



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Bautechnik und
Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren
Peter Jordanstraße 82
A-1190 Wien

Michael Scharf

Monitoring der Hydrologischen Verhältnisse am Gschlifgraben

Diplomarbeit

Jänner, 2009

Betreuer
a.o. Univ. Prof. DI Dr.

Johannes HÜBL

Eidesstattliche Erklärung

"Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegeben Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzen Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe."

Wien, am Datum

Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Am Ende des Jahres 2007 kam es am *Gschlifgraben*, einem Rutschhang am Ostufer des *Traunsees*, zu Massenbewegungen, so dass die darunterliegenden Siedlungen und Infrastruktureinrichtungen gefährdet waren. Darum wurden vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung Maßnahmen zur Verringerung der Rutschbewegungen entwickelt und umgesetzt. Diese Maßnahmen waren unter anderem die Aufschließung und die Errichtung von Notstraßen, Hangentlastung und Massenabfuhr, Entwässerungs- und Hochwasserschutzmaßnahmen, Wiederaufforstung und Erosionsschutz sowie die Errichtung eines Monitoring und Frühwarnsystems. Ziel dieser Arbeit ist, die hydrologischen Verhältnisse durch Errichtung von Messstationen an verschiedenen Stellen möglichst genau zu erfassen, um zum einen mit den gewonnenen Erkenntnissen und den laufend übermittelten Messdaten Aussagen über das Verhalten des Hanges in der Zukunft zu tätigen, und, zum anderen die dauernde Funktionsfähigkeit der Entwässerung zu überprüfen. Bei den Messstationen sollen in Rohrleitungen bzw. vor Dreieckswehren Ultraschallsensoren eingebaut werden, die durch ständige Füllhöhenmessung und über einen im Datenlogger einprogrammierten Pegelschlüssel den Durchfluss berechnen. Weiters sollen, um die Verhältnisse im Oberboden zu erkunden, in verschiedenen Tiefen Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte eingebaut werden. Durch die Übertragung von Messwerten über das GSM- Netz sollen die Messergebnisse im Internet regelmäßig abgerufen werden können. Die wesentlichen Abschnitte dieser Arbeit waren nun die Berechnung des Pegelschlüssels mit der Auffindung aller bei diesem Messverfahren auftretenden Problemen, die Erhöhung der Genauigkeit, sowie der Einbau einer Messstation im Feld, um bereits im Vorfeld Probleme beim Betrieb der Messstationen zu erkennen. Ziel ist nun, die bereits erhaltenen Erkenntnisse und Erfahrungen so zu nützen, dass in der Zukunft ein problemloser Betrieb möglich ist.

Abstract

Due to mass landslides at the *Gschlifgraben*, a mountainside at the East Bank of the *Traunsee* at the end of the year 2007, subjacent settlements and infrastructure facilities were at risk. Therefore, the "*Forsttechnische Dienst für Wildbach –und Lawinenverbauung*" established and implemented procedures to prevent further landslides. These procedures included the establishment of temporary detours, the draining off earth slides deep-well pumping and flood control measures, reforestation and erosion control, as well as the establishment of a Monitoring and an Early-warning system. The objective of this essay is to monitor more precisely the hydrological relations through the establishment of gauging stations in different locations in order to characterize the behavior of the hillside in the near future by means of transmitted measured data, as well as to check the functional efficiency of the deep-well pumping. At the gauging stations, pipelines and respectively in front of retaining dams should be equipped with ultrasonic sensors that should calculate the movement through constant measurement and a data logger that contains a programmed rating curve. Furthermore, sensors will be installed in various depths to measure the soil moisture as well as to investigate the circumstances of the top soil. Through the transmission of measured data through the GSM-network the measurement results should be recallable on the Internet on a regular basis. The paragraphs in this diploma essay focus on the calculation of the rating curve to locate problems that occurred during the measurement procedures. Another topic this diploma essay refers to is the increase in accuracy as well as the establishment of a gauging station in the field in order to detect problems in advance. The objective now is to utilize the already obtained findings and experiences in a convenient way to facilitate a smooth operation.

Inhalt

1	Vorwort	7
2	Einleitung	8
2.1	Allgemeines	8
2.2	Maßnahmen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach und Lawinenverbauung ..	9
2.3	Methodik und Aufbau der Arbeit	9
2.4	Zielsetzung der Arbeit.....	10
3	Hydraulische Grundlagen.....	11
3.1	Physikalische Eigenschaft von Flüssigkeiten	11
3.2	Hydrodynamische Grundlagen	14
3.2.1	Das zeitliche und räumliche Verhalten einer Strömung	14
3.2.2	Zustand der Strömung.....	14
3.2.3	Kontinuitätsgleichung	15
3.2.4	Bernoulli Gleichung	15
4	Durchflussmesstechnik.....	17
4.1	Durchflussmessung bei Teilfüllung	18
4.1.1	Durchflussmessung bei Teilfüllung mit Strömungsumlenkung	18
4.1.1.1	Venturirinne	18
4.1.1.2	Parshalrinne	19
4.1.1.3	Khafagirinne	19
4.1.1.4	Venturikanäle im Schachtbauwerk.....	19
4.1.1.5	Badger Mess- Schachtrinne.....	19
4.1.1.6	Palmer Bowlusrinne	19
4.1.1.7	Messung des Durchflusses über die Fließgeschwindigkeit in Messrinnen.....	19
4.1.1.8	Überfälle	19
4.1.1.8.1	Scharfkantiger Rechtecküberfall.....	21
4.1.1.8.2	Dreiecksüberfall nach Thomson	22
4.1.1.8.3	Breitkroniger Überfall	22
4.1.2	Durchflussmessung bei Teilfüllung ohne Strömungsumlenkung	23
4.1.2.1	Messung der Fließgeschwindigkeit	24
4.1.2.1.1	Ultraschall-Laufzeitverfahren.....	24
4.1.2.1.1.1	Laufzeitdifferenzverfahren.....	24
4.1.2.1.1.2	Impuls- Folge- Frequenz- Verfahren	24
4.1.2.1.1.3	Phasendifferenzverfahren	24

4.1.2.1.2	Ultraschall- Doppler-Verfahren	25
4.1.2.1.3	Stroboskop- Verfahren	25
4.1.2.1.4	Driftverfahren	26
4.1.2.1.5	Clamb-On-Durchflussmesser	26
4.1.2.1.6	Magnetische Induktion für teilgefüllte Querschnitte.....	26
4.1.2.1.7	Ultraschall- Mehrpfadverfahren	26
4.1.2.1.8	Messung der punktuellen Fließgeschwindigkeit.....	26
4.1.2.1.8.1	Punktmessung mittels Ultraschall- Doppler- Sensor.....	26
4.1.2.1.8.2	Punktmessung mittels magnetisch induktiven Messwertaufnehmern 27	
4.1.2.1.8.3	Punktmessung mit Eintauchsonden nach dem magnetisch induktiven Verfahren 27	
4.1.2.1.8.4	Punktmessung mittels Messflügel.....	28
4.1.2.1.8.5	Punktmessung mittels Staurohr	28
4.1.2.2	Wasserstandsmessung bei einem oder zwei Querschnitten	28
4.1.2.2.1	Durchflussmessung mittels kombinierter Verfahren.....	29
4.1.2.2.1.1	Schwimmer Verfahren: direktes Verfahren	29
4.1.2.2.1.2	Echolotverfahren: indirektes Verfahren.....	29
4.1.2.2.1.3	Druckverfahren: indirekte Verfahren	30
4.1.2.2.1.4	Kapazitives Verfahren	30
4.1.2.2.1.5	Radar- Verfahren.....	30
4.2	Durchflussmessung in Druckleitungen	30
4.2.1	Messgeräte mit konstantem Querschnitt.....	31
4.2.2	Messgeräte mit veränderlichem Querschnitt.....	31
4.2.3	Geschwindigkeitsmessung.....	31
5	Beurteilung der Verfahren	31
5.1	Durchflussmessung bei Teilfüllung mit Strömungsumlenkung.....	31
5.2	Durchflussmessung bei Teilfüllung ohne Strömungsumlenkung.....	31
6	Gesamtsystem	32
6.1	Beschreibung der vorgesehenen Maßnahmen zur Erfassung der hydrologischen Verhältnisse.....	33
7	Beschreibung des Rohrleitungssystems	35
8	Ultraschallhöhenmess- Verfahren	37
8.1	Beschreibung der Ultraschallhöhenmess- Sensoren	37
8.1.1	Vegason 61	38

8.1.1.1	Produktbeschreibung	38
8.1.1.2	Montagehinweise	39
8.1.1.3	Messcharakteristiken und Messgenauigkeit	39
8.1.2	Ultraschall- Sensor UC500-30GM-IUR2-V15.....	40
8.1.2.1	Produktbeschreibung	40
8.1.2.2	Montagehinweise	40
8.1.2.3	Allgemeine Daten	40
8.2	Ermittlung des Pegelschlüssels (Schlüsselkurve)	41
8.2.1	Berechnung des Pegelschlüssels mittels Fließformeln.....	41
8.2.1.1	Die wichtigsten Fließformeln [13], [2]	41
8.2.1.2	Berechnung des Pegelschlüssels mit der Formel von Gaukler-Manning-Strickler 43	
8.2.2	Ermittlung des Pegelschlüssels/ Schlüsselkurve mit den Gleichungen der Rohrhydraulik.....	46
8.2.2.1	Verwendete Formeln	46
8.2.2.2	Rohrleitungsberechnung	48
8.2.3	Vergleich der Verfahren	49
8.2.4	Einfluss der Neigung auf den Pegelschlüssel	49
8.3	Probleme bei der Durchflussmessung mittels Ultraschallsensoren	50
8.3.1	Luftmischung bei steilem Gelände	50
8.3.1.1	Beginn der Luftaufnahme	51
8.3.1.2	Die mittlere Luftkonzentration \bar{C}	52
8.3.1.3	Minimale Luftaufnahmegeschwindigkeit v_{Amin}	53
8.3.1.4	Minimales Luftaufnahmegefälle J_{Amin}	53
8.3.1.5	Die mittlere Gemischgeschwindigkeit v_g	54
8.3.1.6	Die maximale Gemischquerschnittsfläche F_l	54
8.3.1.7	Die mittlere Gemischfläche F_m	54
8.3.1.8	Berücksichtigung der Luftmischung beim Pegelschlüssel	55
8.3.1.9	Messfehler aufgrund einer Trendlinie für geringe Abflusstiefen	57
8.3.2	Stau- und Senkkurven	59
8.3.2.1	Berechnung von Stau- und Senkkurven bei Rohren mit konstantem Durchmesser	59
8.3.3	Eisbildung im Winter.....	62
8.3.4	Kalibrierung	62

8.3.5	Zuschlagen von Rohrleitungen beim Übergang von Teilfüllung auf Vollfüllung....	63
9	Erfassung von oberflächlich abfließenden Wässern.....	63
9.1	Dreieckswehr	64
9.1.1	Ausführung eines Dreieckswehres.....	65
9.1.2	Pegelschlüssel bei der Messung mittels Ultraschallsensoren	68
10	Messung der Bodenfeuchte	69
10.1	Wassergehaltsbestimmung	69
10.2	Bestimmung der Saugspannung	70
10.3	Bodenfeuchtigkeit Sensor Stevens Hydra Probe	70
11	Ermittlung des Durchflusses an einem Profil	72
12	Beschreibung der Pilot/ Probestation	72
13	Zusammenfassung und Ausblick	77
14	Literaturverzeichnis	79
15	Abbildungsverzeichnis	81
16	Tabellenverzeichnis	83

1 Vorwort

Als Rutschung wird das Abgleiten von Gesteins- oder Erdmassen bezeichnet. Diese Rutsch oder Kriechbewegungen sind oft die Folge von Verwitterung und Schwerkraft. Der Auslöser von Hangbewegungen ist meist ein erhöhter Wassergehalt in der betroffenen Gesteinsschicht. Dieser wird durch Starkregenereignisse, durch Schneeschmelze usw. verursacht, was zu Eindringen von Oberflächenwasser in den Boden führt. Rutschungen können jedoch auch durch Erdbeben und durch die Verringerung der Standfestigkeit aufgrund von menschlichem Eingreifen entstehen.

Gegen einen erhöhten Wassergehalt kann man mit Entwässerungsmaßnahmen vorgehen. Damit können die Rutschbewegungen nicht gestoppt, jedoch verringert bzw. hinausgezögert werden. Durch Massenbewegungen können beträchtliche Schäden an Gebäuden und an Infrastruktureinrichtungen entstehen.

Bei der Errichtung von Hangentwässerungssystemen ist jedoch auf eine sorgfältige Ausführung zu achten. Innerhalb des Entwässerungssystems darf kein Wasser verloren gehen, da bei defekten Systemen das Wasser an einer Stelle konzentriert austritt, und sich dadurch die Wahrscheinlichkeit des Abgleitens vergrößert. Bei der Fassung von Tiefenwasser mittels Drainagen darf es zu keinem Ausspülen von Bodenmaterial (Erosion¹, Suffosion²) kommen, weil es dadurch zu Setzungen oder kleinräumigen Rutschungen kommen kann. Weiters soll das gefasste Wasser möglichst schnell aus dem Rutschgebiet abgeführt und in einen Vorfluter eingeleitet werden.

Um eine möglichst langfristige Funktion des Entwässerungssystems zu gewährleisten, bedarf es regelmäßiger Kontrollen. Dies kann entweder durch Begehung des Rutschgebietes oder durch die Errichtung eines Beobachtungs- oder Monitoringsystems erfolgen.

1 Erosion: Darunter versteht man die Umlagerung und den Transport von Teilchen eines Bodens, dass es zu einer Zerstörung der Bodenstruktur kommt. Dabei unterscheidet man die Oberflächenerosion, die äußere Erosion, die innere Erosion, die Fugenerosion und die Kontakterosion. [20]

2 Suffosion: Darunter versteht man den Transport von feinen Teilchen in den Poren des Bodens durch die Grundwasserströmung, ohne dass dabei das tragende Bodenskelett verändert wird. Man unterscheidet die Oberflächensuffosion, die innere Suffosion, die Kontaktsuffosion und die äußere Suffosion. [20]

2 Einleitung

2.1 Allgemeines

Der Gschlifgraben liegt im Bezirk Gmunden in Oberösterreich am Ostufer des Traunsees. Geologisch liegt er im Grenzbereich zwischen der Flyschzone und den nördlichen Kalkalpen. Die Flyschzone ist hier durch eine Aufbruchzone des Helvetikums, welche aus Gesteinen besonderer Mobilität besteht, durchbrochen.



Abb. 1 Geographische Lage vom Gschlifgraben (doris.ooe.gv.at)

Weiters ist die Situation am Gschlifgraben durch zahlreiche besonders ungünstige Faktoren gekennzeichnet. Als Folge dieser Gegebenheiten sowie der Eigenschaften der Gesteine und deren Veränderung bei Wasseraufnahme kam es immer wieder zu Massenumlagerungen.

Schon seit dem 15. Jahrhundert sind historische Aufzeichnungen über immer wieder auftretende Rutschungen, Felsstürze, Murenabgänge und Schlammströme bekannt. Durch Bohrungen konnten weitere Erkenntnisse über die Entwicklungsgeschichte am Gschlifgraben gewonnen werden.

Am 28.11.2007 kam es wieder zu Massenbewegungen. Dabei rutschten die Erdmassen im oberen Bereich bis zu 5 m pro Tag, im mittleren Bereich bis zu 1,5 m pro Tag und am Schwemmkegel bis zu 0,5 m pro Tag. Dadurch wurden die entlang der Seestraße liegenden Gebäude und die dazugehörigen Infrastruktureinrichtungen gefährdet. Entlang der Seestraße wurden 55 Häuser evakuiert, die Seestraße gesperrt und der Gschlifgraben zum Katastrophengebiet erklärt. Weiters wurden vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung zahlreiche Maßnahmen entwickelt, welche die Massenbewegung stoppen bzw. verringern sollen.

2.2 Maßnahmen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach und Lawinerverbauung

- Aufschließung und Errichtung von Notstraßen
- Entwässerungs- und Hochwasserschutzmaßnahmen
- Hangentlastung durch Massenabfuhr
- Wiederaufforstung und Erosionsschutzmaßnahmen
- Errichtung eines Monitoring- und Frühwarnsystems

2.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Aus der Wasserwirtschaft sind zahlreiche Verfahren zur Durchflussmessung bekannt. All diese Verfahren haben jedoch unterschiedliche Vor- und Nachteile, und werden in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Deshalb ist es wichtig, sich zuerst über alle möglichen Verfahren zu informieren und sich erst dann auf eine oder mehrere geeignete Methoden festzulegen. Im ersten Abschnitt der Arbeit werden die heute in der Wasserwirtschaft verwendeten Methoden zur Durchflussbestimmung beschrieben.

Nachdem man sich für ein Verfahren entschieden hat, soll untersucht werden, wo die Grenzen der Anwendung liegen. Durch Versuche im Labor und durch Einbau einer Probestation in der Natur sollen die Genauigkeit, das Verhalten bei unterschiedlichen Temperaturbereichen bzw. Klimabereichen und deren dauerhafte Funktionstauglichkeit überprüft und die dabei auftretenden Probleme behoben werden. Auch die Auffindung der Schlüsselkurve/ Pegelschlüssels und der Vergleich der im Labor gemessenen Werte mit den errechneten Werten stellen einen wesentlichen Abschnitt der Arbeit dar.

Ein weiterer Teil ist die Begehung des Geländes und die Vermessung der Rohrleitungen. Nach Umrechnung der Vermessungsdaten in Koordinaten (Geosie) kann das Rohrleitungssystem mit allen Zuleitungen in CAD (Lageplan, Längenschnitt) bzw. in einem GIS (Geoinformationssystem) dargestellt werden. Nach einer Geländebegehung und Einholung von Informationen bei der WLV soll ersichtlich werden, aus welchen Bereichen Oberflächenwässer und Tiefenwässer abgeleitet werden. Weiters sollte überlegt werden, wie und an welchen Stellen es zum Versagen der Rohrleitungen kommen kann. Erst dann kann entschieden werden, wo man Messstationen platziert, um zum einen die hydrologischen Verhältnisse genau zu erfassen und zum anderen die dauerhafte Funktion der Rohrleitungen zu kontrollieren.

1. Pegelschlüssel: Als Pegelschlüssel bezeichnet man eine Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss. Dieser muss für jede Pegelstelle ermittelt werden. Der Pegelschlüssel stellt aufgrund der ständigen Querschnittsveränderungen durch Erosion und Anlandungen keine konstante Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss dar. [18]

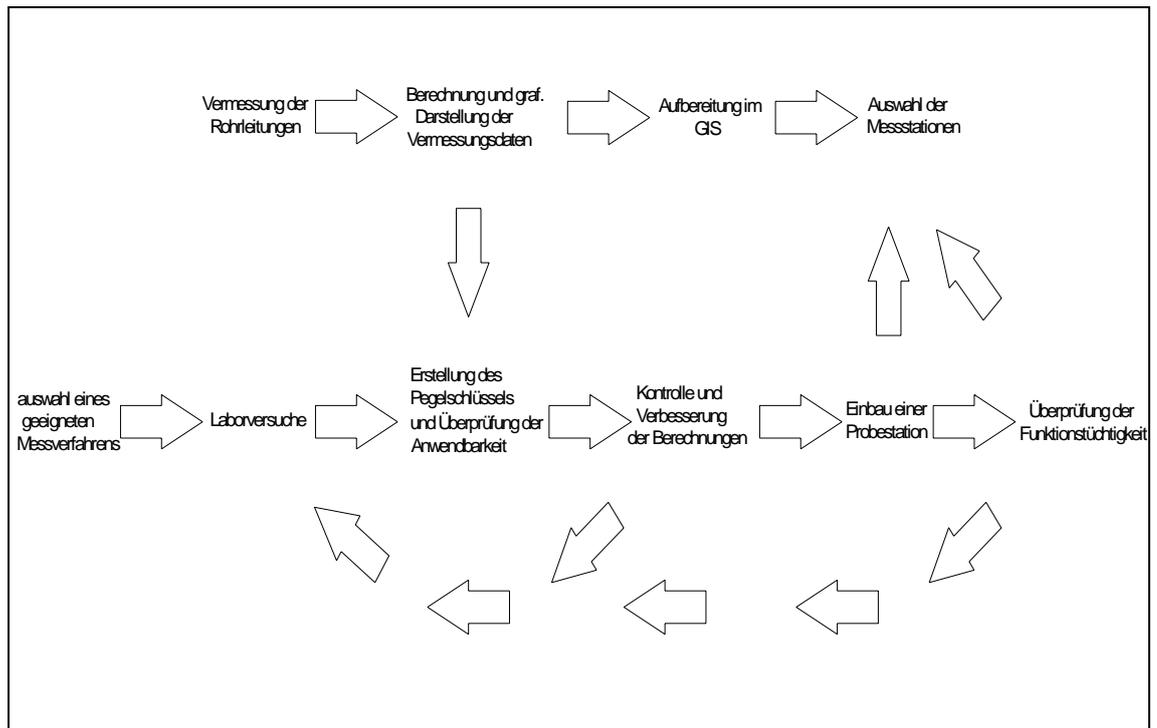


Abb. 2. Methodik und Aufbau der Arbeit

2.4 Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit der Errichtung eines Monitoringsystems am Gschlifegraben. Durch zahlreiche bauliche Maßnahmen wurde die Entwässerung des Gschlifegrabens gewährleistet. Diese baulichen Maßnahmen umfassen unter anderem die Neuanlage und den Ausbau von offenen Ableitungsgräben, die Anlage und den Betrieb von Entwässerungsbrunnen, die Anlagen von Drainagen und Sickerschlitzen inklusive Tiefendrainagen sowie die Errichtung von Sammelrohrleitungen zur Wasserabfuhr aus sensiblen Rutschbereichen.

Um die hydrologischen Verhältnisse genau erfassen zu können, ist es wichtig zu wissen aus welchen Bereichen welche Wässer abgeführt werden, weil zum Beispiel Tiefenwässer andere Eigenschaften haben als Oberflächenwässer. Diese Wässer fließen zum Teil in einem verzweigten Rohrleitungssystem, oder wie bereits angesprochen, in offenen Ableitungsgräben ab. Durch Durchflussmessung an unterschiedlichen Stellen des Rohrleitungssystems, an Dreieckswehren und an einzelnen Pegelprofilen sollte man dann in der Lage sein, die abfließenden Wassermengen möglichst vollständig zu erfassen. Weiters soll durch gut überlegte Auswahl der Messstationen die Kontrolle der Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems gewährleistet sein.

3 Hydraulische Grundlagen

3.1 Physikalische Eigenschaft von Flüssigkeiten

- Dichte:

Die Dichte von Flüssigkeiten ist definiert als Quotient aus Masse und Volumen und ist abhängig von Temperatur und Druck. Bei 4° C weist die Dichte mit 999,97 kg/m³ ihr Maximum auf und sinkt mit steigender Temperatur. Weiters kann sich die Dichte durch erhöhten Salzgehalt sowie auch durch Schweb- und Schmutzstoffe oder Geschiebe verändern, was geringfügig auch Auswirkungen auf das Fließverhalten von Flüssigkeiten hat. [2]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

$$\rho = \text{Dichte} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$m = \text{Masse} (kg)$$

$$V = \text{Volumen} (m^3)$$

- Gewicht:

Im Schwerfeld der Erde unterliegen Massen einer Anziehungskraft, dem Gewicht.

$$F = G * \frac{M * m}{r^2} \quad (3.2)$$

$$F = \text{Gewicht} (kg)$$

$$G = \text{Gravitationskonstante}; G = 6,67259 * 10^{-11} \frac{m^3}{kg^{-1} * s^{-2}}$$

$$M = \text{Masse der Erde}; M = 5,977 * 10^{24} kg$$

$$m = \text{Masse des betrachteten Objektes} (kg)$$

$$r = \text{Abstand der Schwerpunkte} (m)$$

Für Flüssigkeiten an der Erdoberfläche kann der durchschnittliche Erdradius (\bar{R}) eingesetzt werden. Der durchschnittliche Erdradius beträgt 6371000m. Somit können die bekannten Größen G , M und r zur Fallbeschleunigen g zusammengefasst werden. [2]

$$g = G * \frac{M}{r^2} \quad (3.3)$$

$$g = \text{Fallbeschleunigung in} \left(\frac{m}{s^2} \right); \text{ in etwa } 9,81 \frac{m}{s^2} \text{ (Ortsabhängig)}$$

Vereinfacht ergibt das Gewicht einer Masse:

$$F = m \cdot g \quad (3.3)$$

- **Zähigkeit:**

Als Zähigkeit oder dynamische Viskosität η wird die innere Reibung bzw. der Fließwiderstand von Flüssigkeitsteilchen gegeneinander verstanden. Die Zähigkeit hat Auswirkungen auf das Fließverhalten von Flüssigkeiten (reines Wasser fließt schneller als Öl), und ist definiert als Proportionalitätsfaktor zwischen Schubspannung und Geschwindigkeitsgradienten. [2]

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dn} \quad (3.4)$$

$$\tau = \text{Schubspannung} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \right)$$

$$\eta = \text{Dynamische Viskosität} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)$$

$$v = \text{Fließgeschwindigkeit} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$n = \text{Ortskoordinate normal zur Bewegungsrichtung} \quad (\text{m})$$

Eine davon abgeleitete Größe ist die sich auf die Dichte ρ beziehende kinematische Viskosität ν . Die kinematische Viskosität ist wie die dynamische Viskosität abhängig von der Temperatur der Flüssigkeit. Die kinematische Viskosität spielt zum Beispiel bei der Berechnung von Reibungsverlusten bei Rohrleitungen eine Rolle. [2]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.5)$$

$$\nu = \text{Kinematische Viskosität} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

$$\rho = \text{Dichte} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

- **Oberflächenspannung:**

Als Oberflächenspannung σ wird der Quotient aus der Arbeit, die zur Vergrößerung der Oberfläche erforderlich ist und der Größe des Flächenzuwachses verstanden. Sie wird durch Kohäsionskräfte bewirkt, mit denen sich die Flüssigkeitsmoleküle gegenseitig anziehen. Im Inneren wirken diese Kräfte nach allen Seiten mit gleicher Stärke. An einer Grenzfläche zu einem Gas werden die Moleküle jedoch stärker von den Flüssigkeitsmolekülen angezogen als von den Gasmolekülen. [2]

$$\sigma = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Länge}} \quad (3.6)$$

$$\sigma = \text{Oberflächenspannung} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right)$$

- **Sättigungsdampfdruck:**

Sinkt der Flüssigkeitsdruck unter den Sättigungsdampfdruck, gehen mehr Wassermoleküle von der Flüssigkeit in die Umgebungsluft über als umgekehrt und die Flüssigkeit beginnt zum verdampfen. Steigt der Flüssigkeitsdruck wieder, kondensiert der Dampf. [2]

$$p_s = 611 * e^{\left(\frac{17,27*t}{t+273,3}\right)} \quad (3.7)$$

p_s = Sättigungsdampfdruck (Pa)

t = Temperatur ($^{\circ}C$)

- **Flüssigkeitsdruck:**

Der Flüssigkeitsdruck ist in einem Punkt in einer Flüssigkeit nach allen Richtungen gleich groß.

$$p = \frac{F_n}{A} \quad (3.8)$$

p = Flüssigkeitsdruck (Pa) oder (bar); $1 bar = 10^5 Pa \approx 10m$ Wassersäule

Der Druck kann auch als Druckhöhe angegeben werden.

$$h_D = \frac{p}{\rho * g} \quad (3.9)$$

h_D = Druckhöhe (m)

Physikalische Eigenschaften von Wasser							
Temperatur $^{\circ}C$	ρg kN/m^3	Dichte, ^a kg/m^3	Elastizitätsmodul, ^{b,c} $E/10^6, kPa$	dynamische Zähigkeit $\mu \times 10^3, Pa \cdot s$	kinematische Zähigkeit, ^a $\nu \times 10^6 m^2/s$	Oberflächen- spannung ^{a,d} $\sigma, N/m$	Dampf- druck, ^e p_v, kPa
0	9.805	999.8	1.98	1.781	1.785	0.075 6	0.61
5	9.807	1,000.0	2.05	1.518	1.518	0.074 9	0.87
10	9.804	999.7	2.10	1.307	1.306	0.074 2	1.23
15	9.798	999.1	2.15	1.139	1.139	0.073 5	1.70
20	9.789	998.2	2.17	1.002	1.003	0.072 8	2.34
25	9.777	997.0	2.22	0.890	0.893	0.072 0	3.17
30	9.764	995.7	2.25	0.798	0.800	0.071 2	4.24
40	9.730	992.2	2.28	0.653	0.658	0.069 6	7.38
50	9.689	988.0	2.29	0.547	0.553	0.067 9	12.33
60	9.642	983.2	2.28	0.466	0.474	0.066 2	19.92
70	9.589	977.8	2.25	0.404	0.413	0.064 4	31.16
80	9.530	971.8	2.20	0.354	0.364	0.062 6	47.34
90	9.466	965.3	2.14	0.315	0.326	0.060 8	70.10
100	9.399	958.4	2.07	0.282	0.294	0.058 9	101.33

Tabelle 1 Physikalische Eigenschaften von Wasser (aus [12], 101)

- **Der Atmosphärendruck:**

Der Atmosphärendruck beträgt auf Meeresspiegelhöhe bei 0°C und 45° geographischer Breite 1,01325 bar und nimmt mit steigender Meereshöhe ab. [2]

- **Bezugsdruck:**

Der Bezugsdruck ist jener Druck, auf den sich alle Drücke beziehen. In der Hydraulik wird meist der Atmosphärendruck als Bezugsdruck gewählt. Ist der Druck größer als der Atmosphärendruck, spricht man von Überdruck, sonst von Unterdruck. [2]

3.2 Hydrodynamische Grundlagen

3.2.1 Das zeitliche und räumliche Verhalten einer Strömung

- **Stationär:** Die Geschwindigkeit und der Durchfluss sind in allen Punkten eines Strömungsgebietes zeitlich konstant. [14]
- **Instationär:** Die Geschwindigkeit und der Durchfluss sind in allen Punkten eines Strömungsgebietes zeitlich veränderlich. [14]
- **Gleichförmig:** In allen Punkten eines Strömungsgebietes ist die Geschwindigkeit ortsunabhängig. [14]
- **Ungleichförmig:** In allen Punkten eines Strömungsgebietes ist die Geschwindigkeit abhängig vom Ort. [14]

3.2.2 Zustand der Strömung

- **Laminar:** Bei der laminaren Strömung können aufgrund der Reibungskräfte die Störungen ausgeglichen werden. Die Stromlinien verlaufen parallel, die Strömung erfolgt in Schichten. [14]
- **Turbulent:** Bei der turbulenten Strömung wird die Grundströmung von unregelmäßigen Schwankungen überlagert.

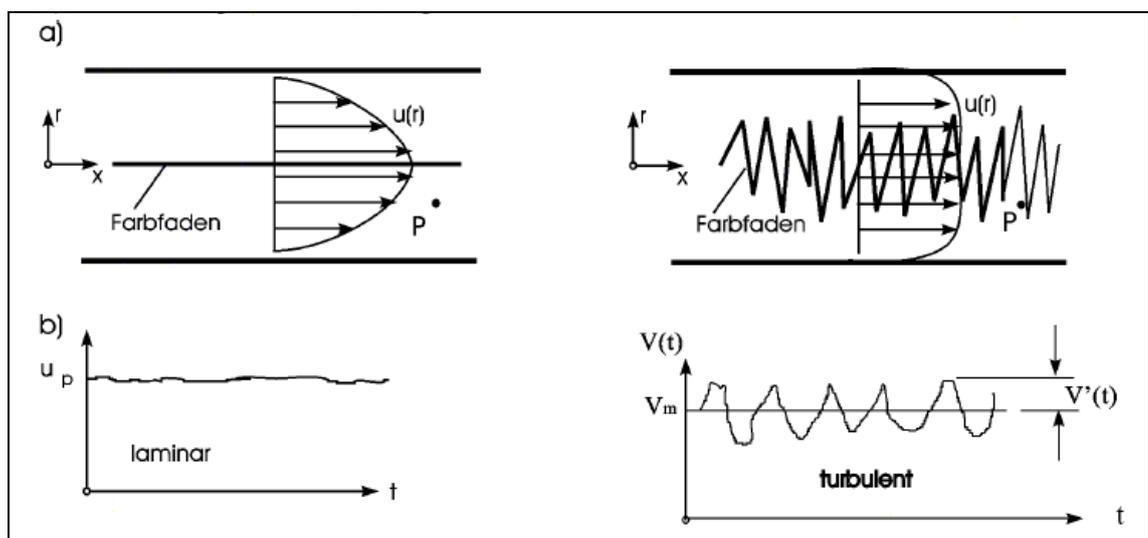


Abb. 3 Vergleich zwischen laminarer und turbulenter Strömung a) Geschwindigkeitsprofil
b) Geschwindigkeitsschwankungen im Punkt b; $u_p \approx v_m$ (aus[12], 43)

Der Übergang von laminarer Strömung zu einer turbulenten Strömung erfolgt in Wasser bei $Re_{krit} = 2300-2800$.

$$Re = \frac{v_m * d}{\nu} \quad (3.10)$$

v_m = mittlere Geschwindigkeit $\left(\frac{m}{s}\right)$

d = Rohrdurchmesser (m)

ν = kinematische Zähigkeit $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$Re < Re_{krit}$ bedeutet laminares Fließen, $Re > Re_{krit}$ bedeutet turbulente Strömung. [14]

3.2.3 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass der Durchfluss in einer Stromröhre pro Zeiteinheit konstant ist. [12]

$$Q = v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (3.11)$$

Q = Durchfluss $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

v_i = Mittlere Fließgeschwindigkeit $\left(\frac{m}{s}\right)$

A_i = Querschnittsfläche (m^2)

3.2.4 Bernoulli Gleichung

„Bei einer stationären Bewegung einer, nur der Schwere als Massenkraft unterworfenen Flüssigkeit ist für alle Punkte einer Stromlinie die Summe aus Geschwindigkeits-, Druck- und Ortshöhe konstant“. (aus[14], 24)

$$\frac{v^2}{2 * g} + \frac{p}{\rho * g} + z = H = \text{konstant} \quad (3.12)$$

$\left(\frac{v^2}{2 * g}\right)$ = Geschwindigkeitshöhe, Höhe der kinetischen Energie (m)

$\left(\frac{p}{\rho * g}\right)$ = Druckhöhe (m)

(z) = Lageenergiehöhe bzw. Höhe über den Vergleichshorizont (m)

(H) = Gesamtenergiehöhe (m)

Nach Hinzufügen eines weiteren Energiehöhenbetrages, der Verlusthöhe h_v , erhält man die erweiterte Bernoulli- Gleichung:

$$\frac{v^2}{2 * g} + \frac{p}{\rho * g} + z + h_v = H = \text{konstant} \quad (3.13)$$

h_v = Verlusthöhe (m)

Die Verlusthöhe setzt sich aus den Reibungsverlusten und den örtlichen Einzelverlusten zusammen.

- Örtliche Einzelverluste:

Zu den örtlichen Einzelverlusten zählen Eintrittsverluste, Verluste durch Richtungsänderungen, Verluste durch Querschnittänderungen, Verluste durch Rohrverzweigungen und Rohrvereinigungen, Verluste durch Einbauten und Austrittsverluste. [12]

$$h_i = \xi_e * \frac{v^2}{2 * g} \quad ()$$

h_i = Verlusthöhe (m)

ξ = Verlustbeiwert

- Reibungsverluste: [12]

$$h_v = \frac{\lambda * l * v^2}{2 * d * g} \quad (3.14)$$

h_v = Verlusthöhe

l = Länge (m)

λ = Rohrreibungsbeiwert

- Rohrreibungsbeiwert λ [12]

Im turbulenten Fall sind bei der Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes der glatte, der Übergangsbereich und der raue Bereich zu unterscheiden. Im glatten und im Übergangsbereich wird die Formel von Prandtl und Colebrook verwendet.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log \left(\frac{2,51}{R_e * \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 * d} \right) \quad (3.15)$$

Der Wert λ ist iterativ zu bestimmen. Als Startwert wird 0,02 empfohlen.

Im rauen Bereich ist λ nur von der relativen Rauigkeit abhängig.

$$\varepsilon = \frac{k}{d} = \text{relative Rauigkeit}$$

$$\lambda_{rau} = \frac{1}{4 * \log^2 \left(\frac{3,71 * d}{k} \right)} \quad (3.16)$$

k = absolute Rauigkeit (mm)

d = Rohrdurchmesser (m)

Re = Reynoldszahl

4 Durchflussmesstechnik

Jede Durchflussmessung setzt sich aus den Komponenten Hydraulik, Sensorik und der Messwertverarbeitung zusammen. Dabei umfasst die Hydraulik die Geschwindigkeitsverteilung in den verschiedenen Strömungszuständen, die in einem Rohr vorkommen können. Die Sensorik als Basis des Mess-Systems beschäftigt sich mit der Beschaffung von für die Messung notwendigen Informationen, wie zum Beispiel der genauen Ermittlung der Fließhöhe h oder der Fließgeschwindigkeit v an einem bestimmten Ort. Die Messwertverarbeitung soll möglichst störungsfrei auch kleine Mess-Signale verarbeiten, und diese als durchflussproportionales Ausgangssignal wiedergeben. Eine weitere Aufgabe von Sensorik und Messwertverarbeitung ist die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m als Funktion der lokalen Fließgeschwindigkeit v_l wiederzugeben. Die in der heutigen Mengen- und Durchflussmesstechnik verwendeten Verfahren sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. [4]

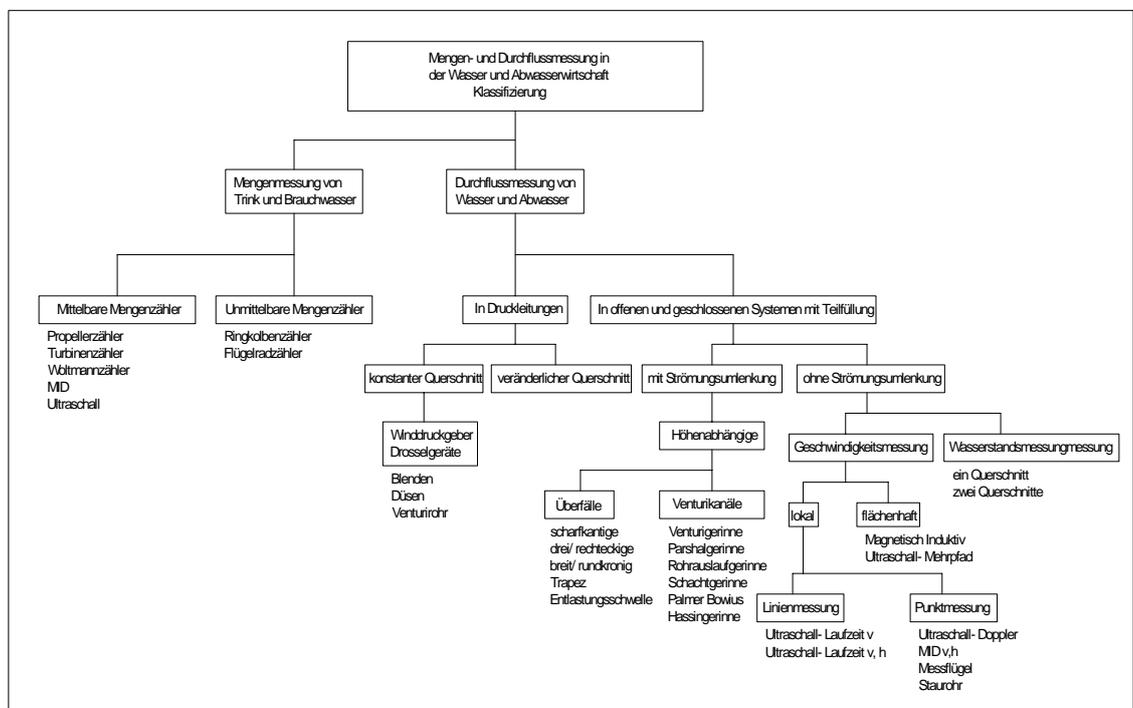


Abb. 4. Klassifizierung der Durchflussmessgeräte (aus [4], 108)

Man unterscheidet die Mengenmessung von Trink- und Brauchwasser von der Durchflussmessung von Wasser und Abwasser. Bei letzterem wird nochmals zwischen Durchflussmessung in Druckrohrleitungen und der Durchflussmessung in offenen und geschlossenen Systemen mit Teilfüllung unterschieden. Da bei dieser Arbeit nur die Durchflussmessung bei Systemen mit Teilfüllung von Bedeutung ist, wird in der Folge nur auf diese Verfahren näher eingegangen.

4.1 Durchflussmessung bei Teilfüllung

Man unterscheidet bei der Durchflussmessung Verfahren mit Strömungsumlenkung von Verfahren ohne Strömungsumlenkung. Welches dieser Verfahren zum Einsatz kommt, hängt von den örtlichen Verhältnissen, der Möglichkeit bauliche Maßnahmen vorzunehmen, den hydraulischen Verhältnissen und natürlich auch von den Kosten ab.

4.1.1 Durchflussmessung bei Teilfüllung mit Strömungsumlenkung

Bei diesen Verfahren wird in einer Messrinne der Querschnitt seitlich eingeengt, so dass ein Strömungswechsel stattfindet. Im Längenschnitt kann die Sohle entweder gerade durchgehend oder mit einer Bodenschwelle zur Anhebung des Oberwasserstandes ausgeführt werden. Diese Messrinnen können entweder vor Ort betoniert werden, oder, um Fertigungsfehler zu vermeiden, für gängige Bauformen als vorgefertigte Bauteile geliefert werden. Für welche der vielen verschiedenen Bauform man sich entscheidet, hängt von den jeweiligen Strömungsverhältnissen ab. Die Dimensionierung der genormten Ausführungen ist in verschiedenen Normen genau festgelegt. Die häufigsten Querschnitte sind Rechteck- und Trapezprofile. [4]

4.1.1.1 Venturirinne

Die genormte Bauform des Venturikanals ist die am häufigsten vorkommende Bauform und besteht aus einem rechteckigen Zulauf mit einer Trapezeinschnürung ohne Bodenschwelle. Durch die Einschnürung und den daraus folgenden Aufstau im Oberwasser kann man durch Messung vor und nach der Einschnürung den Durchfluss berechnen. Wenn es zu einem Fließwechsel von Strömen zu Schießen kommt, genügt die Messung des Oberwasserstandes. [4]

$$Q = k * b * h_u * \sqrt{2 * g * (h_o - h_u)} \quad (4.1)$$

$$Q = \text{Durchfluss} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$h_u = \text{Unterwasserstand} [m]$$

$$h_o = \text{Oberwasserstand} [m]$$

$$b = \text{Breite des Gerinnes} [m]$$



Abb. 5. Grundriss und Längenschnitt eines Venturigerinnes (aus [4], 127)

4.1.1.2 Parshallrinne

Die Parshallrinne unterscheidet sich von der klassischen Venturirinne durch eine zusätzlich angebrachte Vertiefung im Kontrollquerschnitt. Dadurch wird auch bei kleinen Durchflüssen ein Fließwechsel erzwungen und der Messbereich erhöht.

Damit ist die Parshallrinne eine Form, die auch bei nur 1% der Maximalmenge den Durchfluss misst. [4]

4.1.1.3 Khafagirinne

Die Khafagirinne hat einen relativ kurzen Zulauf und die Einengung ist als Kreis ausgebildet. Dadurch wird bei gleicher Wasserstandshöhe ein größerer Durchfluss erreicht. [4]

4.1.1.4 Venturikanäle im Schachtbauwerk

Diese tragbaren Formen eignen sich für permanente Durchflussmessung und werden am Unterwasserende eines Kontrollschachtes eingebaut. [4]

4.1.1.5 Badger Mess- Schachtrinne

Die Badger Mess- Schachtrinne besitzt eine trapezförmige Rinne an der Einengung und kann im Abflussrohr eines Schachtbauwerkes eingesteckt werden. [4]

4.1.1.6 Palmer Bowlusrinne

Auch die Palmer Bowlusrinne hat ähnlich wie die Badger Mess- Schachtrinne einen trapezförmigen Querschnitt, die Länge der Engstelle beträgt jedoch nur einen Rohrdurchmesser und ist mit einer Sohlschwelle ausgeführt. [4]

4.1.1.7 Messung des Durchflusses über die Fließgeschwindigkeit in Messrinnen

Diese Venturirinne nutzt die Vorteile einer Messrinne kombiniert mit einem Geschwindigkeitsaufnehmer im Kontrollquerschnitt. [4]

4.1.1.8 Überfälle

Messüberfälle und Messwehre sind Bauwerke zum Durchflussmessen. Sie besitzen einen diskontinuierlichen Sohlverlauf, wobei sich stromauf meist ein Rückstau bildet. Durch diese plötzliche Änderung der Geometrie kommt es zu einer Änderung des Abflussverhaltens. Bei der dabei entstehenden Überfallströmung gelten die Annahmen paralleler Stromlinien und hydrostatischer Druckverteilung nicht. Beim Überströmen der Überfälle steigt der Durchfluss mit steigender Wasserhöhe. Die Überfallprofile haben einfache geometrische Formen. Die normierten Profile haben eine scharfkantige Kronenform mit einer maximalen Kantenbreite von 2 mm. Bei feststoffführenden Wässern kann es durch Ablagerungen im Oberwasser zu Problemen kommen.

Es wird zwischen zwei verschiedenen Formen von Überfällen unterschieden. Beim **unvollkommenen Überfall** wird das Oberwasser vom Unterwasser beeinflusst und der Abfluss ist eingestaut. Beim **vollkommenen Überfall** dagegen fließt das Wasser uneingestaut ab, und es kommt zu einem Fließwechsel vom Strömen zum Schießen. Die Berechnung des Durchflusses für den ungestauten Abfluss erfolgt mit der Abflussformel nach Poleni. [9]

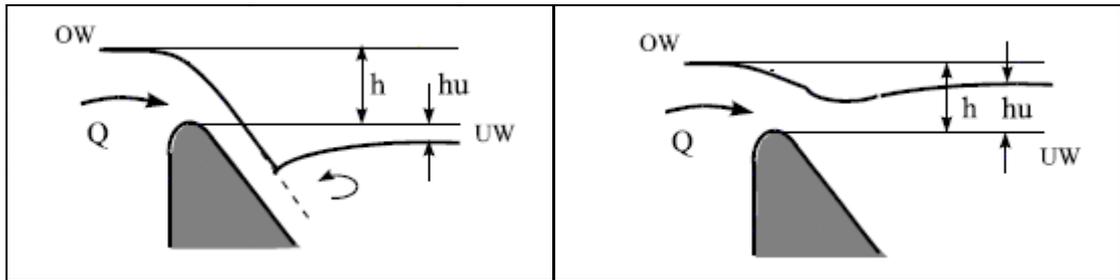


Abb. 6 Vollkommener (links) und unvollkommener Überfall (rechts) (aus[13], 40)

$$Q = \frac{2}{3} * \mu' * b * \sqrt{2 * g} * h^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (4.2)$$

$$Q = \text{Durchfluss} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

μ = Überfallbeiwert nach Poleni

$$\mu' = c * \mu$$

h = Höhe zwischen tiefsten Punkt der Wehrröffnung und Höhe des Oberwasserspiegels [m]

b = Breite [m]

g = Erdbeschleunigung $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

Überfallform	Kronenausbildung	μ p
a	breit, scharfkantig, waagrecht	0,49-0,51
b	breit, gut abgerundete Kanten, waagrecht	0,50-0,55
c	breit, vollständig abgerundet z.B. mit ganz umgelegter Stauklappe	0,65-0,73
d	scharfkantig, Überfallstrahl belüftet	~ 0,64
e	rundkronig, mit lotrechter Oberwasser- und geneigter Unterwasserseite	0,73-0,75
f	dachförmig, gut ausgerundet	bis 0,79

Tabelle 2. Überfallsbeiwerte nach Poleni (aus [13], 39)

$$Q = C_d * b * (2 * g * h^3)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Q = Durchfluss (m^3 / s)

C_d = Überfallbeiwert (m)

b = Überfallbreite (m)

h = Überfallhöhe (m)

w = Wehrhöhe (m)

4.1.1.8.2 Dreiecksüberfall nach Thomson

Beim Dreiecksüberfall ist der Abfluss von den Verhältnissen im Zulaufgerinne weitgehend unabhängig. Weiters ist der Dreiecksüberfall für geringe Durchflüsse bis etwa 40 l/s und Überfallhöhen bis 0,1 m geeignet. Die Genauigkeit dieser Überfälle ist unter Naturbedingungen mit etwa 2% abzuschätzen. [9]

Die Durchflussgleichung des Dreiecküberfalles lautet:

$$Q = \frac{8}{15} * \mu * \sqrt{2 * g} * \tan \alpha * h^{\frac{5}{2}} \quad (4.3)$$

Q = Durchfluss (m^3 / s)

μ = Überfallbeiwert (m)

h = Überfallhöhe (m)

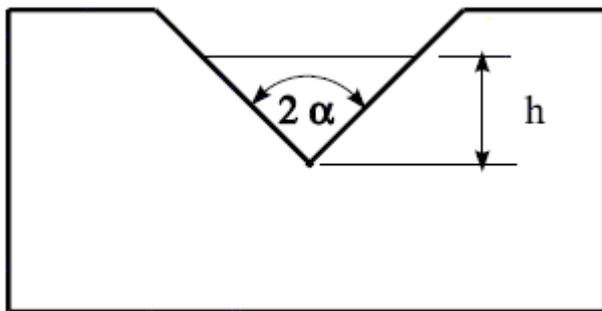


Abb. 8 Dreieckswehr nach Thomson (aus[13], 49)

4.1.1.8.3 Breitkroniger Überfall

Bei dieser Überfallform ist die Vorder- und Rückseite vertikal, die Kronenfläche horizontal und beide Kanten sind scharf ausgeführt. Beim breitkronigen Wehr stellen sich je nach der relativen Wehrlänge verschiedene Oberflächenformen ein.

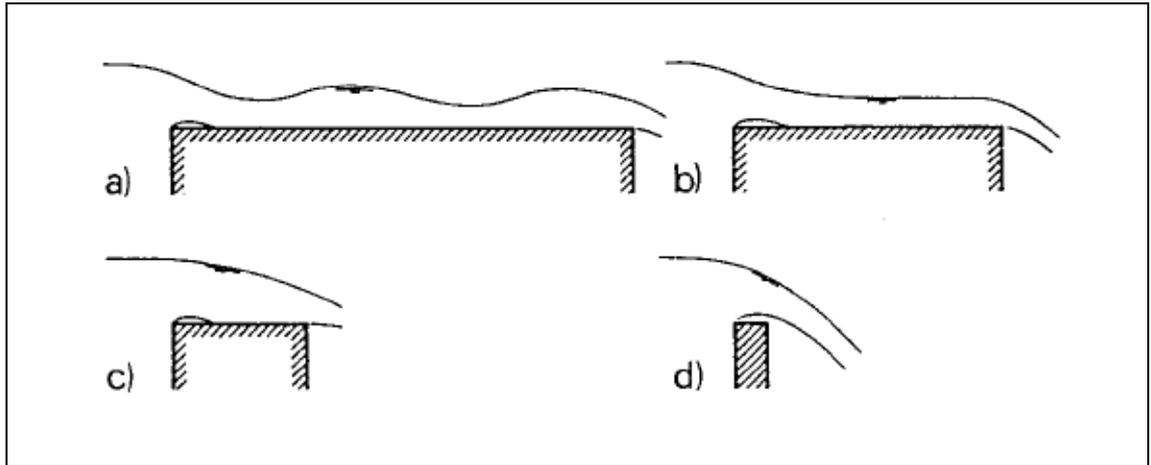


Abb. 9 Abflusszustände beim breitkronigem Wehr (a. das lange Wehr, b. das eigentlich breitkronige Wehr, c. kurzes Wehr, d. das praktisch scharfkantige Wehr) (aus [19], 3.26)

Die Gleichung für das Standardwehr lautet:

$$Q = 0,326 * \left(\frac{1 + \frac{9}{7} * \zeta_w^4}{1 + \zeta_w^4} \right) * b * (2 * g * H^3)^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

$\zeta_w = \frac{H}{L_w}$ = Faktor für die relative Wehrlänge

H = Energiehöhe (m)

b = Breite (m)

g = Erdbeschleunigung $\left(9,81 \frac{m}{s^2} \right)$

4.1.2 Durchflussmessung bei Teilfüllung ohne Strömungsumlenkung

Auch bei den Verfahren der Durchflussmessung ohne Strömungsumlenkung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Nach Erb unterscheidet man höhenabhängige Verfahren, bei denen man aus dem Füllstand im Rohr über einen Pegelschlüssel den Durchfluss ermittelt, von den geschwindigkeitsabhängigen Verfahren. Dabei wird durch Messung der lokalen Fließgeschwindigkeit die mittlere Fließgeschwindigkeit ermittelt und durch Multiplikation dieser mit der Querschnittsfläche der Durchfluss ermittelt. [4]

$$Q = A * v \quad (4.5)$$

$$Q = \text{Durchfluss} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$A = \text{Querschnittsfläche} \left[m^2 \right]$$

$$v = \text{Fließgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$$

4.1.2.1 Messung der Fließgeschwindigkeit

Die bei der Durchflussmessung verwendeten Verfahren nutzen die Verfahren der Ultraschall-Laufzeitverfahren nach dem Prinzip der Mitführung, des Ultraschall-Doppler-Effektes und der Magnetischen Induktion. Auf diesen Verfahren aufbauend, haben sich mehrere andere Verfahren auf dem Markt etabliert. [4]

4.1.2.1.1 Ultraschall-Laufzeitverfahren

Aus den Ultraschall-Laufzeitverfahren haben sich verschiedene Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung entwickelt, wobei sich die Unterschiede aus der Signalverarbeitung ergeben. [4]

4.1.2.1.1.1 Laufzeitdifferenzverfahren

Beim Laufzeitverfahren wird die Laufzeit des Schalles durch einen Kanal gemessen, und die Differenz des Schalles einmal in Strömungsrichtung und einmal gegen die Strömungsrichtung gebildet. Aus der Differenz lässt sich die lokale Fließgeschwindigkeit berechnen. Ein Vorteil dieses Verfahren ist, dass die Messungen durch Feststoffe im Wasser nicht gestört wird. [4]

4.1.2.1.1.2 Impuls- Folge- Frequenz- Verfahren

Bei diesem Verfahren werden die Laufzeiten der Schallimpulse gemessen und anschließend die Frequenzdifferenzen gebildet. Da dieses Verfahren zur Messung mehrere Schwingungsperioden benötigt, und bei Ausfall eines Wellenzuges (zum Beispiel durch sich im Wasser befindenden Feststoffen) der nächste Wellenzug abgewartet werden muss, eignet sich dieses Verfahren für feststoffführende Wässer nicht. [4]

4.1.2.1.1.3 Phasendifferenzverfahren

Dabei wird die Laufzeitmessung durch Messung der Phasenwinkelverschiebung φ_0 ersetzt. Der Einfluss der temperaturabhängigen Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_0 wird durch laufende Messung der Schallgeschwindigkeit im Wasser eliminiert.

$$c_0 = \frac{2 * l}{t_{1,2} + t_{2,1}} \quad (4.6)$$

Die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ soll bei v_{\max} innerhalb einer Wellenlänge bleiben so dass keine Überlappung der Wellenzüge entsteht. [4]

$$v_l = \frac{c_0^2}{2 * l * t * g * \alpha * 2 * \pi * f} \quad (4.7)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{f_s} \quad (4.8)$$

α = Einbauwinkel [°]

f_s = Sendefrequenz

Δt = Laufzeitdifferenz [s]

4.1.2.1.2 Ultraschall- Doppler-Verfahren

Wird ein gebündelter Ultraschallstrahl unter dem Winkel α und der Frequenz f ausgesendet, dann wird ein Teil des Strahls an den Feststoffen in der Flüssigkeit mit einer Frequenzverschiebung Δf reflektiert.

$$\Delta f = 2f * \frac{\cos \alpha}{c_0} * v_p \quad (4.9)$$

f = Sendefrequenz $\left[\frac{\text{Hz}}{\text{mHz}} \right]$

v_p = Partikelgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

f_2 = Dopplerfrequenz $\left[\frac{\text{Hz}}{\text{mHz}} \right]$

c_0 = Schallausbreitungsgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ - Bei 20°C beträgt c_L 343 m/s.

α = Einstrahlwinkel zwischen Ultraschallstrahl und Strömungsrichtung [°]

Durch Umformen der Gleichung kann die Partikelgeschwindigkeit v_p ermittelt werden.

$$v_p = \frac{c_0 * \Delta f}{2f * \cos \alpha} \quad (4.10)$$

Ein wesentlicher Nachteil dieser Verfahren ist, dass sich die Messwertaufnehmer immer in der Strömung befinden und dadurch ein Teil des Querschnitts verbaut wird. Die Kabelverlegung verursacht in manchen Fällen Störungen durch Wellenbildung. [4]

Bei Rohrleitungen mit unterschiedlichen Füllhöhen eignet sich dieses Verfahren nur bedingt. Da der Messwertaufnehmer fest montiert wird und dieser sich immer in der Strömung befinden muss, würde es durch die starken Schwankungen häufig zu Ausfällen der Messungen kommen.

4.1.2.1.3 Stroboskop- Verfahren

Bei diesem dem Doppler- Verfahren ähnlichem Verfahren wird die Zeit, die ein Partikel beim Durchlaufen einer bestimmten Wegstrecke in einem Schallkegel benötigt, gemessen. Dabei werden die Ultraschallimpulse in kurzer und schneller Folge ausgestrahlt. [25]

4.1.2.1.4 Driftverfahren

Beim Driftverfahren wird senkrecht zum Medium ein kontinuierliches Ultraschallsignal abgestrahlt und die Intensitätsverteilung durchs Medium entsprechend der Strömungsrichtung abgelenkt. Aus der relativen Intensitätsverteilung des Signals auf die gegenüberliegenden Empfänger kann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. [25]

4.1.2.1.5 Clamb-On-Durchflussmesser

Bei dieser Messanordnung werden die Sensoren außen am Rohr angebracht. Da dieses Verfahren jedoch nur bei feststofffreiem Wasser eingesetzt werden kann, wird dieses Verfahren in der Wasserwirtschaft kaum verwendet. [25]

4.1.2.1.6 Magnetische Induktion für teilgefüllte Querschnitte

Dieses Verfahren misst neben der Fließgeschwindigkeit auch die Füllhöhe im Rohr. Eine induzierte Spannung wird von mehreren Elektronenpaaren abgegriffen und die Fließgeschwindigkeit bestimmt. Durch Umschalten der Magnetfeldstruktur wird die Füllhöhe bestimmt. Die einzelnen Elektrodenpaare besitzen Kennlinien, die im Messumformer gespeichert werden und durch ein Korrekturverfahren ein durchflussproportionales Signal erzeugen. [4]

$$Q \approx U$$

$$Q = \text{Durchfluss} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$U = \text{Messspannung} [\text{V}]$$

Ein großer Nachteil dieses Verfahren ist, dass bei Füllhöhen unter 10% keine Messungen mehr stattfinden, weil in diesem Bereich die Elektrodenpaare nicht in der Lage sind, die Spannung abzugreifen.

4.1.2.1.7 Ultraschall- Mehrpfadverfahren

Auch dieses Verfahren wird zur Ermittlung der mittleren Fließgeschwindigkeit eingesetzt. Dabei werden neben den horizontalen Messpfaden auch vertikale Messpfade angeordnet. [4]

4.1.2.1.8 Messung der punktuellen Fließgeschwindigkeit

Bei der Punktmessung der Fließgeschwindigkeit wird die lokale Fließgeschwindigkeit entweder in einem Punkt, oder in einem definierten kleinen Flächensegment ermittelt. Entweder kann der Messwertempfänger fest montiert, beweglich zur Ermittlung der maximalen Fließgeschwindigkeit oder an mehreren Punkten zur Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils eingebaut werden. Zur Messung der punktuellen Fließgeschwindigkeit gibt es verschiedene Möglichkeiten. [4]

4.1.2.1.8.1 Punktmessung mittels Ultraschall- Doppler- Sensor

Bei Auftreffen eines Ultraschallstrahls auf ein im Feststoff befindliches Teilchen erfährt dieser eine Dopplerverschiebung Δf .

$$\Delta f = 2f * \frac{\cos \alpha}{c_o} * v_p \quad (4.11)$$

α = Einstrahlwinkel zwischen Ultraschallstrahl und Strömungsrichtung [°]

$$f = \text{Sendefrequenz} \left[\frac{\text{Hz}}{\text{mHz}} \right]$$

$$c_o = \text{Schallausbreitungsgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Diese Dopplerfrequenz ist ein Maß für die Partikelgeschwindigkeit v_p .

$$v_p = \frac{c_o * \Delta f}{2f * \cos \alpha} \quad (4.12)$$

Die digitale Auswertung der Dopplerfrequenz erfolgt über eine durch Überlappung der Schallstrahlen gebildete Messfläche, welche den auswertbaren Teil der Messung bildet. Diese ist von der Eindringtiefe des Schallstrahles im Wasser abhängig, welche von der Feststoffkonzentration im Wasser stark beeinflusst wird. Eine Kalibrierung ist vorzunehmen. Die Mess-Sonden sind entweder an der Sohle oder am Kanalumfang installiert. [4]

4.1.2.1.8.2 Punktmessung mittels magnetisch induktiven Messwertaufnehmern

Dieses Verfahren nutzt das Faradaysche Induktionsgesetz, welches besagt, dass ein Wasser, welches ein Magnetfeld durchströmt, eine Spannung induziert, die der lokalen Fließgeschwindigkeit in der Nähe des Sensors proportional ist. Durch bewegliche Punktmessung oder durch sohlgebundene Messung wird die Fließgeschwindigkeit ermittelt. Die hohe Messgenauigkeit, die bei der Durchflussmessung bei Vollfüllung erreicht wird, kann bei Teilfüllung nicht erreicht werden.

$$U_e = B * L * \bar{v} \quad (4.13)$$

U_e = Induktionsspannung

L = Länge des Leiters [m]

\bar{v} = Mittlere Fließgeschwindigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Da der Elektrodenabstand L und die magnetische Feldstärke B feste Werte sind, ist die induzierte Spannung der Fließgeschwindigkeit direkt proportional. [4]

4.1.2.1.8.3 Punktmessung mit Eintauchsonden nach dem magnetisch induktiven Verfahren

Auch dieses Messprinzip funktioniert nach dem in 4.1.2.1.8.2 beschriebenen Verfahren, wird hauptsächlich mobil eingesetzt und dient zur Kalibrierung von permanent installierten Geräten. [4]

4.1.2.1.8.4 Punktmessung mittels Messflügel

Bei diesem Verfahren wird die Fließgeschwindigkeit mit Hilfe eines sich in der Strömung drehenden Propellers gemessen. Dabei ist die Drehzahl der Fließgeschwindigkeit proportional.

$$v_l = k * \frac{n}{D} \quad (4.14)$$

k = Werkseitig ermittelter Proportionalitätsfaktor, der von den geometrischen Abmessungen des Flügels, der Lagerreibung, der Wirbelbildung und den Schaufeln abhängig ist. [4]

n = Anzahl der Umdrehungen

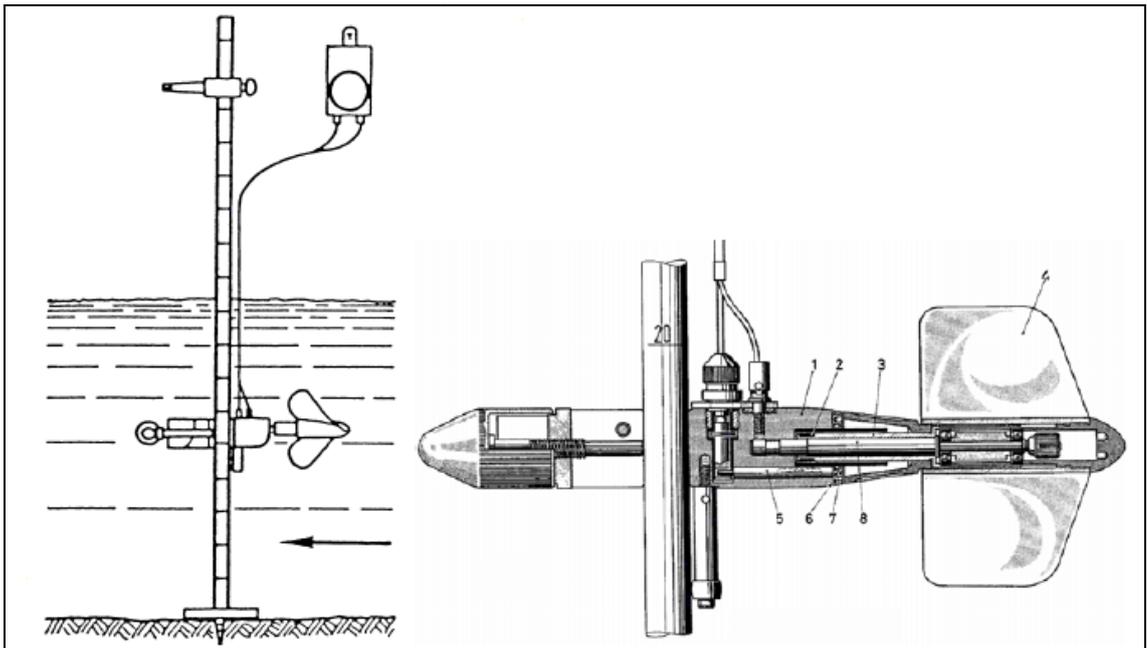


Abb. 10 Hydrometrischer Flügel (aus [8], 119)

4.1.2.1.8.5 Punktmessung mittels Staurohr

Dabei wird der Wirkdruck mittels eines Staurohrs gemessen. Diese Geräte sind relativ einfach aufgebaut und eignen sich zum Einsatz bei feststoffarmen Wässern bei Fließgeschwindigkeiten kleiner als 0,2 m/s. [4]

4.1.2.2 Wasserstandsmessung bei einem oder zwei Querschnitten

Bei diesem Verfahren geht man von einem Zusammenhang zwischen der Wassertiefe und der mittleren Fließgeschwindigkeit aus und berücksichtigt auch in das Messergebnis einfließende Größen wie die Wandrauigkeit und Strömungswiderstände. Ein kontinuierlicher und konstanter Abfluss wird vorausgesetzt.

Bei der Wasserstandsmessung in einem Messquerschnitt wird angenommen, dass die Wasserspiegellinie parallel zur Gerinnesohle verläuft und sich die Wassertiefe nicht ändert. Der Durchfluss wird mit einer der in 8.2.1.1 beschriebenen Formeln berechnet.

Bei der Wasserstandsmessung in zwei Messquerschnitten wird die Änderung des Wasserstandes in den beiden Messquerschnitten erfasst. [4]

4.1.2.2.1 Durchflussmessung mittels kombinierter Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Geschwindigkeitsmessung mit einer Höhenmessung kombiniert. Die Verfahren zur Ermittlung der Geschwindigkeit wurden in 4.1.2.1 beschrieben. Auf die Verfahren zur Bestimmung der Füllhöhe wird in 4.1.2.2.1 noch eingegangen. Bei Kenntnis der Füllhöhe h kann der durchflossene Querschnitt A ermittelt werden und das Produkt

$$Q = A * \bar{v} \quad (4.15)$$

gebildet werden.

$$Q = \text{Durchfluss} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$A = \text{Querschnittsfläche} \left[m^2 \right]$$

$$v = \text{Fließgeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Weiters unterscheidet man direkte Verfahren, bei denen es zu einer Berührung zwischen Wasser und Messkörper kommt, von indirekte oder berührungslose Verfahren. [4]

4.1.2.2.1.1 Schwimmer Verfahren: direktes Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Wasserstandshöhe von einem sich im Wasser befindlichen Schwimmkörper aufgenommen. Da der Schwimmkörper durch Fette oder Feststoffe beschädigt werden kann, wird dieses Verfahren heute kaum mehr eingesetzt. [4]

4.1.2.2.1.2 Echolotverfahren: indirektes Verfahren

Das Echolotverfahren, oder auch Ultraschallhöhenmessverfahren gehört zu den indirekte oder berührungslosen Verfahren. Dabei wird von einem Ultraschallsensor ein Ultraschallimpuls ausgesendet, welcher an der Wasseroberfläche reflektiert, und nach Umschalten des Sensors von Senden auf Empfangen die Laufzeit des Schalls t_s misst. Die Zeit, die der Sensor zum Umschalten von Senden auf Empfangen benötigt, wird als Totzone oder Blockdistanz bezeichnet, weil innerhalb dieser Zeit keine Messung erfolgen kann. Die Messstrecke L_s errechnet man aus der Laufzeitdifferenz Δt_s .

$$L_s = c_L * \Delta t_s = \frac{1}{2} * t_s * c_L \quad (4.16)$$

c_L =Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in der Luft. Bei 20°C beträgt c_L 343 m/s. Da sich c_L mit der Temperatur verändert (0,17%/ °C), muss die Lufttemperatur laufend vom Sensor gemessen und berücksichtigt werden.

Den Wasserstand errechnet man aus der Differenz zwischen den Abstand der Gerinnesohle und Sensor L und der Messstrecke L_s . [4]

$$h = L - L_s \quad (4.17)$$

Dieses Verfahren hat sich für permanente Durchflussmessungen weitgehend bewährt, und wird in der Wasserwirtschaft in vielen Bereichen eingesetzt. Es eignet sich überall dort, wo der Querschnitt des Gerinnes bekannt ist, und es eine eindeutige Beziehung zwischen Füllhöhe und Durchfluss (Pegelschlüssel) gibt.

4.1.2.2.1.3 Druckverfahren: indirekte Verfahren

Bei den Druckverfahren unterscheidet Erb hydrostatische Druckverfahren von Einperl-Verfahren.

- Hydrostatische Druckaufnehmer [4]

Bei diesem Verfahren wird aufgrund des statischen Druckes des Wassers eine sich an der Sohle befindende Membran verformt. Diese Verformung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Es wird der Differenzdruck zwischen atmosphärischem Druck und statischem Druck der Wassersäule gemessen.

- Einperl- Verfahren [4]

Dabei wird über ein sich auf Sohlniveau befindendes Rohr Luft oder ein anderes Gas eingebracht, so dass an der Tauchrohrmündung ständig Luftblasen aufsteigen. Der dabei im Tauchrohr entstehende Druck ist proportional der Höhendifferenz zwischen Wasseroberfläche und Tauchrohrunterkante.

Da beide Verfahren nur den statischen Druck messen, sind sie für Durchflussmessungen bei Abschnitten mit hohen Fließgeschwindigkeiten nicht geeignet.

4.1.2.2.1.4 Kapazitives Verfahren

Beim kapazitiven Verfahren wird die Kapazitätsänderung zwischen zwei sich im Wasser befindenden Elektroden gemessen und aus dieser die Fließhöhe ermittelt. Da sich an den Elektroden leicht Feststoffe oder Fette anlagern, ist dieses Verfahren nur für reine Wasser ohne Feststoffe geeignet. [4]

4.1.2.2.1.5 Radar- Verfahren

Dieses Verfahren funktioniert ähnlich wie das Ultraschallhöhenmessverfahren. Es werden Mikrowellen ausgesendet und die Laufzeit eines Mikrowellenimpulses zwischen Senden und Empfangen gemessen. Aus der Laufzeit t lässt sich über die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Laufweg l bestimmen. [4]

$$l = c * 0,5 * t \quad (4.18)$$

Da Mikrowellen von den Umgebungsbedingungen nahezu nicht beeinflusst werden, würde sich dieses Verfahren zwar zur Durchflussmessung eignen, wird aber aufgrund des großen Aufwandes und der hohen Kosten kaum eingesetzt.

4.2 Durchflussmessung in Druckleitungen

Bei der Durchflussmessung von Druckrohren wird nur die flächengemittelte Fließgeschwindigkeit ermittelt. Eine Höhenmessung ist aufgrund der Vollenfüllung nicht notwendig. Wie bereits in 4 erwähnt, ist bei den Rohrleitungen am Gschlieffgraben meistens

nicht mit Vollfüllung zu rechnen. Darum werden die Verfahren zur Durchflussmessung bei Druckrohren nur angeführt und nicht genau erklärt.

4.2.1 Messgeräte mit konstantem Querschnitt

- Ringkolbenzähler
- Taumelscheibenzähler
- Flügelradzähler

4.2.2 Messgeräte mit veränderlichem Querschnitt

- Düsen
- Blenden
- Venturirohre
- Prandtl Staurohre

4.2.3 Geschwindigkeitsmessung

- Magnetisch induktive Verfahren
- Ultraschall-Laufzeitverfahren
- Ultraschall-Dopplerverfahren
- Staurohre [4]

5 Beurteilung der Verfahren

5.1 Durchflussmessung bei Teilfüllung mit Strömungsumlenkung

Die zuvor beschriebenen Verfahren eignen sich zur Durchflussmessung bei künstlichen und natürlichen Gerinnen. Bei bereits bestehenden Entwässerungsröhren wäre es nur mit großem finanziellem Aufwand möglich, Messrinnen oder Messwehre zur Durchflussmessung zu errichten. Auch das steile und sehr schlecht zugängliche Gelände würden die Bauarbeiten erschweren. Zwar hätten Messrinnen sowie Überfälle den Vorteil, dass aufgrund des strömenden Zuflusses oberhalb des Wehres die Luftermischung, auf welches in 8.3.1 noch genauer eingegangen wird, kein Problem darstellen würde. Doch aufgrund der zuvor erwähnten Kosten, der technischen Probleme und der Tatsache, dass Rohre einen definierten Querschnitt haben und dadurch die Auffindung des Pegelschlüssels kein Problem darstellt, sind andere Verfahren für die Durchflussmessung bei Rohrleitungen besser geeignet.

In den Bereichen vor den Einmündungen zu den Rohrleitungen bzw. im Hangbereich, wo Tiefenwasser zu Tage tritt, wäre es jedoch denkbar, Messwehre zu bauen. Da vor den Einmündungen vor allem im Regenwetterfall große Wassermengen zu erwarten sind, wäre in diesen Bereichen die Errichtung von Rechtecks- oder Dreiecksüberfällen denkbar. Auch im Hangbereich, wo überwiegend mit kleinen Wassermengen zu rechnen ist, würde sich ein Dreiecksüberfall, der auch geringe Wassermengen genau messen kann, anbieten.

5.2 Durchflussmessung bei Teilfüllung ohne Strömungsumlenkung

- **Geschwindigkeitsmessung lokal:**

Bei allen in 4.1.2.1.8 beschriebenen Verfahren wird die Fließgeschwindigkeit in einem Punkt oder in einem begrenzten Querschnitt ermittelt. Um den Durchfluss zu erhalten, muss zuerst die mittlere Fließgeschwindigkeit und dann auch der Fließquerschnitt ermittelt werden. Da bei den Entwässerungsröhren am Gschlieffgraben beinahe immer mit Teilfüllung zu rechnen ist, muss mit einem Höhenmesser zusätzlich noch die Füllhöhe im Rohr

bestimmt werden. Ein weiteres Problem ist dass bei fester Montage die Messgeräte bei sehr niedrigen Füllhöhen ins Trockene fallen können und dadurch keine Messungen möglich wären. Daher werden diese Verfahren eher zur Kalibrierung von Durchflussmessgeräten im Betrieb und zur Durchflussmessung bei wenig schwankenden Wasserständen mit bekannten Geschwindigkeitsverteilungen eingesetzt.

- **Geschwindigkeitsmessung flächenhaft:**

Diese Verfahren sind für die Durchflussmessung am Gschlifegraben nur bedingt geeignet. Bei manchen Verfahren werden die Ausgangssignale durch sich im Wasser befindenden Feststoffen gestört, was zu ungenauen Messungen führt. Andere wiederum benötigen Feststoffe. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich die Messwertaufnehmer teilweise in der Strömung befinden, was zum einen den Querschnitt verringert und, zum anderen, bei niedrigen Füllhöhen die Messwertaufnehmer ins trockene Fallen können. Weiters sind die Verfahren zur Ermittlung der flächigen Fließgeschwindigkeit gegenüber anderen Verfahren relativ teuer.

- **Wasserstandsmessung**

Bei diesen Verfahren werden die Füllhöhen an einem bekannten Querschnitt gemessen und der Durchfluss mittels Pegelschlüssel ermittelt. Dazu müssen Gefälle und Rauigkeit bekannt sein. Weiters darf sich die Querschnittsfläche nicht verändern (Änderung des Pegelschlüssels). Die Vorteile dieser Verfahren sind, dass sie von Feststoffen in der Flüssigkeit nicht gestört werden, leicht einzubauen sind, gegenüber den anderen Verfahren relativ kostengünstig sind und sich diese Verfahren in der Wasser und Abwasserwirtschaft bereits bewehrt haben.

6 Gesamtsystem

Wie bereits zuvor erwähnt, befasst sich diese Arbeit mit der Errichtung eines Monitoringsystems für die hydrologischen Verhältnisse am Gschlifegraben. Dabei will man durch die Anordnung mehrerer Messstationen zum einen durch langfristige Beobachtungen Kenntnisse über die Hydrologie des Hanges erhalten und zum anderen die ständige Funktionsfähigkeit der Entwässerung kontrollieren. So soll man bereits frühzeitig in der Lage sein, mögliche Probleme, die in der unmittelbaren Zukunft auftreten können, zu erkennen und eventuell Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dazu werden in der Folge einige Beispiele für mögliche schadbringende Szenarien gegeben, die man jedoch aufgrund der Anordnung der Messstationen frühzeitig erkennen sollte.

- Ein defektes Dränsystem: Ein defektes Dränsystem kann aufgrund des konzentrierten Wasserverlustes an einer Stelle eine höhere Rutschwahrscheinlichkeit bewirken als gar kein Dränsystem und ist oft die Ursache für Rutschungen.

Durch laufende Messung des Abflusses aus dem Dränsystem und Vergleich dieser Daten mit den gemessenen Niederschlagsdaten sollte man in der Lage sein bei gewissen Regenereignissen den Abfluss abzuschätzen. Falls die erwartete Menge nicht gemessen wird, deutet dies auf ein defektes Dränsystem hin.

- Ein defektes Rohrleitungssystem: Bei einem defekten Rohrleitungssystem können große Wassermengen an einer Stelle austreten. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass Wasser in den Untergrund versickert, was wiederum die Rutschgefahr erhöht.

Nach längerer Beobachtung und Messung des Durchflusses kann man bei gewissen Niederschlägen gewisse Abflüsse erwarten. Wird dieser erwartete Wert nicht erreicht,

kann auf ein defektes Rohrleitungssystem geschlossen werden. Weiters kann ein zu geringer Durchfluss eine Verklauung/ Verstopfung bei der Einmündung in die Rohrleitungen bedeuten.

Ein defektes Rohrleitungssystem kann auch erkannt werden, indem man bei jeder Rohrleitung mindestens zwei Messstationen plaziert und an der darunterliegenden Messstation ein geringerer Durchfluss gemessen wird als bei der Messstation zuvor.

- Durch die bereits im November 2008 eingebaute Probestation am Gschlifgraben konnte man die Eignung des Messverfahrens bei sehr tiefen Temperaturen erproben. Man erkannte, dass durch die Kälte und das Anwachsen der Eisschicht stets zu hohe Füllhöhen gemessen wurden.
- Versickerung des Wassers: Durch Messung der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen und unterschiedlichen Stellen kann auf das Vordringen der Feuchtefront bzw. auf die Versickerung des Wassers in den Boden geschlossen werden. Wird festgestellt, dass kaum Wasser versickert, verringert sich das Problem bei der Ableitung von Regenwasser aus dem Hangbereich.
- Problem bei Starkniederschlägen: Bei Auftreten von Starkniederschlägen kann möglicherweise nicht das ganze Wasser in den Rohrleitungen abgeführt werden (Zuschlagen der Rohrleitungen) und Wasser gelangt in den Hangbereich. Durch die Errichtung eines Rückhaltebeckens könnten Wassermengen zurückgehalten und zeitversetzt abgeführt werden. Die Errichtung von Rückhaltebecken bei einem Rutschhang ist jedoch aufgrund der bautechnischen Schwierigkeiten nur sehr schwer zu realisieren.

Die zuvor aufgezählten Punkte, bzw. auch viele andere möglicherweise auch unerwartet auftretende Probleme können, müssen aber nicht auftreten. Wichtig wird jedoch sein, dass man bei allen unerwarteten bzw. von den Durchschnittswerten abweichenden Messwerten sich überlegt, was die Gründe für die Abweichungen sein können und möglicherweise die betroffenen Abschnitte vor Ort besichtigt.

6.1 Beschreibung der vorgesehenen Maßnahmen zur Erfassung der hydrologischen Verhältnisse

Wie bereits zuvor erwähnt, ist zur Erfassung der hydrologischen Verhältnisse und zur Kontrolle der Entwässerung die Errichtung von verschiedenen Messstationen geplant. Dazu sollen zum einen Durchflussmessstationen und zum anderen eine Bodenfeuchtemessstation eingebaut werden. Bei den Rohrleitungen sollen an verschiedenen Stellen Ultraschallsensoren eingebaut werden. Weiters sollen im Hangbereich mehrere Dreieckswehre, welche die geringen Durchflüsse aus den Dränsystemen erfassen, errichtet werden. Auch bei der Quellfassung im oberen Bereich ist die Errichtung eines Dreieckswehres geplant, welches aufgrund der größeren Durchflüsse andere Abmessungen bzw. einen anderen Öffnungswinkel aufweisen muss. Zusätzlich soll in offenen Ableitungsgräben an zwei Stellen mit bekannter Querschnittsfläche der Durchfluss mittels Pegelschlüssel berechnet werden. Dies setzt die genaue Kenntnis der Querschnittsfläche, die sich auch bei großen Abflüssen nicht ändern darf, voraus. Um die Verhältnisse im Oberboden zu erfassen, soll an einem Standort eine Bodenfeuchtemessstation mit Sensoren in unterschiedlichen Tiefen eingebaut werden.

In der folgenden Abbildung ist eine Möglichkeit zur Anordnung von Messstationen schematisch dargestellt.

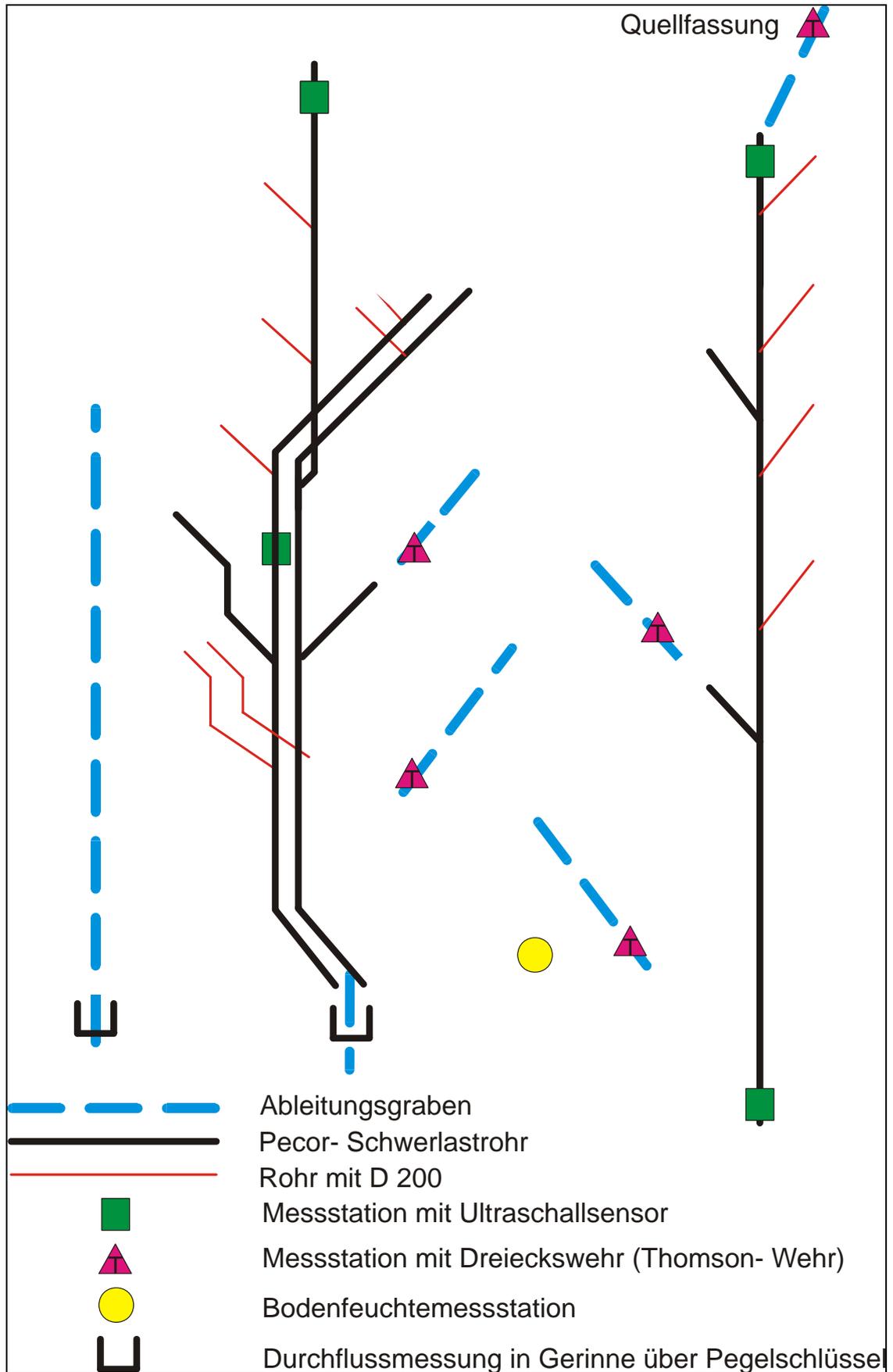


Abb. 11 Darstellung einer möglichen Anordnung von Messtationen am Gschlieflgraben

7 Beschreibung des Rohrleitungssystems

Die Rohrleitungen am Gschlifgraben bestehen aus Pecor-Rohren mit einem Innendurchmesser von 500 mm. Diese doppelwandigen Rohre sind Schwerlastrohre aus PEHD (Polyethylen High Density), haben eine glatte Innenseite und einen außenliegenden spiralförmigen Steg. Dadurch wird die hohe Ringsteifigkeit von ca. 10 kPa gewährleistet.



Abb. 12 Einmündung eines Pecor- Schwerlastrohres aus PEHD in den Traunsee

Das verzweigte Rohrleitungssystem selbst besteht aus zwei nebeneinander verlaufenden nördlichen Strängen und einem südlichen Strang. Die beiden nördlichen Stränge verlaufen bis etwa km 1,115 (gemessen von der Einmündung der Rohre in ein künstliches Gerinne, welches dann in den Traunsee entwässert) nebeneinander und teilen sich dann in einen Strang, der im Rutschbereich mittels Drainagen Tiefenwasser fasst (Rohr Nord 2), und einen anderen Strang, der am oberen Ende der Rohrleitungen Oberflächenwasser sammelt (Rohr Nord 1). An dieser Stelle teilt sich auch Rohr Nord 1 und verläuft bis zur Stelle, wo von Rohr Nord 2 Tiefenwasser gesammelt werden, parallel zu diesem Strang. Rohr 1 mündet ebenso wie Rohr Nord 2 bei einer Seehöhe von ca. 441 m in ein Gerinne, welches später in den Traunsee entwässert. Beide Rohre haben ein durchschnittliches Gefälle von etwa 13%, wobei das Gefälle zum Teil stark wechselt. Das Rohr Süd entwässert auf einer Seehöhe von etwa 493 m in den Traunsee. Auch dieser Strang fasst zum Teil Drainagen- oder Tiefenwasser und aus den seitlichen Zuläufen stammende Oberflächenwässer. Die seitlichen Zuläufe haben entweder wie die Hauptstränge einen Innendurchmesser von 500 mm oder bestehen aus Rohren mit geringerem Durchmesser. In folgender Abbildung ist jene Stelle, an der sich die nördlichen Stränge verzweigen, dargestellt.

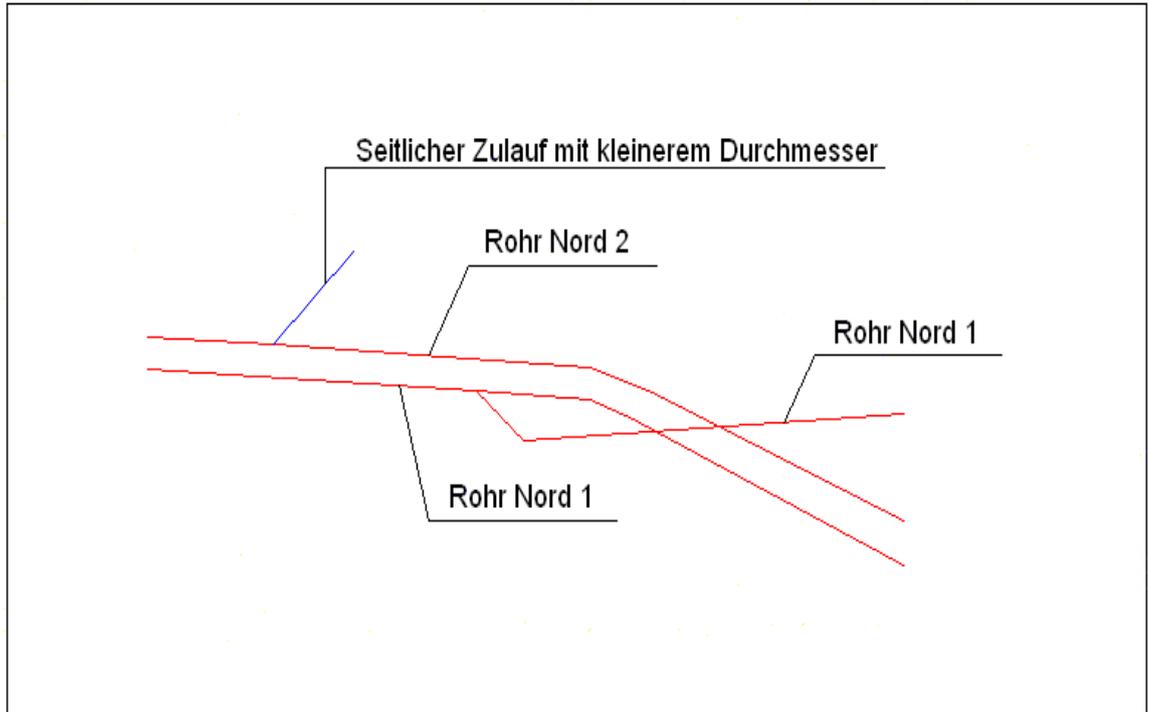


Abb. 13 Verzweigung der beiden nördlichen Stränge

Im unteren Bereich verlaufen die Rohre unter der Erde und sind nur durch Schächte, die in regelmäßigen Abständen aus der Erde ragen, zu erkennen. Deshalb ist in diesem Bereich die genaue Bestimmung des Gefälles relativ schwierig. Die beiden nördlichen Stränge verlaufen annähernd parallel zu einem Begleitweg. Der südliche Strang verläuft im unteren Bereich beinahe vollständig im Wald. Im oberen Bereich verlaufen die Rohre ausschließlich über der Oberfläche.

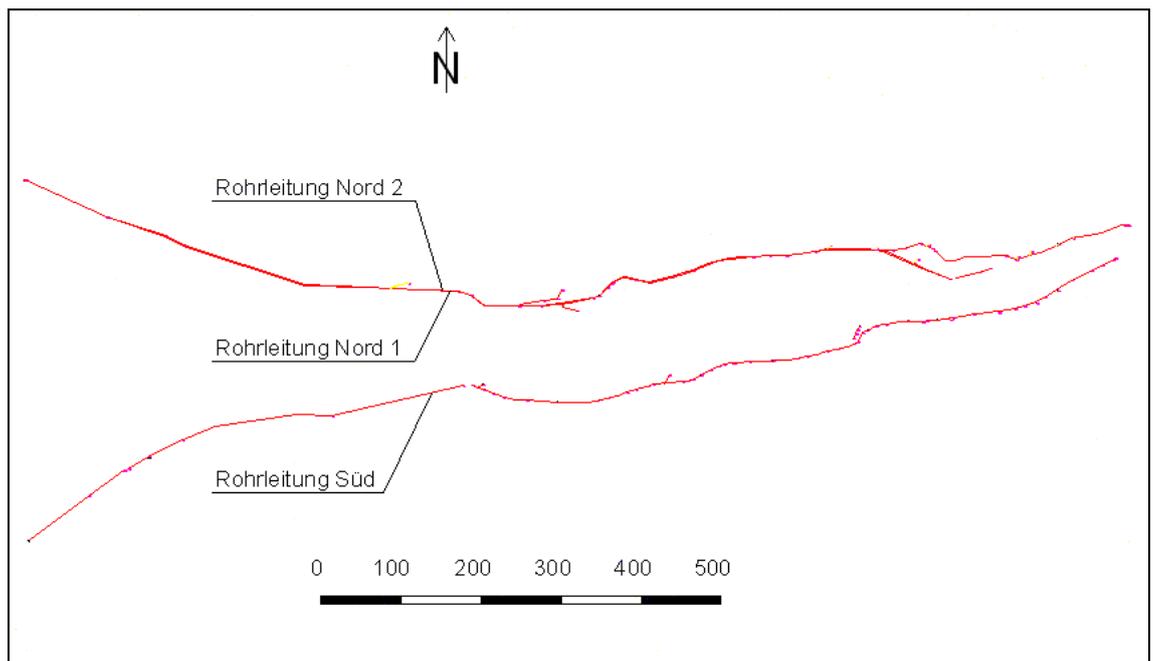


Abb. 14 Überblick über das Rohrleitungssystem am Gschlifgraben

8 Ultraschallhöhenmess- Verfahren

Da das Ultraschallhöhenmessverfahren ein relativ günstiges Verfahren ist, es keine zusätzlichen Flächen für z. B. Beruhigungsstrecken benötigt, keine anderen baulichen Maßnahmen erforderlich sind, Feststoffe die Messung nicht stören und bei Rohren der Fließquerschnitt bekannt ist hat man sich bei den Rohrleitungen für die Durchflussmessung mittels Ultraschallhöhenmesssensoren entschieden. Dabei wird wie bereits in 4.1.2.2.1.2 beschrieben die Füllhöhe im Rohr gemessen, und über einen Pegelschlüssel der Durchfluss berechnet. Auch bei diesem Verfahren gibt es zahlreiche Probleme, auf die in der Folge noch ausführlich eingegangen wird. Aufgrund der niedrigen Kosten, der problemlosen Kalibrierung und vieler anderer Vorteile hat man sich für dieses Verfahren entschieden.

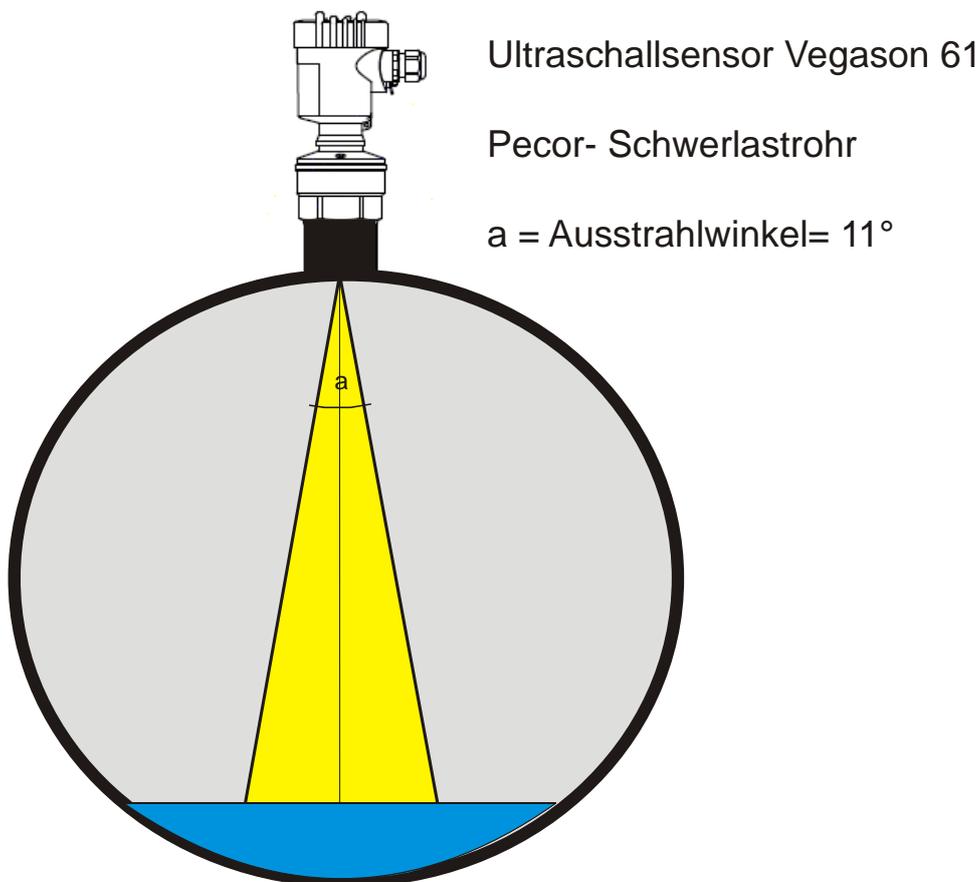


Abb. 15 Durchflussmessung mittels Höhenmessverfahren

8.1 Beschreibung der Ultraschallhöhenmess- Sensoren

Auch bei den Ultraschallhöhenmess-Sensoren gibt es verschiedene Typen, die unterschiedlich teuer sind und sich für unterschiedliche Betriebsbedingungen eignen. In der Folge werden die vom Institut für alpine Naturgefahren verwendeten Sensoren, welche in einem Rohr mit 500 mm Durchmesser im Labor eingebaut wurden gezeigt und beschrieben. Die Daten der Beschreibungen stammen aus den jeweiligen Produktbeschreibungen der beiden Ultraschallsensoren. [27], [28]



Abb. 16 Ultraschallsensoren eingebaut in einem Rohr mit 500mm Durchmesser

8.1.1 Vegason 61



Abb. 17 Ultraschallsensor Vegason 61 [28]

8.1.1.1 Produktbeschreibung

- **Komponenten:** Der Vegason 61 besteht aus einem Schallwandler mit integriertem Temperaturfühler, dem Gehäuse mit Elektronik und einem Gehäusedeckel mit Anzeige und Bedienmodul.
- **Einsatzbereich:** Dieser Ultraschallsensor eignet sich zur kontinuierlichen Füllstandmessung und wird vor allem in der Wasser und Abwasserwirtschaft eingesetzt.
- **Funktionsprinzip:** Von einem Schallwandler werden kurze Ultraschallimpulse auf das zu messende Medium ausgesendet, welche an der Füllgutoberfläche reflektieren und vom

Schallwandler wieder als Echos empfangen werden. Die Laufzeit des Schalls zwischen Aussenden und Empfangen ist der Füllhöhe proportional. Die ermittelte Füllhöhe wird in ein Ausgangssignal umgewandelt und als Messwert ausgegeben.

8.1.1.2 Montagehinweise

- Medienberührende Teile: Es muss sichergestellt werden, dass alle Teile für die jeweiligen Einsatzbedingungen wie Druck, Temperatur oder chemische Eigenschaften der Medien geeignet sind
- Sensorausrichtung: Um optimale Messergebnisse zu erhalten, sollte der Sensor immer senkrecht auf die Füllgutoberfläche ausgerichtet sein.
- Behältereinbauten: Einbauten dürfen die Ultraschallsignale nicht kreuzen.
- Der Messbereich bei Flüssigkeiten beträgt bis zu 5m. Die Bezugsebene für den Messbereich ist die Unterseite des Schallwandlers. Zwischen Bezugsebene und Flüssigkeitsoberfläche ist ein Mindestabstand, der sogenannte Totbereich, einzuhalten. Dieser beträgt bei diesem Modell 0,25 m und resultiert aus der Zeit die der Schallwandler benötigt, um von Aussenden auf Empfangen zu schalten.

8.1.1.3 Messcharakteristiken und Messgenauigkeit

- Ultraschallfrequenz: 70 kHz
- Messintervall: $\geq 2s$
- Abstrahlwinkel: 11° Aufgrund des Abstrahlwinkels trifft der Strahl am Rand zuerst auf das Rohr. Dadurch ergibt sich in Kreisrohren bei niedrigen Füllhöhen ein nicht messbarer Bereich.

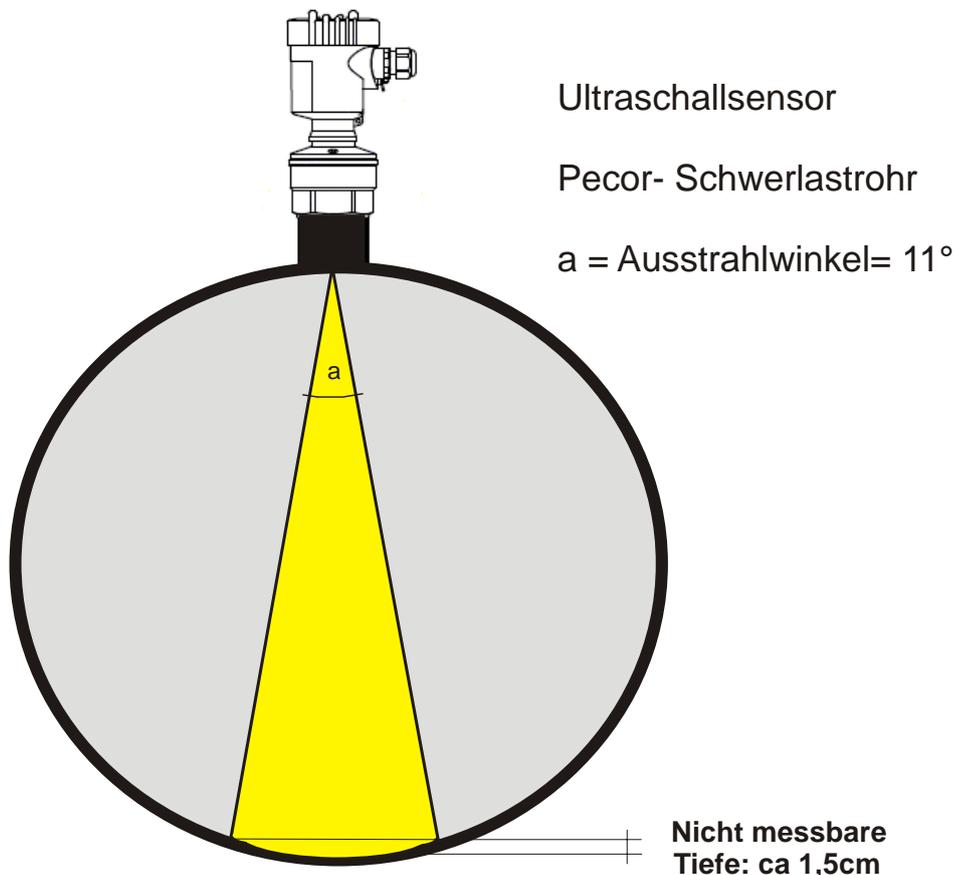


Abb. 18. Nicht erfassbare Füllhöhe

- Sprungantwort oder Einstellzeit: $\geq 3s$
- Messauflösung: max. 1mm

8.1.2 Ultraschall- Sensor UC500-30GM-IUR2-V15



Abb. 19 Ultraschallsensor UC500-30GM-IUR2-V15 [27]

8.1.2.1 Produktbeschreibung

- Einsatzbereich: Auch der UC500-30GM-IUR2-V15 eignet sich zur kontinuierlichen Füllstandmessung.
- Funktionsprinzip: Das Funktionsprinzip unterscheidet sich vom in 8.1.1.1 beschriebenen Vegason 61 kaum.

8.1.2.2 Montagehinweise

- Sensorausrichtung: Der Ultraschallsensor ist senkrecht auf die Füllgutoberfläche auszurichten.
- Für Einbauten und medienberührende Teile gilt dasselbe wie zuvor in 8.1.1.2 beschrieben.
- Messbereich: Im Gegensatz zum Vegason 61 verträgt der UC500-30GM-IUR2-V15 keinen Einstau.

8.1.2.3 Allgemeine Daten

- Erfassungsbereich: 30 – 500mm
- Einstellbereich: 50 – 500mm
- Blindbereich: 0 – 30 mm
- Wandlerfrequenz: ca. 380 kHz
- Umgebungstemperatur: -25 – 70°C

8.2 Ermittlung des Pegelschlüssels (Schlüsselkurve)

Wie bereits zuvor erwähnt, muss man zur Ermittlung des Durchflusses mittels Ultraschallhöhenmess-Verfahren eine Beziehung zwischen Wasserstand im Rohr und Durchfluss, den sogenannten Pegelschlüssel oder die Schlüsselkurve, berechnen. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Entweder man ermittelt mit Hilfe von Fließformeln die Geschwindigkeit und berechnet das Produkt aus Querschnittsfläche und Geschwindigkeit, oder man behilft sich mit den Formeln der Rohrhydraulik.

8.2.1 Berechnung des Pegelschlüssels mittels Fließformeln

Aus der Gerinnehydraulik sind verschiedene Fließformeln bekannt. Nach [2] gehen die Herleitungen der Fließformeln von stationär gleichförmigen Abflussbedingungen aus, das heißt, dass die Fließflächen zweier hintereinander gelegenen Querschnitten von gleicher Form und Beschaffenheit sind und das Sohlgefälle I_0 , Wasserspiegelgefälle I_w und Energieliniengefälle I_E als gleich vorausgesetzt werden.

8.2.1.1 Die wichtigsten Fließformeln [13], [2]

- Fließformel von Brahms- de Chezy

$$v = \sqrt{\frac{8 * g}{\lambda}} * \sqrt{\frac{A * h_v}{U * l}} = C * \sqrt{R * I} \quad (8.1)$$

λ = Rohrreibungsbeiwert

l = Länge [m]

A = Querschnittsfläche [m²]

C = Geschwindigkeitsbeiwert

U = Benetzter Umfang [m]

$R = \frac{A}{U}$ = Hydraulischer Radius [m]

h_v = Verlusthöhe [m]

I = Energieliniengefälle [%]

- Fließformel von Hazen- Williams

$$v = C' * (R * I)^{0,54} \quad (8.2)$$

- Fließformel von Gaukler- Manning- Strickler

$$v = k_{st} * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad (8.3)$$

k_{st} = Manning Strickler Beiwert $\left[\frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} \right]$

I = Gefälle [%]

$$R = \frac{A}{U} = \frac{\text{Fläche}}{\text{BenetzterUmfang}} = \text{Hydraulischer Radius [m]}$$

- Universelle Fließformel

$$v = -4,0 * \lg \left(\frac{f_g * v}{8 * r_{hy} * \sqrt{2 * g * r_{hy} * I}} + \frac{\frac{k}{r_{hy}}}{4 * f_r} \right) * \sqrt{2 * g * r_{hy} * I} \quad (8.4)$$

k = Absolute Rauigkeit [mm]

r_{hy} = Hydraulischer Durchmesser [m]

f_r, f_g, C_r = Formbeiwerte nach Leske für offene Gerinne

g = Erdbeschleunigung $\left[9,81 \frac{m}{s^2} \right]$

Nach Einsetzen für $\frac{k}{r_{hy}} \geq 10^{-4}$ kann der erste Summand im Argument des Logarithmus vernachlässigt werden. Somit wird:

$$v = 4 * \lg \left(\frac{4 * f_r}{\frac{k}{r_{hy}}} \right) * \sqrt{2 * g * r_{hy} * I} \quad (8.5)$$

Gerinneform	f_g	f_r	C_r
Rechteck b=h	2,80	3,45	20,19
Rechteck b=2h	2,90	3,30	19,85
Rechteck b= ∞	3,05	3,05	19,24
Rechteck Mittelwert	3,20	3,20	19,61
Halbkreis $h = \frac{d}{2}$	3,60	3,60	20,52
Trapez Mittelwert	3,16	3,16	19,52
Kreisrohr	3,71	3,71	20,75

Tabelle 3 Formbeiwerte für offene Gerinne nach Leske (aus [2], 252)

Berechnungen mit der Universellen Fließformel sind deutlich aufwendiger als zum Beispiel mit der Manning- Formel. Trotzdem wird sie heutzutage häufig angewendet.

8.2.1.2 Berechnung des Pegelschlüssels mit der Formel von Gaukler-Manning-Strickler

Berechnung:

- Bekannt: k_{st} wurde werksseitig ermittelt

I kann bei jeder Messstation gemessen werden

h ist bekannt, da man für jede Füllhöhe den Durchfluss Q berechnet

$$d = 0,5\text{m}$$

- Unbekannt: $R = \frac{A}{U} = \frac{d}{4}$ bei jeder Füllhöhe ändert sich R

- Berechnung:

$$v = k_{st} * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad (8.6)$$

$$Q = A * k_{st} * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad (8.7)$$

$$Q = A * \left(\frac{A}{U}\right)^{\frac{2}{3}} * k_{st} * I^{\frac{1}{2}} \quad (8.8)$$

Die Berechnung erfolgt über den Winkel α :

$$A = \frac{r^2 * \pi}{360} * \alpha \quad (8.9)$$

$$U = \frac{2 * r * \pi}{360} * \alpha \quad (8.10)$$

$$R = \frac{r}{2} = \frac{d}{4} \quad (8.11)$$

$$h = \frac{d \cdot \sin \alpha}{4} \quad (8.12)$$

Berechnung im Excel:

α	s [m]	H [m]	P [m]	A [m ²]	Rh [m]	V [m/s]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /s]	Q [l/s]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,000
5	0,0218	0,0002	0,0218	0,0000	0,0002	0,09	0,0000	0,0000	0,000
10	0,0436	0,0010	0,0436	0,0000	0,0006	0,23	0,0000	0,0000	0,006
15	0,0653	0,0021	0,0654	0,0001	0,0014	0,40	0,0000	0,0000	0,037
20	0,0868	0,0038	0,0873	0,0002	0,0025	0,58	0,0001	0,0001	0,128
25	0,1082	0,0059	0,1091	0,0004	0,0039	0,78	0,0003	0,0003	0,334

Tabelle 4. Ausschnitt aus Excel Berechnung zur Bestimmung des Pegelschlüssels

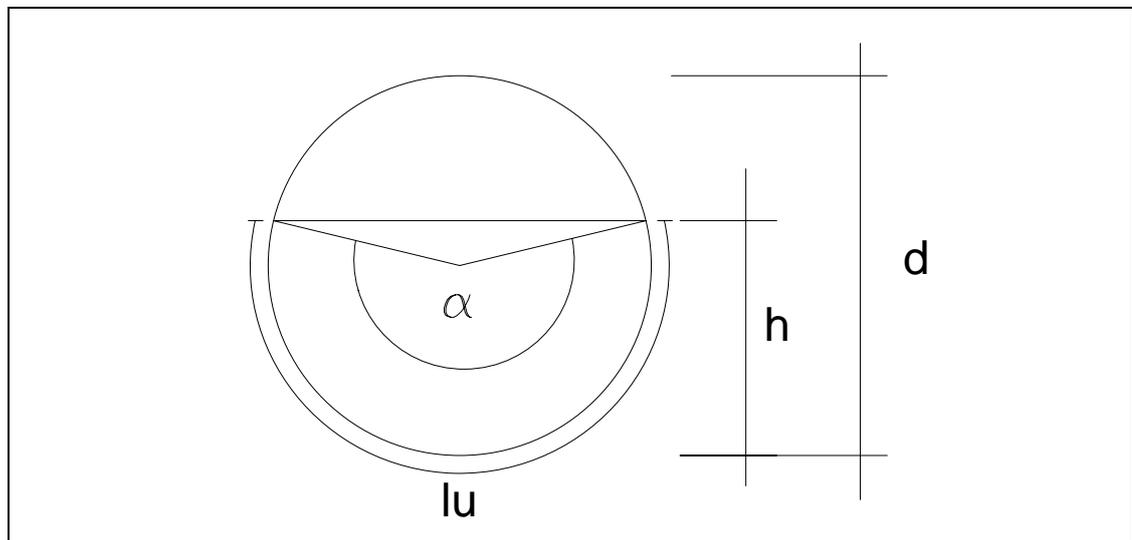


Abb. 20. Teilgefülltes Kreisrohr, Bezeichnungen

Nach Berechnung aller Winkel bis zur Vollfüllung ($\alpha = 360$) erhält man eine Tabelle, in der für jede Füllhöhe h der Durchfluss Q bekannt ist. Die Form der Kurve ist abhängig vom Gefälle sowie von der Rauigkeit.

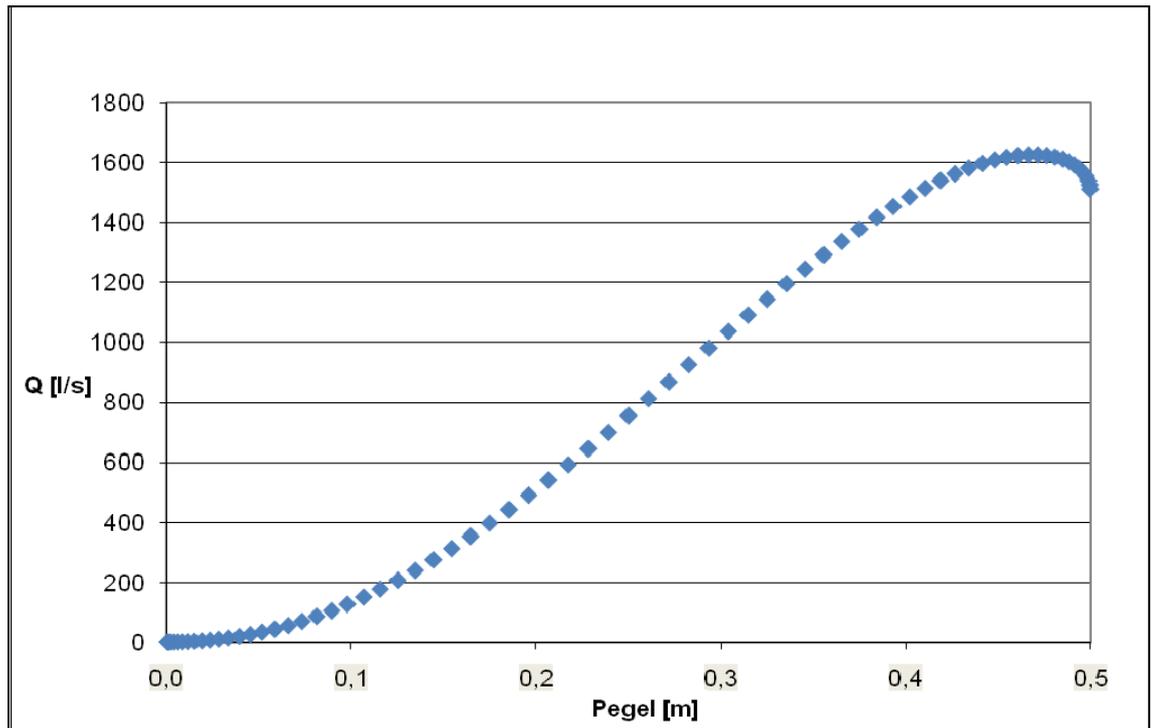


Abb. 21. Durchflüsse abhängig von der Füllhöhe im Rohr

Zur Ermittlung des Pegelschlüssels passt man eine Trendlinie der Form Polynom der zum Beispiel 3. bis 6. Ordnung an die im Diagramm dargestellten Punkte an. Je höher die Ordnung des Polynoms ist, desto genauer kann die Trendlinie an die Punkte im oberen und unteren Bereich angepasst werden.

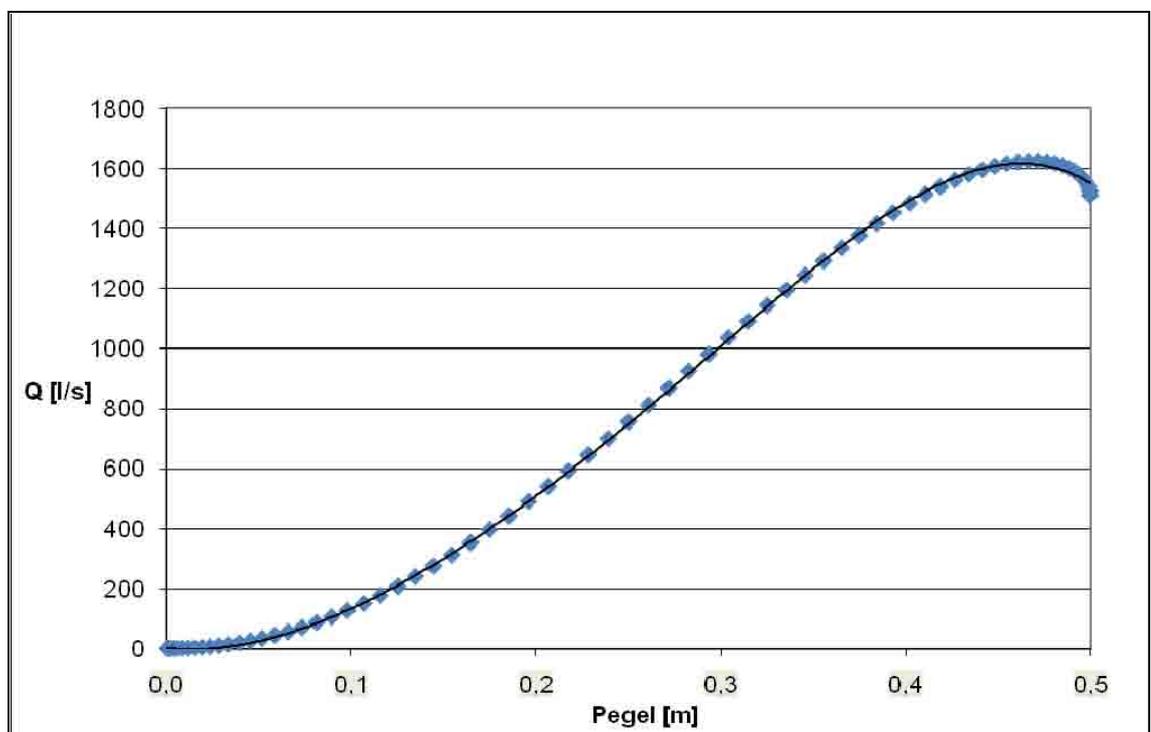


Abb. 22. Trendgerade mit Pegelschlüssel (als Polynom 5 Ordnung)

Durch Angeben der Formel dieser Trendlinie erhält man die Formel der Schlüsselkurve/ des Pegelschlüssels:

$$Q = 1000000 * h^5 - 71782 * h^4 + 153049 * h^3 - 767,39 * h^2 + 451,75 * h - 2,6596$$

Auch bei der Bestimmung des Pegelschlüssels mit einer anderen Fließformel geht man gleich vor. Man errechnet die Geschwindigkeit und bildet für jede Füllhöhe das Produkt aus Geschwindigkeit und Querschnittsfläche.

8.2.2 Ermittlung des Pegelschlüssels/ Schlüsselkurve mit den Gleichungen der Rohrhydraulik

8.2.2.1 Verwendete Formeln

- Kontinuitätsgesetz

$$Q = v * \frac{d^2 * \pi}{4} \quad (8.13)$$

$$Q = \text{Durchfluss} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$v = \text{Fließgeschwindigkeit} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$d = \text{Durchmesser} [m]$$

- Reynolds- Zahl R_e

$$R_e = v * \frac{d}{\nu} \quad (8.14)$$

$$v = \text{Mittlere Fließgeschwindigkeit} \left(\frac{m}{s} \right)$$

$$\nu = \text{kinematische Viskosität} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

- Energieverlustgleichung

$$h_v = \frac{\lambda * L * v^2}{2 * d * g} \quad (8.15)$$

$$h_v = \text{Verlusthöhe} (m)$$

$$\lambda = \text{Rohrreibungsbeiwert}$$

L = Leitungslänge (m)

- Energieliniengefälle

$$I = \frac{h_v}{L} \quad (8.16)$$

Wenn $\lambda \leq \lambda_{krit} = 2320$ dann wird der Rohrreibungsbeiwert λ für laminare Strömung berechnet.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (8.17)$$

Wenn $\lambda \geq \lambda_{krit}$ (Turbulenter Fall) wird λ mit der Formel von Prandtl Colebrook ermittelt, wobei es unterschiedliche Formeln für den glatten Bereich, den Übergangsbereich und den rauen Bereich gibt.

- Glatter Bereich (Nach Blasius)

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (8.18)$$

- Übergangsbereich (Nach Colebrook)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log \left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 * d} \right) \quad (8.19)$$

k = absolute Rauigkeit (mm)

d = Durchmesser (m)

- Rauer Bereich (Nach Colebrook)

$$\lambda = 2 * \log^* \left(\frac{3,71 * d}{k} \right) = 1,14 - 2 * \log^* \left(\frac{k}{d} \right) \quad (8.20)$$

Die Grenze zwischen hydraulisch rauem und Übergangsbereich wird durch den Moody-Wert 200 charakterisiert. Bei Werten < 200 befinden man sich im Übergangsbereich, bei Werten über 200 im rauen Bereich.

Für die Berechnung des Pegelschlüssels wird zuerst mit Hilfe von Grundfall 4 der Durchfluss bei der drucklosen Vollfüllung berechnet und mit folgender Formel die Teilfüllung für alle Füllhöhen ermittelt.

$$Q_T = Q_V * \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \sqrt{\frac{h}{d}} - \left(1 - 2 * \frac{h}{d} \right) * \sqrt{\frac{h}{d} * \left(1 - \frac{h}{d} \right)} \right]^{\frac{13}{8}} * \left[\arcsin \sqrt{\frac{h}{d}} \right]^{\frac{-5}{8}} \quad (8.21)$$

$$Q_v = \text{Durchfluss bei Vollfüllung} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$Q_T = \text{Durchfluss bei Teilfüllung} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

8.2.2.2 Rohrleitungsberechnung

Zur Ermittlung der Vollfüllung bedient man sich in der Rohrhydraulik mit einen der in [14] beschriebenen 6 Grundfällen. Die Fälle 1 bis 3 können direkt berechnet werden, die Fälle 4 bis 6 müssen iterativ gelöst werden.

Für den speziellen Fall am Gschlieffgraben bedient man sich Grundfall 4.

- Bekannt: d, l
- Unbekannt: Q, v

Da der hydraulische Bereich nicht bekannt ist, können weder Q , noch v oder λ direkt berechnet werden- d.h. man muss iterativ vorgehen. Folgende Schleife wird empfohlen:

$$v_i \rightarrow R_{ei} \rightarrow \lambda_i \rightarrow I_{ri} \text{ bzw. } h_{vi} \rightarrow v_{i+1}$$

Diese Schleife ist so oft zu wiederholen, bis h_{vi} hinreichend mit h_v übereinstimmt.

Um dann den Pegelschlüssel zu erhalten, geht man wie in 8.2.1.2 beschrieben, vor. Man berechnet für jede Füllhöhe den Durchfluss und zeichnet ein Punktdiagramm. Nach Anpassen einer Trendlinie an die Punkte und anzeigen der Formel erhält man den Pegelschlüssel.

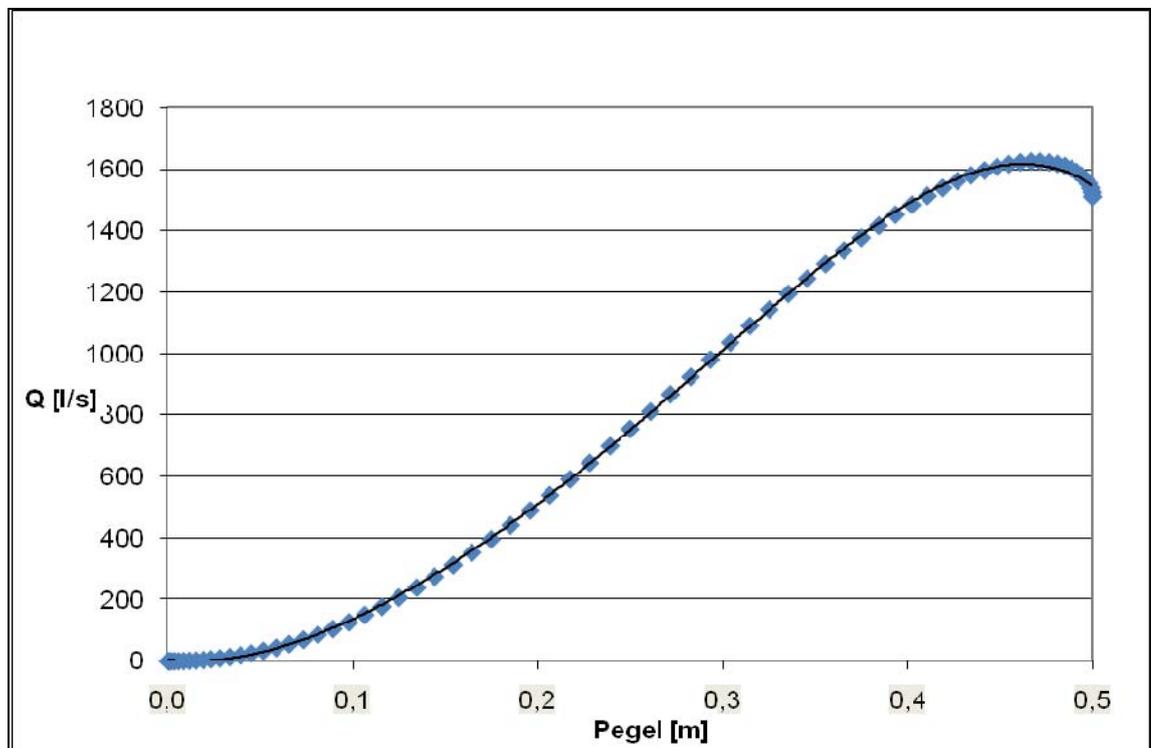


Abb. 23 Pegelschlüssel berechnet mit Formeln der Rohrhydraulik

Die Formel des Pegelschlüssels lautet:

$$Q = 1000000 * h^5 - 558112 * h^4 + 108633 * h^3 + 5192,2 * h^2 - 234,49 * h$$

8.2.3 Vergleich der Verfahren

Beim Vergleich der Verfahren zur Ermittlung des Pegelschlüssels mittels Formeln der Rohrhydraulik und den Verfahren mit Fließformeln kommt man bei richtiger Abschätzung der absoluten Rauigkeit k bzw. des Stricklerbeiwertes k_s zu annähernd gleichen Ergebnissen. Für die genauere Berechnung von Durchflüssen in Rohrleitungen werden jedoch die in 8.2.2 beschriebenen Formeln empfohlen, da man verschiedene Einflussgrößen berücksichtigen kann und bei Rohrleitungen die Rauigkeit zumeist als absolute (äquivalente) Rauigkeit angegeben wird. Es ist auch möglich eine Beziehung zwischen der absoluten Rauigkeit und dem Strickler-Beiwert herzustellen:

$$k_{st} = \frac{26}{\frac{1}{k^6}} \quad (8.22)$$

k =absolute Rauigkeit (mm)

k_{st} =Manning-Strickler-Beiwert $\left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} \right)$

8.2.4 Einfluss der Neigung auf den Pegelschlüssel

Im folgenden Diagramm ist der Einfluss der Neigung auf den Pegelschlüssel dargestellt. Die rote Linie zeigt die Form der Schlüsselkurve bei einer Neigung der Rohrleitung von 6° , die blaue Linie die Form der Schlüsselkurve bei 10° .

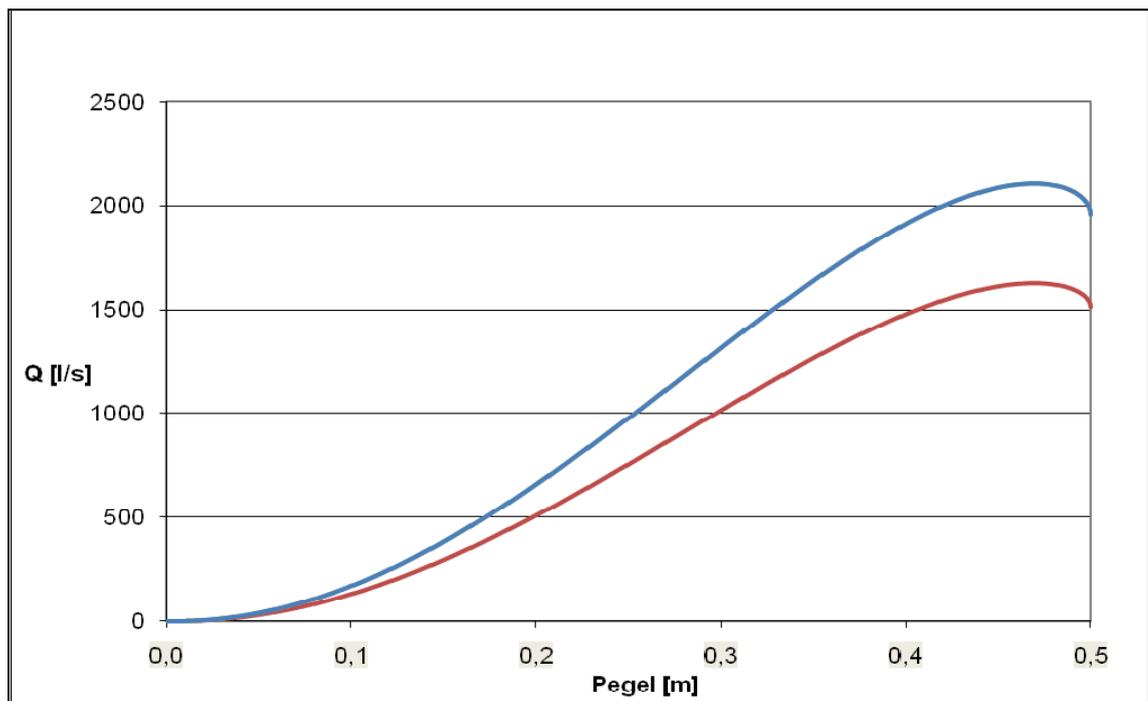


Abb. 24 Einfluss der Neigung der Rohrleitung auf den Pegelschlüssel

8.3 Probleme bei der Durchflussmessung mittels Ultraschallsensoren

Das Verfahren zur Durchflussmessung mittels Ultraschallhöhenmess-Sensoren ist eine einfache und kostengünstige Methode die sich in der Wasserwirtschaft weitgehend bewährt hat. In der Wasserwirtschaft hat man es jedoch in den meisten Fällen mit eher flachem Gelände und geringen Neigungen zu tun. Auch die Übergänge von steilem auf flaches Gelände und die damit verbundene Bildung von Stau- und Senkkurven stellen in der Wasserwirtschaft keine allzu großen Probleme dar. Am Gschlifgraben hat man es jedoch mit durchwegs steilem Gelände zu tun, was zu einigen Problemen führt. Im Folgenden wird auf diese Probleme eingegangen.

8.3.1 Lufteinmischung bei steilem Gelände

Bei schnell fließendem Wasser in offenen Kanälen oder in geschlossenen Gerinnen kann man erkennen, dass Luft in Form von Blasen aufgenommen wird. Es bildet sich ein Wasser-Luftgemisch mit weißschäumendem Aussehen, welches eine Veränderung des Geschwindigkeitsprofils sowie eine Vergrößerung des benetzten Querschnitts nach sich zieht. Im Wasserbau sind zwei Möglichkeiten der Luftaufnahme an der bewegten freien Oberfläche des Wassers bekannt. Zum einem gibt es die Brechung von Oberflächenwellen, wie es in den Brandungszonen von Küsten oder in Zuströmungsbereichen von Tosbecken zu beobachten ist. Die zweite Möglichkeit kann man zum Beispiel bei Schussrinnen oder in langen, steilen teilgefüllten Rohrleitungen erkennen. Hier setzt die Weißfärbung des Wassers erst nach einer gewissen Fließstrecke ein. Auf Michells und Loveli (1953) geht eine beschreibende Zusammenstellung der Erscheinungsformen der Luftaufnahme zurück, die von VOLKART in [26] übersetzt wurde.

- Rippled flow („gekräuselter Abfluss“):
„leicht bewegte Wasseroberfläche, keine Luftaufnahme, geringe bis mittlere Fließgeschwindigkeit (ca. 2m/s), geringe Turbulenz, kleines Gefälle (wenige %)“ [26]
- Choppy flow („gewellter Abfluss, Kreuzwellen“):
„stärker bewegte Oberfläche mit einigen kleinräumigen Wellen, welche eventuell etwas Luft einschließen. Keine merkliche Zunahme der Fließtiefe. Erhöhte lokale Turbulenz.“ [26]
- Scarified flow („Abfluss mit aufgerissener Oberfläche“):
„Wasser- Luftgemisch in einer dünnen Schicht nahe dem Spiegel. Grosse Variationsmöglichkeiten der Oberflächenformen, beträchtliche Geschwindigkeitskomponente quer zum Spiegel, geringes Ansteigen der Fließtiefe.“ [26]
- Emulsified flow („emulgierender Abfluss“):
„Luftaufnahme an der gesamten, stark schäumenden Gemischoberfläche, starke Zunahme der Abflusstiefe.“ [26]
- Ebulient flow („brodelnder Abfluss“):
„Die Oberfläche schäumt stark und scheint zu sieden. Spezielle Randbedingungen erzwingen lokal eine Einengung oder Umlenkung des Abflusstrahls und somit auch eine örtliche Querturbulenz. Die Grundgeschwindigkeit außerhalb der Störstelle ist eher gering, die Luftblasen werden im anschließenden beruhigten Abflussbereich wieder abgegeben“.[26]
- Separation flow („Trennabfluss“)
„Strömung hoher Geschwindigkeit, welche durch Einbauten und Hindernisse geteilt wird. Örtlich hohe Turbulenz bei den Trennelementen, lokale Unterdrücke im Bereich

des Dampfdruckes.“ [26]

Beschränkt man sich auf steile, teilgefüllte Rohrleitungen, sind nur die Typen rippled flow, choppy flow, scified flow und emulsified flow zu erwarten.

8.3.1.1 Beginn der Luftaufnahme

Wenn man im Längsprofil die Zonen der Luftaufnahme betrachtet, unterscheidet Volkart in [26] folgende Zonen:

- Zulauf zur Steilstrecke:

Der luftfreie Zulauf findet im strömenden Bereich statt. Erst am Ende des Zulaufs zur Steilstrecke findet ein Fließwechsel vom strömenden zum schießenden Abfluss statt.

- Beschleunigungsstrecke:

Durch die starke Zunahme der Fließgeschwindigkeit kommt es nach Durchlaufen des Wasserspiegels der kritischen Tiefe h_k zu einem Fließwechsel vom Strömen zum Schießen. Es kommt zur Bildung einer Senkkurve.

- Aufnahmestrecke:

Die Aufnahmestrecke ist dadurch gekennzeichnet, dass in der Strömung bereits Luftblasen auftreten. Diese vermehren sich mit zunehmender Fließlänge und deren Eindringtiefe wächst an. Dadurch vergrößert sich die Abflusstiefe und der Volumenstrom des Gemisches. Die maximale Eindringtiefe ist dann erreicht, wenn bis zur Sohle Luftblasen eindringen.

- Gleichgewichtsstrecke:

In der Gleichgewichtsstrecke bleiben somit die Abflusstiefe sowie die Geschwindigkeits- und Luftkonzentrationsprofile konstant.

Aus folgender Abbildung ist ersichtlich, dass die Luftaufnahme erst dann einsetzt, wenn die turbulente Grenzschicht $\delta_{(x)}$, welche am Fußpunkt der kritischen Tiefe entspringt, die Wasseroberfläche erreicht. Dieser Punkt wird Durchstoßpunkt P_D bezeichnet.

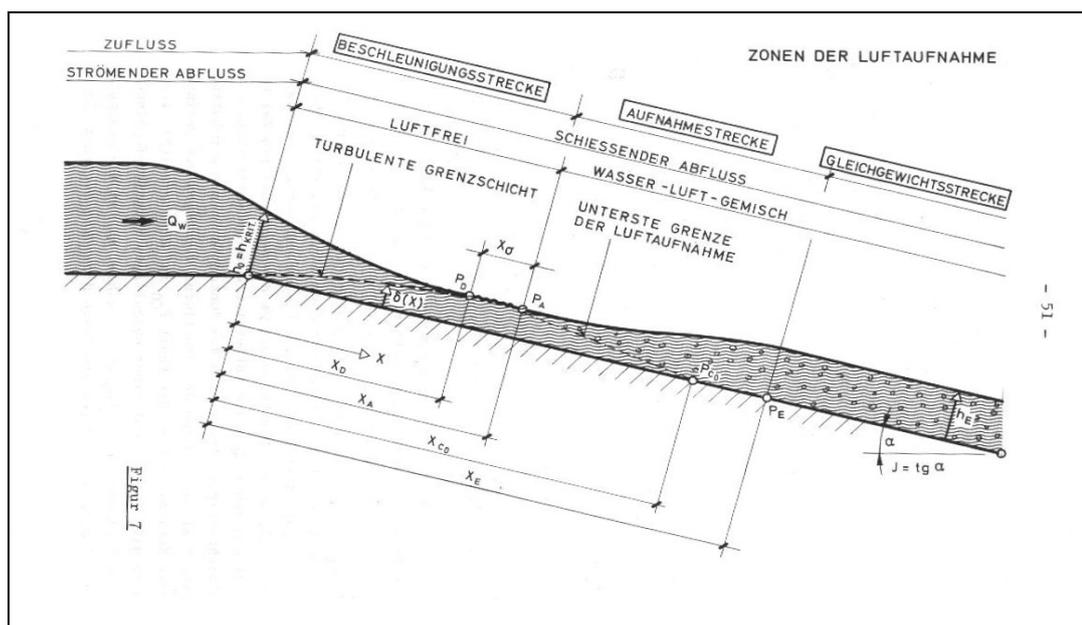


Abb. 25 Zonen der Luftaufnahme (aus [26], 51)

8.3.1.2 Die mittlere Luftkonzentration \bar{C}

Die mittlere Luftkonzentration \bar{C} stellt eines der größten Probleme bei der Ermittlung der Luftaufnahme dar. Es gibt eine sehr gute Korrelation zwischen der mittleren Luftkonzentration \bar{C} und der BOUSSINESQ- Zahl des luftfreien Abflusses. [26]

$$Bou_w = \frac{v_w}{\sqrt{g * Rh_w}} \quad (8.23)$$

v_w = Mittlere Reinwassergeschwindigkeit $\left(\frac{m}{s}\right)$

Rh_w = Hydraulischer Radius für Reinwasser (m)

g = Erdbeschleunigung $\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)$

Volkart zeigte in [26] mittels Versuchen an Röhren verschiedener Durchmesser mit Hilfe der Beziehung

$$\bar{C} = 1 - \frac{1}{A(Bou_w - Bou_{w0})^B + 1} \quad (8.24)$$

Bou_{w0} = BOUSSINESQ- Zahl im Moment des Luftaufnahmebeginns

dass für die Werte $\bar{C} = 0$ mit geringer Streuung um den Wert $Bou_{w0} = 6,0$ verlaufen. Nach Bestimmung der Werte A und B kam Volkart zur Gleichung

$$\bar{C} = 1 - \frac{1}{0,02(Bou_w - 6,0)^{1,5} + 1} \quad (8.25)$$

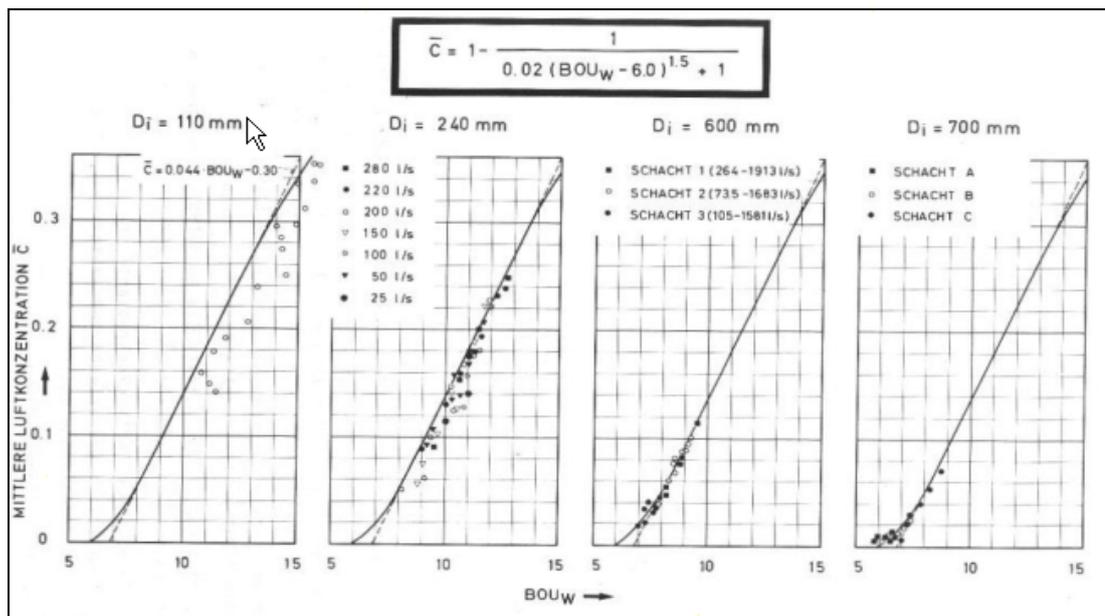


Abb. 26 Luftkonzentration in Abhängigkeit von der Boussinesq- Zahl (aus [26], 199)

8.3.1.3 Minimale Luftaufnahmegegeschwindigkeit $v_{A\min}$

Aufgrund der Tatsache, dass beim Übergang von einer Reinwasserströmung zu einer Gemischströmung eine eindeutige BOUSSINESQ-Zahl zugeordnet werden kann, ist es möglich, für Kreisrohre die minimale Luftaufnahme-Fließgeschwindigkeit $v_{A\min}$ zu bestimmen. Für Rohrfüllungsgrade z über den Wert 0,5 gibt es sogar eine Faustformel für die minimale Luftaufnahmegegeschwindigkeit: [26]

$$v_{A\min} = 10 * \sqrt{Di} \quad (8.26)$$

Di = Durchmesser des Rohres (m)

8.3.1.4 Minimales Luftaufnahmegefälle $J_{A\min}$

Das minimale Luftaufnahmegefälle $J_{A\min}$ ist jenes Gefälle, welches die Luftaufnahme erst ermöglicht. Mit Hilfe eines Fließgesetzes kann das Gefälle $J_{A\min}$ ermittelt werden, für den der Normalabfluss für einen bestimmten Durchmesser und einer bestimmten Rauigkeit genau den Wert $Bou_{w0} = 6,0$ annimmt. Durch Umformen der Gleichung

$$Bou_w = \frac{v_w}{\sqrt{g * Rh_w}} = Bou_{w0} = 6 \quad (8.27)$$

und Einsetzen ergibt sich nach Colebrook für den Füllungsgrad $z = 1$:

$$\frac{3}{2 * \sqrt{2}} * \frac{1}{\sqrt{J_{A\min}}} = -\log^* \left[\frac{2,51 * v}{Di * \sqrt{2g * Di * J_{A\min}}} + \frac{k}{3,71 * Di} \right] \quad (8.28)$$

k = Absolute Rauigkeit (mm)

und nach Strickler für den Füllungsgrad $z = 1$:

$$J_{A\min} = \frac{36,0 * 4^{\frac{1}{3}} * g}{k_s^2 * Di^{\frac{1}{3}}} \quad (8.29)$$

k_{st} = Manning- Strickler- Beiwert $\left(\frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} \right)$

Das minimale Luftaufnahmegefälle für teilgefüllte Rohre ($z \leq 1,0$) kann nun ermittelt werden, indem man $J_{A\min}$ mit einem Faktor f_z multipliziert.

$$J_{A\min(\text{teilgefüllt})} = J_{A\min} * f_z \quad (8.30)$$

f_z ist ein Faktor, der die Abhängigkeit des hydraulischen Radius vom Füllungsgrad berücksichtigt, und kann aus folgender Grafik ermittelt werden. [26]

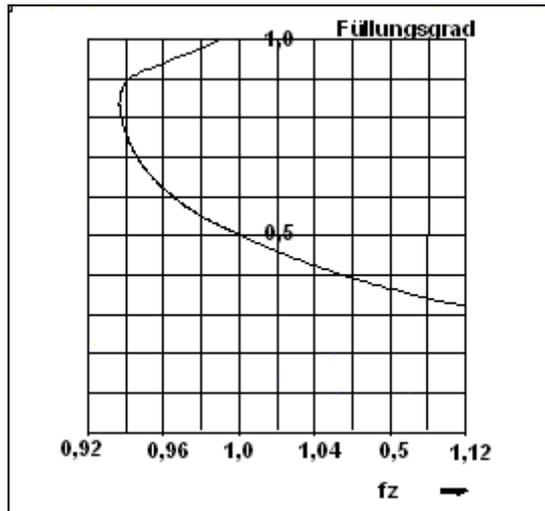


Abb. 27 Grafik zur Ermittlung des Faktor f_z (aus [26], 209)

8.3.1.5 Die mittlere Gemischgeschwindigkeit v_g

Die Luftaufnahme wirkt sich auf den Abfluss in Steilleitungen verzögernd aus, so dass der Gemischabfluss im Gegensatz zum Reinwasserabfluss immer langsamer fließt. Durch das Verhältnis v_g / v_w ist ersichtlich, wie groß die verzögernde Wirkung der Luft ist. [26]

$$\frac{v_g}{v_w} = 1 - \bar{C}^{2,09} \approx 1 - \bar{C}^2 \quad (8.31)$$

$$v_w = \text{Reinwassergeschwindigkeit} \left[\frac{m}{s} \right]$$

8.3.1.6 Die maximale Gemischquerschnittsfläche F_l

Nach [26] ist F_l jene Fläche, welche gegen die Fläche mit der Konzentrationslinie $C = 1,0$ begrenzt ist. Das bedeutet, dass der schwankende Gemischspiegel diese, die Fläche F_l limitierende Fließhöhe erreichen kann.

$$F_l = F_w * \left[2,0 * \ln\left(\frac{1}{1-\bar{C}}\right) + 1 \right] \quad (8.32)$$

$$F_w = \text{Querschnittsfläche für Wasser} \left[m^2 \right]$$

8.3.1.7 Die mittlere Gemischfläche F_m

Die mittlere Gemischfläche ist eine „nicht sichtbare Größe“, die zur Bestimmung der mittleren Gemischgeschwindigkeit dient. [26]

$$F_m = F_w * \frac{1}{(1-\bar{C})^2 * (1-\bar{C})} \geq F_w \quad (8.33)$$

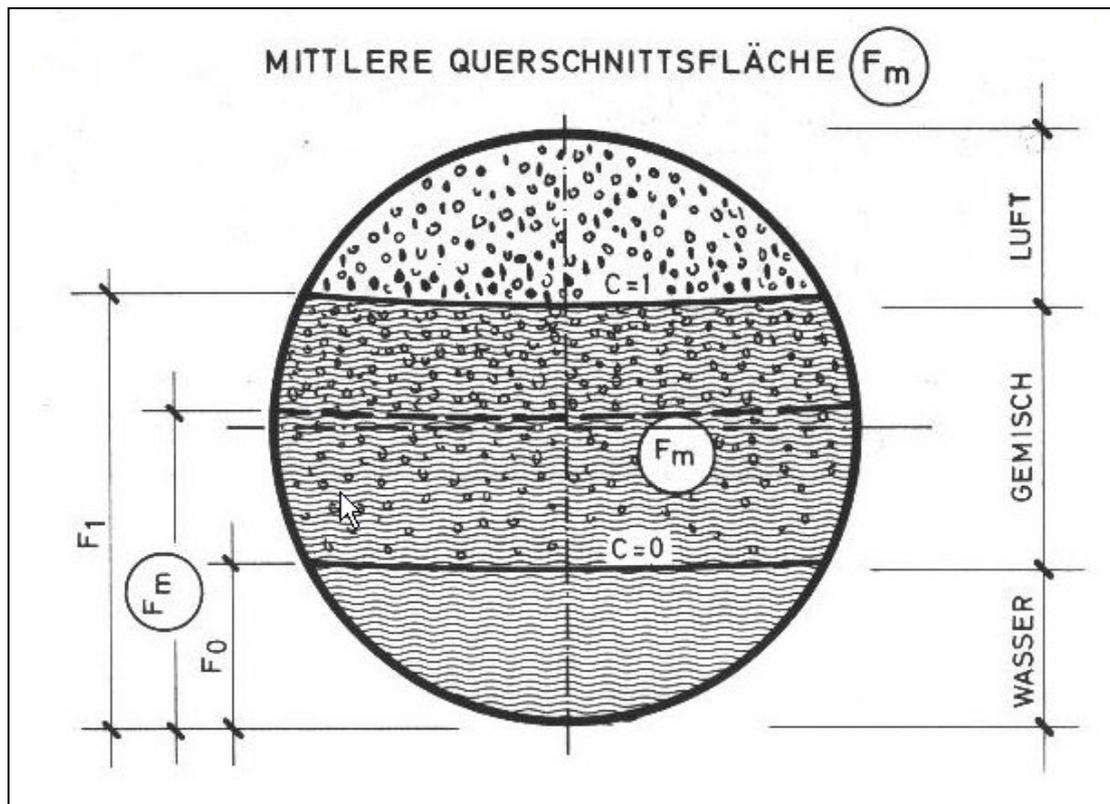


Abb. 28 Mittlere Gemischquerschnittsfläche (aus [26], 164)

8.3.1.8 Berücksichtigung der Lufteinmischung beim Pegelschlüssel

Mit den zuvor in 8.3.1.2 bis 8.3.1.7 beschriebenen Formeln ist es nun möglich die bei steilem Gelände auftretende Lufteinmischung zu berücksichtigen. Da man jedoch nur im Stande ist, die mittlere Gemischfläche zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit sowie die maximale Gemischfläche zu berechnen und sich der Lufteintrag mit der Fließdistanz und der Neigung ändert, ist es nicht möglich, den Durchfluss exakt zu bestimmen. Wenn man jedoch den Lufteintrag berücksichtigt, kann die Genauigkeit erhöht werden. In den folgenden Abbildungen sind die Unterschiede bei den verschiedenen Berechnungsansätzen ersichtlich.

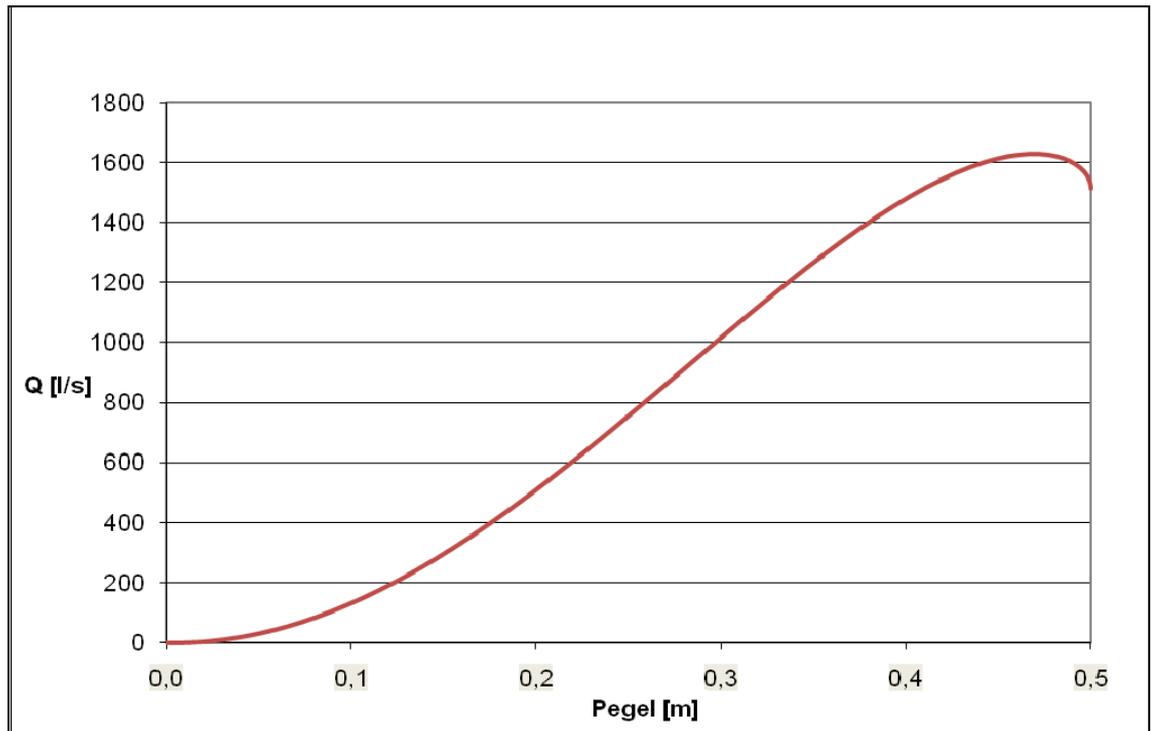


Abb. 29 Pegelschlüssel ohne Berücksichtigung der Lufteinmischung ($l = 6^\circ$, $d = 0,5\text{m}$)

Der Pegelschlüssel für eine Rohrleitung ohne Berücksichtigung der Lufteinmischung mit einem Sohlgefälle von 6° und einem Durchmesser von $0,5\text{ m}$ als Polynom 5. Ordnung lautet:

$$Q = 1000000 * h^5 - 663528 * h^4 + 136757 * h^3 + 1610,9 * h^2 + 302,96 * h$$

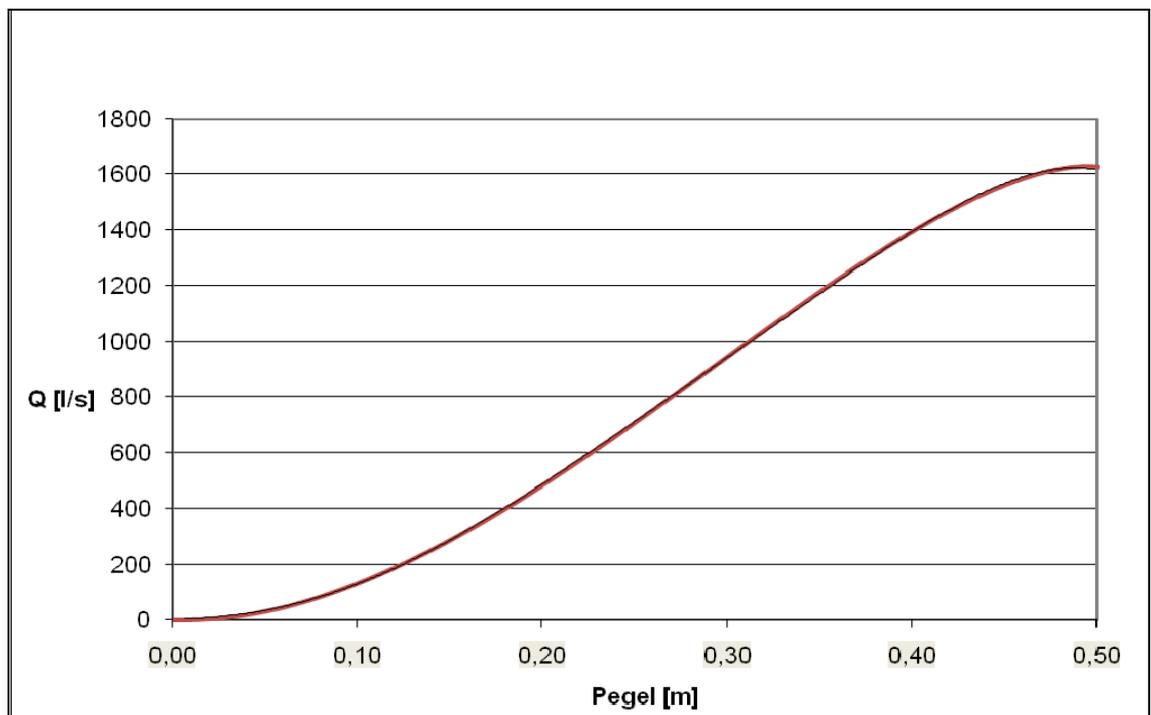


Abb. 30 Pegelschlüssel mit Berücksichtigung der Lufteinmischung ($l = 6^\circ$, $d = 0,5\text{m}$)

Der Pegelschlüssel für eine Rohrleitung mit Berücksichtigung der Luftenmischung mit einem Sohlgefälle von 6° und einem Durchmesser von 0,5 m als Polynom 5. Ordnung lautet:

$$Q = 1000000 * h^5 - 541888 * h^4 + 105014 * h^3 + 4237,1 * h^2 + 247,87 * h$$

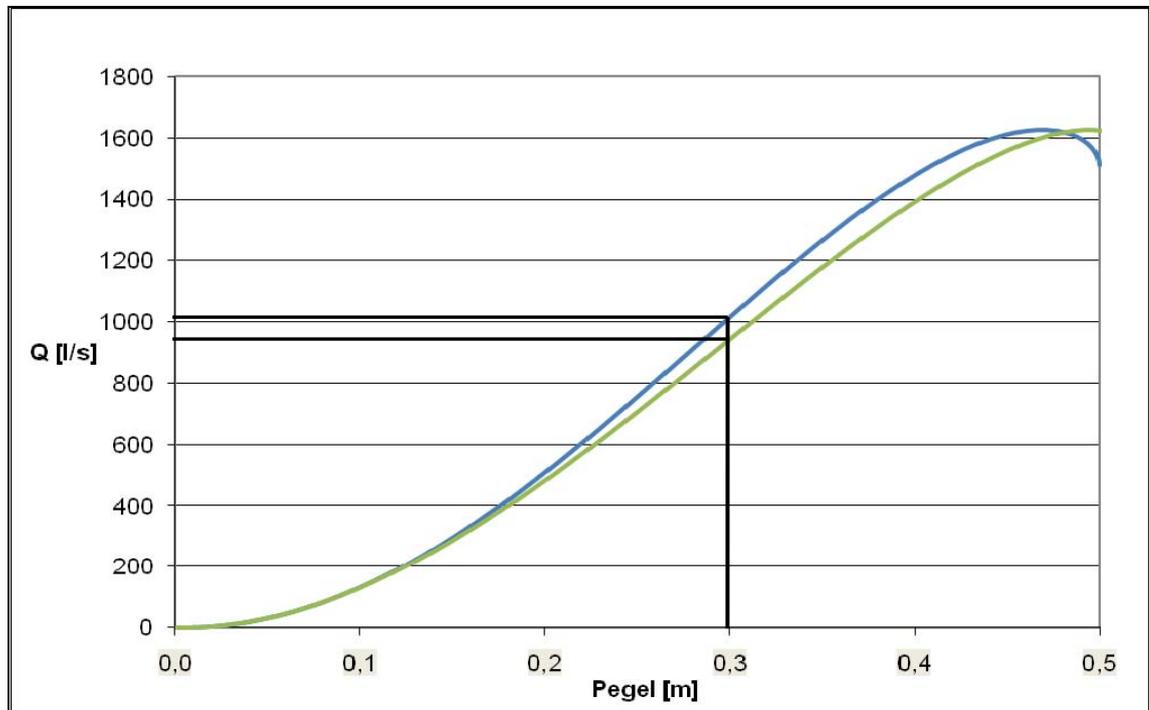


Abb. 31 Vergleich der Schlüsselkurve ohne Berücksichtigung der Luftaufnahme (schwarz) und mit Berücksichtigung der Luftaufnahme (grün) ($l = 6^\circ$, $d = 0,5\text{m}$)

Beim Vergleich der beiden Berechnungen kann man erkennen, dass die Luftenmischung in steilen Rohrleitungen bei geringen Füllständen kaum einen Einfluss auf die Messung hat. Erst bei Füllhöhen ab 0,15 m hat die Luftenmischung zunehmend Auswirkungen auf die Ergebnisse. Bei einer Füllhöhe von etwa 0,3 m beträgt der berechnete Wert ohne Berücksichtigung der Luftaufnahme einen Durchfluss von etwas mehr als $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ und mit Berücksichtigung der Luftaufnahme einen Durchfluss von ca. $940 \text{ m}^3/\text{s}$. Das ergibt einen Unterschied von ca. $70 \text{ m}^3/\text{s}$, was einen Unterschied von etwa 6% bedeutet. Bei höheren Füllständen weichen die berechneten Werte noch weiter voneinander ab.

8.3.1.9 Messfehler aufgrund einer Trendlinie für geringe Abflusstiefen

Aufgrund der Abweichung der Trendlinie vom berechneten Pegelschlüssel (rote Kurve), die zur Ermittlung der Formel für den Datenlogger nötig ist, kommt es zu falsch angegebenen Durchflüssen. In den folgenden Diagrammen kann die Abweichung der Trendlinie von den berechneten Werten abgeschätzt werden.

In Abb. 32 ist zu erkennen, dass bei niedrigen Füllhöhen vom Pegelschlüssel zu große Durchflüsse angegeben werden. Bei einer Füllhöhe von 2 cm beträgt der Messfehler in etwa 4 l/s.

In Abb. 33 ist ersichtlich, dass auch bei großen Füllhöhen die Trendlinie mit den berechneten Werten nicht völlig übereinstimmt. Auch hier ist ersichtlich, dass zum Teil zu große und zum Teil zu kleine Durchflüsse angezeigt werden.

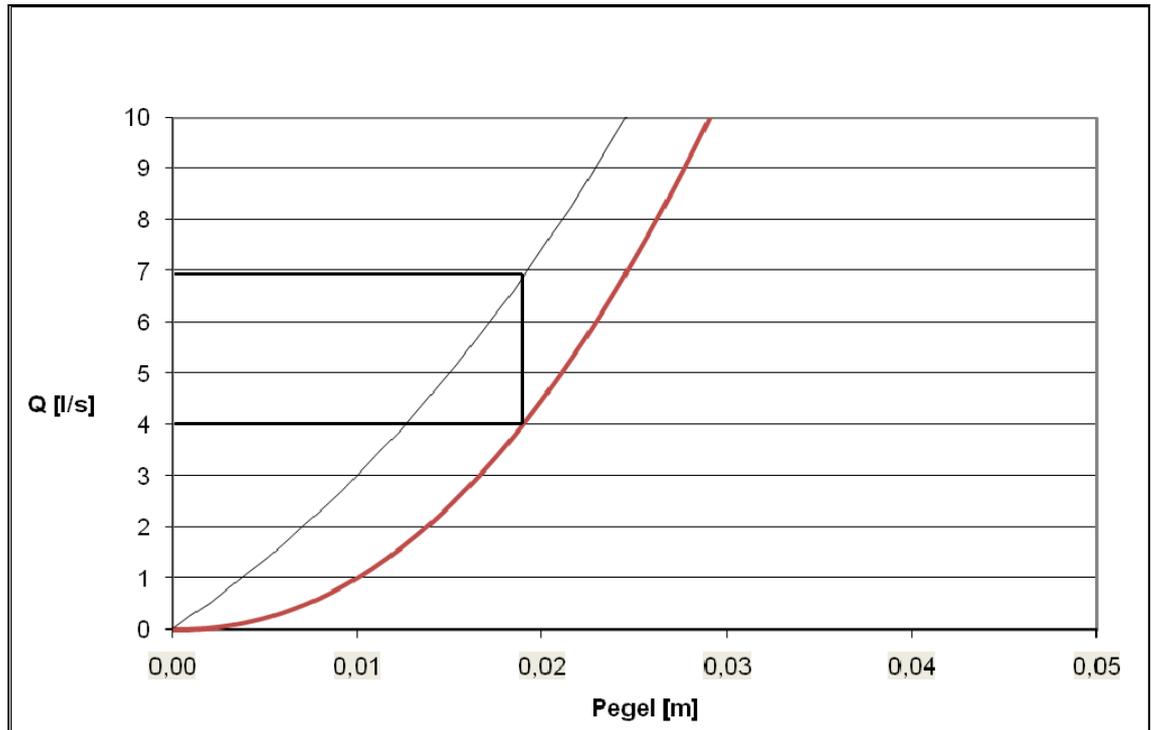


Abb. 32 Trendlinie (blau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot)

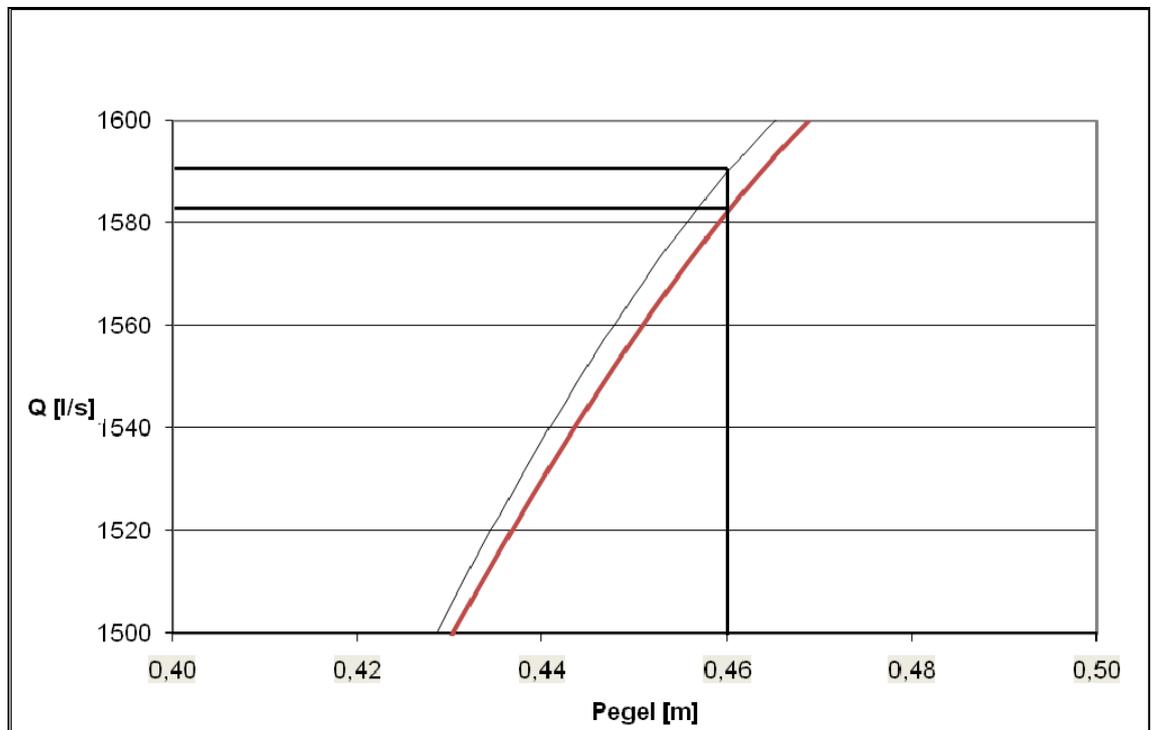


Abb. 33 Trendlinie (blau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot)

8.3.2 Stau- und Senkkurven

Nach Hager [9] versteht man unter Stau- und Senkkurven Wasserspiegelprofile, welche sich als Übergangskurven zwischen zwei oder mehreren Kanalabschnitten ergeben. Die Berechnung solcher Kurven ist sehr umständlich. Vor allem bei der Durchflussmessung mit dem Ultraschallhöhenmess-Verfahren ist es wichtig zu wissen, in wie weit Stau- und Senkkurven die Messung beeinflussen. Da es bei jeder Änderung des Gefälles zur Bildung solcher Übergangskurven kommt, sollte man wissen, wie weit man mit der Messstation von einem Neigungswechsel entfernt sein sollte, um annähernd fehlerfreie Messungen zu erhalten.

8.3.2.1 Berechnung von Stau- und Senkkurven bei Rohren mit konstantem Durchmesser

Bei jeder Änderung von Sohlengefälle, Rauigkeit, Durchfluss und Querschnitt kommt es aufgrund einer Abweichung vom Gleichgewichtszustand zu einer Änderung des Normalabflusses, so dass man von einem ungleichförmigen Abflusszustand spricht. Da man es am Gschlieflgraben durchwegs mit Rohren gleichen Durchmessers und gleicher Rauigkeit zu tun hat, ist vor allem die Änderung des Gefälles von Bedeutung. Zur Herleitung der Differenzialgleichung betrachtet man eine sehr kleine Lauflänge dx . Ausgehend von der Energielinienengleichung (Bernoulli) kann man zwei Profile gegenüberstellen, und erhält die Gleichung. [9]

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_E}{1 - \frac{Q^2 * B}{g * A^3}} = \frac{I_0 - I_E}{1 - F_r^2} \quad (8.34)$$

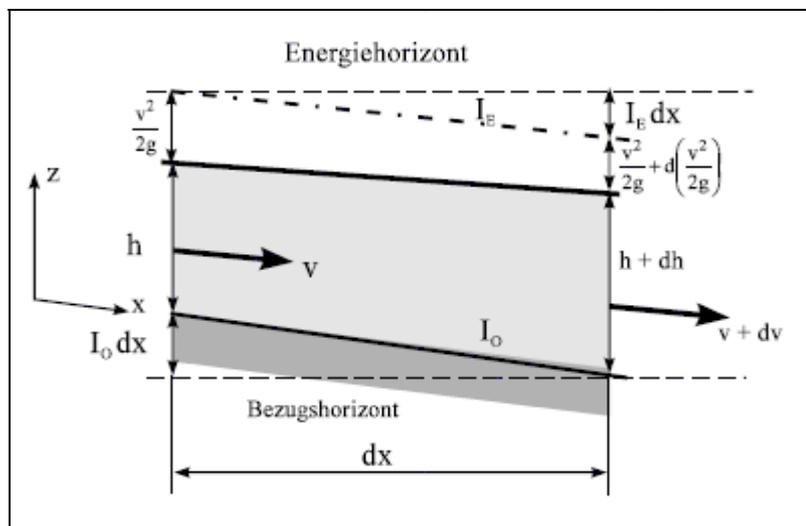


Abb. 34 Gegenüberstellung zweier Profile zur Herleitung der zuvor angeführten Differentialgleichung [9]

Bei ungleichförmigen Abflussverhältnissen kann die Ausbildung des Wasserspiegels sehr unterschiedlich sein. In folgender Abbildung werden verschiedene Stau- und Senkkurven mit ihren Bezeichnungen dargestellt. Da man es am Gschlieflgraben durchwegs mit steilem Gelände zu tun hat und beinahe immer schießender Abfluss herrscht, sind vor allem S1 Kurven (Übergang eines schießenden Abflusses in einen weiteren schießenden Abfluss bei größer werdendem Gefälle) und S2 Kurven (Übergang eines schießenden Abflusses in einen weiteren schießenden Abfluss bei geringer werdendem Gefälle) von Bedeutung. [9]

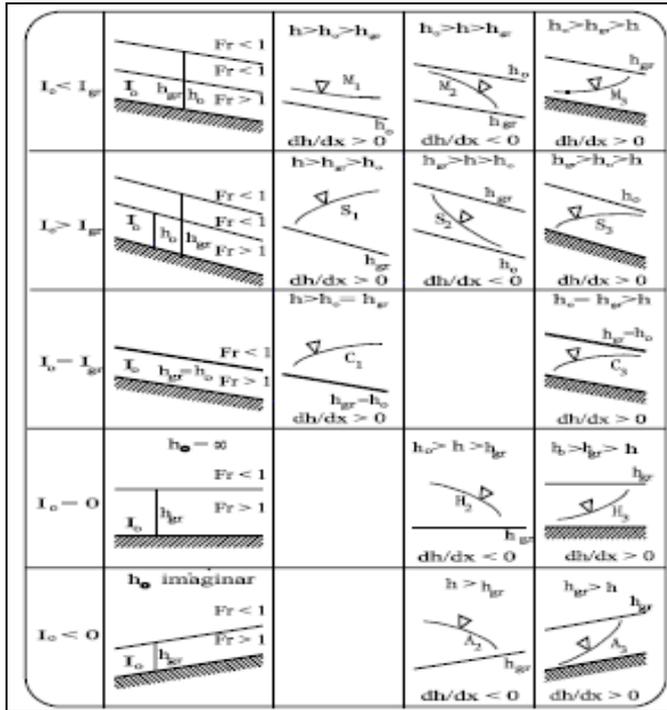


Abb. 35 Stau- und Senkkurven mit Bezeichnungen (aus [12], 28)

Zur Berechnung der Wasserspiegellagen gibt es verschiedene Verfahren. Man unterscheidet Verfahren mittels graphischer Integrationsmethode von den Methoden der direkten Integration (Rechteckquerschnitt nach Rühlmann, Parabelquerschnitt nach Tolkmitt) und von der Methode der abschnittswiseen Berechnung. Hinsichtlich der Berechnungsrichtung sollte man bei h (Normalabflusstiefe) $\geq h_c$ (Kritische Abflusstiefe), also bei strömendem Abfluss, entgegen und bei $h \leq h_c$ (Schießender Abfluss) in Fließrichtung rechnen. Theoretisch reichen Stau- und Senkkurven bis ins Unendliche. In der Praxis enden bzw. beginnen Stau- und Senkkurven genau dort, wo die Wasserstandshöhe bei Staulinien nur noch um 1% größer und bei den Senklinien nur noch um 0,5% kleiner als der Wasserstand bei Normalabfluss sind. [13]

Hager hat in [9] ein Näherungsverfahren zur Berechnung von Stau- und Senkkurven im Kreisprofil, zu denen heute nur wenige rechnerische Beiträge vorhanden sind, angegeben.

- Berechnung des Normalabfluss h_N

$$q_N = \left(\frac{Q}{k * J_s^{\frac{1}{2}} * D^5} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{8.35}$$

q_N = Dimensionsloser Durchfluss

$$Q = \text{Durchfluss} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

J_s = Sohlgefälle

D = Durchmesser (m)

$$k = \text{Rauhigkeitsbeiwert} \left[\frac{m^{\frac{1}{3}}}{s} \right]$$

$$y_N = \left[\frac{2}{7} (3 - \sqrt{9 - 28 * q_N}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.36)$$

$$h_N = y_N * D \quad (8.37)$$

- Berechnung der kritischen Tiefe h_c

$$y_c = \frac{h_c}{d} = \left[\frac{Q}{(g * D^5)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.38)$$

$$h_c = y_c * D \quad (8.39)$$

- Berechnung der dimensionslosen Parameter

$$X = \frac{J_s * x}{h_N} \quad (8.40)$$

$$Y = \frac{h}{h_N} \quad (8.41)$$

$$Y_c = \frac{h_c}{h_N} \quad (8.42)$$

- Die Gleichung von Stau- und Senkkurven im Kreisprofil lautet:

$$\frac{dY}{dX} = 1 - \frac{\frac{y_N^4 \left(1 - \frac{7}{12} * y_N^2\right)^2}{y^4 * \left(1 - \frac{7}{12} y^2\right)^2}}{1 - \left(\frac{Y_c}{Y}\right)^4} \quad (8.43)$$

Bei kleinen Teilfüllungen von $y_N \leq 0,3$ kann der Einfluss von $\left(\frac{7}{12}\right)y^2$ gegenüber 1 vernachlässigt werden.

$$\frac{dY}{dX} = \frac{1 - Y^{-4}}{1 - \left(\frac{Yc}{Y}\right)^4} \quad (8.44)$$

Nach Berechnung und Betrachtung von Stau- und Senkkurven ist zu sehen, dass die geringen Neigungsunterschiede der einzelnen Rohre nur einen geringen Einfluss auf die Messungen haben.

8.3.3 Eisbildung im Winter

Durch die geringen Durchflüsse im Winter und die teilweise sehr niedrigen Temperaturen über längere Zeit, kann es zur Bildung einer Eisschicht im Rohr kommen. Diese Eisschicht kann durch Anhaften des Wassers an der Oberfläche des Eises und gefrieren immer höher ansteigen, was zu Fehlmessungen führt. Bei nur sehr geringen Durchflüssen kommt es zur Messung von sehr hohen Wasserspiegelhöhen und dadurch zur Berechnung von sehr großen Durchflüssen.

8.3.4 Kalibrierung

Ein weiteres Problem bildet eine ausreichend genaue Kalibrierung. Darunter versteht man das Anpassen von einem gemessenen Wert an den tatsächlich vorhandenen Abstand zwischen Ultraschallsensor und Füllgutoberfläche. Dazu vergleicht man die beiden Werte, und, falls es Abweichungen gibt, muss man diese aufeinander abstimmen. Bei nur geringen Abweichungen der gemessenen Werte von den wirklichen Wasserspiegelhöhen wird die Messung deutlich verfälscht. Die Ermittlung der wirklichen Wasserspiegelhöhe ist bei Rohrleitungen jedoch nicht einfach. Durch Messung der Wasserspiegelhöhe mittels z.B. eines Zahlstabes in der Öffnung, in die der Ultraschallsensor eingebaut wird, ist es beinahe unmöglich, die Wasserspiegelhöhe hinreichend genau abzulesen. Dadurch bedient man sich einer ebenen Fläche (zum Beispiel in Form einer Holzplatte), die durch eine Öffnung vor oder nach dem Ultraschallsensor in das Rohr eingebracht wird. Diese Holzplatte wird vorher im Labor in ein Rohr mit 500 mm Durchmesser eingebaut, an der Sohle befestigt und dann der Abstand gemessen. Dadurch ist der Abstand zwischen Rohrsohle und Oberfläche der Holzplatte bekannt. Diese Holzplatte kann dann auch in den Rohren am Gschlifgraben durch eine sich vor oder hinter dem Sensor befindlichen Öffnung eingebaut werden. Aus dem Labor ist bereits die Höhe der Holzplattenoberfläche bekannt. Somit ist es auch am Feld möglich, eine annähernd fehlerfreie Kalibrierung vorzunehmen.

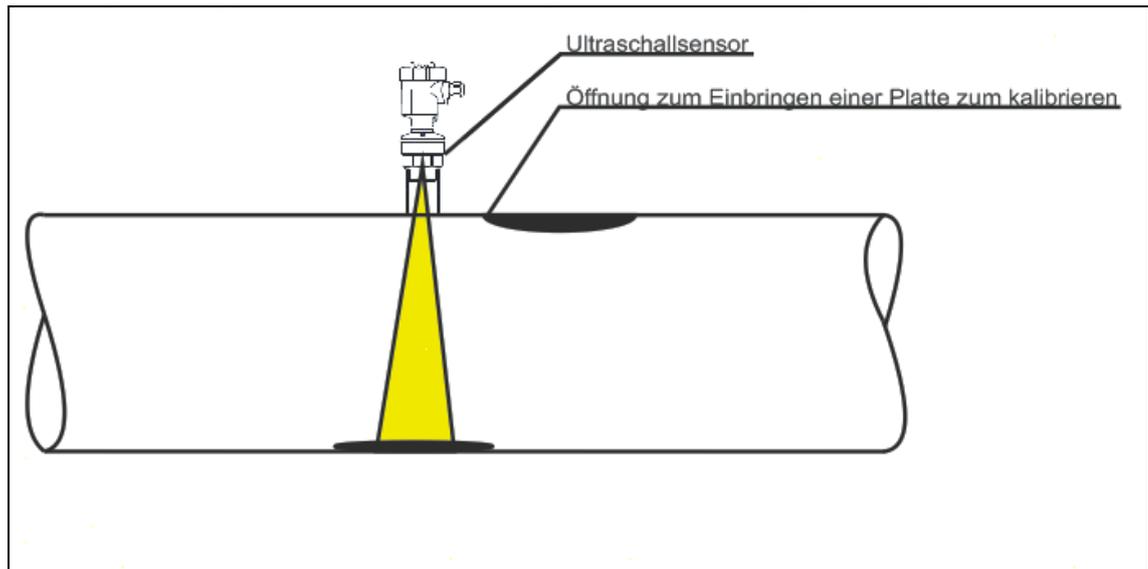


Abb. 36 Einbringen eines Gegenstandes zur Kalibrierung

8.3.5 Zuschlagen von Rohrleitungen beim Übergang von Teilfüllung auf Vollfüllung

Beim Übergang von Teilfüllung auf Vollfüllung kann es zum Zuschlagen von Rohrleitungen kommen. Darunter versteht man jenen Zustand, bei dem sich der Freispiegelabfluss zum Druckabfluss ändert und somit der Normalabflusszustand gestört wird. Zum einen entsteht Zuschlagen durch die intermittierende Öffnung und Schließung des Einlaufes aus dem stagnierenden Oberwasser. Dabei wirkt der Einlauf wie ein Schütz, der die Lufteinströmung aus dem Oberwasser nur stoßweise zulässt. Geringe Über- und Unterdrücke im Unterwasser des Einlaufes verhindern den Normalabfluss und Luftblasen werden mit der Strömung mitbewegt. Zum anderen kann es durch Wellenbildung zum Zuschlagen kommen. Dieser Fall kann zum Beispiel auftreten, wenn in einem Schacht ober dem Kanal strömender Abfluss herrscht und sich im Kanal schießender Abfluss einstellt. Dabei kann eine Welle den Kanalscheitel berühren, die Luftzufuhr unterbrechen und somit die Bildung des Normalabflusszustandes stören. Weitere Gründe, die das Zuschlagen fördern, sind Abflussstörungen wie zum Beispiel Richtungsänderungen, Änderung des Gefälles, Vereinigungsbauwerke, Querschnittänderungen, Abstürze oder Feststoffe die sich im Querschnitt abgelagert haben. [9]

Durch Zuschlagen wird nicht nur die Durchflussmessung mittels Ultraschallhöhenmessensoren gestört bzw. fehlerhaft. Durch die Luftblaseneinschließung und die damit veränderten hydraulischen Bedingungen kommt es sowohl bei den Verfahren zur Durchflussmessung bei Teilfüllung als auch bei den Verfahren zur Durchflussmessung bei Vollfüllung zu Problemen.

9 Erfassung von oberflächlich abfließenden Wässern

Um die hydrologischen Verhältnisse am Gschlifegraben erfassen zu können, reicht es nicht aus, nur die Durchflüsse in den Rohrleitungen zu ermitteln. Auch im Hangbereich zwischen den Rohrleitungen fließen in Geländeeintiefungen Wässer, die teilweise aus Dränsystemen stammen oder bei Regenwetter teilweise oberflächlich diesen Gräben zufließen. In diesen Bereichen wäre es sinnvoll, mit Überfällen den Durchfluss zu ermitteln.

9.1 Dreieckswehr

Für kleine Überfallhöhen und zur genauen Messung von kleinen Durchflüssen eignet sich vor allem das Dreieckswehr. Dabei wird in einer lotrechten Wand ein Ausschnitt in Form eines gleichschenkeligen Dreiecks ausgebildet. Die Wand staut das Gewässer aufgrund der Durchflussverengung auf. Aus der Höhe des Wasserspiegels vor dem Wehr lässt sich der momentane Durchfluss berechnen. Der Unterwasserstand sollte mindestens 50mm unter der Wehrbasis liegen, um eine vollständige Strahlbelüftung zu gewährleisten. Der angestaute Wasserstand wird in einer Entfernung von etwa zwei bis vier mal der Entfernung zwischen der Wehroberkante und der Gewässersohle gemessen. Die Messung kann mit einem der in 4.1.2.2 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Wasserspiegelhöhe an einem Ort mit bekanntem Fließquerschnitt erfolgen. [9], [19]

Ein wesentlicher Vorteil von Dreieckswehren ist, dass sowohl sehr kleine sowie auch große Durchflussmengen erfasst werden können. Diese Dreieckswehre können vor Ort aus Stahlbeton errichtet werden oder auch als Fertigteile geliefert und am gewünschten Platz eingebaut werden. Der Öffnungswinkel des Wehres sowie auch die maximale Stauhöhe richtet sich nach den zu erwartenden Abflüssen.

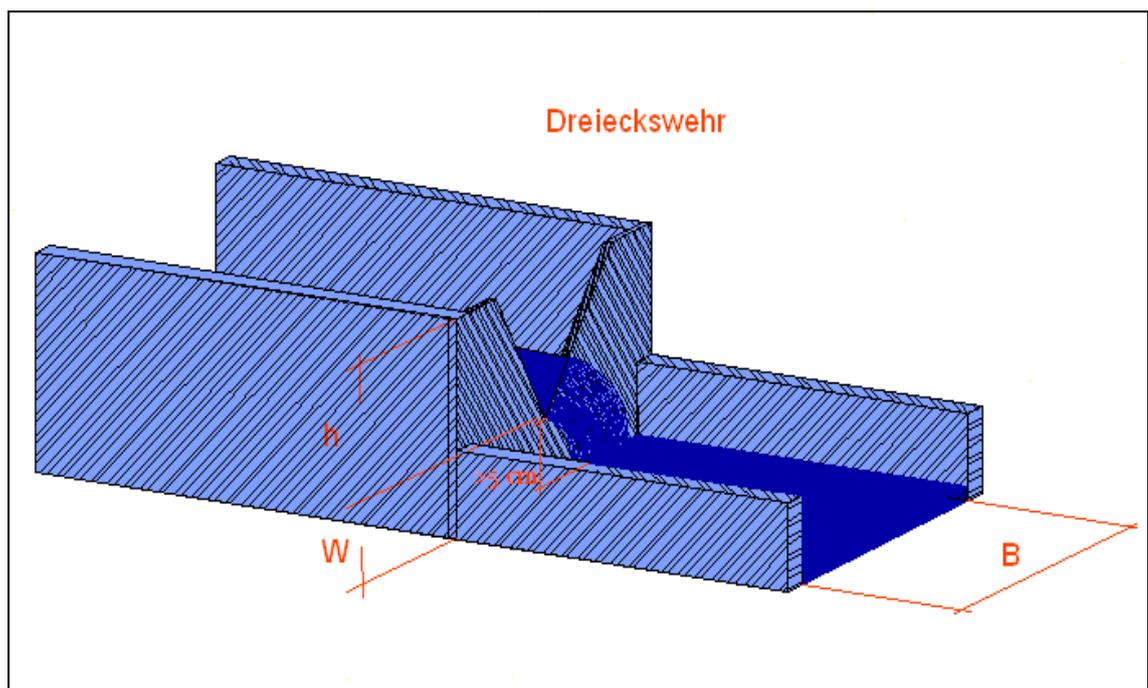


Abb. 37 Dreieckswehr mit künstlichem Zu- und Ablauf

Weitere Voraussetzungen für die Errichtung eines Dreieckswehres sind, dass die Anströmrichtung lotrecht auf das Wehr erfolgt, die Abdichtung zwischen Gewässersohle und Wehr gut ausgeführt ist, weil jeder Verlust zu Messfehlern führt und sich nach dem Wehr kein Rückstau bildet.

Der Durchfluss kann mit folgender Formel berechnet werden.

$$Q = 0,533 * \mu * \sqrt{2 * g} * \tan \alpha * h^{\frac{5}{2}} \quad (9.1)$$

μ = Dimensionsloser Überfallbeiwert der vom Winkel α und der Höhe h abhängig ist

α = Öffnungswinkel [°]

h = Stauhöhe [m]

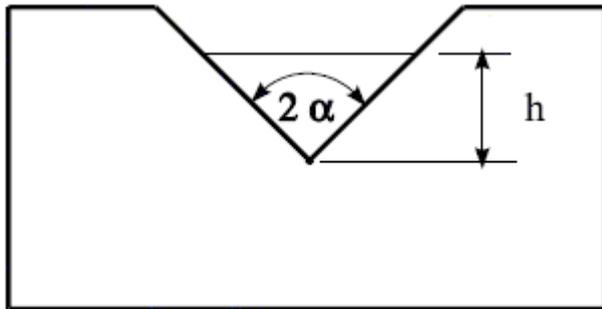


Abb. 38 Dreieckswehr nach Thomson (aus[13], 49)

Weiters ist zu beachten, dass das Wasser genug Stauraum hat, weil der Kontrollquerschnitt im Wehr nicht schnell angeströmt werden darf.

9.1.1 Ausführung eines Dreieckswehres

Die genaue Ausführung eines Dreieckswehres ist von den jeweiligen örtlichen Verhältnissen abhängig. Zum einen kann das Bauwerk wie in Abb. 37 gezeigt als Dreieckswehr mit künstlich errichteten Zu- und Ablauf ausgeführt werden. Zum anderen kann das Dreieckswehr in einem Ableitungsgraben so eingebaut werden, dass dadurch der Fließquerschnitt vom Ableitungsgraben abgesperrt wird, und das Wasser über das Wehr abfließt. Zur Messung der Wasserspiegelhöhen gibt es wie in 4.1.2.2 beschrieben verschiedene Möglichkeiten. Da man jedoch auch hier ständig Messergebnisse erhalten will könnte auch hier die bewegungslose Messung der Wasserspiegelhöhen mittels Ultraschallhöhenmess-Sensoren, welche bereits bei den Rohrleitungen am Gschlifgraben zum Einsatz kommen, verwendet werden. Bei diesem Verfahren sind durch Laborversuche und die eingebaute Probestation am Gschlifgraben bereits Daten über die Funktionstauglichkeit unter verschiedenen Bedingungen in der Natur vorhanden. Dabei wird der Sensor in etwa 2-4 mal der Wehrhöhe ober dem Dreieckswehr eingebaut. Weiters ist jedem Wehr ein die Schwimmstoffe abhaltender Rechen vorzusetzen. Aufgrund der ständigen Massenbewegungen und der damit verbundenen Möglichkeit, dass sich die Ausrichtung des Sensors ändert, was zu Fehlmessungen führen würde, ist eine laufende Kontrolle der Messstationen unumgänglich. [9], [19]

Da jedoch aus Kostengründen und auch aus Gründen der bautechnischen Ausführung nicht beliebig viele Messwehre gebaut werden können, ist es wichtig, mit möglichst wenigen Messstationen die oberflächlich abfließenden Wässer und das Wasser aus dem Dränsystem möglichst vollständig zu erfassen. Weiters ist bei der Auswahl von Messstationen auch auf die Geländeneigung zu achten, da vor der Messstation das Wasser über eine gewisse Distanz eine Beruhigungsstrecke benötigt.

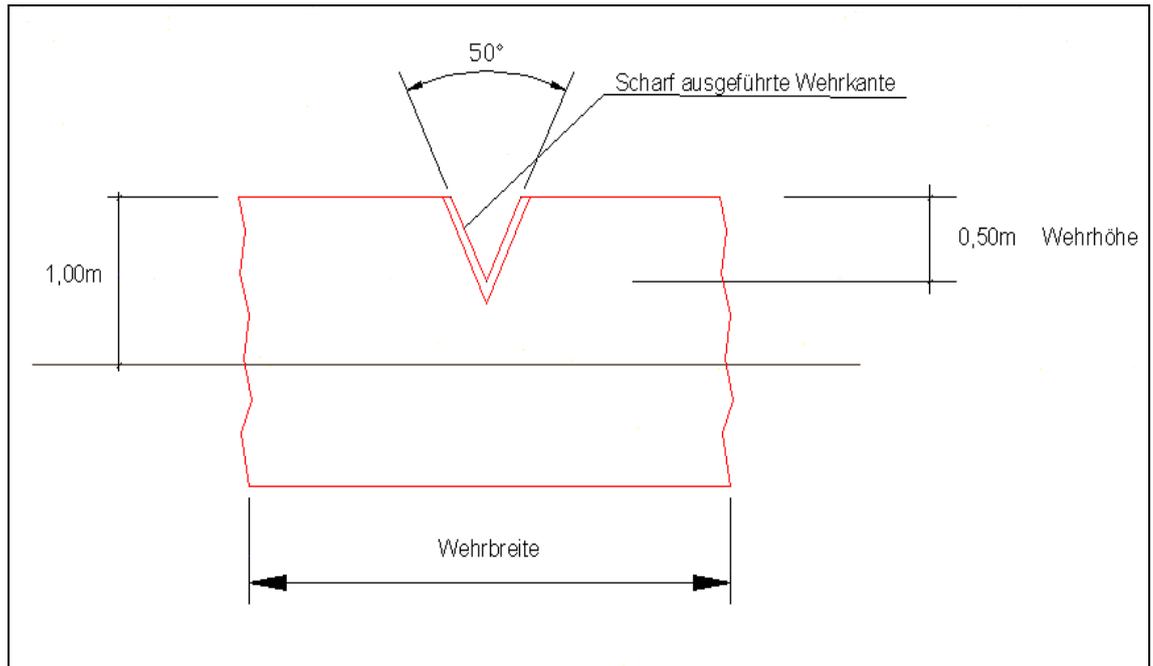


Abb. 39 Mögliche Ausbildung eines Dreieckwehres in einem Ableitungsgraben

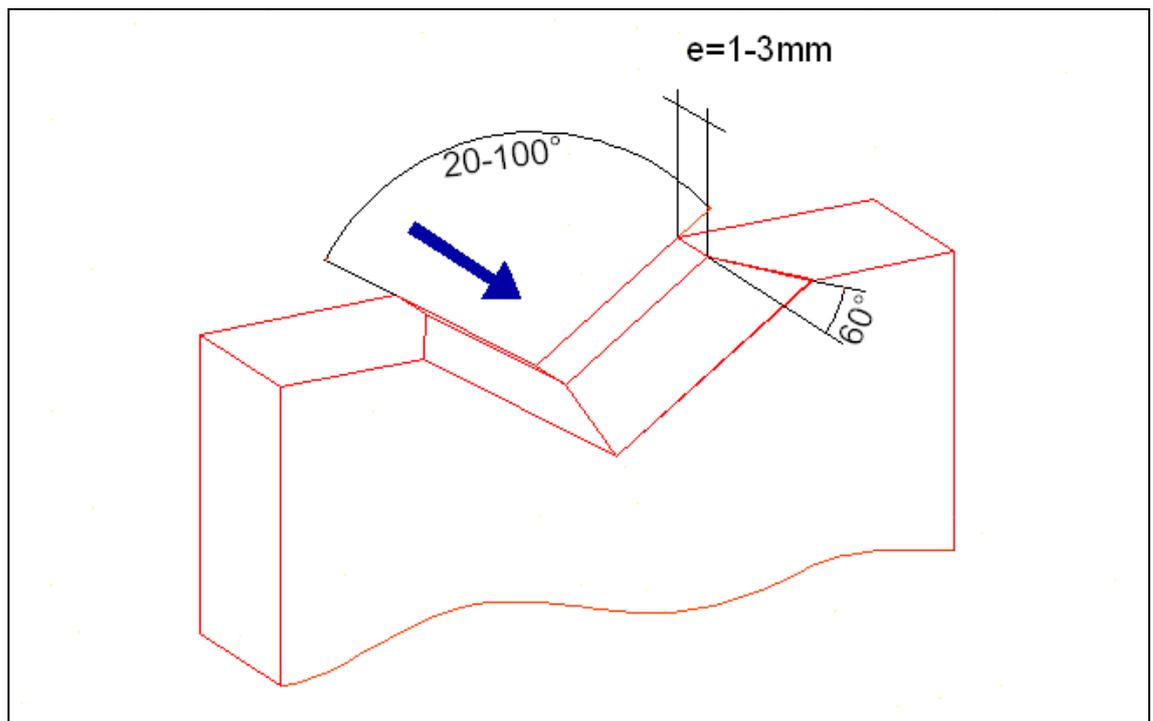


Abb. 40 Dreieckswehr mit scharfkantiger Kronenform

Um eine vollständige Belüftung zu gewährleisten sollen Messüberfälle eine scharf ausgeführte Kronenform und einen geraden Zulaufkanal besitzen. Die Dicke der Wehrkante sollte nicht breiter als 3 mm und unterwasserseitig um 45° bis 60° abgewinkelt sein.

9.1.2 Pegelschlüssel bei der Messung mittels Ultraschallsensoren

Wie bereits in 8.2 beschrieben, benötigt man bei der Messung mit Ultraschallhöhenmesssensoren bzw. zur Umrechnung der Wasserspiegelhöhen zu Abflüssen eine eindeutige Beziehung zwischen Wasserspiegelhöhe und Durchfluss.

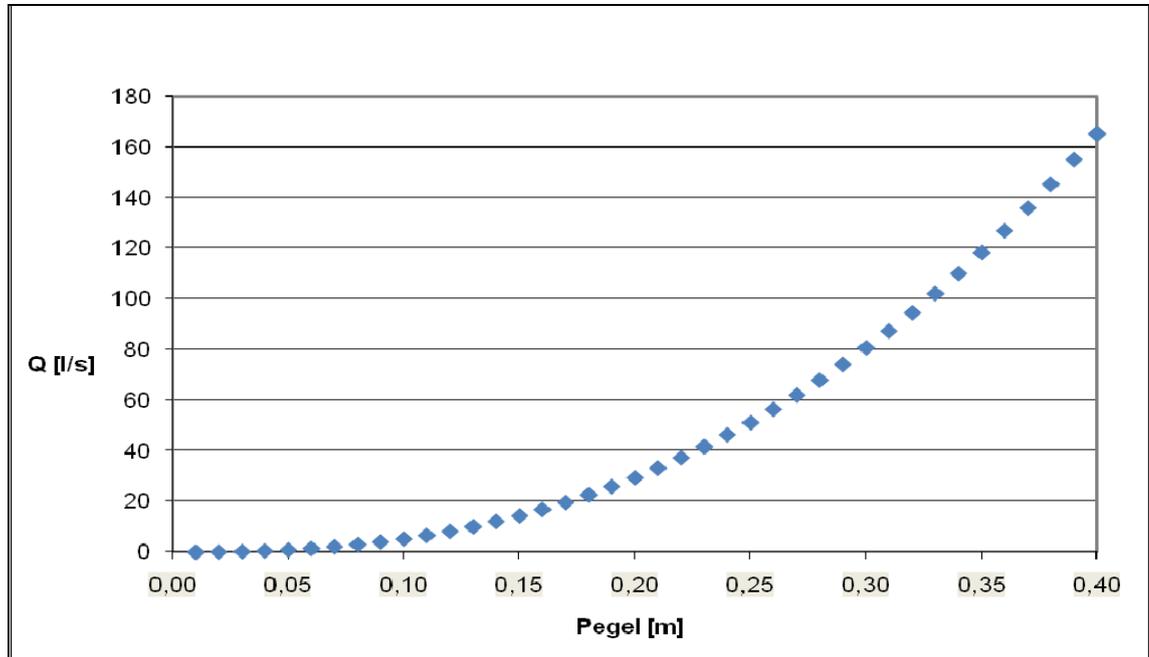


Abb. 42 Beziehung zwischen Wasserspiegelhöhe und Durchfluss bei einem Dreieckswehr

Durch Erstellen eines Diagrammes (Punktdiagramm) und das Anpassen einer Trendlinie an die Punkte sowie das Angeben einer Formel, kann der Pegelschlüssel/ Schlüsselkurve ermittelt werden. Im Gegensatz zur Bestimmung des Pegelschlüssels bei Rohrleitungen wählt man anstelle der Trendlinie der Art „Polynom“ (der sechsten Ordnung) die Trendlinie der Art „Potenz“ aus.

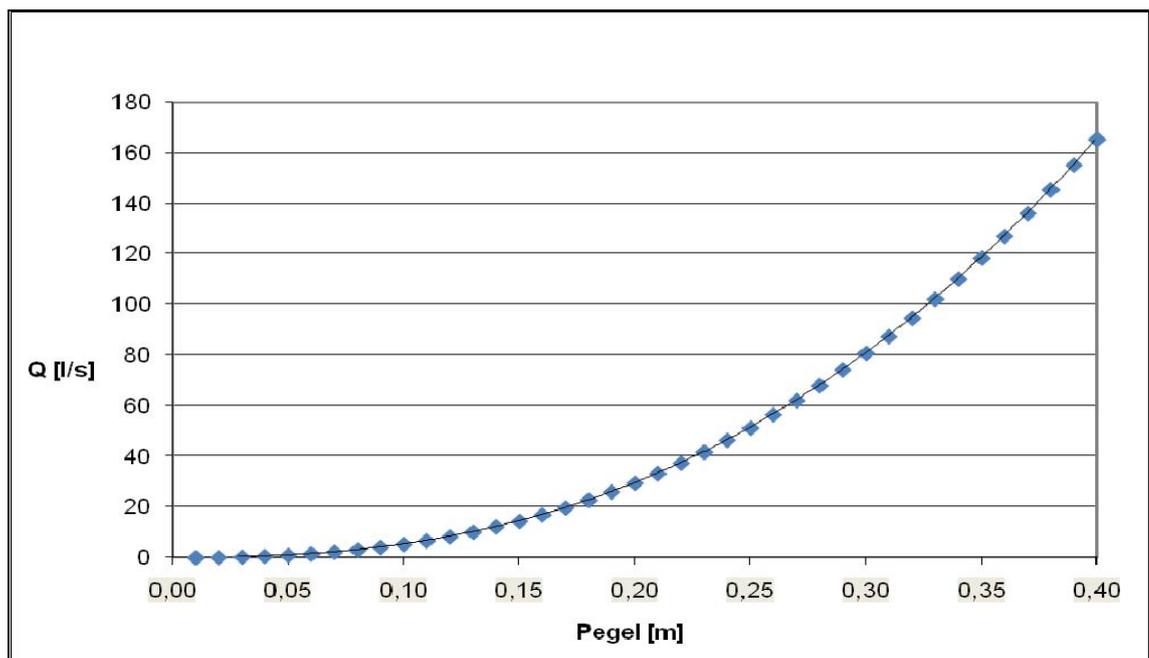


Abb. 43 Wasserspiegelhöhe-Durchfluss-Beziehung

Der Pegelschlüssel für ein Dreieckswehr mit einem Öffnungswinkel α von 30° und einem Überfallbeiwert von 0,597 lautet:

$$Q = 782,63 * h^{2,4884}$$

10 Messung der Bodenfeuchte

Bei Rutschungen handelt es sich um Bewegungen zusammenhängender Bodenmassen, welche von Gleitflächen begrenzt werden. Sie werden meist durch zu hohem Wassergehalt ausgelöst. Je nach der Tiefe der Gleitfläche unterscheidet man Rasenrutschungen von flachen und tiefen Rutschungen.

Durch Messung der Bodenfeuchte kann man zum einen das Vordringen der Feuchtefront in den Boden beobachten. Kann das Wasser nicht in tiefere Schichten vordringen, verringern sich die Probleme bei der Ableitung von Regenwasser aus dem Rutschbereich. Zum anderen sind bei Rasenrutschungen, bei denen eine geschlossene Vegetationsdecke bei steilem Gelände in einer Tiefe von etwa 20 bis 40 cm abrutscht, und bei flachen Rutschungen die Feuchtemessungen von Interesse. Weiters hat die Bodenfeuchte auch Auswirkungen auf das Anwachsen der den Hang stabilisierenden Vegetation. Zum Messen der Feuchtigkeit im Oberboden gibt es verschiedene Möglichkeiten:

10.1 Wassergehaltsbestimmung

- Stechzylinder zur Bestimmung des Wasseranteils: Dabei wird mit einem Stechzylinder ein definiertes Probevolumen aus dem Boden entnommen und gewogen. Nach Trocknen der Probe bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz und wiederholter Wägung, kann man den Wasseranteil berechnen. [19]

$$w = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (10.1)$$

m_1 = Masse vor der Trocknung

m_2 = Masse nach der Trocknung

V = Volumen des Stechzylinders

- Massenwassergehalt mittels einer gestörten Probe: Dabei wird dem Boden eine Probe entnommen und gewogen. Nach Trocknung und weiterer Wägung kann man den Massenwassergehalt bestimmen. [17]

$$m = \frac{m_w}{m_2} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \quad (10.2)$$

- Radioaktive Methode: Eine in einem Gerät integrierte Quelle sendet Neutronen aus, deren Geschwindigkeit beim Auftreffen auf Wasserstoffatome vermindert wird. Die Neutronen werden von einem Detektor erfasst und durch einen dem Wassergehalt proportionalen Zahlenwert abgebildet. [17]
- Time Domain Reflectometry (TDR): Da die relative Dielektrizitätszahl von Wasser größer ist als von anderen Bodenbestandteilen, ist es möglich, die Bodenfeuchte zu bestimmen. Die Laufzeitmessung erfolgt durch Einbringen von drei parallelen Leitstäben in den Boden und durch Messung der Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Boden. Nach Messung des Spannungsverlaufes kann die Dielektrizität und der Wassergehalt bestimmt werden. [17]

- Frequency Domain Reflectometry (FDR): Auch bei diesem Verfahren wird nach Messung der Dielektrizität auf den Wassergehalt geschlossen. [19]
- Kalziumkarbidmethode: Dabei wird die Probe in einem geschlossenen Gefäß mit Kalziumkarbid vermischt. Das Wasser der Probe reagiert mit dem Kalziumkarbid zu Acetylen gas. Je mehr Wasser in der Probe ist, desto größer steigt der Druck. Durch Messung des Druckes im Gefäß kann auf den Wassergehalt geschlossen werden. [17]
- Methylalkoholmethode: Zuerst wird die Masse der Probe und des Behälters bestimmt. Danach wird die Probe mit Alkohol versetzt, in Brand gesetzt und wiederholt gewogen. Dies geschieht so lange bis die Wägung vor und nach dem Abbrennen konstant bleibt. Durch Wägung der Probe mit Behälter vor und nach dem Abbrennen kann auf dem Wassergehalt geschlossen werden. [17]
- Röntgen- Computer- Tomographie: Durch Messung der Abschwächung eines kollimierten Röntgenstrahls von Detektoren wird mit Hilfe eines Computers die Rekonstruktion einer Tomographie Ebene durchgeführt und der Wassergehalt bestimmt. [17]
- Nuclear Magnetic Resonanz: Die Wassergehaltsbestimmung erfolgt unter Verwendung eines Magnetfeldes wobei die Strahlungsabschwächung im Bereich der Radio-Frequenz durch Wasserstoffprotonen gemessen wird. [17]

10.2 Bestimmung der Saugspannung

Da die Saugspannungen im Boden, mit der das Wasser gegen die Schwerkraft im Boden festgehalten wird, vom Füllungsgrad der Poren mit Wasser abhängt, ist es möglich, mit anderen Methoden den Wassergehalt abzuschätzen. Da jedoch die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt nicht eindeutig ist und dadurch der Wassergehalt nur abgeschätzt werden kann, eignen sich diese Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts nur bedingt. Auch zur Messung der Saugspannung gibt es verschiedene Methoden, von denen die bekanntesten kurz beschrieben werden:

- Tensiometer: Bei diesem Verfahren haben das Bodenwasser und das Wasser im Tensiometer über eine poröse Keramik Kontakt. Dadurch wird die Bodenwasserspannung direkt auf den Druckaufnehmer übertragen und ein entsprechendes Signal bezogen auf den atmosphärischen Referenzdruck geliefert. [17]
- Gipsfeuchtemesser (Blockmethode): Die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden ist abhängig vom Wassergehalt des dazwischenliegenden Bodenmaterials. Um das Problem des Salzgehaltes im Bodenwasser in Griff zu bekommen, werden die Elektroden in einem Gipsblock vergossen. Das Wasser im Gipsblock ist stets mit Gips vermischt. Der Gipsblock misst die Leitfähigkeit der Gipslösung zwischen den Elektroden. Die im Block vorhandene Wassermenge ist eine Folge des Potentialgleichgewichts Block und Umgebung. [17]

10.3 Bodenfeuchtigkeit Sensor Stevens Hydra Probe

Der Bodenfeuchtigkeit Sensor Hydra Probe ist ein Multi-Parameter-Sensor, der nicht nur die Bodenfeuchte sondern auch die Boden- Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit misst. Mit dem nur 12,4 cm langen Sensor, der einen Durchmesser von 4,2 cm hat, ist es möglich, sehr genaue Messungen der Bodenfeuchte zu machen. Weitere Vorteile dieses Typs sind, dass der Sensor schnell auf sich ändernden Bedingungen reagiert, und keine Kalibrierung erforderlich ist. Bei der Messung werden ein bzw. mehrere Sensoren, die durch Kabeln mit dem Gerät zum Ablesen der Messwerte verbunden sind, in unterschiedlichen Tiefen in der Erde vergraben. [23]

Technische Daten	Bereich	Genauigkeit
Dielektrizitätskonstante	1-65 wobei 1=Luft, 78=destilliertes Wasser	$\pm 1,5\%$
Bodenfeuchtigkeit	Von trocken bis vollständig gesättigt	$\pm 0,03$
Leitfähigkeitsmessung	0 bis 20 dS/m \emptyset	$\pm 2\%$ oder 0,002dS/m
Temperatur	10°C- 65°C	$\pm 0,6^\circ\text{C}$

	Durchmesser	Länge
Sensing Band	3cm	5,7cm

Abb. 44 Technische Daten

- Betriebstemperatur: bis 65°C
- Länge: 12,4cm
- Durchmesser: 4,2cm
- Gewicht: 200gr (nur Sonde)
- Ausgangssignal: SDI-12



Abb. 45 Bodenfeuchtigkeit Sensor

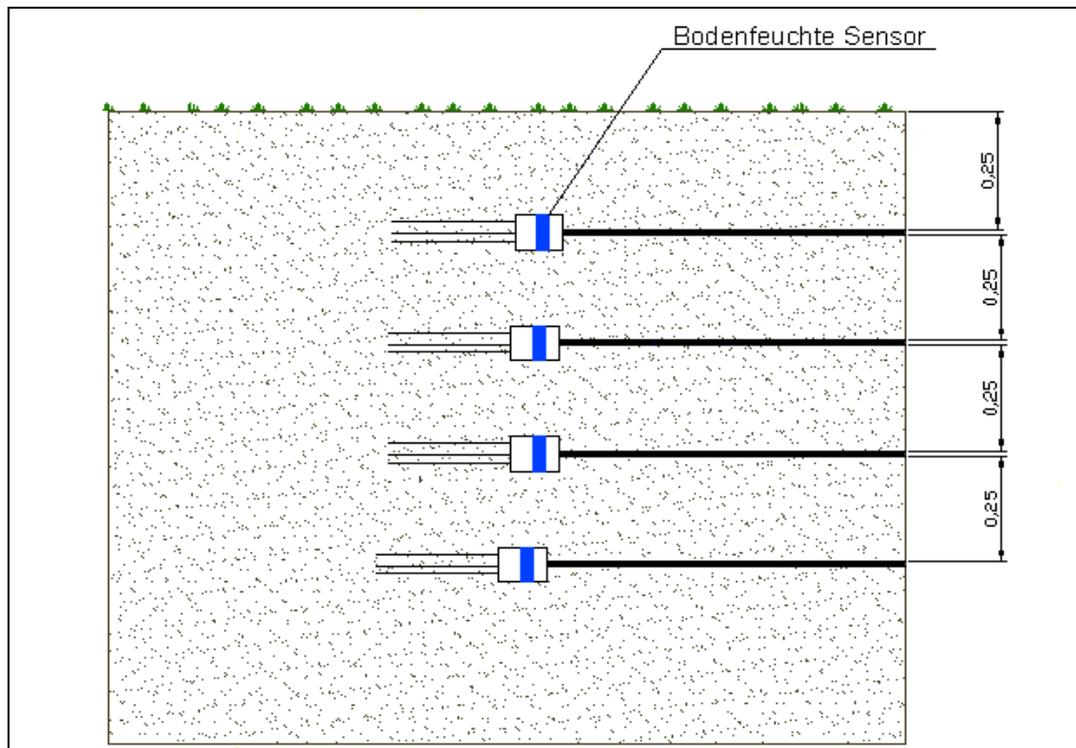


Abb. 46 Bodenfeuchtigkeit Sensoren eingebaut in verschiedenen Tiefen

11 Ermittlung des Durchflusses an einem Profil

Um den Durchfluss an einem offenen Ableitungsgraben, welcher nach Regenereignissen wie ein natürliches Gerinne Wasser führt, zu berechnen, muss der Pegelschlüssel am Querschnitt bekannt sein. Da jedoch der Pegelschlüssel bei natürlichen Gerinnen keine konstante Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss darstellt, ist die Ermittlung relativ schwierig. Nach Hochwasserereignissen kommt es aufgrund von Erosionen und Anlandungen zu ständigen Veränderungen des Pegelprofils und damit auch zu Veränderungen des Pegelschlüssels.

Die Ermittlung des Pegelschlüssels ist relativ zeitaufwendig. Dazu soll der Abfluss unter möglichst stationären Bedingungen bei unterschiedlichen Wassermengen gemessen werden. Weiters soll das Pegelprofil über einen möglichst langen Zeitraum unverändert bleiben.

Treten instationäre Abflussverhältnisse auf, kann es zu einer Abflusshysterese, oder auch Doppelwert-Abflusskurve genannt, kommen. Dabei treten bei demselben Wasserstand unterschiedliche Abflussmengen auf. Der höhere Wert gilt aufgrund der Veränderung des Gefälles für steigende Wasserstände und der niedrigere Abflusswert für fallende Wasserstände. [18]

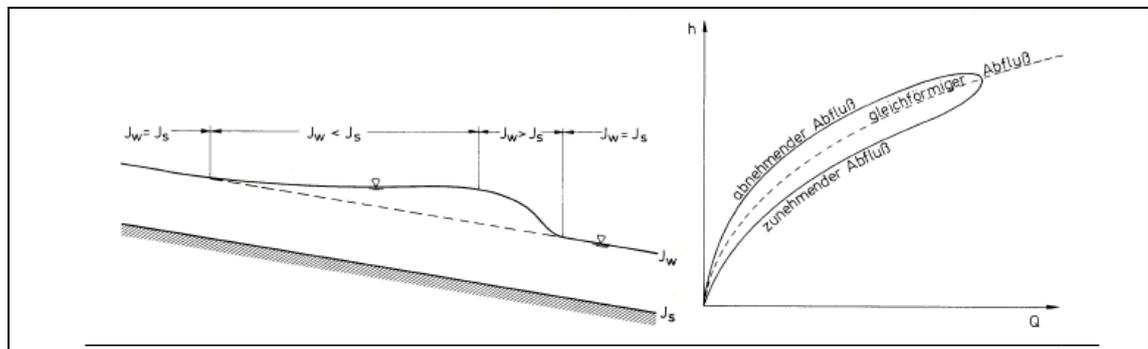


Abb. 47 Abflusshysterese (aus[18], 114)

Die Wasserstandsmessung soll auch bei offenen Ableitungsgräben wie bei den Rohrleitungen und den Dreieckswehren mittels Ultraschallsensoren erfolgen.

12 Beschreibung der Pilot/ Probestation

Um das Messverfahren mittels Ultraschallsensoren unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und die Datenübertragung zu testen, wurde bei den Rohrleitungen am Gschlifgraben eine Pilotstation aufgebaut. Dabei wurde ein Gerüst aus Eisenrohren, welches vor Ort verschraubt wurde, aufgestellt und darauf folgende Bestandteile befestigt:

- Datenlogger mit Router zum Einprogrammieren der Formel für die Wasserspiegelhöhe-Durchfluss-Beziehung (Pegelschlüssel) und zur ständigen Übertragung der Messergebnisse über das GSM- Netz.
- Regenmesser um laufend Niederschlagsdaten zu erhalten.
- Eine Web-Cam, welche in gewissen Abständen Bilder macht.
- Solarpaneele, um die Energieversorgung der zuvor erwähnten Bestandteile zu sichern.
- Ultraschallsensoren (Typ Vegason 61 und Typ UC 500).

In der folgenden Abbildung ist ein Bild der in regelmäßigen Zeitabständen übertragenen Messdaten dargestellt. Im unterem Diagramm werden die von den zwei Ultraschallsensoren übertragenen Durchflüsse in l/s, im mittleren Diagramm die Niederschlagshöhen in mm, im Diagramm oben links der Batteriestatus in Volt und oben rechts die Füllhöhen mit den berechneten Abflüssen dargestellt.

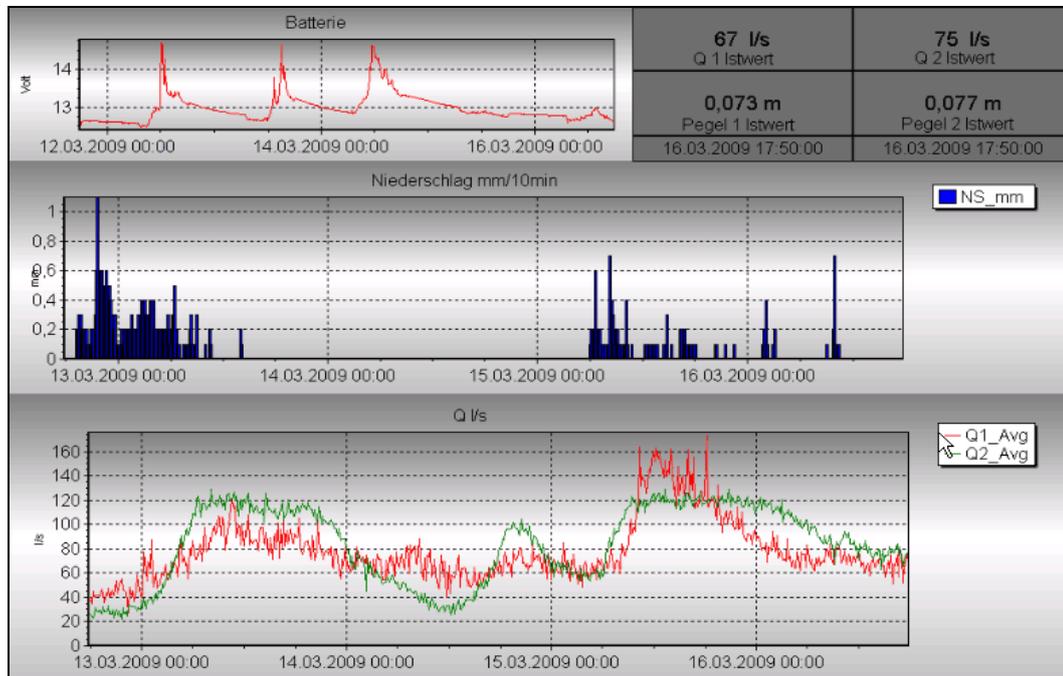


Abb. 48 Messdaten der Pilotstation vom 13.03.2009 bis zum 16.03.2009



Abb. 49 Probe/ Pilotstation am Gschlifegraben



Abb. 50 Ultraschallsensor Vegason 61 eingebaut am Gschlifegraben

Durch laufende Beobachtung der übertragenen Daten konnten auch einige Probleme bei der Messung mittels Ultraschallhöhenmesssensoren festgestellt werden, die in der Folge kurz erläutert werden:

- Negative Messwerte bei sehr niedrigen Füllhöhen:

Beim Einbau der Probestation vor Ort wurde bereits die Formel des Pegelschlüssels in den Datenlogger einprogrammiert. Man entschied sich für ein Polynom der 5. Ordnung. Dabei fiel auf, dass bei sehr niedrigen Füllhöhen negative Werte berechnet wurden. Nach genauer Betrachtung der Formel erkannte man, dass sich die Trendlinie im Bereich zwischen 0 und etwa 2,5 cm im negativen Bereich befindet.

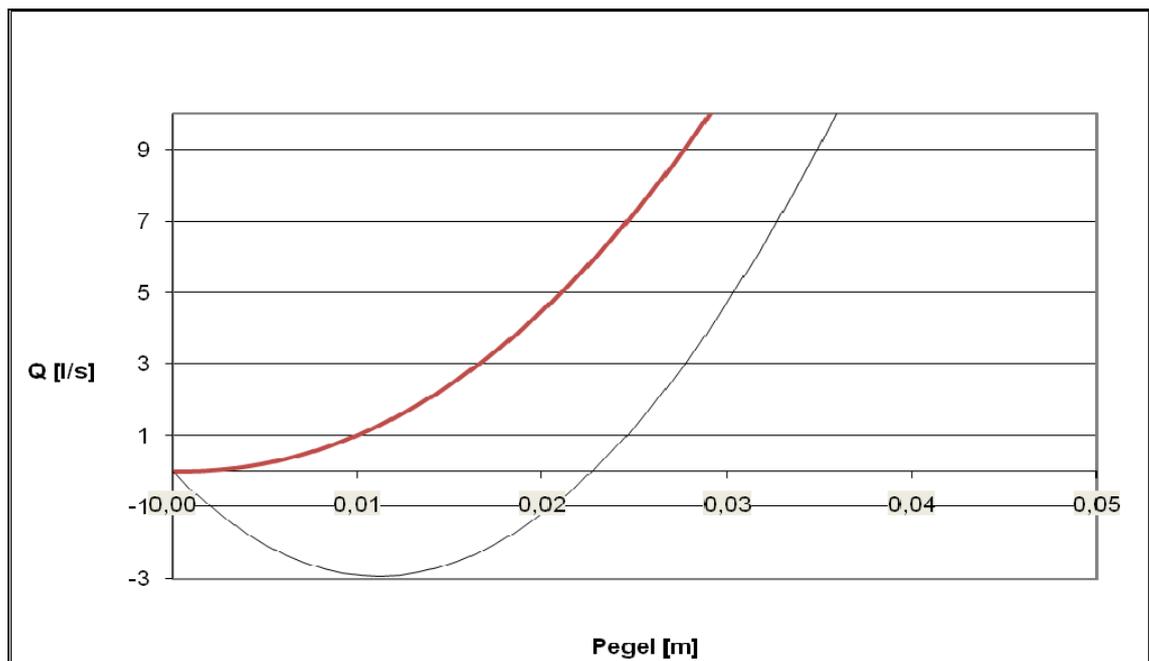


Abb. 51 Trendlinie (grau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot)

Dem konnte man entgegenwirken, indem man sich anstelle der Trendlinie der Form Polynom 5. Ordnung für eine Trendlinie der Form 6. Ordnung entschied. Als Ergebnis erhielt man positive Werte im unteren Bereich. Die zuvor beschriebene Abweichung zwischen tatsächlichem Pegelschlüssel und Trendlinie konnte jedoch nicht verbessert werden.

Nach Betrachtung der Trendlinien verschiedener Ordnung erkannte man, dass die Trendlinie der Form Polynom 6. Ordnung die geringsten Abweichungen zu den berechneten Werten zeigt. Die Kurve startet bei Null, steigt etwas steiler und nähert sich bei größeren Füllhöhen wieder an die Kurve mit den berechneten Durchflüssen an. Durch die Änderung der Trendlinie auf Polynom der 6. Ordnung konnte, wie bereits zuvor beschrieben, die Genauigkeit etwas verbessert werden und liefert als Ergebnisse stets positive Werte.

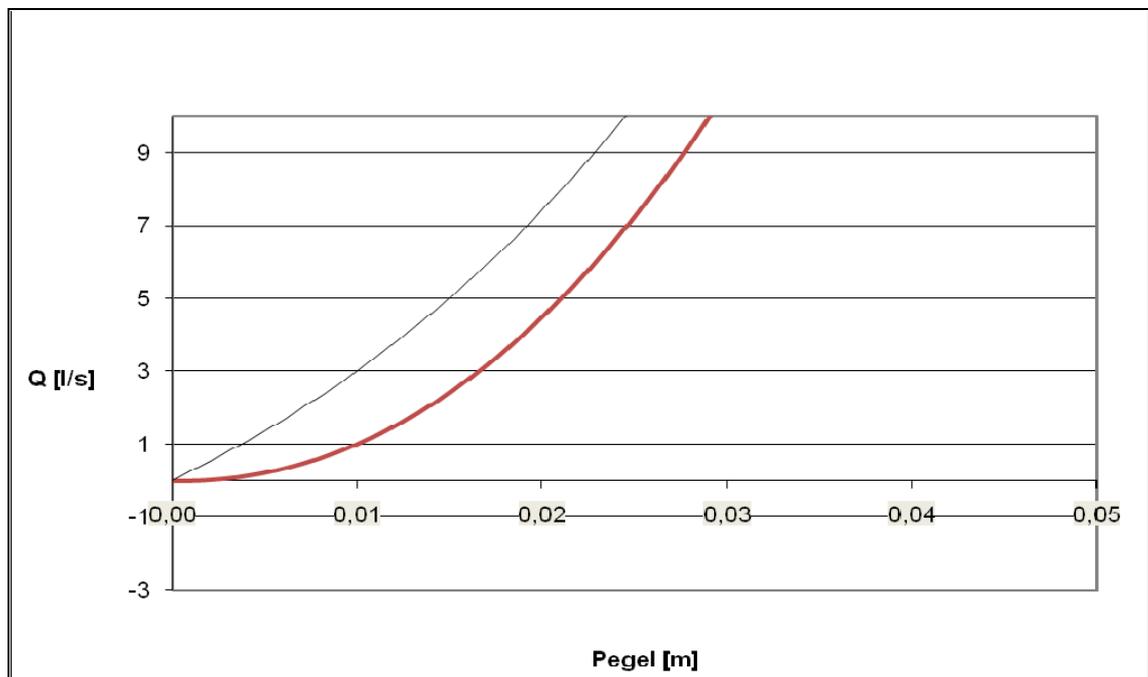


Abb. 52 Trendlinie (grau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot) als Polynom der 6. Ordnung

- Unrealistisch große Durchflüsse bei sehr großen Füllhöhen

Nach Starkregenereignissen bzw. nach länger andauernden Regenereignissen erkannte man, dass bei sehr großen Füllhöhen zwar der Wasserstand im Rohr richtig gemessen wurde, die Berechnung der Durchflüsse jedoch zu Problemen führte. Nach einsetzen der Füllhöhen von 1 cm bis 50 cm in den Pegelschlüssel wurde ersichtlich, dass die Abweichung zu den berechneten Werten mit steigender Füllhöhe anstieg. Da die Trendlinie auch im oberen Bereich relativ gut mit den berechneten Werten übereinstimmte, konnte der Fehler nur an der Genauigkeit liegen. Nach Erhöhung der Genauigkeit auf 10 Nachkommastellen konnten diese Probleme behoben werden.

Die folgende Formel stellt einen Pegelschlüssel der Form Polynom der 6. Ordnung bei 6° Neigung und Erhöhung der Genauigkeit auf 10 Nachkommastellen dar.

$$\begin{aligned}
 Q = & -808389,824050903 * h^6 + 1081711,95236206 * h^5 \\
 & - 541888,071716309 * h^4 + 105014,218833923 * h^3 \\
 & + 4237,0659947395 * h^2 + 247,8712072372 * h
 \end{aligned}
 \quad (12.1)$$

In der nachfolgenden Tabelle wurde eine Trendlinie der Form Polynom 6. Ordnung mit einer Genauigkeit von 10 Nachkommastellen und eine Trendlinie der Form Polynom 6. Ordnung mit einer Genauigkeit von 2 Nachkommastellen nachgerechnet. Dabei ist zu erkennen, dass die Werte in der Tabelle bei einer Genauigkeit von 10 Nachkommastellen mit den Werten im Diagramm deutlich besser übereinstimmen als bei einer Berechnung des Pegelschlüssels mit einer Genauigkeit von zwei Nachkommastellen.

Polygon 6. Ordnung mit 10 Nachkommastellen

h (cm)	Q (l/s)	h (cm)	Q (l/s)
0,01	3,00	0,26	755,80
0,02	7,41	0,27	801,94
0,03	13,67	0,28	848,23
0,04	22,14	0,29	894,61
0,05	33,05	0,30	941,03
0,06	46,59	0,31	987,45
0,07	62,84	0,32	1033,81
0,08	81,85	0,33	1080,06
0,09	103,59	0,34	1126,11
0,10	127,99	0,35	1171,89
0,11	154,96	0,36	1217,27
0,12	184,36	0,37	1262,11
0,13	216,04	0,38	1306,21
0,14	249,83	0,39	1349,35
0,15	285,54	0,40	1391,22
0,16	323,00	0,41	1431,47
0,17	362,01	0,42	1469,66
0,18	402,39	0,43	1505,26
0,19	443,96	0,44	1537,66
0,20	486,56	0,45	1566,12
0,21	530,02	0,46	1589,78
0,22	574,21	0,47	1607,66
0,23	618,99	0,48	1618,62
0,24	664,25	0,49	1621,35
0,25	709,88	0,50	1614,38

Polygon 6. Ordnung mit 2 Nachkommastellen

h (cm)	Q (l/s)	h (cm)	Q (l/s)
0,01	3,01	0,26	3137,11
0,02	7,49	0,27	3589,71
0,03	14,07	0,28	4094,83
0,04	23,38	0,29	4657,26
0,05	36,09	0,30	5282,16
0,06	52,88	0,31	5974,97
0,07	74,51	0,32	6741,54
0,08	101,77	0,33	7588,02
0,09	135,53	0,34	8520,96
0,10	176,75	0,35	9547,30
0,11	226,48	0,36	10674,36
0,12	285,87	0,37	11909,87
0,13	356,20	0,38	13261,98
0,14	438,87	0,39	14739,27
0,15	535,44	0,40	16350,77
0,16	647,61	0,41	18105,95
0,17	777,25	0,42	20014,76
0,18	926,41	0,43	22087,64
0,19	1097,34	0,44	24335,48
0,20	1292,47	0,45	26769,72
0,21	1514,47	0,46	29402,29
0,22	1766,22	0,47	32245,64
0,23	2050,85	0,48	35312,79
0,24	2371,74	0,49	38617,27
0,25	2732,52	0,50	42173,21

Tabelle 5 Vergleich der nachgerechneten Werte

13 Zusammenfassung und Ausblick

Am Ende des Jahres 2007 kam es am Gschlifgraben zu Massenbewegungen, so dass die darunterliegenden Siedlungen und Infrastruktureinrichtungen stark gefährdet waren. Durch die Umsetzung von Maßnahmen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung, welche unter anderem die Entwässerung des Hanges, die Massenabfuhr aus gefährdeten Rutschbereichen, die Aufschließung und Errichtung von Notstraßen sowie die Wiederaufforstung umfassen, konnten diese Massenbewegungen weitgehend verringert werden. Der letzte Schritt ist nun die Errichtung eines umfangreichen Monitoring und Frühwarnsystems.

Ziel dieser Arbeit ist nun, die hydrologischen Verhältnisse durch Errichtung von Messstationen an verschiedenen Stellen möglichst genau zu erfassen, um zum einen mit den gewonnenen Erkenntnissen und den laufend übermittelten Messdaten Aussagen über das zukünftige Verhalten des Hanges tätigen zu können. Zum anderen soll die dauernde Funktionsfähigkeit der Entwässerung überprüft werden, und falls Schäden auftreten, diese so schnell wie möglich erkannt und behoben werden. Das ist jedoch mit einigen Problemen verbunden. Das steile Gelände, die ständigen Massenbewegungen, die klimatischen Bedingungen und vieles mehr erschweren dieses Vorhaben. Nach Auswahl des für die jeweiligen Bedingungen am besten geeigneten Messverfahrens, Ermittlung des Pegelschlüssels und dem Einbau einer Messstation im Labor bzw. später auch am Gschlifgraben, konnte das Verfahren zur Durchflussmessung bei Rohrleitungen mittels Ultraschallhöhenmess-Sensoren getestet werden. Nach umfangreicher Literaturstudie und Berechnung des Pegelschlüssels konnte bei Rohrleitungen auch die bei steilem Gelände auftretende Lufteinmischung berücksichtigt werden. Beim Vergleich des Pegelschlüssels mit Berücksichtigung der Lufteinmischung und des Pegelschlüssels ohne Berücksichtigung der Lufteinmischung konnten vor allem bei großen Füllhöhen ein Unterschied bei den Durchflüssen erkannt werden. Weiters konnten auch einige Probleme, die durch den Betrieb der Probestation erkannt wurden, behoben werden. Zum Beispiel konnte durch Einstellen der Genauigkeit auf 10 Nachkommastellen beim Pegelschlüssel die Abweichungen von den berechneten Füllhöhen minimiert werden. Auch die nicht möglichen negativen Durchflüsse, die bei geringeren Füllhöhen berechnet wurden, konnten durch die Erhöhung der Trendlinie von Polynom 5. Ordnung auf Polynom 6. Ordnung ausgeschaltet werden

Im Hangbereich, wo keine Rohrleitungen vorhanden sind, sollen zur Ermittlung der Abflüsse Dreieckswehre eingebaut werden. Dabei sollen die Wasserspiegelhöhen mit dem bereits in den Rohrleitungen verwendeten Verfahren zur Durchflussmessung mittels Ultraschallhöhenmesssensoren gemessen und die Abflüsse wiederum mittels einem Pegelschlüssel berechnet werden. Bei diesem Verfahren kann aufgrund der Anpassung der Geometrie des Thomsonwehres an die zu erwartenden Durchflüsse und der wesentlich geringeren Fließgeschwindigkeiten im Anströmbereich (strömender Zufluss) mit genauen Ergebnissen gerechnet werden. Unumgänglich ist der Einbau eines Rechens zum Abhalten von Schwimmstoffen, da es sonst zu Verklausungen kommen kann.

Um die Verhältnisse im Oberboden zu erfassen, soll eine Station zur Messung der Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen eingebaut werden.

Bei allen zuvor beschriebenen Messmethoden ist es wichtig, die Ergebnisse richtig einzuschätzen. Als Beispiel sei die Durchflussmessung bei den Rohrleitungen angeführt. Aufgrund der Rohrleitungslänge des steilen Geländes, des ständig wechselnden Gefälles, der Ungenauigkeiten bei der Messung mittels Ultraschallsensoren und vieler anderer Probleme, die die Messung möglicherweise verfälschen, kann der Durchfluss nicht exakt bestimmt werden. Vor allem bei größeren Durchflüssen werden die Messergebnisse zunehmend ungenauer. Auch bei Auftreten von unrealistischen Messwerten, wie minimalen Durchflüssen nach Starkregenereignissen oder extrem hohen Durchflüssen, kann auf Probleme bei den

Messungen geschlossen werden und sollen zur Kontrolle Anlass geben. Mit dem Wissen, dass bei den erhaltenen Messwerten eine gewisse Ungenauigkeit berücksichtigt werden muss, sollte es möglich sein, die Ergebnisse richtig einzuschätzen.

14 Literaturverzeichnis

- [1] BERNHARD, H., & BRETSCHEIDER, H. (1982). *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. Hamburg: Parey- Verlag.
- [2] BOLLRICH, G. (1996). *Technische Hydromechanik 1*. Berlin, München: Verlag für Bauwesen.
- [3] BONFING, K. (1987). *Technische Durchflussmesstechnik: unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmessverfahren*. Essen: Vulkan Verlag.
- [4] ERB, H. G. (1997). *Durchflussmesstechnik für die Wasser- und Abwasserwirtschaft, Vulkan Verlag, Essen*. Essen: Vulkan Verlag.
- [5] FIEDLER, O. (1992). *Strömungs- und Durchflussmesstechnik*. München: Oldenburg Verlag.
- [6] FRANKE, P. (1974). *Abriss der Hydraulik 4, Abfluß über Wehre und Überfälle*. Technische Universität München: Bauverlag Wiesbaden und Berlin.
- [7] FRANKE, P.-G. (1971). *Abriss der Hydraulik 6- Stationär gleichförmiger Abfluss in Freispiegelgerinnen, Technische Hochschule München*. München: Technische Hochschule München.
- [8] Fürst, J. (. (2009). *Gewässerkunde und Hydrometrie, Vorlesung und Übung* . Wien.
- [9] HAGER, W. (1994). *Abwasserhydraulik, Theorie und Praxis*. Zürich: Springer Verlag.
- [10] HAGER, W. (1982). *Die Hydraulik von Verteilkanälen, Teil 1: Theorie der Verteilkanäle*. Zürich.
- [11] HARTUNG, F. (1968). *Der Abfluss in Schussrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme*. München/ Obernahr.
- [12] Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, U. f. *Hydraulik 1, Teil 1*. Wien.
- [13] Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, U. f. *Hydraulik 1, Teil 2*. Wien.
- [14] KAMMERER, G. (2003). *Hydraulik Übungen*. Wien.
- [15] KLOPP, K. (kein Datum). *Kleinstwasserkraft Klopp*. Abgerufen am 2. April 2009 von http://www.kleinstwasserkraft.de/Docs/Thomson_Messwehr.pdf
- [16] LECHER, K. (2001). *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. Berlin: Parey- Verlag.
- [17] LOISKANDL, W. ,.-S. (2008). *Bosenphysik (Skriptum)*. Wien.
- [18] NACHTNEBEL, H. (2004). *Gewässerkunde, Hydrometrie und Hydroinformatik Studienblätter*. Wien.
- [19] NACHTNEBEL, H. (2003). *Gewässerplanung und Konstruktiver Wasserbau*. Wien.
- [20] PREGL, O. (2003). *Geotechnik 1*. Wien: Eigenverlag des Institutes für Geotechnik.
- [21] RICHTER, H. (1954). *Rohrhydraulik, Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung*. Berlin: Springer- Verlag.
- [22] RÖSSERT, R. (1992). *Hydraulik im Wasserbau*. München, Wien: Oldenburg- Verlag.
- [23] Stevens Water Monitoring Systems. (kein Datum). Abgerufen am 12. 06 2009 von Stevens- Hydra Probe II Soil Moisture Sensor (SDI-12 / RS485)- Datasheet: www.stevenswater.com/catalog/stevensProduct.aspx?SKU='93640'

- [24] Telemetry, A. (kein Datum). http://www.adcon.at/english/produkte_sensoren_bodenfeuchte_hydraprrobe_en.html. Abgerufen am 28. Mai 2009 von <http://www.adcon.at>
- [25] *Ultraschall- Durchflussmesser- Wikipedia*. (kein Datum). Abgerufen am 2. 10 2008 von wikipedia.
- [26] VOLKART, P. (1978). *Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, Mitteliungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- [27] www.luconda.com/artikeldetails/produktinfos/2006872-1-Pepperl-Fuchs-104092.pdf. (kein Datum). Abgerufen am 14. 01 2009
- [28] www.vega.com/downloads/BA/28775-DE.PDF. (kein Datum). Abgerufen am 14. 01 2009

15 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Geographische Lage vom Gschlifgraben (doris.ooe.gv.at)	8
Abb. 2. Methodik und Aufbau der Arbeit	10
Abb. 3 Vergleich zwischen laminarer und turbulenter Strömung a) Geschwindigkeitsprofil b) Geschwindigkeitsschwankungen im Punkt b; $u_p \approx v_m$ (aus[12], 43).....	14
Abb. 4. Klassifizierung der Durchflussmessgeräte (aus [4], 108)	17
Abb. 5. Grundriss und Längenschnitt eines Venturgerinnes (aus [4], 127)	18
Abb. 6 Vollkommener (links) und unvollkommener Überfall (rechts) (aus[13], 40)	20
Abb. 7 Scharfkantiges Wehr (aus[19], 3.24)	21
Abb. 8 Dreieckswehr nach Thomson (aus[13], 49).....	22
Abb. 9 Abflusszustände beim breitkronigem Wehr (a. das lange Wehr, b. das eigentlich breitkronige Wehr, c. kurzes Wehr, d. das praktisch scharfkantige Wehr) (aus [19], 3.26)	23
Abb. 10 Hydrometrischer Flügel (aus [8], 119)	28
Abb. 11 Darstellung einer möglichen Anordnung von Messstationen am Gschlifgraben.....	34
Abb. 12 Einmündung eines Pecor- Schwerlastrohres aus PEHD in den Traunsee	35
Abb. 13 Verzweigung der beiden nördlichen Stränge	36
Abb. 14 Überblick über das Rohrleitungssystem am Gschlifgraben	36
Abb. 15 Durchflussmessung mittels Höhenmessverfahren	37
Abb. 16 Ultraschallsensoren eingebaut in einem Rohr mit 500mm Durchmesser	38
Abb. 17 Ultraschallsensor Vegason 61 [28].....	38
Abb. 18. Nicht erfassbare Füllhöhe.....	39
Abb. 19 Ultraschallsensor UC500-30GM-IUR2-V15 [27].....	40
Abb. 20. Teilgefülltes Kreisrohr, Bezeichnungen.....	44
Abb. 21. Durchflüsse abhängig von der Füllhöhe im Rohr	45
Abb. 22. Trendgerade mit Pegelschlüssel (als Polynom 5 Ordnung).....	45
Abb. 23 Pegelschlüssel berechnet mit Formeln der Rohrhydraulik.....	48
Abb. 24 Einfluss der Neigung der Rohrleitung auf den Pegelschlüssel	49
Abb. 25 Zonen der Luftaufnahme (aus [26], 51).....	51
Abb. 26 Luftkonzentration in Abhängigkeit von der Boussinesq- Zahl (aus [26], 199).....	52
Abb. 27 Grafik zur Ermittlung des Faktor f_z (aus [26], 209)	54
Abb. 28 Mittlere Gemischquerschnittsfläche (aus [26], 164)	55
Abb. 29 Pegelschlüssel ohne Berücksichtigung der Lufteinmischung ($l= 6^\circ$, $d=0,5m$)	56
Abb. 30 Pegelschlüssel mit Berücksichtigung der Lufteinmischung ($l= 6^\circ$, $d=0,5m$)	56

Abb. 31 Vergleich der Schlüsselkurve ohne Berücksichtigung der Luftaufnahme (schwarz) und mit Berücksichtigung der Luftaufnahme (grün) ($l=6^\circ$, $d=0,5m$).....	57
Abb. 32 Trendlinie (blau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot).....	58
Abb. 33 Trendlinie (blau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot).....	58
Abb. 34 Gegenüberstellung zweier Profile zur Herleitung der zuvor angeführten Differentialgleichung [9].....	59
Abb. 35 Stau- und Senkkurven mit Bezeichnungen (aus [12], 28).....	60
Abb. 36 Einbringen eines Gegenstandes zur Kalibrierung.....	63
Abb. 37 Dreieckswehr mit künstlichem Zu- und Ablauf.....	64
Abb. 38 Dreieckswehr nach Thomson (aus[13], 49).....	65
Abb. 39 Mögliche Ausbildung eines Dreieckswehres in einem Ableitungsgraben.....	66
Abb. 40 Dreieckswehr mit scharfkantiger Kronenform.....	66
Abb. 41 Thomson bzw. Dreieckswehr (Rot).....	67
Abb. 42 Beziehung zwischen Wasserspiegelhöhe und Durchfluss bei einem Dreieckswehr....	68
Abb. 43 Wasserspiegelhöhe-Durchfluss-Beziehung.....	68
Abb. 44 Technische Daten.....	71
Abb. 45 Bodenfeuchtigkeit Sensor.....	71
Abb. 46 Bodenfeuchtigkeit Sensoren eingebaut in verschiedenen Tiefen.....	71
Abb. 47 Abflusshysterese (aus[18], 114).....	72
Abb. 48 Messdaten der Pilotstation vom 13.03.2009 bis zum 16.03.2009.....	73
Abb. 49 Probestation am Gschlifgraben.....	73
Abb. 50 Ultraschallsensor Vegason 61 eingebaut am Gschlifgraben.....	74
Abb. 51 Trendlinie (grau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot).....	74
Abb. 52 Trendlinie (grau) und berechnete Wasserstands- Durchflussbeziehung (rot) als Polynom der 6. Ordnung.....	75

16 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Physikalische Eigenschaften von Wasser (aus [12] ,101)	13
Tabelle 2. Überfallsbeiwerte nach Poleni (aus [13], 39)	20
Tabelle 3 Formbeiwerte für offene Gerinne nach Leske (aus [2], 252)	42
Tabelle 4. Ausschnitt aus Excel Berechnung zur Bestimmung des Pegelschlüssels.....	44
Tabelle 5 Vergleich der nachgerechneten Werte	76