messverfahren am Pegel Saifenbach bei Pöllau und Reinberg/Voraubach vom 12.11.2003, (Flügelmessung = 100%)

Die Ergebnisse des Salzverdünungsverfahrens wurden den Messergebnissen der Flügelmessung gegenübergestellt. In *Tabelle 6* ist zu sehen, dass die ermittelten Durchflussmengen sehr gut übereinstimmen. An der Messstelle Saifenbach lag die Abweichung zwischen Flügelmessung und Salzverdünnungsmethode nur bei -1,1%. An der Messstelle Reinberg/Voraubach betrug die Abweichung der beiden Messmethoden 3,3%.

## 6.2.3 Schlussfolgerungen

Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass die Abweichungen der gemessenen Durchflussmengen nur gering voneinander abweichen und noch im vertretbaren Bereich liegen.

## 6.3 Vergleich von verschiedenen Auswertemethoden

### 6.3.1 Einleitung

Am 12.11.2003 und 25.11.2003 wurden an den Messstellen Wörth/Lafnitz, Bruck/Mur und Leoben/Mur Durchflussmessungen mit dem hydrometrischen Flügel durchgeführt. Zweck der

Messungen war es festzustellen, wie groß die Abweichungen zwischen verschiedenen Auswertemethoden sind.

### 6.3.2 Messmethodiken

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Messprofile am Pegel Wörth/Lafnitz wurden nach den Verfahren der verringerten Messpunkte, sowie der Drei-, und der Vielpunktmethode, und an den Pegeln Bruck/Mur und Leoben/Mur zusätzlich noch nach der Fünf- und Sechspunktmethode ausgewertet und gegenübergestellt (*siehe dazu Kap. 5.1.5*).

Zum Verfahren der verringerten Messpunkte zählen die Methode nach Kreps, die amerikanische Methode wie auch die Einpunktmethode. Diese Methoden sind zwar nicht so genau wie jene Verfahren, die das gesamte Geschwindigkeitsfeld benutzen, aber dafür weniger zeitaufwendig. Da es notwendig ist, eine Vielzahl von Messungen an jedem Pegelprofil durchzuführen, ist es oft nicht möglich, die zwar genaueren aber zeitaufwändigen Methoden anzuwenden. Alle durchgeführten Messmethoden wurden der Methode nach Kreps gegenübergestellt und ausgewertet.

### 6.3.3 Ergebnisse

#### Vergleichsmessungen an der Messstation Wörth an der Lafnitz (12.11.2003)

Es wurde in insgesamt fünf Messlotrechten mittels Gestänge und Ott-Flügel (Nr. 121239) die Geschwindigkeit nach den erwähnten Methoden gemessen. Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Messergebnisse der verschiedenen Auswertemethoden.

<b>Methode</b>	<b>Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Durchschnittsgeschwindigkeit <math>v_m</math> [m/s]</b>
<b>Methode nach Kreps</b>	1,454	0,431
<b>Amerikanische Methode</b>	1,438	0,426
<b>Vielpunktmethode</b>	1,436	0,425
<b>3-Punkt-Methode</b>	1,415	0,419
<b>1-Punkt-Methode</b>	1,405	0,416

**Tabelle 7: Ermittelte Durchflussmenge [m<sup>3</sup>/s] und der Durchschnittsgeschwindigkeit  $v_m$  [m/s] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Wörth an der Lafnitz vom 12.11.2003**

In *Tabelle 7* sind die Abweichungen der Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Auswertemethoden zur Methode nach Kreps aufgelistet.

Mittlere Abweichung von $v_m$ nach Krepss zu $v_m$ nach	Prozent
Amerikanische Methode	-1,2
Vielpunktmethode	-1,4
3-Punkt-Mehtode	-2,8
1-Punkt-Methode	-3,5

Tabelle 8: Abweichung der mittleren Fließgeschwindigkeit nach Krepss (100%) zu den übrigen Methoden

Maximale Abweichung von $v_m$ nach Krepss zu $v_m$ nach	Prozent
Amerikanische Methode	-11,9
Vielpunktmethode	-7,4
3-Punkt-Mehtode	-8,2
1-Punkt-Methode	-6,2

Tabelle 9: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Krepss (100%) zu den übrigen Methoden

Wie aus *Tabelle 8 und 9* ersichtlich, lag die maximale Abweichung in den mittleren Geschwindigkeiten nach Krepss und der amerikanischen Methode bei -11,9 %. Im Mittel lag die Abweichung bei -1,2%, wobei die höchsten Abweichungen in den Bereichen mit niedrigeren Geschwindigkeiten lagen (*siehe auch Abbildung 47 unten*). Auch bei den übrigen Auswertemethoden ist beim Vergleich zur Krepss-Methode zu erkennen, dass die höheren Abweichungen im Bereich der niedrigeren Geschwindigkeiten zu verzeichnen waren. Die größte Abweichung mit -3,5% zeigte die 1-Punkt-Methode. Die Auswertungen zeigen, dass die ermittelten Durchflusswerte der einzelnen Auswertemethoden nur sehr gering von der Krepss-Methode abweichen und noch im vertretbaren Bereich liegen.

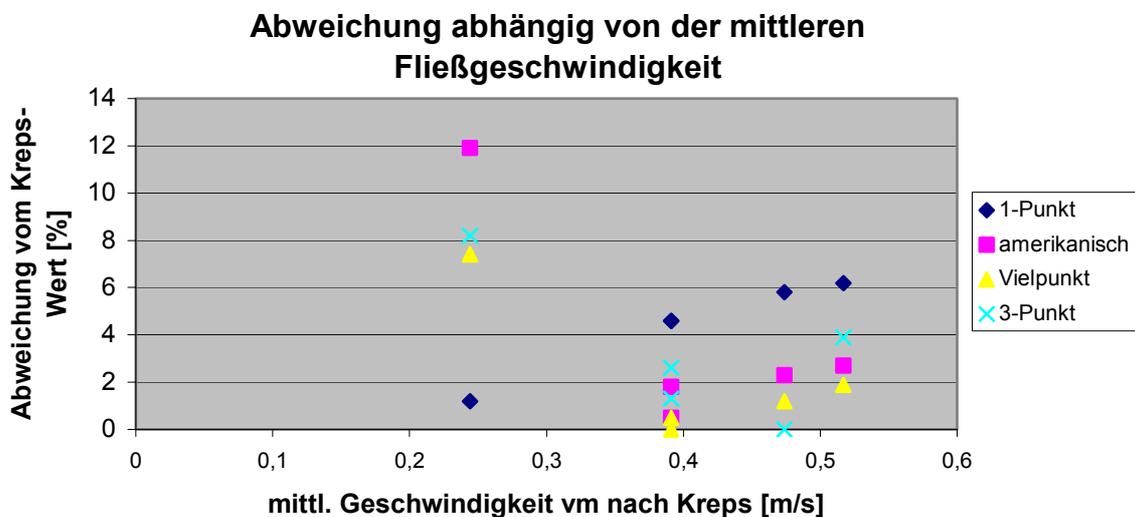


Abbildung 47: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss

## Vergleichsmessung Messstation Bruck an der Mur (25.11.2003)

Es wurde in insgesamt zehn Messlotrechten mittels Schwimmflügelausrüstung und Ott-Flügel (Nr. 10-1163835) die Geschwindigkeit nach den anfangs erwähnten Methoden gemessen. Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Messergebnisse der verschiedenen Auswertemethoden.

Methode	Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	Durchschnittsgeschwindigkeit $v_m$ [m/s]
Methode nach Kreps	63,121	1,000
Amerikanische Methode	67,101	1,063
Vielpunktmethode	65,251	1,034
6-Punkt-Mehtode	66,068	1,047
5-Punkt-Methode	63,484	1,006
3-Punkt-Mehtode	65,525	1,038
1-Punkt-Methode	62,369	0,988

Tabelle 10: Ermittelte Durchflussmenge [m<sup>3</sup>/s] und der Durchschnittsgeschwindigkeit [m/s] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Bruck an der Mur vom 25.11.2003

Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Abweichungen der Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Verfahren zur Methode nach Kreps.

Mittlere Abweichung von $v_m$ nach Kreps zu $v_m$ nach	Prozent
Amerikanische Methode	+5,9
Vielpunktmethode	+3,3
6-Punkt-Mehtode	+4,5
5-Punkt-Methode	+0,6
3-Punkt-Mehtode	+3,7
1-Punkt-Methode	-1,2

Tabelle 11: Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nach Kreps (100%) zu den übrigen Methoden

Maximale Abweichung von $v_m$ nach Kreps zu $v_m$ nach	Prozent
Amerikanische Methode	+24,9
Vielpunktmethode	+6,6
6-Punkt-Mehtode	+9,6
5-Punkt-Methode	+5,9
3-Punkt-Mehtode	+7,5
1-Punkt-Methode	-22,6

Tabelle 12: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Kreps (100%) zu den übrigen Methoden

Wie die *Tabellen 11 und 12* zeigen, lag die maximale Abweichung in den mittleren Geschwindigkeiten nach Krepis und der amerikanischen Methode bei 24,9 %. Im Mittel lag die Abweichung bei 5,9%, wobei die höchsten Abweichungen wiederum in den Bereichen mit niedrigeren Geschwindigkeiten lagen (*siehe auch Abbildung 48 unten*). Auch in diesem Fall war zu erkennen, dass bei den übrigen Auswertemethoden beim Vergleich zur Krepis-Methode die höheren Abweichungen im Bereich der niedrigeren Geschwindigkeiten lagen. Die geringste Abweichung der mittleren Geschwindigkeit zeigte die 5-Punkt-Methode mit 0,6%. Auch hier lagen die ermittelten Durchflusswerte der einzelnen Auswertemethoden im vertretbaren Bereich.

### Abweichung abhängig von der mittleren Fließgeschwindigkeit

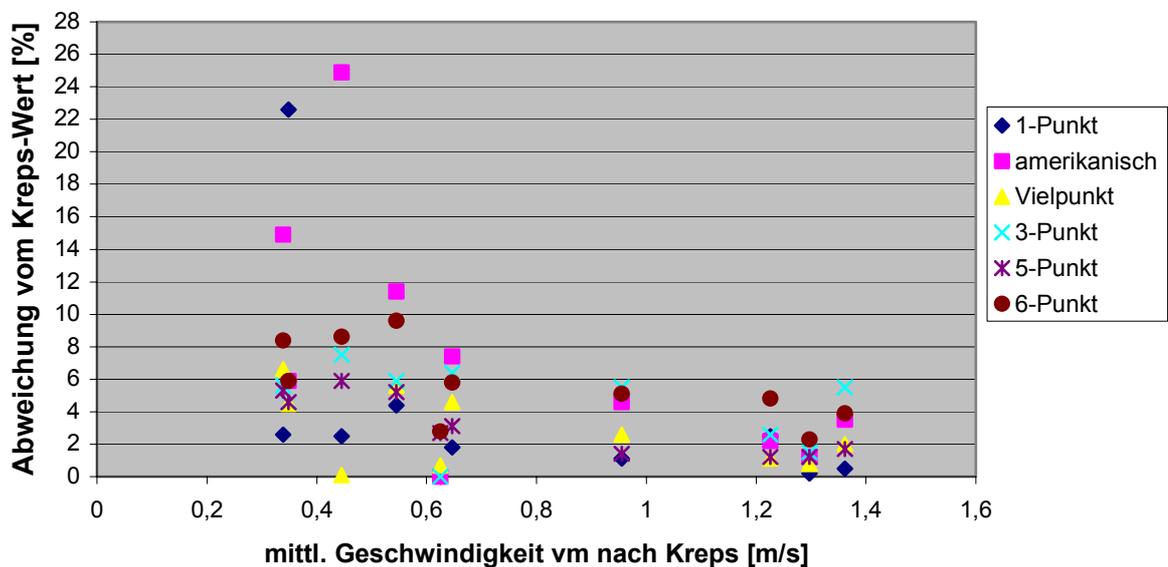


Abbildung 48: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepis

### Vergleichsmessung Messstation Leoben an der Mur (25.11.2003)

Insgesamt wurde in zehn Messlotrechten mittels Schwimmflügelausrüstung und Ott-Flügel (Nr. 10-1163835) die Geschwindigkeiten gemessen. Nachfolgende Tabelle veranschaulicht die Messergebnisse der verschiedenen Auswertemethoden.

<b>Methode</b>	<b>Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Durchschnitts- geschwindigkeit v<sub>m</sub> [m/s]</b>
<b>Methode nach Krepss</b>	58,201	1,197
<b>Amerikanische Methode</b>	58,000	1,193
<b>Vielpunktmethode</b>	57,778	1,189
<b>6-Punkt-Mehtode</b>	58,601	1,205
<b>5-Punkt-Methode</b>	56,597	1,164
<b>3-Punkt-Mehtode</b>	57,552	1,183
<b>1-Punkt-Methode</b>	56,553	1,163

**Tabelle 13: Ermittelte Durchflussmenge [m<sup>3</sup>/s] und der Durchschnittsgeschwindigkeit [m/s] nach verschiedenen Auswertemethoden am Pegel Leoben an der Mur vom 25.11.2003**

Nachfolgende Tabelle zeigt die Abweichungen der Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Verfahren zur Methode nach Krepss.

<b>Mittlere Abweichung von v<sub>m</sub> nach Krepss zu v<sub>m</sub> nach</b>	<b>Prozent</b>
<b>Amerikanische Methode</b>	-0,3
<b>Vielpunktmethode</b>	-0,7
<b>6-Punkt-Mehtode</b>	+0,7
<b>5-Punkt-Methode</b>	-2,7
<b>3-Punkt-Mehtode</b>	-1,2
<b>1-Punkt-Methode</b>	-2,8

**Tabelle 14: Abweichung der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss (100%) zu den übrigen Methoden**

<b>Maximale Abweichung von v<sub>m</sub> nach Krepss zu v<sub>m</sub> nach</b>	<b>Prozent</b>
<b>Amerikanische Methode</b>	-13,6
<b>Vielpunktmethode</b>	-7,7
<b>6-Punkt-Mehtode</b>	+10,1
<b>5-Punkt-Methode</b>	-6,6
<b>3-Punkt-Mehtode</b>	-8,2
<b>1-Punkt-Methode</b>	-11,8

**Tabelle 15: Maximale Abweichung der mittleren Geschwindigkeiten in den jeweiligen Messlotrechten nach Krepss (100%) zu den übrigen Methoden**

Wie in den *Tabellen 14 und 15* zu sehen ist, stimmten auch hier die ermittelten Durchflüsse bei allen Methoden sehr gut überein. Die maximale Abweichung in den mittleren Geschwindigkeiten nach Krepss und der amerikanischen Methode lag bei -13,6 %. Im Mittel lag die Abweichung aber nur bei -0,3%. Auch hier waren die höchsten Abweichungen der

verschiedenen Auswertemethoden im Vergleich zur Krepss-Methode in den Bereichen mit niedrigeren Geschwindigkeiten zu verzeichnen (siehe auch Abbildung 49 unten). Die größte Abweichung mit -2,8% zeigte wieder die 1-Punkt-Methode.

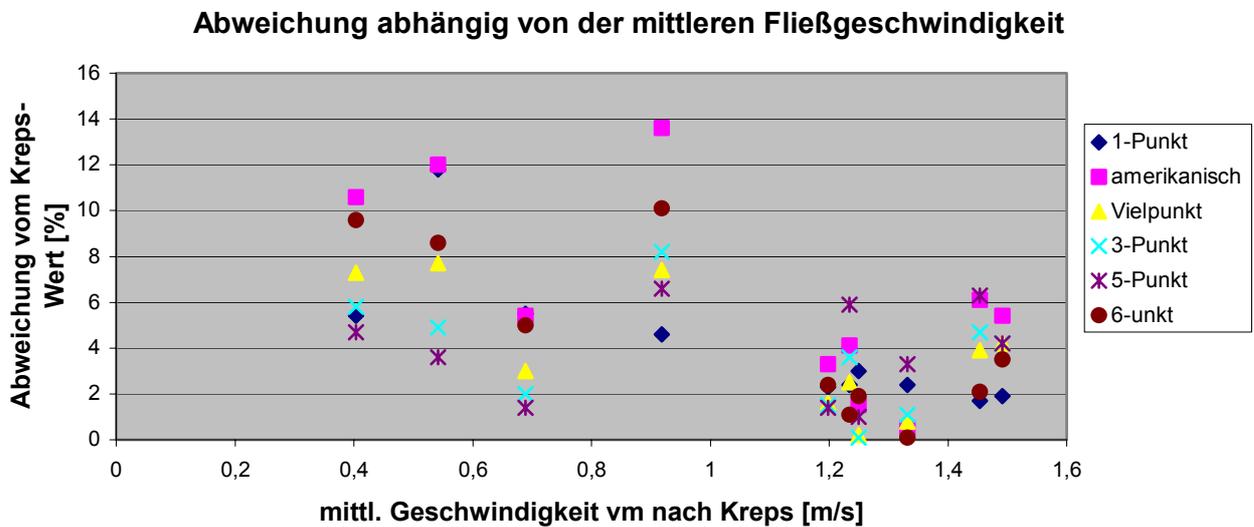


Abbildung 49: Abweichung von der mittleren Geschwindigkeit nach Krepss

### 6.3.4 Schlussfolgerungen

Die an den drei ausgewählten Pegelprofilen durchgeführten Durchflussmessungen nach verschiedenen Methoden zeigten, dass die ermittelten maximalen und mittleren Abweichungen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten in den Messlotrechten mit einzelnen Ausnahmen sehr gut übereinstimmten. Die Abweichungen der Messergebnisse der Verfahren der verringerten Messpunkte im Vergleich zu den restlichen Verfahren waren gering und lagen im vertretbaren Bereich.

## 6.4 Durchflussmessung an der Mur mittels ADCP Sonde

### 6.4.1 Einleitung

Der Hydrographische Dienst Steiermark führte Durchflussmessungen am Pegel Mureck/Mur am 3.11.2003 mit auf Ultraschalltechnologie basierenden Messgeräten und als Vergleich mit dem hydrometrischen Flügel durch.

Für die Vergleichsmessungen wurde vom Hydrographischen Dienst Steiermark in Zusammenarbeit mit dem hydrographischen Dienst Slowenien eine ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Sonde der Firma RD Instruments verwendet (siehe Abbildung 50).



**Abbildung 50: ADCP Messgerät des hydrographischen Dienstes Slowenien bei der Messung am Pegel Mureck/Mur**

Dabei wurde die ADCP Sonde auf einem kleinen Boot befestigt, und die kontinuierlich gemessenen Daten (Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe) online via Funk zum Laptop samt Auswertesoftware übertragen.

Für die Messung wurde das Boot mit Hilfe einer Seilbahn über den Messquerschnitt gezogen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Geschwindigkeit des Bootes nicht höher als die Fließgeschwindigkeit des Gewässers ist und eine Mindestgewässertiefe von ca. 30 cm eingehalten wird. Die Sonde, die aus 4 Messkeulen besteht, erfasst dabei kontinuierlich über den Querschnitt die jeweilige Wassertiefe bzw. Geschwindigkeit in verschiedenen Tiefen, wobei die Werte am Laptop online mittels der Auswertesoftware dargestellt werden (*Abbildung 51*). In der linken oberen Hälfte ist das gemessene Profil mit den Geschwindigkeiten in den unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Die Grafik im linken unteren Teil zeigt die jeweilige Ausrichtung des Bootes bzw. der Sonde nach Himmelsrichtung, die je nach Strömungsverhältnissen variiert und mittels Kompass erfasst wird. Der rechte Teil der Grafik zeigt die Ergebnisse der Messung. Der Durchfluss wird online durch Integration über das Profil ermittelt.

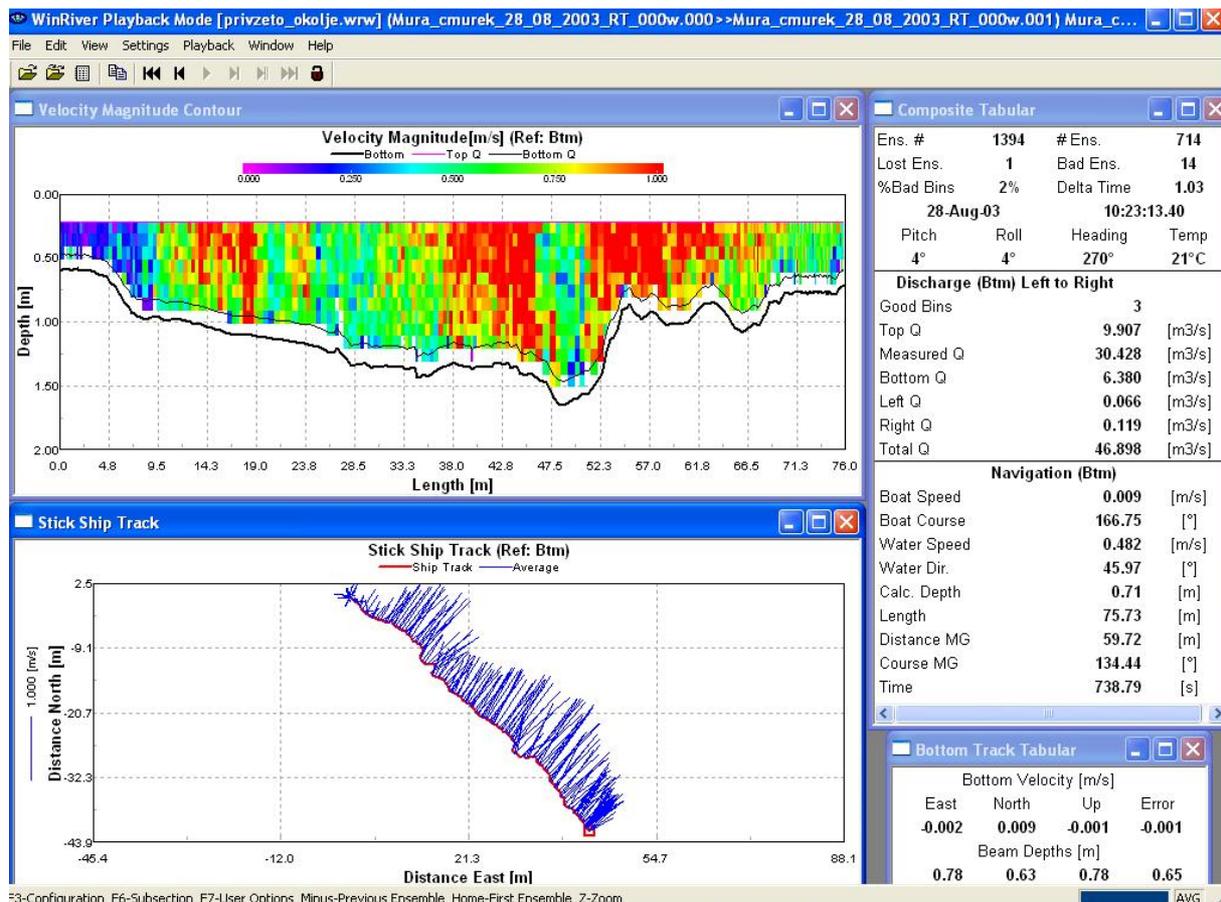


Abbildung 51: Darstellung der Auswertesoftware

An der Messstelle Mureck/Mur wurden mittels ADCP Gerät 2 Durchflussmessungen durchgeführt (jeweils in die entgegengesetzte Richtung). Dabei wichen die beiden Messungen nicht mehr als 3% voneinander ab. Bei einer größeren Abweichung hätte die Messung wiederholt werden müssen.

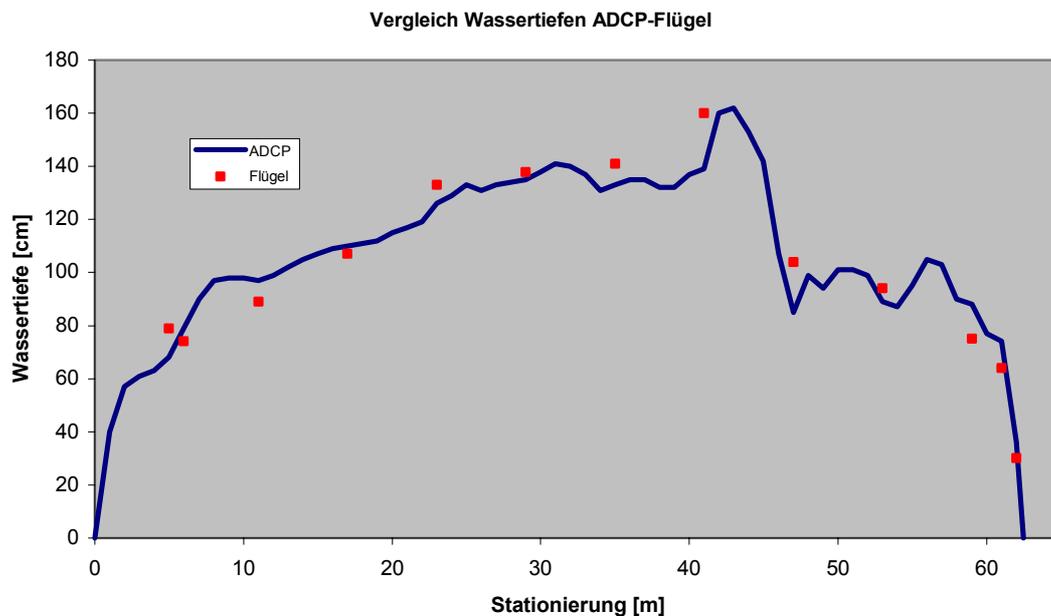
### 6.4.2 Messergebnisse

Der Hydrographischen Dienst Steiermark führte eine Vergleichsmessung mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels durch. In *Tabelle 16* sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Bezug auf ermittelte Durchflussmengen bzw. auf die in den Messlotrechten der Flügelmessung ermittelten mittleren Geschwindigkeiten dargestellt. Bei der ADCP - Messung sind nur die Ergebnisse einer Messung dargestellt, da sich keine Unterschiede in den beiden Messungen ergaben. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung der ADCP - Messung von der Flügelmessung dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die gemessenen Durchflüsse um ca. 7% voneinander abweichen, die mittleren Geschwindigkeiten in den einzelnen Lotrechten bis auf eine Ausnahme (wahrscheinlich Einfluss eines Steines auf die

Flügelmessung) um max. 27%. *Abbildungen 52 und 53* zeigen die gemessenen Wassertiefen bzw. die mittleren Geschwindigkeiten aus der ADCP- und Flügelmessung (Bericht des hydrographischen Dienstes Steiermark 2003).

	Flügel	ADCP Messung	Abweichung [%]
<b>Durchfluss [m³/s]</b>	43,7	46,9	-7,3
<b>Mittlere Geschwindigkeiten [m/s]</b>			
Profil 1	0,19	0,23	-17,4
Profil 2	0,84	0,66	27,2
Profil 3	0,78	0,93	-19,2
Profil 4	0,48	0,44	8,3
Profil 5	0,67	0,66	1,5
Profil 6	0,84	0,86	-2,4
Profil 7	0,4	1,03	-157,5
Profil 8	1,06	1,17	-10,4
Profil 9	0,8	0,89	-11,3
Profil 10	0,67	0,66	1,5
Profil 11	0,39	0,46	-17,9
Profil 12	0,26	0,24	7,7

**Tabelle 16:** Vergleich der gemessenen Durchflüsse bzw. mittleren Geschwindigkeiten aus ADCP- und Flügelmessung



**Abbildung 52:** Vergleich der gemessenen Wassertiefen aus ADCP- und Flügelmessung

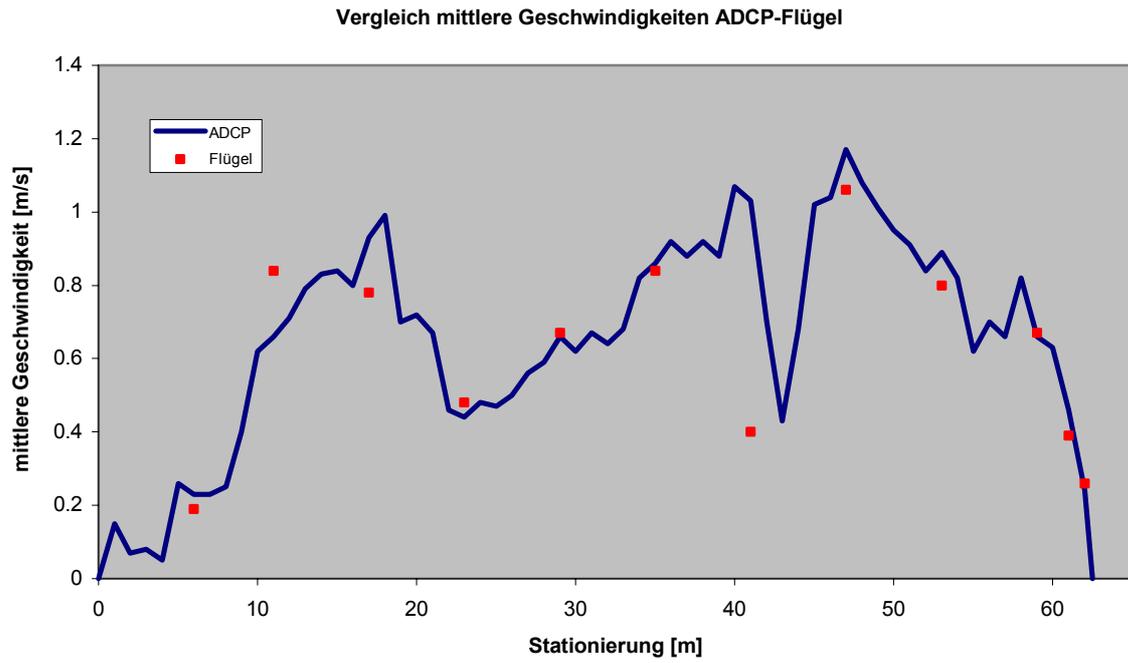


Abbildung 53: Vergleich der gemessenen mittleren Geschwindigkeiten aus ADCP- und Flügelmessung

## 7. Gesamtbewertung und Ausblick

### 7.1 Gegenüberstellung der einzelnen Messverfahren

Die Auswahl des Durchflussmessgerätes bzw. der Auswertemethodik hängt vom vertretbarem Messaufwand und vor allem der Größenordnung des zu erfassenden Durchflusses ab. Zusätzlich müssen, um eine hohe Genauigkeit bei der Messung zu erlangen, die am Messstandort vorherrschenden Messbedingungen beachtet und eingehalten werden.

Direkte Durchflussmessungen sind auf kleinere Wassermengen beschränkt. Dazu zählen die Gefäßmessungen, die bis zu einem Durchfluss von 50 l/s zum Einsatz kommen. Die Anschaffungs- und Wartungskosten sind sehr gering. Die Gefäßmessung eignet sich besonders gut zur Messung kleinerer Quellschüttungen und kleinerer Abflüsse. Dabei können mit Messgefäßen genauere Ergebnisse erzielt werden als mit Messflügeln. Von Nachteil ist, dass diese Art der Durchflussmessung nur bei einem bestimmten Gefälle und der notwendigen Überfallhöhe einsetzbar sind. Die Gefäßmessung eignet sich nur für Einzelmessungen. (siehe Kap. 4.1).

Messwehre sind für die Durchflussermittlung in kleinen natürlichen Wasserläufen (bis 1 m<sup>3</sup>/s) geeignet. Eingeschränkt kann der Einsatz von Messwehren durch zu große Durchflussmengen, zu hohe Schwebstoff- und Geschiebefracht und die daraus folgende Verlandung des Stauraumes werden. Rechteckwehre können bis zu einem Durchfluss von 1000 l/s und Dreiecküberfälle bis zu ca. 100 l/s eingesetzt werden (siehe Kap. 4.2). Messrinnen sind für Durchflüsse in der Größenordnung von 5 l/s bis 5 m<sup>3</sup>/s einsetzbar. Der Vorteil von Messrinnen gegenüber von Messwehren liegt darin, dass der Durchflussquerschnitt nicht verbaut wird, und es dadurch zu keiner Verlandung des Stauraumes kommen kann. Aus diesem Grund können Messrinnen auch bei stark verschmutzten Gewässern verwendet werden. Messwehre und Messrinnen werden zur kontinuierlichen Erfassung des Durchflusses eingesetzt. Bei größeren Durchflüssen kommen Messwehre und Messrinnen aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr zur Anwendung, da der Einbau und die Wartung solcher Messgeräte mit hohen Kosten verbunden ist. (siehe Kap. 4.3).

Der hydrometrische Flügel wird in kleinen Gewässern wie auch in großen Strömen (Messflügel mit Schwimmflügelausrüstung) zur Durchflussermittlung eingesetzt.

Voraussetzung ist ein laminares Fließverhalten des Wassers. Der hydrometrische Flügel kann bereits bei einer Wassertiefe von einigen cm (der Messflügel muss vollständig im Wasser eingetaucht sein) und einer Fließgeschwindigkeit von 10-15 cm/s verwendet werden. Die Mindestfließgeschwindigkeit ist notwendig, um den Messflügel bei jeder Messung noch zuverlässig in Umdrehung zu versetzen. Bei turbulenten Strömungsverhältnissen, unregelmäßigem Messprofil, starkem Geschiebetrieb und Verkrautung kann mit dem hydrometrischen Flügel nicht mehr gemessen werden. Die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu anderen Messgeräten gering. Flügelmessungen finden für eine kontinuierliche Erfassung der Durchflussmenge keine Verwendung (siehe Kap. 5.1).

Der Vorteil von elektromagnetischen Messsonden ist, dass im Gegensatz zur Flügelmessung, auch bei Verkrautung und sehr geringen Fließgeschwindigkeiten der Durchfluss gemessen werden kann. Durchflussmessungen können bis zu einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s durchgeführt werden. Die Mindestwassertiefe beträgt 3 cm. Zusätzlich sind elektromagnetische Messsonden mit einem geringen Wartungsaufwand verbunden (siehe Kap. 5.2).

Mit Ultraschallmessgeräten können Durchflussmessungen in Gewässern mit einer Breite von einigen Metern bis zu 2000m durchgeführt werden. Da nur eine geringe Sensorüberdeckung notwendig ist, können Ultraschallmessgeräte auch bei Niedrigwasser eingesetzt werden. Diese Geräte eignen sich besonders für staugeregelten Gewässer. Von Vorteil ist die einfache Installation und Wartung. Ein großer Nachteil ist der hohe Anschaffungspreis. Zusätzlich kann es bei starker Schwebstoffführung zu Messfehlern kommen.

ADCP-Messgeräte eignen sich besonders für Gewässerbreiten von 1 – 30m und 0,3 – 5m Wassertiefe. Besonders bei Hochwasserereignissen hat sich diese Messart bewährt. Bei starkem Geschiebetrieb kann es zu großen Messfehlern kommen. Die Messergebnisse sind stark vom Strömungsprofil abhängig.

Tracermessungen sind besonders bei turbulenten Strömungsverhältnissen (Gebirgsbächen) geeignet. Tracermessungen können bei hohen Fließgeschwindigkeiten, geringen Wassertiefen und relativ schwacher Wasserführung eingesetzt werden. Voraussetzung ist eine vollständige Durchmischung des Tracers im Gewässer. Mit dem Salzverdünnungsverfahren kann eine Durchflussmenge bis zu einigen m<sup>3</sup>/s bestimmt werden. Begrenzt wird dieses Verfahren durch den hohen Salzeinsatz (2-5 kg Salz pro m<sup>3</sup> Wasser). Der Vorteil von Fluoreszenz-

Farbstoffmessungen gegenüber dem Salzverdünnungsverfahren liegt darin, dass auch große Durchflussmengen messbar sind, da nur sehr geringe Tracermengen benötigt werden. Der Vorteil des Salzverdünnungsverfahrens liegt darin, dass die Kosten sehr gering sind und der Nachweis über die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit im Wasser sehr einfach zu ermitteln ist. Der Nachweis von Farbstoffen ist dagegen mit einem hohen apparativen Aufwand verbunden. Radioaktive Tracer kommen zur Durchflussermittlung in Oberflächengewässern eher selten zum Einsatz. Bei stark verschmutzten Gewässern sind Tracermessungen nicht geeignet, da es beim Nachweis des Tracers zu Verfälschungen des Messergebnisses kommen kann. Für kontinuierliche Durchflussmessungen ist diese Methode nicht geeignet (siehe Kap. 5.3).

Eine Gegenüberstellung und genaue Beschreibung der einzelnen Arten von Pegelmessungen sind in Kap. 3.3 zu finden.

## **7.2 Bewertung von Auswerteverfahren**

Die Zahl der Messpunkte in einer Messlotrechten hängt von der gewünschten Genauigkeit, der Wassertiefe und von der verfügbaren Zeit zur Durchführung der Messung ab. Dabei kommt die 1-Punkt-Methode bei einer geringen Wassertiefe (0,1 – 0,75 m) zum Einsatz, oder wenn eine kurze Messzeit verlangt wird, z.B. bei Hochwasserereignissen. Je unregelmäßiger die Geschwindigkeitsverteilung in der Vertikalen ist, desto mehr Messpunkte sollten gewählt werden (siehe Kap. 5.1.4).

Da es in der Praxis oft aus zeitlichen Gründen nicht möglich die Vielpunktmethode anzuwenden, kommt meist die 2-Punkt-Methode nach Krepss zum Einsatz. Der Vergleich der einzelnen Auswertemethoden hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Methoden mit verringerten Messpunkten nur eine geringe Abweichung zur Vielpunktmethode aufweisen (siehe Kap. 6).

Alle die für diese Arbeit verwendeten Auswerteprotokolle liegen in der Hydrographischen Landesabteilung Steiermark (Fachabteilung 19a – Wasserwirtschaftliche Planung und Hydrographie, Referat 1 – Hydrographie) auf.

## Literaturverzeichnis

- BAUMANN, H., SCHENDEL, U., MANN, G., 1974: Wasserwirtschaft in Stichworten. - Hirth, Kiel, 204 S.
- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H. J., 1990: Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie 1. - Gebr. Borntraeger, Berlin, 673 S.
- BEHRENS, H., 1982: Tracerverfahren zur Strömungs- und Abflussmessung, 14. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrologie - "Hydrometrie", Tagungspublikation, Kap. 18, Andernach, 22 S.
- DYCK, S., PESCHKE, G., 1995<sup>3</sup>: Grundlagen der Hydrologie. - Verlag für Bauwesen, Berlin, 536 S.
- DYPVIK, K., LOHRMANN, A., 2002: Online Discharge Measurements in large Rivers, Nortek AS, Norway, 20
- GEES, A., BICHSEL, J. 1991: Bericht über die Ergebnisse der Tracerkampagne der LHG vom 22. – 26. Juli 1991, Bern, 19 S.
- GEES, A., ROCHAT, R. 1992: Technischer Bericht 3.01, Bericht über die Ergebnisse der Tracerkampagne der LHG vom 9. Juli 1992, Trübbach, Rezlberg, Bern 11 S.
- HODEL, H.-P., 1992: Anwendung von Tracerverfahren zur Durchflussermittlung, 17. DVWK- Fortbildungslehrgang Hydrologie, Durchflusserfassung in offenen Gerinnen - klassischen Verfahren und neue Entwicklungen, Tagungspublikation, 21. - 25.09.1992, Kap. 23, Essen, 35 S.
- HODEL, H.-P., STOLLER, F., 1999: Technischer Bericht, Messkampagne mit den Lichtleiter-Fluorometern LLF1 und LLF-M, Bundesamt für Wasser und Geologie, Landeshydrologie und –geologie, Bern 49 S.
- HÖLTING, B., 1996: Hydrogeologie. - Enke, Stuttgart, 441 S.
- KREPS, H., 1975: Praktische Arbeit in der Hydrographie. - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 227 S.
- LESER, H., (Hrsg.), 1984: DIERCKE - Wörterbuch Allgemeine Geographie, Band 1 A-M. – Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 422 S.
- LESER, H., (Hrsg.), 1984: DIERCKE - Wörterbuch Allgemeine Geographie, Band 1 N-Z. – Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 421 S.
- LUDER, B., 1994: Manual für die Abflussmessung nach dem Salzverdünnungsverfahren Technischer Bericht, Landeshydrologie und –Geologie, Abteilung Hydrologie, Bern, 23 S.
- MANIAK, U., 1993<sup>3</sup>: Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 568 S.

MENDEL, H. G., 2000<sup>1</sup>: Elemente des Wasserkreislaufs, Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung, Analytica Verlagsgesellschaft, Berlin, 244 S.

MORLOCK, S., E., NGUYEN, H., T., ROSS, J., H., 2002: Feasibility of Acoustic Doppler Velocity Meters for the Production of Discharge Records from U.S. Geological Survey Streamflow-Gaging Stations, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 01-4157, Indiana, 51 S.

WUNDT, W., 1953: Gewässerkunde. – Springer Verlag, Berlin, 320 S.

WYDER, D, 1998: Handbuch der Pegelmessung, Landeshydrologie und –geologie Bern Hydrologische Mitteilungen Nr.26, Bern, 77 S.

## **Sonstige Unterlagen**

Bericht des hydrographischen Dienstes Steiermark, 2003, (Vergleichsmessung ADCP Sonde - hydrometrischer Flügel), Hydrographischen Landesabteilung Steiermark (Fachabteilung 19A - Referat I – Hydrographie)

Durchfluss Handbuch, 2003<sup>4</sup>: Herausgeber: Endress+Hauser Flowtec AG, Schaub Medien Ab, Sissach, Schweiz, 472 S.

Handbuch für die Abflussmengenmessung 1982, Mitteilung Nr.4, Landeshydrologie Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 76 S.

ÖNORM EN ISO 748 2000: Durchflussmessung im offenen Gerinnen, Geschwindigkeitsflächen-Verfahren, Ausgabe: 2000-05-01, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 39 S.

Pegelvorschrift Anlage D 1998<sup>1</sup>: Richtlinien für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen, Anhang II Messgeräte, Länderarbeitsgemeinschaft für Wasser (LAWA) und dem Bundesministerium für Verkehr (BMV), Berlin, Potsdam und Bonn, 56 S.

Prospekte der Firma OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, 2003, Kempten, Deutschland, Internet: [www.ott-hydrometry.de](http://www.ott-hydrometry.de)

RD INSTRUMENTS (1996): Acoustic Doppler Current Profiler, Principles of Operation: A Practical Primer, San Diego, CA: RD Instruments  
Internet: [www.rdinstruments.com](http://www.rdinstruments.com)

Software: BIBER V 3.0 der Firma KISTERS AG in Aachen, Deutschland 2004,  
Internet: [www.kisters.de](http://www.kisters.de)

User Manual, EasyQ River Flow Monitor, Nortek AS, Norway, 56 S.

User Manual, Qliner 2003: River Discharge Measurement System, N3013-001, Rev. A, Nortek AS 2002-2003, Norway, 32 S.