

**Erfassung hydromorphologischer
Vorgänge bei Hochwasser mit Hilfe
von ADCP-Messungen**

von

Katharina Fiedler

Dr.-Ing. Katharina Fiedler, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau
und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München



Technische Universität München

Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft

80290 München, Arcisstraße 21
Germany

Tel.: 089 / 289 23161
Fax: 089 / 289 23172
E-Mail: wabau @ bv.tum.de

Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Oskar von Miller - Institut)

82432 Obernach, Walchensee
Germany

Tel.: 08858 / 9203 0
Fax: 08858 / 9203 33
E-Mail: obernach @ bv.tum.de

ISSN 1437-3513

ISBN 978-3-940476-12-8

Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für
Wasserbau und Wasserwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Peter Rutschmann
Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München

Druck und Einband: Meissner Druck GmbH, Oberaudorf

Kurzfassung

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung numerischer Modelle und den damit steigenden Ansprüchen an Naturmessdaten zur Eichung dieser Modelle sowie dem Inkrafttreten neuer Richtlinien und Gesetze (z. B. EU-WRRL) gewinnt die messtechnische Erfassung hydromorphologischer Prozesse in Fließgewässern immer mehr an Bedeutung. Die ADCP-Technik stellt hier eine zukunftssträchtige Möglichkeit dar. Sie wird bereits seit Jahren erfolgreich zur Abflussmessung eingesetzt, die Auswertung der erfassten Daten in Hinblick auf Geschiebegeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen hingegen ist noch nicht ausreichend erforscht und noch mit Unsicherheiten behaftet.

Die vorliegende Arbeit behandelt die physikalischen Grundlagen der verwendeten Messtechnik und dokumentiert die Ergebnisse mehrerer ADCP-Messungen an zwei bayerischen Flüssen während Hochwasser. Im Zuge der Messungen konnte neben der Erfassung der Fließgeschwindigkeiten auch die Veränderung der Sohlhöhen während großer Abflüsse erfolgreich nachgewiesen werden. Des Weiteren war es möglich, die Geschiebegeschwindigkeiten sowie deren Verteilung über die Breite des Gewässers zu erfassen. Die Auswertung der ADCP-Daten in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen brachte sehr interessante Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen den vom ADCP aufgezeichneten Rückstreuinformationen und der gewünschten Messgröße, zeigte aber auch noch großen Forschungsbedarf auf.

Abstract

Due to the ongoing development of numerical models and growing demands on measured data for calibration as well as new directives and laws (e.g. EU-WRRL) coming into force, measuring hydrodynamical processes gains more and more importance. Here, ADCP-technology present a seminal possibility. Established in discharge measurement since years, data-analysis with regard to bed load velocities and suspended sediment concentrations is not yet investigated sufficiently and still contains uncertainties.

The presented work contains the physical fundamentals of this technique and presents the results of several ADCP-measurements on two bavarian rivers during flood. Besides recording flow velocities successfully, changes in river bed levels during high discharges could be detected. Furthermore it was possible to record bed load velocities as well as their distribution along the stream-width. The examination of ADCP-data with respect to suspended sediment concentrations resulted in very interesting findings about the correlation between backscatter intensity, recorded by the ADCP, and the desired measured variable, but also showed great demand for further research.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Angestellte am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.

Den Stein (bzw. das Sedimentkorn) ins Rollen brachte eine Studie zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des bayerischen Inn, die am Lehrstuhl durchgeführt wurde. Im Rahmen numerischer Simulationen stellte sich heraus, dass es nicht möglich war, das Modell anhand von Wasserspiegelfixierungen während Hochwasser zu kalibrieren. Man machte sich auf die Suche nach der Ursache dieses Phänomens und stellte fest, dass es nicht das erste Mal war, dass der Inn den Modellierern Kopfzerbrechen bereitete: Offensichtlich kam es bei Hochwasser zur Erosion großer Mengen von Sedimenten in den Staustufen, was zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der betroffenen Flussabschnitte führte. (Bis heute hat sich daran auch nichts geändert.) Es wurde ein Tool entwickelt, mit dem der Sohlaustrag berücksichtigt werden konnte. Das modifizierte Modell konnte kalibriert und validiert und die Studie erfolgreich abgeschlossen werden.

Was blieb, waren viele unbeantwortete Fragen bezüglich der Systematik des Sohlaustrags am Inn. Eine umfangreiche Literaturrecherche zeigte den großen Bedarf an Naturmessungen, um diesen Vorgang messtechnisch zu erfassen. Aber welche Technik ist für derartige Messungen geeignet? Durch die Wiederanlandung während des absteigenden Astes der Hochwasserwelle ist es nicht möglich, die Hochwasserprofile nach Ablauf des Ereignisses zu erfassen. Der Einsatz herkömmlicher Messgeräte während Hochwasser ist wiederum mit großen Schwierigkeiten verbunden.

Die ADCP-Technik bot sich hier als vielversprechende Alternative an – und erste Testmessungen an der Versuchsanstalt in Oberrach erbrachten den Beweis: Mit Hilfe von ADCP-Messungen können Informationen über Sedimentbewegungen im Messquerschnitt erfasst werden! Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Testmessungen wurde in Zusammenarbeit mit der E.ON Wasserkraft GmbH und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt das operative Entwicklungsvorhaben „Erfassung des Abflusses an Pegeln mit bewegter Sohle“ initiiert. Dieses Projekt brachte erste wichtige Erkenntnisse und legte den Grundstein für weiterführende Untersuchungen.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Einstieg in die Thematik der Schwebstoff- und Geschiebemessung mittels ADCP. Vor allem im alpinen und voralpinen Raum Mitteleuropas wird die ADCP-Technik erst seit kurzem zur Abflussmessungen eingesetzt. Die am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft durchgeführten Untersuchungen haben das Potential dieser Messtechnik, aber auch weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt. Umfangreiche Untersuchungen sind noch notwendig, um unter Verwendung der aufgezeichneten ADCP-Daten in Zukunft auch quantitative Aussagen zu Schwebstoffkonzentrationen und Geschiebetrieb zu ermöglichen.

Katharina Fiedler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Gliederung	2
2	Aktueller hydromorphologischer Zustand der Fließgewässer	5
2.1	Anthropogene Eingriffe	5
2.1.1	Talsperren	6
2.1.2	Flusssperren	8
2.2	Europäische Wasserrahmenrichtlinie	11
3	Entwicklung der Messtechnik	17
3.1	Wasserstandsmessungen	17
3.2	Geschwindigkeitsmessungen	19
3.3	Abflussmessungen	23
3.4	Geschiebemessungen	25
3.5	Schwebstoffmessungen	27
4	Ultraschall-Doppler-Technik	33
4.1	Physikalische Grundlagen	33
4.1.1	Schallausbreitung	33
4.1.2	Der Doppler-Effekt	34
4.2	ADCP-Messtechnik	37
4.2.1	Das <i>Workhorse RioGrande</i> von RDI	38
4.2.2	Unterteilung in mehrere Tiefenschichten	39
4.2.3	Berechnung der Fließgeschwindigkeiten	41
4.2.4	Berechnung des Abflusses	49
4.2.5	Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen	55
4.2.6	Erfassung des Geschiebetriebs	69
5	Mess- und Auswerteprogramme	73
5.1	WinRiver	73
5.1.1	Acquire Mode	73
5.1.2	Playback Mode	75
5.2	AGILA	76
5.3	Tool zur Verknüpfung der ADCP-Daten mit Lageinformationen	77

6	ADCP-Messungen	85
6.1	ADCP-Messungen an der Versuchsanstalt in Oberrach	85
6.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung	85
6.1.2	Auswertung der Versuchsdaten	89
6.1.3	Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen	94
6.2	ADCP-Messungen am bayerischen Inn	95
6.2.1	Hintergrund der Messungen	95
6.2.2	Randbedingungen für die ADCP-Messungen	104
6.2.3	Messinstrumentierung	110
6.2.4	Durchführung der ADCP-Messungen	111
6.2.5	Auswertung der ADCP-Messungen	115
6.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	134
6.3	ADCP-Messungen an der Tiroler Achen	137
6.3.1	Hintergrund der Messungen	137
6.3.2	Randbedingungen für die ADCP-Messungen	139
6.3.3	Messinstrumentierung	143
6.3.4	Durchführung der ADCP-Messungen	144
6.3.5	Auswertung der ADCP-Messungen	147
6.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	164
7	Fazit	167
7.1	Zusammenfassung der Naturmessungen	167
7.2	Empfehlungen für die Durchführung von ADCP-Messungen	169
7.3	Ausblick	170
	Danksagung	171
	Literaturverzeichnis	175

1 Einleitung

Die folgende Einführung soll dem Leser die aktuellen Fragestellungen und Herausforderungen bei der messtechnischen Erfassung von hydromorphologischen Prozessen in Fließgewässern näher bringen und die daraus entstandene Motivation für die auf den kommenden Seiten beschriebenen Untersuchungen darstellen. Im Anschluss daran wird ein kurzer Überblick über die Gliederung der vorliegenden Arbeit gegeben.

1.1 Einführung

Durch die immer dichtere Besiedlung gewässernaher Gebiete und das steigende Schadenspotential in diesen Bereichen wächst der Wunsch, die Vorgänge in einem Gewässer besser verstehen, zukünftige Entwicklungen und Veränderungen voraussagen und eventuell regulierend eingreifen zu können. Die wachsende Sensibilität unserer Umwelt gegenüber führt des Weiteren auch zu steigenden Anforderungen an die ökologische Qualität der Wasserkörper. Nutzungs- bzw. Interessenskonflikte erschweren oft das Erreichen definierter Zielvorgaben und stellen den verantwortlichen Bauingenieur vor große Herausforderungen. Fundierte Kenntnisse über den Ist-Zustand sowie eine solide Datenbasis sind daher wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung verschiedener wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Fragestellungen.

Die messtechnische Erfassung des Abflussgeschehens in einem Gewässer stellt mittlerweile einen elementaren Bestandteil der Wasserwirtschaft dar. Die dabei gewonnenen Daten dienen als Grundlage für statistische Untersuchungen und werden als Eingangsgrößen für numerische und physikalische Modelle benötigt. Das Gewässermanagement sowie die Erfassung und Dokumentation des Abflusses werden in Zukunft einen immer bedeutenderen Stellenwert einnehmen. Durch die Erhöhung von Rechnerkapazitäten und die Neu- und Weiterentwicklung von numerischen Simulationsprogrammen können mittlerweile hydrologische, hydraulische, morphologische und ökologische Fragestellungen für ganze Flusssysteme mit Hilfe numerischer Modelle vernetzt und ganzheitlich betrachtet werden. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis für überregionale Prozesse im Gewässersystem.

1 Einleitung

Jede Untersuchung ist aber nur so gut wie ihre Eingangsgrößen. Durch die erweiterten Möglichkeiten in der numerischen Modellierung steigen die Anforderungen an Qualität und Quantität der zur Verfügung stehenden Messdaten, um die Modelle dementsprechend kalibrieren und validieren zu können. Personelle Einsparungen in der Wasserwirtschaftsverwaltung, bei den Wasserkraftbetreibern sowie bei anderen mit der Unterhaltung von Gewässern betrauten Einrichtungen sind ein weiterer Grund für den steigenden Bedarf an neuen, effektiven Messmethoden, die wenig Wartung benötigen, robust sind, zuverlässig arbeiten und trotz geringem Zeitaufwand eine hohe Datendichte liefern. Auch die Optimierung von Wasserkraftanlagen, der Ausbau des Hochwasserschutzes sowie das Inkrafttreten neuer Gesetze und Vorschriften erfordern eine umfangreiche Dokumentation aller Vorgänge in unseren Gewässern. Mit den derzeit vorhandenen, etablierten Messmethoden sind diese Forderungen jedoch oft nur unzureichend und unter hohem Aufwand zu erfüllen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Anwendbarkeit der ADCP-Technik zur Erfassung hydromorphologischer Vorgänge genauer untersucht. Nachdem Veränderungen in einem Fließgewässer vor allem während Hochwasserabflüssen stattfinden, wurde der Fokus der Untersuchungen auf Situationen mit erhöhtem Abfluss gelegt.

1.2 Gliederung

Die vorliegende Arbeit besteht aus sieben Kapiteln. Nach der bereits gegebenen Einführung in die Thematik wird in Kapitel 2 ein Überblick über den aktuellen hydromorphologischen Zustand unserer Fließgewässer gegeben. Dabei wird vor allem auf die Auswirkungen anthropogener Eingriffe, wie beispielsweise den Bau von Fluss- und Talsperren, eingegangen. Des Weiteren werden die wichtigsten Zielvorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie sowie die daraus resultierenden Anforderungen an das Gewässermonitoring kurz umrissen.

Anschließend gibt Kapitel 3 einen Überblick über die Entwicklung der Messtechnik auf dem Gebiet der Hydraulik und der Hydromorphologie. Die gängigsten Methoden zur Messung von Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten, Abflüssen, Geschiebepbewegungen sowie dem Transport von Schwebstoffen, Vor- und Nachteile sowie Anwendungsgrenzen werden kurz beschrieben.

Kapitel 4 beinhaltet die physikalischen Grundlagen der Doppler-Technik und stellt die verwendete Ultraschall-Doppler-Messtechnik vor. Das Prinzip der Messung von Relativgeschwindigkeiten wird beschrieben und die Ausnützung dieses Effekts zur Lösung

verschiedener Fragestellungen – wie der messtechnischen Erfassung von Fließ- und Geschiebegeschwindigkeiten – erläutert. Der Vorgehensweise bei der Auswertung der ADCP-Rückstreudaten zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen wird dabei besonderes Augenmerk geschenkt.

Im darauf folgenden Kapitel 5 wird ein kurzer Überblick über die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen verwendete Software gegeben. Ergänzend zur Beschreibung der kommerziellen Programme zur Durchführung und Auswertung von ADCP-Messungen wird ein selbst entwickeltes Tool vorgestellt, das der Zusammenführung von ADCP-Daten mit den Lageinformationen externer Messgeräte dient.

Kapitel 6 bildet das Herz der vorliegenden Arbeit. Dieser Abschnitt beinhaltet die durchgeführten ADCP-Messungen sowie die Auswertung der Daten. Zuerst werden die Testmessungen an der Versuchsanstalt in Oberrach beschreiben sowie die daraus gewonnenen Erfahrungen dargelegt. Dem folgen die Beschreibung der Hochwassermessungen am Inn, die Darstellung der Datenauswertung sowie die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse. Abschließend werden die ADCP-Messungen während erhöhter Abflüsse an der Tiroler Achen behandelt. Auch hier wird nach einer kurzen Beschreibung der Randbedingungen während der Messungen näher auf die Auswertung der Daten eingegangen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse schließt den Abschnitt.

Die Arbeit endet mit Kapitel 7, das eine Zusammenfassung der wichtigsten erlangten Ergebnisse und Erkenntnisse beinhaltet und einen kurzen Ausblick gibt. Die im Rahmen der Untersuchungen nicht abschließend geklärten Fragestellungen werden dargelegt und der sich daraus ergebende Untersuchungs- bzw. Forschungsbedarf wird formuliert.

2 Aktueller hydromorphologischer Zustand der Fließgewässer

Heutzutage sind vollkommen naturbelassene Wasserkörper in unseren Breiten selten. Vor allem in besiedelten Gebieten mit Platzknappheit, z. B. in Tälern, zwingt der Mensch das Fließgewässer oft in ein gestrecktes, schmales Bett, trennt Überschwemmungsflächen vom Gewässer ab und unterbricht die Durchgängigkeit durch Querbauwerke. Der Bau großer Speicher und Bauwerke zur Ausleitung von Wasser beeinflusst zudem die Abflusscharakteristik erheblich. Der langfristige Gleichgewichtszustand, der sich im Laufe der Zeit über weite Strecken eines Gewässerverlaufs hinweg gebildet hat, wird durch diese anthropogenen¹ Eingriffe empfindlich gestört.

2.1 Anthropogene Eingriffe in Abflussgeschehen und Gewässermorphologie

Durch die Regulierung der Flüsse und die Begradigung ihres Laufs wird das mittlere Fließgefälle erhöht. Dies führt zu steigenden Sohlschubspannungen, was teilweise massive Eintiefungen der Flusssohle zur Folge hat. Durch das Abtrennen natürlicher Überschwemmungsflächen fehlt deren positive Retentionswirkung während Hochwasser - die Hochwassabflüsse werden größer, die Wellen steiler und die Wellengeschwindigkeiten größer. Auch diese Veränderung beeinflusst die Morphologie der Flusssohle dahingehend, dass es häufiger zu Eintiefungen kommt. Der Bau von Speichern und Ausleitungsbauwerken hat in erster Linie eine erhebliche Reduktion der Abflussvariabilität zur Folge. Vor allem größere Abflüsse werden durch die Bauwerke gekappt, oft kommt es zum vollständigen Trockenfallen des verbleibenden Gewässerabschnitts. Auch diese Veränderungen haben erheblichen Einfluss auf die Morphologie der betroffenen Gewässer.

¹vom griechischen *anthropos* = Mensch und von *genese* = Erzeugung/Erschaffung. Alles vom Menschen Beeinflusste, Verursachte oder Hergestellte. Als Gegensatz zu *anthropogen* wird häufig der Begriff *natürlich* verwendet. Viele Einflüsse auf die Umwelt können sowohl anthropogen als auch natürlich bedingt sein, wobei eine eindeutige Abgrenzung nicht immer möglich ist.

Im Folgenden werden die Auswirkungen von Querbauwerken auf die Gewässermorphologie umrissen. Die Ausführungen beschränken sich auf den alpinen und voralpinen Bereich Mitteleuropas, die beschriebenen Zusammenhänge haben aber prinzipiell überall Gültigkeit.

2.1.1 Talsperren

Die Alpen stellen eines der Gebiete mit der höchsten Erosionsrate weltweit dar. Neben dem Abtrag von Feststoffen durch Niederschlag haben Gletscher, Lawinen, Muren und Bodenerosion großen Einfluss auf den Feststofftransport der dort entspringenden Fließgewässer [Knoblauch et al., 2005]. Durch den Bau großer Talsperren am Rande der Alpen, wie z. B. den Sylvensteinsee, den Forggensee oder die großen Speicher am Rande des österreichischen Alpenhauptkamms, wird die Durchgängigkeit der Gewässer unterbrochen. Die aus den alpinen Einzugsgebieten ankommenden Feststoffe werden in großen Mengen in den Speicherseen abgelagert und gelangen ohne gezielte Maßnahmen nicht mehr in den weiteren Gewässerverlauf.

Der Speicher einer Talsperre weist aufgrund seiner Größe die grundsätzlichen Charakteristiken eines stehenden Gewässers, also eines Sees, auf. Die Fließgeschwindigkeiten gehen praktisch auf Null zurück, die Wassertiefe nimmt erheblich zu, und es kommt zu einer vollkommenen Unterbrechung des Abflusses sowie aller darin mitgeführten Stoffe. Auch die vom Gewässer transportierten Feststoffe werden im Regelfall vollständig im Speicher zurückgehalten. Diese Unterbrechung kann zu erheblichen Beeinträchtigungen im Betrieb des Speichers führen. Durch die Anlandung von Sedimenten kommt es zu einer Reduktion des Stauraumvolumens. Neben den bekannten negativen ökologischen und landschaftlichen Folgen hat dies auch wirtschaftliche und sicherheitstechnische Konsequenzen.

- Durch die Reduktion des bewirtschaftbaren Volumens wird die Flexibilität beim Betrieb der Anlage beeinträchtigt.
- Die Hochwasserschutzwirkung des Reservoirs für die Unterlieger wird durch die Volumenreduktion ebenfalls eingeschränkt.
- Betriebseinrichtungen am Absperrbauwerk werden durch Anlandungen von Sedimenten verlegt.
- Maschinenbauliche Anlagen werden durch die in das System eingetragenen Feststoffe beschädigt (Abrasion, Kavitation, ...).

Maßgebend für die Entwicklung der Verlandung eines Stauraums sind nach Knoblauch et al. [2007] die Stauraumgeometrie, die Abflussverteilung und der Feststoffeintrag in den Speicher. Während sich das Geschiebe meist nahe dem Eintritt in den Speicher ablagert, setzen sich die feineren Schwebstoffe über das gesamte Reservoir verteilt ab [Schleiss und Oehy, 2002]. Während Hochwasser können zudem große Mengen an Schwebstoffen in Form von Trübe- oder Dichteströmen entlang der Sohle der Speichers bis zur Talsperre transportiert werden, wo sie sich dann absetzen. Die Menge der in einem Stausee abgelagerten Sedimente besteht zu mehr als 80 % aus Schwebstoffen, der Rest ist Geschiebe. Maßnahmen gegen die Verlandung können entweder im Einzugsgebiet (z. B. durch Aufforstung), oder im Speicher (z. B. durch Leitbauwerke, Baggerungen oder Spülungen) getätigt werden. Deren Durchführung wird jedoch maßgeblich durch wirtschaftliche, technische und rechtliche Aspekte beschränkt [Knoblauch et al., 2005]. Die Verhinderung der Verlandung eines Speichers und die Ermöglichung des nachhaltigen Betriebs unter Einhaltung aller geltenden Vorgaben ist deshalb eines der vorrangigen Ziele im Rahmen der Speicherunterhalts. Die korrekte Erfassung der morphologischen Vorgänge mit Hilfe von Naturmessungen spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Messdaten geben Auskunft über die Beschaffenheit der Sedimente, über das zeitliche Auftreten der Feststoffeinträge, sowie über die Bahnen von eventuell auftretenden Dichteströmen im Speicher. Daraus gewonnene Erkenntnisse können genutzt werden, um numerische Modelle zu kalibrieren und zu validieren, oder um zielgerichtete Maßnahmen zu entwickeln, die dem Feststoffeintrag entgegenwirken. Die messtechnische Erfassung des Sedimenttransports in einen bzw. in einem Speicher kann aber auch dazu dienen, um die Effektivität bereits durchgeführter Maßnahmen gegen die Verlandung zu überprüfen. So haben beispielsweise Messungen mit optischen und akustischen Geräten im Speicher Margaritze (Österreich) ergeben, dass die mittels Saugbaggerungen vom Absperrbauwerk in einen Flachwasserbereich des Reservoirs umgelagerten Sedimente in Form von Dichteströmen wieder zurück zur Talsperre transportiert werden. Nur mit Hilfe der Naturmessungen war es möglich, diese Rückströmung zu dokumentieren. Die erhaltenen Informationen dienen jetzt als Grundlage, um die bereits gesetzten Maßnahmen gegen die drohende Verlandung des Speichersees zu überdenken und geeignete Alternativprogramme auszuarbeiten.

Durch die Errichtung von Talsperren und die damit einhergehende Unterbrechung des Feststofftransports kommt es aber auch zu Problemen im Unterwasser des Querbauwerks. Durch den Rückhalt der transportierten Sedimente im Speicher entsteht im Gewässerabschnitt unterhalb der Sperre ein Sedimentdefizit, das zu Eintiefungen des Flussbettes über weite Strecken hinweg führen kann. Die Erosion der Sohle führt

zur Absenkung des flussnahen Grundwasserspiegels, wodurch Auwälder trocken fallen und Brunnen beeinträchtigt werden können. Zudem wird die Standsicherheit aller im oder am Fluss befindlichen Bauwerke, wie z. B. Rohrdüker, Brückenfundamente, Ufermauern, und Fundamente von Dämmen, Deichen oder Stauanlagen, gefährdet. Dem Phänomen der Eintiefung kann durch Zugabe von Geschiebe, durch die Ermöglichung einer eigendynamischen Aufweitung des Gewässers (Geschiebeeintrag aus den Uferbereichen, [Schmautz, 2003]) sowie durch bauliche Maßnahmen, wie der Errichtung von Rampen, begegnet werden. Auch hier sind Naturmessungen ein wichtiges Instrument zur Erfassung der Sohlenlagen und des Sedimenttransports im Gewässer. Der Ist-Zustand kann so exakt erfasst und die morphologische Situation des betreffenden Gewässerabschnitts beurteilt werden. Die gewonnenen Informationen werden beispielsweise zur Kalibrierung und Validierung numerischer Modelle verwendet. Zudem kann im Rahmen eines Monitoringprogramms mit Hilfe von Naturmessungen überprüft werden, ob die durchgeführten Maßnahmen die erwarteten Auswirkungen und die gewünschte nachhaltige Verbesserung der Situation erbracht haben.

2.1.2 Flussperren

Sind in einem Gewässer keine großen Kopfspeicher vorhanden, so gelangen die natürlichen Sedimenteinträge aus den alpinen Einzugsgebieten ungehindert in die Flussmittel- und Unterläufe. Aber auch hier wurde während der letzten Jahrzehnte die natürliche Durchgängigkeit des Gewässers durch die Errichtung zahlreicher Querbauwerke unterbrochen.

Der Aufstau an einer Flussperre bewirkt eine lokale Reduktion des Energiegefälles. Verursacht wird diese durch die Erhöhung der Wassertiefen bis zu einem Faktor von zirka fünf, sowie die Reduktion der Fließgeschwindigkeiten etwa bis zum Faktor zehn [Westrich, 1981]. Die soeben beschriebenen Veränderungen der Strömungscharakteristik bewirken eine Ablagerung der transportierten Feststoffe im Oberwasser der Bauwerke. Einfluss auf den Sedimentationsprozess haben der Feststoffeintrag in den Stauraum, die Größe des gestauten Wasserkörpers und die Durchströmcharakteristik des Stauraums. Generell werden gröbere Körner eher in den Bereichen der Stauwurzeln abgelagert, während sich sehr feine Stoffe erst im Nahbereich der Flussperre absetzen. Die Anlandungen wirken sich negativ auf die Einhaltung der geforderten Mindestfreiborde und den Nachweis der schadlosen Hochwasserabfuhr aus, können die Schiffbarkeit eines Gewässerabschnitts beeinträchtigen und die Gewässergüte beeinflussen. Vor allem die feinkörnigeren Ablagerungen können außerdem zu einer Kol-

mation der Sohle führen. Die Verbindung zum flussbegleitenden Grundwasserkörper wird unterbrochen, und die charakteristischen Grundwasserschwankungen in Flussnähe werden unterbunden. Durch die Kolmation des Schotterlückenraums geht außerdem wichtiger Lebensraum für die Flora und Fauna im Fluss verloren [Eberstaller et al., 2001].

Im Unterwasser führt die Unterbrechung des Feststofftransports zu einem Transportdefizit, das oft rasch fortschreitende Erosionsraten und die damit einher gehenden Probleme mit sich zieht. Eine Eintiefung des Flusses hat weitreichende ökologische, wasserwirtschaftliche, landschaftliche und sicherheitsrelevante Konsequenzen. Dieser Umstand birgt vor allem für die Betreiber von Flusssperren große Herausforderungen, denn die abgelagerten Sedimente können im Regelfall nur durch Herstellung des ursprünglichen Fließgefälles während einer Staulegung von der Strömung abtransportiert werden [Demel und Amesmaier, 2007]. Die Notwendigkeit regelmäßiger Spülungen, um den Sedimenthaushalt im Gleichgewicht zu halten, wurde bereits vor mehreren Jahrzehnten erkannt und teilweise in die Betriebsvorschriften der betroffenen Anlagen aufgenommen. Durch die fehlende Berücksichtigung ökologischer Aspekte beim Spülvorgang kam es in der Folge aber zu spektakulären Schäden der Gewässerökologie, vor allem der Fischpopulationen. Die Vorfälle erweckten großes Interesse und beeinflussten die öffentliche Meinung dahingehend, dass Spülungen mit großer Skepsis und Misstrauen betrachtet und immer stärker abgelehnt wurden. Während der nachfolgenden Betriebsjahre wurde die Verhandlungssituation der Flusstausräume immer dramatischer. Die daraus resultierenden Probleme zwangen die Betreiber der Anlagen zu einem abermaligen Umdenken.

Die folgende Aufzählung soll einen Überblick über die laufenden Maßnahmen zum Sedimentmanagement an den wichtigsten Flüssen Österreichs und Bayerns geben, um die Aktualität der soeben dargestellten Problematik zu verdeutlichen. Sie erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

- An der Drau (Österreich) werden jährliche Querprofilaufnahmen durchgeführt, um die Entwicklung der Staauraumverlandungen zu dokumentieren. Die Daten dienen als Grundlage für die Planung von Staauraumspülungen und Kiesbaggerungen, sowie zur Kontrolle der Effektivität bzw. Nachhaltigkeit der getätigten Maßnahmen [Steiner und Moser, 2002].
- Durch den Ausbau der Wasserkraft wurde auch der Sedimenttransport der Enns (Österreich) beeinträchtigt. Periodische Querprofilmessungen sowie Schwebstoffmessungen geben hier Auskunft über den Eintrag von Feststoffen in die Stauräu-

2 Aktueller hydromorphologischer Zustand der Fließgewässer

- me und das Ausmaß von Anlandungen. Wo nötig, werden Baggerungen durchgeführt, teilweise kommt es auch zur Spülung von Stauräumen. Die Erreichung eines morphologischen Gleichgewichtszustand ist an der Enns noch nicht in Sicht [Pöschl, 2001].
- Für das Flusskraftwerk Bodendorf, das als Kopfspeicher an der Mur (Österreich) fungiert, wurde im Rahmen des INTERREG IIIB Projekts „Alpreserv“² ein umfangreiches Geschiebemanagementprogramm, verbunden mit einem langjährigen Monitoring, ausgearbeitet [Alpreserv, 2007].
 - Auch an der bayerischen und österreichischen Donau wurde der Geschiebe- und Schwebstofftransport durch den Bau von Flusskraftwerken über weite Strecken beeinträchtigt. Jährliche Aufmessungen der Querprofile sowie tägliche Schwebstoffmessungen werden für die laufende Überwachung der Sedimentsituation herangezogen. Als aktive Maßnahmen sind Geschiebefallen, aber auch die Zugabe von Geschiebe im Unterwasser der Anlagen (Kraftwerk Freudenufer unterhalb von Wien) zu nennen. Anlandungen von Feinsediment werden bei Bedarf ebenfalls ausgeräumt, Spülungen werden an den Staustufen der Donau nicht durchgeführt [Schimpf und Harreiter, 2001].
 - An der bayerischen Wertach, die bis vor etwa 150 Jahren ein weit verzweigter alpiner Wildfluss war, wurden aufgrund des steigenden Bedarfs an Siedlungsraum und landwirtschaftlichen Nutzflächen ab 1860 umfangreiche Regulierungsmaßnahmen durchgeführt. Aus einem natürlichen Wildfluss wurde ein reguliertes, verbautes Gewässer. Im Jahr 1997 wurde das Projekt *Wertach Vital* mit dem Ziel begonnen, durch den Einbau von Rampen eine weitere Eintiefung des Flusses zu verhindern und gleichzeitig den Hochwasserschutz zu erhöhen, den ökologischen Zustand zu verbessern und im Stadtgebiet von Augsburg ein Naherholungsgebiet zu schaffen. Umfangreiche Monitoringprogramme sollen den Erfolg der Maßnahmen dokumentieren [WWA-D, 2008].
 - Der Betrieb der beiden aufeinander folgenden Innkraftwerke Kirchbichl und Langkampfen in Tirol (Österreich) wird ebenfalls durch die Anlandung von Sedimenten im Stauraum beeinträchtigt. Bei Hochwasser werden beide Stauräume

²Alpreserv ist Teil des von der EU initiierten INTERREG IIIB Programms, an dem 17 Projektpartner -Innen aus fünf Ländern teilnehmen. Ziel ist es, die Probleme der Verlandung von Speichern im alpinen Raum auf internationaler Ebene zu diskutieren und gemeinsame Lösungen zu erarbeiten [Knoblauch et al., 2005].

gleichzeitig gespült, ein umfangreiches Monitoringsystem dokumentiert die Effektivität der Spülungen und deren Auswirkungen auf die Wasserspiegellagen. Zusätzlich zu den Spülungen werden im Stauraum Langkampfen regelmäßige Räumungen der dort errichteten Kiesfalle durchgeführt [Hofer und Reindl, 2001].

- Auch bei der Bewirtschaftung der Kraftwerke am bayerischen Inn spielt die Sedimentproblematik eine entscheidende Rolle. Seit der Errichtung der Staustufen werden regelmäßige Peilungen durchgeführt, um die Entwicklung der Sohlenlagen zu dokumentieren. Umfangreiche Baggerungen sichern in den kritischen Bereichen die Einhaltung vorgegebener Maximalwasserstände sowie die schadlose Abfuhr der Bemessungshochwasser. Unterhalb der Salzachmündung konnte die Verlandungssituation durch den Bau von Leitdämmen entschärft werden, seit den 70-er Jahren herrscht hier ein morphologisches Gleichgewicht. Bis auf die Schotterablagerungen im Mündungsbereich der Salzach bestehen die Anlandungen größtenteils aus sandigem Feinmaterial bzw. schluffig-tonigen Schwebstoffen. Der Nachweis der Hochwassersicherheit und die Gewährleistung der Betriebsbereitschaft erfordern auch hier weiterhin ein umfangreiches Monitoring [Zauner, 2001]. Weitere Untersuchungen und Maßnahmenprogramme am Inn werden im folgenden noch ausführlicher behandelt.

2.2 Europäische Wasserrahmenrichtlinie

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie dient der Harmonisierung des Gewässerschutzes in Europa und der Koordination der Gewässerbewirtschaftung in staats- und länderübergreifenden Flussgebieten. In Deutschland wurden zehn derartige Flussgebiete definiert, nämlich Donau, Elbe, Ems, Maas, Oder, Rhein, Eider, Schlei/Trave, Warnow/Peene und Weser [WHG, 2002]. Die sechs erstgenannten erstrecken sich über die politischen Grenzen hinaus und werden gemeinsam mit den benachbarten Anrainerstaaten bewirtschaftet.

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie wurde vom EU-Parlament verabschiedet und trat am 22.12.2000 in Kraft. Ihr Ziel ist

„... die Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Schutz der Binnenoberflächengewässer, der Übergangsgewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers zwecks

- *Vermeidung einer weiteren Verschlechterung sowie Schutz und Verbesserung des Zustands der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete im Hinblick auf deren Wasserhaushalt,*

2 Aktueller hydromorphologischer Zustand der Fließgewässer

- *Förderung einer nachhaltigen Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes der vorhandenen Ressourcen,*
- *Anstreben eines stärkeren Schutzes und einer Verbesserung der aquatischen Umwelt, unter anderem durch spezifische Maßnahmen zur schrittweisen Reduzierung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von prioritären Stoffen und durch die Beendigung oder schrittweise Einstellung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von prioritären gefährlichen Stoffen,*
- *Sicherstellung einer schrittweisen Reduzierung der Verschmutzung des Grundwassers und Verhinderung seiner weiteren Verschmutzung, und*
- *Beitrag zur Minderung der Auswirkungen von Überschwemmungen und Dürren.“*
[WRRL, 2000]

Für die Erreichung der formulierten Ziele wurde folgender Zeitplan aufgestellt.

- rechtliche Umsetzung bis 2003
- Bestandsaufnahme bis 2004
- Erstellung von Überwachungsprogrammen bis 2006
- Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen bis 2009
- Umsetzung von Maßnahmenprogrammen bis 2012

Ziel ist das Erreichen des guten Zustands aller Wasserkörper bis 2015.

Die WRRL wurde 2002 bzw. 2003 durch die Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes des Bundes [WHG, 2002] und des Bayerischen Wassergesetzes [BayWG, 1994] in nationales Recht umgesetzt. Das Bayerische Wassergesetz regelt unter anderem die Bewirtschaftung der Gewässer des Freistaates Bayern in den Flussgebietseinheiten Donau, Rhein, Elbe und Weser. Im Jahr 2004 wurde die Bayerische Gewässerbestandsaufnahme- und -zustandseinstufungsverordnung [BayGewZustVO, 2004] neu aufgelegt. Sie regelt für oberirdische Gewässer folgende Punkte.

- *§ 4: Lage, Grenzen und Zuordnung der Oberflächenwasserkörper, typspezifische Referenzbedingungen*
- *§ 5: Zusammenstellung der Gewässerbelastungen und Beurteilung ihrer Auswirkungen*
- *§ 6: Anforderungen an die Einstufung des ökologischen Zustands der oberirdischen Gewässer*

- § 7: Anforderungen an die Einstufung des chemischen Zustands der oberirdischen Gewässer
- § 8: Überwachung des ökologischen und chemischen Zustands der oberirdischen Gewässer, Überwachungsnetz
- § 9: Einstufung des ökologischen Zustands, des ökologischen Potentials und des chemischen Zustands der oberirdischen Gewässer, Darstellung der Überwachungsergebnisse [BayGewZustVO, 2004]

Im Zuge der Bestandsaufnahme wurden vorhandene Wassernutzungen einer wirtschaftlichen Analyse unterzogen und sämtliche anthropogene Belastungen der Gewässer erhoben. In der darauf folgenden dritten Phase wurden die für die Entwicklung des Gewässerzustands maßgeblichen Parameter überwacht. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen ein. Kern dieser Pläne sind gezielte Maßnahmenprogramme, die den Gewässerzustand verbessern sollen, wie z. B. Renaturierungen, Wiederherstellungen der Durchgängigkeit, und die Stärkung von Schutzgebieten. Die Programme werden alle sechs Jahre aktualisiert. Ziel für das Jahr 2015 ist das Erreichen des so genannten *guten Zustands*³ für alle natürlichen Gewässer. Künstlichen oder erheblich veränderten Gewässer soll bis 2015 durch geeignete Maßnahmen zumindest ein *gutes ökologisches Potential*⁴ verliehen werden.

In Deutschland wurden 63 % aller Gewässer als *natürlich*, 23 % als *erheblich verändert* und 14 % als *künstlich* eingestuft. Die Erreichung des in der WRRL vorgegebenen Zielzustands, des *guten Zustands* für natürliche Gewässer bzw. die Erreichung des *guten ökologischen Potentials* für erheblich veränderte sowie künstliche Gewässer ist nach Irmer et al. [2007] nur für 12 % aller Gewässer wahrscheinlich, für 26 % unsicher und für die restlichen 62 % unwahrscheinlich. Die Gründe für die Zielverfehlung sind oft im schlechten hydromorphologischen Zustand sowie in der fehlenden Durchgängigkeit der Gewässer zu suchen. Aus diesem Grund hat das Bayerische Landesamt für Umwelt auf Basis bisher gewonnener Erfahrungen bei der Umsetzung der WRRL den sogenannten *Maßnahmenkatalog Hydromorphologie* erstellt, in dem ergänzende Maßnahmen zur Reduktion der bekannten Defizite zusammengefasst und die Verbesserungspotentiale für die einzelnen Qualitätskomponenten beurteilt werden.

³Zustand eines Oberflächenwasserkörpers, der sich in einem zumindest guten ökologischen und chemischen Zustand befindet [WRRL, 2000]

⁴Zustand eines erheblich veränderten oder künstlichen Wasserkörpers, der nach Anhang V der WRRL entsprechend eingestuft wurde [WRRL, 2000]

2 Aktueller hydromorphologischer Zustand der Fließgewässer

Diese Problematik ist jedoch nicht nur auf Bayern bzw. Deutschland begrenzt, sondern für alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union gültig. Deshalb wurde bei einem Treffen der *Wasserdirektoren*⁵ im Juni 2005 beschlossen, sich stärker mit der Hydromorphologie der Gewässer zu befassen und besondere Schwerpunkte auf die Themen Wasserkraft, Schifffahrt und Hochwasserschutz zu legen [WRRL, 2006]. Für die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Situation eines Gewässers oder Gewässerabschnittes wird das in Abb. 2.1 schematisch dargestellte Vorgehen empfohlen [WRRL, 2006]).

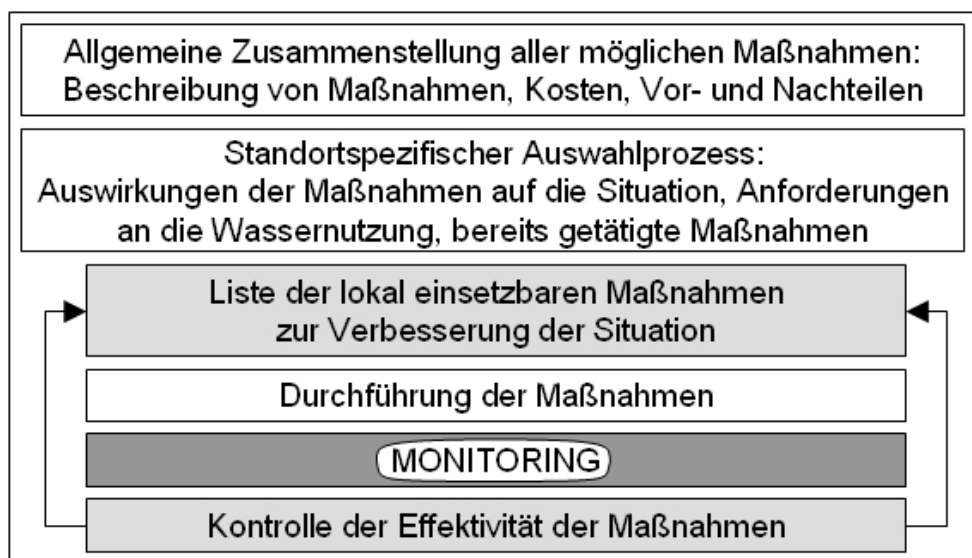


Abbildung 2.1: Vorgehensweise bei der Wahl geeigneter Verbesserungsmaßnahmen

Die Dokumentation der Gewässersituation durch Beobachtungen und Messungen in der Natur spielt nicht nur im Rahmen der Bestandsaufnahme eine große Rolle, sondern ist auch ein wichtiges Instrument zur Kontrolle der Effektivität von bereits durchgeführten Maßnahmen. Eine periodische Erfassung der hydromorphologischen Situation ist für den Nachweis, dass die getätigten Maßnahmen den erwünschten Erfolg erbracht haben und sich der Zustand des Gewässers nachhaltig verbessert hat, unerlässlich. Mit den heutzutage vorhandenen personellen Ressourcen ist dieser For-

⁵Die Konferenz der Wasserdirektoren ist das oberste Entscheidungsgremium bei der Umsetzung der WRRL. Wasserabteilungsleiter der Mitgliedstaaten und Vertreter der EG-Kommission diskutieren zwei mal im Jahr verschiedene Fragestellungen und verabschieden die Leitlinienpapiere der jeweiligen Facharbeitsgruppen.

derung bei Verwendung herkömmlicher Messmethoden wie z. B. hydrometrischen Flügeln, Lotstangen oder Samplern zur Schwebstoffprobenentnahme, kaum nachzukommen. Der Einsatz moderner Messinstrumente hingegen ermöglicht die Erfassung der erforderlichen hydromorphologischen Kenngrößen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, der Personalaufwand wird durch die Automatisierung verringert, und die Möglichkeit der Fernsteuerungen bzw. des stationären Einbaus der Messgeräte unterwasser machen die Messeinsätze sicherer. Oft erfordert die neue Technik aber auch kompliziertere Auswerteroutinen sowie zusätzliche Messungen mit konventionellen Geräten zur Eichung der Messwerte, was die Attraktivität dieser innovativen Verfahren wieder reduziert. Als weitere Nachteile kommen hohe Anschaffungskosten und die Notwendigkeit einer intensiven Einarbeitung in die Technik hinzu.

3 Entwicklung der Messtechnik

Seit dem Beginn der Erfassung von hydromorphologischen Kennwerten hat sich die Messtechnik stark verändert. Hatte man früher nur einfache Hilfsmittel beispielsweise zur Messung von Fließgeschwindigkeiten zur Verfügung, kann man heute auf eine Vielzahl teils hochkomplexer Verfahren und Methoden zurückgreifen, die den unterschiedlichsten Aufgabenstellungen gewachsen sind.

Aber auch die Ansprüche an die gewonnenen Messwerte sind stetig gestiegen. Aufgrund der raschen Fortschritte in der Technik können wir die Natur immer besser abbilden, Probleme immer umfassender untersuchen und Fragestellungen immer exakter beantworten. Naturmessdaten sind dabei oft die Grundlage aller Betrachtungen, Simulationen und Auswertungen. Jedes noch so komplexe Modell kann nur so gut sein, wie die Naturdaten, auf deren Basis es aufgebaut wurde. Aus diesem Grund ist die Messtechnik und die effiziente Gewinnung von Messdaten heute wichtiger denn je. Die folgenden Kapitel sollen einen kurzen Überblick über die Entwicklung der Technik, den aktuellen Stand, sowie neueste Entwicklungen geben.

3.1 Wasserstandsmessungen

Nach DIN4049 [1994] ist der Wasserstand W „*der lotrechte Abstand eines Punktes des Wasserspiegels über oder unter einem Bezugshorizont, z. B. durch einen Pegelnullpunkt festgelegt.*“ Der Bezugshorizont sollte so gewählt werden, dass er eindeutig erkennbar ist und zeitlich konstant bleibt. Für die Errichtung von Pegelnullpunkten in Pegelquerschnitten sind in LAWA [1997] klare Vorgaben enthalten. Der Wasserstand in einem Fließquerschnitt wird im Regelfall in Form einer Punktmessung am Ufer ermittelt.

Lattenpegel

Der Lattenpegel stellt die einfachste Form der Wasserstandsmessung dar. Nach LAWA [1997] sollte dafür eine mindestens 100 mm breite Messlatte aus widerstandsfähigem Material (Stahl, Kunststoff) mit einer Maßeinteilung von 1 cm oder 2 cm verwendet

3 Entwicklung der Messtechnik

werden. Je nach den örtlichen Gegebenheiten werden lotrechte Latten, Treppenlatten oder Schrägpegellatten verwendet. Die Ermittlung des Wasserstands erfolgt durch Ablesung an der Messskala.

Schwimmerpegel

Hier wird der Wasserstand mit Hilfe eines Schwimmkörpers erfasst. Zum Schutz gegen Wind, Wellen, Strömung und Treibzeug sollte der Schwimmer in einem Schacht untergebracht sein, der eine direkte Verbindung zum Gewässer aufweist (Prinzip der kommunizierenden Gefäße). Die jeweilige Höhenlage des Schwimmers wird auf nachgeschaltete Geräte übertragen und aufgezeichnet.

Druckluftpegel

Aus einer Leitung wird Gas (Stickstoff oder Druckluft) in einen mit dem Gewässer in direkter Verbindung stehenden Schacht eingepert. Diese Art der Wasserstandsmessung wird deshalb auch *Einperlverfahren* genannt. Der Druck, der notwendig ist, um das Gas gegen den anstehenden Wasserdruck ins Wasser einzubringen, ist proportional zum Luftdruck auf der einen Seite der Leitung und zur Höhe der Wassersäule auf der anderen Seite der Leitung. Bei Kenntnis dieser Beziehung kann daraus der jeweilige Wasserstand berechnet werden.

Drucksondenpegel

Auch hier wird ein Schacht nahe dem Gewässer benötigt, der eine direkte Verbindung mit diesem aufweist. Eine Drucksonde (Druckmessdose) reagiert auf den anstehenden Wasserdruck und überträgt diesen auf nachgeschaltete Geräte, die für die Aufzeichnung verantwortlich sind.

Ultraschallpegel

In diesem Fall ist das Messgerät oberhalb der Wasserspiegeloberfläche angebracht. Ein Ultraschallimpuls wird ausgesendet, an der Grenzschicht Luft/Wasser reflektiert und vom Sender wieder empfangen. Aus der Laufzeit kann die Entfernung zur Wasseroberfläche berechnet werden. Da die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur und dem Luftdruck abhängt, müssen diese beiden Faktoren durch den Vergleich der erfassten Laufzeit mit einer Referenzstrecke mit bekannter Länge berücksichtigt werden. Vorteil dieses Verfahrens ist die berührungslose Erfassung des Wasserstands ohne Kontakt zum Wasser. Das Messgerät kann in sicherem Abstand zur Wasseroberfläche

– beispielsweise an einem Brückenpfeiler – angebracht werden und ist vor einer möglichen Beschädigung durch Treibzeug geschützt. Auch die Gefahr der Verkläusung des Messschachtes oder der Beeinflussung der Messwerte durch Eisbildung ist in diesem Fall nicht gegeben.

Welches der hier aufgezählten Verfahren zur Wasserspiegellagenmessung verwendet wird, hängt immer von den jeweiligen Randbedingungen vor Ort sowie von den Anforderungen an die Messwerte ab. Die Ablesung des Wasserstands anhand eines Lattenpegels ist die mit Abstand einfachste Methode mit dem geringsten baulichen, aber dem höchsten personellen Aufwand. An Pegelquerschnitten werden meist permanente Aufzeichnungen des Wasserspiegels mit Hilfe von Schwimmpegeln, Druckluftpegeln, oder Drucksondenpegeln durchgeführt. Alle drei Verfahren liefern bei günstigen Bedingungen Messwerte mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich, sind aber – vor allem bei Hochwasser – anfällig auf Verstopfung durch Verschlammung oder Verkläusung. Im Winter können die aufgezeichneten Daten durch Eisbildung verfälscht werden. Erschweren derartige Randbedingungen den erfolgreichen Betrieb von konventionellen Pegelanlagen, so bieten Ultraschallpegel eine mögliche Alternative.

3.2 Geschwindigkeitsmessungen

Wasserstandsmessungen ohne zusätzliche Informationen lassen nur Aussagen über die relative Veränderung des Abflusses zu. So kann man beispielsweise aus einem steigenden Wasserstand auf einen ebenfalls zunehmenden Abfluss schließen. Möchte man absolute Abflussinformationen, sind zusätzliche Geschwindigkeitsmessungen notwendig. Eventuelle Einschränkungen der Durchführbarkeit (Mindest- oder Höchstgeschwindigkeiten), die Notwendigkeit infrastruktureller Einrichtungen an den Ufern, der zeitliche und personelle Aufwand sowie die gewünschte Quantität und Qualität der Ergebnisse sollten bei der Wahl der Messmethode berücksichtigt werden. Folgende Messgeräte bzw. -verfahren stehen zur Erfassung von Fließgeschwindigkeiten zur Verfügung [Fiedler et al., 2008].

Tracer

Tracer⁶ kommen vor allem bei turbulenten, inhomogenen Geschwindigkeitsverteilun-

⁶(engl.: to trace = verfolgen, aufspüren) Substanzen, die in sehr geringen Konzentrationen noch detektiert werden können und deshalb als Markierungsstoffe verwendet werden, um verschiedene Prozesse in der Natur verfolgen und quantifizieren zu können.

gen, beispielsweise in Wildbächen, zur Anwendung. Voraussetzung sind ein konstanter Durchfluss sowie eine vollständige Durchmischung des Tracers entlang einer definierten Beobachtungsstrecke. Werden diese Randbedingungen gewährleistet, können aus der Verteilungscharakteristik des Tracers die mittlere Fließgeschwindigkeit und der Abfluss ermittelt werden.

Schwimmer

Der Einsatz von Oberflächen- und Tiefenschwimmern liefert punktuelle Geschwindigkeitswerte, die verwendet werden können, um mit Hilfe empirischer Formeln die mittleren Fließgeschwindigkeiten im Querschnitt abzuschätzen. Diese Vorgehensweise beinhaltet allerdings gewisse Ungenauigkeiten.

Hydrometrischer Flügel

Die Flügelmessung stellt die derzeit am weitesten verbreitete Methode der Geschwindigkeitsmessung dar. Ein frei drehbarer, hydrometrischer Flügel wird mit der Geräteachse gegen die Fließrichtung in den Wasserkörper eingetaucht und die Flügelschaufel durch die Strömung in Bewegung versetzt. Ein Zählgerät erfasst die Umdrehungen pro definierter Zeiteinheit (nach LAWA [1997] mindestens 30 sec oder zehn Impulse). Diese Messgröße kann anhand einer durch Eichmessungen ermittelten Beziehung in die punktuelle Fließgeschwindigkeit umgerechnet werden. Soll der gesamte Fließquerschnitt messtechnisch erfasst werden, und ist ein Durchwaten nicht möglich, so benötigt man einen Steg, eine Brücke, oder eine Seilkrananlage, um die Vielpunktmessungen durchführen zu können.

Magnetische Induktion

Lokale Fließgeschwindigkeiten können auch unter Verwendung des Faraday'schen Gesetzes⁷ erfasst werden. Ein durch Spulen erzeugtes Magnetfeld wird durch hindurchströmendes Wasser verändert, wodurch elektromagnetische Induktion⁸ entsteht. Diese kann messtechnisch erfasst und anhand bekannter Zusammenhänge in die Fließgeschwindigkeit umgerechnet werden.

⁷Michael Faraday (1791 – 1867)

Englischer Physiker und Chemiker, der 1831 das Phänomen der elektromagnetischen Induktion entdeckte.

⁸Das Entstehen elektrischer Spannung entlang einer Leiterschleife durch die Änderung des magnetischen Flusses.

Laufzeitverfahren

Die Anwendung des Laufzeitverfahrens erfordert die Installation zweier schräg zueinander angeordneter Sender- bzw. Empfängereinheiten auf beiden Seiten des Gewässers. Ein Ultraschallsignal wird einmal schräg mit und einmal schräg gegen die Fließrichtung von einem Ufer zum anderen gesendet. Aus dem Unterschied der Laufzeiten kann die mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt berechnet werden. Ist die Anlage einmal installiert, so erlaubt sie die permanente messtechnische Erfassung der mittleren Fließgeschwindigkeit im Querschnitt.

Radarwellen

Radarwellen mit bekannter Frequenz werden von einem Sender auf die Wasseroberfläche gesendet, wo sie reflektiert werden. Durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers kommt es dabei zu einer Frequenzverschiebung. Aus dem Frequenzunterschied zwischen den ausgesendeten Radarwellen und den empfangenen Reflexionen kann die Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche berechnet werden. Mit Hilfe empirischer Formeln kann diese Größe verwendet werden, um die mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt abzuschätzen, was jedoch mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet ist.

Particle Image Velocimetry (PIV)

Die *Particle Image Velocimetry* ist eine optische Methode zur berührungslosen Messung von Geschwindigkeiten. Das Messprinzip beruht auf der physikalischen Definition der Geschwindigkeit als Quotient von Differenzen. Die momentane Position von Partikeln in der Strömung wird mit geeigneten Kameras zu zwei Zeitpunkten aufgezeichnet, die Geschwindigkeitsvektoren werden im Anschluss über Kreuzkorrelation der beiden Bilder berechnet.

Bis vor Kurzem nur in sehr kleinskaligen Anwendungsbereichen, wie beispielsweise Modellversuchen zu finden, gewinnt die PIV-Technik mehr und mehr auch für Naturmessungen an Bedeutung. Grund dafür ist vor allem die Entwicklung in der Datenbearbeitung. Es existieren Berichte über die erfolgreiche Anwendung der *Large Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) zur Erfassung von Oberflächengeschwindigkeiten in langsam fließenden Gewässern [Meselhe et al., 2004]. Die Technik wurde aber auch schon zur Erfassung von Oberflächengeschwindigkeiten und großen Wirbelstrukturen bei Hochwasser eingesetzt [Fujita et al., 2007].

Ultraschall-Dopplerverfahren

Für die Messung von Fließgeschwindigkeiten kann auch das Phänomen der Dopplerverschiebung (Kap. 4.1.2) ausgenutzt werden. Akustische Signale im Ultraschallbereich werden von einem Messgerät ausgesendet, an Partikeln im Wasser reflektiert und wieder empfangen. Durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Sender, Reflektor und Empfänger kommt es zu einer Veränderung der Frequenz, der so genannten Dopplerverschiebung. ADV-Sonden (*A*coustic *D*oppler *V*elocimetry) werden zur Erfassung punktueller Geschwindigkeiten verwendet, mit Hilfe von ADCP-Messungen (*A*coustic *D*oppler *C*urrent *P*rofiler) kann die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Querschnitt mit sehr hoher räumlicher Auflösung erfasst werden. Auf diese Messtechnik wird in Kap. 4.2 genauer eingegangen.

Bei der Wahl eines Verfahrens zur Messung von Fließgeschwindigkeiten sollten die Randbedingungen vor Ort, die erforderliche Menge und Genauigkeit der Ergebnisse, sowie mögliche Anforderungen an die Messwerte im Zuge einer weiterführenden Verwendung berücksichtigt werden.

- Tracer- und Schwimmermessungen sind mit relativ geringem Aufwand durchführbar, liefern aber nur eine mittlere Fließgeschwindigkeit im betrachteten Abschnitt. Diese Technik wird für den Einsatz in Wildbächen und alpinen Gewässern empfohlen, wo der Einsatz alternativer Methoden mit Schwierigkeiten verbunden ist und Ungenauigkeiten in den Ergebnissen von mehreren Prozent in Kauf genommen werden können.
- Hydrometrische Flügel bieten den Vorteil, dass das zuständige Messpersonal meist langjährige Erfahrungen im Umgang mit dieser Technik hat. Sind die Messgeräte kalibriert, können Geschwindigkeitsmessungen ohne das Einstellen von Geräteparametern durchgeführt werden. Die Technik ist robust und einfach zu bedienen, und die Ergebnisse weisen bei günstigen Messbedingungen eine Genauigkeit von $\pm 2 - 5 \%$ auf. Nachteilig wirkt sich vor allem in großen Messquerschnitten der hohe Zeitaufwand aus. So benötigt beispielsweise die Erfassung der Geschwindigkeitsverteilung in einem 50 m breiten Querschnitt mit Hilfe von Flügelmessungen zwei Stunden oder mehr, während eine ADCP-Messungen trotz höherer Messwertdichte und mindestens gleichwertiger Ergebnisqualität in maximal 30 Minuten beendet ist.
- Das Laufzeitverfahren wird dann eingesetzt, wenn eine permanente Erfassung der Fließgeschwindigkeiten erforderlich ist. Im Vergleich zur Geschwindigkeitsmessung mit stationären Horizontal-ADCPs (Kap.4.2.3.2) haben Laufzeitverfah-

ren den Nachteil, dass sie an beiden Ufern eine Anbindung an die Infrastruktur benötigen und nur die mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt ermitteln, während H-ADCPs mehrere Messwerte entlang der Gewässerbreite aufzeichnen, was vor allem bei heterogenen Geschwindigkeitsverteilungen die Genauigkeit des Ergebnisses erhöht.

- Der Einsatz der PIV-Methode zur Fließgeschwindigkeitsmessung in natürlichen Gewässern wird erst seit Kurzem untersucht. Erste Erfahrungen zeigen, dass sich das Verfahren besonders gut dazu eignet, großräumige Vorgänge, wie beispielsweise Mischprozesse beim Zusammenfluss von Gewässern, makroskalige Wirbelstrukturen und Hochwasserabflüsse, vom Helikopter aus berührungslos – und damit auch gefahrlos – zu erfassen. Voraussetzung dafür ist die optische Erkennung der Strömungen durch Oberflächenwellen, Schaum, Treibgut oder Ähnlichem. Der Vorteil der Technik liegt in der verhältnismäßig schnellen Erfassung von Oberflächengeschwindigkeiten entlang ganzer Flussabschnitte. Angaben über die Genauigkeit der Messergebnisse liegen aufgrund fehlender Vergleichsmessungen noch nicht vor.
- Die Ultraschall-Dopplertechnik stellt auf dem Gebiet der Fließgeschwindigkeitsmessung sicher die zukunftsträchtigste Methode dar. Ihre Vorteile liegen in der hohen erfassbaren Messwertdichte und der großen Messgenauigkeit von $< 2\%$ bei idealen Messbedingungen. Der erforderliche Zeitaufwand beträgt nur einen Bruchteil dessen, was für vergleichbare konventionelle Geschwindigkeitsmessungen veranschlagt werden muss. Des Weiteren ermöglicht die Auswertung der ADCP-Daten auch Rückschlüsse auf zusätzliche Messgrößen, wie beispielsweise Geschiebebeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen. Als Nachteil im Vergleich zu herkömmlichen Methoden können die hohen Anschaffungskosten und die erforderliche intensive Einarbeitung in die Messtechnik genannt werden. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, ist die Optimierung einer Vielzahl von Parametern und Einstellungen erforderlich, wozu die Kenntnis aller wählbaren Einstellungen und der jeweiligen Einsatzbereiche unerlässlich ist.

3.3 Abflussmessungen

Auch zur Erfassung des Abflusses stehen heute eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren und Methoden zur Verfügung. Ihr Anwendungsbereich hängt stark von den Randbedingungen im jeweiligen Gewässer ab. Die direkte messtechnische Erfassung

des Abflusses in der Einheit Volumen pro Zeit ist sehr aufwändig und in den meisten Fällen nicht in die Praxis umzusetzen. Deshalb wird fast immer auf indirekte Methoden zurückgegriffen und der Abfluss aus anderen erfassten Messgrößen, wie der Fließgeschwindigkeit und dem Wasserstand, berechnet.

Direkte Messverfahren

Zur direkten Abflussmessung zählt die volumetrische Erfassung des Abflusses mit kalibrierten Messgefäßen oder Messbehältern. Dieses Verfahren liefert zwar exakte Ergebnisse, kann aber nur bei kleinen Durchflüssen von mehreren Litern pro Sekunde angewendet werden. Auch die Tracermessung, die bereits in Kap. 3.2 erwähnt wurde, zählt zu den direkten Methoden der Abflussmessung.

Indirekte Messverfahren

Eine weitere Möglichkeit der Abflussermittlung bieten Messwehre, Messröhren oder Messgerinne. Aus den erfassten Messwerten Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit und den bekannten Querschnittsabmessungen kann der Abfluss anhand der gültigen Überfalls- bzw. Fließformeln berechnet werden. Die Anwendung dieser Methode ist jedoch mit erheblichem baulichen Aufwand verbunden. Zudem stellen die Bauwerke meist einen schwerwiegenden Eingriff in das natürliche Gewässer dar.

Geschwindigkeitsinformationen in natürlichen, frei fließenden Gewässerabschnitten können bei bekannter Querschnittsfläche auch unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung $Q = A \cdot v$ zur Berechnung des Abflusses herangezogen werden. Stehen mehrere Messwerte im Querschnitt zur Verfügung, so wird dieser in Teilflächen unterteilt, die Teilabflüsse berechnet und anschließend aufsummiert. In den meisten Fällen wird der Abfluss jedoch aus kontinuierlich erfassten Wasserständen und einer zuvor aufgestellten Wasserstand-Abfluss-Beziehung – auch Abflusskurve genannt – ermittelt. Dieses Verfahren setzt allerdings voraus, dass eine ausreichende Anzahl von Abflussmessungen die Gültigkeit der Abflusskurve über das zu erwartende Spektrum von Wasserständen sicherstellt und dass die hydraulischen Verhältnisse im Bereich des Messquerschnitts gleichbleibend sind, um auch eine zeitliche Konstanz der Abflusskurve zu gewährleisten.

3.4 Geschiebemessungen

Nach DIN4049 [1994] werden alle Feststoffe, die an der Gewässersohle bewegt werden, als Geschiebe bezeichnet. Dabei handelt es sich um ein Gemisch von Körnern unterschiedlicher Form und Größe mit einer Dichte von 2500 - 2700 kg/m³. Die Bewegung erfolgt meist hüpfend und rollend, wobei der Kontakt zur Sohle nur für kurze Zeit unterbrochen wird. Eine klare Abgrenzung, ab welcher Ablösungsdauer die Körner als Schwebstoffe bezeichnet werden, existiert nicht.

In der Regel werden Geschiebetransport und -zusammensetzung durch die Entnahme und Auswertung von Proben bestimmt. Die Geschiebeentnahme kann dabei mit verschiedenen Geräten erfolgen. Prinzipiell können diese in mobile und stationäre Fangeinrichtungen unterschieden werden. Für die Bestimmung der Kornzusammensetzung ist zudem noch die Unterscheidung in gestörte und ungestörte Proben wichtig.

Stationäre Fangeinrichtungen

Bei stationären Fangeinrichtungen handelt es sich um in der Gewässersohle fest installierte Vorrichtungen, auch Geschiebefallen genannt. Sie können entweder die gesamte Sohlbreite oder nur einen Teilbereich abdecken. Die Behälter zum Auffangen des Geschiebes müssen in regelmäßigen Abständen geleert werden. Einrichtungen dieser Art bieten den Vorteil, Geschiebe über lange Zeiträume (bis zu einem Jahr) aufnehmen zu können. Zwischen den Entleerungen sind die Bauwerke praktisch wartungsfrei, was Personal und somit auch Kosten spart.

Mobile Geschiebefänger

Der große Vorteil mobiler Fangeinrichtungen ist die Flexibilität bei der Wahl des Messquerschnitts sowie bei der Festlegung der Position für die Einzelmessungen innerhalb eines Querschnitts. Um zu verhindern, dass Material unter der Fangeinrichtung hindurch transportiert werden kann, sollte das Entnahmegesetz möglichst dicht an der Sohle aufliegen. Das Einbringen eines Geschiebesammlers auf die Gewässersohle führt zwangsweise zu einer Veränderung der Stromlinien im Nahbereich des Sammlereinflaßes. Deshalb spielt bei der Auswertung der Fangmenge die Effizienz des Sammlers eine entscheidende Rolle. Dabei handelt es sich um „*das Verhältnis des gesammelten Geschiebes zu dem im ungestörten Bereich gleicher Breite auf der Flusssohle transportierten Geschiebe*“ [DVWK127, 1992]. Aufgrund der von Gewässer zu Gewässer stark

3 Entwicklung der Messtechnik

variierenden Randbedingungen werden mobile Geschiebefänger in Hinblick auf die jeweiligen Anforderungen oft als Einzelanfertigungen ausgeführt. DVWK127 [1992] enthält eine kurze Beschreibung der im deutschsprachigen Raum am häufigsten verwendeten Modelle. Die folgenden drei Modelle eignen sich besonders bei sandigen bis kiesigen Gewässersohlen und können relativ einfach an variable Randbedingungen angepasst werden.

- Der *Bed Load Transport Meter Arnhem* (BTMA) stammt aus Holland und gilt als Vorbild für die Entwicklung weiterer Geschiebefänger.
- Der von der *Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG) entwickelte Geschiebefänger ist aus dem BTMA hervorgegangen.
- Auch der HELLEY SMITH Fänger stellt eine Weiterentwicklung des BTMA dar.

Messungen zur quantitativen Erfassung des Geschiebetransports sind um einiges anspruchsvoller als Abflussmessungen. Der Einbau stationärer Anlagen stellt aufgrund des permanenten Rückhalts der Feststoffe in den Bauwerken einen erheblichen Eingriff in den Geschiebehaushalt des Gewässers dar. Negative Auswirkungen auf die morphologische Entwicklung des unterhalb gelegenen Abschnitts sind dabei nicht auszuschließen. Mobile Geschiebemessungen beeinflussen die Gewässermorphologie zwar nur unwesentlich, sind aber mit einem hohen Personalaufwand verbunden. Das Einbringen der Messgeräte ist zudem nicht überall möglich. Die Beschränkung auf kurzzeitige, punktuelle Messungen, sowie das Problem der Messwertverfälschung aufgrund der lokalen Strömungsbeeinflussung durch den Sammler sind weitere Nachteile, die die Gewinnung qualitativ hochwertiger Daten erschweren.

Qualitative Messverfahren

Ergänzend zu den soeben beschriebenen quantitativen Messungen können auch qualitative Aussagen über den Transport von Feststoffen an der Sohle getroffen werden [DVWK127, 1992].

- Bei Akustischen Messungen werden mit Hilfe von Unterwassermikrofonen (Hydrophonen) die Geräusche aufgezeichnet, die die von der Strömung transportierten Körner beim Aufschlagen auf einen eingebrachten Metallkörper verursachen. Der derzeitige Stand der Forschungen auf diesem Gebiet ermöglicht jedoch noch keine quantitativen Aussagen. Erfahrungen haben außerdem gezeigt, dass die Methode nur bei grobkörnigem Material einsetzbar ist.

- Als weitere Methode der qualitativen Geschiebemessung gilt die Zugabe von speziell gekennzeichnetem Material. Die Körner werden mit Farbe, mit lumineszierenden Partikeln, durch radioaktive Stoffe oder durch radioaktive Aktivierung markiert. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Zugabe von magnetischem Geschiebe. Derartige Messungen mit Hilfe von Tracern werden vor allem in tidebeeinflussten Gewässern durchgeführt.
- Auch der Einsatz von Unterwasserkameras ermöglicht qualitative Aussagen über den Transport von Geschiebe. Der Anwendungsbereich ist jedoch auf klare Gewässer mit ausreichender Sichtweite beschränkt.

Entnahme von Sohlmaterial

Auch für die Entnahme von Sohlmaterial zur Bestimmung der Kornverteilung stehen verschiedene Geräte zu Verfügung. Mit Hilfe von Greifern, Schürfgeräten und Bodensaugern werden so genannte „*gestörte Proben*“ gewonnen. Für die spätere Auswertung spielt die Eindringtiefe des Entnahmegerätes in die Gewässersohle eine wichtige Rolle. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass ein erforderliches Mindestprobengewicht für die Erfassung der Grobkomponenten der Kornverteilung erreicht werden soll. DIN18123 [1996] regelt die Entnahmemengen und schreibt beispielsweise für ein geschätztes Größtkorn von 2 mm eine Mindestprobenmenge von 150 g vor, bei einem Größtkorn von 50 mm müssen mindestens 12 kg Sohlmaterial entnommen werden. Um eventuell vorhandene, vertikale Schichtungen untersuchen zu können, werden „*ungestörte Proben*“ der Sohlenoberfläche benötigt. Diese kann man mit Hilfe von Kernbohrungen (Probendurchmesser bei sandiger Sohle bis zu 10 cm, bei grobem Material dementsprechend größer) oder mit dem Gefrierkernverfahren gewinnen. In zweitem Fall wird eine Gefrierlanze in die Gewässersohle eingebracht, und nach der erforderlichen Einwirkzeit inklusive dem an die Lanze angefrorenen Sohlmaterial wieder entnommen. Diese Methoden ermöglichen zwar eine Auswertung des Geschiebematerials hinsichtlich seiner Kornzusammensetzung, liefern aber keinerlei Informationen hinsichtlich der Menge transportierten Materials pro Zeiteinheit.

3.5 Schwebstoffmessungen

In den Gewässern des bayerischen Alpenvorlands besteht ein Großteil der transportierten Feststoffe aus Schwebstoffen. Nach LfW [2000] hat die Schwebstoffmessung in Bayern eine lange Tradition. Die erste Schwebstoffmessstelle wurde 1924 am Lech in

3 Entwicklung der Messtechnik

Füssen eingerichtet. Sechs Jahre später, im Jahr 1930, wurde mit der systematischen Schwebstoffmessung in Bayern begonnen. Derzeit werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) bzw. den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern 40 Schwebstoffmessstellen an 33 bayerischen Flüssen unterhalten.

Ziel der Schwebstoffmessung ist die Bestimmung der Konzentration (g/l bzw. kg/m³) und in manchen Fällen auch der Zusammensetzung (Sieblinie, organische Bestandteile, Mineralogie) der Schwebstoffe. Generell können dafür verschiedene Verfahren herangezogen werden. Bis zum heutigen Zeitpunkt werden an den bayerischen Schwebstoffpegeln – bis auf sehr wenige Ausnahmen – nur Einpunktprobenentnahmen durchgeführt, die im Hinblick auf die Schwebstoffkonzentrationen ausgewertet werden. Um von diesen Daten auf die mittlere Schwebstoffkonzentration im Querschnitt schließen zu können, sind zusätzliche Vielpunktmessungen erforderlich. Diese Messungen sind in Ermangelung geeigneter Messgeräte oft mit großen Schwierigkeiten behaftet und werden – auch wegen des enormen, dafür benötigten Personalaufwands – immer seltener durchgeführt.

Der jeweilige Beginn der Aufzeichnungen, die Anzahl der seitdem durchgeführten Messungen, die Existenz von Zusatzmessungen, wie beispielsweise der Sieblinienbestimmung von Schwebstoffen, sowie die Anzahl der zusätzlich durchgeführten Vielpunktmessungen variieren von Pegel zu Pegel sehr stark. Die konkrete Situation an den im Zuge dieser Arbeit untersuchten Pegeln wird in den Kap. 6.2.5.3 (für den Pegel Oberaudorf am Inn) und 6.3.5.3 (für den Pegel Staudach an der Tiroler Achen) näher erläutert.

Entnahme von Wasserproben

Die einfachste Art der Schwebstoffmessung stellt die Entnahme von Wasserproben dar. In DVWK125 [1986] werden folgende Messgeräte bzw. Hilfsmittel für die Entnahme von Wasserproben angeführt:

- Eimer mit einem Fassungsvermögen von fünf bis fünfzehn Liter für Oberflächenentnahmen, besonders in kleinen Flüssen
- Schwebstoffmessgerät System W. SCHRÖDER mit einem Liter Flascheninhalt
- Wasserschöpfer System SCHWEDER-WOHLLENBERG mit einem Liter Flascheninhalt
- Wasserschöpfer System HYDRO-BIOS für kleine Fließgeschwindigkeiten, mit 3.5 oder fünf Liter Fassungsvermögen

- Doppelröhrengerät des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) für Messungen an einer Stange mit Bodenplatte, zwei waagrecht angeordnete Zylinder mit je 0.5 Liter Inhalt
- Vertikal-Wasserschöpfer System RUTTNER für tiefe Gewässer mit geringer Strömung
- integrierender Wasserschöpfer System TIMON für Messungen im Küstengebiet der Nordsee
- Schwebstoffentnahmeggerät der Firma OTT für Vielpunktmessungen an einer Seilkrananlage, bestückt mit sechs Flaschen zu je zwei Liter Inhalt
- Delfter Flasche für die Entnahme von grobkörnigeren Schwebstoffen
- Pumpen zur Durchführung von Vielpunktmessungen

Alternativ dazu kann beispielsweise der US-P61 Suspended Sediment Sampler [FISP, 2008] verwendet werden (Abb. 3.1), ein isokinetisches⁹ Entnahmeggerät, das im österreichischen Alpenvorland sehr erfolgreich eingesetzt wird (Stimpfl [2006] und Haimann [2007]). An den großen, schiffbaren Gewässern Deutschlands werden Schwebstoffproben von Schiffen oder Booten aus mit Pumpen gewonnen.

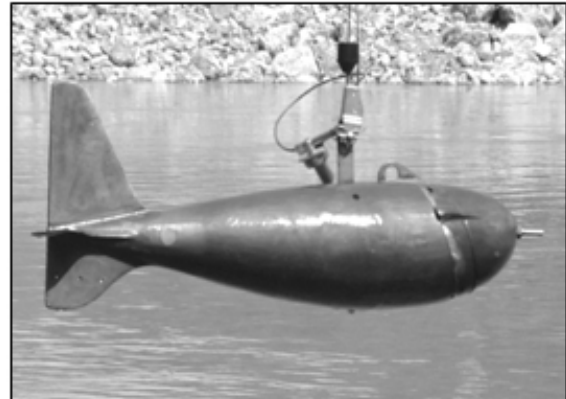


Abbildung 3.1: Schwebstoffprobenentnahme mit einem US-P61 Suspended Sediment Sampler (Messgerät des hydrographischen Dienstes Tirol)

⁹isokinetisch bedeutet geschwindigkeitsgleich. Auf diese Weise wird verhindert, dass durch die Probenentnahme eine Veränderung der Konzentration oder eine Fraktionierung stattfindet und das Messergebnis verfälscht wird.

Auswertung gewonnener Wasserproben

Entnommene Wasserproben können entweder volumetrisch oder gravimetrisch ausgewertet werden. Die volumetrische Methode ist ausschließlich für die Auswertung mineralischer Schwebstoffe geeignet [DVWK125, 1986]. Die gut durchmischte Wasserprobe wird in einen Imhoff-Trichter¹⁰ [DIN38409, 1980] gefüllt, nach zwei Stunden Absetzzeit wird die Menge der Feststoffe, die sich im Bereich der Trichterspitze abgesetzt hat, über eine Skala abgelesen. Im Rahmen der gravimetrischen Auswertung von Schwebstoffen werden die gewonnenen Wasserproben filtriert, die Rückstände anschließend in einem Trockenschrank getrocknet und danach gewogen. Limitierender Faktor hierbei ist die Porengröße der Filter, die im Mittel bei ca. $6.1 \cdot 10^{-3}$ mm liegt [DVWK125, 1986].

Zur Analyse der Korngrößenverteilung von Schwebstoffen können folgende Verfahren verwendet werden.

- Siebanalyse: Körner mit einem Durchmesser größer 0.6 mm können trocken gesiebt werden, bei kleineren Korngrößen muss eine Nasssiebung durchgeführt werden.
- Schlämmanalyse: Bei Korngrößen von 0.001 - 0.125 mm wird mit Hilfe eines Aräometers¹¹ [DIN18123, 1996] eine Schlämmanalyse durchgeführt. Das Verfahren beruht auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit von verschieden großen Partikeln. In zeitlichen Abständen werden die Dichteänderungen in der Suspension gemessen und anschließend unter Verwendung von Eichkurven ausgewertet.
- Sedimentationsanalyse: Aus den messtechnisch erfassten Verteilungen der Sinkgeschwindigkeiten wird auf die Kornverteilung der Schwebstoffe geschlossen.
- optische Verfahren: Änderungen in der optischen Dichte der Suspension während des Sedimentationsvorgangs werden gemessen, zusätzlich sind auch Kornformbestimmungen mit Hilfe von Mikroskopen und Maßstabsrastern möglich.

Trübungsmessung

Ein weltweit sehr verbreitetes Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Schweb-

¹⁰Trichterförmiges Glasgefäß mit genau definiertem Inhalt und Ableseskala mit Millilitereinteilung.

¹¹vom griechischen araios = dünn und métron = Maß. Messgerät zur Bestimmung der Dichte bzw. des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten.

stoffgehalts ist die optische Messung der Trübung. Dabei kommen zwei verschiedene Messmethoden zum Einsatz:

- Bei der Reflexionsmethode (Streulichtmessung) wird die durch Feststoffe im Wasser verursachte Reflexion von emittiertem Licht gemessen.
- Bei der Transmissionsmessung (Durchlichtmessung) wird die Abschwächung des emittierten Lichts durch Feststoffteilchen im Wasser gemessen.

Da die Trübung neben der Konzentration der Schwebstoffe auch von der Korngröße, der Kornbeschaffenheit und von der Konzentration der im Wasser gelösten Stoffe abhängig ist, ist die Überführung der erhaltenen Trübungswerte in Schwebstoffkonzentrationen schwierig. Zur Interpretation der Messergebnisse werden die Trübungsmessgeräte mit einer Formazinsuspension kalibriert. Die Ergebnisse werden entweder in Relation zu den Kalibrierungswerten gesetzt (FAU = Formazin Attenuation Units, FTU = Formazin Turbidity Unit, FNU = Formazin Nephelometric Units), oder mit Hilfe von Korrekturfaktoren in Feststoffkonzentrationen umgerechnet. Zur Überprüfung der auf diese Art erhaltenen Ergebnisse sind konventionelle Vergleichsmessungen der Schwebstoffkonzentrationen erforderlich.

Messung mittels radioaktiver Strahlung

Nach DVWK125 [1986] kann die Schwebstoffkonzentration auch mit Hilfe von „Gamma-Sonden“ erfasst werden. Diese sind mit langlebigen Isotopen, wie z. B. Cd^{109} oder Am^{241} ausgestattet und arbeiten mit dem Prinzip der Transmission oder der Rückstreuung. Auch hier ist eine Umrechnung auf Schwebstoffgehalte sehr schwierig, weil die gemessene Strahlenminderung bei beiden Methoden neben der Konzentration auch von der Kornzusammensetzung der Schwebstoffe und von den im Wasser gelösten Stoffen abhängig ist. Die untere Nachweisgrenze für eine Erfassung der Schwebstoffkonzentration mit Hilfe radioaktiver Strahlung ist mit 300 - 400 mg/l relativ hoch.

Messung mit Ultraschall-Dopplergeräten

Seit einigen Jahren wird auch an der Auswertung der Messdaten von Ultraschall-Dopplergeräten zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen gearbeitet. Aufgezeichnete Informationen über Menge und Beschaffenheit der reflektierten Ultraschallsignale werden verwendet, um Rückschlüsse auf die Konzentrationen von Partikeln in der Strömung ziehen zu können. In Kap. 4.2.5 wird dieses Verfahren inklusive seiner Vor- und Nachteile sowie der Anwendungsgrenzen beschrieben.

3 Entwicklung der Messtechnik

Bei der Wahl einer geeigneten Methode zur Messung von Schwebstoffkonzentrationen sind die jeweiligen Vor- und Nachteile sowie die Anwendungsgrenzen der verschiedenen Verfahren zu berücksichtigen. Nachteile bei der Entnahme von Schwebstoffproben sind der hohe Personal- und Zeitaufwand, der für die Gewinnung und Auswertung der Proben benötigt wird. Die Forderung einer „ungestörten“ Wasserprobe ist zudem nicht immer zu erfüllen, weil manche Entnahmegерäte Wirbel oder Turbulenzen verursachen und die natürlichen Schwebstoffverteilungen dadurch lokal gestört werden. Des Weiteren beschränkt sich die gewonnene Datenmenge auf punkt- oder linienförmige Informationen, ein flächiges Verteilungsbild kann dadurch nicht gewonnen werden. Optische sowie akustische Messungen zur Erfassung von Schwebstoffkonzentrationen sind zwar in der Durchführung wesentlich einfach, hier gilt es jedoch große Herausforderungen bei der Auswertung der Messdaten zu meistern. Die aufgezeichneten Daten sind nicht nur von den Konzentrationen der Schwebstoffe, sondern auch von einer Vielzahl anderer Parameter abhängig, die berücksichtigt werden müssen. Deshalb sind aufwändige Kalibrierungen der Messgeräte bzw. umfangreiche Zusatzmessungen notwendig, um die erfassten Daten eindeutig interpretieren zu können. Optische Messungen liefern zudem nur punktuelle Informationen – meist aus dem Uferbereich des Gewässers, wo die Geräte eingebaut sind – und erfordern daher eine Extrapolation von den messtechnisch erfassten Bedingungen in einem Punkt auf die mittlere Schwebstoffkonzentration im gesamten Querschnitt.

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Akustische Messgeräte werden in vielen Gebieten der Wissenschaft – beispielsweise in der Medizin [Jensen et al., 2006] – zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt. Je nach Verfahren werden dafür entweder die Laufzeiten oder die Frequenzänderungen der Schallwellen ausgewertet.

4.1 Physikalische Grundlagen

Physikalisch gesehen kann Schall als eine „Störung“ im Druckfeld eines leitenden Mediums beschrieben werden. Die Moleküle des Leiters werden in periodische Schwingungen versetzt, wodurch es zu Dichte- und Druckänderungen kommt.

4.1.1 Schallausbreitung

Die Bereiche höheren und niedrigeren Drucks (Wellenberge und Wellentäler) breiten sich in ruhenden Gasen und Flüssigkeiten als Longitudinalwellen¹², in festen Körpern auch als Transversalwellen¹³ aus. Im Vakuum gibt es keine Schallausbreitung. Die Schallgeschwindigkeit c ist von den Materialeigenschaften des Ausbreitungsmediums, sowie dem Druck und der Temperatur abhängig. Sie ist in Festkörpern am größten und in Gasen am kleinsten. Formeln zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit werden unter anderem in Grosso und Mader [1972] angegeben.

Tabelle 4.1 beinhaltet eine Zusammenstellung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Süßwasser und in Luft bei verschiedenen Temperaturen.

¹²Physikalische Welle, auch Längswelle genannt, die in Ausbreitungsrichtung schwingt.

¹³Physikalische Welle, die senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingt.

T [°C]	-10	0	10	20	30
Luft	325	331	337	343	349
Wasser	1348	1407	1449	1484	1511

Tabelle 4.1: Schallausbreitungsgeschwindigkeit c [m/s] in Luft und Wasser bei verschiedenen Temperaturen

Zwischen der Schallgeschwindigkeit c in [m/s], der Schallwellenlänge λ in [m] und der Frequenz f in [1/s] besteht folgender Zusammenhang.

$$c = \lambda \cdot f \tag{4.1}$$

Anhand der Frequenz wird Schall in *Infraschall* (< 16 Hz), *Hörschall* (16 Hz - 20 kHz) und *Ultraschall* (> 20 kHz) unterteilt [Borucki, 1989]. Die menschliche Wahrnehmung des Hörschalls wird dadurch ermöglicht, dass die Druckwellen das Trommelfell in Schwingungen versetzen. Diese werden im Innenohr in elektrische Signale umgewandelt, welche wiederum vom Gehirn als Geräusch interpretiert werden. Wendet man Gleichung (4.1) für eine Schallwelle an der unteren Hörgrenze in Luft bei 20 °C an, so erhält man eine dazugehörige Wellenlänge von etwa 20 m, die Wellenlänge von Schall an der oberen Hörgrenze in Luft beträgt zirka 1.7 cm. Akustische Messverfahren arbeiten meist im Ultraschallbereich.

Besondere Bedeutung hat die Ausbreitung von Schall im Wasser, wo sich elektromagnetische Wellen (z. B. Radiowellen) und Licht nur schlecht ausbreiten können und beschränkte Reichweiten besitzen. Technische Anwendung findet das Phänomen der Schallausbreitung heute vor allem in der Navigation und der Ortung unter Wasser. Der verwendete Frequenzbereich liegt zwischen 10 Hz und 1 MHz [Simpson, 2001].

4.1.2 Der Doppler-Effekt

Bei homogen schallleitenden Medien erfolgt die Schallausbreitung, wenn sich die Schallquelle und das Medium in Ruhe befinden, in alle Richtungen symmetrisch. Bewegt sich der Sender im Medium, oder bewegt sich das Medium um den Erreger, so sind die Kreise der Druckwellen nicht mehr konzentrisch – die Wellenlänge und damit auch die Frequenz ändern sich (Abb. 4.1).

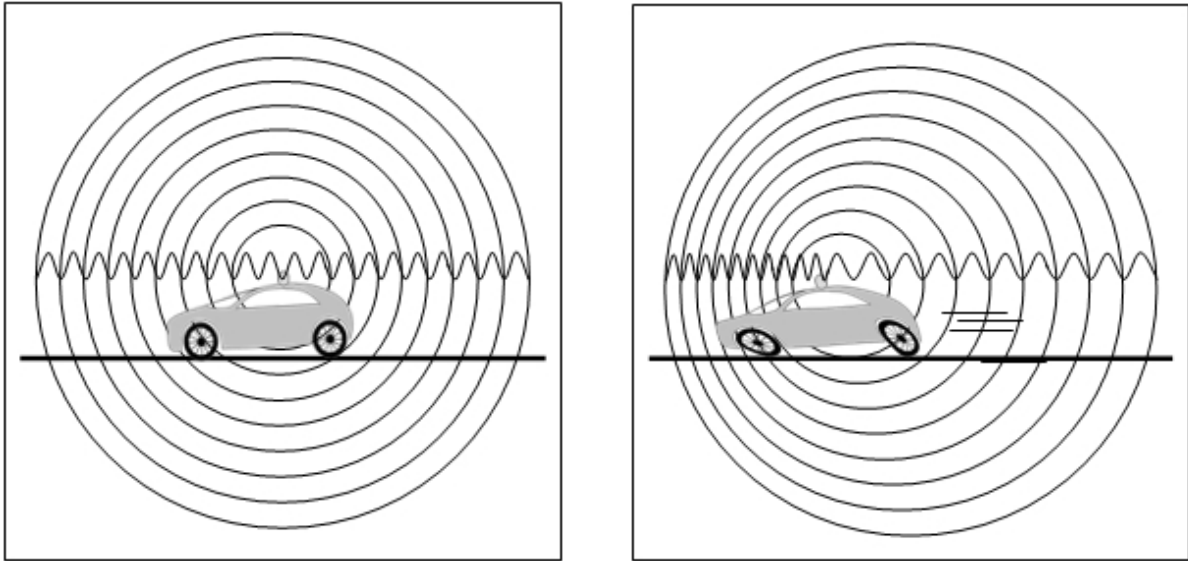


Abbildung 4.1: Doppler-Effekt bei bewegtem Sender

Aber auch, wenn sich die Position des Beobachters (Empfängers) relativ zur Schallquelle ändert, kommt es zur Doppler-Verschiebung (Abb. 4.2). Ist die linke Person in Abb. 4.2 in Ruhe, ziehen an ihr in der Zeit $\Delta T = T_2 - T_1$ vier Wellenberge des ausgesendeten Signals vorbei. Bewegt sich die linke Person hingegen auf die Schallquelle zu, ziehen an ihr in der gleichen Zeit sieben Wellenberge vorbei – die Frequenz ist also größer.

Dieses im Alltag oft auftretende Phänomen der Frequenzverschiebung wird nach seinem Entdecker *Doppler*¹⁴ *Verschiebung* genannt [Simpson, 2001]. Der Unterschied zwischen ausgesendeter und empfangener Frequenz aufgrund von Relativbewegungen des Senders, des Empfängers oder des leitenden Mediums wird mit folgender Formel berechnet [Borucki, 1989].

$$f_E = f_S \cdot \frac{c \pm v_E \cos\alpha \pm v_M \cos\delta}{c \pm v_S \cos\beta \pm v_M \cos\delta} \quad (4.2)$$

f_E ... vom Empfänger wahrgenommene Frequenz
 f_S ... ausgesendete Frequenz

¹⁴Christian Johann Doppler (1803 - 1853), österreichischer Physiker und Mathematiker. Sein Hauptwerk *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*, das der Entdeckung des Doppler-Effekts gleichgesetzt wird, verlas er im Mai 1842 vor der Königlich Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften.

4 Ultraschall-Doppler-Technik

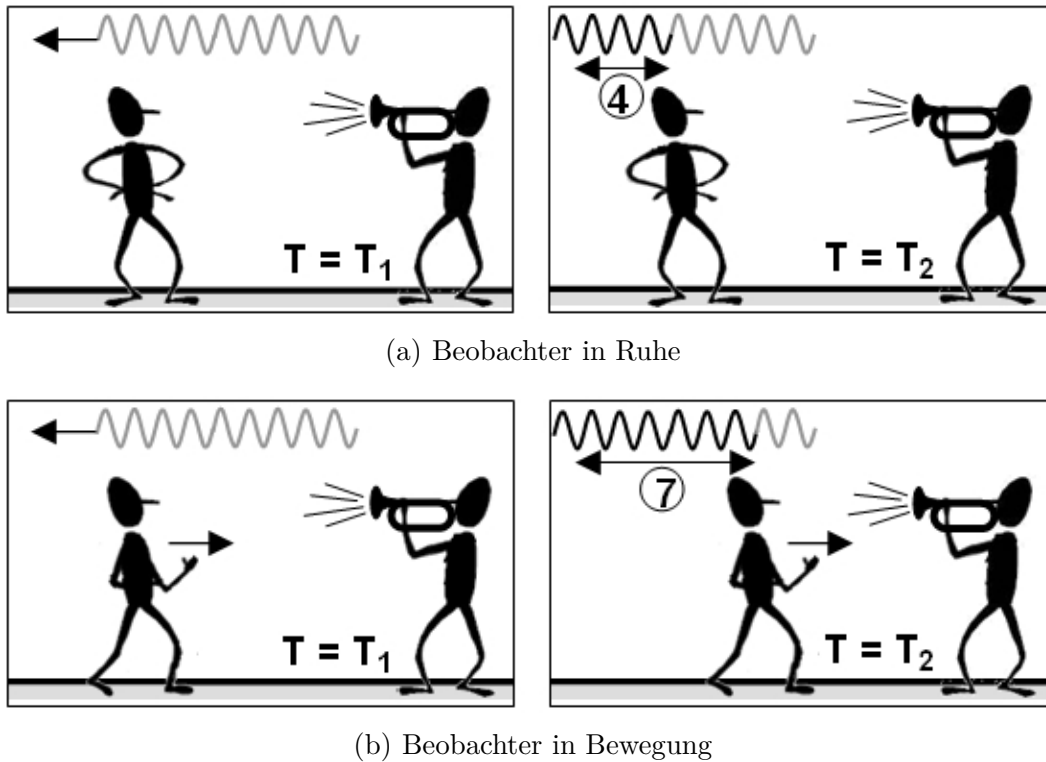


Abbildung 4.2: Doppler-Effekt bei bewegtem Empfänger

c	...	Schallgeschwindigkeit [m/s]
v_E	...	Geschwindigkeit des Empfängers
v_S	...	Geschwindigkeit des Senders
v_M	...	Geschwindigkeit des leitenden Mediums
α	...	Winkel zwischen v_E und der Verbindungslinie Sender - Empfänger
β	...	Winkel zwischen v_S und der Verbindungslinie Sender - Empfänger
δ	...	Winkel zwischen v_M und der Verbindungslinie Sender - Empfänger

Dieser mathematische Zusammenhang ist in Abb. 4.3 grafisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass nur die Geschwindigkeitsanteile parallel zu der Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger eine Frequenzverschiebung verursachen.

Das Maß der Frequenzverschiebung lässt sich nach RDI [1996] auch ganz allgemein formulieren.

$$\Delta f = f \cdot \frac{v}{c} \quad (4.3)$$

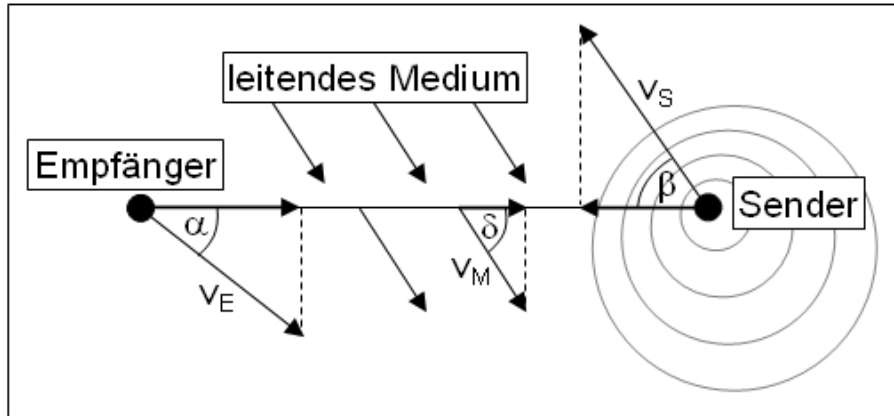


Abbildung 4.3: An der Doppler-Verschiebung beteiligte Geschwindigkeitsanteile

Δf	...	Frequenzverschiebung [1/s]
f	...	ausgesendete Frequenz [1/s]
v	...	Relativgeschwindigkeit (maßgebende Anteile nach Abb. 4.3) [m/s]
c	...	Schallgeschwindigkeit [m/s]

Demnach ist die messbare Frequenzverschiebung Δf des Schallimpulses je größer, desto größer die Relativgeschwindigkeit v zwischen Schallquelle, Ausbreitungsmedium bzw. Empfänger ist.

4.2 ADCP-Messtechnik

Ultraschall-Doppler-Geräte werden immer häufiger zur Erfassung von Strömungsgeschwindigkeiten im Rahmen des Gewässermonitorings eingesetzt. Die Geräte arbeiten dabei als Sender und Empfänger. Wichtigste Voraussetzung zur Anwendung dieser Technik ist das Vorhandensein von Partikeln in der Wassersäule, die die akustischen Signale reflektieren. Man geht dabei davon aus, dass sich diese Partikel mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen wie das Wasser auch. Die Ultraschallimpulse werden an den Partikeln im Wasser entweder absorbiert oder in alle Richtungen reflektiert. Die Reflexionen eines kleinen Teils der ausgesendeten Signale werden vom Messgerät wieder aufgefangen und können ausgewertet werden.

4.2.1 Das Ultraschall-Dopplergerät vom Typ *Workhorse RioGrande* von Teledyne RD Instruments

Ultraschall-Doppler-Geräte zur messtechnischen Erfassung von Relativgeschwindigkeiten werden derzeit von verschiedenen Firmen, wie z. B. Teledyne RD Instruments (RDI)¹⁵, Nortek¹⁶, Sontek¹⁷, oder OTT¹⁸ angeboten. Für die Untersuchungen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wurde ein *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) der Firma RDI verwendet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich deshalb auf dieses Gerät.

Gegründet wurde RDI im Jahr 1981 von Fran Rowe und Kent Deines [RDI, 1996]. 1983 wurde das erste ADCP produziert, mit dem kontinuierliche Messungen durchgeführt werden konnten, drei Jahre später umfasste das Programm bereits drei verschiedene Modelle, die in einem Frequenzbereich von 75 - 1200 kHz arbeiteten. Aber erst 1991 machte die Entwicklung der ADCP-Technik mit dem Verkauf des ersten Breitband-Gerätes einen großen Sprung nach vorne. Breitband-ADCPs weisen im Vergleich zu ihren auf Schmalband-Technik basierenden Vorgängern – aufgrund ihrer um das 100-fache höheren Bandbreite – eine um fast das 100-fache kleinere Streuung der Messwerte auf.

Lag zu Beginn der Entwicklung der Fokus vor allem auf Geräten für den Einsatz in maritimen Gewässern, so wurden im Laufe der Jahre mehrere Modelle entwickelt, die für den Messeinsatz in Binnengewässern geeignet sind. Mit dem ADCP vom Typ *Workhorse RioGrande* (Abb. 4.4) steht nun seit einigen Jahren ein robustes Gerät zur mobilen Geschwindigkeitsmessung in mittleren bis großen Gewässern zu Verfügung.

Die Technik des *Workhorse RioGrande* ist in einem 7.6 kg schweren Zylinder aus Polyurethan untergebracht. Das Gerät verfügt über vier, voneinander unabhängig arbeitende, akustische Sender- und Empfängereinheiten, einen Kompass, ein Thermometer und einen Vertikalgyro¹⁹ zur Erfassung der vertikalen Auslenkungen des ADCPs wäh-

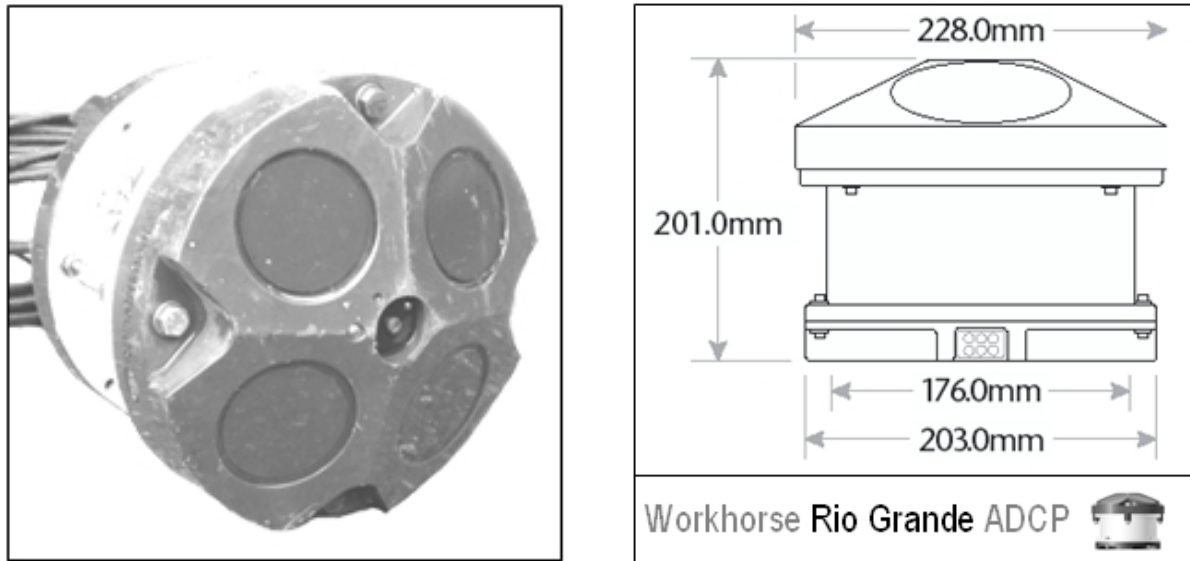
¹⁵Teledyne RDI Europe, Les Nertières, 5 allée Hector Pintus, 06610 La Gaude, France

¹⁶Nortek AS, Vangkroken 2, 1351 Rud, Norway

¹⁷YSI Hydrodata, Unit 8, Business Centre West, Avenue One, Letchworth SG6 2HB, United Kingdom

¹⁸OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Ludwigstr. 16, 87437 Kempten

¹⁹Gyro (Gyroscope) = Neigungsmesser. Dabei handelt es sich um einen Drehratensensor, der – ähnlich einem Kreiselkompass – aus der Winkelgeschwindigkeit, mit der sich das Messgerät um seine Achse bewegt, die Neigung zur Vertikalen berechnet.

Abbildung 4.4: ADCP Typ *Workhorse RioGrande* von RDI

rend einer Messung. Um ein möglichst großes Einsatzspektrum zu ermöglichen, wurde das Gerät in zwei verschiedenen Frequenzversionen entwickelt (Tab. 4.2).

Frequenz [kHz]	Bandbreite [kHz]	Strahlweite [°]	Messzellentiefe [m]	Reichweite [m]
≈ 600 (614.4)	150	1.5	0.1 - 8	100
≈ 1200 (1228.8)	300	1.0	0.05 - 4	30

Tabelle 4.2: Kennwerte des ADCP Typ *Workhorse RioGrande* von RDI

Bei Messeinsätzen im Binnenbereich werden meist Geräte mit einer Frequenz von 1200 kHz verwendet, nur bei besonders großen Fließtiefen oder sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen kommen auch 600 kHz-Geräte zum Einsatz. Mit beiden Varianten können Geschwindigkeiten bis zu maximal 20 m/s messtechnisch erfasst werden.

4.2.2 Unterteilung in mehrere Tiefenschichten

Da die Fließgeschwindigkeiten, und damit auch die auftretenden Frequenzverschiebungen, nicht im gesamten Messbereich gleich sind, muss zusätzlich noch bekannt

4 Ultraschall-Doppler-Technik

sein, in welcher Entfernung vom Messgerät die akustischen Signale reflektiert wurden. Diese Frage wird durch das so genannte *Time Gating* beantwortet. Die Zeit zwischen Aussenden und Empfangen der Schallwellen wird aufgezeichnet, und unter Miteinbeziehung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit die zurückgelegte Entfernung berechnet. Die gesamte Zeitspanne, während der Rückstreusignale empfangen und aufgezeichnet werden, wird in einzelne Zeitfenster unterteilt, alle innerhalb eines Zeitfensters ankommenden Daten werden derselben Tiefenzelle zugeordnet (Abb. 4.5).

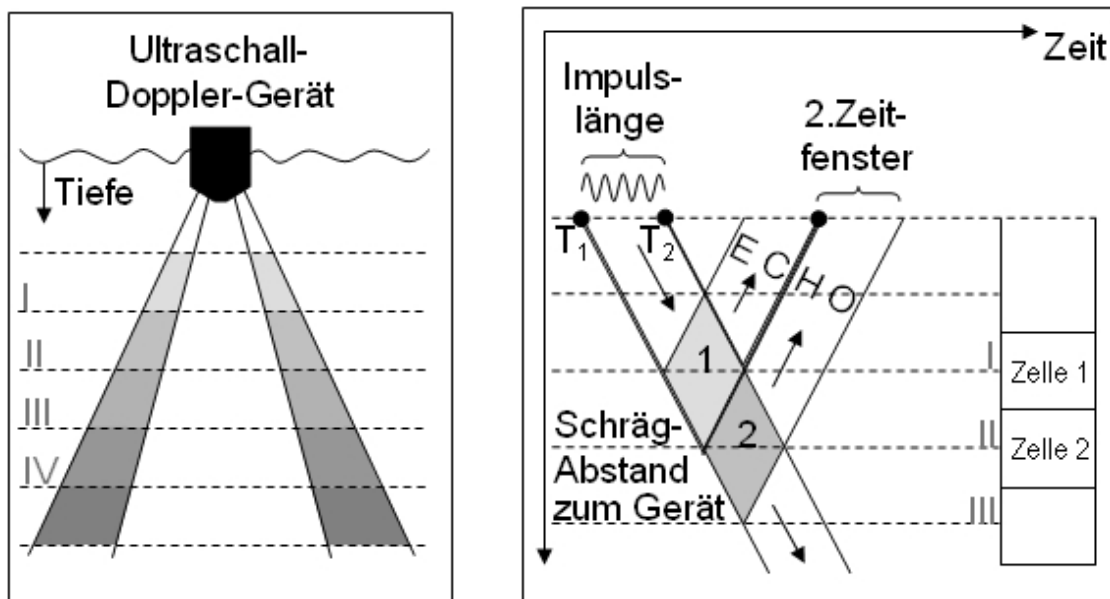


Abbildung 4.5: Unterteilung in Tiefenzellen durch *Time Gating*

Da das ausgesendete akustische Signal eine gewisse Impulslänge aufweist, werden zu einer bestimmten Zeit T Reflexionen aus unterschiedlichen Entfernungen aufgezeichnet. Abbildung 4.5 veranschaulicht dieses Phänomen. Zum Zeitpunkt T_1 verlässt die Spitze des Impulses den Sender, durch die Impulslänge verlässt das Ende erst zum Zeitpunkt T_2 den Sender. Aufgrund dieses Zeitversatzes erreicht der vordere Teil der Welle früher eine bestimmte Tiefe als der hintere Teil.

Beobachtet man die Situation zu Beginn des 2. Zeitfensters, so werden hier sowohl Reflexionen aus der Tiefe II (vom Impulsanfang) als auch aus der Tiefe I (vom Impulsende) empfangen. Aus diesem Grund kommt es zu einer Überlappung der einzelnen Tiefenzellen, wobei der Grad der Überlappung vom Verhältnis der Impulslänge zur Zellentiefe abhängig ist. Je kürzer die Impulse und je größer die Zellentiefen, desto

kleiner die Überschneidungen. Die Situation in Abb. 4.5 entspricht ungefähr einem Verhältnis von eins. In diesem Fall werden die Informationen einer Zelle vor der Mittelwertbildung dreiecksförmig gewichtet, die Werte aus dem Zentrum der Zelle haben also größere Bedeutung als die Daten aus den Randbereichen. Liegen kurze Impulse und große Zelltiefen vor, kann die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Tiefenzellen ohne Wichtung erfolgen. Generell werden möglichst kurze Schallimpulse verwendet, um eine hohe Tiefenaufösung zu erhalten.

4.2.3 Berechnung der Fließgeschwindigkeiten

Die messtechnische Erfassung der Fließgeschwindigkeiten in einem Querschnitt erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden die Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Messgerät und den Partikeln in der Strömung gemessen. Ist der ADCP während der Messung in Ruhe, entsprechen die erfassten Relativwerte den absoluten Strömungsgeschwindigkeiten. Bewegt sich der ADCP während der Messung, muss diese Bewegung bei der Berechnung der absoluten Fließgeschwindigkeiten berücksichtigt werden.

4.2.3.1 Erfassung der relativen Fließgeschwindigkeiten

Während des Rundwegs des vom ADCP ausgesendeten akustischen Impulses über die Partikel in der Wassersäule und wieder zurück erfährt der Impuls eine zweifache Doppler Verschiebung: Das erste Mal bei der Reflexion an den Partikeln in der Strömung und das zweite Mal beim Wiederauftreffen auf das Messgerät. Gleichung (4.3) muss demnach folgendermaßen modifiziert werden.

$$\Delta f = 2 \cdot f \cdot \frac{v}{c} \quad (4.4)$$

Des Weiteren muss noch berücksichtigt werden, dass nur jene Anteile der Relativgeschwindigkeit eine Doppler Verschiebung hervorrufen, die die Distanz zwischen Messgerät und Partikeln verändern (Glg. 4.2 und Abb. 4.3). Akustische Signale, die rechtwinkelig zur Strömung ausgesendet werden, werden daher an den Partikeln reflektiert und vom Messgerät wieder empfangen, ohne dass eine Änderung der Frequenz feststellbar wäre. Aus diesem Grund werden akustische Signale zur Geschwindigkeitsmessung immer schräg zur Hauptfließrichtung (Abb. 4.6) ausgesendet.

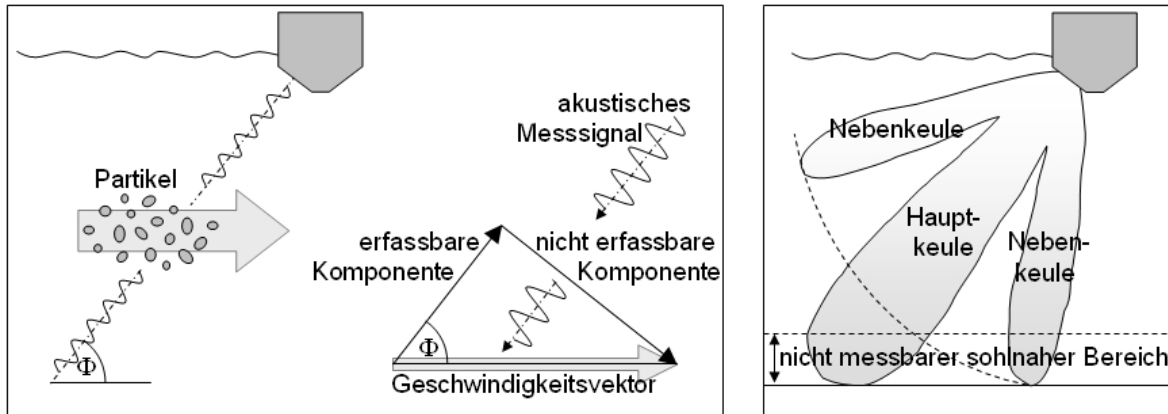


Abbildung 4.6: Auslenkung der ausgesendeten Messimpulse

Der Winkel Φ zwischen akustischem Signal und Strömungsrichtung muss dementsprechend in Glg. (4.4) implementiert werden, sodass sich schlussendlich folgender Zusammenhang ergibt [RDI, 1996].

$$\Delta f = 2 \cdot f \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos(\Phi) \quad (4.5)$$

Je steiler die Messstrahlen zur Strömungsrichtung angeordnet werden, desto größer wird der Winkel Φ , desto kleiner werden die über den Doppler-Effekt erfassbaren Geschwindigkeitskomponenten und desto größer werden die Ungenauigkeiten der Geschwindigkeitsmessung. Je kleiner der Winkel Φ gewählt wird, desto größer wird der messtechnisch nicht erfassbare sohnaher Bereich. Grund dafür sind die so genannten *Side Lobes*²⁰. Diese störenden Nebenprodukte werden in einem Winkel von 30 - 40° zum akustischen Hauptsignal ausgesendet. Erreichen sie vor der Hauptkeule die Sohle, so werden die Messdaten des Hauptstrahls von den Rückstreuensignalen der Nebenkeulen überlagert. Der dadurch beeinträchtigte sohnaher Messbereich beträgt in Abhängigkeit der Auslenkung der Messstrahlen 15 % der Fließtiefe bei 30° bzw. 6 % der Gesamttiefe bei 20° (Abb. 4.6).

²⁰Nebenkeulen

Der Teil des ausgesendeten Impulses, der nicht in die gewollte Richtung abgestrahlt wird. Nebenkeulen sind unerwünscht, weil sie die Hauptkeule schwächen und die Echosignale der Hauptkeule stören.

Bei handelsüblichen Geräten beträgt der Winkel zwischen den einzelnen *Beams*²¹ und der Geräteachse meist 20 - 30°, im Fall des hier verwendeten ADCP-Gerätes vom Typ *Workhorse RioGrande* 20°. Das Gerät verfügt über vier akustische Sensoren, die in der so genannten *Janus*²²-Konfiguration angeordnet sind (Abb. 4.4). Jeweils drei davon werden zur Berechnung der dreidimensionalen Relativgeschwindigkeiten verwendet. Sie werden mit Hilfe der aufgezeichneten Kompassdaten in vektorieller Form (east-west, north-south, up-down) abgespeichert, wobei der Einfluss einer möglichen – vom geräteinternen Neigungsmesser erfassten – vertikalen Auslenkung des ADCP (beispielsweise durch Roll- und Stampfbewegungen des Trägergerätes auf der Wasseroberfläche) bei der Ermittlung der Geschwindigkeitsanteile berücksichtigt wird. Der vierte Strahl dient der Ermittlung der so genannten *Error Velocity*, der Fehlergeschwindigkeit. Sie ist die Differenz der aus den verschiedenen Beam-Kombinationen errechneten Geschwindigkeitsvektoren und ein wichtiger Kennwert für die Homogenität der Strömung bzw. die Qualität der Messwerte.

4.2.3.2 Stationäre ADCP-Messung und *Moving Boat* Methode

Prinzipiell können ADCPs auf verschiedene Weise zur Erfassung von Geschwindigkeitsdaten eingesetzt werden. Eine Möglichkeit dabei ist der stationäre Einbau an der Sohle (senkrecht nach oben blickend) oder im Uferbereich (H-ADCP, horizontal ausgerichtet). Alternativ dazu können die Messstrahlen des ADCP den Wasserkörper von der Oberfläche aus, senkrecht nach unten blickend, durchdringen. Im Fall eines stationären Einbaus entsprechen die erfassten Relativgeschwindigkeiten den Absolutwerten der Fließgeschwindigkeit, da sich das Messgerät in Ruhe befindet. Es können aber nur Daten entlang einer Messlinie gesammelt werden, flächenhafte Messungen im gesamten Fließquerschnitt sind hier nicht möglich (Abb. 4.7).

In den meisten Fällen findet die ADCP-Messung von der Wasseroberfläche aus statt. Das Gerät wird knapp unter der Wasseroberfläche über den Messquerschnitt bewegt, die vier Beams blicken dabei nach unten. Je nach Messbedingungen kommen dabei verschiedene Trägergeräte zum Einsatz. In kleineren Fließgewässern wird meist das von OceanScience²³ entwickelte *River Boat*, ein 1.2 m langer, 0.8 m breiter und 6 kg schwerer Trimaran, verwendet. Trägerboote dieser Größenordnung, wie auch der

²¹Leitstrahl, Richtstrahl, Messstrahl

²²Römischer Gott des Ein- und Ausgangs. Er hat zwei Gesichter und kann daher sowohl nach vorne als auch nach hinten blicken.

²³OceanScience, 105 Copperwood Way, Suite J Oceanside, CA 92054, USA

4 Ultraschall-Doppler-Technik

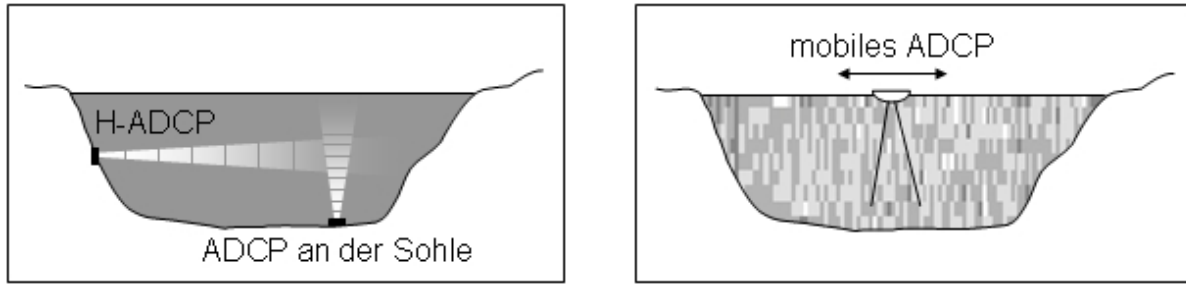


Abbildung 4.7: Einsatzbereiche des ADCP

Aluminium-Katamaran des Ingenieurbüros Schmid²⁴, können von einer Brücke oder einem Steg aus über das Gewässer bewegt werden, oder an einem Pegelquerschnitt von der dort installierten Seilkrananlage gezogen werden. In größeren Gewässern, wie z. B. den großen, schiffbaren Flüssen in Deutschland, werden ADCP-Messungen oft mit bemannten Booten oder Messschiffen durchgeführt. Auch ferngesteuerte Boote sind mittlerweile im Einsatz. So besitzt beispielsweise das WSA Heidelberg²⁵ ein trailerbares Messboot, das wahlweise bemannt oder ferngesteuert bewegt werden kann (Abb. 4.8).

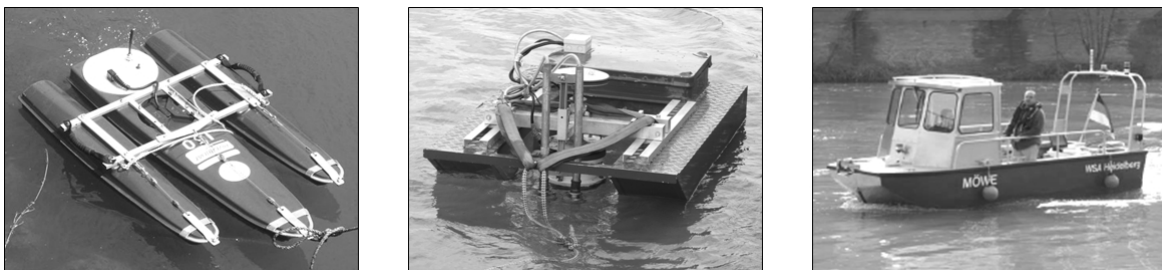


Abbildung 4.8: ADCP-Trägerboote: Links = River Boat von OceanScience,
Mitte = Aluboot des Ingenieurbüros Schmid,
Rechts = Messboot des WSA-Heidelberg

²⁴Ingenieurbüro Schmid, Hundsgasse 6, 76889 Kapsweyer

²⁵Wasser- und Schifffahrtsamt Heidelberg, Vangerowstraße 12, 69115 Heidelberg

4.2.3.3 Messtechnische Erfassung der ADCP-Bewegung

Um aus den ermittelten Relativgeschwindigkeiten zwischen dem ADCP und den Partikeln im Wasser auf die Absolutgeschwindigkeiten der Strömung schließen zu können, sind Informationen über die Bewegung des ADCP erforderlich. Diese können auf zwei verschiedene Arten erfasst werden.

Geräteinterne Erfassung der ADCP-Bewegung

Die geräteinterne Ermittlung des ADCP-Messpfads erfolgt durch Kombination des geräteinternen Kompasses mit den Rückstreuinformationen des so genannten *Bottom Pings*. Das *Bottom Track*-Signal wird vom ADCP in jedem Messensemble ergänzend zu den *Water Pings* ausgesendet, um die Sohle abzutasten. Im Gegensatz zu den *Water Pings* werden für die Abtastung der Sohle möglichst lange Signale verwendet, um zu gewährleisten, dass die gesamte Strahlbreite des Signals zur selben Zeit von der Sohle reflektiert wird. Dies ermöglicht eine größere Genauigkeit in der Auswertung der Rückstreusignale. Über das *Time Gating* (Kap. 4.2.2) und die Laufzeit zwischen dem Aussenden und dem Empfangen der Schallimpulse kann die Schrägentfernung zwischen ADCP und Sohle berechnet werden, die mittels trigonometrischer Formeln in die vertikale Fließtiefe umgerechnet wird. Außerdem ermittelt der ADCP aus der Doppler-Verschiebung der Sohlenechos die Relativgeschwindigkeit zwischen der Sohle und sich selbst. Im Gegensatz zur Fließgeschwindigkeitsermittlung (ADCP in Ruhe - Partikel in Bewegung) wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass sich die Sohle in Ruhe befindet und die erfasste Relativgeschwindigkeit (v_{ADCP} in Abb. 4.9) durch die Bewegung des Messgeräts verursacht wird.

Das beschriebene Verfahren funktioniert nur dann, wenn der ADCP die Sohle mit dem BT-Signal erfassen kann und kein Geschiebetrieb stattfindet. Befindet sich das Sohlmaterial in Bewegung, wird die für die geräteinterne Ermittlung der ADCP-Bewegung erforderliche Voraussetzung ($v_{\text{Sohle}} = 0$) nicht mehr eingehalten. Der ADCP interpretiert die aus dem Geschiebetrieb resultierende Doppler-Verschiebung als eigene Bewegung stromaufwärts (v^*_{ADCP} in Abb. 4.9). Werden die erfassten Relativgeschwindigkeiten zwischen dem ADCP und den Partikeln in der Strömung ($v_{\text{Wasser (relativ)}}$ in Abb. 4.9) mit dem verfälschten ADCP-Weg addiert, führt das zu einer Unterschätzung der Fließgeschwindigkeiten (v^*_{Wasser} in Abb. 4.9).

Erfassung der ADCP-Bewegung mit GPS

Die ADCP-Bewegung kann aber auch mit externen Messgeräten erfasst werden. In

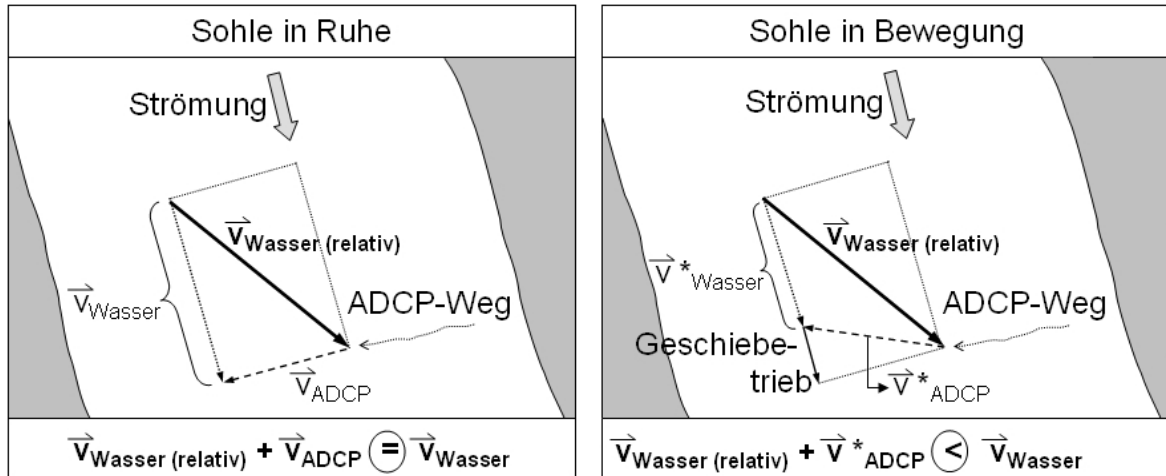


Abbildung 4.9: Beeinflussung der Fließgeschwindigkeitsermittlung durch Geschiebetrieb

den meisten Fällen kommt dafür das *Global Positioning System* (GPS) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein weltweit einsetzbares, satellitengestütztes Navigationssystem. Die Infrastruktur dazu bilden 24 Satelliten sowie mehrere Kontrollstationen auf der Erde. Mit Hilfe von GPS-Empfängern kann die Laufzeit zwischen Satellit und Messgerät erfasst und daraus der jeweilige Gerätestandort berechnet werden. Dabei ist für die eindeutige Lagebestimmung der Kontakt zu mindestens vier Satelliten erforderlich. Aus militärischen Gründen wird die Genauigkeit des Verfahrens für die zivile Nutzung durch eine künstliche „Verschmierung“ (*Selective Availability*) auf zirka 15 m reduziert. Durch den Einsatz von *Differential-GPS* (dGPS) kann die Genauigkeit bis auf wenige Zentimeter gesteigert werden [RDI, 1999]. Dabei wird zusätzlich zum beweglichen GPS-Gerät noch eine ortsfeste Station verwendet, die das selbe Satellitensignal wie die bewegliche Antenne empfängt. Da die geografische Position der Referenzstation bekannt ist, kann der Fehler der GPS-Ortsbestimmung berechnet und zur Korrektur der GPS-Daten der beweglichen Antenne verwendet werden.

Ist das verwendete GPS-Gerät in der Lage, GGA-Daten²⁶ im NMEA 0183-Format²⁷ auszugeben, können diese mit der ADCP-Software *WinRiver* (Kap. 5.1) eingelesen

²⁶GGA - Global Positioning System Fix Data: Zeit und Position

VTG – Track Made Good and Ground Speed: Zurückgelegter Weg und Geschwindigkeit über Grund

²⁷National Marine Electronics Association

Vereinigung amerikanischer Elektronikhersteller und -händler der Schiffahrtsindustrie, die Standards in der Marineelektronik setzt

und zusätzlich zu den *Bottom Track*-Informationen abgespeichert werden [RDI, 2003]. Die in die Datensätze eingespeisten dGPS-Werte können dazu verwendet werden, um den zurückgelegten Messweg unter Verwendung der externen Lageinformationen zu berechnen.

Möchte man die von den dGPS-Geräten aufgezeichneten Lageinformationen in die ADCP-Daten integrieren, ist zu berücksichtigen, dass sich die beiden Systeme auf unterschiedliche Nordrichtungen beziehen. Die dGPS-Daten verwenden als Bezug die geografische Nordrichtung, die durch die Rotationsachse der Erde festgelegt ist. Die vom ADCP erfassten Relativgeschwindigkeiten werden – wie bereits in Kap. 4.2.3.1 beschrieben – unter Verwendung des geräteinternen Kompasses in vektorieller Form (east-west, north-south, up-down) abgespeichert. In diesem Fall dient als Bezugspunkt der magnetische Nordpol, an dem die Feldlinien des Erdmagnetfeldes zusammenlaufen. Die beiden Pole liegen über 1000 km voneinander entfernt, wobei der magnetische Nordpol jedes Jahr um mehrere Kilometer wandert. Der Winkel zwischen der geografischen und der magnetischen Nordrichtung wird als *Deklination* bezeichnet. Seine Größe kann aus einer so genannten *Isogenenkarte*²⁸ (Abb. 4.10) abgelesen werden. Bei Kenntnis der ortsabhängigen Abweichung kann diese angegeben und bei der Zusammenführung von ADCP- und dGPS-Daten berücksichtigt werden. In Bayern beträgt die Abweichung zwischen magnetischem und geografischem Nordpol derzeit $0^\circ 50'$ und ändert sich um $2'$ pro Jahr.

Aber nicht nur die Abweichung zwischen den Bezugspunkten der beiden Lageortungssysteme – dem magnetischer Kompass des ADCP und den dGPS-Antennen – muss berücksichtigt werden. Auch lokale Gegebenheiten vor Ort können zu einer Verfälschungen der Messwerte führen. Ferromagnetische²⁹ Gegenstände und Stromkreise mit Gleichstrom erzeugen ein magnetisches Störfeld, durch das die Messungen des magnetischen Kompasses beeinflusst werden können. Dieses Phänomen wird *Deviation* genannt. Es kann durch spezielle Kalibrierungsprozeduren vor Ort vor Beginn der Messungen bestimmt und in der Auswertung der erfassten Rohdaten dementsprechend berücksichtigt werden.

Die Auswirkungen der *Deklination* und der *Deviation* müssen nur dann in Betracht gezogen werden, wenn unterschiedliche Lageortungssysteme mit verschiedenen Bezugspunkten herangezogen werden. Verwendet man zur Bearbeitung der erfassten Rela-

²⁸Karte mit Linien gleicher Deklination.

²⁹Ein Material wird als ferromagnetisch bezeichnet, wenn es in einem Magnetfeld selbst zum Magneten wird.

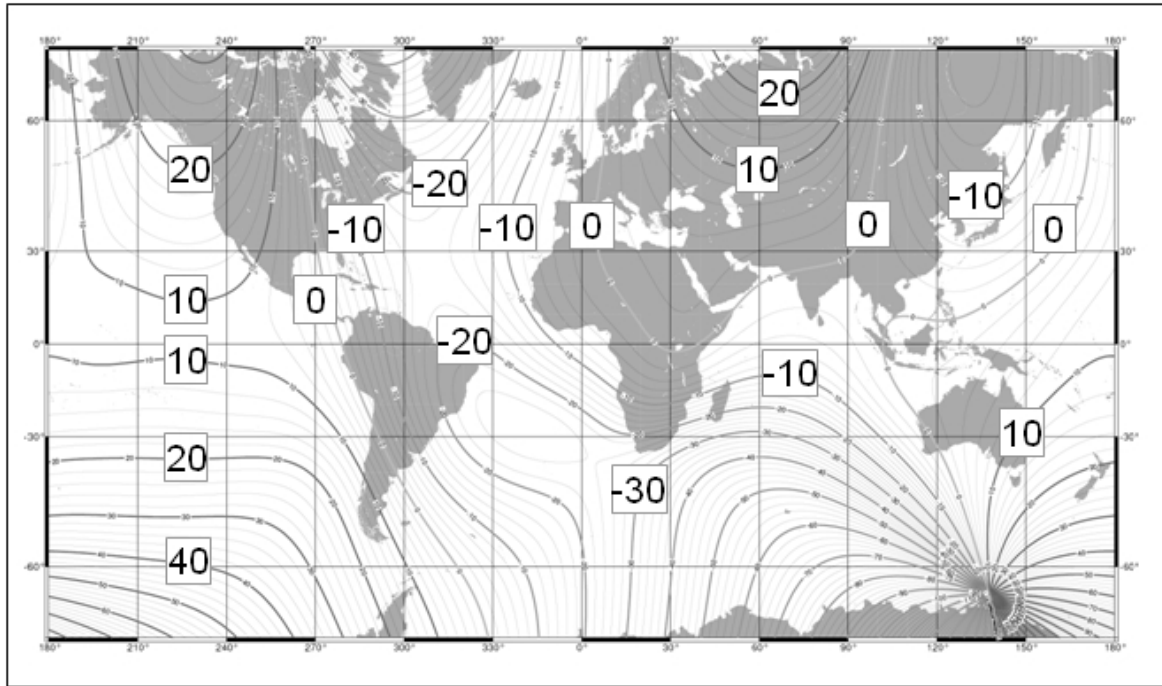


Abbildung 4.10: Isogenenkarte, Stand 2005 [NGDC, 2005]

tivgeschwindigkeiten nur die Messdaten des ADCP, so werden alle Werte auf ein und denselben Nordpol bezogen und die Gefahr einer Datenverfälschung durch die Verwendung unterschiedlicher Bezugspunkte ist nicht gegeben.

4.2.3.4 Ermittlung der absoluten Fließgeschwindigkeiten

Wie bereits erwähnt, entsprechen die vom ADCP ermittelten Relativgeschwindigkeiten nur dann den realen Fließgeschwindigkeiten, wenn sich das Gerät in Ruhe befindet. Wird der ADCP während der Messung bewegt, muss seine Eigenbewegung im Zuge der Datenauswertung berücksichtigt werden. Dazu können entweder die erfassten Daten des *Bottom Track* verwendet werden, oder – wenn vorhanden – dGPS-Daten. Nachdem sämtliche vom ADCP erfassten Geschwindigkeitsinformationen in vektorieller Form gespeichert werden, kann die Eigengeschwindigkeit des ADCP durch vektorielle Addition der ADCP-Bewegung und der Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Messgerät und den Partikeln im Wasser berücksichtigt werden. Als Ergebnis erhält man die absoluten Fließgeschwindigkeit der Strömung in Nord-Süd- und in Ost-West-Richtung.

4.2.4 Berechnung des Abflusses

Ein wesentlicher Vorteil der ADCP-Technik gegenüber herkömmlichen Flügelmessungen ist der Umstand, dass mit Hilfe von ADCP-Messungen innerhalb kurzer Zeit eine große Anzahl von Fließgeschwindigkeitsinformationen im Messquerschnitt erfasst werden kann. Dies ermöglicht vor allem bei heterogenen Geschwindigkeitsverteilungen – beispielsweise bei stark gegliederten Querschnitten – eine genauere Abflussermittlung, als das mit punktuellen Flügelmessungen möglich wäre.

Die allgemeinste Gleichung zur Berechnung des Abflusses aus bekannten Geschwindigkeitswerten in einem beliebigen Querschnitt lautet [Simpson und Oltmann, 1993]:

$$Q_t = \int_S \vec{V}_f \cdot \vec{n} \, ds \quad (4.6)$$

Q_t	...	gesamter Abfluss im Messquerschnitt [m ³ /s]
\vec{V}_f	...	Vektor der mittleren Fließgeschwindigkeit [m/s]
\vec{n}	...	Einheitsvektor rechtwinkelig zur Querschnittsrichtung [-]
$\int_S ds$...	Integration über die Querschnittsfläche

Die Geschwindigkeitsvektoren werden normal zur Querschnittsfläche über diese integriert. Im Falle einer ADCP-Messung von einem fahrenden Boot aus wird die Eigengeschwindigkeit des Messinstruments folgendermaßen berücksichtigt.

$$ds = |V_b| \, dz \, dt$$

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d (\vec{V}_f \times \vec{V}_b) \cdot \vec{k} \, dz \, dt \quad (4.7)$$

T	...	benötigte Zeit für eine Überfahrt [s]
d	...	Fließtiefe [m]
\vec{V}_b	...	Vektor der mittleren Bootsgeschwindigkeit [m/s]
\vec{k}	...	Einheitsvektor [-]
$\int_0^T dt$...	Integration über die Zeit
$\int_0^d dz$...	Integration über die Fließtiefe

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Trotz der hohen Datendichte können bestimmte Bereiche des Querschnitts vom ADCP nicht erfasst werden. Dazu gehören alle sohnnahen Bereiche, deren Rückstreuungssignale durch die *Side Lobes* (Kap. 4.2.3.1) der akustischen Signale gestört werden. Auch aus dem Bereich oberhalb des ins Wasser eingetauchten ADCPs und dem *Blank*-Bereich, der durch die Nachhallzeit zwischen Senden und Empfangen zustande kommt, können keine Messwerte aufgezeichnet werden. Des Weiteren können (z. B. durch Turbulenzen an der Wasseroberfläche) Luftblasen unter das Messgerät gelangen und die Ausbreitung der Schallwellen in der Wassersäule blockieren [RDI, 1996], was zu so genannten *Fehlensembles*, also Ensembles ohne Daten, führen kann. Abbildung 4.11 zeigt das typische Ergebnisbild einer ADCP-Messung. In diesem Fall sind die Messzellen 25 cm tief, die Breite variiert zwischen 0.5 und 1.0 m. Deutlich erkennbar sind die nicht erfassbaren Randbereiche. Die erste Zelle beginnt in einer Fließtiefe von 0.63 m, der sohnnahe Bereich ohne Messwerte nimmt mit einer Dicke von 0.33 m knapp 10 % der Gesamtlängtiefe in Gewässermittle ein.

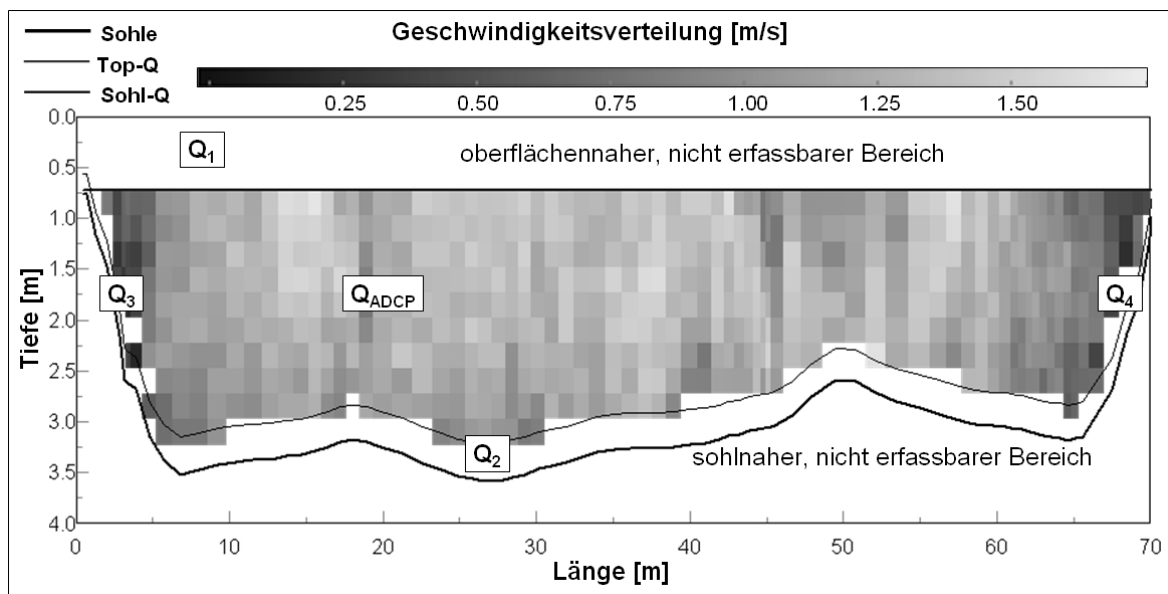


Abbildung 4.11: Geschwindigkeitsverteilungen einer ADCP-Überfahrt mit nicht erfassbaren Randbereichen

All diese Bereiche werden im Zuge der Abflussermittlung aus den erfassten Geschwindigkeitswerten durch Interpolations- oder Extrapolationsverfahren berücksichtigt. Für die Bereiche nahe der Sohle und der Wasseroberfläche wird meist das in

Glg. (4.8) aufgeführte Potenzgesetz nach Chen für Gerinne mit freier Oberfläche verwendet [Simpson und Oltmann, 1993].

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \cdot \left[\frac{z}{z_0} \right]^{1/6} \quad (4.8)$$

u	...	Fließgeschwindigkeit im Abstand z zur Gewässersohle [m/s]
u^*	...	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
z	...	Abstand zur Gewässersohle [m]
z_0	...	Rauigkeit der Sohle [m]

Voraussetzung dafür ist eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung über die Fließtiefe. Die Form der Kurve kann durch Variation der Hochzahl zwischen 1/2 und 1/10 an die Verhältnisse vor Ort angepasst werden. Die Unbekannten u^* und z_0 können anhand von ADCP-Messwerten für u und z bestimmt werden. Mit den so ermittelten sohnahen Geschwindigkeiten kann danach unter Verwendung von Glg. (4.7) der gesuchte Durchfluss berechnet werden.

In den Randbereichen wird der Teilabfluss Q_{Rand} unter Verwendung des nächstliegenden erfassten Geschwindigkeitswertes und der Teilfläche berechnet. Für die Konstante C in Glg. (4.9) wird im Falle dreieckiger Randflächen der Wert 0.35 verwendet, bei senkrechten Uferberandungen wird 0.91 angesetzt.

$$Q_{Rand} = C \cdot V_m \cdot L \cdot d_m \quad (4.9)$$

C	...	Koeffizient zur Berücksichtigung der Uferform [-]
V_m	...	vom Ufer aus nächstgelegene, tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit [m/s]
L	...	Abstand vom Ufer zum nächstgelegenen Messensemble [m]
d_m	...	Fließtiefe im vom Ufer nächstgelegenen Messensemble [m]

Betrachtet man die in Abb. 4.11 dargestellte Situation, so ergeben sich folgende Teilabflüsse.

- Der aus den ADCP-Daten berechnete Abfluss beträgt $Q_{ADCP} = 146.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

4 Ultraschall-Doppler-Technik

- Der mit Hilfe des in Glg. (4.8) aufgeführten Potenzgesetzes berechnete Teilabfluss nahe der Wasseroberfläche ist $Q_1 = 63.5 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Der mit dem Potenzgesetz berechnete Teilabfluss nahe der Sohle beträgt $Q_2 = 26.5 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Die Teilabflüsse an den beiden Ufern betragen $Q_3 = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_4 = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abstand vom Ufer bis zur ersten Messlotrechten betrug während der Messungen jeweils 2 m, die Uferform kann als dreieckig beschrieben werden (überhöhte Darstellung in Abb. 4.11).

Aus der Zusammenstellung ergibt sich ein Gesamtabfluss von

$$Q = Q_{ADCP} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 237.6 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (4.10)$$

Der messtechnisch erfasste Anteil beträgt in diesem Fall 62 % des Gesamtabflusses, der größte zu extrapolierende Teilabfluss ist der im Bereich der Wasseroberfläche. Der Einfluss der ufernahen Bereiche ist praktisch vernachlässigbar.

Einfluss der ADCP-Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit, mit der der ADCP über den Messquerschnitt bewegt wird, hat großen Einfluss auf die erfasste Datenmenge. Der ADCP braucht eine bestimmte Zeitspanne, um die Daten in einem *Ensemble*³⁰ zu erfassen. Die Dauer ist unter anderem abhängig von der Anzahl der ausgesendeten Messsignale pro Ensemble, der maximalen Tiefe, aus der die Echos kommen, sowie verschiedenen Wasserparametern (z. B. Temperatur, Salzgehalt). Außerdem ist zwischen dem Aussenden der Signale und dem Beginn des Aufzeichnens der Echos eine kurze Pause erforderlich. Grund dafür ist der Umstand, dass das ausgesendete akustische Signal „nachklingt“ bzw. „nachhallt“ und dadurch die ankommenden Echos gestört werden. Die erforderliche *Nachhallzeit* entspricht bei 600 kHz einem *blank*-Bereich von zirka 1 m, bei 1200 kHz sollte im Idealfall ein Mindestabstand bis zur ersten Messzelle von 0.5 m eingehalten werden [RDI, 1996]. Ist die Messung in einem Ensemble beendet, sendet der ADCP das nächste akustische Signal aus. In der Regel können 1-2 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden. Die Zellbreite ergibt sich aus dem Weg, den das Trägergerät

³⁰Messstrahl, Messlinie, entlang der Daten gesammelt werden

während der Messung eines Ensembles zurückgelegt hat. Als grober Richtwert gilt, dass die Geschwindigkeit des ADCPs auf keinen Fall die Fließgeschwindigkeit im Querschnitt übersteigen soll.

Berücksichtigung von Geschiebetrieb

Die einfachste Methode, einer Verfälschung des Messpfads durch Geschiebetrieb und der dadurch verursachten Unterschätzung des Abflusses zu entgehen, ist die Verwendung von dGPS-Daten. Die GPS-Technik ist aber nicht an allen Standorten einsetzbar. Dichter Bewuchs der Ufer, hohe Bauwerke, enge Täler oder ungünstige Witterungsverhältnisse können den Kontakt zu den GPS-Satelliten unterbrechen bzw. verhindern. In einem derartigen Fall ist man auf die *Bottom Track*-Daten des ADCPs angewiesen.

Um die Größe des entlang einer Überfahrt akkumulierten Fehlers im Messweg ermitteln zu können, ist eine so genannte *Schleifenfahrt* notwendig (Abb. 4.12). Im Gegensatz zur realen Situation schließt sich bei vorhandenem Geschiebetrieb der vom ADCP aufgezeichnete *Bottom Track* nicht, sondern weist am Schluss eine Lücke bzw. einen Längsversatz auf.

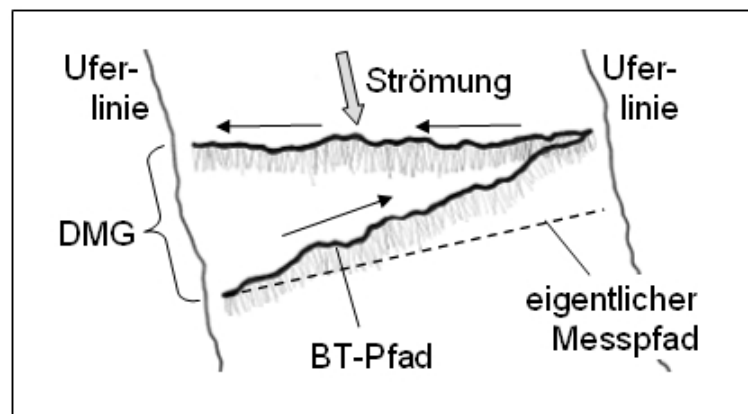


Abbildung 4.12: Schleifenfahrt mit Längsversatz aufgrund von Geschiebetrieb

Unter Verwendung dieses Abstands ($DMG = \textit{Distance Made Good}$) kann abgeschätzt werden, um wie viel der Gesamtabfluss dadurch unterschätzt wird. Im einfachsten Fall geht man davon aus, dass die Geschiebebewegung und die Strömungsverhältnisse entlang des Messwegs annähernd konstant sind. Die mittlere Geschiebebeschwindigkeit

4 Ultraschall-Doppler-Technik

und der daraus resultierende Abflussfehler können nach Glg. (4.11) berechnet werden (Mueller und Wagner [2006] und Mueller und Wagner [2007]).

$$\bar{V}_{mb} = \frac{DMG}{T} \rightarrow Q_{mb} = \bar{V}_{mb} \cdot A \rightarrow Q_{TC} = Q_{TM} + Q_{mb} \quad (4.11)$$

DMG	...	Längsversatz der Schleifenfahrt [m]
T	...	für die Schleifenfahrt benötigte Zeit [s]
Q_{mb}	...	Abflussdifferenz aufgrund von Geschiebetrieb [m^3/s]
\bar{V}_{mb}	...	mittlere Geschiebegeschwindigkeit [m/s]
A	...	Querschnittsfläche normal zur Hauptströmungsrichtung [m^2]
Q_{TC}	...	korrigierter Abfluss [m^3/s]
Q_{TM}	...	gemessener Abfluss [m^3/s]

Ändern sich Fließtiefe, Strömungsgeschwindigkeit und Geschiebegeschwindigkeit entlang des Messpfads, so ist eine genauere Betrachtung der BT-Verfälschung erforderlich. Es wird davon ausgegangen, dass die Geschiebegeschwindigkeit proportional zur sohnahen Fließgeschwindigkeit in den einzelnen Ensembles ist. ADCPs können die untersten 6 - 10 % der Fließtiefe aufgrund der bereits beschriebenen Störungen durch die *Side Lobes* nicht erfassen. Setzt man aber ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil über die Tiefe an, können die sohnahen Werte aus der vorhandenen Datenmenge nach Glg. (4.8) extrapoliert werden. Mit Hilfe der auf diese Weise ermittelten sohnahen Fließgeschwindigkeiten wird die berechnete mittlere Geschiebegeschwindigkeit \bar{V}_{mb} für jedes Ensemble gewichtet. Die Berechnung des Abflussanteils Q_{mc} erfolgt durch Aufsummierung aller Ensembles. Nicht zu vernachlässigen ist in diesem Fall auch die Korrektur der messtechnisch nicht erfassbaren Abflussanteile Q_1 und Q_2 (Abb. 4.11), die durch Multiplikation der Werte mit dem Faktor Q_{mc}/Q_m erfolgt (Mueller und Wagner [2006] und Mueller und Wagner [2007]).

So schnell und einfach wie bei der durch Glg. (4.11) ausgedrückten Näherungslösung kommt man, wenn man die Schritt-für-Schritt Korrektur des Messpfads wählt, nicht mehr ans Ziel. In Mueller und Wagner [2006] ist nachzulesen, dass am USGS³¹ bereits ein dementsprechendes Auswertetool³² programmiert wurde. Dieses liest ASCII-Files

³¹United States Geological Survey, <http://www.usgs.gov/> (Stand 08. Februar 2008)

³²LC = Loop Correction Software

<http://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat/LC1.shtml> (Stand 08. Februar 2008)

ein, wie sie aus den kommerziellen ADCP-Programmen exportiert werden können, und arbeitet die oben beschriebenen Berechnungsschritte ab.

4.2.5 Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen

Obwohl ADCPs eigentlich zur messtechnischen Erfassung von Fließgeschwindigkeiten konzipiert wurden, können die aufgezeichneten Daten auch zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen herangezogen werden. Dazu wird die vom ADCP abgespeicherte Intensität der empfangenen Echos (RSSI = *Received Signal Strength Indicator*) ausgewertet. Zwischen den Echointensitäten und den Schwebstoffkonzentrationen kann zwar eine Proportionalität nachgewiesen werden, weil diese Beziehung aber von vielen Parametern beeinflusst wird, sind umfangreiche Korrekturen notwendig, um diese Faktoren zu eliminieren (Wall et al. [2006] und RDI [1996]).

Die im Folgenden verwendeten Formeln und Beziehungen gehen auf die von Urick [1975] formulierte Sonargleichung zurück. Folgende Parameter – alle in der logarithmischen Einheit [dB] – finden in der Beziehung Eingang.

Sendegerät:

SL ... *Source Level*, Lautstärke des ausgesendeten Signals

Ausbreitungsmedium:

TL ... *Transmission Loss*, Übertragungsverlust

NL ... *Ambient-Noise Level*, Umgebungsgeräusch, Grundrauschen

Reflektor:

TS ... *Target Strength*, akustische Kraft / Stärke des Reflektors

Das Signal wird vom Sender mit der Intensität SL ausgesendet. Bis es nach einer gewissen Strecke den Reflektor erreicht, ist es um den Betrag TL abgeschwächt. Nach der Reflexion besitzt es die Intensität $SL - TL + TS$. Bis es wieder an seinem Ausgangspunkt angelangt ist, wird es noch einmal um den Übertragungsverlust TL des Ausbreitungsmediums reduziert und wird schlussendlich mit der Intensität $SL - 2 \cdot TL + TS$ empfangen. Addiert man das natürliche Grundrauschen NL noch dazu, so erhält man den so genannten *Reverberation Level* RL , also den Wert, der in

einer natürlichen Umgebung nach dem Aussenden eines Messsignals und der Reflexion an einem Gegenstand wieder empfangen und aufgezeichnet wird.

$$RL = SL - 2 \cdot TL + TS + NL \quad (4.12)$$

Neben mehreren gerätetechnischen und geometrischen Kenngrößen ist die Lautstärke des empfangenen Echos von den Eigenschaften des Wassers und der Konzentration sowie der Kornzusammensetzung der darin befindlichen Schwebstoffe abhängig. Daher kann keine explizite Formulierung zur Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen aufgestellt werden. Zur Lösung dieses Problems existieren zwei verschiedene Ansätze.

- Iterative Berechnung: Diese Vorgehensweise liefert die genauesten Ergebnisse, sie erfordert aber umfangreiche Zusatzmessungen, um Kenntnis über alle für die Lösung erforderlichen Parameter zu erhalten. Aufgrund der impliziten Formulierung kann das Problem nur auf iterativem Wege gelöst werden, was einen hohen Rechenaufwand mit sich bringt.
- Näherungslösung: Bestimmte Annahmen werden getroffen, um die Berechnung zu vereinfachen sowie Anzahl und Umfang der zusätzlich erforderlichen Messungen zu reduzieren. Dafür muss man gewisse Ungenauigkeiten der Ergebnisse in Kauf nehmen.

4.2.5.1 Iterative Berechnung

Die Berechnung von Schwebstoffkonzentrationen anhand der vom ADCP aufgezeichneten Rückstreuintensitäten erfolgt in zwei Schritten. Zuerst müssen die vom ADCP empfangenen und aufgezeichneten relativen Echointensitäten in absolute Werte umgerechnet werden. Anhand von Vergleichsmessungen kann danach eine Beziehung zwischen den absoluten Echointensitäten und den Schwebstoffkonzentrationen formuliert werden. Unter Verwendung dieser Information werden dann die Schwebstoffkonzentrationen in allen ADCP-Messzellen berechnet.

Für die Berechnung der absoluten Rückstreuwerte entwickelte der amerikanische Elektroingenieur und Mitbegründer von RDI, Kent L. Deines, eine lösbare Form der in Glg. 4.12 dargestellten aktiven Sonargleichung [Deines, 1999].

$$S_V = C + 10 \cdot \lg \left[\frac{T_T}{L \cdot T_P} \right] + 20 \cdot \lg R + 2 \cdot \alpha \cdot R + K_C \cdot (E - E_r) \quad (4.13)$$

S_V	...	absolute Rückstreustärke [dB]
C	...	Konstante [dB]
T_T	...	Temperatur [°C]
T_P	...	Sendeleistung [W]
L	...	Wellenlänge des ausgesendeten Signals [m]
R	...	schräge Entfernung zum Reflektor [m]
α	...	Absorptionsgrad [-]
K_C	...	Umrechnungsfaktor [dB/Counts]
E	...	aufgezeichneter Messwert, RSSI-Wert [Counts]
E_r	...	aufgezeichneter Messwert in vollkommen klarem Wasser [Counts]

Die Rückstreustärke S_V entspricht dem Parameter TS in Glg. 4.12. Sie steht für die Veränderung des Signals durch die reflektierenden Partikel und ist von deren Beschaffenheit (Größe, Dichte, Form) und Konzentration abhängig. Ist dieser Wert bekannt, kann daraus auf die Schwebstoffkonzentrationen in der jeweiligen Messzelle geschlossen werden.

Die Konstante C ist in Glg. 4.12 mit dem Grundrauschen, oder dem *Ambient-Noise Level* NL gleichzusetzen.

Der zweite Term ($\lg[T_T/L \cdot T_P]$) steht für den *Source Level* SL , also die Lautstärke des ausgesendeten Signals.

Die beiden folgenden Terme bilden die Übertragungsverluste $2 \cdot TL$. Dabei wird mit $20 \cdot \lg R$ die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung des Signals berücksichtigt, $2 \cdot \alpha \cdot R$ beinhaltet die Absorption des Signals entlang des zurückgelegten Wegs.

Der letzte Term beinhaltet den *Reverberation Level* RL , also das vom Messgerät empfangene und aufgezeichnete Echosignal.

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Die Konstante C hängt von verschiedenen Geräteparametern, der Boltzmannkonstante³³ und der Temperatur ab. Sind alle benötigten Variablen bekannt, kann C nach Glg. 4.14 berechnet werden [Deines, 1999]. Alternativ dazu können jedoch auch die in Deines [1999] angegebenen Werte verwendet werden. Diese sind in Tab. 4.3 zusammengestellt. Bei der Festlegung von C ist zu berücksichtigen, dass diese Größe für die Ergebnisse nicht von Bedeutung ist, solange man die vom ADCP erfassten Messgrößen an Naturmessdaten der Schwebstoffkonzentration eichen kann.

$$C = 10 \cdot \lg \left[\frac{8 \cdot K \cdot F \cdot B_N \cdot \cos \theta}{\pi \cdot E_x^2 \cdot d^2} \right] \quad (4.14)$$

K	...	Boltzmannkonstante: $K = 1.38^{-23}$ [J/K]
F	...	Faktor für den vom Empfänger aufgezeichneten Schallimpuls
B_N	...	Bandbreite des Schallimpulses [dB]
θ	...	Winkel zwischen den Messtrahlen und der Vertikalen [°]
E_x	...	Effektivität der vier Signalgeber
d	...	Durchmesser der Signalgeber [m]

Die Temperatur T_T wird vom internen Thermometer des ADCP gemessen und in den Datenfiles mit der Einheit [°C] abgespeichert. Die Sendeleistung T_P ist neben verschiedenen Hardwareparametern maßgeblich von der Stromversorgung des Messgerätes abhängig und schwer erfassbar. Theoretisch ist es zwar möglich, ihre Größe mit Hilfe von Hydrophonen messtechnisch zu erfassen, diese Messungen stellen in der Regel aber eine große Herausforderung für das durchführende Personal dar und sind mit Unsicherheiten behaftet. Bei Kenntnis von Stromstärke und Spannung der geräteinternen Stromversorgung kann nach Wall et al. [2006] die Übertragungsleistung mit Glg. (4.15) berechnet werden.

$$T_P = (T_C \cdot 0.011451) \cdot (T_V \cdot 0.380667) \quad (4.15)$$

T_C	...	Stromstärke [A]
-------	-----	-----------------

³³Benannt nach dem österreichischen Physiker Ludwig Boltzmann, erlaubt die Boltzmannkonstante die Berechnung der mittleren thermischen Energie eines Teilchens aus der Temperatur.

T_V ... Stromspannung [V]

Stromstärke und Stromspannung können aus den Rohdaten des ADCP ausgelesen werden. Es wird in der Literatur jedoch nicht angegeben, wo genau im ADCP diese Werte gemessen werden, und ob die Messgrößen noch mit einem Faktor für die Effektivität der Signalgeber (Beams) multipliziert werden müssen. Die Berechnung von T_P anhand Glg. 4.15 ist daher auch mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Alternativ zur rechnerischen Ermittlung der Übertragungsleistung werden in der Literatur verschiedene Angaben zu ihrer Größe gemacht. So sind beispielsweise in Deines [1999] für verschiedene Gerätetypen die Werte von $P_{DBW} = 10 \cdot \lg T_P$ angegeben. In Wall et al. [2006] sind Aussagen über die Übertragungsleistung von zwei Geräten vom Typ *Workhorse RioGrande* mit einer Frequenz von 1200 kHz zu finden. Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die Größenordnung sowie die Streuung dieses Parameters in der Literatur.

Autor	Gerätetyp	Frequenz	Sendeleistung	Konstante C
Deines	Workhorse Sentinel	300 kHz	25 Watt	-143.5 dB
Deines	Workhorse RioGrande	600 kHz	8 Watt	-139.3 dB
Wall	Workhorse Sentinel	600 kHz	60-98 Watt	
Deines	Workhorse Sentinel	1200 kHz	3 Watt	-129.1 dB

Tabelle 4.3: Übertragungsleistung für verschiedene ADCP-Geräte

Wall et al. [2006] gibt an, dass zwischen den Naturmessungen und den zuvor durchgeführten Kalibrierungsmessungen die Übertragungsleistung um den Faktor 3.8 schwankte. Des Weiteren wurde im Zuge der Messungen festgestellt, dass die Spannung der Batterie während der Messungen nachließ, was sich in einer um 26 % reduzierten Übertragungsleistung niederschlug. Das bedeutet, dass es sich bei der in Glg. (4.13) eingesetzten Sendeleistung immer nur um eine Näherung bzw. eine Abschätzung handeln kann. Die enthaltenen Unsicherheiten können – analog zur Vorgehensweise bei der Ermittlung der Konstanten C – durch die Eichung der ADCP-Daten an konventionell erfassten Schwebstoffkonzentrationen kompensiert werden.

Die Wellenlänge L aus Glg. (4.13) lässt sich mit Glg. (4.1) aus der Schallgeschwindigkeit und der Gerätefrequenz berechnen und liegt je nach Temperatur im Bereich von 1 - 3 mm.

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Der Faktor K_C dient der Umrechnung der Echointensitäten E und E_r von [Counts] in [dB]. Er variiert je nach Gerät zwischen 0.35 und 0.55, wird in der Literatur (Deines [1999], Poerbandono und Mayerle [2003] oder Aardoom und Mol [2005]) aber oft näherungsweise mit $K_C = 0.45$ angenommen. Für den im gegenständlichen Fall verwendeten ADCP wurden vom Hersteller die in Tab. 4.4 aufgeführten Werte angegeben.

	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4
K_C	0.4052	0.3963	0.3952	0.3938

Tabelle 4.4: Umrechnungsfaktoren K_C in [dB/count] für den verwendeten ADCP

Die Echointensität E aus Glg. (4.13) wird während der Messung in der Einheit [Counts] aufgezeichnet. Das Grundrauschen E_r des ADCP entspricht dem RSSI-Wert bei vollkommen klarem Wasser und beträgt rund 40 Counts [Deines, 1999]. Nach Deines [1999] bzw. RDI [2002] kann die Größe von E_r auch mit Hilfe des Befehls **PT3** in *WinRiver* ermittelt werden.

Die Schrägentfernung R zwischen dem ADCP und der jeweiligen Messzelle wird unter Berücksichtigung der Auslenkung der Schallstrahlen zur Vertikalen (z. B. 20° bei einem ADCP Typ *Workhorse Rio Grande* von RDI) und aus der Tiefe der Messzelle ermittelt ($R \approx t / \cos 20$). Alternativ dazu ist in Deines [1999] eine Formel zur exakten Ermittlung der Schrägentfernung angegeben.

Der Absorptionsgrad α in Glg. (4.13) setzt sich zusammen aus der Wasserabsorption α_W und der Partikeldämpfung α_S (Glg. 4.16). Der Wasserabsorptionsterm besteht aus drei Komponenten [Aardoom und Mol, 2005]. Der erste Teil repräsentiert den Einfluss von Borsäure, der zweite Teil steht für den Einfluss von Magnesiumsulfat und der dritte Teil berücksichtigt den Einfluss der Viskosität auf die Absorption. Die dafür benötigten Parameter können mit Hilfe von CTD³⁴-Messungen oder aus den ADCP-Daten gewonnen werden.

$$\alpha = \alpha_W + \alpha_S \tag{4.16}$$

³⁴Conductivity, Temperature, Depth: Leitfähigkeit, Temperatur, Tiefe

In Aardoom und Mol [2005] ist auch die Formel zur Berechnung der Partikeldämpfung enthalten. ADCPs können im Gegensatz zu mehrfrequenten Messgeräten [Smerdon und Caine, 2007] nicht unterscheiden, ob Veränderungen in der Intensität des Echosignals von Veränderungen in der Konzentration oder in der Kornverteilungskurve der Schwebstoffe stammen (Wall et al. [2006] und Reichel und Nachtnebel [1993]). Deshalb werden Informationen über den Korndurchmesser und die Schwebstoffkonzentration benötigt. Nach Stimpfl [2006] besteht zwischen der Konzentration fluvialer³⁵ Sedimente und der Partikeldämpfung ein linearer Zusammenhang, während der Partikeldurchmesser mit der sechsten Potenz Eingang findet. Eine Möglichkeit der Erfassung der benötigten Informationen bieten OBS³⁶-Messungen und LISST³⁷-Messungen, die Aufschluss über die Konzentration sowie die Kornverteilung der Schwebstoffe geben. Alternativ dazu können auch Schwebstoffproben entnommen werden, und im Nachgang der ADCP-Messung im Labor ausgewertet werden.

Weil die absolute Rückstreuung und in weiterer Konsequenz auch die Schwebstoffkonzentrationen von der Partikeldämpfung α_S abhängig sind, diese aber wiederum von den Schwebstoffkonzentrationen abhängig ist, kann man die Fragestellung nicht explizit lösen, sondern muss sich dem Ergebnis iterativ nähern. In der ersten Zelle eines ADCP-Messensembles wird die absolute Rückstreuung zuerst nur unter Berücksichtigung der Wasserabsorption ermittelt. Daraus ermittelt man mit Hilfe einer Kalibrierungsbeziehung die Schwebstoffkonzentration und verwendet das Ergebnis zur Berechnung der Partikeldämpfung. Dieser Wert wird nun in Glg. (4.13) und in weiterer Folge zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentrationen berücksichtigt und der Vorgang so lange wiederholt, bis das Ergebnis die gewünschte Genauigkeit aufweist. Die so ermittelte Schwebstoffkonzentration wird für die Berechnung der Partikelabschwächung in der nächsten Zelle verwendet. Die Berechnungsschritte werden nun Zelle für Zelle wiederholt, bis das gesamte Ensemble berechnet ist [Aardoom und Mol, 2005]. Durch diese Vorgehensweise können Veränderungen der Schwebstoffkonzentrationen oder der Kornzusammensetzung über die Tiefe erfasst und deren Auswirkungen auf die Partikeldämpfung berücksichtigt werden.

³⁵durch Fließgewässer verursacht. Fluviale Sedimente sind das Ergebnis fluvialer Erosion, also der durch ein Fließgewässer verursachten Erosion.

³⁶Optical Backscatter Sensor

³⁷Laser In-Situ Scattering and Transmissionmetry

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Die unbekannt Parameter A und B der Kalibrierbeziehung (Glg. 4.17) müssen anhand von punktuell durchgeführten Schwebstoffkonzentrationsmessungen ermittelt werden.

$$10 \cdot \lg SSC = A \cdot S_V + B \quad (4.17)$$

SSC ... Schwebstoffkonzentrationen [mg/l]
($SSC = \textit{Suspended Sediment Concentration}$)
 S_V ... absolute Rückstreustärke [dB]

Untersuchungen von Aardoom und Mol [2005] an der Weser bei Nordenham unter Verwendung von Glg. (4.17) haben gezeigt, dass A und B zwar einen hohen Korrelationskoeffizienten von $r^2 \geq 0.8$ aufweisen, aber nicht über die Zeit konstant sind, sondern von Änderungen der sedimentologischen Eigenschaften der Schwebstoffe, hervorgerufen durch die Tideströmung in der Weser, beeinflusst werden. Abbildung 4.13 aus Aardoom und Mol [2005] zeigt diesen Zusammenhang.

Aus diesem Grund sollten an jeder Messstelle zu Beginn eines ADCP-Einsatzes für Schwebstoffkonzentrationsmessungen die Größe sowie die zeitliche Varianz der Variablen A und B mit Hilfe von Vergleichsmessungen bestimmt werden. Nur so kann festgestellt werden, ob sich die beiden Größen konstant über die Zeit verhalten, oder ob bei jeder ADCP-Messung eine Kalibrierung der Parameter notwendig ist.

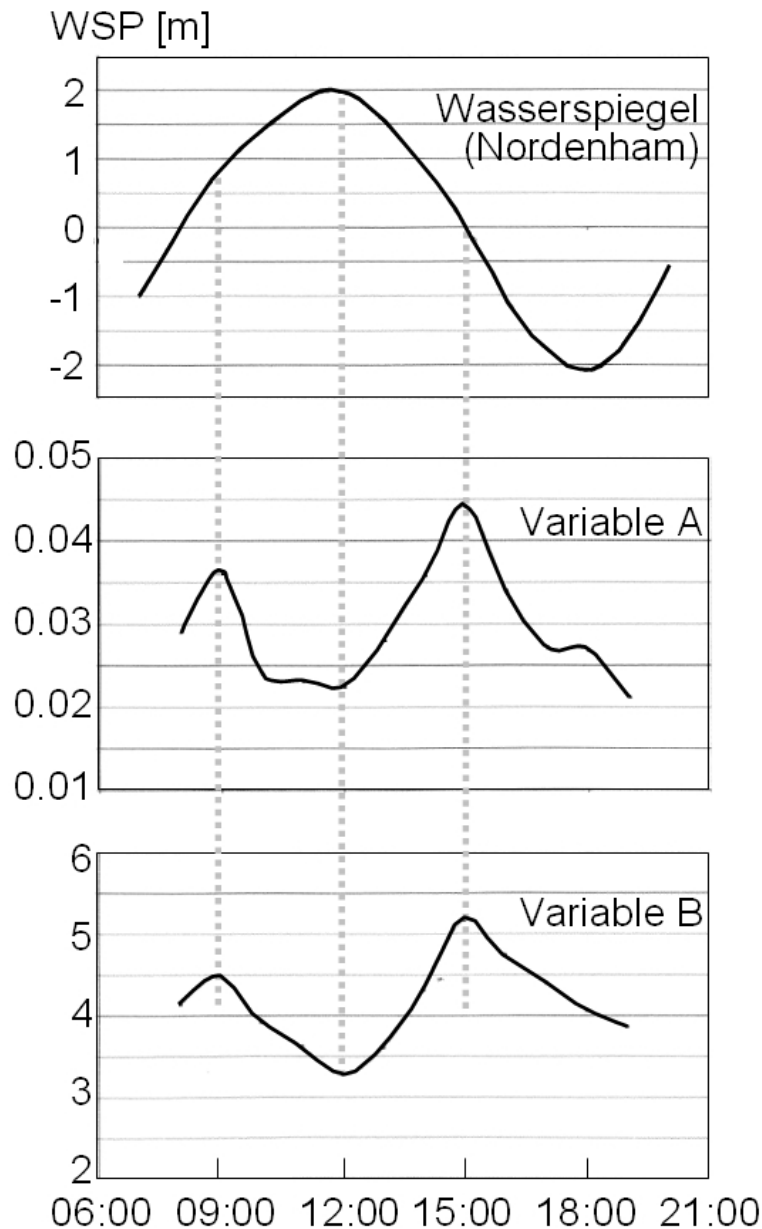


Abbildung 4.13: Beeinflussung der Variablen A und B durch die Tideströmung an der Weser [Aardoom und Mol, 2005]

4.2.5.2 Näherungslösung

Aufgrund des hohen Rechenaufwands der soeben beschriebenen iterativen Berechnung wurden alternativ dazu vereinfachte Ansätze zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentrationen entwickelt. Poerbandondo und Mayerle [2004] führt die beiden dafür entwickelten Ansätze auf. Die in Glg. (4.18) enthaltene Näherung geht davon aus, dass der Logarithmus des Konzentrationsverhältnisses in zwei Punkten proportional zur Differenz der beiden zugehörigen absoluten Echointensitäten ist. Die alternative

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Vorgehensweise basiert auf einer linearen Beziehung zwischen den absoluten Echointensitäten und dem Logarithmus der Schwebstoffkonzentrationen (Glg. (4.19)).

$$10 \cdot \lg SSC/SSC_r = EI - EI_r \quad (4.18)$$

$$10 \cdot \lg SSC = A \cdot EI + B \quad (4.19)$$

SSC ... Schwebstoffkonzentrationen [mg/l]
 (SSC = *Suspended Sediment Concentration*)
 EI ... Echointensitäten [dB]

Für die Lösung von Glg. (4.18) [Deines, 1999] wird zusätzlich zu den Messwerten EI auch eine Referenzmessung in einer frei wählbaren Bezugsebene zur Bestimmung der Größen EI_r und SSC_r benötigt. Der Ansatz von Gartner [2004] in Glg. (4.19) kommt zwar ohne eine derartige Referenzebene aus, hier müssen aber die Variablen A und B (Achsenabschnitt und Steigung der Regressionsgeraden) durch Vergleichsmessungen bestimmt werden.

Gartner [2004] hat im Oktober 1998 im Zuge umfangreicher Naturmessungen in der Bucht von San Francisco festgestellt, dass sich A und B bei veränderlichen Randbedingungen (Temperatur, Tidenströmung, Schwebstoffkonzentration, Salzgehalt) erheblich ändern. Die Frequenz des verwendeten Geräts (1200 bzw. 2400 kHz) hat hingegen nur geringen Einfluss auf die Parameter.

Im Rahmen einer Untersuchung des U.S. Geological Survey zur Auswahl geeigneter Methoden, mit denen Schwebstoffe messtechnisch erfasst werden können, wurden unter anderem auch ADCP-Messungen diesbezüglich ausgewertet [Gray et al., 2003]. Für die Ermittlung der gesuchten Konzentrationswerte aus den gemessenen ADCP-Daten wurde hier der in Glg. (4.20) dargestellte Ansatz verwendet. Mit Hilfe der Ergebnisse einer Messkampagne in Florida [Patino und Byrne, 1998] konnten die Variablen a - c und e bestimmt werden. Eine Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit ($d \cdot \lg v$) konnte nicht gefunden werden.

$$SSC = 10^{EI \cdot (a+b \cdot \lg S_a + c \cdot \lg T) + d \cdot \lg v + e} \quad (4.20)$$

$$SSC = 10^{EI \cdot (0.07462 + 0.00084 \cdot \lg S_a - 0.02957 \cdot \lg T) - 1.4615}$$

S_a	...	Salzgehalt [-]
T	...	Temperatur [°C]
v	...	Geschwindigkeit [m/s]

Zur Berechnung der Echointensität EI kann nach Gartner [2004] eine vereinfachte Form von Glg. 4.12 verwendet werden. Das in der ursprünglichen Beziehung berücksichtigte Grundrauschen NL wird vernachlässigt, weil es sich dabei lediglich um eine additive Konstante handelt und die Ergebnisse der Gleichung in jedem Fall anhand der Kalibriergrößen A und B umgerechnet werden müssen.

$$\begin{aligned}
 RL &= SL + TS - 2 \cdot TL \\
 RL &= K_C \cdot (E - E_r) \\
 TL &= 10 \cdot \lg R + \alpha \cdot R
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Somit kann die relative Rückstreustärke oder Echointensität EI an einem bestimmten Punkt entlang der Messgeraden berechnet werden.

$$EI = K_C \cdot (E - E_r) + 20 \cdot \lg R + 2 \cdot \alpha \cdot R \tag{4.22}$$

Auch hier stellt sich das Problem der rechnerischen Ermittlung des Absorptionsgrads α . Nach Poerbandondo und Mayerle [2004] kann die Variable vereinfachend über die gesamte Tiefe auch als konstant angenommen werden, da ihre Veränderung über die Tiefe nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Die Gerätesoftware des ADCP *WinRiver* rechnet den RSSI-Wert (E in [Counts]) nach diesem Näherungsansatz in die Echointensität EI um. Nach Stimpfl [2006] wird dabei jedoch der Einfluss der Partikeldämpfung α_S vernachlässigt. Nachdem in den wenigsten Fällen die für die Berechnung von α_S erforderlichen Informationen vorliegen, und diese auch nur mit erheblichem Messaufwand ermittelt werden können, ist dieses Vorgehen bei der Ermittlung einer Näherung aber durchaus legitim.

4.2.5.3 Anwendungsgrenzen

Nach Poerbandono [2003] müssen bei der Verwendung von ADCP-Messung zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen zwei Einschränkungen des Anwendungsspektrums berücksichtigt werden.

- Aufgrund der einrequenten Arbeitsweise kann der ADCP nicht zwischen Änderungen in der Sieblinienverteilung und Änderungen in der Konzentration der Partikel unterscheiden. Deshalb sind zusätzliche Vergleichsmessungen erforderlich. Diese Problematik wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln behandelt.
- Die bereits aufgeführten Formeln und Ansätze zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Echointensitäten der ADCP-Signale und den vorhandenen Schwebstoffkonzentrationen gelten nur innerhalb der Grenzen des *Rayleigh*³⁸ *Regimes* [Aardoom und Mol, 2005]. Aus diesem Grund können ADCP-Messungen zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen nur innerhalb eines bestimmten Korngrößenspektrums verwendet werden. Auf diese Einschränkung soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Die Abschwächung oder Dämpfung eines akustischen Signals ist stark frequenzabhängig. Hochfrequente Wellen haben eine kurze Reichweite, niederfrequente Wellen eine dementsprechend längere (siehe Tab. 4.2). Aus diesem Grund wird die Arbeitsfrequenz eines Messgeräts in erster Linie nach der erforderlichen Reichweite festgelegt.

Möchte man die aufgezeichneten Messdaten auch zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen heranziehen, kann man auf verschiedene in der Fachliteratur angegebene Ansätze zurückgreifen. Wie Abb. 4.14 zeigt, haben das Verhältnis von Partikeldurchmesser zu Wellenlänge [Hanes et al., 1988] sowie die vorhandene Datenbasis einen entscheidenden Einfluss auf die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Modelle. In Reichel und Nachtnebel [1993] ist nachzulesen, dass es mit Hilfe von Naturmessungen praktisch unmöglich ist, alle benötigten Partikelkennwerte zu erfassen, die notwendig wären, um eine deterministische Beziehung zwischen den Schwebstoffen und der akustischen Rückstreuung herzustellen.

³⁸John William Strutt, 3. Baron Rayleigh (1842 - 1919)

Der englische Physiker erhielt 1904 für die Bestimmung der Dichte der wichtigsten Gase und für die Entdeckung des Argons den Physik-Nobelpreis.

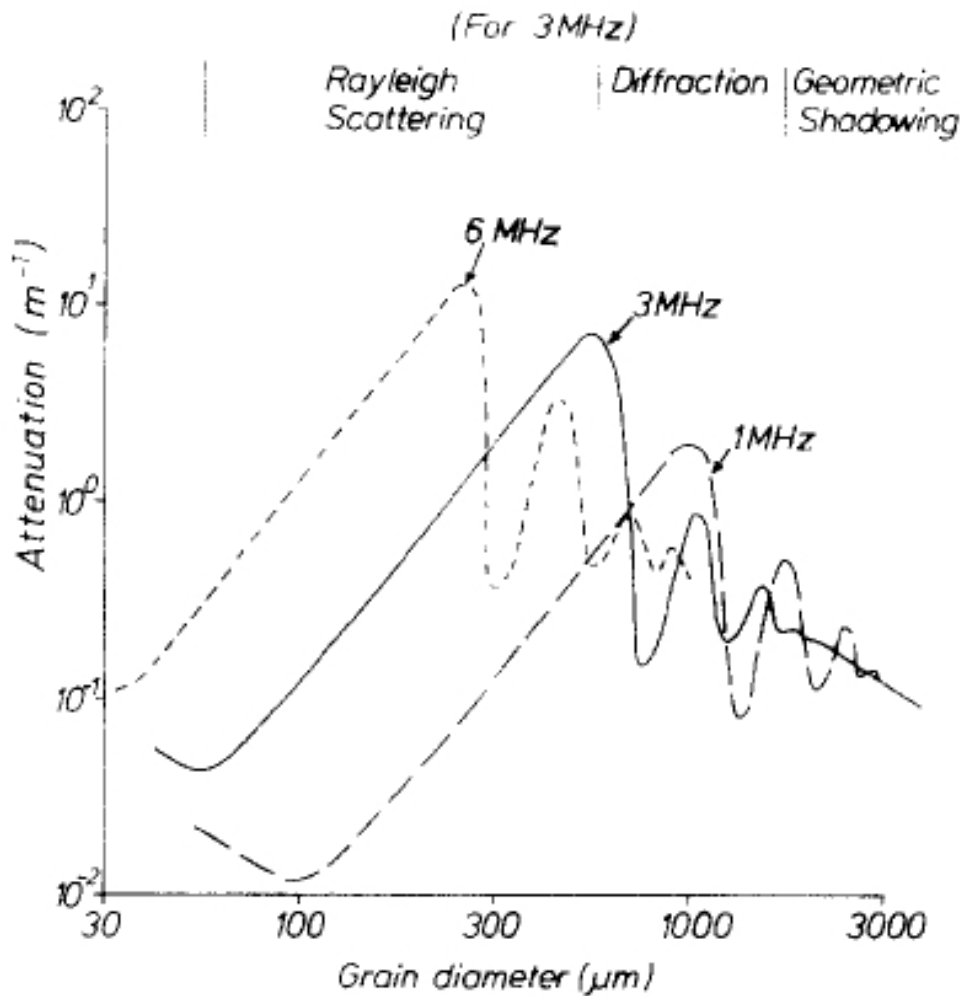


Abbildung 4.14: theoretische Dämpfung eines akustischen Signals als Funktion der Partikelgröße und der Wellenlänge [Hanes et al., 1988]

Im Regelfall sind von den im Wasser befindlichen Feststoffen bestenfalls Sieblinie und Konzentration bekannt. Aus diesem Grund wird für die Auswertung von ADCP-Daten meist auf das *Rayleigh scattering model* zurück gegriffen. Der Anwendungsbereich dieses Ansatzes beschränkt sich jedoch auf Partikel, deren Umfang πd_P kleiner als die Wellenlänge λ der akustischen Signale ist. Die Wellenlänge ist nach Glg. (4.1) wiederum eine Funktion der Frequenz und der Schallgeschwindigkeit.

Solange $\pi d_P < \lambda$ gilt, wird der Großteil der an den Partikeln reflektierten Signalen wieder in die Richtung des Senders zurückgeworfen. Je weiter sich πd_P der Größe von λ nähert, desto komplexer wird das Echosignal. Wird der Partikelumfang größer als die Wellenlänge, pflanzt sich die Hälfte der Signalstreuung in die ursprünglichen

4 Ultraschall-Doppler-Technik

Ausbreitungsrichtung fort. Der Rest wird in alle Richtungen reflektiert und nur ein Bruchteil davon erreicht wieder das Messgerät. Wird die Partikelgröße hingegen viel kleiner als die Wellenlänge, gibt es fast keine Signaldämpfung mehr, was auch zu Ungenauigkeiten bzw. Fehlern in der Auswertung führt. Nach Gartner [2002] sollte sich daher die Auswertung von akustischen Rückstreusignalen auf den Bereich zwischen $0.1 < \pi d_P / \lambda < 1$ beschränken. Für ADCPs mit 600 kHz bzw. 1200 kHz Arbeitsfrequenz ergibt sich für die Schwebstoffkonzentrationsauswertung somit folgendes Korngrößenspektrum (Tab. 4.5).

$\pi d_P / \lambda$	0.1	1.0
600 [kHz]	0.076 [mm]	0.764 [mm]
1200 [kHz]	0.038 [mm]	0.382 [mm]

Tabelle 4.5: Partikelgrenzdurchmesser d_P des Rayleigh Regimes

4.2.6 Erfassung des Geschiebetriebs

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Anwendungsfeldern der ADCP-Technik beschäftigen sich aktuelle Untersuchungen mit der Frage, ob die vom ADCP aufgezeichneten *Bottom Track*-Daten auch in Hinblick auf Geschiebebewegungen ausgewertet werden können. Wie in Kap. 4.2.3.3 beschrieben wurde, zeichnet der ADCP mit Hilfe eines geräteinternen Kompasses seine jeweilige Ausrichtung in Bezug auf die magnetische Nordrichtung während einer Messung auf. Die Auswertung des *Bottom Track*-Signals ermöglicht die Berechnung der eigenen Geschwindigkeit über Grund, vorausgesetzt, die Sohle befindet sich in Ruhe. Aus der Kombination dieser beiden Messgrößen kann der Weg des ADCP über Grund ermittelt werden. Durch Geschiebetrieb werden die Messungen verfälscht, weil der ADCP die Bewegung des Sohlmaterials als Eigenbewegung stromaufwärts interpretiert (Abb. 4.9). Mueller und Wagner [2007] entwickelten ein Konzept, wie diese Verfälschung der Messwerte berücksichtigt werden kann (Kap. 4.2.4). Alternativ dazu kann der vom ADCP berechnete Messweg auch durch extern erfasste Lagedaten überschrieben werden, um korrekte Ergebnisse zu erhalten. Des Weiteren können auch stationäre ADCP-Messungen durchgeführt werden. In diesem Fall ist die Eigengeschwindigkeit des ADCP gleich Null und alle erfassten Relativgeschwindigkeiten sind zugleich die vorhandenen Absolutgeschwindigkeiten. Ist der reale Messpfad des ADCP bekannt, so erlaubt der Vergleich mit dem, aus den BT-Daten berechneten, vermeintlichen Messweg Rückschlüsse auf die Geschiebebewegung im Messquerschnitt [Rennie et al., 2002].

$$v_G = v_{dGPS} - v_{BT} \quad (4.23)$$

v_G	...	Geschiebegeschwindigkeit [m/s]
v_{dGPS}	...	mittels dGPS erfasste Geschwindigkeit des ADCP über Grund [m/s]
v_{BT}	...	mittels <i>Bottom Track</i> erfasste Geschwindigkeit des ADCP über Grund [m/s]

Die Geschwindigkeit des Geschiebes kann nach Glg. 4.23 berechnet werden. In den meisten Fällen werden aber Daten über den Geschiebetrieb in Menge pro Zeitein-

heit benötigt. Dieser kann unter Verwendung folgenden Zusammenhangs berechnet werden.

$$g_b = v_G \cdot d_a \cdot \rho_S \cdot (1 - p) \quad (4.24)$$

g_b	...	Geschiebetrieb [kg/m·s]
v_G	...	Geschiebegeschwindigkeit [m/s]
d_a	...	Mächtigkeit der transportierten Schicht [m]
ρ_S	...	Dichte des Geschiebmaterials [kg/m ³]
p	...	Porosität des Geschiebmaterials [-]

Obwohl die beiden Größen d_a und p in den wenigsten Fällen bekannt sind, können sie nach Rennie et al. [2002] aufgrund ihrer geringen Varianz relativ gut abgeschätzt werden. Bei annähernd gleichförmigen Sohlmaterial, das durch den Radius r beschrieben werden kann, kann der Geschiebetrieb aber auch ohne Berücksichtigung dieser beiden Variablen, sondern nur in Abhängigkeit der Korngröße und der Dichte des Sohlmaterials berechnet werden (Glg. 4.25). Somit lässt sich mit Hilfe von ADCP-Messungen der Geschiebetrieb im Messquerschnitt ermitteln.

$$g_b = v_G \cdot \rho_S \cdot r \cdot \frac{4}{3} \quad (4.25)$$

Rennie et al. [2002] haben hierzu umfangreiche Messungen am Fraser River in Kanada durchgeführt. Der Messquerschnitt wies eine Breite von 510 m und eine kiesige Sohle mit geringem Sandanteil auf, die Fließtiefen lagen zwischen zwei und sieben Metern. Parallel zu den ADCP-Messungen bei bettbildendem Abfluss wurden konventionelle Geschiebesammler eingesetzt, um unabhängig von den ADCP-Daten Informationen über den vorhandenen Geschiebetrieb zu erhalten. Es zeigte sich, dass die aus den ADCP-Werten ermittelten Geschiebegeschwindigkeiten eine hohe Streuung aufwiesen und daher eine zeitliche Mittelwertbildung der Daten notwendig war. Ein Zeitintervall von mindestens 25 Minuten wird deshalb für die Mittelwertbildung als notwendig bezeichnet, um ausreichend gute Ergebnisse zu erhalten. Das bedeutet, dass kurzzeitige Schwankungen in der Geschiebebewegung, wie zum Beispiel beim

Vorhandensein von Transportkörpern, zwar nicht erfasst werden können, die mittlere Geschiebebeschwindigkeit aber eine sehr gute Korrelation mit dem konventionell erfassten Geschiebetrieb auf. Aufgrund der Tatsache, dass im Messquerschnitt der Term $d_a \cdot (1 - p)$ aus Glg. 4.24 konstant ist, konnte folgender linearer Zusammenhang gefunden werden [Rennie et al., 2002].

$$\overline{g_b} = 1.4 \cdot \overline{v_G} - 0.046 \quad \dots \quad (r^2 = 0.93) \quad (4.26)$$

Auch der Vergleich der ermittelten mittleren Geschiebebeschwindigkeiten mit den berechneten Schubspannungen τ zeigte eine erkennbare Korrelation.

$$\overline{v_G} = 0.00128 \cdot \tau^{1.45} \quad \dots \quad (r^2 = 0.44) \quad (4.27)$$

Die grafische Darstellung der in Glg. 4.26 und in Glg. 4.27 formulierten Zusammenhänge ist in Abb. 4.15 enthalten.

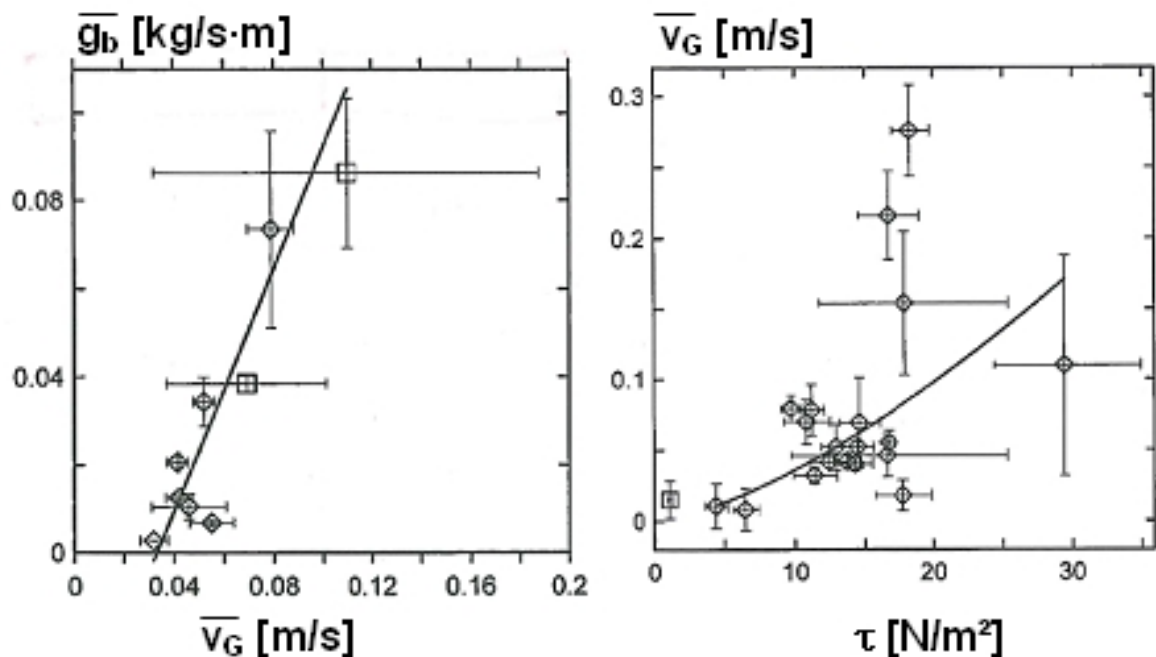


Abbildung 4.15: Zusammenhang zwischen Geschiebetrieb, Sohlschubspannung und ermittelter Geschiebebeschwindigkeit [Rennie et al., 2002]

Obwohl die Auswertungen der Messungen am Fraser River zu vielversprechenden Ergebnissen geführt haben und eindeutige Zusammenhänge zwischen den verschiedenen, untersuchten Parametern gefunden werden konnten, ist derzeit noch nicht bekannt, ob die in Glg. 4.26 dargestellte Beziehung messtellenspezifisch ist, oder allgemeine Gültigkeit besitzt. Aus Glg. 4.26 sowie aus Abb. 4.15 ist zu entnehmen, dass unter Verwendung des ermittelten Zusammenhangs eine Geschiebebeschwindigkeit berechnet wird, obwohl kein Geschiebetrieb zu verzeichnen ist ($\overline{g_b} = 0, \overline{v_G} > 0$). Es wird vermutet, dass die BT-Signale des ADCP durch hohe Schwebstoffkonzentrationen nahe der Sohle verfälscht wurden. Dies würde bedeuten, dass der Zusammenhang zwischen vorhandenem Geschiebetrieb und mit ADCP-Messungen erfassten Geschiebebeschwindigkeiten messtellenbezogen kalibriert werden muss. Auf diesem Gebiet sind noch umfangreiche Untersuchungen erforderlich, um diese Erkenntnisse zu vertiefen, ihre Gültigkeit auszudehnen und den Einfluss etwaiger Störfaktoren (wie beispielsweise der Schwebstoffe) genauer zu untersuchen.

5 Mess- und Auswerteprogramme

Zur Durchführung und Auswertung von ADCP-Messungen werden verschiedene Programme am Markt angeboten. Der Anwender hat die Wahl zwischen der von RDI entwickelten Software, die gemeinsam mit dem ADCP verkauft wird, und alternativen Programmen, die oft in Hinblick auf spezielle Benutzergruppen bzw. spezielle Anwendungen programmiert wurden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden die Originalsoftware von RDI sowie zwei weitere Programme zur weiterführenden Auswertung der ADCP-Daten verwendet. Im Folgenden sollen diese Tools kurz beschrieben werden.

5.1 WinRiver

Die Standardsoftware, mit der ADCPs betrieben werden, nennt sich *WinRiver* und wird von RDI vertrieben. Das Programm kann zum Durchführen von ADCP-Messungen sowie zum nachträglichen Abspielen und Bearbeiten der abgespeicherten Daten verwendet werden. Für die durchgeführten Messungen wurde die Software in der Version 1.06 verwendet.

5.1.1 Acquire Mode

ADCP-Messungen werden im so genannten *Acquire Mode* aufgezeichnet. Die Software *WinRiver* ermöglicht die Kommunikation zwischen dem Computer, dem ADCP und möglichen anderen Messgeräten über serielle Schnittstellen im RS 232-Format. Die Verbindung zum ADCP sowie zu anderen verwendeten Messgeräten kann entweder über ein Datenkabel oder über Modem hergestellt werden.

Eingabe verschiedener Messparameter

Vor Beginn einer jeden Messung muss der Anwender verschiedene Informationen zu den vor Ort herrschenden Messbedingungen (z. B. Uferform, maximal zu erwartende Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Bootsgeschwindigkeiten) angeben. Des

Weiteren sind verschiedene gerätespezifische Parameter, wie beispielsweise die ADCP-Eintauchtiefe sowie der Abstand zwischen Uferlinie und jeweils erstem Messensemble einzugeben. All diese Informationen werden in einer Konfigurationsdatei gespeichert und können im Nachgang der Messung verändert werden.

Geräteeinstellungen

Für sämtliche messrelevanten Geräteeinstellungen existieren *Default*- oder Standardwerte, die so genannten *Fixed Commands*. Diese Werte können vom Anwender bei Bedarf überschrieben werden. Die folgende Zusammenstellung beinhaltet die wichtigsten und am häufigsten benötigten Befehle:

WM X	...	<i>Water Profiling Mode</i> = X
WP XX	...	XX <i>Pings</i> pro Messensemble
BM X	...	<i>Bottom Tracking Mode</i> = X
BP X	...	X <i>Bottom Pings</i> pro Messensemble
WS XX	...	Zellentiefe = XX cm
WN XX	...	XX Tiefenzellen pro Ensemble
WF XX	...	Abstand zwischen ADCP und erster Messzelle = XX cm

Der *Water Profiling Mode* steuert die Messimpulse zur Erfassung der Strömungsparameter in der Wassersäule. Der Standardmode ist WM 1. Dieser Modus ist sehr robust und unter den meisten Messbedingungen einsetzbar [RDI, 2002]. Vom *Water Profiling Mode* werden unter anderem die Länge der vom ADCP ausgesendeten Impulse, die Energie, sowie die zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Messsignale beeinflusst. Diese Einstellungen haben Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse, wie zum Beispiel die Empfindlichkeit der Auswerteroutine gegenüber Störeinflüssen und die Standardabweichung der Ergebniswerte. Der *Bottom Tracking Mode* regelt die Abtastung der Sohle in jedem Messensemble durch den so genannten *Bottom Ping* des ADCP.

Da die Geräteeinstellungen Einfluss auf die zeitliche Abfolge sowie die Beschaffenheit der Messstrahlen haben und die Routinen zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten direkt beeinflussen, können sie im Nachhinein nicht mehr geändert werden.

Durchführen einer Messung

Um die Kommunikation mit dem ADCP und eventuell noch weiteren Messgeräten

herzustellen, müssen im *Acquire Mode* die verwendeten COM-Ports – also die verwendeten seriellen Steckplätze – definiert werden. Im Anschluss daran sollte die Kommunikation zwischen dem Messcomputer und allen verwendeten Messgeräten getestet und die Uhren aller Geräte synchronisiert werden. Mit dem Befehl *Start Pinging* beginnt der ADCP, Messsignale auszusenden. Die Daten werden aber erst gespeichert, wenn der Anwender den Befehl *Start Transect* gegeben hat. Die dementsprechenden Befehle zum Beenden heißen analog dazu *Stop Transect* und *Stop Pinging*.

Darstellung der Messwerte

Während der Messungen können die erfassten Daten „online“ am Bildschirm dargestellt werden. Dies ermöglicht eine sofortige Kontrolle der Datenmenge und Qualität und ein rasches Eingreifen, wenn eine Veränderung von Messparametern oder Geräteeinstellungen notwendig wird. Die Fließgeschwindigkeiten können wahlweise mit Referenz BT, NONE oder GPS dargestellt werden. Bei Referenz NONE wird davon ausgegangen, dass sich das Messgerät in Ruhe befindet. Die erfassten Relativgeschwindigkeiten werden ohne Berücksichtigung der Bewegung des Messgerätes abgespeichert. Das bedeutet, Informationen über die Relativgeschwindigkeiten in den einzelnen Messzellen eines Ensembles können auch dann abgespeichert werden, wenn keine *Bottom Track*-Informationen vorliegen. Bei Referenz BT werden die Fließgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung dieser Daten in absolute Geschwindigkeiten umgerechnet und abgespeichert, bei Referenz GPS dienen externe Lagedaten als Grundlage für die Umrechnung der Relativgeschwindigkeiten.

Die Software ermittelt bereits während der Messfahrt aus den Geschwindigkeits- und Lageinformationen den Durchfluss. Die Ergebnisse werden – unterteilt in *Top Q*, *Measured Q*, *Bottom Q*, *Left Q*, *Right Q* und dem sich daraus ergebenden Gesamtdurchfluss *Total Q* – dargestellt.

5.1.2 Playback Mode

Im Nachgang der Messung können die abgespeicherten Daten im so genannten *Playback Mode* wieder geöffnet und abgespielt werden. Verschiedene Angaben zu den Bedingungen während der Messung, wie zum Beispiel die Uferform, der Abstand zu den Ufern, die Eintauchtiefe des ADCP oder das Verfahren zur Extrapolation der Daten in die messtechnisch nicht erfassbaren Randbereiche können im Nachhinein geändert werden. Die vom ADCP aufgezeichneten Daten können auf verschiedene Referenzmessungen (BT, NONE oder GPS) bezogen werden.

ASCII-Outputfiles

Für eine Weiterbearbeitung bzw. Auswertung der Messdaten des ADCP können die Ergebnisse im ASCII-Format exportiert werden.

5.2 AGILA

Das Programm *AGILA* wurde von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) entwickelt. Die Software arbeitet mit ASCII-Files, wie sie aus *WinRiver* exportiert werden können, und dient der Auswertung von ADCP-Messungen nach der Pegelvorschrift. Aufgezeichnete Daten von verschiedenen Messeinsätzen können in einer „relationalen“ Datenbank [Adler und Nicodemus, 2007] – geordnet nach Gewässer, Messstelle, Datum und Uhrzeit – systematisch abgelegt werden. Die Möglichkeit der tabellarischen und grafischen Darstellungen der wichtigsten Messergebnisse gibt eine schnelle Übersicht. Die Einzelfahrten der Messungen können aber auch aus der Datenbank geladen und weiterbearbeitet werden. Unter Anderem können Ausreißer in den Geschwindigkeitswerten oder falsche Lageinformationen des *Bottom Track* in den Datensätzen gelöscht oder inaktiv gesetzt, und die Glättung der f_m -Linie erhöht bzw. reduziert werden [Adler und Nicodemus, 2000].

Das wichtigste in *AGILA* implementierte Tool ist jedoch die Mittelwertbildung aus den Messdaten mehrerer ADCP-Überfahrten in einem Messquerschnitt, eine Vorgehensweise, die in der Fachliteratur (z. B. in Adler [1993], Jurisch [1995] oder RDI [2003]) ausdrücklich empfohlen wird. Dabei werden alle vorhandenen Informationen über die Messung auf einen Bezugsquerschnitt bezogen, der normal zur ermittelten Hauptfließrichtung angenommen wird. Die Daten der einzelnen Überfahrten werden zuerst überlagert, danach wird der Mittelwert gebildet.

Im Zuge der Auswertung von ADCP-Messungen mit *AGILA* können auch die Verfälschung des *Bottom Tracks* durch Geschiebetrieb und die sich daraus ergebende Unterschätzung des Gesamtabflusses ausgeglichen werden, wenn dafür keine externen Lageinformationen zur Verfügung stehen (Kap. 4.2.3.3). Voraussetzung dafür ist, dass die Größe des Geschiebetriebs entlang des Messwegs ungefähr gleich groß bleibt.

$$\begin{aligned} Q_{gesamt} &= Q_{ADCP} + \Delta Q \\ \Delta Q &= \text{Längsversatz} / \text{Überfahrtszeit} \cdot \text{Querschnittsfläche} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Um die Größe des Fehlers in der Eigenbewegung ermitteln zu können, ist eine so genannte *Schleifenfahrt* notwendig (Abb. 4.9). Im Gegensatz zur realen Situation schließt sich der vom ADCP aufgezeichnete *Bottom Track* nicht, sondern weist am Schluss eine Lücke – einen Längsversatz – auf. Dieser entspricht dem über die Querschnittsbreite akkumulierten Ausmaß des Geschiebetriebs. Unter Verwendung dieses Abstands kann abgeschätzt werden, um wie viel der Gesamtabfluss dadurch unterschätzt wird.

5.3 Tool zur Verknüpfung der ADCP-Daten mit Lageinformationen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben, kann der ADCP prinzipiell seinen eigenen Weg über Grund ohne zusätzliche Messgeräte ermitteln. Unter bestimmten Randbedingungen kann dieses Verfahren jedoch nicht angewendet werden.

Bei Geschiebetrieb interpretiert der ADCP die Bewegung des Sohlmaterials als eigene Bewegung stromaufwärts, was in weiterer Folge zu einer Unterschätzung der absoluten Fließgeschwindigkeiten und des daraus berechneten Abflusses im Messquerschnitt führt (Kap. 4.2.3.3).

ADCP-Messungen mit Referenz *Bottom Track* (BT) werden aber auch dann problematisch, wenn die BT-Signale die Sohle zeitweise nicht erreichen, die reflektierten Signale den ADCP nicht erreichen, oder aus den empfangenen Signalen keine eindeutigen Relativgeschwindigkeiten berechnet werden können. Dies ist vor allem bei Hochwasser mit sehr turbulenter Strömung, großen Sohlbewegungen und hohen Schwebstoffkonzentrationen der Fall. Der ADCP kann aufgrund der fehlenden Daten seinen eigenen Weg über Grund nicht mehr ermitteln, und in weiterer Folge die aufgezeichneten Relativgeschwindigkeiten des betroffenen Ensembles nicht in absolute Fließgeschwindigkeiten umrechnen. Aus diesem Grund werden die erfassten Geschwindigkeitswerte des gesamten Ensembles in der Berechnung des Abflusses bei Referenz BT nicht berücksichtigt. Die Folge sind Bereiche ohne Daten, die inter- bzw. extrapoliert werden müssen, und zu Ungenauigkeiten in der Abflussermittlung führen (Abb. 5.1). Geschwindigkeitsdaten in Ensembles ohne Sohleninformationen werden beim Datenexport mit Referenz BT ebenfalls nicht abgespeichert und stehen daher für weitere Auswertungen nicht zur Verfügung.

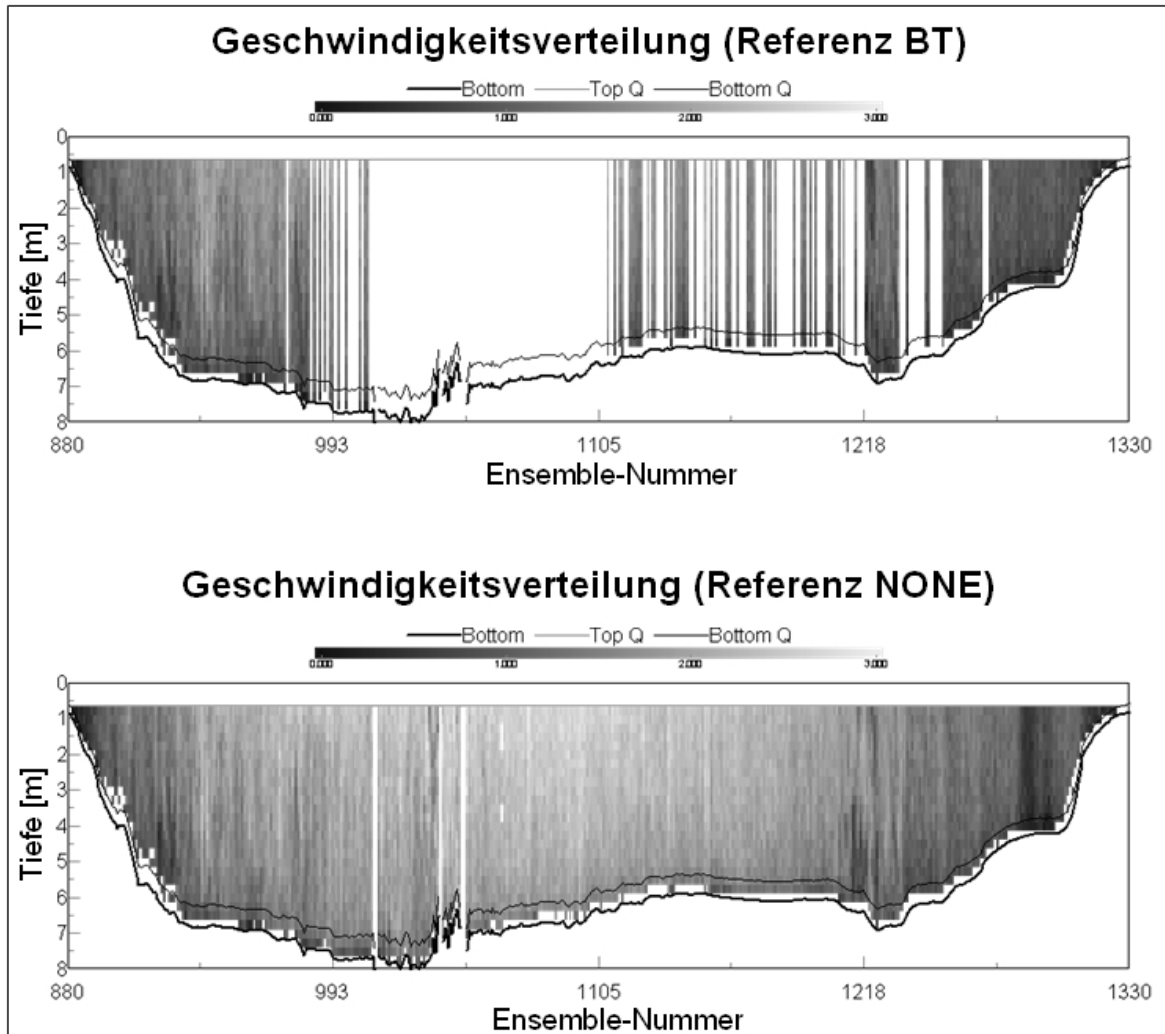


Abbildung 5.1: Geschwindigkeitsverteilung mit Referenz BT und Referenz NONE

Wie Abb. 5.1 zeigt, weist die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung mit Referenz BT große Lücken auf, während bei Referenz NONE wesentlich mehr Geschwindigkeitsinformationen zur Verfügung stehen. Dabei handelt es sich um die Relativgeschwindigkeiten zwischen den reflektierenden Partikeln in der Strömung und dem ADCP. In einem derartigen Fall werden also zusätzliche Lageinformationen benötigt, um die Eigenbewegung des ADCP zu berücksichtigen und die Messdaten dementsprechend in absolute Fließgeschwindigkeiten umzurechnen.

Eine Möglichkeit bieten in diesem Zusammenhang dGPS-Messungen (Kap. 4.2.3.3). Sie haben den Vorteil, dass die berechneten Lageinformationen während der Messung direkt in die ADCP-Files integriert werden können. Die Software *WinRiver* bietet die Möglichkeit, die relativen Fließgeschwindigkeiten auch auf GPS-Daten zu referenzieren, hier sind also keine zusätzlichen Auswerterroutinen erforderlich, um die

5.3 Tool zur Verknüpfung der ADCP-Daten mit Lageinformationen

GPS-Daten in der Berechnung der Fließgeschwindigkeiten und der Abflüsse zu berücksichtigen. GPS-Antennen sind jedoch teuer in der Anschaffung, und ihr Einsatz ist nicht immer möglich, wie in Kap. 4.2.3.3 dargelegt wurde.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Erfassung des ADCP-Messwegs mit geodätischen Messgeräten und die nachträgliche Implementierung dieser Datensätze in die ASCII-Out Files dar. Dabei muss das vorgegebene Format der Output-Files gewahrt werden, um die Bearbeitung der ergänzten Dateien mit weiterführenden Auswerteprogrammen zu ermöglichen. Für die gegenständlichen Untersuchungen wurde der während ADCP-Messungen aufgezeichnete Messpfad zusätzlich von einer Totalstation³⁹ von Leica⁴⁰ erfasst. Am Trägergerät wurde in Verlängerung der Achse des ADCP ein 360°-Prisma befestigt, das während der Messung von der Totalstation automatisch verfolgt werden konnte (Abb. 6.42).

Pro Messwert der Totalstation werden die jeweilige Uhrzeit im Format [hh:mm:ss], die schräge Distanz in [m], sowie der Winkel zur Vertikalen und der Horizontalwinkel zu einer beliebig einstellbaren Nullrichtung in [rad] abgespeichert. Diese Lageinformationen müssen vor der Implementierung in die ADCP-Files entsprechend umgewandelt und umformatiert werden. Zuerst werden die von der Totalstation aufgezeichneten Relativkoordinaten in Gauß-Krüger-Koordinaten⁴¹ umgerechnet. Dafür müssen die Koordinaten des Gerätestandorts sowie der Winkel zwischen dem festgelegten Horizontal-Nullwinkel und Norden bekannt sein. Die Umrechnung erfolgt dann unter Verwendung trigonometrischer Zusammenhänge (Abb. 5.2).

Aus den Punktinformationen im Gauß-Krüger-Format werden weitere, in den ADCP-Daten später benötigte, Variablen – wie beispielsweise die Geschwindigkeitsvektoren pro Messensemble über Grund oder der seit dem Start der Messung zurückgelegte Weg – berechnet und tabellarisch aufgelistet.

Mit Hilfe der Software *CAPLAN*⁴² können die Gauß-Krüger-Koordinaten im nächsten Schritt in geografische Koordinaten⁴³ umgerechnet werden. Dies ist erforderlich,

³⁹Elektronischer Tachymeter zur selbsttätigen Richtungs- und Distanzmessung.

⁴⁰Leica Geosystems GmbH Vertrieb, Triebstraße 14, 80993 München

⁴¹Kartesisches Koordinatensystem, das es erlaubt, kleine Gebiete der Erde in metrischen Koordinaten (Rechtswert und Hochwert) darzustellen. Viele amtliche topografische Karten mit großen und mittleren Maßstäben bauen darauf auf.

⁴²Software der Cremer Programmentwicklung (CP) GmbH zur Verwaltung bzw. Berechnung von Vermessungspunkten sowie zur Planausgabe.

⁴³Geografische Koordinaten (geograf. Breite und geograf. Länge) dienen der Beschreibung der Lage eines Punktes auf der Erde. Diese wird dafür in 360 Längengrade und 180 Breitengrade aufgeteilt.

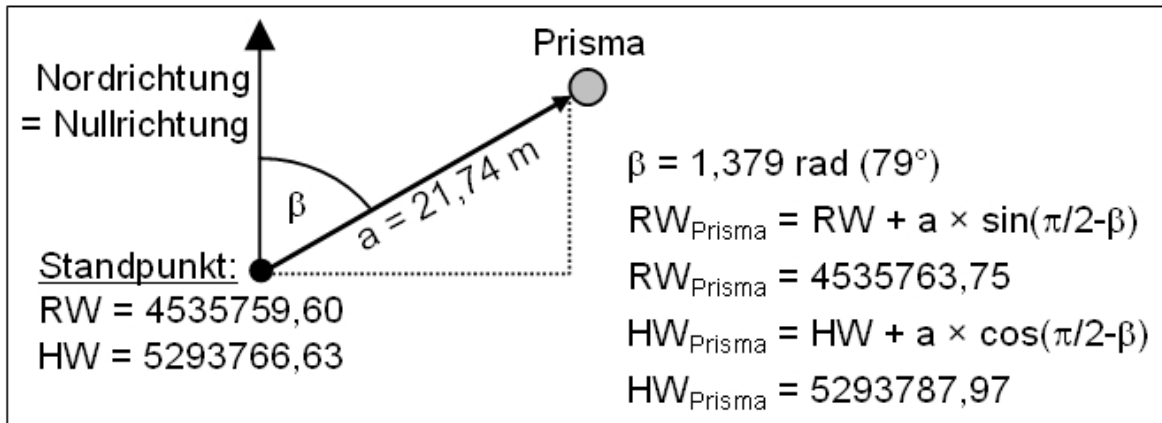


Abbildung 5.2: Verwendete trigonometrische Zusammenhänge zur Koordinatenumrechnung

weil im Falle einer Lageerfassung mit GPS die Daten auch in diesem Format in den ASCII-Files abgespeichert werden würden. Nach der Umrechnung werden die Lageinformationen durch lineare Interpolation auf die Zeitstempel der ADCP-Daten umgerechnet.

Für die Ergänzung bzw. Zusammenführung der verschiedenen Datensätze benötigt man die ADCP-ASCII-Out Files mit Referenz BT und Referenz NONE sowie die umgewandelten Lageinformationen der Totalstation. Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt eines während Hochwasser aufgezeichneten Messensembles mit Referenz BT und Referenz NONE im ASCII-Out Format. Anhand dieses Beispiels soll die Vorgehensweise bei der Zusammenführung der ADCP-Daten mit den Messwerten der Totalstation beschrieben werden.

Die darin enthaltenen Werte haben folgende Bedeutung.

<u>Zeile</u>	<u>Feld</u>	<u>Beschreibung</u>
1	1-7	Datum in [yy mm dd] und Zeit in [hh mm ss hh]
1	8	Ensemblenummer
1	10-12	Pitch, Roll und Heading [°]
1	13	Wassertemperatur [°C]
2	1-4	Geschwindigkeit über Grund mit Referenz BT [m/s] (ost-west, nord-süd, vertikal, Fehler)
2	5	von einem externen Messgerät erfasste Fließtiefe [m]
2	6-8	GPS-Höhendaten [müNN]
2	9-12	Fließtiefen der Beams 1-4 [m]

5.3 Tool zur Verknüpfung der ADCP-Daten mit Lageinformationen

```

5 8 24 11 58 45 7 1250      1      3.830   -3.450   164.190   11.150
-32768 -32768 -32768 -32768   0.00   0.00   0.00   0.00   5.66   0.00   6.40   5.78
21.14      63.26      -1.90      13.29      13.43
30000.0000000 30000.0000000 -32768 -32768          21.1
88.9      15.4      9.5      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
37 cm BT dB 0.45 0.430
0.77 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 115.9 115.9 119.1 116.4 100 2147483647
1.02 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 114.8 114.8 118.0 116.2 100 2147483647
1.27 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 -32768 112.8 112.8 115.1 113.7 100 2147483647
.....

5 8 24 11 58 45 7 1250      1      3.830   -3.450   164.190   11.150
-32768 -32768 -32768 -32768   0.00   0.00   0.00   0.00   5.66   0.00   6.40   5.78
0.00      63.26      0.00      0.00      0.00
30000.0000000 30000.0000000 -32768 -32768          0.0
0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
37 cm NONE dB 0.45 0.430
0.77 205.12 349.84 -36.2 201.9 -11.0 -2.1 115.9 115.9 119.1 116.4 100      0.00
1.02 188.34 351.36 -28.3 186.2 -2.9 4.7 114.8 114.8 118.0 116.2 100      0.00
1.27 206.57 352.49 -27.0 204.8 -4.5 32.4 112.8 112.8 115.1 113.7 100      0.00
.....

```

Abbildung 5.3: Aufbau des Messensembles Nr. 1250 mit Referenz BT (oben) und NONE (unten) im ASCII-Out Format

- 3 1 aufsummierter zurückgelegter Weg vom Start [m]
- 3 2 verstrichene Zeit seit dem Start [s]
- 3 3-5 zurückgelegte Distanz (nord-süd, ost-west, schräg) [m]
- 4 1-5 GPS-Lagedaten (Breitengrad, Längengrad, Distanz zum Startpunkt)
- 5 1-3 Abflussanteile (gemessen, Oberfl. und Sohle extrapoliert) [m³/s]
- 5 4,6 extrapolierte Abflussanteile an den beiden Ufern [m³/s]
- 5 5,7 Abstand zwischen beiden Ufern und dem Start- bzw. Endpunkt der Überquerung [m]
- 5 8-9 Ausdehnung des messtechnisch erfassten Tiefenbereichs [m] (obere / untere Grenze)
- 6 1 Anzahl der Tiefenzellen
- 6 2 Einheit (cm oder ft)
- 6 3 Referenz (BT, NONE, GGA oder VTG)
- 6 4 Einheit der Intensität (dB oder count)
- 6 5 Intensitätsskalierungsfaktor [dB/count]
- 6 6 Schallabsorptionsfaktor [dB/m]
- 7-... 1 Tiefe der jeweiligen Tiefenzelle [m]
- 7-... 2 Absolutwert der Fließgeschwindigkeit [m/s]
- 7-... 3 Richtung des Geschwindigkeitsvektors [°]
- 7-... 4-7 Geschwindigkeitskomponenten [m/s] (ost-west, nord-süd, vertikal, Fehler)
- 7-... 8-11 Rückstreuintensitäten Beam 1-4 (dB oder count, je nach Einstellung)
- 7-... 12 Prozent gültige Daten [%]
- 7-... 13 Abflussanteil in der jeweiligen Tiefenzelle [m³/s]

Die erste Zeile des Ensembles ist unabhängig von der Referenzierung der Daten und kann daher aus einer der beiden Textdateien (Referenz BT oder Referenz NONE) übernommen werden. In Zeile 2 fällt auf, dass mit Referenz BT die Geschwindigkeit des ADCP über Grund nicht ermittelt werden konnte. Um im Zuge einer weiteren Auswertungen die Datensätze mit Referenz BT und mit Bezug auf das externe Lagemessgerät rasch vergleich zu können, werden die Werte in Zeile 2 aus der Datei mit Referenz BT übernommen. Die Lageinformationen in Zeile 3 werden bei Referenz NONE nicht abgespeichert und deshalb ebenfalls aus der Datei mit Referenz BT übernommen. Die GPS-Daten in Zeile 4 fehlen bei beiden Versionen, da parallel zur ADCP-Messung keine zusätzliche GPS-Messung durchgeführt wurde. Diese Variablen werden aus den Werten der Totalstation berechnet und dementsprechend in die Datensätze eingefügt. Die Abflussanteile (Zeile 5) sind im ASCII-File mit Referenz NONE ebenfalls nicht enthalten. Diese Werte werden jedoch im Zuge einer weiteren Bearbeitung – beispielsweise mit dem Programm *AGILA* – neu berechnet und sind deshalb nicht von Bedeutung. Zeile 5 kann daher entweder aus der Datei mit Referenz BT oder mit Referenz NONE weiterverwendet werden. In Zeile 6 wird unter anderem die Referenzierung – BT bzw. NONE – dokumentiert. Diese Angabe muss auf „GGA“ (GPS-Format) umgeändert werden.

Die folgenden Zeilen, die die erfassten Daten in den einzelnen Tiefenzellen enthalten, sind bei Referenz NONE mit Messwerten gefüllt, bei Referenz BT enthält die Aufstellung anstatt der Fließgeschwindigkeiten nur Fehlerwerte (-32768). Der Grund dafür liegt in der misslungenen Erfassung der ADCP-Bewegung mit dem BT-Signal (siehe Zeile 2), was eine Umrechnung der Relativgeschwindigkeiten in Absolutgeschwindigkeiten unmöglich macht. Aus diesem Grund müssen die Geschwindigkeiten mit Referenz NONE anhand der Lageinformationen der Totalstation umgerechnet und in die Datensätze integriert werden. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden.

Die Totalstation zeichnete während des Zeitfensters, in dem der ADCP das Ensemble Nr. 1250 erfasste, die in Tab. 5.1 dargestellten Lageinformationen auf.

Aus diesen Daten können für das Ensemble Nr. 1250 die Geschwindigkeiten des ADCP-Trägergerätes über Grund ermittelt und die relativen Fließgeschwindigkeiten aus dem ASCII-Out File mit Referenz NONE in absolute Fließgeschwindigkeiten umgerechnet werden. Die Umrechnung der relativen Fließgeschwindigkeiten wird am Beispiel der Messzelle in 1.27 m Tiefe durchgeführt.

5.3 Tool zur Verknüpfung der ADCP-Daten mit Lageinformationen

Zeit	Rechtswert	Hochwert	Länge	Breite	Höhe
11:58:44	4510336.537	5289082.454	12.1378403	47.7408419	463.215
11:58:45	4510336.650	5289082.486	12.1378418	47.7408422	463.215
11:58:46	4510336.660	5289082.483	12.1378419	47.7408421	463.215

Tabelle 5.1: Lagemessung der Totalstation

$$v_{BT\ west}^{ost} = 12.0\ cm/s \quad \rightarrow \quad v_{west}^{ost} = -27.0 + 12.0 = -15.0\ cm/s$$

$$v_{BT\ sued}^{nord} = 3.54\ cm/s \quad \rightarrow \quad v_{sued}^{nord} = 204.8 + 3.55 = 208.34\ cm/s$$

Das Ergebnis der Datenzusammenführung ist in Abb. 5.4 für das Messensemble Nr. 1250 dargestellt.

5	8	24	11	58	45	7	1250	1	3.830	-3.450	164.190	11.150						
-32768	-32768	-32768	-32768	-32768	-32768	-32768	-32768	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.66	0.00	6.40	5.78		
21.14		63.26						-1.90	13.29		13.43							
47.7408422		12.1378418						12.00	3.55		100.03							
88.9		15.4						9.5	0.0		0.0		0.0		0.0	0.00	0.00	0.00
37	cm	GGA	dB	0.45	0.430													
0.77	206.868	353.282						-24.2	205.44	-32768	-32768	115.9	115.9	119.1	116.4	100		0.01
1.02	190.446	355.090						-16.3	189.74	-32768	-32768	114.8	114.8	118.0	116.2	100		0.01
1.27	208.887	355.882						-15	208.34	-32768	-32768	112.8	112.8	115.1	113.7	100		0.01
.....																		

Abbildung 5.4: Aufbau des Messensembles Nr. 1250 mit Referenz GPS (GGA) im ASCII-Out Format

Die so ergänzten Dateien können im Anschluss mit weiterführenden Auswerteprogrammen (beispielsweise *AGILA*, Kap. 5.2) geöffnet werden. Das Ergebnis einer derartigen Bearbeitung bzw. Ergänzung der Datensätze ist in Abb. 5.5 dargestellt.

Der Unterschied in den Ergebnissen ist deutlich zu sehen. Während die mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt bei Referenz BT 1.03 m/s beträgt, wird unter Mitbeziehung der Lageinformationen der Totalstation (Referenz GPS) eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 1.69 m/s berechnet. Verantwortlich für diesen Unterschied ist unter anderem der Geschiebetrieb im Messquerschnitt. In Abb. 5.5 ist aber auch zu erkennen, dass bei Referenz BT die Messwerte nicht nur zu niedrig sind, sondern, dass auch – wie zu Beginn des Kapitels bereits beschrieben – weniger Daten zur Abflussberechnung verwendet werden. Der mit Referenz BT ermittelte Gesamt-

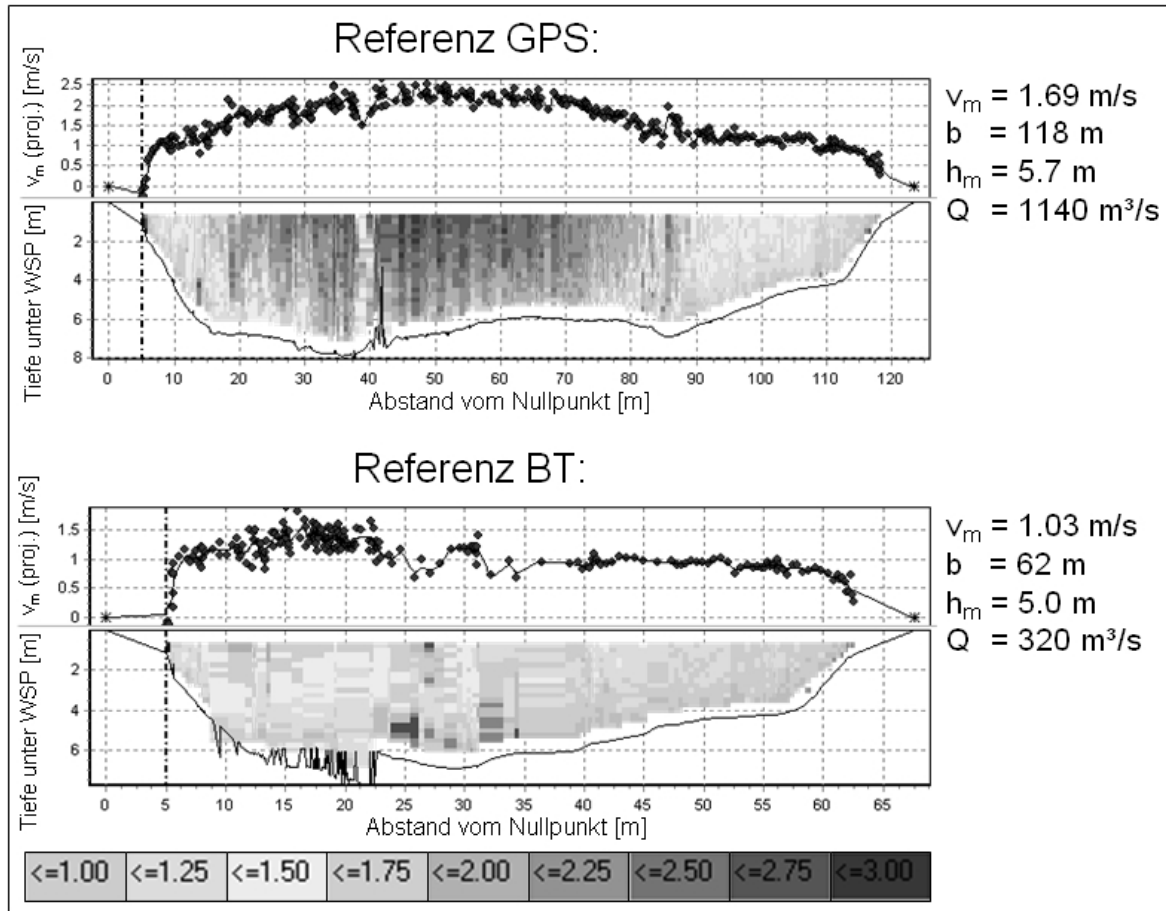


Abbildung 5.5: Ermittelte Fließgeschwindigkeitsverteilung in einem Messquerschnitt mit Geschiebetrieb

abfluss im Messquerschnitt wird im Vergleich zu den GPS-referenzierten Ergebnissen schlussendlich um etwa 70 % unterschätzt, was einen enormen Fehler darstellt. Die Berücksichtigung der aufgezeichneten Lageinformationen einer Totalstation kann daher als sehr effektive Möglichkeit bezeichnet werden, um den durch Geschiebetrieb verursachten Fehler in der Auswertung der ADCP-Daten zu kompensieren und trotz schwieriger Messbedingungen zufriedenstellende Messergebnisse zu erhalten.

6 ADCP-Messungen

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt, sind ADCPs sehr robuste Messgeräte, mit denen innerhalb kurzer Zeit eine Vielzahl von Strömungsparametern ermittelt werden können. Auch aufgrund des verbesserten Personenschutzes durch ferngesteuerte Geräte und der Möglichkeit einer weiterführenden Datenauswertung zur Erfassung morphologischer Prozesse kommen diese Geräte immer öfter zum Einsatz.

Am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München fanden Untersuchungen zur Erfassung hydromorphologischer Vorgänge in Fließgewässern mit Hilfe von ADCP-Messungen statt. Die Durchführung der Messungen sowie die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse werden auf den folgenden Seiten ausführlich beschrieben.

6.1 ADCP-Messungen an der Versuchsanstalt in Oberrach

Um sich mit der Messtechnik vertraut zu machen, die verschiedenen Geräteeinstellungen zu testen und die möglichen Einsatzbereiche des ADCP zu untersuchen, wurden im Sommer 2005 an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach (VAO) erste Testmessungen durchgeführt. Es kam ein ADCP der Firma RDI vom Typ *Workhorse RioGrande* mit einer Frequenz 1200 kHz zum Einsatz. Das Gerät wurde für die Dauer der Versuche von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zur Verfügung gestellt wurde.

6.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuche fanden in einem 235 m langen rechteckigen Betonkanal mit einem Gefälle von 0.5 ‰ am Freigelände der VAO statt (Abb. 6.1). Der 2.5 m breite und 2.1 m tiefe Kanal kann mit einem Abfluss von maximal 5 m³/s beaufschlagt werden.

6 ADCP-Messungen



Abbildung 6.1: Lageplan der Versuchsstand mit Versuchskanal

Der Versuchsstand wurde nach den ersten 100 m Kanallänge aufgebaut. An dieser Stelle befinden sich an beiden Seiten des Kanals Beobachtungsschächte, von denen aus die Vorgänge im Gerinne durch Plexiglasscheiben beobachtet werden können (Abb. 6.2).

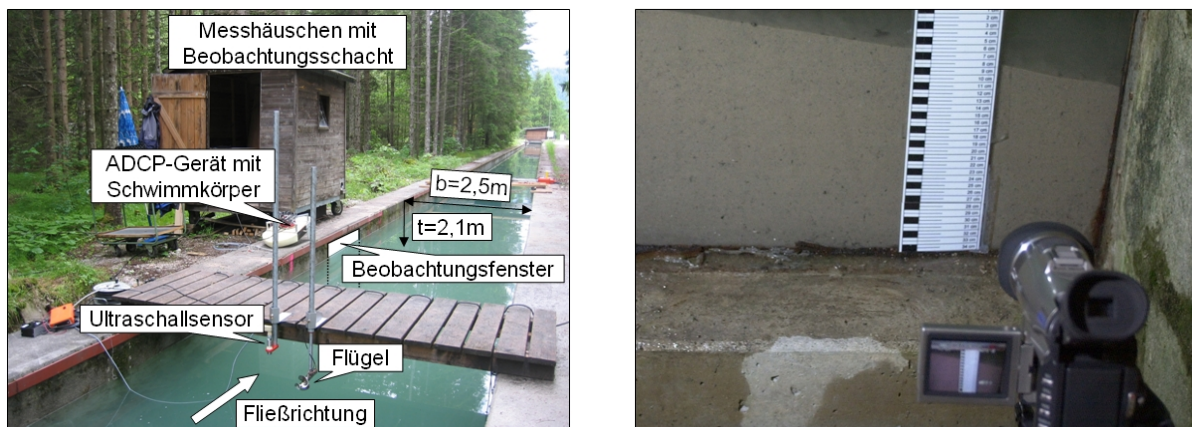


Abbildung 6.2: Versuchsstand mit Beobachtungsschacht

Der für den ADCP-Einsatz konzipierte Schwimmkörper aus Styrodur (Abb. 6.3) wurde für die Dauer der Versuche im Bereich der Beobachtungsfenster in Kanalmitte befestigt. Der ADCP ermittelte an diesem Punkt während der gesamten Versuchsdauer die Fließgeschwindigkeitsverteilung entlang der Messlotrechten, sowie die Höhenlagen der Sohle im Bereich unter dem Messgerät.



Abbildung 6.3: ADCP-Schwimmkörper aus Styrodur

Verschiedene Fragestellungen sollten mit Hilfe der Versuche beantwortet werden.

- Wie genau kann der ADCP die Höhenlage der Gewässersohle erfassen?
- Ist eine messtechnische Erfassung von zeitlich variablen Sohlenhöhen beispielsweise während Erosion möglich?
- Ist die ADCP-Technik auch bei hohen Schwebstoffkonzentrationen einsetzbar?

Das Messgerät kann – aufgrund seiner Befestigung auf dem im Wasser schwimmenden Trägerboot – die Fließtiefen nur relativ zur Wasseroberfläche aufzeichnen. Um davon auf die absoluten Höhenlagen der Sohle schließen zu können, wurde an der Messstelle auch ein Ultraschallsensor zur Wasserstandsmessung installiert. Ein hydrometrischer Messflügel der Firma OTT wurde zum Vergleich mit den vom ADCP gemessenen Fließgeschwindigkeiten in den Versuchsstand integriert. Im orographisch linken Beobachtungsschacht wurden eine Digitalkamera und eine digitale Videokamera installiert, um den Vorgang des Sohlaustrags auch visuell zu dokumentieren (Abb. 6.2).

Messtechnische Erfassung veränderlicher Sohlenlagen

Die ersten Messungen sollten nicht nur Erkenntnisse über die Arbeitsweise des ADCP bringen, sondern vor allem die Fragestellung klären, mit welcher Genauigkeit der ADCP Sohlenlagen erfassen kann und wie das Messgerät auf erhöhte Schwebstoffkonzentrationen und bewegliche Sohlen reagiert. In den Kanal wurden im entleerten Zustand zwei verschieden hohe Sohlen ($h_1 = 35$ cm, $h_2 = 60$ cm) über eine Länge von mehreren Metern im Bereich der Beobachtungsfenster eingebaut. In Hinblick auf die

6 ADCP-Messungen

geplanten Naturmessungen am bayerischen Inn wurde als Sohlmaterial eine Mischung aus zwei verschiedenen Sanden verwendet, dessen Sieblinie gut mit den bekannten Sieblinien aus den Stauräumen Oberaudorf, Nußdorf und Feldkirchen übereinstimmt. In diesen drei Bereichen liegen Auswertungen von umfangreichen Sohlprobenentnahmen vor. Die aus den gewonnenen Proben ermittelten Sieblinien in den drei Staustufen sowie das Sieblinienband des an der VAO verwendeten Sandes sind in (Abb. 6.4) dargestellt.

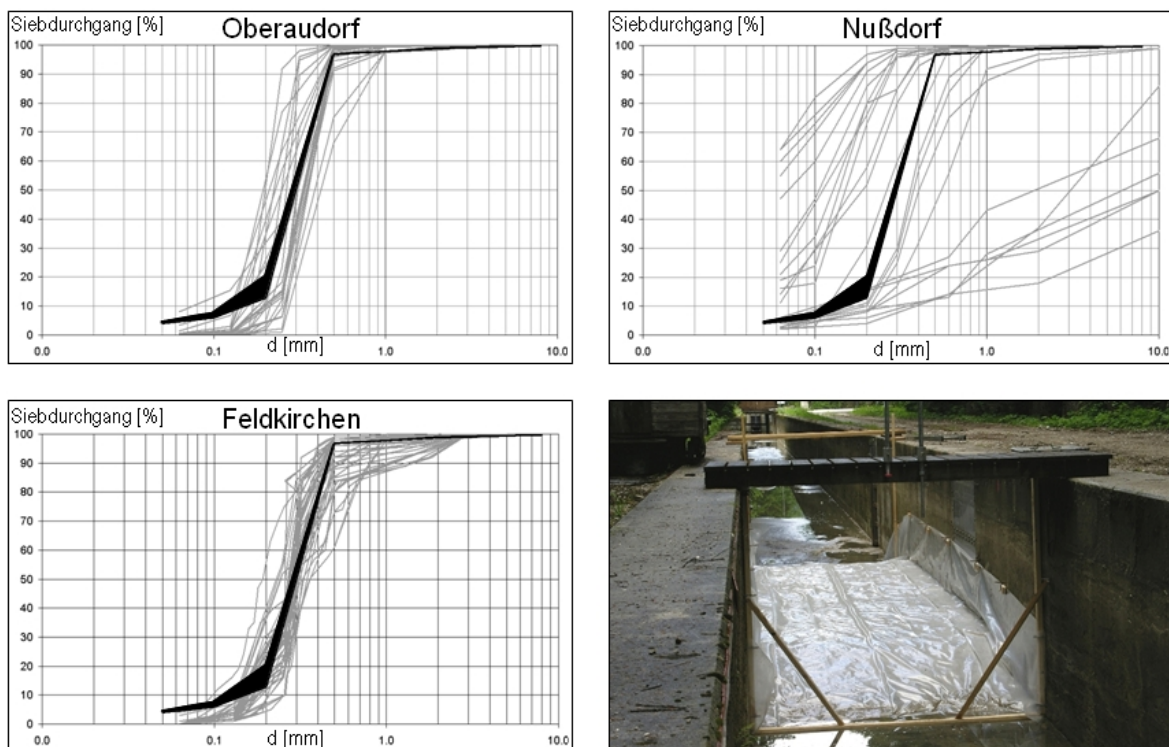


Abbildung 6.4: Sieblinien von Sohlenproben aus den Innstaustufen Oberaudorf, Nußdorf und Feldkirchen im Vergleich zur Sieblinie des Versuchssandes, Einbau des Sohlenpolsters im Versuchskanal

Für die Versuche wurde der Sand lagenweise eingebaut und mit Schaufeln verdichtet. Danach wurde die Sohle zum Schutz vor Erosion mit einer Folie abgedeckt, und der Kanal langsam geflutet (Abb. 6.4). Anschließend wurde die Schutzfolie wieder entfernt. Der Durchfluss durch das System wurde langsam von Null an gesteigert und auf dem maximal erreichbaren Niveau festgehalten. Der Wasserspiegel konnte während des gesamten Versuches durch ein Schütz im Unterwasser annähernd konstant gehalten werden. Der ADCP war – wie bereits beschrieben – während der gesamten

Versuchszeit stationär in der Mitte des Kanals befestigt. Für die Messungen wurden folgende Geräteeinstellungen des ADCP gewählt:

WM5, WP10, BM5, BP10, TP000020, WS10, WN20, WF10

WM8, WP10, BM5, BP10, TP000020, WS10, WN20, WF10

Der Wechsel des *Water Mode* von WM 5 auf WM 8 während der beiden Messungen wurde aufgrund der steigenden Fließgeschwindigkeiten im Laufe des Versuchs vorgenommen. Bei beiden Versuchen begann die eingebaute Sohle bei Erreichen einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v_m \approx 1$ m/s zu erodieren und wurde im weiteren Verlauf vollkommen abgetragen. Parallel zu den Aufzeichnungen des ADCP wurde mit dem Ultraschallsensor der Wasserspiegelverlauf an der Messstelle dokumentiert. Die visuelle Dokumentation der Sohlhöhen aus dem linken Beobachtungsschacht diente zur Validierung der ADCP-Daten.

6.1.2 Auswertung der Versuchsdaten

Die Versuche an der VAO brachten wertvolle Erkenntnisse über die Arbeitsweise des ADCP, die Genauigkeit der Messwerte und die Einsatzgrenzen dieser Technik unter bestimmten Randbedingungen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Messtechnik in der Lage ist, zeitliche Veränderungen von Sohlhöhen zu dokumentieren. Abbildung 6.5 und 6.6 zeigen die vom ADCP aufgezeichneten Sohlenlagen sowie die Ergebnisse der visuellen Beobachtung aus dem linken Schacht.

Normalerweise mittelt die ADCP-Software *WinRiver* die gemessenen Fließtiefen der vier Messstrahlen und zeigt das Ergebnis als Sohlhöhe für die Lotrechte unter der Geräteachse an. Eine getrennte Darstellung der vier Höhenlagen ist nicht möglich. Um die von den vier Strahlen aufgezeichneten Abstände getrennt darstellen zu können, wurden die Daten aus den ASCII-Out Files ausgelesen. Die zeitliche Entwicklung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit in Abb. 6.5 und 6.6 wurde aus *AGILA* exportiert.

Der Unterschied zwischen den erfassten Höhenlagen der beiden vorderen und der beiden hinteren Messstrahlen des ADCP ist in Abb. 6.5 und 6.6 deutlich zu erkennen. Die Differenz ist dadurch erklärbar, dass die Sohle nicht gleichmäßig ausgetragen wurde, sondern die Erosion am oberstromigen Ende der eingebauten Sandsohle begann und sich von dort aus in Strömungsrichtung fortpflanzte. Abbildung 6.7(a) zeigt eine

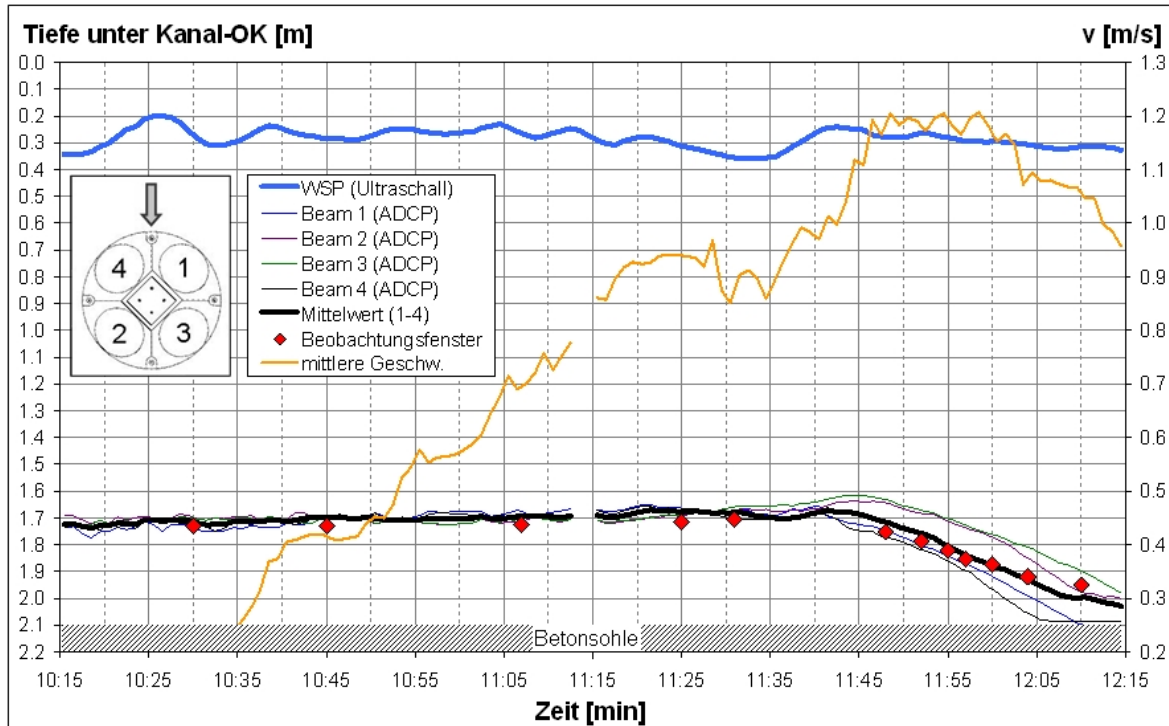


Abbildung 6.5: zeitlicher Verlauf der Sohlenlagen während der Erosion der 35 cm hohen Sandsohle

schematische Darstellung dieses Sachverhalts, Photos aus dem Beobachtungsschacht bestätigen diese These (Abb. 6.8).

Ebenfalls deutlich zu sehen ist, dass die vom ADCP aufgezeichneten Sohlenlagen anfangs sehr gut mit den visuellen Beobachtungen übereinstimmen, sich aber gegen Ende des Versuchs voneinander entfernen. Auch diese Differenzen sind mit der Versuchsanordnung erklärbar. Zum Einen ist der Schnittpunkt der ADCP-Beams mit der Sohle aufgrund der vertikalen Auslenkung der Strahlen abhängig von der Sohlenhöhe. Mit fortschreitendem Abtrag – also größerer Fließtiefe – wandert dieser Punkt geringfügig nach oberstrom bzw. unterstrom (Abb. 6.7(a)). Außerdem erfasste der ADCP die Sohlenlagen eher in Kanalmitte, während die Beobachtungen aus dem Schacht nur die Situation am äußersten Rand des Querschnitts widerspiegeln (Abb. 6.7(b)). Die Fließgeschwindigkeit haben jedoch im Mittelbereich des Querschnitts ihr Maximum und nehmen zu den Berandungen hin ab, wodurch in Wand- und Sohlennähe die Schubspannungen kleiner sind, was wiederum zu einer verminderten Erosion im Vergleich zum Mittelbereich führt. Umfangreiche Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung in Fließquerschnitten von Kölling [1994] bestätigten diesen Sachverhalt. Die Ergebnisse zeigten für einen Rechteckkanal mit einem Seitenverhältnis von

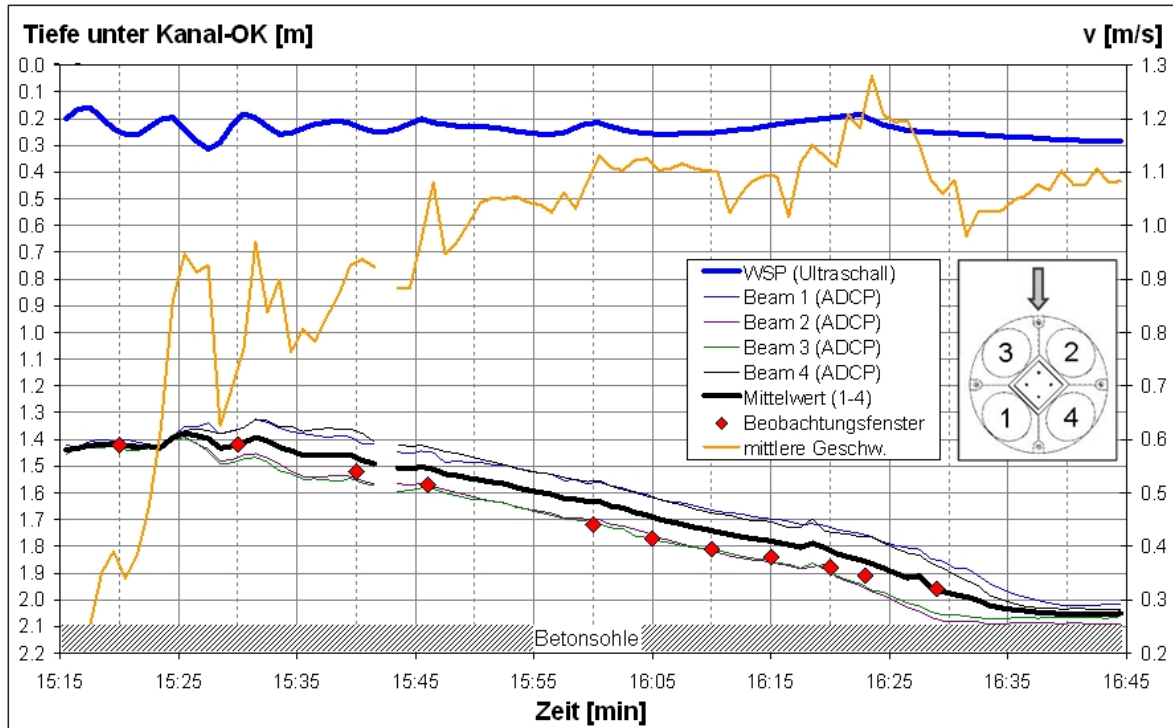


Abbildung 6.6: zeitlicher Verlauf der Sohlenlagen während der Erosion der 60 cm hohen Sandsohle

$H : B = 1 : 2$, dass die Längsgeschwindigkeiten von der Querschnittsmitte zu den Eckbereichen hin auf bis zu 64 % ihres Maximalwertes absinken (Abb. 6.9).

Betrachtet man den Vorgang der Erosion der eingebauten Sandsohle, so sind grundsätzlich zwei verschiedene Phänomene zu unterscheiden.

- Partikel geben aufgrund der angreifenden Schubspannung ihre stationäre Lage auf und bewegen sich hüpfend und springend entlang der Sohle stromabwärts – sie bezeichnet man als *Geschiebe*.
- Partikel werden von der Strömung aufgenommen, verlieren den Kontakt zur Sohle und bewegen sich in unterschiedlichen Höhenschichten mit der Strömung weiter – sie bezeichnet man als *Schwebstoffe*.

Schwebstoffe bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit fort wie die Wasserpartikel der Strömung – diese Annahme ist auch Voraussetzung für die Auswertung der ADCP-Signale zur Ermittlung von Fließgeschwindigkeiten, werden diese doch an Partikeln in der Wassersäule reflektiert. Die Geschwindigkeit, mit der sich Geschiebe fortbewegt, ist hingegen abhängig von der angreifenden Schubspannung und dem

6 ADCP-Messungen

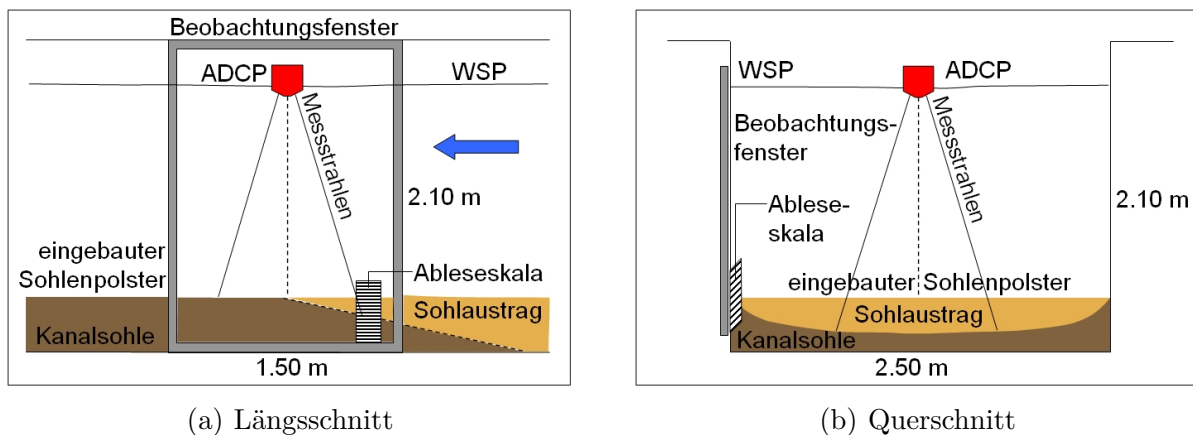


Abbildung 6.7: ungleichmäßige Erosion des Sohlenpolsters

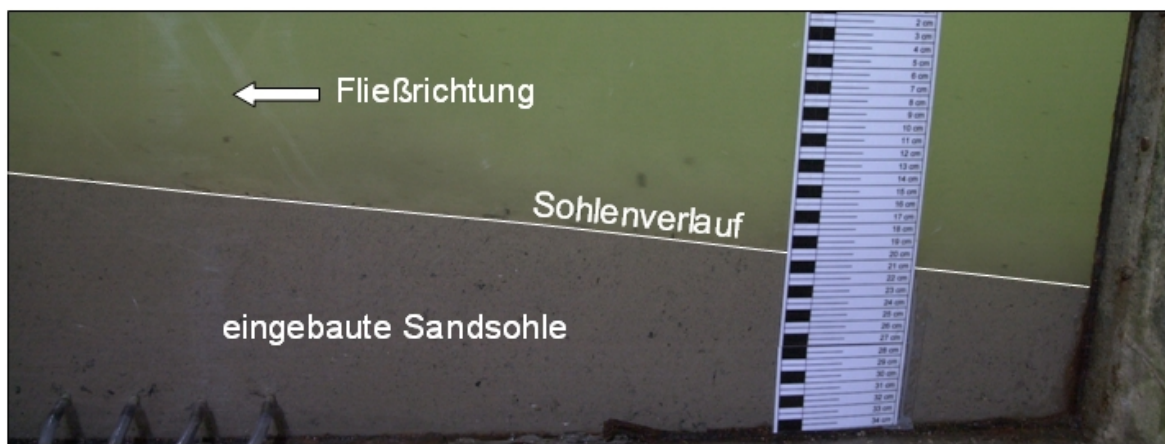


Abbildung 6.8: Aufnahmen des schrägen Sohlverlaufs während der Versuche

dagegen haltenden Widerstand der Partikel. Stellt man in der Messsoftware als Lagereferenzierung *Bottom Track* ein, so wird der ADCP-Weg über Grund unter der Annahme ermittelt, dass die Sohle in Ruhe ist. Die aus dem BT-Signal ermittelte Relativgeschwindigkeit zwischen ADCP und Sohle wird als Bootsbeziehung interpretiert. Kennt man die tatsächliche Bewegung des Messgeräts – die in diesem Fall Null ist – so erhält man auf diese Weise aus den Datensätzen Informationen über die Geschiebegeschwindigkeit.

Abbildung 6.10 zeigt den zeitlichen Verlauf der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit, der Geschiebegeschwindigkeit und der Sohlerosion während der zwei Versuche an der VAO. Bei der Erosion der 35 cm hohen Sandsohle wurde der Durchfluss anfangs nur langsam gesteigert. Der Austrag der Sohle erfolgte erst gegen Ende des Versuchs innerhalb von 30 Minuten bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von etwa 1.2 m/s.

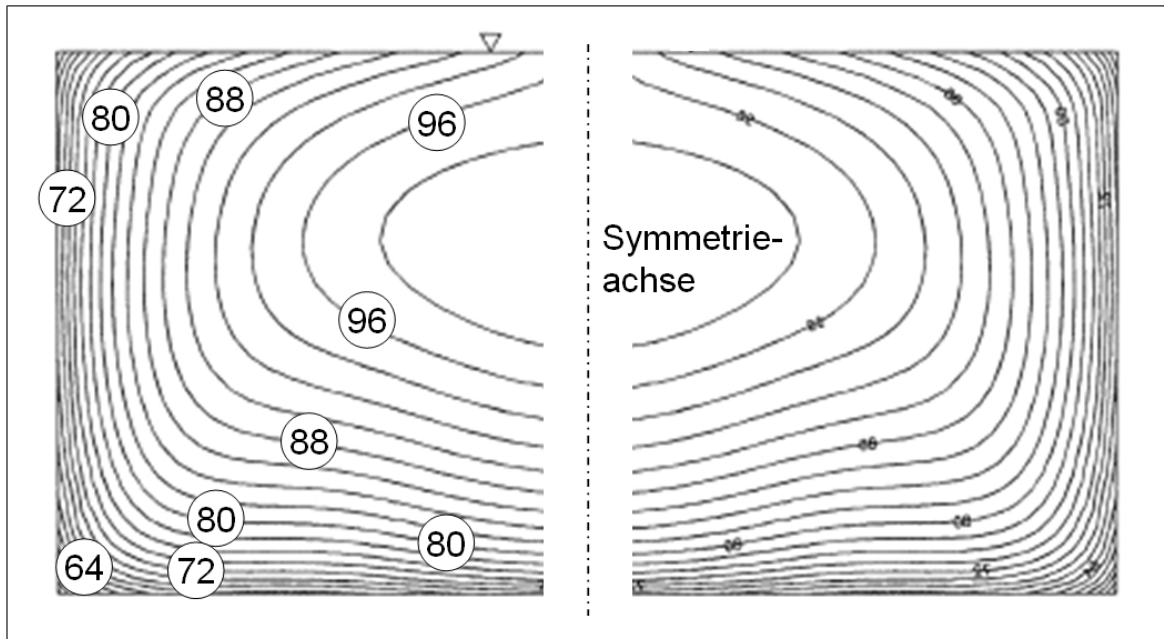


Abbildung 6.9: Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in einem rechteckigen Querschnitt in Prozent zur maximalen Geschwindigkeit [Kölling, 1994]

Dies schlägt sich auch in den relativ hohen Geschiebegeschwindigkeiten von bis zu 60 cm/s nieder, mit denen die Sedimente im Bereich der Sohle unter dem ADCP hindurch transportiert wurden. Bei der Erosion der 60 cm hohen Sandsohle wurde der Durchfluss anfangs zwar relativ rasch gesteigert, was zu einem sprunghaften Anstieg der Fließgeschwindigkeiten und der Sedimentgeschwindigkeiten führte, im weiteren Verlauf des Versuchs erreichte die Beanspruchung der Sohle jedoch nicht mehr die Werte des ersten Versuchs. Aus diesem Grund stiegen die Geschiebegeschwindigkeiten an der Sohle auch nur bis 40 cm/s an. Bei beiden Versuchen fällt der Zeitpunkt, an dem die Sedimentgeschwindigkeiten wieder auf Null zurückgehen, ganz deutlich mit dem Ende der Sohlerosion zusammen: Die Betonsohle ist erreicht und es findet keine Bewegung an der Sohle mehr statt.

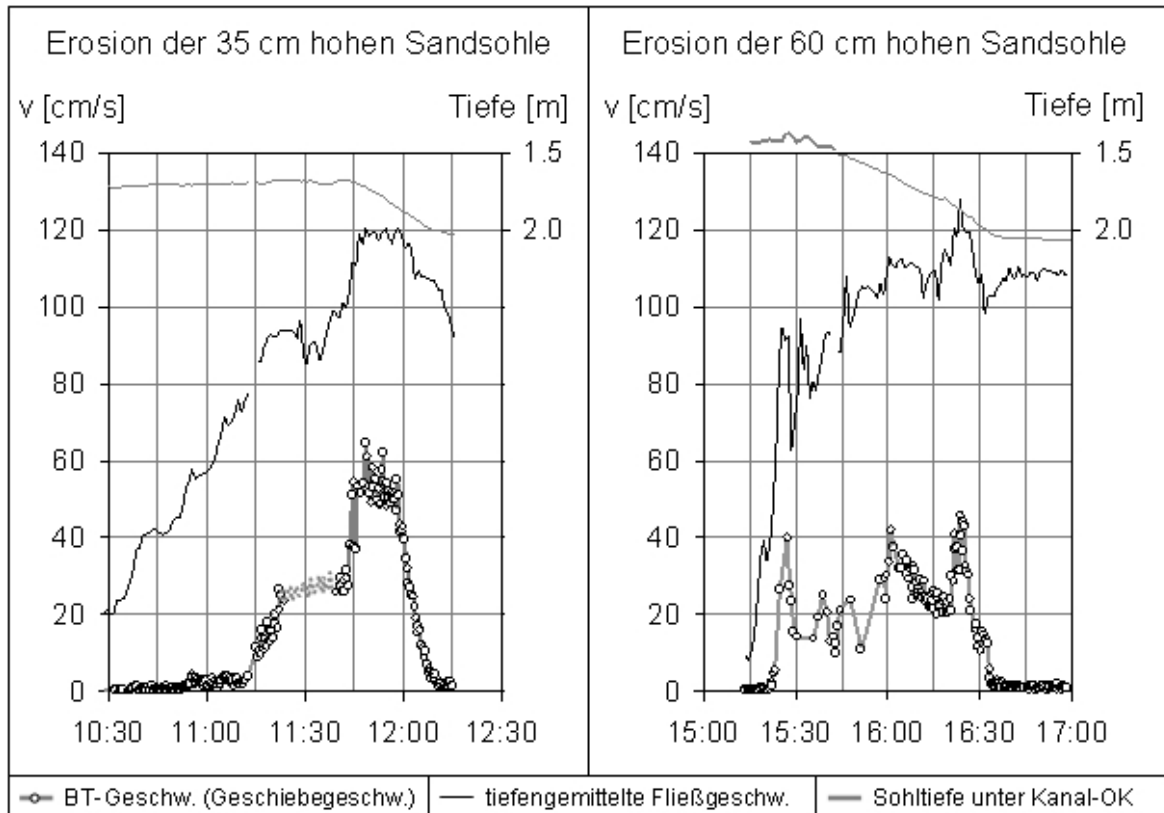


Abbildung 6.10: zeitlicher Verlauf der Geschiebengeschwindigkeit, der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit und der Fließtiefe

6.1.3 Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Testmessungen in einem rechteckigen Kanal an der Versuchsanstalt in Oberrach haben durchaus zufriedenstellende Ergebnisse gebracht. Zur Untersuchung, ob und wie genau der ADCP zeitlich veränderliche Sohlhöhen abbilden kann, wurden zwei unterschiedlich hohe Sandsohlen im Bereich des Messquerschnitts eingebaut und im Laufe der Versuche erodiert. Die daraus resultierenden Veränderungen der Sohlhöhen über die Zeit konnten mit Hilfe der ADCP-Messungen einwandfrei erfasst werden. Die Ergebnisse der ADCP-Messungen konnten anhand visueller Beobachtungen aus einem seitlich angeordneten Schacht bestätigt werden. Der Vergleich der gemessenen mit den beobachteten Sohlenlagen zeigt, dass die vom ADCP aufgezeichneten Daten sehr gut mit den tatsächlichen Sohlhöhen übereinstimmen. Dazu ist jedoch eine getrennte Auswertung der vier Messstrahlen erforderlich. Durch ihre Auslenkung zur Vertikalen treffen sie nämlich an unterschiedlichen Punkten auf die Sohle, wodurch auch räumliche Unterschiede im Sohlenverlauf abgebildet werden können. So wurde beispielsweise während der Erosion der eingebauten Sandsohle ein in Längsrichtung

schräger Verlauf der Sohlenoberfläche festgestellt. Dieses Phänomen ist durch die von oberstrom nach unterstrom fortschreitende Erosion erklärbar und konnte durch die visuellen Beobachtungen bestätigt werden. Die Messgenauigkeit lag im Zentimeterbereich und erfüllt die an die Messtechnik gestellten Erwartungen vollständig.

Die durch die Erosion der Sandsohlen hervorgerufene Steigerung der Schwebstoffkonzentrationen im Messquerschnitt führte zu keinen negativen Beeinträchtigungen der Messungen. Ob die ADCP-Technik aber auch mit den Schwebstoffkonzentrationen, wie sie an den bayerischen Gewässern während Hochwasser auftreten, zurecht kommt, kann nur anhand von Naturmessungen festgestellt werden.

6.2 ADCP-Messungen am bayerischen Inn

Im Rahmen der Untersuchungen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, wurden am bayerischen Inn ADCP-Messungen während erhöhter Abflüsse durchgeführt. Im Folgenden werden die geographischen, morphologischen und hydrologischen Randbedingungen und die geschichtliche Entwicklung sowie deren Auswirkungen auf die heutige Situation des Gewässers kurz umrissen. Die dadurch entstandene, spezielle morphologische Situation am Inn war Motivation für die Durchführung der Messungen.

6.2.1 Hintergrund der Messungen

Aufgrund seines alpinen Einzugsgebietes führt der Inn große Mengen von feinen Sedimenten mit sich. Durch das Fehlen eines großen Kopfspeichers im Oberlauf – wie vergleichsweise der Sylvensteinsee an der Isar oder der Forggensee am Lech – können diese Feinteile nicht sedimentiert werden, sondern werden vom Fluss weiter transportiert. Aus diesem Grund verfügt der bayerische Inn über außergewöhnlich hohe Konzentrationen an Schwebstoffen, die in Verbindung mit der heutigen Situation des Gewässers spezielle Problemstellungen und Herausforderungen bringen.

6.2.1.1 Einzugsgebiet des Inn

Der Inn ⁴⁴ entspringt auf 2484 müNN aus dem Läggh dal Lunghin, einem kleinen See oberhalb des Malojapasses im schweizer Kanton Graubünden. Im Bereich der

⁴⁴keltisch „Ine“ für „Der Fließende“

Gemeinde Samedan mündet der Flaz in den Inn. Das Einzugsgebiet dieses Zuflusses liegt im über 4000 m hohen Berninamassiv. Vom Berninagletscher, der für einen Großteil des Abflusses des Flaz verantwortlich ist, kommen auch die großen Mengen an Schwebstoffen, die für den Inn so charakteristisch sind. Bei Martina überquert der Inn die Grenze nach Österreich. Die aus dem bis zu 3400 m hohen Gebirge der Silvrettagruppe kommende Sanna mündet bei Landeck in den Inn. Nächster nennenswerter Zufluss ist die Öztaler Ache, die die südlich des Inn gelegenen Öztaler Alpen entwässert. Im Stadtgebiet von Innsbruck mündet die Sill in den Inn, im weiteren Verlauf des Unteren Inntals kommt als weiterer rechter Zufluss die Ziller hinzu. All diese Zuflüsse entwässern hochalpine, teilweise vergletscherte Einzugsgebiete und führen große Mengen an feinen Sedimenten (Gletscherschliff etc.) mit sich.

Kurz nach Kufstein bildet der Inn für einige Kilometer die Grenze zwischen Österreich und Deutschland. Er fließt weiter in nördlicher Richtung bis Rosenheim, wo die Mangfall einmündet. Im weiteren Verlauf ändert der Fluss seine Richtung immer mehr nach Osten. Bei Fkm 68.5 mündet die Salzach als bedeutendster Nebenfluss in den Inn. Ab hier fungiert der Fluss wieder als natürliche Grenze zwischen Deutschland und Österreich. Bei Passau schließlich mündet der Inn nach 517 Fließkilometern und 2193 überwundenen Höhenmetern in die Donau. Von seinem gesamten Einzugsgebiet von 26072 km² entfallen 1945 km² auf schweizer Staatsgebiet, 7767 km² auf Österreich und die verbleibenden 16357 km² auf bayerisches Gebiet [Schiller, 1977].

6.2.1.2 Geschichtliche Entwicklung des Inn

Die Geschichte des bayerischen Inn ist noch relativ jung. Das Inntal und das Rosenheimer Becken wurden von den letzten Vorstößen der Würmeiszeit⁴⁵ vor mehr als 10000 Jahren geformt. Nach dem Rückzug des Inngletschers entstand im Bereich des heutigen Chiemgaus und des Bayerischen Oberlandes ein Gletschersee von 300 km² Fläche, der sich nach und nach mit Geschiebe füllte. Erst als vor zirka 10000 Jahren der letzte Endmoränenwall bei Wasserburg brach, begann der See auszulaufen.

Bis in das frühe 19. Jh. war der Inn ein unverbauter, unregulierter, frei fließender Fluss. Aufzeichnungen aus dieser Zeit ist zu entnehmen, dass das stark verzweigte, mäandrierende Gewässer eine Breite von bis zu 2200 m in Anspruch nahm (Abb. 6.11).

⁴⁵Die Würmeiszeit (benannt nach der Würm, einem Nebenfluss der Amper) ist die jüngste großräumige Vergletscherung, die über den Alpenraum hinausging.

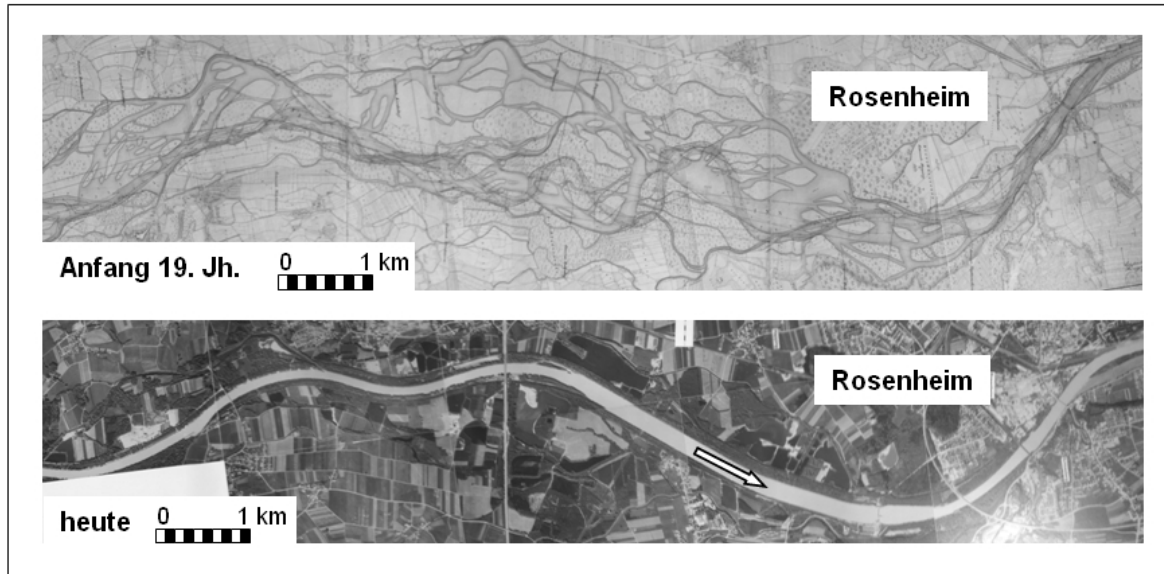


Abbildung 6.11: Entwicklung des Inn im Bereich von Rosenheim
(Fotografien von ausgestellttem Bildmaterial im Innmuseum in Rosenheim)

Im Innmuseum in Rosenheim ist nachzulesen, dass ständige Verlagerungen des Flussbetts und hohe Geschiebefrachten sowie Grenzstreitigkeiten zwischen Bayern und Österreich der Grund für erste lokale Regulierungsmaßnahmen waren. Im Jahre 1847 wurde in einem Übereinkommen zwischen Bayern und Österreich die Normalbreite des Inn auf 117 m festgelegt. Damit war der Grundstein für die *Große Innkorrektur* gelegt. Der Abschnitt zwischen Kiefersfelden und Windshausen wurde bis 1883 ausgebaut, von Windshausen bis zur Mündung der Attel wurden die Korrekturmaßnahmen erst gegen 1900 fertig gestellt. Restarbeiten auf diesem Abschnitt erstreckten sich bis 1920.

Ausbau der Wasserkraft

Am bayerischen Inn begann der Ausbau der Wasserkraft mit der Planung des Ausleitungskraftwerks Töging im Jahr 1917. Die Anlage wurde 1922 fertig gestellt. Im Jahr 1938 folgten die Laufkraftwerke Wasserburg, Teufelsbruck und Gars. 1942 bzw. 1944 wurden am Unteren Inn die Anlagen Ering und Eggfling, gefolgt von Neuötting 1951, Braunau-Simbach 1953 und Stammham 1955 erreicht. Am Oberen Inn wurde 1960 das Kraftwerk Rosenheim fertig gestellt. In den Jahren 1961 und 1965 wurde die Kraftwerkskette am Unteren Inn mit den Anlagen Schärding-Neuhaus und Passau-Ingling geschlossen. Das Kraftwerk Feldkirchen wurde 1970 fertig gestellt, gefolgt von Perach, das 1977 ans Netz ging. Mit dem Bau der letzten beiden Kraftwerke Nußdorf

und Oberaudorf, die in den Jahren 1982 bzw. 1992 fertig gestellt wurden, war der Inn bis auf die Restwasserstrecke zwischen der Wehranlage Jettenbach und der Wiedereinleitung bei Töging durchgehend ausgebaut. Abbildung 6.12 zeigt den Verlauf des bayerischen Inn, die wichtigsten Zuflüsse mit ihren Einzugsgebieten sowie die Lage der einzelnen Kraftwerke. Ergänzend dazu beinhaltet Tab. 6.1 eine Zusammenstellung der Kraftwerke am bayerischen Inn.

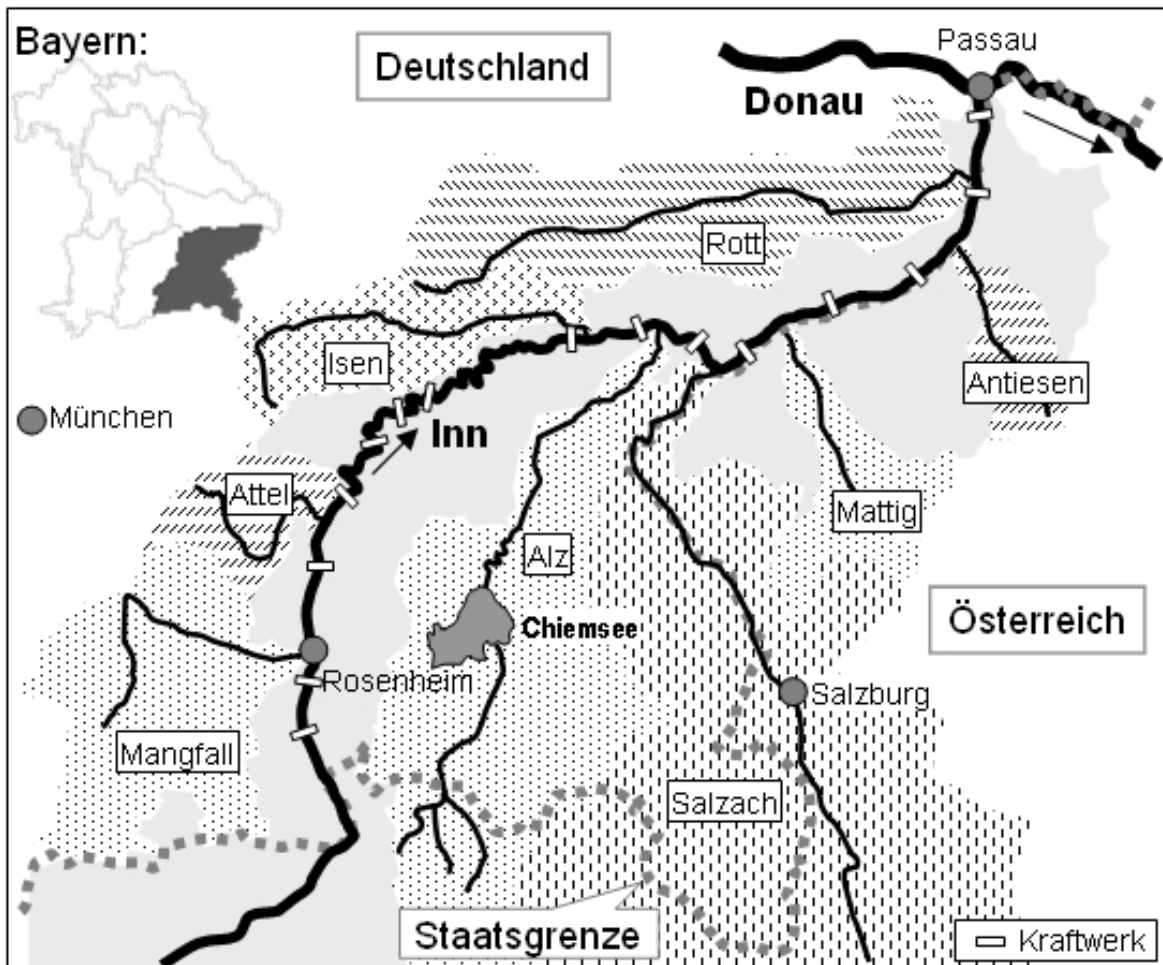


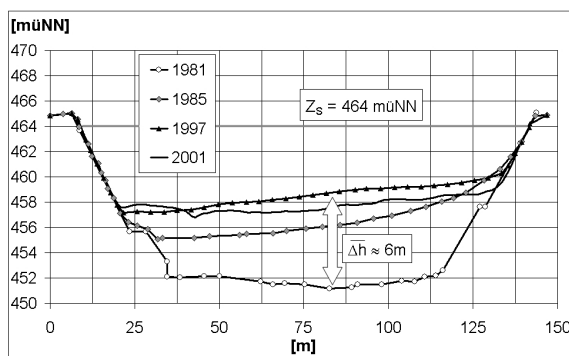
Abbildung 6.12: Einzugsgebiet des Inn, wichtigste Zuflüsse und Kraftwerke

6.2.1.3 Verlandungsproblematik am Inn

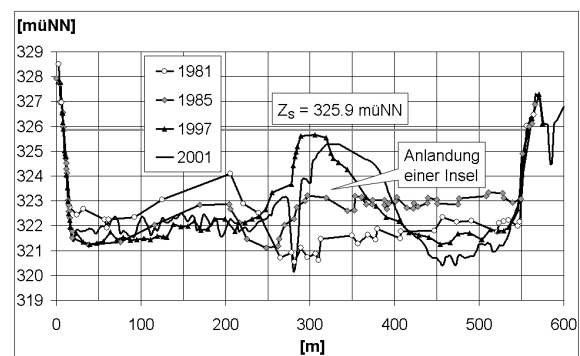
Durch die Errichtung von Staustufen kam es zu einer erheblichen Reduktion des Energieliniengefälles. Der Weitertransport von Sedimenten wurde dadurch unterbunden und große Mengen davon setzten sich in den Stauräumen ab (Abb. 6.13).

Kraftwerk	Fkm	Fertigstellung	KW-Typ	Fallhöhe
Oberaudorf	211,0	1992	Pfeilerkraftwerk	12,53 m
Nußdorf	198,7	1982	Pfeilerkraftwerk	11,65 m
Rosenheim	187,5	1960	Blockbauweise	8,85 m
Feldkirchen	173,1	1970	Blockbauweise	9,00 m
Wasserburg	159,9	1938	Blockbauweise	7,05 m
Teufelsbruck	147,2	1938	Blockbauweise	7,25 m
Gars	137,5	1938	Blockbauweise	7,35 m
Jettenbach	128,0	1922	Ausleitungsbauwerk	—
Neuötting	91,1	1951	Blockbauweise	6,80 m
Perach	83,0	1977	Pfeilerkraftwerk	5,35 m
Stammham	75,4	1955	Blockbauweise	5,65 m
Braunau-Simbach	61,1	1953	Blockbauweise	12,10 m
Ering	48,0	1942	Blockbauweise	9,65 m
Egglfing	35,3	1944	Blockbauweise	10,50 m
Schärding-Neuhaus	18,8	1961	Blockbauweise	11,16 m
Passau-Ingling	4,2	1965	Blockbauweise	10,41 m

Tabelle 6.1: Kraftwerke am bayerischen Inn [Innwerk, 1992]



(a) Fkm 199 (Stauraum Nußdorf)



(b) Fkm 36 (Stauraum Egglfing)

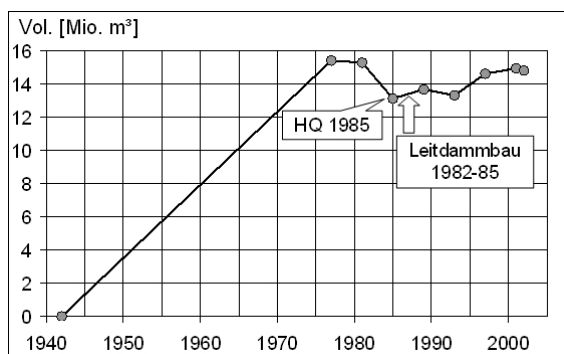
Abbildung 6.13: Zeitliche Entwicklung der Sohlhöhen in zwei Stauräumen am Inn

Im Stauraum von Nußdorf kam es zu einer Anhebung der mittleren Sohle um bis zu sechs Meter. Durch die Pfeilerbauweise⁴⁶ der Staustufe erfolgte die Sohlenänderung fast konstant über die gesamte Flussbreite (Abb. 6.13(a)).

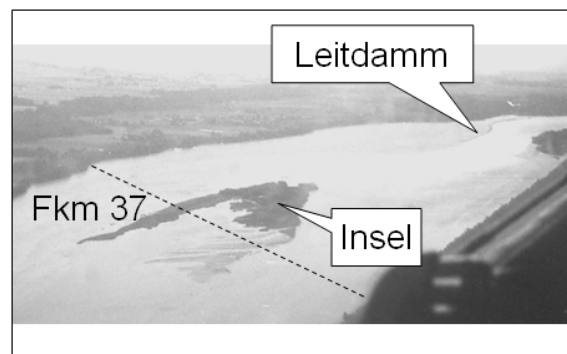
Wie durch das Beispiel Egglfing verdeutlicht wird, stellt sich die Situation am Unteren Inn ganz anders dar. Die Stauräume in diesem Bereich sind sehr breit, und aufgrund

⁴⁶Wehrfelder und Turbinen sind wechselweise über den Querschnitt angeordnet.

der hier angewendeten Blockbauweise⁴⁷ der Staustufen kam es zu sehr unregelmäßigen Anlandungen und Inselbildungen im Oberwasser der Bauwerke (Abb. 6.13(b)). Der Verlandungsprozess dauerte an den Staustufen zwischen der Salzachmündung und der Innmündung in die Donau insgesamt 30 Jahre – Anfang der 70-er Jahre erreichte der Fluss hier wieder ein morphologisches Gleichgewicht. Der Verlandungsgrad der Stauräume ist relativ hoch. Als Beispiel soll hierfür der Stauraum Egglfing genannt werden, der zu 57 % mit Sedimenten, vorwiegend schluffigen bis tonigen Schwebstoffen, gefüllt ist [Zauner, 2001]. Die fortschreitende Verlandung der breiten Stauräume konnte nur mit massiven Gegenmaßnahmen gestoppt werden. So wurden – zusätzlich zu lokal durchgeführten Baggerungen – in den Staubereichen von Braunau, Ering und Egglfing Leitdämme errichtet (Abb. 6.14). Diese Strukturen bewirken in Kombination mit ausreichend hohen Abflüssen – so genannten *Initialereignissen* – eine Konzentration der Strömung in Querschnittsmitteln, was zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten und somit zu einer verstärkten Mobilisierung der Ablagerungen führt. Zauner [2001] stellte fest, dass nach dem Erreichen des morphologischen Gleichgewichts zwar keine dringenden Bewirtschaftungsmaßnahmen mehr zu ergreifen sind, jedoch ein effizientes Monitoring äußerst wichtig ist, wenn man auch in Zukunft die Betriebssicherheit der Anlagen gewährleisten und Prognoserechnungen mit numerischen Modellen durchführen möchte.



(a) Verlandung des Stauraums Egglfing



(b) Luftbild des Stauraums bei HQ

Abbildung 6.14: Situation im Stauraum des Kraftwerks Egglfing

⁴⁷Über den Querschnitt werden ein Kraftwerksblock und ein Wehlfeldblock angeordnet.

Schon vor Jahrzehnten wurde erkannt, dass es notwendig ist, die Verringerung der Abflussquerschnitte in die Berechnungen der Staukurven miteinzubeziehen und die zu erwartenden neuen Gleichgewichtssohlen zu erfassen. Basierend auf Untersuchungen der bereits damals schon im Gleichgewicht befindlichen Stauräume Gars und Teufelsbruck wurde für die Schwebstoffanlandungen eine charakteristische Grenzscherre Spannung von $\tau_0 = 3 \text{ N/m}^2$ ermittelt, was am Oberen Inn einem Abfluss von etwa $700 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht [Ahammer, 1979a].

Die auf Basis der damals vorliegenden Erkenntnisse ermittelten Gleichgewichtssohlen wurden anfangs auch zur Berechnung der Wasserspiegelverläufe während der Bemessungshochwasser herangezogen. Die Untersuchung einiger abgelaufener Ereignisse zeigte aber bald, dass diese Annahme den realen Abflussbedingungen während Hochwasser nicht entsprach. So wurde beispielsweise während des Hochwassers im Sommer 1954 an der Staustufe Ering trotz des raschen Anstiegs der Wasserführung ein nur geringer Anstieg des Wasserspiegels beobachtet, der bei Verwendung der bekannten Gleichgewichtssohlen nicht nachvollzogen werden konnte. Es wurde versucht, anhand von aufgezeichneten Pegelwerten auf die Ausräumprozesse während Hochwasser zu schließen. Bald wurde die Frage nach der Berücksichtigung dieser Räumwirkung und der Einführung von so genannten Hochwassersohlen für die Wasserspiegellagenberechnung bei großen Hochwasserereignissen aufgeworfen. Dies erforderte die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Verlandungen. Ahammer [1979b] stellte fest, dass die Ver- und Entlandung von Stauräumen kein kontinuierlicher Prozess ist, sondern vom jeweiligen Verlandungsgrad der Staustufe, den zugeführten Sedimenten vom Oberlieger und den hydraulischen Randbedingungen während des Abflussereignisses abhängt. Er beobachtete, dass bei rasch ansteigenden Hochwasserwellen mit steilen Ästen die kürzere Zeitspanne der Sohlerosion durch einen intensiveren Räumungsvorgang kompensiert wird und kurze Hochwasserereignisse bei gleich hohem Scheitel zu einer stärkeren Ausräumung führen als lange, flache Hochwasserwellen.

Mit Hilfe hydromorphologischer Simulationsmodelle gelingt es zunehmend besser, die Vorgänge und Umbildungsprozesse in den Stauräumen am Inn nachzubilden und die zukünftige Entwicklung sowie die Vorgänge bei den maßgebenden Bemessungsszenarien zu prognostizieren. Wie jedoch bereits in Kap. 1.1 erwähnt, sind für die Kalibrierung und die Validierung derartiger Modelle umfangreiche und belastbare Naturmessdaten erforderlich. Die Verfasser mehrerer Gutachten zur Untersuchung der am Inn immer noch bestehenden Fragestellung nach der zeitlichen hydromorphologischen Entwicklung nennen daher das Fehlen von Naturmessdaten als größtes Problem bei der numerischen Simulation und empfehlen dringend die verstärkte Erfassung sämtlicher

sedimentologischer Parameter, wie beispielsweise Sohlenverläufe und Sohlenzusammensetzungen sowie Schwebstoffkonzentrationen und -zusammensetzungen.

6.2.1.4 Numerische Simulationen an der TUM

Im Rahmen einer Studie zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit des bayerischen Inn wurden am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München (TUM) numerische Simulationen durchgeführt. Zur Ermittlung der maximalen Kapazität der Fließquerschnitte wurde unter Verwendung vorhandener Peilprofile – aufgenommen bei Normalabflussverhältnissen – ein eindimensionales, hydraulisches Modell erstellt und anhand dokumentierter Abflüsse in der Größenordnung von MQ kalibriert. Die anschließende Simulation abgelaufener Hochwasserereignisse zeigte jedoch, dass die berechneten Wasserspiegelverläufe während der Scheitelabflüsse um bis zu mehrere Meter über den dokumentierten Wasserspiegelfixierungen lagen. Dies bestätigte die Aussagen verschiedener Untersuchungen (Ahammer [1979a], Ahammer [1979b]), dass die Innsohle während Hochwasserabflüssen erheblich ausgetragen wird. Es wurde ein Tool entwickelt, um den Sohlaustrag im Modell berücksichtigen zu können. Die Erosion wurde über die Länge eines Staurooms als linear zunehmend modelliert, mit dem Maximalwert im Nahbereich der Staustufe (Abb. 6.15). Im Querschnitt wurde die Sohle zwischen zwei Begrenzungspunkten konstant herabgesetzt. Mit Hilfe dieser Erweiterung konnte das numerische Modell anhand zwei dokumentierter Hochwasserereignisse erfolgreich kalibriert und validiert werden. In den einzelnen Stauräumen wurden Erosionen von bis zu mehreren Metern ermittelt. Der größte Austrag ergab sich im Oberwasser der Staustufe Nußdorf mit 4 m (Abb. 6.15).

Um den zeitlichen Verlauf des Sohlaustrags zu untersuchen, wurde für den Stauraum Feldkirchen eine instationäre Simulation der Hochwasserwelle von 1999 durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Wasserspiegellagen war hier von zwei Pegeln im Stauraum sehr gut dokumentiert worden. Nach der Kalibrierung der Modellrauheiten anhand von Mittelwasserabflüssen wurde das Hochwasserereignis ohne Berücksichtigung einer möglichen Sohlabenkung numerisch simuliert und die berechneten mit den gemessenen Wasserspiegellagen an den beiden Pegeln verglichen (Abb. 6.16).

Es ist deutlich zu sehen, dass zu Beginn der Simulationen die berechneten Wasserspiegel mit den gemessenen Werten gut übereinstimmen, die Modellrauheiten also ausreichend gut kalibriert wurden. Mit dem Anstieg der Hochwasserwelle steigen die

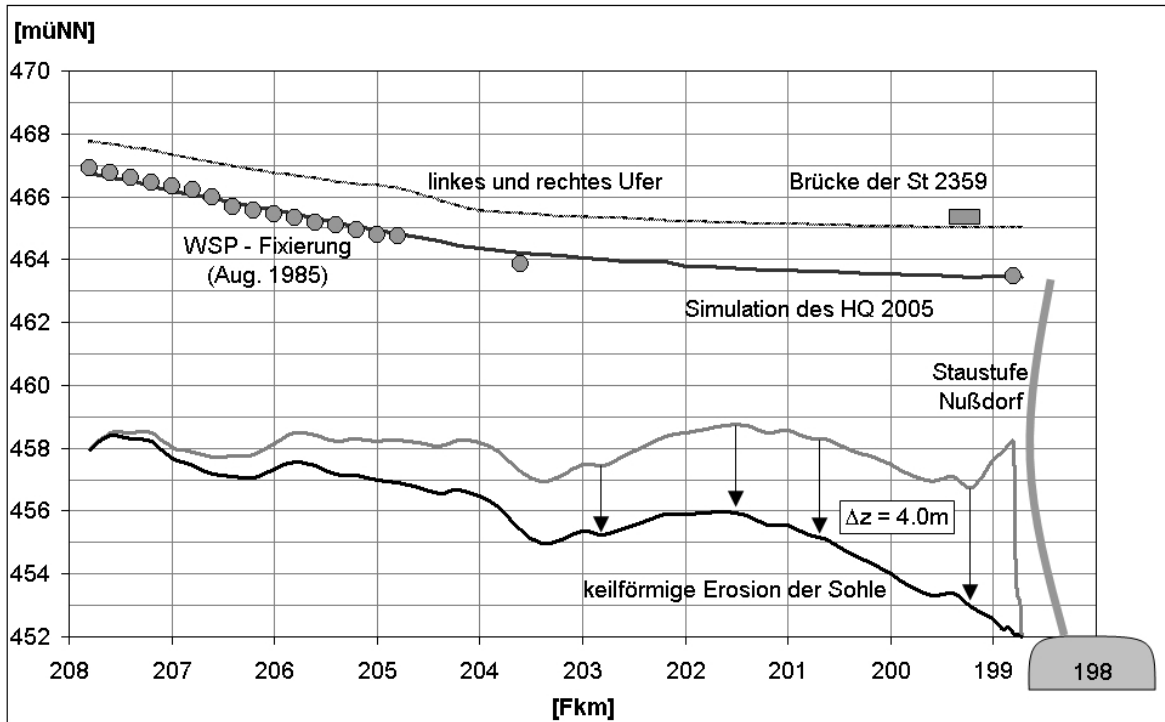


Abbildung 6.15: Keilförmiger Sohlaustrag im Stauraum der Staustufe Nußdorf

berechneten Wasserspiegel aber schneller an als die gemessenen. Die sich daraus ergebenden Differenzen entwickeln sich proportional zu den zeitlichen Veränderungen des Abflusses. Es ist auch erkennbar, dass die Unterschiede zwischen Messung und Berechnung mit zunehmender Entfernung von der Staustufe abnehmen. Interpretiert man die zu hoch berechneten Wasserspiegellagen als Resultat der vernachlässigten Sohlenerosion, so bestätigen die unterschiedlichen Differenzen an den beiden untersuchten Querschnitten die Annahme, dass die Erosion im Nahbereich der Staustufe am größten ist und nach oberstrom hin abnimmt.

Nicht berücksichtigt wurde bei dieser Simulation eine mögliche Veränderung der Sohlrauheiten. Doch selbst bei Berücksichtigung von wesentlich glatteren Berandungen während Hochwasser können die gemessenen Wasserspiegellagen ohne Absenkung der Sohlenlagen numerisch nicht abgebildet werden. Dies lässt den Schluss zu, dass es während Hochwasser zu einer Erosion der Anlandungen in den Staustufen am bayerischen Inn kommt. Der Sohlaustrag passiert ohne zeitlichen Versatz zum Anstieg der Hochwasserwelle. Geht der Abfluss wieder zurück, landet sich die Sohle wieder mit von oberstrom antransportierten Sedimenten an und nimmt wieder eine ähnliche Höhenlage wie vor dem Ereignis ein.

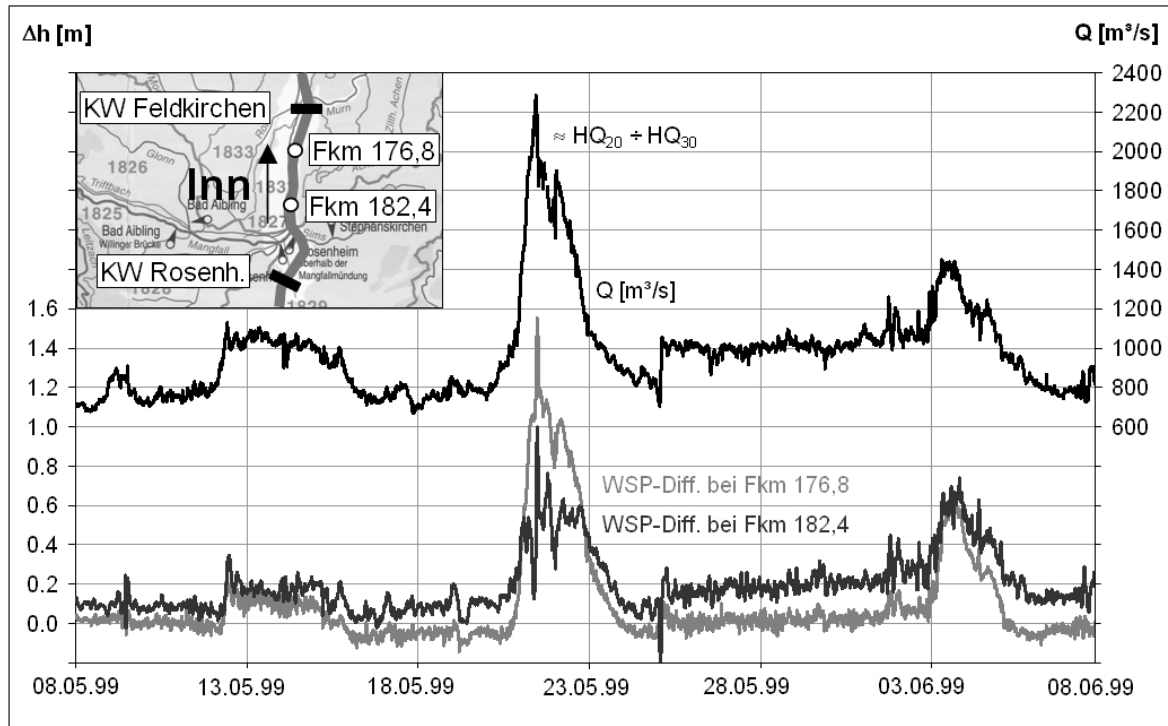


Abbildung 6.16: Zeitliche Entwicklung der Wasserspiegellagen an zwei Pegeln im Stauraum Feldkirchen während des Hochwassers 1999

6.2.2 Randbedingungen für die ADCP-Messungen

Die Ergebnisse der bereits vorgestellten Untersuchungen wurden unter anderem dazu verwendet, um eine möglichst günstige Stelle für die geplanten ADCP-Messungen am Inn zu bestimmen. Die Wahl fiel auf den Stauraum Nußdorf, für den im Vergleich mit den restlichen Innstaustrufen der höchste Sohlaustrag ermittelt worden war.

6.2.2.1 Situation im Messquerschnitt

Knapp 500 m oberhalb der Staustufe Nußdorf überquert die St 2359 bei Fkm 199.2 den Inn. Die Brücke führt nahezu rechtwinkelig über den Fluss. Das Bauwerk wird von zwei über die Breite gleichmäßig angeordneten Pfeilern getragen. Durch die Möglichkeit, den ADCP von der Brücke aus über den Fluss zu ziehen, eignet sich dieser Querschnitt gut für die geplanten Messungen. Wie Abb. 6.17 zeigt, weist der Inn in diesem Bereich bei Einhaltung des Stauziels eine Breite von 120 m und eine mittlere Fließtiefe von zirka 5 - 7 m auf. Im Sohlverlauf des trapezförmigen Querschnitts fünf Meter unterstrom des Brücke sind die Pfeilerkolke noch sehr gut zu erkennen, 20 m unterhalb des Bauwerks sind sie bereits verschwunden (Abb. 6.17).

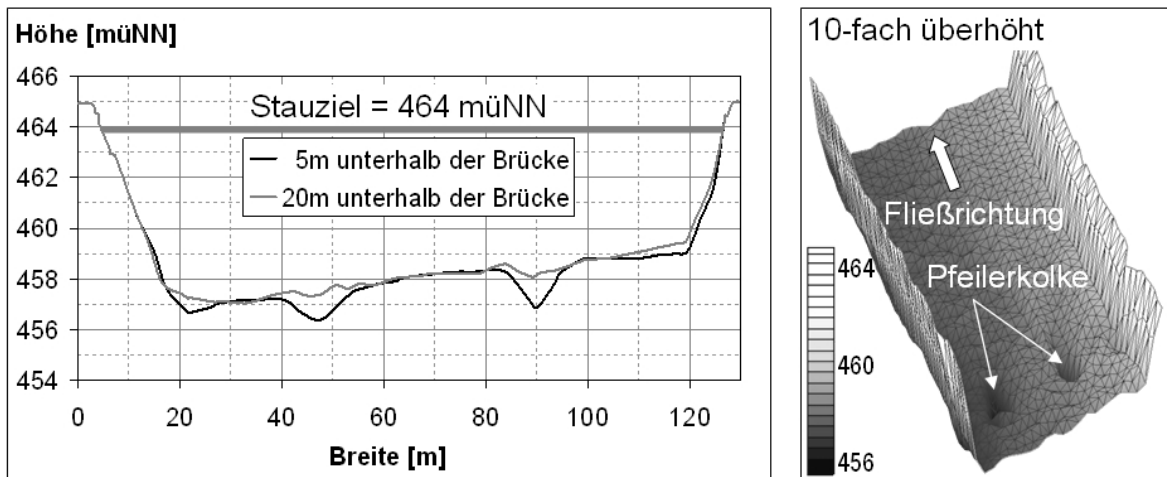


Abbildung 6.17: Messquerschnitt an der Nußdorfer Brücke am Inn

Zur Validierung der ADCP-Messungen konnte auf die angegebenen Durchflüsse an den Staustufen Oberaudorf (Fkm 211.3) und Nußdorf (Fkm 198.7) sowie auf die an den amtlichen Pegeln Oberaudorf (Fkm 211.0) und Rosenheim (Fkm 185.5) ermittelten Abflusswerte zurückgegriffen werden. Einzig nennenswerter Zufluss zwischen dem Kraftwerk bzw. dem Pegel Oberaudorf und der Messstelle ist der Euzenauer Bach, der bei Fkm 203.7 in den Inn mündet. Für dieses Gewässer wird ein MHQ von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben. Da dieser Abfluss innerhalb der Ungenauigkeit der zur Verfügung stehenden Abflusswerte am Inn liegt, können der Zufluss vernachlässigt und die angegebenen Werte des Kraftwerks und des Pegels Oberaudorf ohne weitere Anpassung für die Messstelle übernommen werden. Auch die Fließzeiten zwischen den beiden Stationen sind aufgrund der geringen Fließlänge von nur zwölf Kilometern vernachlässigbar. Zwischen dem Messquerschnitt und dem Pegel Rosenheim liegen 13.7 Fkm. Auf dieser Strecke münden der Steinbach (Fkm 198.5), der Kirchbach (Fkm 193.5) und die Rohrdorfer Achen (Fkm 186.0) in den Inn. Vergleicht man die Jährlichkeiten der beiden Pegel Oberaudorf und Rosenheim (Tab. 6.2), so ist erkennbar, dass die genannten Zuflüsse sowie die diffusen Einträge aus dem Zwischeneinzugsgebiet bei niedrigen bis mittleren Abflüssen zwar ihren Beitrag zum Abflussgeschehen am Inn leisten, während extremer Hochwasserereignisse ist ihr Einfluss jedoch vernachlässigbar. Das bedeutet, dass bei Hochwasser auch der Pegel Rosenheim zur Validierung der Abflussmessungen an der Nußdorfer Brücke herangezogen werden kann.

Vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) werden für die Pegel Oberaudorf und Rosenheim oberhalb der Mangfallmündung die in Tab. 6.2 zusammen gestellten Jährlichkeiten angegeben [LfU, 2008].

Pegel Oberaudorf			Pegel Rosenheim		
NQ	...	52 m ³ /s	NQ	...	79 m ³ /s
MQ	...	307 m ³ /s	MQ	...	316 m ³ /s
HQ ₂	...	1360 m ³ /s	HQ ₂	...	1400 m ³ /s
HQ ₅	...	1500 m ³ /s	HQ ₅	...	1540 m ³ /s
HQ ₁₀	...	1700 m ³ /s	HQ ₁₀	...	1750 m ³ /s
HQ ₁₀₀	...	2250 m ³ /s	HQ ₁₀₀	...	2300 m ³ /s

Tabelle 6.2: Jährlichkeiten an den Pegeln Oberaudorf und Rosenheim am Inn

Zusätzlich zur kontinuierlichen Aufzeichnung des Abflusses werden am Pegel Oberaudorf regelmäßige Probenentnahmen an der Wasseroberfläche zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentrationen durchgeführt. Für die hydrologischen Jahre 1981 - 2004 wurden am Landesamt für Umwelt (LfU) 6400 reguläre Einzelmessungen ausgewertet. Anhand dieser Daten wurde versucht, eine Beziehung zwischen dem Abfluss und den Schwebstoffkonzentrationen am Pegel Oberaudorf zu finden (Abb. 6.18). Aus der Darstellung ist zu sehen, dass mit keiner der erzeugten Trendlinien eine zufrieden stellende Übereinstimmung mit den Datensätzen erreicht werden konnte. Die potentielle Funktion weist zwar die beste Korrelation auf, die visuelle Überprüfung zeigt jedoch, dass mit dieser Trendlinie die Schwebstoffkonzentrationen bei höheren Abflüssen unterschätzt werden. Das bedeutet, dass vor allem während der für den Schwebstofftransport so wichtigen Hochwasserabflüsse die Konzentrationen nur sehr unzureichend abgebildet werden können.

Ergänzend zu den Einzelmessungen wurden seit 1985 insgesamt 23 Vielpunktmessungen in einem Abflussbereich von 340 - 980 m³/s durchgeführt. Der Vergleich der daraus berechneten mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt mit den Ergebnissen der dazugehörigen, direkt davor bzw. danach durchgeführten Einzelmessungen ergab, dass die aus den Vielpunktmessungen berechneten mittleren Konzentrationen um einen Faktor bis zu 1.25 größer sind als die Ergebnisse der Einzelmessungen. Die Größe der Differenz zwischen Einzelmessungen und mittleren Konzentrationen verhält sich dabei umgekehrt proportional zum Abfluss. Das bedeutet, dass bei kleineren Abflüssen die Schwebstoffkonzentrationen einen größeren Gradienten über die Fließtiefe aufweisen als bei großen Abflüssen. Dieses Phänomen lässt sich damit begründen, dass während großer Abflüsse die Turbulenzen in der Strömung wesentlich stärker ausgeprägt sind, was zu einer besseren Durchmischung der einzelnen Tiefenschichten und somit auch zu einer gleichmäßigeren Verteilung

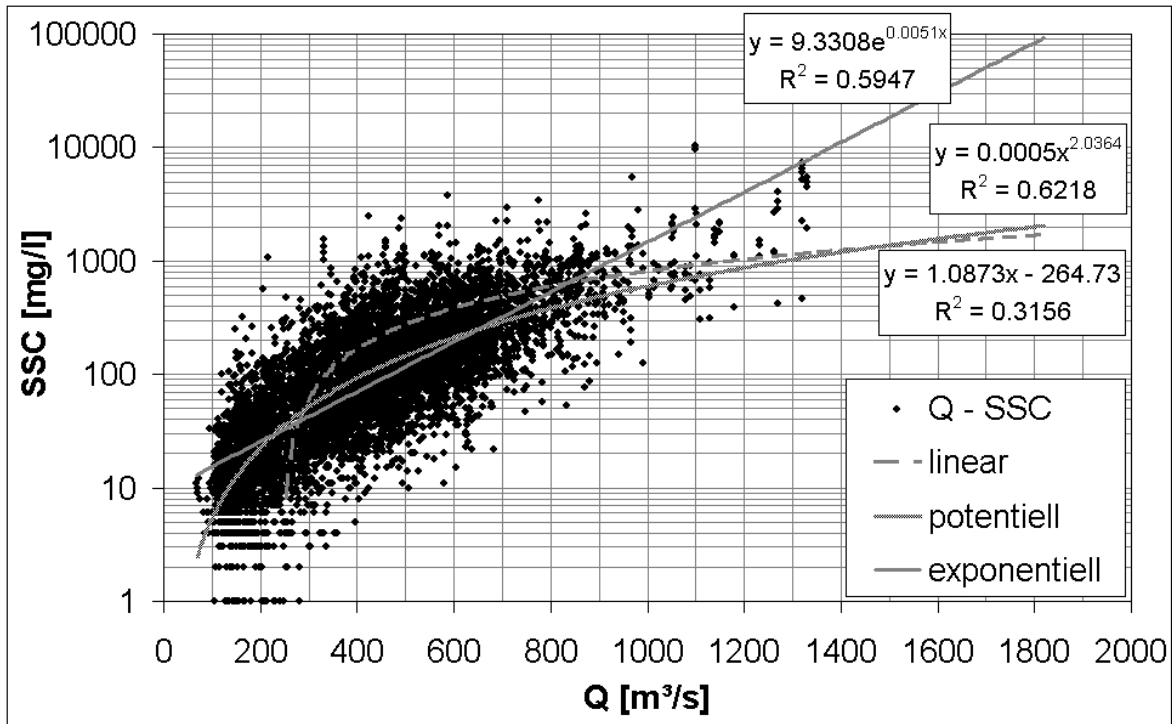


Abbildung 6.18: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Einpunkt-Schwebstoffkonzentrationen und dem Abfluss am Pegel Oberaudorf

der Schwebstoffe führt. Untersuchungen der Korngrößenverteilungen der Schwebstoffe wurden am Pegel Oberaudorf leider nur an Oberflächenproben durchgeführt. Die Auswertung von 31 Proben erbrachte, dass die Schwebstoffe eine Größe kleiner 0.2 mm aufweisen, der d_{50} liegt im Bereich von 0.01 - 0.03 mm.

Bis heute liegen keine fundierten Erkenntnisse über die Kornzusammensetzung der Schwebstoffe im Bereich des Pegels Oberaudorf vor. Die selten durchgeführten Vielpunktmessungen bieten eine nur sehr geringe Datenbasis zur Untersuchung der Konzentrationsverteilungen im Querschnitt. Aussagen über mögliche Korngrößengradienten der Schwebstoffe sind aufgrund fehlender Sieblinienauswertungen der Vielpunktmessungen auch nicht möglich. Die fehlenden Informationen stellen unter anderem ein großes Problem bei der numerischen Modellierung dar. Bei der Implementierung von morphologischen Prozessen in die Berechnung müssen eine Vielzahl von Daten – wie beispielsweise die Eingangsgrößen der Schwebstoffkonzentrationen sowie die Korngrößenverteilungen – aufgrund der fehlenden Messwerte anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Für niedrige bis mittlere Abflüsse gelingt dies zwar einigermaßen gut, es musste jedoch schon des öfteren festgestellt werden, dass die gewählten Näherungswerte vor allem bei Hochwasser massiv von den realen Bedingungen ab-

weichen. Erschwerend kommt hier noch dazu, dass die Beziehung zwischen Abfluss und Schwebstoffkonzentrationen zusätzlich durch Vorabsenkungen sowie Spülungen an den Oberliegerkraftwerken Langkampfen und Oberaudorf beeinflusst wird. Somit können die während Hochwasser auftretenden Schwebstoffkonzentrationen nur sehr schwer abgeschätzt und derartige Ereignisse mit hydromorphologischen Modellen nicht ausreichend genau nachgebildet werden. Der Versuch, das Hochwasser 2005 mit Hilfe eines eindimensionalen, instationären, hydromorphologischen Tools (HEC-RAS 4.0 Beta⁴⁸) nachzurechnen, bestätigte diese Einschätzung. Die starken Umbildungsprozesse während des Hochwassers im Stauraum Nußdorf konnten in keiner Weise nachgebildet werden.

6.2.2.2 Abflusssituation im Sommer 2005

Die Abflusssituation im Bereich zwischen Oberaudorf und Rosenheim für die Sommermonate 2005 ist in Abb. 6.19 dargestellt. Wie zu sehen ist, kam es in dieser Zeit zum Ablauf zweier Hochwasser. Für das Ereignis am 12. Juli wurde ein Wiederkehrintervall von fünf Jahren angegeben. Bei dem Ereignis Mitte August handelt es sich um das in vielen Teilen Bayerns schadbringende „Augusthochwasser '05“, das im Bereich der Messstelle die Größenordnung eines HQ₁₀₀ erreichte. In der Darstellung sind auch die am Pegel Oberaudorf ermittelten Schwebstoffkonzentrationen eingetragen. Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, sind diese Werte das Ergebnis der Auswertung von Einpunktprobenentnahmen an der Wasseroberfläche.

Wie Abb. 6.20 zeigt, wurde der Scheitelabfluss des Julihochwassers am 12. Juli 2005 gegen 02:00 nachts erreicht. Die an den Kraftwerken Oberaudorf und Nußdorf im Viertelstundentakt angegebenen Abflusswerte liegen zwischen dem 11.07.2005-12:00 und dem 12.07.2005-12:00 im Mittel um 11 % bzw. 140 m³/s auseinander. Der Euzenauer Bach führte in dieser Zeit bis zu 12.5 m³/s ab. Der Unterschied in den angegebenen Abflüssen der beiden Kraftwerken ist daher in den Ungenauigkeiten der Überfallberechnung an den Wehrfeldern zu suchen. In Abb. 6.20 ist zu erkennen, dass am Kraftwerk Oberaudorf der Oberwasserstand um bis zu vier Meter abgesenkt wurde, während das Stauziel am Kraftwerk Nußdorf nur um 1.5 m abgesenkt wurde. Es ist davon auszugehen, dass für eine derartige Absenkung, wie sie in Oberaudorf vorgenommen wurde, der verwendete Überfallbeiwert μ und damit auch der berechnete

⁴⁸HEC-RAS: *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*
1D-Programm des *US Army Corps of Engineers* (<http://www.hec.usace.army.mil>)

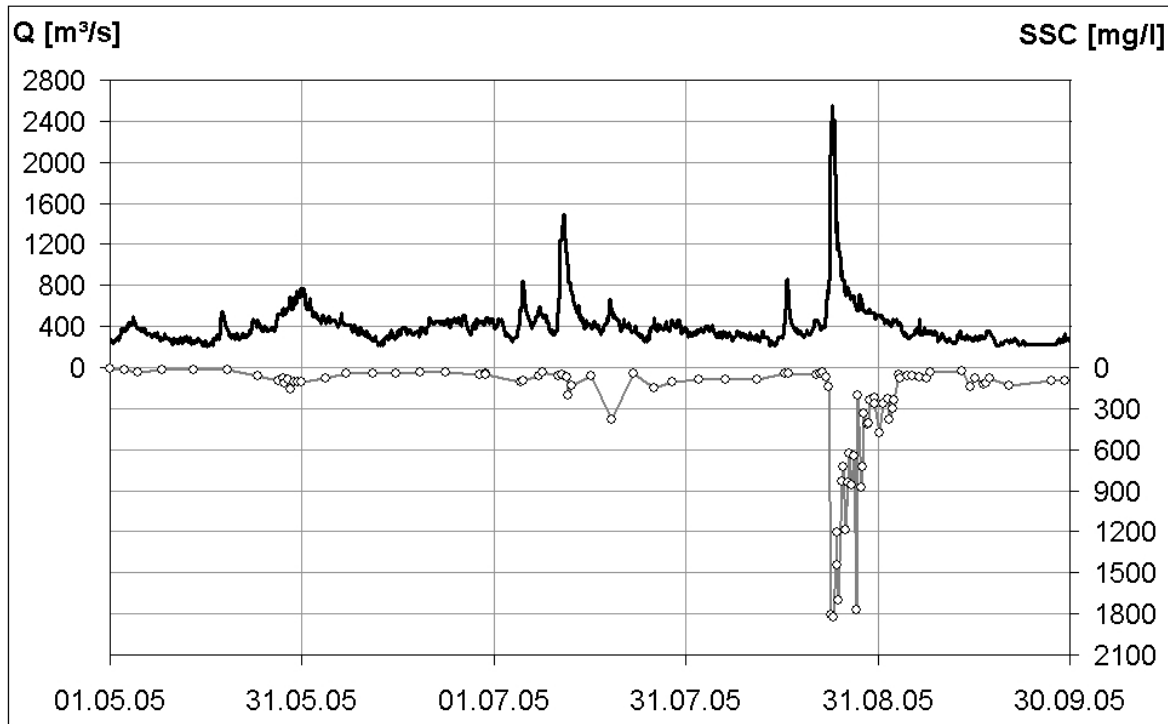


Abbildung 6.19: Abfluss im Sommer 2005
an der Staustufe Nußdorf bei Fkm 198.7

Durchfluss mit Unsicherheiten behaftet sind. In diesem Fall liefert das Kraftwerk Nußdorf die genaueren Abflusswerte. Die Abflussberechnung am Pegel Oberaudorf bei Fkm 211.0 brachte deutlich zu hohe Abflusswerte und wurde deshalb nicht in die Grafik aufgenommen.

Abbildung 6.21 zeigt den am Pegel Rosenheim und an den Kraftwerken Oberaudorf und Nußdorf erfassten Ablauf des Augusthochwassers am Inn. Am Kraftwerk Oberaudorf musste das Stauziel um bis zu sieben Meter abgesenkt werden. Für den Zeitraum des Hochwasserscheitels liegen hier keine Abflusswerte vor. Beim Vergleich des angegebenen Abflusses am Kraftwerk Nußdorf mit dem Abfluss am Pegel Rosenheim ist zu berücksichtigen, dass auch hier das Stauziel um bis zu 2.5 m abgesenkt wurde. Durch die Beeinflussung des Oberwasserstands wurde während des ansteigenden Astes der Hochwasserwelle der Abfluss über die Wehre erhöht und ist deshalb nicht mehr direkt mit den Pegelwerten vergleichbar. Am Pegel Oberaudorf führte die Berechnung des Abflusses anhand der gemessenen Wasserstände aufgrund massiver Umlagerungen im Pegelquerschnitt zu einer erheblichen Überschätzung der Ergebnisse, während des Scheiteldurchgangs der Hochwasserwelle fiel der Pegel vollständig

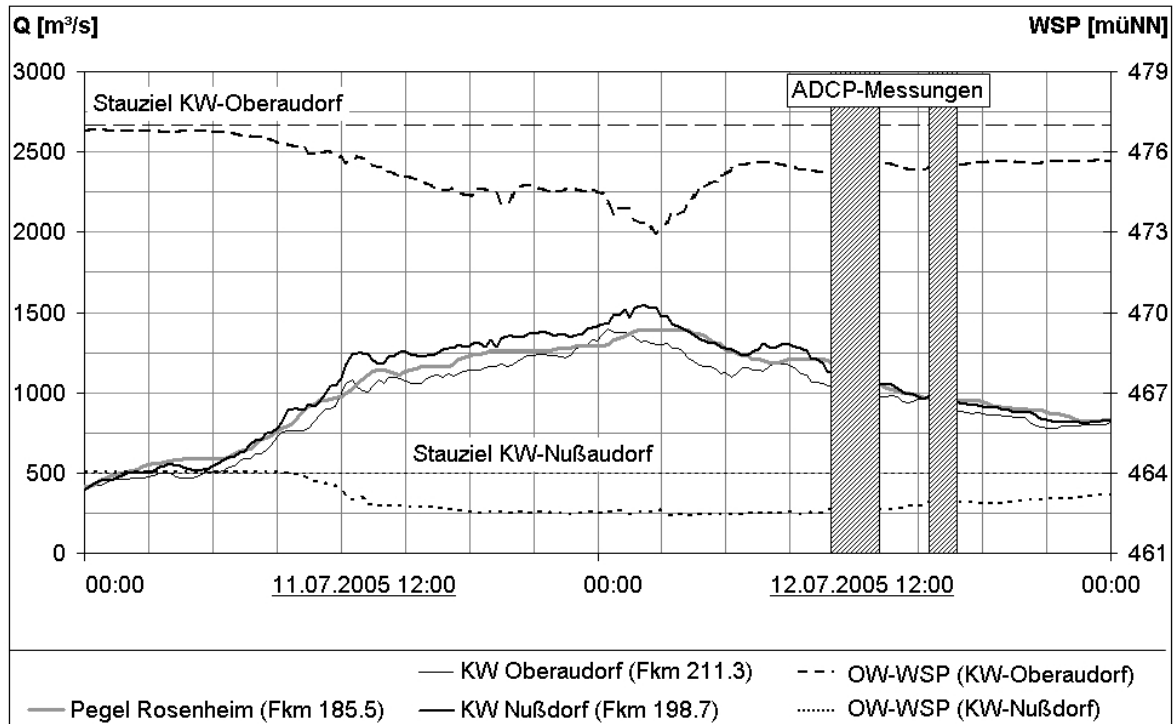


Abbildung 6.20: Zeitpunkt der ADCP-Messungen während des Hochwassers im Juli 2005

aus. Da die Aufzeichnungen am Pegel Oberaudorf für die folgenden Untersuchungen nicht verwendbar sind, wurden sie in Abb. 6.21 nicht aufgenommen.

Der Scheitelabfluss des Hochwassers wurde an der Messstelle in der Nacht vom 23. auf den 24. August erreicht und lag in der Größenordnung von knapp $2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Beide Hochwasserereignisse konnten mit Hilfe von ADCP-Messungen während des absteigenden Astes der Welle dokumentiert werden. Die dabei verwendeten Messgeräte, die Vorgehensweise bei der Durchführung der Messungen, aufgetretene Probleme, die Auswertung der Messungen sowie die daraus resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Folgenden dargelegt.

6.2.3 Messinstrumentierung

Für die Messungen an der Nußdorfer Brücke wurde ein ADCP vom Typ *Workhorse RioGrande* der Firma RDI mit einer Frequenz von 1200 kHz verwendet. Die Messungen wurden unter Leitung der TUM vom Ingenieurbüro Schmid durchgeführt, die Rohdaten wurden der TUM zur Auswertung und Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Der ADCP war auf einem Katamaran aus Aluminium befestigt. Ebenfalls auf

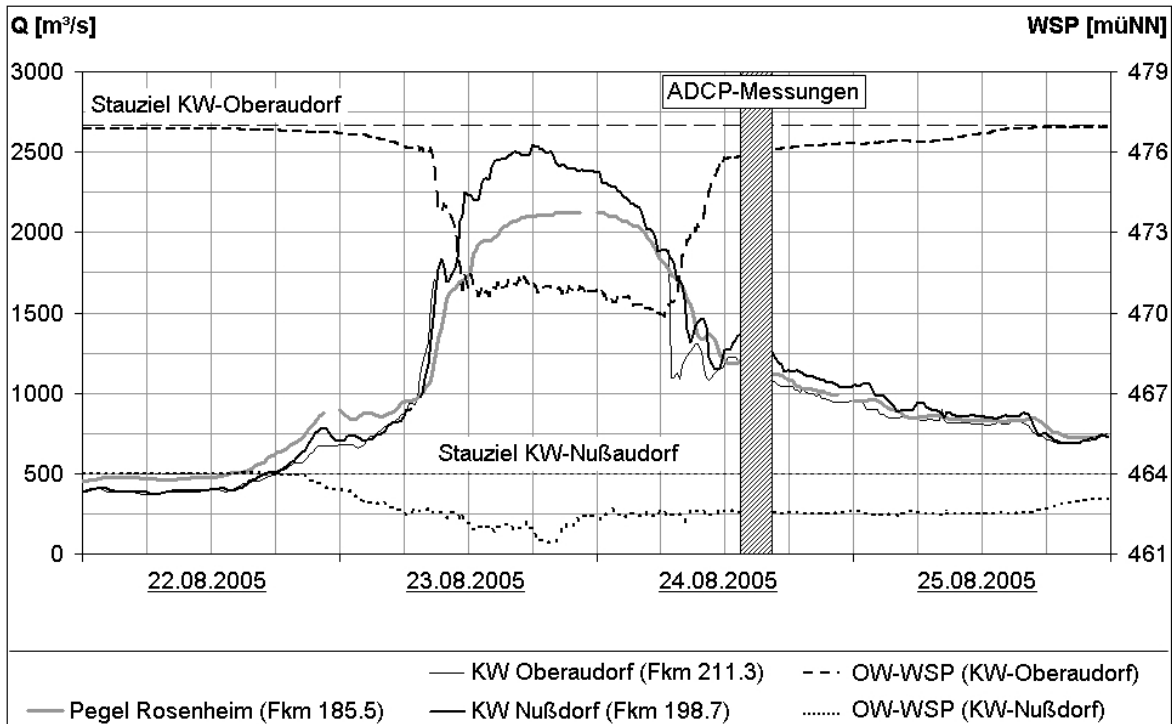


Abbildung 6.21: Zeitpunkt der ADCP-Messungen während des Hochwassers im August 2005

dem Boot befanden sich eine GPS-Antenne zur Erfassung des Messpfads und der Messlaptop (Abb. 6.22). Eine zweite, stationäre GPS-Antenne am Ufer diente als Referenzstation (Kap. 4.2.3.3). Die GPS-Daten wurden während der Messungen separat abgespeichert und im Zuge der Datenauswertung in den ASCII-Dateien ergänzt.

6.2.4 Durchführung der ADCP-Messungen

Wie in Abb. 6.20 und Abb. 6.21 zu sehen ist, erreichten beide Hochwasserwellen in der Nacht ihre Scheitelabflüsse. Aus Sicherheitsgründen konnten deshalb die Maximalabflüsse nicht erfasst werden.

Messbedingungen

Im Juli wurden während des ablaufenden Astes der Hochwasserwelle zwei ADCP-Messungen mit jeweils mehreren Überfahrten durchgeführt (Abb. 6.20). Auch im August konnten erst während des absteigenden Astes der Hochwasserwelle ADCP-Messungen durchgeführt werden. Der Zeitpunkt der Messfahrten ist in Abb. 6.21

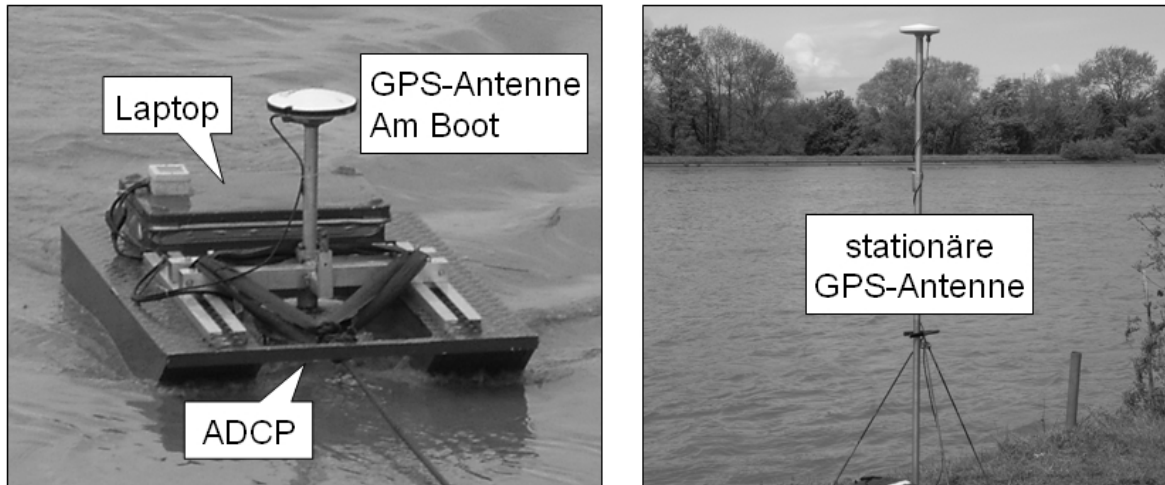


Abbildung 6.22: ADCP-Trägerboot mit GPS-Antenne, GPS-Referenzstation am Ufer

eingetragen. Während der Messeinsätze im Juli und August stellte die Abflusssituation im Messquerschnitt eine große Herausforderung für das durchführende Personal dar. Das Trägerboot inklusive aller an Bord befindlichen Instrumente wurde durch große Mengen an Treibgut gefährdet, die der Inn mobilisiert hatte. Die im Querschnitt vorhandenen Oberflächengeschwindigkeiten von 3 m/s und mehr erforderten eine Zugkraft von bis zu 80 kg, um das Trägerboot in der Strömung zu halten. Auch die durch die Brückenpfeiler verursachten stehenden Wellen, die sich v-förmig ins Unterwasser ausbreiteten, erschwerten die Durchführung der Messungen erheblich. Auf die erfassten Messwerte hatten die Brückenpfeiler ebenfalls einen negativen Einfluss. Durch die verstärkten Turbulenzen und den erhöhten Lufteintrag kam es vermehrt zu Fehlensembles und Lücken in der Datenerfassung. Als weiterer Faktor, der die Messungen ungünstig beeinflusste, muss die strömungsungünstige Form des ADCP-Trägerbootes selbst genannt werden. Durch den hohen Strömungswiderstand wurde das Ziehen des Bootes über den Querschnitt erschwert, außerdem wurden durch die Turbulenzen am Bootsbug große Mengen an Luftbläschen unter den ADCP transportiert. Diese führten ebenfalls zu einer Verringerung der Menge an erfassten Messwerten. Auch die hohen Schwebstoffkonzentrationen führten vor allem während der Messung im August dazu, dass die Messsignale des ADCP nicht die gesamte Wassersäule durchdringen konnten und streckenweise keine Reflexionen aus den größeren Tiefenschichten empfangen werden konnten.

Geräteeinstellungen

Die Geräteeinstellungen des ADCP wurden zwischen den einzelnen Fahrten der beiden Messeinsätze nicht verändert. Die Messungen während des Julihochwassers wurden mit folgender Konfiguration durchgeführt.

WM1, WP1, BM5, BP1, TP000009, WS20, WN50, WF10, WV170

Die Querungen während des Hochwasserereignisses im August fanden mit folgender Gerätekonfiguration statt.

WM1, WP4, BM5, BP5, TP000001, WS20, WN50, WF05, WV370

Bei allen Überfahrten waren GPS-Antennen im Einsatz, um den zurückgelegten Weg des ADCP-Trägerbootes unabhängig vom geräteinternen *Bottom Track* aufzuzeichnen. Die aufgezeichneten Messpfade sind in Abb. 6.23 und Abb. 6.24 dargestellt. Wie zu erkennen ist, decken die Überfahrten vom 12. Juli einen Bereich von knapp 35 m unterhalb der Brücke ab. Grund dafür war der Wunsch, die Ausdehnung der Pfeilerkolke in Richtung unterstrom zu erfassen. Die sechs Überfahrten am 24. August wurden aufgrund der schwierigen Messbedingungen relativ knapp unterstrom der Brücke durchgeführt. Der ADCP wurde in einem Abstand von maximal sieben Metern zur Brücke über den Fluss gezogen.

Referenz BT versus Referenz GPS

Wie der Vergleich der erfassten dGPS-Lagedaten mit den Brückenkoordinaten deutlich macht, weisen die Messwerte eine durchaus zufrieden stellende Genauigkeit auf. Die vom ADCP anhand der Kompass- und der *Bottom Track*-Daten ermittelten Messpfade zeigen ein vollkommen anderes Bild. Die mit Referenz BT (Kap. 5.1.1) berechnete ADCP-Bewegung weist einen erheblichen Längsversatz auf (Abb. 6.32). Grund dafür sind die Sedimentbewegungen im Sohlbereich, die vom ADCP – wie bereits in Kap. 4.2.3.3 beschrieben – als Eigenbewegung flussaufwärts interpretiert werden.

Aber nicht nur die Qualität der Messwerte, auch die Quantität der Daten wird je nach verwendeter Referenzierung durch die Messbedingungen beeinträchtigt. Betrachtet man Abb. 6.25, so ist der Unterschied in der Messwertdichte klar erkennbar. Mit

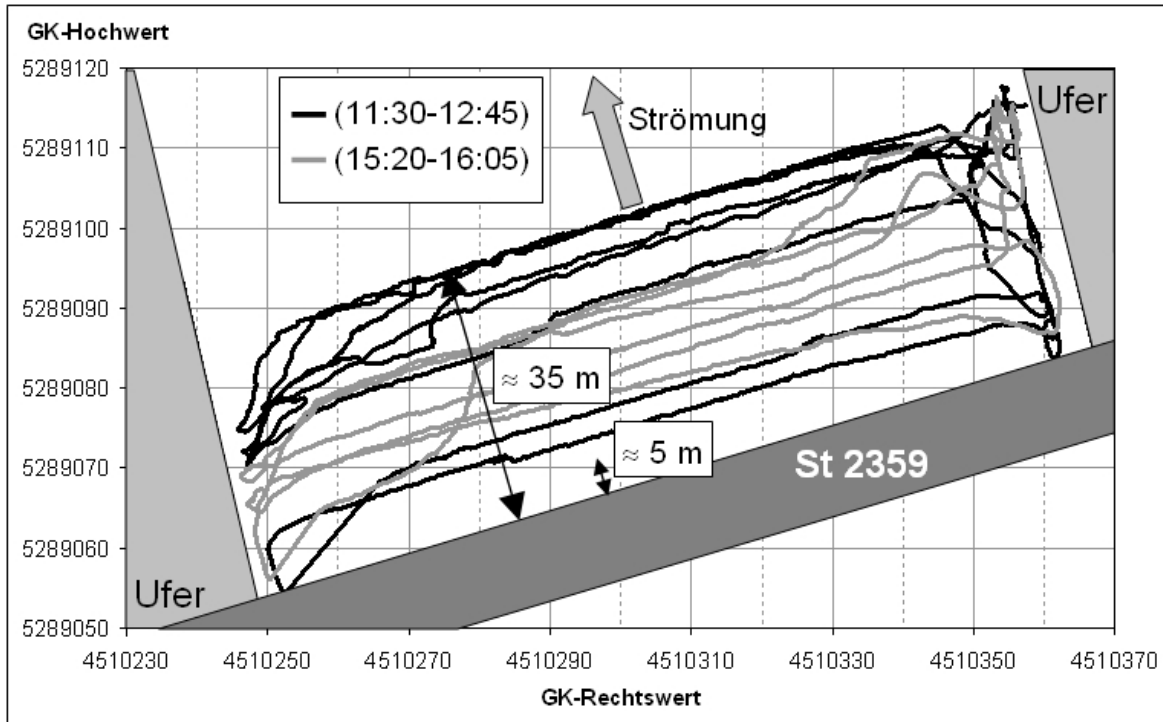


Abbildung 6.23: GPS-Spur der Messfahrten an der Nußdorfer Brücke am Inn (Hochwassermessung am 12. Juli 2005)

Referenz BT werden weit weniger Messensembles angezeigt, als mit Referenz NO-NE⁴⁹. Der Grund dafür liegt in den fehlenden Informationen über die Bootsgeschwindigkeiten. Der ADCP ist zwar in der Lage, in vielen Messensembles die jeweiligen Sohlenhöhen zu erfassen, kann aber streckenweise keine Bootsbewegung über Grund berechnen. Sind diese Daten nicht vorhanden, kann die Software aus den erfassten Relativgeschwindigkeiten keine Absolutgeschwindigkeiten berechnen und die Messzellen in den betroffenen Ensembles bleiben bei Referenz BT leer.

Dieses Phänomen wurde während beider Messeinsätze im Juli und im August beobachtet. Aufgrund der vielen Fehlensembles bei Referenz BT und der starken Verfälschung der erfassten Daten durch den Geschiebetrieb im Querschnitt konnten ohne Berücksichtigung der dGPS-Werte keinerlei verwertbare Informationen über die Situation im Querschnitt gewonnen werden.

⁴⁹Die Auswertesoftware geht davon aus, dass sich das Messgerät selbst in Ruhe befindet. Die erfassten Relativgeschwindigkeiten werden deshalb ohne weitere Umrechnung bzw. Referenzierung abgespeichert.

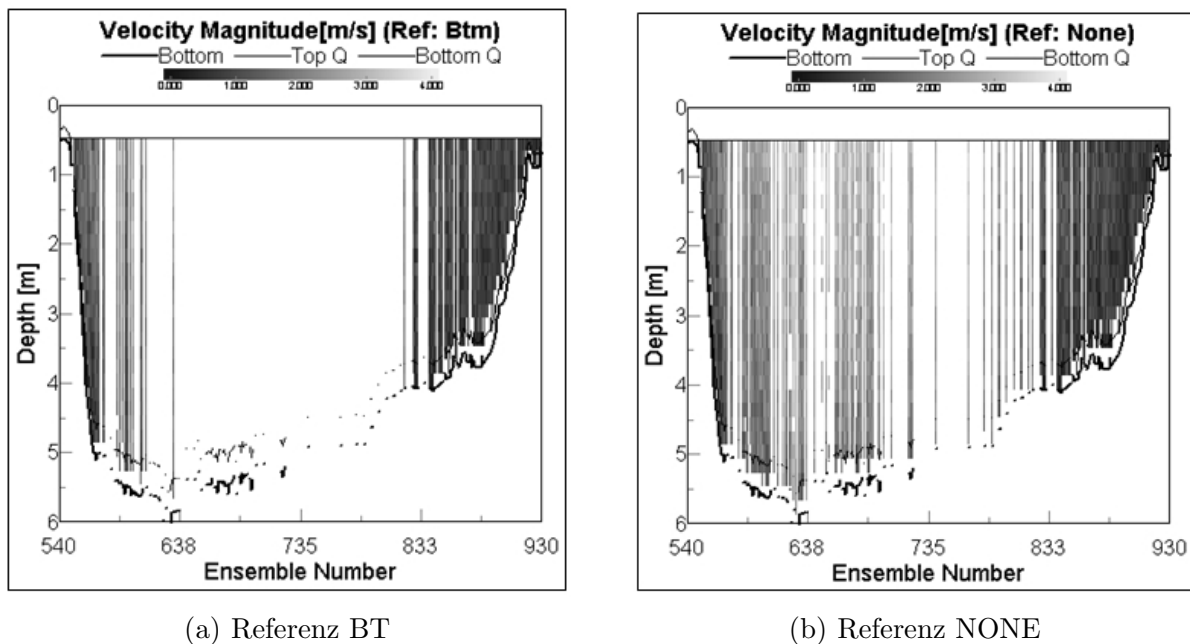


Abbildung 6.25: *WinRiver*-Darstellung der erfassten Geschwindigkeitswerte während einer ADCP-Messfahrt bei Hochwasser

mit den Angaben der Kraftwerke Nußdorf und Oberaudorf auf, es liegen jedoch von dieser Fahrt zu wenige Messwerte vor. Der Großteil der Geschwindigkeitsdaten musste interpoliert werden und der so ermittelte Geschwindigkeitsverlauf über die Querschnittsbreite weicht erheblich von den realen Verhältnissen ab. Aus diesem Grund wurde auch diese Fahrt nicht in der weiteren Auswertung berücksichtigt. Bei den restlichen sechs Einzelmessungen konnte eine ausreichende Anzahl von Messwerten erfasst werden und die aufgezeichneten Daten fanden Eingang in die Mittelwertbildung. Die sechs Überfahrten des zweiten Messblocks weisen aufgrund des zurückgegangenen Abflusses und der verminderten Strömungsturbulenzen eine wesentlich höhere Datendichte sowie eine geringere Streuung auf und konnten alle für die Auswertung herangezogen werden.

Während die Auswertung der ADCP-Daten mit Referenz GPS durchaus zufriedenstellende Ergebnisse erbrachte, war die Auswertung ohne externe Lageaufzeichnung nicht zielführend (Abb. 6.26). Die aus den BT-referenzierten Daten ermittelten Abflüsse sind um fast 50 % zu niedrig, während die mit Referenz GPS ermittelten Abflüsse eine gute Übereinstimmung mit den an den Kraftwerken berechneten Durchflüssen aufweisen. Die aus den Einzelfahrten gebildeten Mittelwerte weichen um weniger als 5 % von den Vergleichswerten an den Kraftwerken ab. Während der ersten ADCP-Messung lag der Abfluss bei fast $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ und sank bis zur zweiten Messung auf

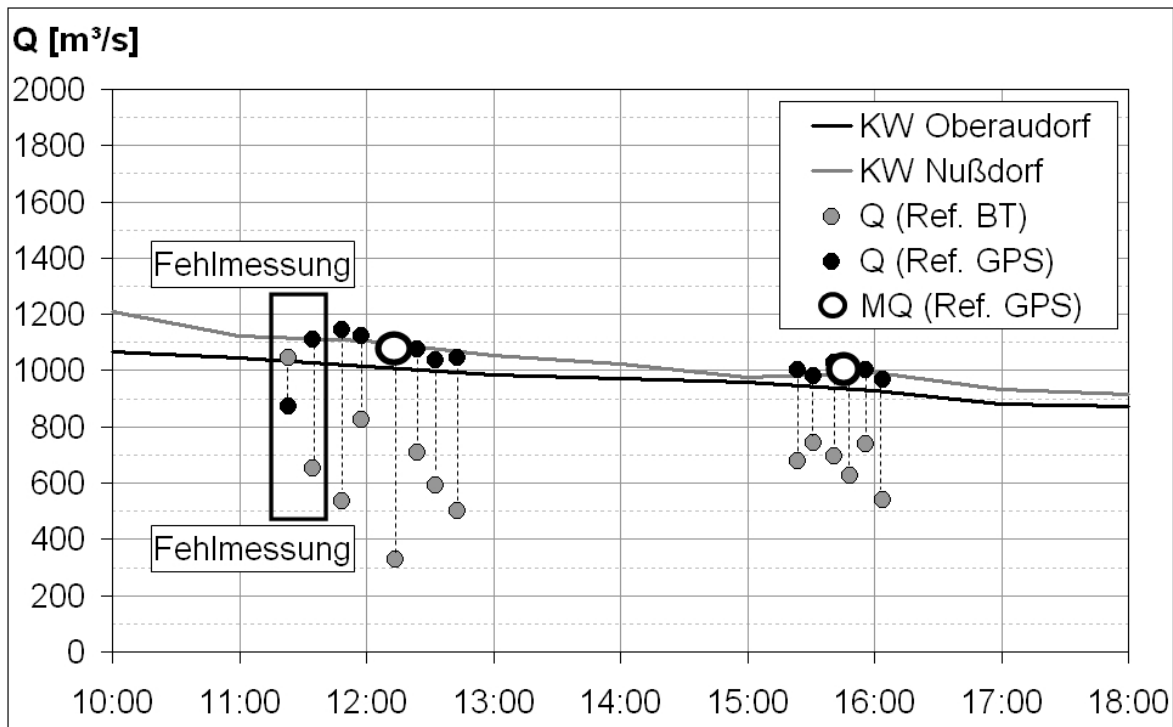


Abbildung 6.26: Abflussergebnisse der ADCP-Messungen im Vergleich mit Pegel- und Kraftwerksdaten (ADCP-Messung am 12. Juli 2005)

ungefähr $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ab. Das Stauziel am Kraftwerk Nußdorf war anfangs um 1.35 m abgesenkt, der Wasserspiegel lag bei 462.6 müNN . Bis zur zweiten Messung wurde das Stauziel wieder um 30 cm angehoben und der Wasserspiegel lag bei 462.9 müNN . Dies führte zu einem Anstieg der Wasserspiegelbreite im Messquerschnitt von 120 m auf 121 m sowie zu einer größeren Fließtiefe von 4.8 m im Vergleich zu 4.6 m während der ersten Messung.

Abbildung 6.27 zeigt die Darstellung der aus den Einzelfahrten gemittelten Fließgeschwindigkeitsverteilungen sowie der gemittelten Sohlenverläufe mit Referenz BT und mit Referenz GPS. In dieser Darstellung wird der Grund für die zu niedrig ermittelten Abflüsse mit Referenz BT klar. Bei Referenzierung der ADCP-Daten auf das *Bottom Track*-Signal werden einerseits die Querschnittsbreite und andererseits die Fließgeschwindigkeiten unterschätzt. Während bei Referenz GPS die aus den ersten sechs Querungen berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt bei $v_{m,GPS1} = 1.97 \text{ m/s}$ liegt, wird mit Referenz BT ein Wert von $v_{m,BT1} = 1.29 \text{ m/s}$ erhalten. Bei der mittleren Fließgeschwindigkeit des zweiten Messblocks verhält es sich ähnlich. Mit Referenz GPS wird eine mittlere Fließgeschwindigkeit von $v_{m,GPS2} = 1.73 \text{ m/s}$ berechnet, mit Referenz BT hingegen erhält man einen Mittelwert von $v_{m,BT2} = 1.25 \text{ m/s}$.

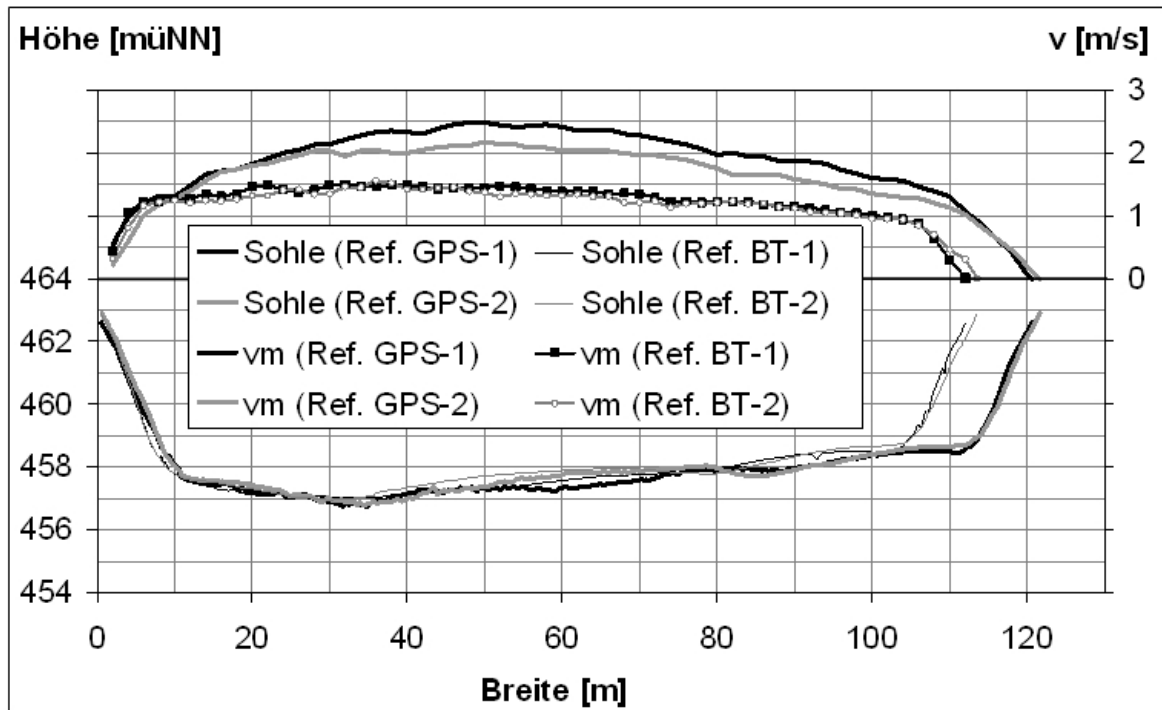


Abbildung 6.27: Darstellung der gemittelten Geschwindigkeitsverteilungen und der gemittelten Sohlenverläufe mit Referenz BT und GPS (ADCP-Messung am 12. Juli 2005)

Während des Hochwassers im August wurden sieben Querfahrten durchgeführt. Die erste Überfahrt wurde erheblich durch Turbulenzen und stehende Wellen an der Wasseroberfläche erschwert. Aufgrund der widrigen Umstände zeichnete der ADCP nur im unmittelbaren Uferbereich Daten auf (Abb. 6.28). Im Zentralbereich des Fließquerschnitts konnten weder Informationen über die Fließgeschwindigkeiten, noch über die jeweiligen Höhenlagen der Sohle erfasst werden. Es wird vermutet, dass die hohen Schwebstoffkonzentrationen und das zum Teil durch die Brückenpfeiler erzeugte turbulente Strömungsmuster der Grund für das Scheitern dieser Messfahrt waren. Da keinerlei Informationen über die Fließgeschwindigkeiten in Querschnittsmitte vorlagen, wurde der Gesamtabfluss trotz Interpolation der Fehlbereiche erheblich unterschätzt. Es wurde beschlossen, weitere Querungen zu einem späteren Zeitpunkt bei besseren Messbedingungen zu versuchen.

In weiterer Folge wurden noch sechs Messfahrten während des Hochwasserereignisses durchgeführt, die alle für die Mittelwertbildung herangezogen werden konnten (Abb. 6.29). Durch die Auswertung der ADCP-Daten mit Referenz GPS und die Mittelung der sechs Überfahrtsergebnisse gelang es, ausreichend genaue Informationen über die Situation im Messquerschnitt zu erhalten. Auch bei diesem Messeinsatz

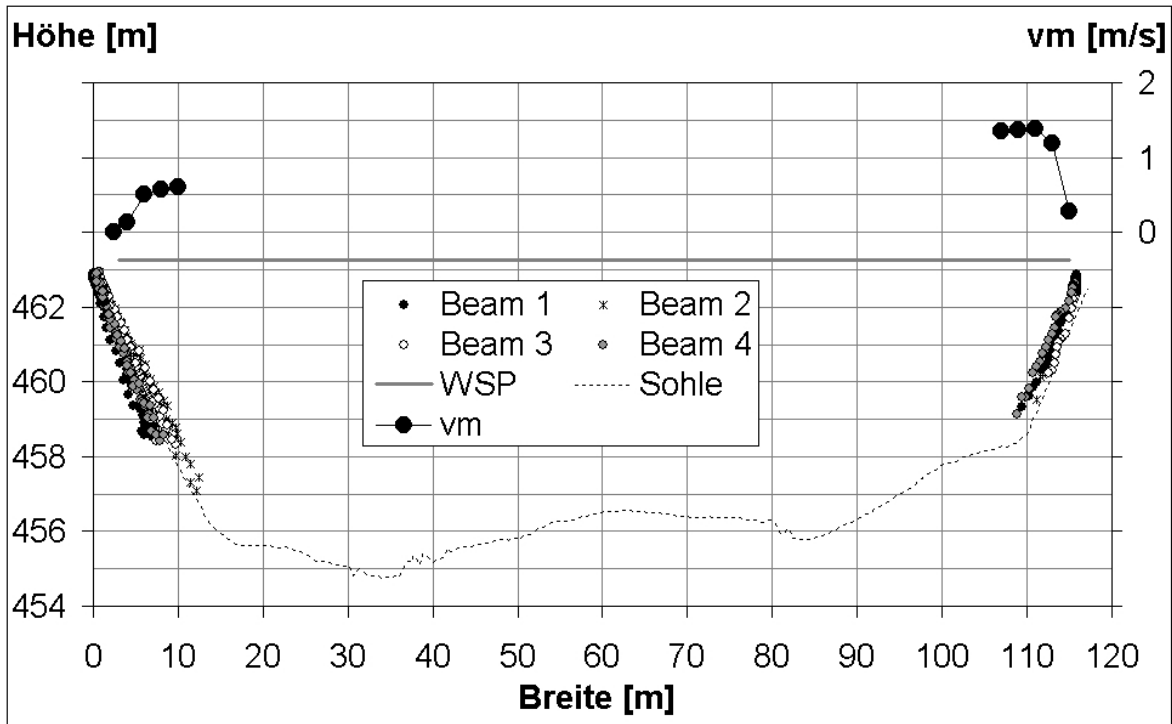


Abbildung 6.28: Ergebnisse der ersten Messfahrt am 24. August 2005

war die Auswertung der ADCP-Daten ohne Berücksichtigung externer Lageaufzeichnungen nicht zielführend. Die unter Verwendung der BT-Daten ermittelten Abflüsse weisen einen enormen Streubereich zwischen $180 - 1400 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Die mit Referenz GPS ermittelten Abflüsse hingegen weichen von ihrem Mittelwert um maximal 12,5 % ab, wobei in diesem Zusammenhang auch der während der Messung sinkende Abfluss zu berücksichtigen ist (Abb. 6.29). Auch die Abflussangaben an den Kraftwerken stimmen nicht genau überein. Der Grund dafür liegt in der prinzipiellen Schwierigkeit der Abflussberechnung bei derartigen Extremsituationen, wie sie während des Hochwasserereignisses geherrscht haben. Am Kraftwerk Oberaudorf konnte der Abfluss zeitweise gar nicht ermittelt werden, am Kraftwerk Nußdorf wirkte sich die starke Absenkung des Stauziels negativ auf die Abflussermittlung aus. Deshalb ist in Abb. 6.29 zusätzlich der Abfluss am Kraftwerk Rosenheim angegeben, um die Abflusssituation besser darstellen zu können. Unter den soeben beschriebenen Umständen kann die Genauigkeit der aus den ADCP-Daten ermittelten Informationen als durchaus zufrieden stellend bezeichnet werden. Der aus den ADCP-Daten berechnete Abfluss sank im Laufe der Messung von $1320 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, der Mittelwert lag bei $1170 \text{ m}^3/\text{s}$.

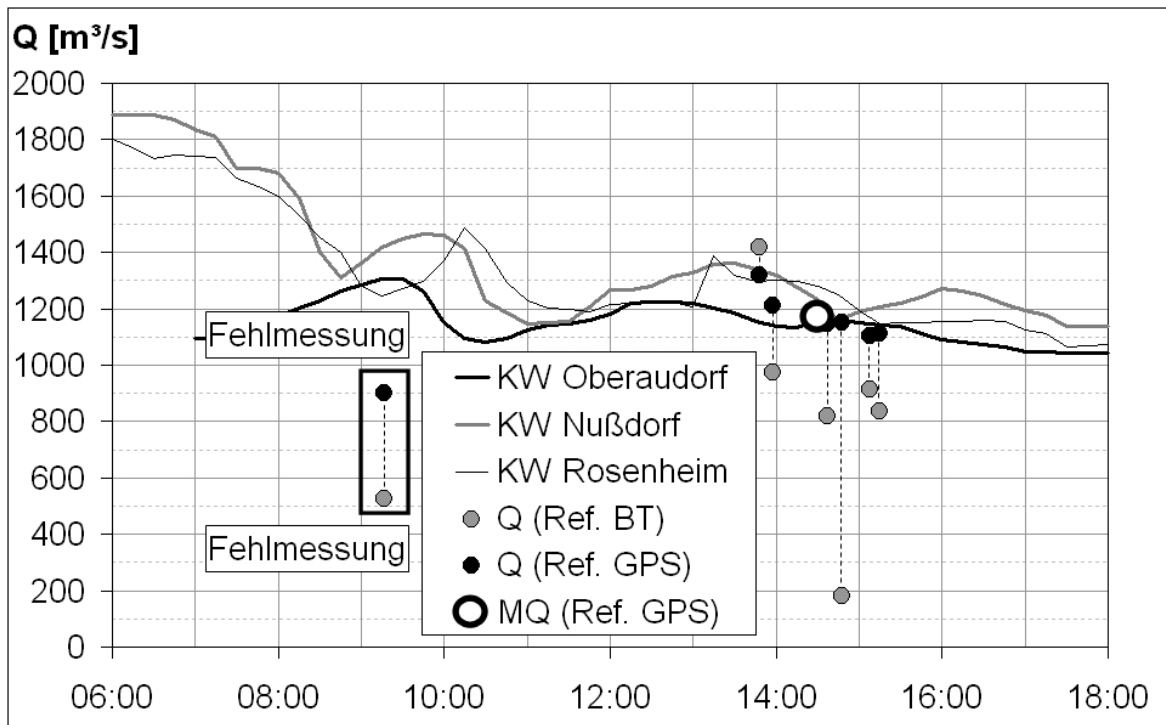


Abbildung 6.29: Abflussergebnisse der ADCP-Messungen im Vergleich mit Pegel- und Kraftwerksdaten (ADCP-Messung am 24. August 2005)

Abbildung 6.30 zeigt die Darstellung der aus den Einzelfahrten gemittelten Fließgeschwindigkeitsverteilungen sowie der gemittelten Sohlenverläufe mit Referenz BT und Referenz GPS. Die Unterschiede in den Ergebnissen sind klar erkennbar. Die Auswertung der Messwerte mit Referenz BT führt auch hier zu einer Unterschätzung der Querschnittsfläche sowie der Fließgeschwindigkeiten. Die aus den Überfahrten mit Referenz GPS berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit variiert zwischen 2.02 und 1.65 m/s, der Mittelwert liegt bei $v_{m,GPS} = 1.75$ m/s. Verwendet man das *Bottom Track*-Signal als Referenz, erhält man eine mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt von $v_{m,BT} = 1.25$ m/s. Das Stauziel am Kraftwerk Nußdorf schwankte während der Messung zwischen 462.4 und 462.7 müNN, was in einer Fließtiefe von 5.5 - 5.9 m und einer Wasserspiegelbreite von 110 - 119 m resultierte. Mit Referenz BT schwanken die Breiten zwischen 60 - 130 m, was ebenfalls ein klares Indiz für die großen Ungenauigkeiten in der Lageerfassung ist.

6.2.5.2 Sohlenlagen und Geschiebepbewegung

Zur Interpretation der aufgezeichneten Hochwassersohlen werden diese mit gemessenen Sohlenverläufen während Normalabflussverhältnissen verglichen. Dabei ist zu be-

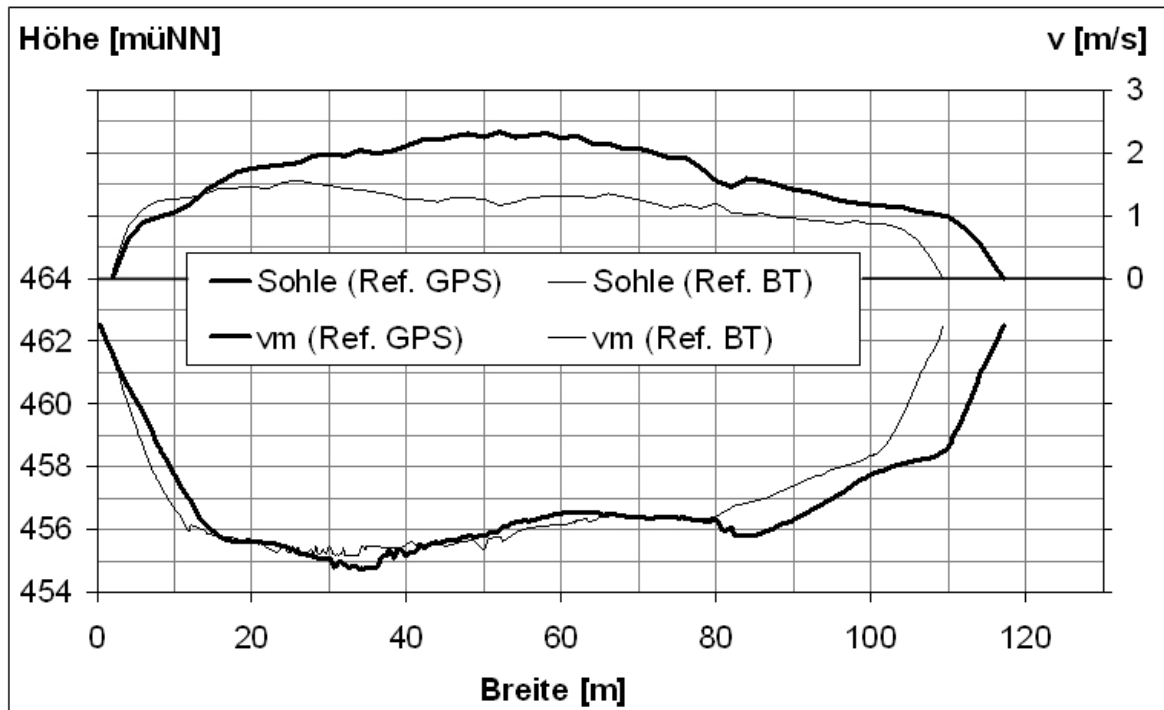


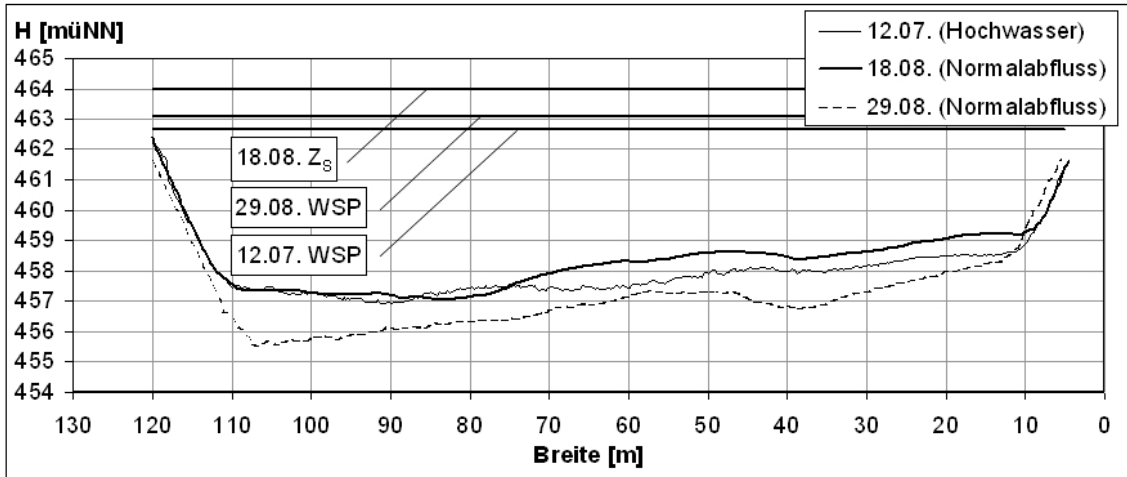
Abbildung 6.30: Darstellung der gemittelten Geschwindigkeitsverteilungen und der gemittelten Sohlenverläufe mit Referenz BT und GPS (ADCP-Messung am 24. August 2005)

rücksichtigen, dass die Überfahrten in unterschiedlichen Abständen zur Brücke durchgeführt wurden (Abb. 6.23 und Abb. 6.24). Während der ersten beiden Überfahrten am 12. Juli wurde der ADCP etwa 7 - 10 m unterhalb der Brücke über den Querschnitt gezogen. Bei der Messung am 24. August wurde der Sohlenverlauf im Abstand von 5 - 10 m von der Brücke erfasst. Diese beiden Messungen können daher verglichen werden. Die restlichen vier Überfahrten der ersten ADCP-Messung am 12. Juli fanden 25 - 35 m unterhalb der Brücke statt, die Querungen der zweiten Messung im Juli liegen 10 - 25 m unterhalb der Brücke.

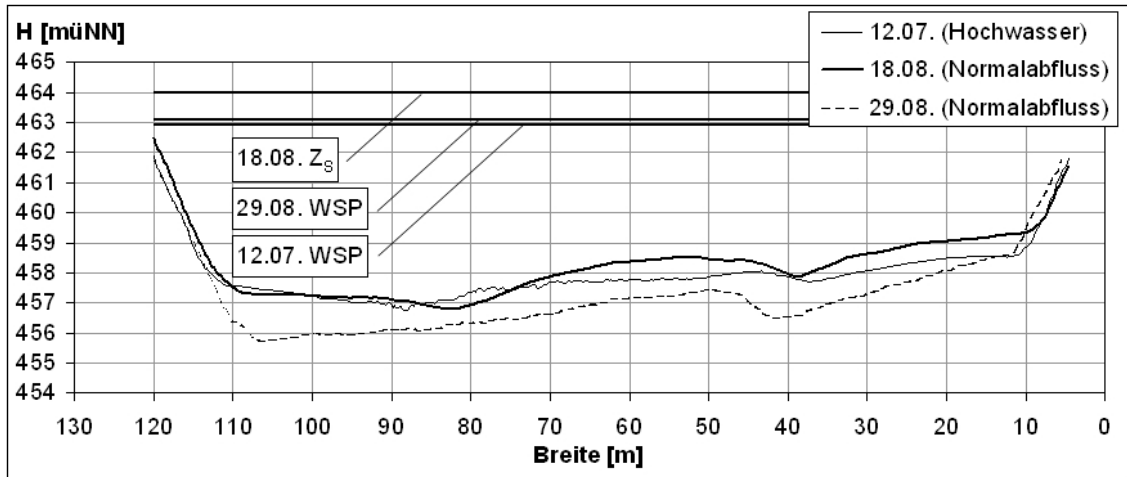
Abbildung 6.31 zeigt die während der ADCP-Messungen erfassten Sohlenlagen. Dafür wurden die Messwerte in drei Gruppen unterteilt: Messfahrten 25 - 35 m, 10 - 25 m und 5 - 10 m unterhalb der Brücke. In Abb. 6.31(a) und 6.31(b) sind neben den Ergebnissen von ADCP-Messungen während Normalabflussverhältnissen nur die gemessenen Sohlenlagen während des Julihochwassers eingetragen. Während des Augusthochwassers konnten die Überfahrten nur mit geringem Abstand zur Brücke durchgeführt werden. Der Vergleich der Hochwassersohlen vom Juli mit dem danach dokumentierten Normalzustand am 18. August zeigt sehr deutlich, dass es durch den Hochwasserabfluss zu einer Sohlenerosion von bis zu 70 cm gekommen ist. Der Austrag der Sohle fand

vor allem im mittleren und im rechten Bereich des Querschnitts statt. Bei der Betrachtung des Sohlenverlaufs vom 29. August ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Messung der Abfluss nach dem Durchgang der Hochwasserwelle zwar wieder bis auf $550 \text{ m}^3/\text{s}$ abgesunken war, das Stauziel aber immer noch um einen knappen Meter abgesenkt war. Die Reduktion des Fließquerschnitts durch die Stauzielabsenkung führte zu ungewöhnlich hohen Fließgeschwindigkeiten, was die Wiederanlandung der Sedimente erheblich verzögerte. Fünf Tage nach dem Hochwasserscheitel war die Sohle vor allem im linken Bereich des Querschnitts noch um 1.5 m von ihrer ursprünglichen Höhenlage entfernt.

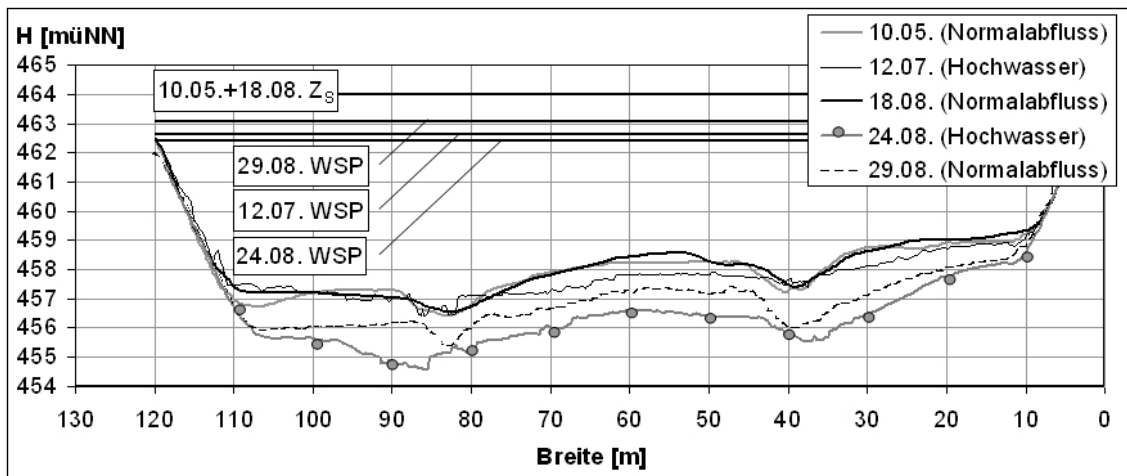
Noch deutlicher zeigt Abb. 6.31(c) den während der Hochwasserereignisse stattgefundenen Sohlaustrag. Im Bereich von 5 - 10 m unterhalb der Brücke wurden insgesamt fünf ADCP-Messungen bei verschiedenen Abflüssen durchgeführt. Die erste Messung am 10. Mai fand während Normalabfluss statt. Die erfassten Sohlenlagen decken sich gut mit dem am 18. August gemessenen Sohlverlauf. Das Hochwasser im Juli, das zwischen diesen beiden Messungen ablief, verursachte einen Sohlaustrag von bis zu 70 cm.



(a) 25 - 35 m unterhalb der Brücke



(b) 10 - 25 m unterhalb der Brücke

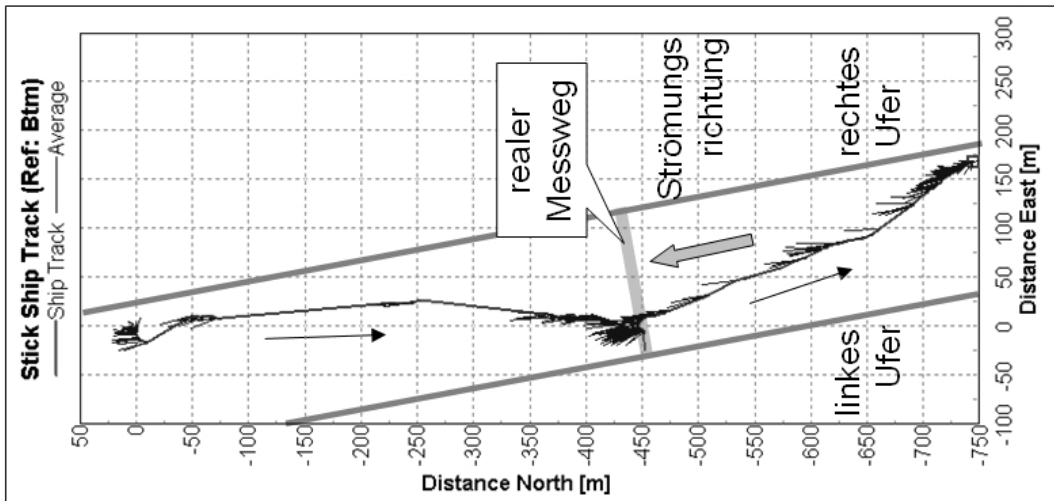


(c) 5 - 10 m unterhalb der Brücke

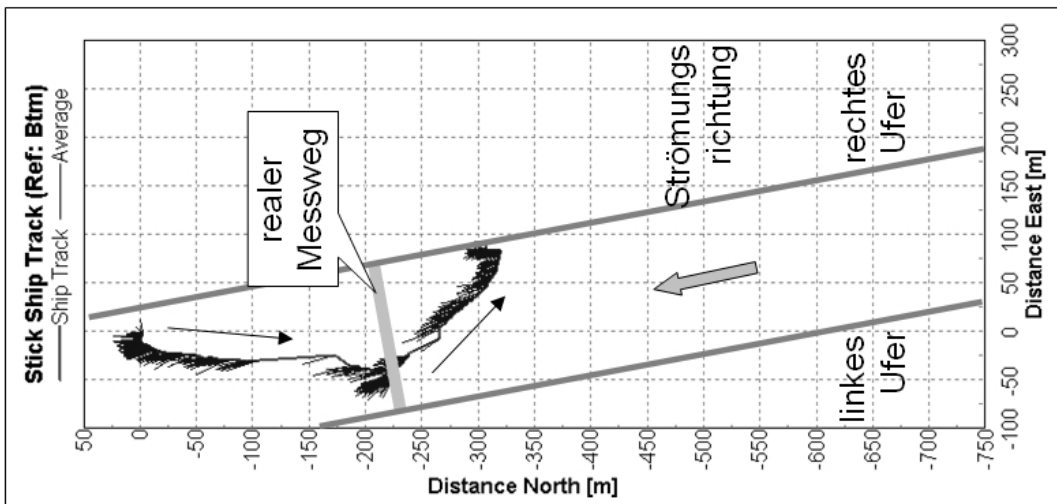
Abbildung 6.31: Darstellung der vom ADCP aufgezeichneten Sohlenverläufe während verschiedener Messeinsätze im Sommer 2005

Die Erosionen fanden hauptsächlich zwischen den beiden Brückenpfeilern und im rechten Querschnittsbereich statt, am linken Ufer kam es sogar zu einer kleinräumigen Anlandung. Die Messung vom 18. August beweist, dass die durch das Julihochwasser verursachten Erosionen danach wieder angelandet wurden. Einen enormen Sohlaustrag verursachte der Hochwasserabfluss im August. Obwohl die ADCP-Messungen erst während des abfallenden Astes, 16 Stunden nach dem Durchgang des Hochwasserscheitels, durchgeführt werden konnten, wurde ein Sohlaustrag von mehr als 2 m festgestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Kolk des linken Brückenpfeilers erheblich in Richtung linkes Ufer ausgedehnt hat. Der Grund dafür liegt in der dreidimensionalen Strömungssituation, hervorgerufen durch die Lage der Messstelle in einer leichten Rechtskurve. Die durch die Kurvenlage hervorgerufenen Sekundärströmungen im Querschnitt führen zu einer erhöhten Beanspruchung der Sohle im linken Querschnittsbereich. In der Darstellung ist auch zu sehen, dass die Sohle fünf Tage nach dem Durchgang der Hochwasserwelle ihre ursprüngliche Höhenlage noch nicht erreicht hat. In dieser Zeit wanderte die Sohle wieder um 0.5 - 1 m nach oben. Während die Wiederanlandung im rechten und mittleren Bereich des Querschnitts annähernd gleichmäßig vor sich ging, fallen im Bereich des linken Pfeilerkolks erheblich größere Anlandungen auf. Der durch das Hochwasser nach links verschobene Kolk ist wieder in seine ursprüngliche Lage gewandert, was auf die Reduktion des Kurveneinflusses bei geringeren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen ist.

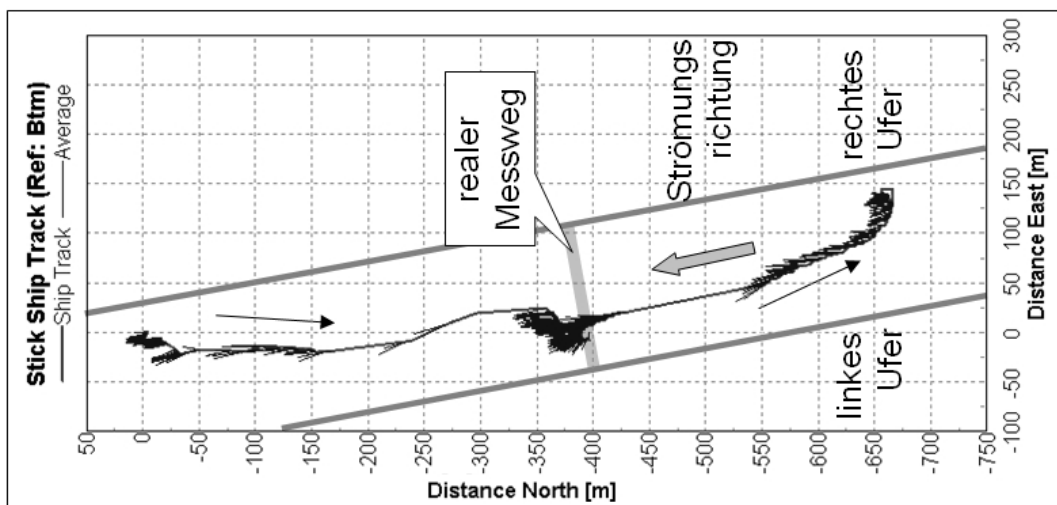
Betrachtet man die aufgezeichneten *Bottom Track*-Wege des ADCP genauer und vergleicht diese mit den parallel dazu durchgeführten dGPS-Messungen, so ist aus der Differenz der Rückschluss auf eventuell vorhandene Geschiebebewegungen im Messquerschnitt möglich. Abbildung 6.32 beinhaltet die Darstellung des BT-Pfads von drei Hin- und Rückfahrten während der Hochwasserereignisse im Juli und im August. Der Vergleich der dargestellten BT-Wege mit den eingetragenen tatsächlichen Messwegen (grau) zeigt deutlich, dass die mit Referenz BT ermittelten ADCP-Bewegungen einen erheblichen Längsversatz aufweisen. Nachdem es sich bei den Querungen jeweils um eine Hin- und eine Rückfahrt handelt, sollten sich die Messwege eigentlich schließen. Aus der Darstellung ist jedoch ersichtlich, dass die Verfälschung in Längsrichtung ein Vielfaches der eigentlichen Querbewegung des ADCPs ausmacht. Grund dafür sind die enormen Sedimentbewegungen im Sohlbereich während der Messungen (siehe Kap. 4.2.3.3).



(a) 1. Messung am 12. Juli 2005



(b) 2. Messung am 12. Juli 2005

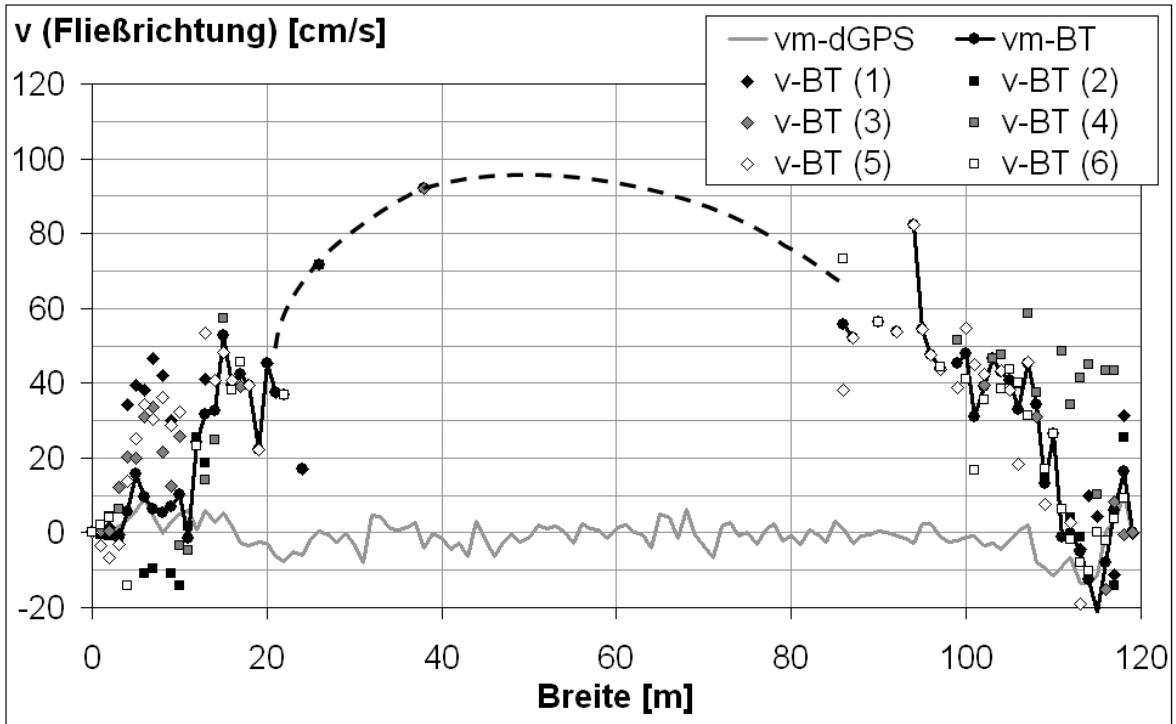


(c) Messung am 24. August 2005

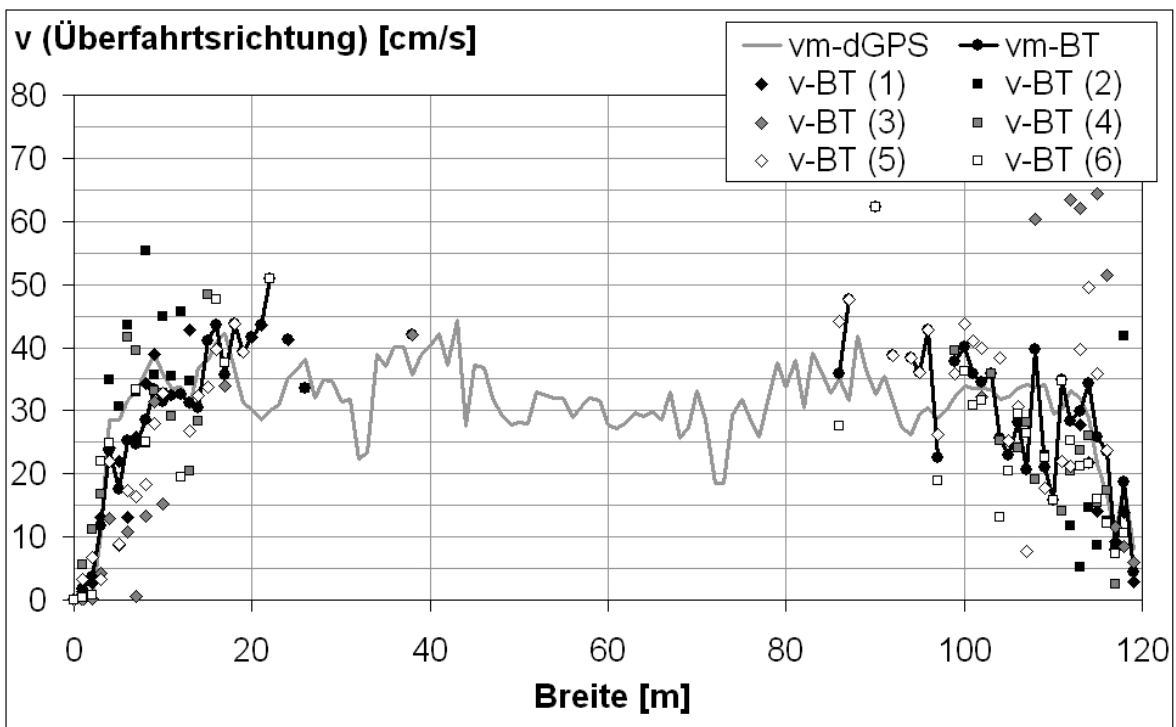
Abbildung 6.32: Beispielhafte Darstellung der *Bottom Track*-Aufzeichnungen von drei Hin- und Rückfahrten während Hochwasser

Der Längsversatz in Fließrichtung bei der ersten Schleifenfahrt am 12. Juli beträgt etwa 750 m. Die beiden Überfahrten dauerten in Summe 20 min. Das bedeutet, dass sich das Geschiebe im Querschnitt mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 0.63 m/s bewegt. Während des Messeinsatzes am Nachmittag des 12. Juli betrug der Längsversatz nur mehr 320 m. Bei einer Überfahrtszeit von insgesamt 15 min lässt sich daraus eine mittlere Geschiebengeschwindigkeit von 0.36 m/s abschätzen. Während des Auguthochwassers ergab sich ein Längsversatz von 670 m. Die beiden Überfahrten dauerten insgesamt 24 min, woraus sich eine mittlere Geschiebengeschwindigkeit von knapp 0.47 m/s ergibt.

Um noch mehr Informationen in Hinblick auf die Geschiebengeschwindigkeiten zu erhalten, wurden die vom ADCP aufgezeichneten Bootsgeschwindigkeiten mit Referenz BT genauer untersucht. Die für jedes Ensemble in vektorieller Form abgespeicherten Werte wurden aus den ASCII-Dateien ausgelesen und in Komponenten parallel sowie rechtwinkelig zur Hauptströmungsrichtung umgerechnet. Auch die aus den dGPS-Daten berechneten Vektoren der Bootsgeschwindigkeit wurden in diese beiden Komponenten zerlegt. Nachdem die ADCP-Fahrten annähernd rechtwinkelig zur Hauptströmungsrichtung durchgeführt wurden, sollten die Geschwindigkeitsanteile in Fließrichtung um den Wert Null schwanken. Wie in den Abb. 6.33(a), 6.34(a) und 6.35(a) zu sehen ist, erfüllen die dGPS-Werte diese Erwartung. Für die mit Referenz BT berechneten Bootsgeschwindigkeitsanteile in Fließrichtung ist das nicht der Fall. Obwohl streckenweise keine *Bottom Track*-Informationen erfasst werden konnten, lassen die Darstellungen Rückschlüsse auf die Geschiebengeschwindigkeit während der Messungen zu. Der Verlauf der zu berücksichtigenden Komponenten in Abb. 6.33(a) zeigt, dass in der Mitte des Querschnitts Werte bis zu 100 cm/s erreicht wurden. Im Zuge der zweiten ADCP-Messung während des Julihochwassers wurden nur mehr Geschiebengeschwindigkeiten bis zu 80 cm/s festgestellt (Abb. 6.34(a)), was auf den geringeren Abfluss zurückzuführen ist. Die Auswertung der Bootsgeschwindigkeiten während der Hochwassermessung im August ergab ebenfalls Werte bis zu 80 cm/s (Abb. 6.35(a)). Die Aussagekraft der BT-referenzierten Bootsgeschwindigkeiten kann durch den Vergleich der Komponenten in Überfahrtsrichtung mit den dGPS-Werten bestätigt werden (Abb. 6.33(b), 6.34(b) und 6.35(b)). Während aller drei Messungen weisen die gemittelten Geschwindigkeitsanteile eine deutlich erkennbare Übereinstimmung auf.

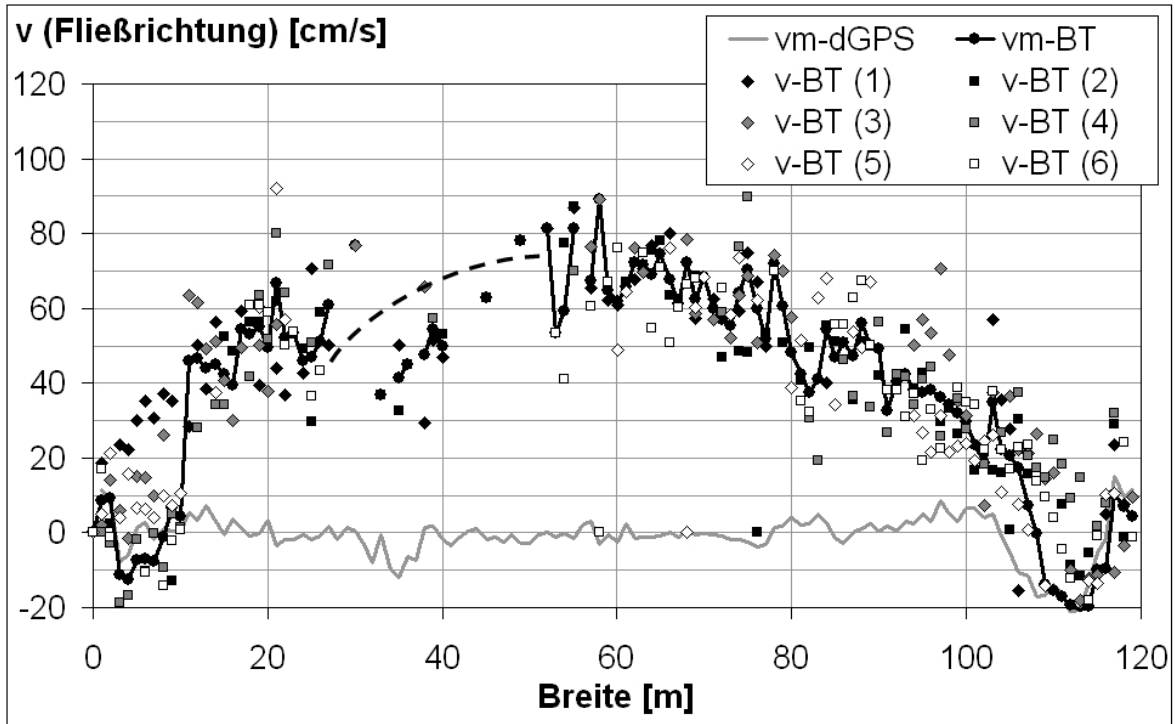


(a) Komponenten in Fließrichtung

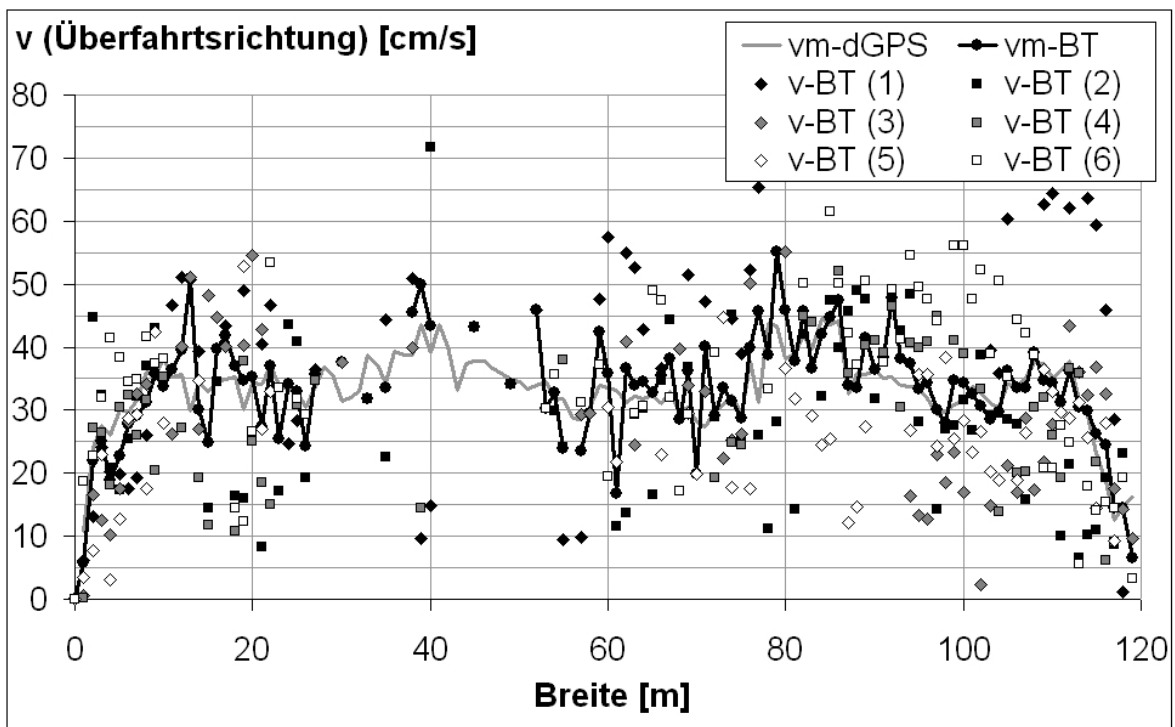


(b) Komponenten in Überfahrtsrichtung

Abbildung 6.33: Vergleich der BT-Geschwindigkeitskomponenten mit den aus den dGPS-Daten berechneten Geschwindigkeitsvektoren (1. Messung am 12. Juli 2005)

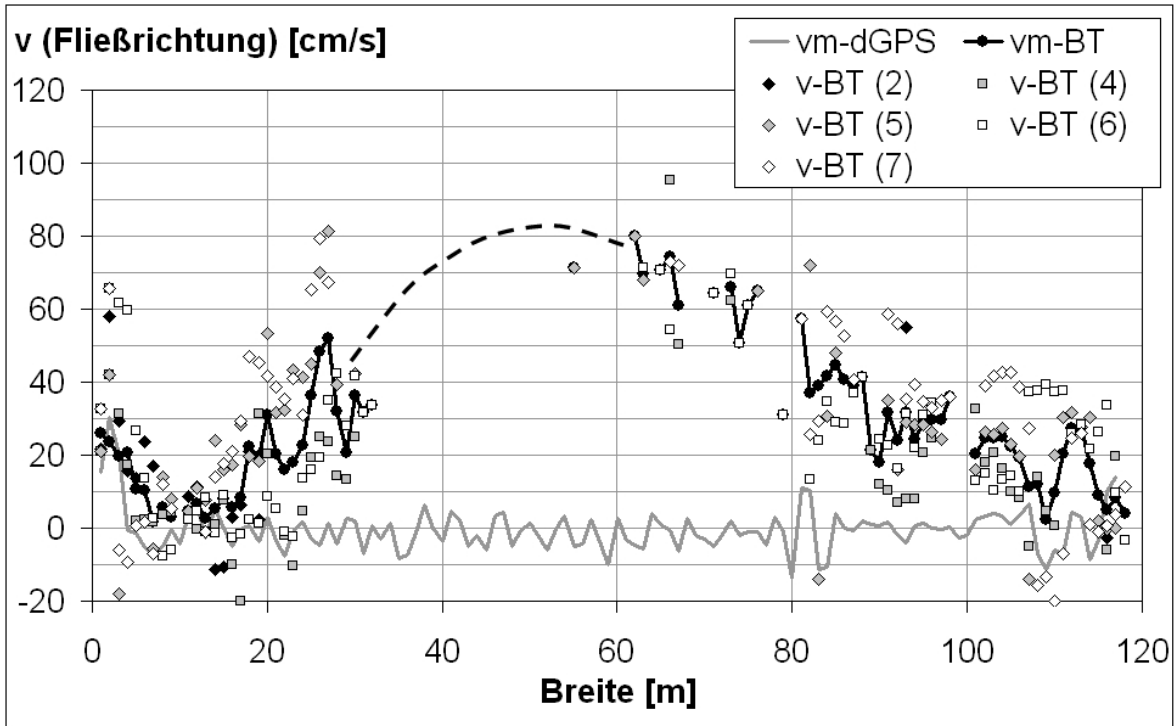


(a) Komponenten in Fließrichtung

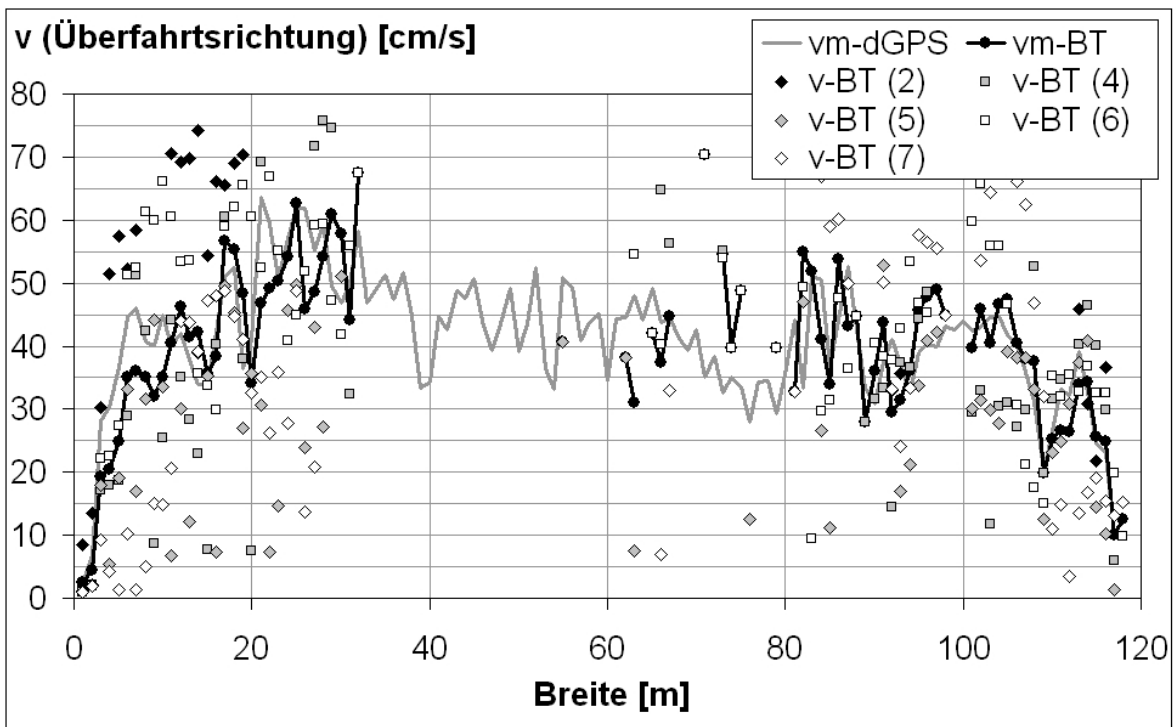


(b) Komponenten in Überfahrtsrichtung

Abbildung 6.34: Vergleich der BT-Geschwindigkeitskomponenten mit den aus den dGPS-Daten berechneten Geschwindigkeitsvektoren (2. Messung am 12. Juli 2005)



(a) Komponenten in Fließrichtung



(b) Komponenten in Überfahrtsrichtung

Abbildung 6.35: Vergleich der BT-Geschwindigkeitskomponenten mit den aus den dGPS-Daten berechneten Geschwindigkeitsvektoren (Messung am 24. August 2005)

Erstaunlich ist, dass für das Ereignis im August, das während der ADCP-Messungen einen höheren Abfluss aufwies als im Juli, eine geringere Geschiebegeschwindigkeit ermittelt wurde. Vergleicht man jedoch die Abflusssituation während der beiden Messungen genauer, so wird der Grund dafür ersichtlich. Im August waren die erfassten Fließgeschwindigkeiten trotz des größeren Abflusses um 10 % kleiner als im Juli (Abb. 6.27 und 6.30). Der Grund dafür liegt in der Größe der Fließquerschnitte. Während der Messungen lag der am Kraftwerk Nußdorf gehaltene Wasserspiegel zwischen 462.4 und 462.9 müNN. Die massive Sohlerosion während des Augusthochwassers führte jedoch zu erheblich größeren Fließquerschnitten als im Juli. Dies hatte kleinere Fließgeschwindigkeiten und kleinere Schubspannungen zur Folge. Deshalb ist die ermittelte Geschiebegeschwindigkeit während der Augustmessung niedriger als im Juli. Die Untersuchung zeigt sehr deutlich, wie wichtig die Messung der aktuellen Sohlenhöhen für die korrekte Erfassung der jeweiligen Abflusssituation ist.

6.2.5.3 Echointensitäten und Schwebstoffkonzentrationen

Wie bereits in Kap. 4.2.5 beschrieben, können ADCP-Messungen auch zur Auswertung in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen verwendet werden. Für quantitative Aussagen sind hier jedoch konventionell durchgeführte Vergleichsmessungen zur Eichung der ADCP-Daten erforderlich. Derartige Messungen konnten im Messquerschnitt unterhalb der Nußdorfer Brücke nicht durchgeführt werden. Es liegen lediglich die Ergebnisse von Einpunktmessungen vor. Wie bereits in Kap. 6.2.2 beschrieben wurde, werden am Pegel Oberaudorf in regelmäßigen Abständen Einpunktproben von der Wasseroberfläche entnommen und die Schwebstoffkonzentrationen ermittelt. Die Konzentrationswerte während der Zeitfenster der ADCP-Messungen sind in Tab. 6.3 noch einmal zusammengefasst.

Abbildung 6.36 beinhaltet die vom ADCP während der Messfahrten an der Nußdorfer Brücke erfassten Echointensitäten EI (Glg. 4.22). Dabei handelt es sich um eine aus allen verwertbaren Überfahrten berechnete mittlere Verteilung über den Querschnitt.

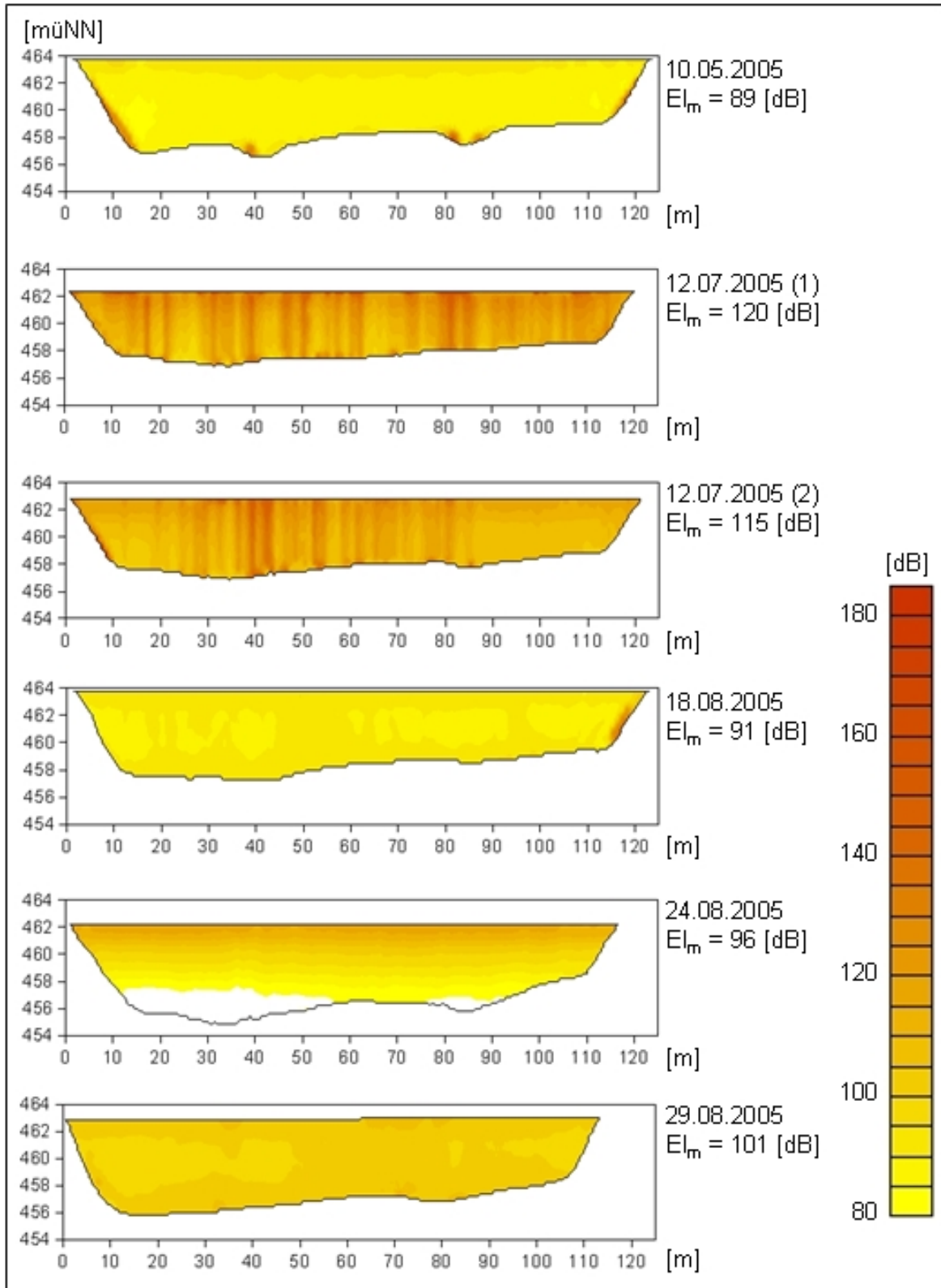


Abbildung 6.36: Gemittelte Verteilung der Echantensitäten EI während mehrerer ADCP-Messungen an der Nußdorfer Brücke am Inn

Datum	Uhrzeit	Konzentration	Pegelabfluss
[TT.MM.JJJJ]	[hh:mm]	[mg/l]	[m ³ /s]
09.05.2005	09:00	15	281
14.05.2005	06:00	18	233
12.07.2005	12:00	70	786
12.07.2005	18:00	207	703
16.08.2005	18:00	40	506
24.08.2005	11:30	1208	—
24.08.2005	14:00	1447	—
24.08.2005	19:00	1705	—
29.08.2005	07:00	415	501
29.08.2005	13:00	410	558

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Schwebstoffeinpunktauswertungen am Pegel Oberaudorf

Der Vergleich der in Tab. 6.3 angegebenen Schwebstoffkonzentrationen mit den gemittelten Echointensitäten der ADCP-Messungen (Abb. 6.36) zeigt, dass Konzentrationen und Intensitäten innerhalb bestimmter Grenzen proportional zueinander sind. Als eindeutiger Ausreißer in den ADCP-Daten muss das Ergebnis vom 24. August gewertet werden. Im Vergleich mit den restlichen *EI*-Daten erscheint der Wert von nur 96 dB viel zu klein. In Abb. 6.36 ist auch zu sehen, dass die erfassten Echointensitäten bei dieser Messung in Oberflächennähe am größten sind und in Sohlnähe überhaupt keine Daten aufgezeichnet wurden. Dies deutet darauf hin, dass die ADCP-Technik mit der hier verwendeten Frequenz von 1200 kHz an ihre Grenzen gestoßen ist. Aufgrund der hohen Anzahl von Partikeln in der Wassersäule wird ein zu großer Teil der Messsignale absorbiert und gelangt nicht mehr zum Messgerät zurück. Der Grund für die schlechten Ergebnisse der Messung der Echointensitäten kann aber auch in der Korngrößenverteilung der Schwebstoffe liegen. In Tab. 4.5 wird für eine Messfrequenz von 1200 kHz der Anwendungsbereich auf $d = 0.038 - 0.382$ mm begrenzt. In Burz [1967] wird angegeben, dass die Schwebstoffe am Inn vorwiegend aus der Ton- und Schlufffraktion stammen, selten aber auch Größen bis zu 0.2 mm erreichen können, was vor allem bei großen Hochwasserereignissen eintritt. Das bedeutet, es kann davon ausgegangen werden, dass sich beim Augusthochwasser 2005 die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe vergöberte, wodurch der Faktor $\pi d_P / \lambda$ nahe 1 rückte. In diesem Bereich werden die Echosignale sehr komplex, was ihre Auswertung erheblich erschwert, und zu falschen Ergebnissen bzw. Fehlwerten führen kann. Bei dem Versuch, eine Beziehung zwischen den ADCP-Werten und den Ergebnissen der Ein-

punktprobenentnahmen aufzustellen, wird diese Messung daher nicht berücksichtigt. Ebenfalls aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen wird das Ergebnis der ersten Einpunktauswertung vom 12. Juli. Die ermittelten 70 mg/l erscheinen – verglichen mit anderen Messungen bei ähnlichen Abflusssituationen – im Verhältnis zum Abfluss viel zu niedrig. Somit verbleiben vier Messungen – am 10. Mai, am 12. Juli, am 18. August und am 29. August.

Anhand dieser Daten wurden die Variablen A und B aus Glg. 4.19 bestimmt, um den Zusammenhang zwischen ADCP-Echointensitäten und Schwebstoffkonzentrationen beschreiben zu können. Das Ergebnis ist in Abb. 6.37 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsfunktion beträgt $R^2 = 0.6$. Betrachtet man aber die direkte Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Schwebstoffkonzentrationen, so wird die unzureichende Qualität dieser Abschätzung offensichtlich. Die Ergebnisse der Messungen vom 10. Mai und vom 18. August bei Normalwasserabfluss stimmen noch ganz gut überein. Die beiden anderen Punkte der Messungen vom 12. Juli und vom 29. August liegen jedoch weit von der Ideallinie (Gerade mit 45° Neigung) entfernt. Der Versuch, zwischen den gemittelten Rückstreuinformationen von ADCP-Messungen und konventionell durchgeführten Einpunktmessungen, die zudem auch nicht zeitgleich durchgeführt worden sind, einen Zusammenhang zu finden, ist wohl nicht zielführend. Die darin beinhalteten Ungenauigkeiten sind zu groß, um eine gesicherte Beziehung zwischen den Messwerten des ADCP und den wahren Schwebstoffkonzentrationen aufstellen zu können.

Ob und innerhalb welcher Grenzen die beiden Kalibrierkonstanten A und B aus Glg. 4.19 an Binnengewässern schwanken, wurde bis heute noch nicht untersucht. Der korrekte Weg zur ihrer Bestimmung führt auf jeden Fall über ADCP-Messungen mit zeitgleich durchgeführten Vielpunktmessungen der Schwebstoffkonzentrationen im selben Querschnitt. Pro ADCP-Überfahrt können dann anhand der ermittelten Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt die Größen für A und B bestimmt werden. Die Änderung der Werte über die Zeit kann bei einer ausreichenden Menge von Messungen dann im Anschluss an die Einzelauswertungen untersucht werden.

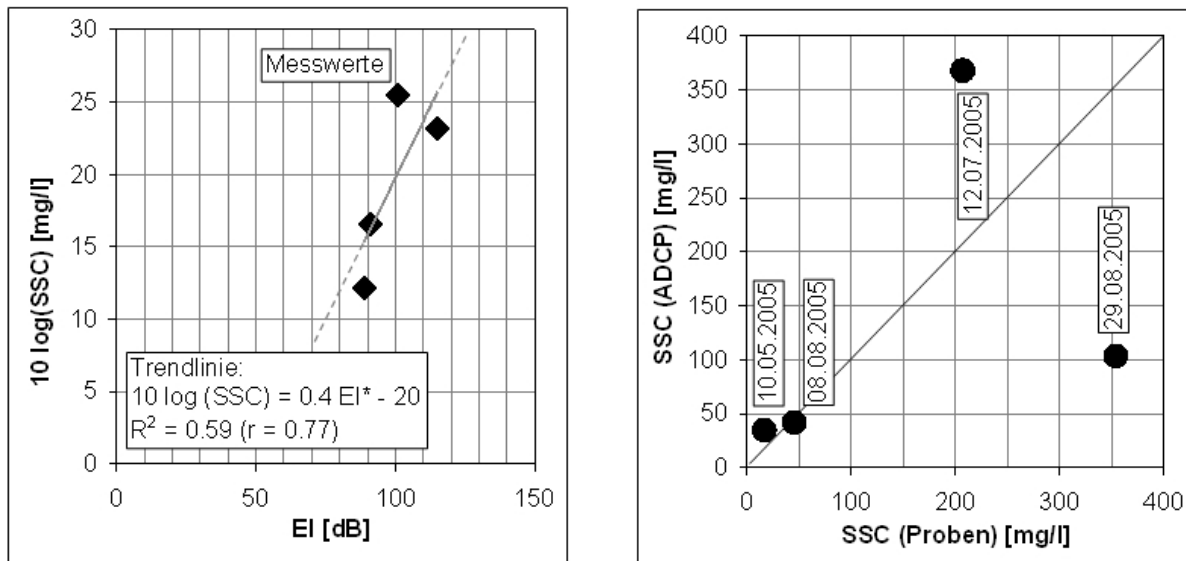


Abbildung 6.37: Aus den ADCP-Echointensitäten berechnete Schwebstoffkonzentrationen

6.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

An der Nußdorfer Brücke am Inn – 500 m oberhalb des Kraftwerks Nußdorf bei Fkm 198.7 – wurden während zwei Hochwasserereignissen ADCP-Messungen durchgeführt. Diese Messeinsätze im Juli und im August 2005 haben wertvolle Erkenntnisse über die hydromorphologischen Vorgänge während Hochwasser, die Möglichkeiten der ADCP-Technik und deren Anwendungsgrenzen gebracht. Die Auswertung der vom ADCP erfassten Geschwindigkeiten unter Miteinbeziehung extern ermittelter Lageinformationen – in diesem Fall dGPS-Werte – brachte für beide Hochwasserereignisse zufrieden stellende Ergebnisse. Der aus den Einzelfahrten gemittelte Abfluss weist eine gute Übereinstimmung mit den Vergleichsdaten der benachbarten Kraftwerke auf. Trotz der letztendlich guten Ergebnisse war die Durchführung der Messungen jedoch mit Schwierigkeiten behaftet, die sich auch in den erfassten Messwerten widerspiegeln. Streckenweise konnten keine Daten erfasst werden, sondern mussten inter- bzw. extrapoliert werden.

Um die Messdaten auswerten und daraus die bereits aufgeführten Informationen gewinnen zu können, ist eine Aufzeichnung des zurückgelegten Messwegs mit Hilfe von externen Geräten, wie in diesem Fall GPS-Antennen, zwingend erforderlich. Der vom ADCP unter Verwendung des *Bottom Track*-Signals ermittelte Messpfad wird durch den Sedimenttransport im Bereich der Sohle massiv verfälscht. Ein Vergleich der *Bot-*

tom Track-Aufzeichnungen mit dem wahren Messweg ermöglicht Rückschlüsse auf die Geschiebegeschwindigkeit während der Messfahrten im Querschnitt. So konnte festgestellt werden, dass während der beiden Hochwasserereignisse ein erheblicher Sedimenttransport im Bereich der Sohle stattfand, während die Sohle bei den Normalabflussmessungen in Ruhe war.

Erstmalig konnten die Höhenlagen der Sohle während des Durchgangs einer Hochwasserwelle messtechnisch erfasst werden. Es wurde festgestellt, dass – wie bereits durch verschiedene Untersuchungen angedeutet – die Gewässersohle während Hochwasser erheblich erodiert wird. Während des absteigenden Astes des Auguthochwassers konnte ein Sohlaustrag von 2 m dokumentiert werden. Durch die starken Erosionen kommt es vor allem bei großen Hochwasserereignissen trotz Absenkung der Stauziele an den Kraftwerken zu einer Vergrößerung der Fließquerschnitte, was zu einer erhöhten Abflussleistung bei gleichbleibenden Wasserständen sowie zu einer verminderten Beanspruchung der Sohle führt.

Auch die Auswertung der Echointensitäten in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen brachte wertvolle Erkenntnisse. So konnte die Konzentrationsveränderung zwischen den einzelnen Messeinsätzen qualitativ gut nachvollzogen werden. Unter Verwendung von vier ADCP-Messungen und zeitnah durchgeführten Einpunktprobenentnahmen wurden versuchsweise die beiden unbekanntenen Kalibrierparameter in der Beziehung zwischen den ADCP-Werten und den Schwebstoffkonzentrationen ermittelt. Es wurde jedoch festgestellt, dass es nicht möglich ist, anhand der wenigen vorhandenen Schwebstoffkonzentrationsdaten eine klar definierte Beziehung zwischen den ADCP-Echointensitäten und den Schwebstoffkonzentrationen aufzustellen. Dies liegt zum Einen daran, dass Einpunktmessungen nur als Näherungswert für die mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt betrachtet werden können und keine Aussagen über die räumliche Verteilung möglich sind. Zum Anderen konnten die konventionellen Probenentnahmen nicht zeitgleich mit den ADCP-Messungen durchgeführt werden. Zufrieden stellende Aussagen über die Beziehung zwischen ADCP-Echointensitäten und Schwebstoffkonzentration sind nur dann möglich, wenn die Parameter A und B aus Glg. 4.19 anhand von zeitgleich durchgeführten Eichmessungen im selben Querschnitt bestimmt werden können. Umfangreiche Messkampagnen zur Ermittlung dieser Kenngrößen und zur Untersuchung ihrer Schwankungsbreiten wären hier sehr wünschenswert.

Der Messeinsatz am 24. August hat ganz klar die Grenzen der ADCP-Technik aufgezeigt. Bei derart turbulenten Strömungsmustern, hohen Fließgeschwindigkeiten, un-

regelmäßiger Wasseroberfläche, hohen Schwebstoffkonzentrationen und starkem Geschiebetransport war die Erfassung verwertbarer Messdaten sehr schwierig. Die aufgezeichneten Rückstreuintensitäten sind im Vergleich zu den Ergebnissen der restlichen Messeinsätze zu gering, aus den tieferen Bereichen des Fließquerschnitts liegen gar keine Messwerte vor. Es wird davon ausgegangen, dass der Zusammenhang zwischen Echointensitäten und Schwebstoffkonzentrationen einen Wendepunkt aufweist. Führen bis zu diesem Punkt die ansteigenden Konzentrationen zu einer größeren Menge an Reflexionen und somit auch zu höheren Rückstreuwerten, so resultiert eine weitere Zunahme der Partikel dazu, dass die Signale des ADCP die Wassersäule nicht mehr durchdringen können und keine verwertbaren Reflexionen mehr empfangen werden. In diesem Zusammenhang spielt auch die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe eine große Rolle. Hierzu liegen am Inn leider nur sehr wenige Naturmessdaten vor. Deshalb ist die Ausdehnung des Anwendungsbereichs der ADCP-Technik nicht ohne weiteres auf andere Flüsse übertragbar, sondern muss von Fall zu Fall ermittelt werden.

Tabelle 6.4 gibt abschließend eine Zusammenstellung der wichtigsten Messgrößen wieder, die während der ADCP-Messungen an der Nußdorfer Brücke am Inn gesammelt werden konnten. Ergänzt werden die Ergebnisse der ADCP-Messungen durch die ermittelten Schubspannungen während der Messungen. Die Werte wurden anhand eindimensionaler, stationärer HEC-RAS Simulationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Sohlenhöhen berechnet. Die für den Inn gültige kritische Sohlschubspannung $\tau_{crit} = 0.6 \text{ N/m}^2$, ab der Sohlerosion einsetzt, deckt sich gut mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen und der ADCP-Messungen. Während normaler Abflussbedingungen und Einhaltung des Stauziels liegen die Schubspannungen unter dem Grenzwert, es herrscht kein Geschiebetrieb und die Sohlenhöhen stimmen mit den dokumentierten Sohlenlängsverläufen überein. Bei Hochwasser überschreiten die Sohlschubspannungen den Grenzwert, das Sohlmaterial wird stromabwärts transportiert und die Höhenlagen der Sohlen sinken dementsprechend stark ab. Diese Phänomene konnten mit Hilfe der ADCP-Messungen gut erfasst werden.

Datum	Q	WSP	v_m	h_m	τ	v_G	EI_m	SSC
	[m ³ /s]	[müNN]	[m/s]	[m]	[N/m ²]	[m/s]	[dB]	[mg/l]
10.05.2005	251	464.0	0.36	5.6	0.3	0	89	16.5
12.07.2005-1	1087	462.6	1.97	4.6	8.9	0.63	120	70
12.07.2005-2	1013	462.9	1.73	4.8	6.7	0.36	115	207
18.08.2005	347	464.0	0.53	5.3	0.6	0	91	45.5
24.08.2005	1163	462.4	1.75	5.7	6.8	0.47	96	1453
29.08.2005	539	463.1	0.80	5.9	1.6	0	101	354

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der ADCP-Messungen während der Sommermonate 2005

6.3 ADCP-Messungen an der Tiroler Achen

Alternativ zu den Messungen am Inn wurde ein zweiter Fluss in Bayern ausgewählt, an dem ADCP-Messungen während erhöhter Abflüsse durchgeführt werden sollten. Aufgrund spezieller hydromorphologischer Fragestellungen in dem Gewässerabschnitt sowie organisatorischer Vorteile bei der Messdurchführung fiel die Wahl auf den Pegel Staudach an der Tiroler Achen. Die Randbedingungen vor Ort sowie die sich daraus ergebenden Besonderheiten werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

6.3.1 Hintergrund der Messungen

Obwohl sich die Tiroler Achen und der Inn in vielen Aspekten unterscheiden, weisen sie eine gemeinsame Besonderheit auf: Beide Gewässer transportieren beachtliche Mengen an Schwebstoffen, was weitreichende Konsequenzen mit sich bringt. Im Gegensatz zum Inn führen die hohen Sedimentfrachten an der Tiroler Achen nicht zu Problemen in der Bewirtschaftung bzw. im Unterhalt von Stauanlagen. Hier liegen die Herausforderungen, die es zu meistern gilt, auf dem Gebiet der Ökologie, des Tourismus und der langfristigen Bewirtschaftung des Chiemsees.

6.3.1.1 Einzugsgebiet der Tiroler Achen

Ihren Ursprung hat die Tiroler Achen in den Kitzbühler Alpen in Österreich. Sie entsteht durch den Zusammenfluss der Kitzbühler Ache mit der Reither Ache und der Fieberbrunner Ache. Die ersten 55 km legt die Tiroler Achen im Bezirk Kitzbühel

auf österreichischem Staatsgebiet zurück, wo sie noch einige Vorfluter aufnimmt. Danach überquert sie die deutsch-österreichische Grenze und fließt weitere 24 km durch den Landkreis Traunstein, bevor sie in den Chiemsee mündet. Die Tiroler Achen ist ein sommerkaltes, alpines Gewässer, das durch eine starke Abflussdynamik und – wie bereits erwähnt – hohe Schwebstofftransportraten charakterisiert wird. Das Abflussgeschehen konzentriert sich auf die Monate April bis August, in denen 58 % des Jahresabflusses sowie 78 % der Jahresschwebstofffracht transportiert werden. Die mittlere Schwebstofffracht liegt bei zirka 240000 t pro Jahr [Elsner, 2005].

Durch den steigenden Besiedelungsdruck im 19. Jahrhundert wurde die Tiroler Achen umfangreich reguliert, was die ökologischen Randbedingungen stark veränderte. Der Fluss wurde auf einen trapezförmigen Querschnitt beschränkt, entlang der Ufer wurden Hochwasserschutzdeiche errichtet. Erst in den letzten Jahren begannen die verantwortlichen Behörden, das Gewässer wieder ökologisch aufzuwerten. Durch den abschnittswisen Rückbau von Ufersicherungen wurde neben der Verbesserung der ökologischen Situation auch der Hochwasserrückhalt verbessert. Langfristiges Ziel ist es, mit den Maßnahmen wieder eine dynamische Wildflusslandschaft mit Kiesbänken und intakten Auwäldern zu schaffen [WWA-T, 2008].

6.3.1.2 Verlandung des Chiemsee-Mündungsdeltas

Wie viele andere Voralpenseen auch, entstand der Chiemsee Ende der letzten Eiszeit vor zirka 10000 Jahren. Ursprünglich bedeckte der See eine Fläche von fast 240 km². Heute ist er mit einem Volumen von 2 Mrd. m³ und einer Fläche von 80 km² immer noch der größte See Bayerns. Sein Einzugsgebiet beträgt knapp 1400 km². Davon entfallen rund 952 km² auf die Tiroler Achen, die mit 68 % der Jahreswasserfracht den bedeutendsten Zufluss in den Chiemsee darstellt. Durch die hohen Schwebstoff- und Geschiebefrachten des Fließgewässers wird die Verlandung des Sees erheblich gefördert, was sich vor allem im Bereich der Hirschauer Bucht zeigt, wo ein großflächiges Mündungsdelta entstanden ist. Dieses besteht etwa zu gleichen Teilen aus Kies, Sand und Schluff. Vorliegende Daten aus langjährigen Untersuchungen ermöglichten die Ermittlung einer seit 1970 mittleren jährlichen Verlandung von 140000 m³ [Elsner, 2005]. Das Delta schiebt sich dadurch um bis zu 25 m pro Jahr in den See hinaus.

Fast 80 % der angelandeten Sedimente kommen aus dem Einzugsgebiet der Tiroler Achen. Sie stammen aus der so genannten Grauwackenzone⁵⁰ im Raum Kitzbühel, von wo aus sie ohne Zwischenlagerung in den See transportiert werden. In dieser Hinsicht ist das Einzugsgebiet des Chiemsees einzigartig und mit keinem See am Alpennordrand vergleichbar [WWA-T, 2008].

Um die drohende Verlandung des Chiemsees abzuwenden, wurde 1980 in der Tiroler Achen bei Fkm 3 eine Geschiebefalle errichtet. Hier werden pro Jahr etwa 20000 m³ Kies entnommen. Es ist davon auszugehen, dass sich dadurch die Zusammensetzung der Anlandungen in der Hirschauer Bucht in Zukunft verändern wird und die feinkörnigen Fraktionen einen prozentual größeren Anteil einnehmen werden.

6.3.2 Randbedingungen für die ADCP-Messungen

Für die Durchführung von ADCP-Messungen eignen sich vor allem Pegelquerschnitte, da sie meist über eine Seilkrananlage verfügen, mit der normalerweise Geschwindigkeitsmessungen mit hydrometrischen Flügeln durchgeführt werden. Diese Anlagen ermöglichen ein sehr gleichmäßiges, langsames Ziehen des ADCP über den Gewässerquerschnitt. Mit Hilfe der Seilkrananlage ist dafür keine menschliche Kraftanstrengung erforderlich, außerdem sorgt die gleichmäßige, beliebig langsame Überfahrtgeschwindigkeit für eine hohe, gleichmäßig verteilte Datendichte.

6.3.2.1 Situation im Messquerschnitt

Der einzige bayerische Pegel an der Tiroler Achen befindet sich bei Fkm 9.23, nahe der Gemeinde Staudach-Egerndach, und wird vom Wasserwirtschaftsamt (WWA) Traunstein betrieben. Der Querschnitt liegt zwischen einer Linkskurve und einer lang gestreckten Rechtskurve des Flusses, zirka 150 m unterhalb einer Straßenbrücke (Abb. 6.38).

Die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt für den Pegel Staudach an der Tiroler Achen angegebenen Abflussjährlichkeiten sowie die Wasserstandsmittel- und Höchstwerte [LfU, 2008] sind in Tab. 6.5 zusammengestellt.

⁵⁰Relativ weiche, meist dunkle Gesteine, bestehend aus einer tonigen Grundmasse mit Quarz, Feldspat, Kiesel- oder Tonschiefern und Gesteinsbruchstücken.

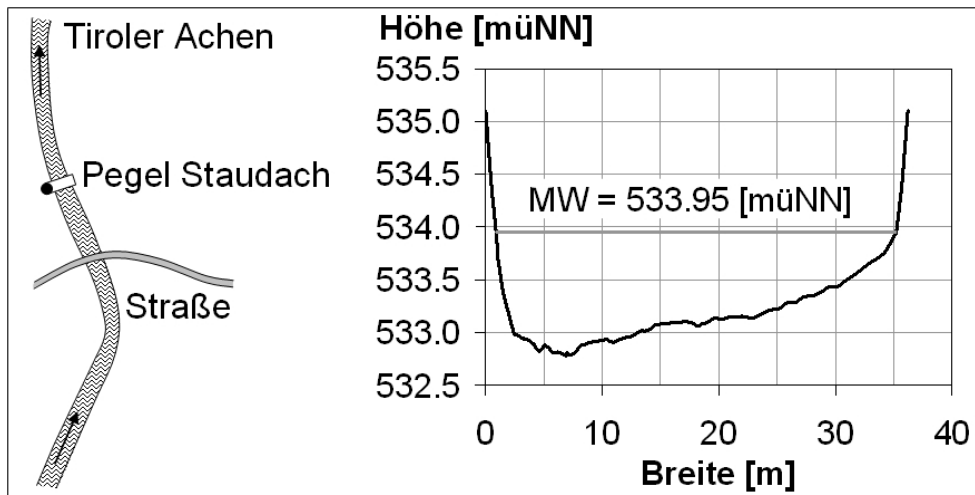


Abbildung 6.38: Lage des Pegels Staudach sowie Form des Pegelquerschnitts

NQ	...	7.2 m ³ /s	NW	...	533.45 müNN
MQ	...	35 m ³ /s	MNW	...	533.56 müNN
HQ ₂	...	350 m ³ /s	MW	...	533.95 müNN
HQ ₅	...	440 m ³ /s	MHW	...	536.46 müNN
HQ ₁₀	...	530 m ³ /s	HW	...	537.97 müNN
HQ ₁₀₀	...	870 m ³ /s			

Tabelle 6.5: Jährlichkeiten am Pegel Staudach an der Tiroler Achen

Neben der kontinuierlichen Erfassung des Wasserstands werden am Pegel Staudach fast täglich Wasserproben entnommen und in Hinblick auf die Schwebstoffkonzentrationen ausgewertet. Dabei handelt sich um Einpunktnahmen von der Wasseroberfläche mit bis zu zehn Liter. Es ist zu berücksichtigen, dass mit diesen Messungen nicht die mittlere Schwebstoffkonzentration im Fließquerschnitt erfasst werden kann.

Elsner [2005] hat mehr als 11000 Einpunktmessungen seit 1971 den erfassten Abflüssen gegenübergestellt, um eine mögliche Beziehung zwischen dem Abfluss und den Schwebstoffkonzentrationen zu finden. Abbildung 6.39 zeigt das Ergebnis der Auswertung. Die Datenmenge weist eine erhebliche Streuung auf, was auch in der geringen Korrelation zu erkennen ist. Die beste Anpassung liefert die potentielle Trendlinie, generell muss jedoch festgestellt werden, dass die Abschätzung von Schwebstoffkonzentrationen anhand vorhandener Abflussdaten nur sehr grobe Richtwerte liefern kann und für eine ausreichend genaue Erfassung auf jeden Fall Schwebstoffkonzentrationsmessungen durchgeführt werden sollten.

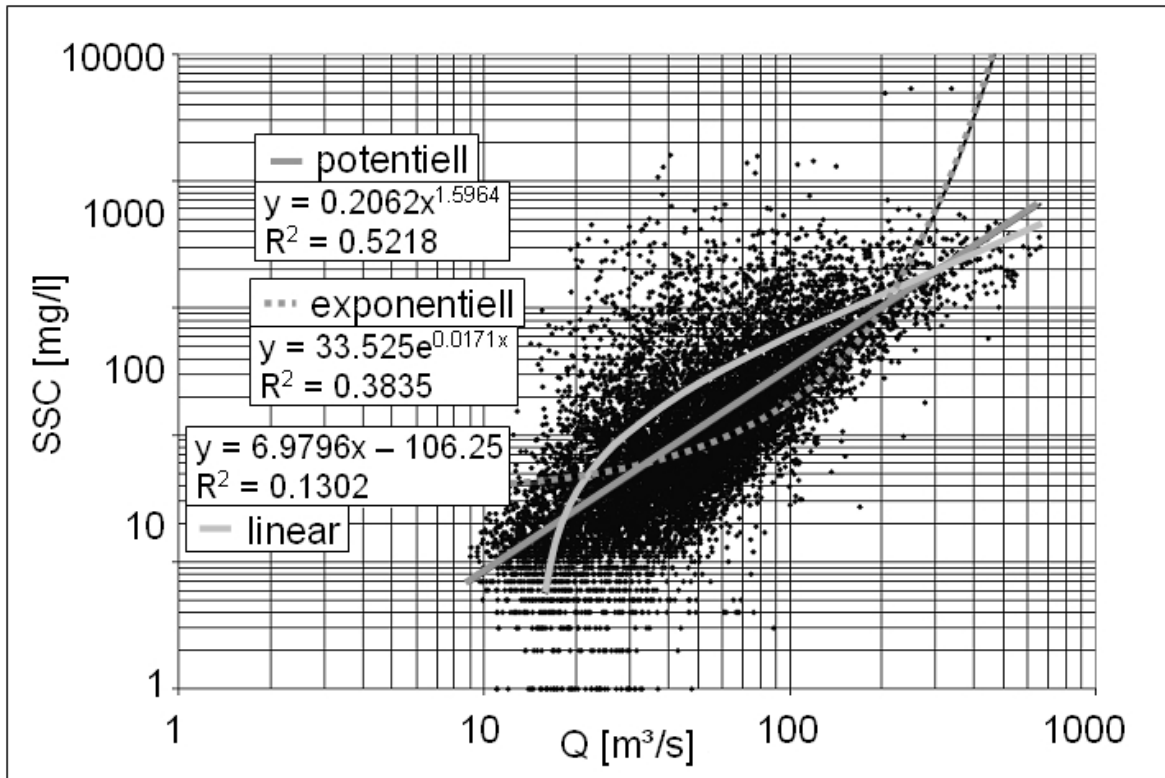


Abbildung 6.39: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Einpunkt-Schwebstoffkonzentrationen und dem Abfluss am Pegel Staudach (nach Elsner [2005])

Die Einpunktmessungen am Pegel werden durch sporadisch durchgeführte Vielpunktmessungen ergänzt. Elsner [2005] untersuchte 36 zwischen 1988 und 2003 durchgeführte Vielpunktmessungen mit direkt davor bzw. danach durchgeführten Einpunktmessungen und stellte fest, dass die aus den Vielpunktentnahmen berechneten mittleren Konzentrationen um einen Faktor von bis zu 1.75 größer sind als die Oberflächenwerte, wobei der Unterschied – wie auch am Inn beobachtet – mit zunehmender Konzentration abnimmt. Die Untersuchungen haben auch ergeben, dass die Konzentrationen im linken Querschnittsbereich höher sind als in der rechten Hälfte. Diese Asymmetrie der Verteilung nimmt mit steigenden Schwebstoffkonzentrationen zu.

Zwischen 1967 und 1990 wurden zusätzlich zur Konzentrationsbestimmung von 122 Proben die Kornverteilungskurven ausgewertet. Elsner [2005] geht davon aus, dass es sich dabei um Einpunktmessungen im Bereich der Wasseroberfläche gehandelt hat. Wie auch am Inn bewegen sich die Korngrößen überwiegend im Schluffbereich mit Korndurchmessern von weniger als 0.2 mm, der d_{50} liegt zwischen 0.004 - 0.03 mm.

In den letzten Jahren wurden leider keine Sieblinienauswertungen von Schwebstoffproben mehr durchgeführt.

6.3.2.2 Abflusssituation während der Messungen

Am Pegel Staudach wurden während der Sommermonate 2006 und 2007 mehrere ADCP-Messungen durchgeführt. Die Einsätze konzentrierten sich auch hier auf Situationen mit erhöhtem Abfluss. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Auswertungen der Messeinsätze am 8. August 2006, am 9. Mai 2007 und am 10. Juli 2007 (Abb. 6.40) vorgestellt.

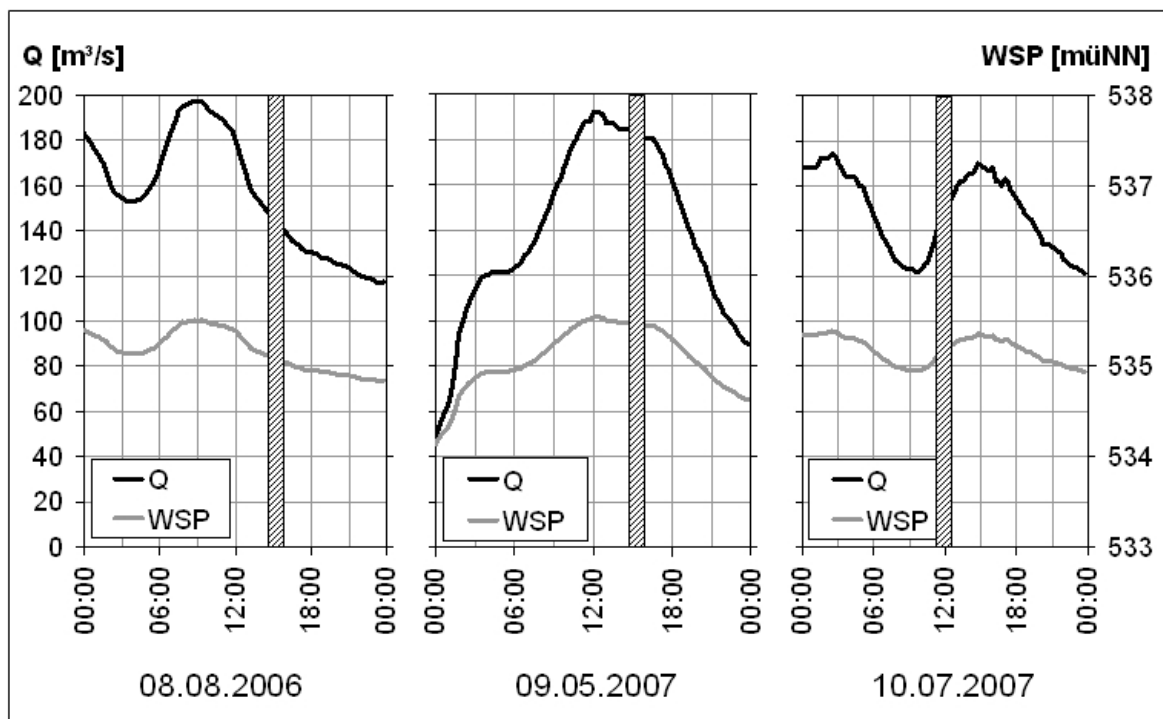


Abbildung 6.40: Abfluss und Wasserstand während der drei ADCP-Messungen am Pegel Staudach an der Tiroler Achen

Zur Validierung der vom ADCP aufgezeichneten Messwerte konnten die am Pegel Staudach ermittelten Abflüsse verwendet werden. Am 8. August 2006 und am 9. Mai 2007 wurden vor der ADCP-Messung von der Brücke knapp oberhalb des Pegels (Abb. 6.38) konventionelle Schwebstoffmessungen durchgeführt. Eine Abflussmessung mit einem hydrometrischen Flügel wurde am 9. Mai 2007 vor und am 10. Juli 2007

nach dem ADCP-Einsatz durchgeführt. Diese Daten wurden ebenfalls zur Validierung der ADCP-Ergebnisse herangezogen.

Abbildung 6.41 zeigt den zwischen Sommer 2006 und 2007 aufgezeichneten Abfluss am Pegel sowie die Ergebnisse der in dieser Zeit durchgeführten Schwebstoff-Einpunktmessungen.

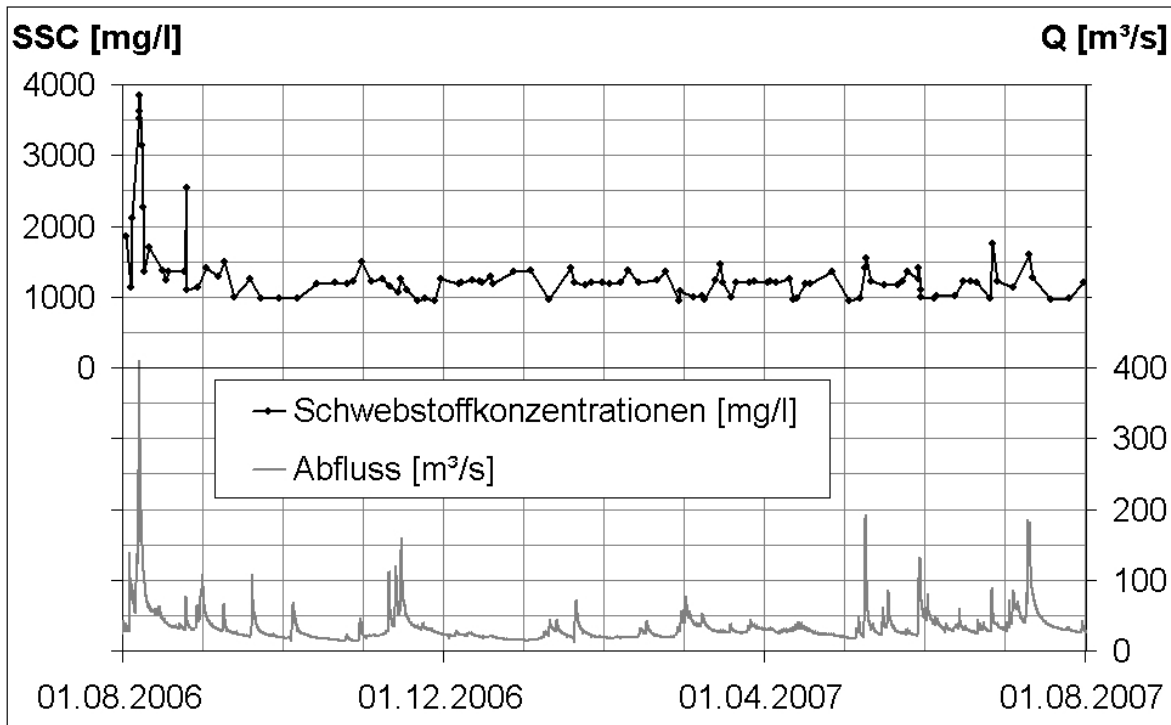


Abbildung 6.41: Abfluss und gemessene Schwebstoffkonzentrationen am Pegel Staudach an der Tiroler Achen

6.3.3 Messinstrumentierung

Für die Messungen an der Tiroler Achen wurde ein ADCP vom Typ *Workhorse Rio-Grande* von RDI mit einer Frequenz von 1200 kHz verwendet. Das Messgerät und das Trägerboot (*River Boat* von OceanScience, Kap. 4.2.3.2) wurden vom WWA Landshut zur Verfügung gestellt, die Messeinsätze vor Ort wurden mit personeller Unterstützung des WWA Traunstein durchgeführt. Das ADCP-Trägergerät wurde mit Hilfe der am Pegel installierten Seilkrananlage über den Querschnitt gezogen. In Verlängerung der Geräteachse des ADCP war auf dem Trägergerät ein 360°-Prisma

6 ADCP-Messungen

befestigt, das von einer am Ufer befindlichen Totalstation automatisch verfolgt wurde (Abb. 6.42).



Abbildung 6.42: Totalstation von Leica am Ufer und ADCP-Boot mit 360°-Prisma

Bei der Messung im Juli 2007 war die Lageerfassung mit der Totalstation aus organisatorischen Gründen nicht möglich. Hier wurde der Messpfad anhand der bekannten Koordinaten der Seilkrananlage im Nachhinein rekonstruiert und in die ADCP-Datensätze integriert. Die folgenden Kapitel beinhalten die Auswertung der Messdaten sowie die Interpretation der Ergebnisse. Der Vorgang der Umformatierung und Implementierung der Lageinformationen in die ADCP-Datensätze wurde bereits in Kap. 5.3 beschrieben.

6.3.4 Durchführung der ADCP-Messungen

Auch an der Tiroler Achen mussten für die Durchführung der ADCP-Messungen verschiedene Randbedingungen berücksichtigt werden.

Messbedingungen

Das Hochwasserereignis im August 2006 erreichte seinen Maximalabfluss von knapp $400 \text{ m}^3/\text{s}$ bereits am 07. August. Aufgrund der großen Mengen an Treibgut waren zu diesem Zeitpunkt keine ADCP-Messungen möglich. Die Tiroler Achen führte Äste, Baumstämme, Sträucher und ganze Bäume mit sich, und eine Kollision mit dem Trägerboot des ADCP durfte nicht riskiert werden. Neben der Gefahr des Messgerätverlustes wäre durch einen derartigen Zwischenfall womöglich auch die maximale Tragkraft der Seilkrananlage überschritten worden, was enorme Schäden sowie eine erhebliche Gefährdung des Messpersonals zur Folge gehabt hätte. Am Tag nach dem Scheiteldurchgang der Hochwasserwelle war die Treibgutmenge zurückgegangen und es konnten mehrere ADCP-Querungen durchgeführt werden.

Im Mai 2007 gelang es, den Scheitelabfluss der Hochwasserwelle von knapp $200 \text{ m}^3/\text{s}$ zu erfassen. Im Juli 2007 kam es zum Ablauf zweier Wellen mit bis zu $170 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb von zwölf Stunden. Der erste Scheitel erreichte den Pegelquerschnitt am 10. Juli um 02:00 Uhr früh. Aus Sicherheitsgründen war zu diesem Zeitpunkt keine Messung möglich. Im Laufe des Tages konnten jedoch während des ansteigenden Astes der zweite Welle mehrere Messfahrten mit dem ADCP durchgeführt werden.

Geräteeinstellungen

Die ADCP-Messungen am 08. August 2006 wurden mit folgenden Geräteeinstellungen durchgeführt.

WM1, WP1, BM5, BP1, TP000009, WS10, WN50, WF20, WV170

Im Mai 2007 wurde die Messzellentiefe von 10 auf 20 cm vergrößert. Die Messfahrten wurden mit folgender Konfiguration durchgeführt.

WM1, WP1, BM5, BP1, TP000020, WS20, WN25, WF20, WV205

Während der Messung am 10. Juli 2007 konnte der zurückgelegte Messpfad des ADCP-Trägerbootes nicht mit externen Lagemessgeräten aufgezeichnet werden. Aus diesem Grund legte man pro Messensemble zwei *Bottom Pings* (BP2) fest. Dadurch sollte die Qualität der BT-Daten verbessert werden, was sich auch positiv auf den daraus berechneten Messweg mit Referenz BT auswirkt. Folgende Gerätekonfiguration wurde für die Messfahrten verwendet.

6 ADCP-Messungen

WM1, WP1, BM5, BP2, TP000009, WS20, WN15, WF20, WV205

Die Messpfade der drei ADCP-Messungen sind in Abb. 6.43 dargestellt. Während des Messeinsatzes im August 2006 überquerte das Trägerboot mit dem ADCP und dem Prisma an Bord in einem Abstand von zirka sechs Metern stromabwärts des Tragseils der Seilkrananlage die Tiroler Achen. Diese Position des Messgeräts zum Zugseil der Seilkrananlage wurde während der Messfahrten im Mai 2006 beibehalten. Im Zuge des Messeinsatzes im Juli 2007 wurde der Abstand auf etwa vier Meter verkürzt, um das Trägerboot stabiler in der Strömung halten zu können, ein mögliches Schlingern zu verhindern und so den Messweg anhand der eingestellten, konstanten Überfahrtsgeschwindigkeit besser nachvollziehen zu können. Der Vergleich der erfassten Lagedaten mit den bekannten Koordinaten der Seilkrananlage zeigt, dass die von der Totalstation aufgezeichneten Messwerte eine zufrieden stellende Genauigkeit aufweisen.

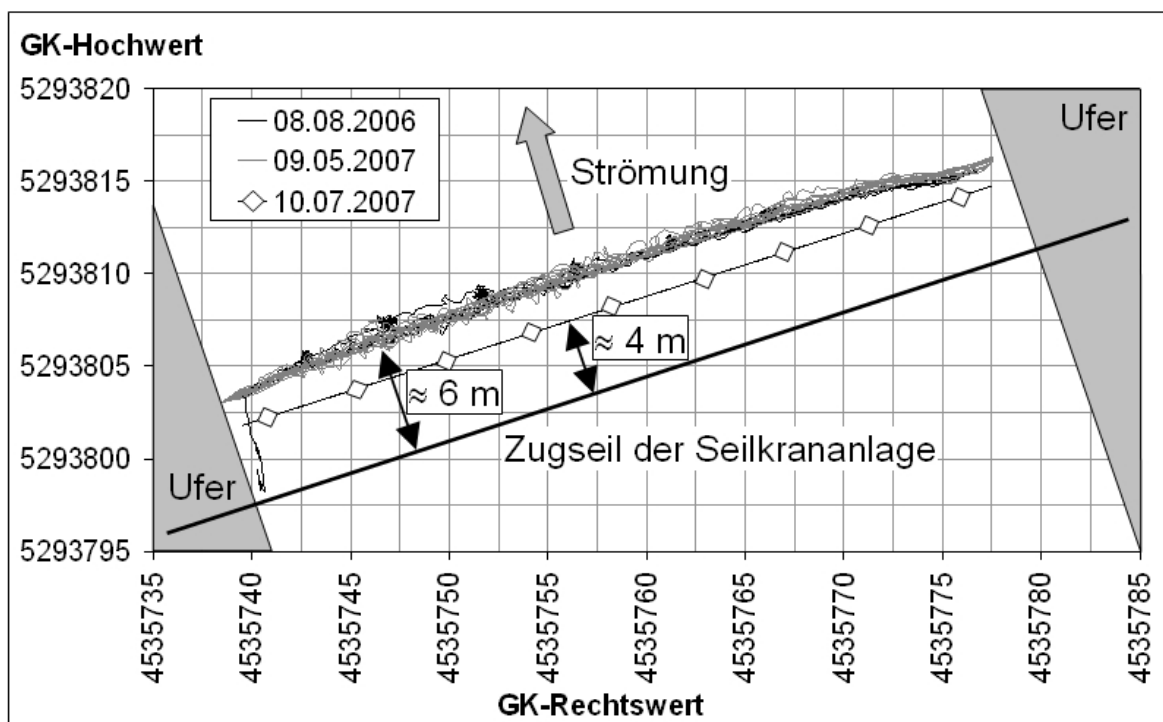


Abbildung 6.43: Aufgezeichnete Messwege am Pegel Staudach an der Tiroler Achen

Referenz BT versus Referenz GPS

Ein Blick auf die anhand der Kompass- und BT-Daten des ADCP ermittelten Mess-

wege (Abb. 6.49) vom August 2007 und vom Juli 2007 verdeutlicht die Notwendigkeit einer externen Lageerfassung. Die mit Referenz BT berechnete Bootsbe-
wegung weist vor allem im linken Bereich des Querschnitts einen erheblichen Längsversatz auf. Grund dafür sind – wie auch bei den Hochwassermessungen am Inn – Sedimentbewegungen im Bereich der Sohle. Bei der ADCP-Messung im Mai 2007 verlor der ADCP über weite Strecken hinweg den Kontakt zur Sohle und konnte keinen Messweg ermitteln – in diesem Fall sind die Messwerte mit Referenz BT unbrauchbar.

6.3.5 Auswertung der ADCP-Messungen

Um die aufgezeichneten Daten auswerten zu können, mussten diese zuerst jeweils mit Referenz BT und Referenz NONE (Kap. 5.1.1) in ASCII-Dateien exportiert werden. Die von der Totalstation aufgezeichneten Relativwerte wurden anhand bekannter Bezugspunkte in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem transformiert. Der Messweg vom 10. Juli 2007 wurde anhand der bekannten Koordinaten der Seilkrananlage, des gemessenen Abstands zwischen dem Zugseil und dem ADCP-Boot und der dokumentierten Start- und Endpunkte der Überfahrten rekonstruiert und nach dem in Kap. 5.3 beschriebenen Verfahren in die Datensätze integriert. Die so erhaltenen Informationen wurden zusammengeführt und in einer neuen ASCII-Datei mit Referenz GPS abgespeichert. Diese Datensätze konnten mit der Software *AGILA* eingelesen und weiter ausgewertet werden.

6.3.5.1 Mittlere Fließgeschwindigkeiten und Abflüsse

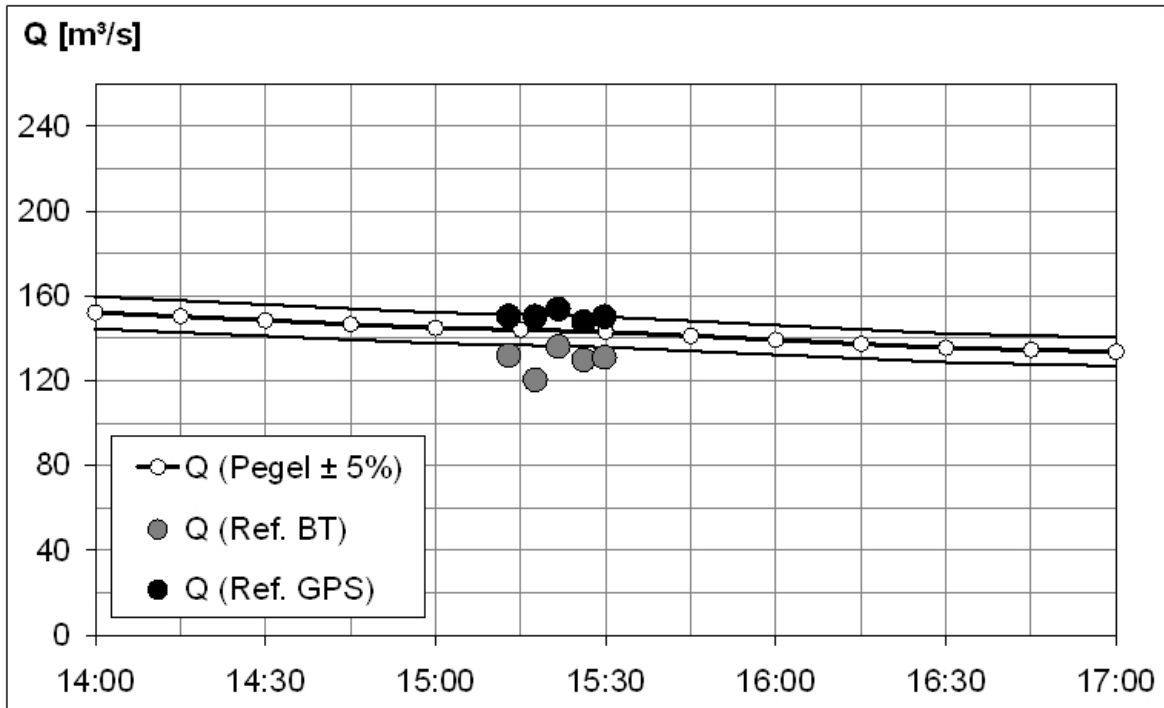
Am 8. August 2006 wurden insgesamt sechs Messfahrten durchgeführt. Die erste Querung musste aufgrund eines in Gewässermitteln angetriebenen Baumstamms unterbrochen werden, die restlichen fünf Messfahrten konnten erfolgreich beendet und für die anschließende Auswertung verwendet werden. Abbildung 6.44(a) zeigt den am Pegel aus den erfassten Wasserständen berechneten Abfluss und die Einzelergebnisse der ADCP-Fahrten mit Referenz BT und Referenz GPS.

Es ist zu sehen, dass die Auswertung der erfassten Daten mit Referenz BT zu einer Unterschätzung der Ergebnisse führt. Die unter Berücksichtigung der extern erfassten Lageinformationen ermittelten Abflüsse liegen im Vergleich zu den Pegelwerten innerhalb eines Schwankungsbereichs von $\pm 5\%$, was als durchaus zufriedenstellende

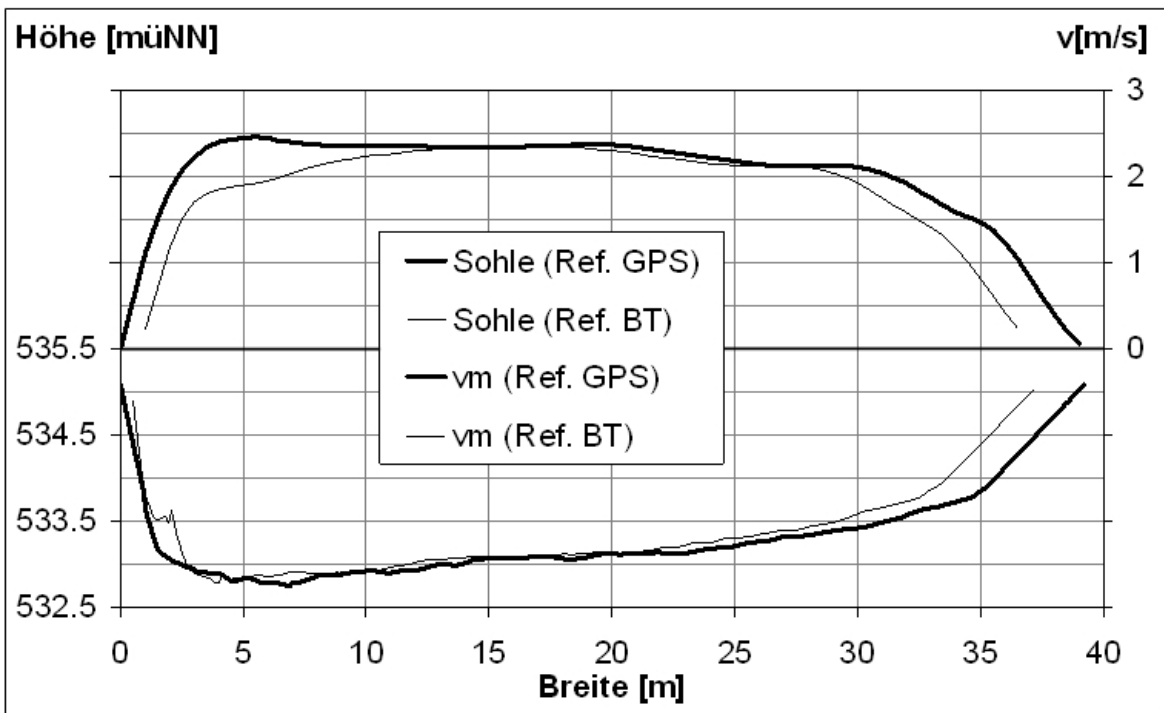
Übereinstimmung gewertet werden kann. Die mittlere Fließgeschwindigkeit bei Referenz BT lag bei $v_{m,BT} = 2.02$ m/s, mit Referenz GPS wurde eine mittlere Geschwindigkeit von $v_{m,GPS} = 2.17$ m/s berechnet. Deutlich erkennbar bei der Betrachtung der $v_{m,GPS}$ -Linie ist das linksseitige Maximum des Verlaufs. Im Bereich der größten Fließtiefen betragen die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten 2.5 m/s und nehmen bis zum rechten Ufer hin stetig ab.

Die sechs Messfahrten vom 9. Mai 2007 konnten allesamt für die weiterführende Auswertung verwendet werden. Abbildung 6.45(a) zeigt den am Pegel aus den erfassten Wasserständen berechneten Abfluss, das Ergebnis der Flügelmessung, sowie die Einzelergebnisse der ADCP-Messfahrten mit Referenz BT und Referenz GPS. Es ist zu sehen, dass die mit Referenz BT ermittelten Abflüsse eine erhebliche Streuung aufweisen und die realen Verhältnisse sowie unter- als auch überschätzen. Der Grund dafür ist – wie bereits erwähnt – in den lückenhaften *Bottom Track*-Daten zu suchen. Da der ADCP in vielen Ensembles kein BT-Signal erfassen konnte, fehlen hier die Lageinformationen. Die betroffenen Ensembles werden verworfen und müssen anhand der Nachbarensamples inter- bzw. extrapoliert werden, was gewisse Unsicherheiten beinhaltet.

Die unter Berücksichtigung der extern erfassten Lageinformationen ermittelten Abflüsse zeigen eine durchaus zufrieden stellende Übereinstimmung mit den Pegelwerten – sie liegen innerhalb eines Schwankungsbereiches von $\pm 5\%$. Die Flügelmessungen decken sich ebenfalls sehr gut mit den Ergebnissen der Abflussberechnung aus den gemessenen Pegelständen.

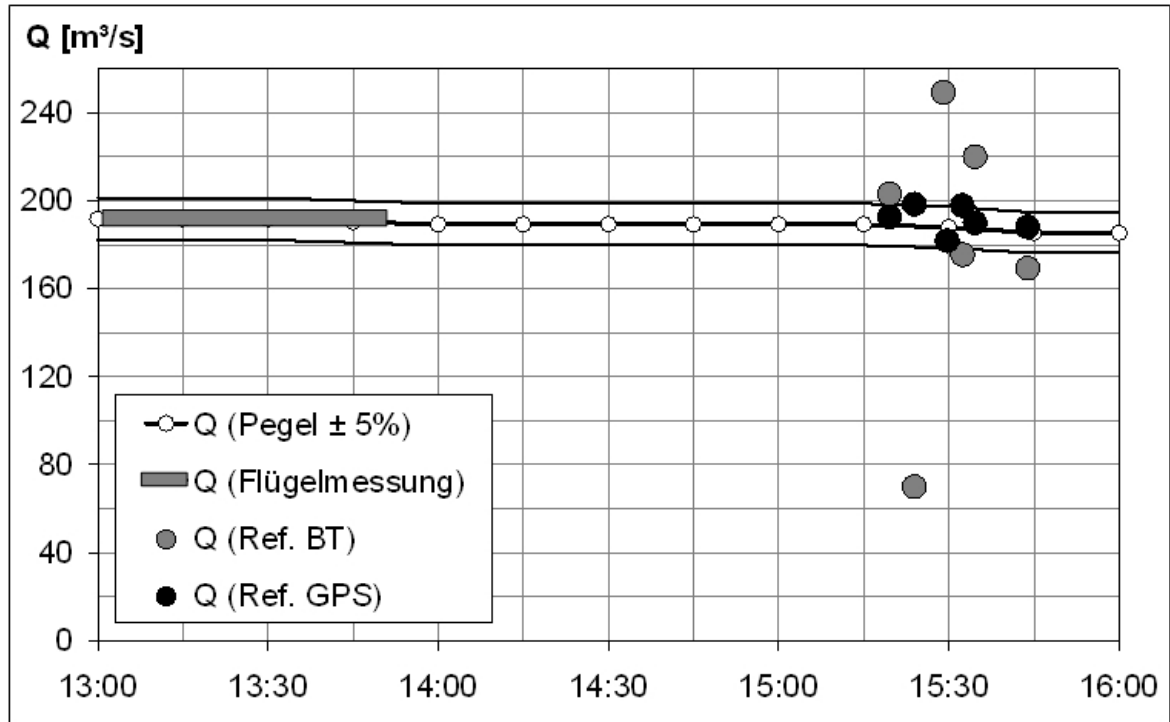


(a) Abflusswerte: Pegeldaten, ADCP-Werte (BT und GPS)

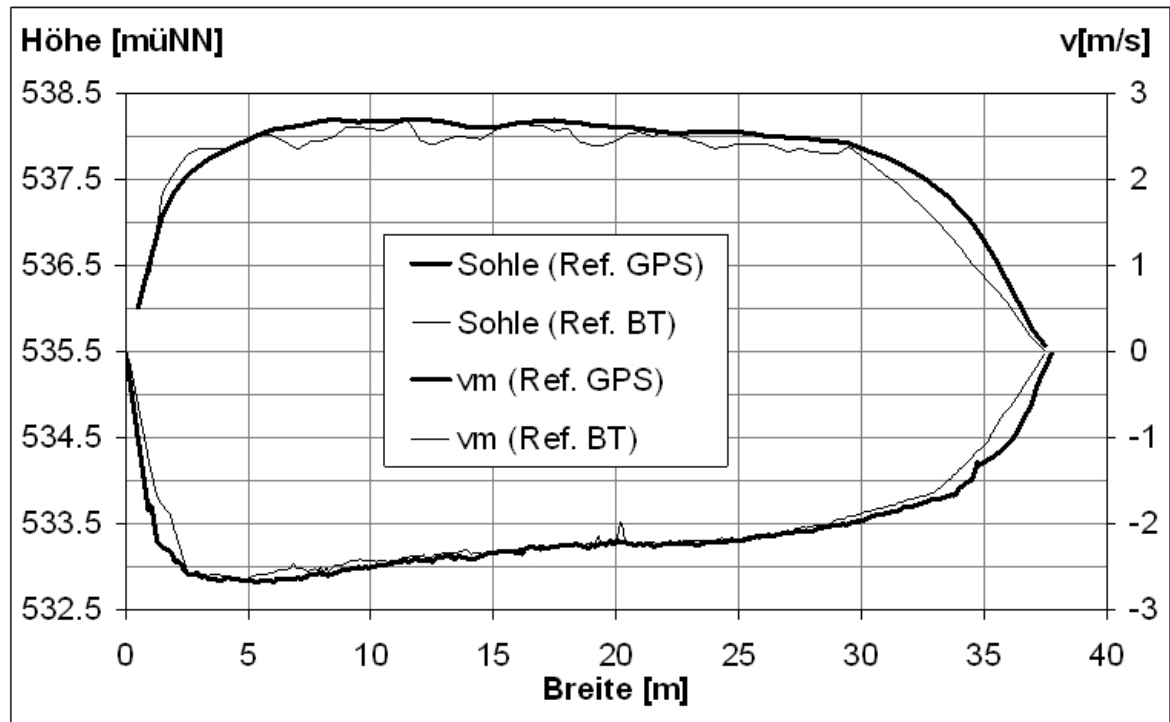


(b) mittlere Sohlen und v_m -Linien (BT und GPS)

Abbildung 6.44: ADCP-Messung am 8. August 2006



(a) Abflusswerte: Pegeldata, Flügelmessung und ADCP-Werte (BT und GPS)



(b) mittlere Sohlen und v_m -Linien (BT und GPS)

Abbildung 6.45: ADCP-Messung am 9. Mai 2007

Wie in Abb. 6.45(b) zu sehen ist, stimmen die Mittelwerte der sechs Querungen mit Referenz BT und Referenz GPS eigentlich gut überein. Die mittlere Fließgeschwindigkeit bei Referenz BT liegt bei $v_{m,BT} = 2.32$ m/s, mit Referenz GPS wurde eine mittlere Geschwindigkeit von $v_{m,GPS} = 2.42$ m/s berechnet. Im Vergleich zur Verteilung der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten vom August 2006 fällt auf, dass das damals beobachtete, markante Geschwindigkeitsmaximum im Bereich des linken Ufers im Mai 2007 nicht mehr vorhanden war. Die $v_{m,GPS}$ -Linie hat ihr Maximum zwar auch in der linken Querschnittshälfte, die Verteilung ist aber um einiges symmetrischer als im August 2006.

Die aus den sechs Überfahrten gemittelten Sohlenverläufe mit Referenz GPS und Referenz BT weisen eine überraschende Übereinstimmung auf. Das gute Endergebnis der Datenauswertung mit Referenz BT ist aber lediglich das Resultat einer Mittelwertbildung von zu großen und zu kleinen Einzelwerten. Aufgrund der unzureichenden BT-Daten schwanken die aufgezeichneten Gewässerbreiten der Einzelfahrten zwischen 20 und 50 m, wie Abb. 6.46 veranschaulicht. Aus diesem Grund variieren auch die berechneten Abflüsse zwischen 70 und 250 m³/s, was eine Differenz von +38 % bzw. -61 % vom Mittelwert $Q_m = 181$ m³/s bedeutet. Eine Auswertung der Daten mit Referenz BT ist unter diesen Umständen nicht zielführend.

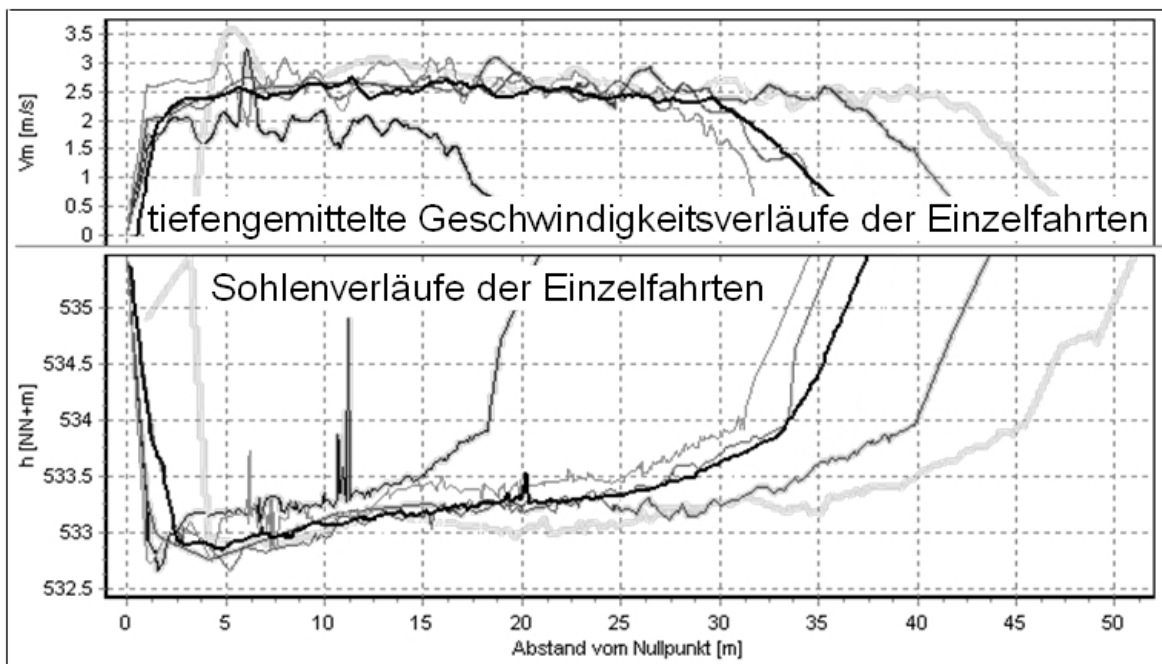
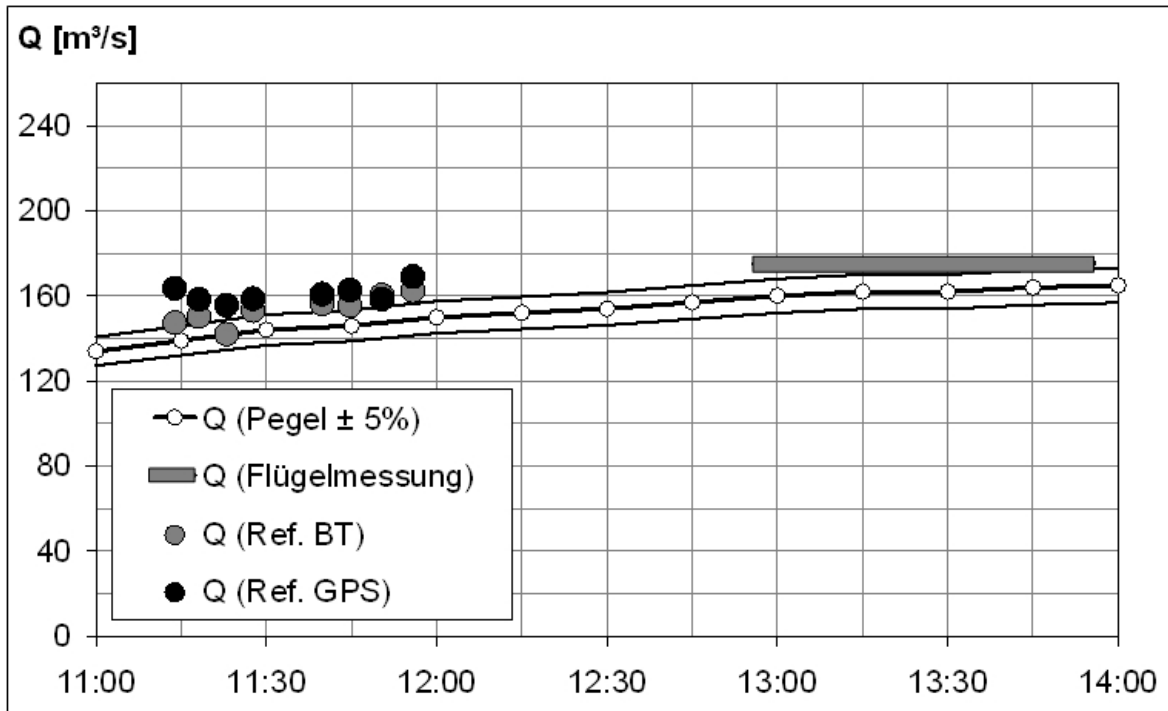


Abbildung 6.46: Darstellung der Sohlverläufe und v_m -Linien der Einzelfahrten mit Referenz BT in *AGILA* (ADCP-Messung am 9. Mai 2007)

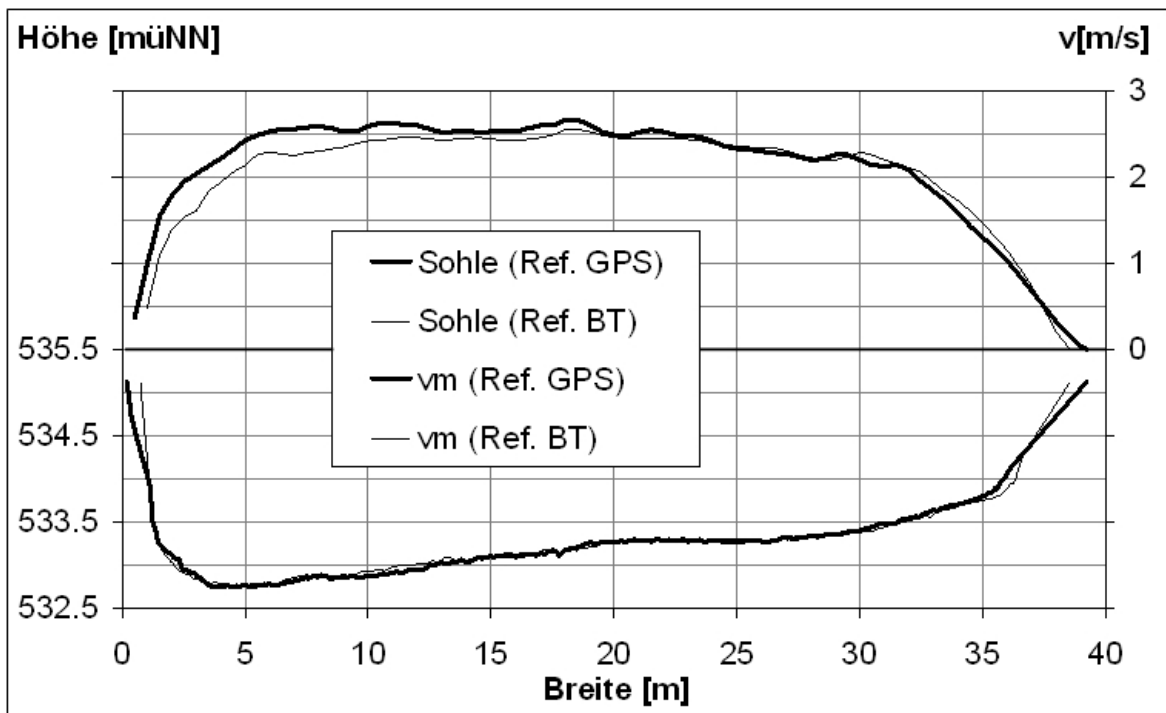
Am 10. Juli 2007 konnten während des ansteigenden Astes der nachlaufenden von zwei aufeinander folgenden Wellen mit erhöhtem Abfluss acht Messfahrten durchgeführt werden. Nach dem ADCP-Einsatz wurde der Abfluss am Pegel mit Hilfe von Flügelmessungen messtechnisch erfasst. Abbildung 6.47(a) beinhaltet den am Pegel aus den erfassten Wasserständen berechneten Abfluss, das Ergebnis der Flügelmessung, sowie die Einzelergebnisse der Messfahrten mit dem ADCP.

Bei den Pegel-Abflusswerten ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um Rohdaten handelt. Für die Berechnung des Abflusses aus den Wasserständen wurde ein ETA-Wert von 0.6 verwendet. Vergleicht man den Pegelabfluss mit dem Ergebnis der Flügelmessungen, so ergibt sich ein Unterschied von 7.6 %. Die Auswertung der Flügelmessungen lieferte eine ETA-Wert von 0.864 des Messeinsatzes. Das bedeutet, dass der Pegelquerschnitt während der Messung am 10. Juli 2007 eine größere Abflusskapazität besaß als durch die damals verwendete Abflusskurve angenommen. Unter diesem Aspekt müssen auch die Ergebnisse der ADCP-Messungen beurteilt werden. Die Grafik in Abb. 6.47(a) zeigt, dass die aus den ADCP-Daten berechneten Abflüsse – unabhängig von der verwendeten Referenzierung – durchwegs über den Pegelwerten liegen. Auch das bereits bekannte Phänomen, dass aufgrund vorhandener Sedimentbewegungen in Sohlnähe der Gesamtabfluss mit Referenz BT unterschätzt wird, trat bei dieser Messung auf. Wie in Abb. 6.47(b) zu sehen ist, unterscheidet sich die Querschnittsfläche mit Referenz BT und mit Referenz GPS um nur 1 m². Der Abfluss ist jedoch bei einer Referenzierung auf das *Bottom Track*-Signal um fast 5 % geringer. Die mittlere Fließgeschwindigkeit bei Referenz BT lag bei $v_{m,BT} = 2.22$ m/s, mit Referenz GPS wurde eine mittlere Geschwindigkeit von $v_{m,GPS} = 2.29$ m/s berechnet.

Betrachtet man die Form der $v_{m,GPS}$ -Linie dieser Messung, so ist diese der Verteilung vom Mai 2006 ähnlich. Die Kurve hat ihr Maximum in der linken Hälfte des Querschnitts, die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten sind aber über einen Großteil der Querschnittsbreite fast konstant und nehmen erst nahe des rechten Ufers ab.



(a) Abflusswerte: Pegeldaten, Flügelmessung und ADCP-Werte (BT und GPS)



(b) mittlere Sohlen und v_m -Linien (BT und GPS)

Abbildung 6.47: ADCP-Messung am 10. Juli 2007

6.3.5.2 Sohlenlagen und Geschiebebewegung

Um die Höhenlagen der Querschnittsverläufe während erhöhtem Abfluss beurteilen zu können, ist der Vergleich mit Messwerten aus Normalabflusszeiten erforderlich. An der Tiroler Achen liegt zusätzlich zu den bereits beschriebenen ADCP-Einsätzen eine weitere Messung am 3. April 2007 während Normalabfluss vor. Da die Tiroler Achen ein frei fließendes Gewässer ohne Querbauwerke und somit ohne Stauzielregelung ist, variieren die Wasserspiegel in Abhängigkeit des Abflusses sehr stark. Während der ADCP-Messung im April 2007 betrug der Abfluss etwa $28 \text{ m}^3/\text{s}$, der Wasserspiegel lag um mehr als 1.3 m tiefer als bei den Hochwassermessungen. Daraus resultieren sehr geringe Fließtiefen von im Mittel nur 0.7 m und aufgrund des sehr flach auslaufenden rechten Ufers eine erhebliche Reduktion des messtechnisch erfassbaren Fließquerschnitts. Abbildung 6.48 zeigt die mit dem ADCP erfassten Querschnittsverläufe während der vier Messeinsätze.

Wie zu sehen ist, hat sich der Pegelquerschnitt innerhalb der durch die Messeinsätze umfassten Zeitspanne von elf Monaten geringfügig verändert. Unabhängig vom Abfluss ist eine leichte Anlandungstendenz von 2006 auf 2007 erkennbar. Vor allem im mittleren Bereich des Querschnitts ist die Sohle um bis zu 20 cm nach oben gewandert. Die Messergebnisse vom Juli 2007 zeigen, dass die Anlandungen im linken Bereich wieder abgetragen wurden. Lediglich auf den mittleren 7 m des Fließquerschnitts ist die Sohle höher als 2006.

Während der ADCP-Messung am 8. August 2006 betrug der unter dem Wasserspiegel vom April 2007 (533.86 müNN) befindliche Teil der durchflossenen Querschnittsfläche 24.5 m^2 . Vergleicht man diesen Wert mit den berechneten Querschnittsflächenanteilen der Messungen im Jahr 2007, so erhält man für die Aprilmessung 2007 eine Fläche von 22.8 m^2 (-7 %), für die Messung im Mai 2007 nur 21.4 m^2 (-13 %) und für die Messung im Juli 2007 wieder einen Anstieg auf 23.6 m^2 (-4 %). Die Veränderungen der Sohlenhöhen im Pegelquerschnitt liegen also innerhalb einer Schwankungsbreite von 15 %. Die Auswirkungen auf den Abfluss fallen in der gleichen Größenordnung aus. Regelmäßige Abflussmessungen sind daher notwendig, um die ETA-Werte⁵¹ der Abflusskurve am Pegel an den jeweiligen Zustand der Sohlenlagen anzupassen.

⁵¹Bei einem zeitlich veränderlichen Gewässerzustand kann über einen längeren Zeitraum keine gültige Wasserstands-Abflussbeziehung (Abflusskurve) angegeben werden. Mit Hilfe des ETA-Verfahrens wird eine Anpassung der Abflusskurve an die jeweiligen Bedingungen ermöglicht. Das Verfahren setzt voraus, dass jede durchgeführte Abflussmessung absolut korrekt ist und Abweichungen von der zuletzt gültigen Abflusskurve nur aus Änderungen im Gewässer resultieren.

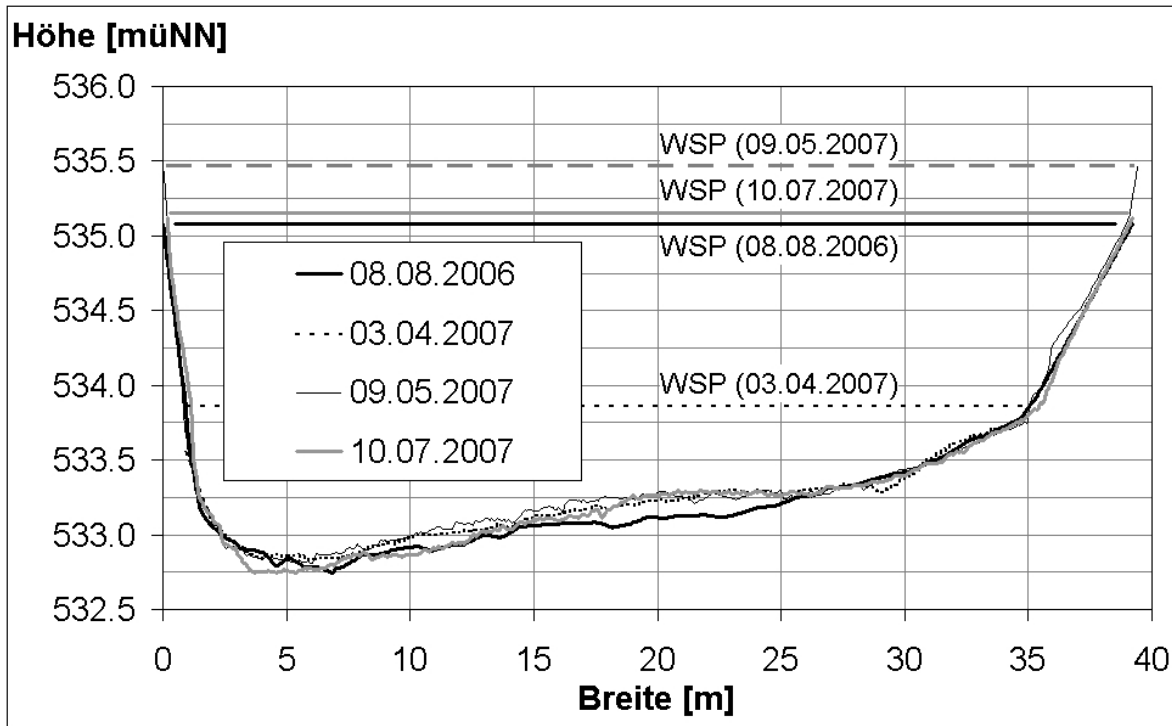
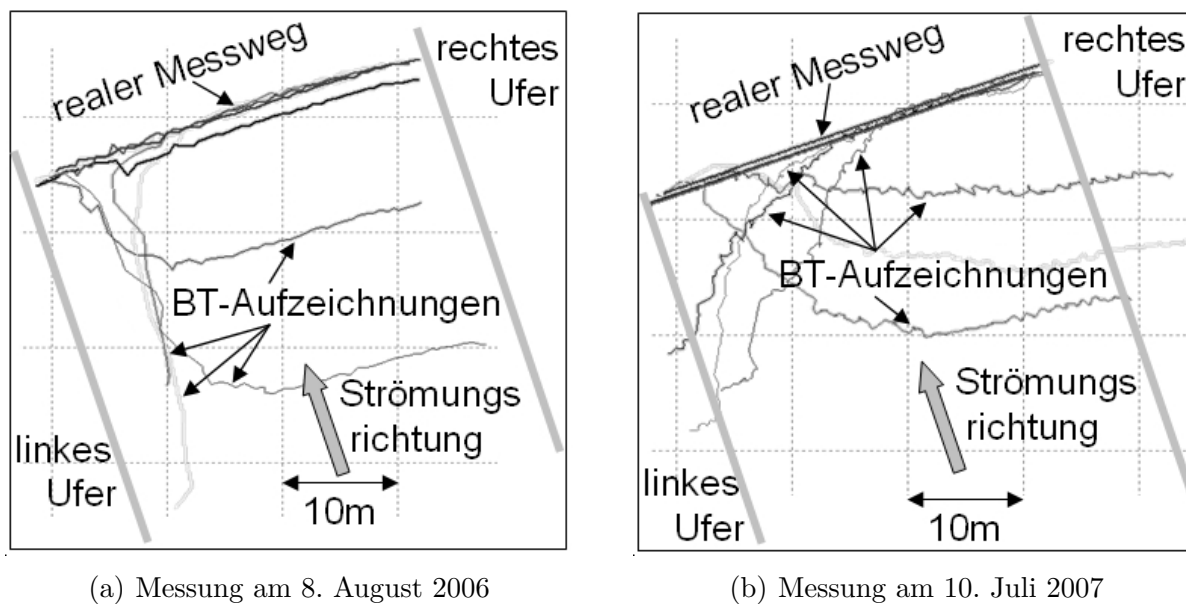


Abbildung 6.48: Darstellung der vom ADCP aufgezeichneten Sohlenverläufe während verschiedener Messeinsätze (Sommer 2006 – Sommer 2007)

Neben der Auswertung der Sohlhöhenlagen wurde versucht, aus dem Vergleich der BT-Daten mit den zusätzlich erfassten Lageinformationen Rückschlüsse auf den Geschiebetrieb im Querschnitt zu ziehen. Da die *Bottom Track*-Daten der Messung vom Mai 2007 sehr große Lücken aufweisen, wurde auf eine Auswertung dieser Messung verzichtet. Im Folgenden werden die Hochwassermessungen vom August 2006 und vom Juli 2007 betrachtet. Abbildung 6.49 beinhaltet die vom ADCP aus den *Bottom Track*-Daten ermittelten Messwege im Vergleich zu den aufgezeichneten Lageinformationen der Totalstation (Messung vom 8. August) sowie zu den nachträglich rekonstruierten Messwegen (Messung vom 10. Juli). Der aus der Sedimentbewegung an der Sohle resultierende Längsversatz ist sehr deutlich erkennbar. Außerdem fällt in der Darstellung auf, dass die Geschiebegeschwindigkeiten bei den beiden Ereignissen über die Querschnittsbreite sehr unterschiedlich verteilt gewesen sind. Die Ergebnisse der Messung vom August 2006 zeigen, dass die BT-Wege nur im linken Teil des Querschnitts von den Lageinformationen der Totalstation abweichen. Im rechten Bereich des Querschnitts sind die Messpfade annähernd parallel. Betrachtet man hingegen die Lageinformationen vom Juli 2007, so ist die Verfälschung aufgrund des Geschiebetriebs über die Gewässerbreite annähernd regelmäßig verteilt.



(a) Messung am 8. August 2006

(b) Messung am 10. Juli 2007

Abbildung 6.49: Vergleich der *Bottom Track*-Aufzeichnungen mit den wahren Messwegen

Vor allem bei der Messung vom August 2006 erschien es nicht zielführend, aus dem aufsummierten Längsversatz des BT-Wegs einer Überfahrt eine mittlere Geschiebege-
 schwindigkeit im Querschnitt zu berechnen. Deshalb wurden die Bottom Track-Daten der einzelnen Messensembles genauer untersucht. Die vom ADCP mit Referenz BT ermittelten Bootsgeschwindigkeiten wurden in die Komponenten parallel zur Überfahrtsrichtung und parallel zur Fließgeschwindigkeit umgerechnet.

Die Seilkrananlage am Pegelquerschnitt Staudach überspannt das Gewässer nahezu rechtwinkelig zur Hauptströmungsrichtung. Das bedeutet, dass auch der ADCP während der Messungen rechtwinkelig zu den Fließgeschwindigkeitsvektoren über den Fluss bewegt worden ist. Wäre im Messquerschnitt kein Geschiebetrieb vorhanden gewesen, wären die Komponenten der Bootsgeschwindigkeit in Fließrichtung – bis auf kleine Schwankungen aufgrund des Schlingerns des Trägerbootes – gleich Null. Die Komponenten der Bootsgeschwindigkeit in Überfahrtsrichtung entsprechen der eingestellten Geschwindigkeit an der Seilkrananlage.

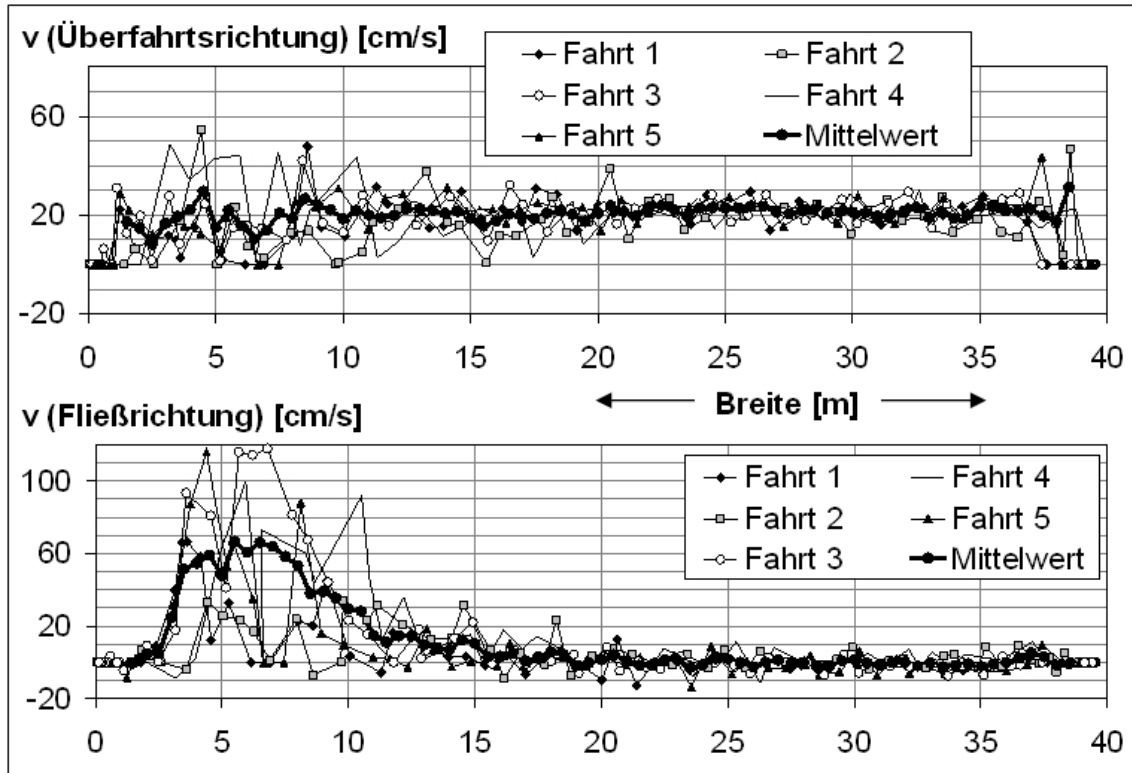
Wie in Abb. 6.50(a) zu sehen ist, schwanken die aus den Bootsgeschwindigkeiten berechneten Komponenten in Überfahrtsrichtung am 8. August 2006 im Bereich von $v^{par} = 0.08 - 0.4$ m/s, der Mittelwert liegt bei $v_m^{par} = 0.2$ m/s. Dieses Ergebnis entspricht der an der Seilkrananlage eingestellten Geschwindigkeit. Die Komponenten vertikal zur Überfahrtsrichtung weisen hingegen eine große Schwankung von

$v^{vert} = 0 - 1.1$ m/s auf. Im rechten Bereich des Querschnitts pendeln die Werte um Null, was ein Indiz für eine ruhende Sohle ist. Der Mittelwert der Geschwindigkeitsanteile im linken Bereich deutet darauf hin, dass im Sohlbereich die Sedimente mit einer Geschwindigkeit von bis zu 0.7 m/s stromabwärts bewegt werden. Der Grund für die starke lokale Konzentration der Geschiebegeschwindigkeiten im linken, ufernahen Bereich ist unter anderem in den Geschwindigkeitsverteilungen zu suchen. Wie Abb. 6.44(b) zeigt, hat der Verlauf der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten ebenfalls im linken Uferbereich sein Maximum und fällt im weiteren Verlauf über die Gewässerbreite deutlich ab. Es ist aber auch nicht ganz auszuschließen, dass es sich bei den erfassten Bewegungen nicht um Geschiebetransport handelt, sondern um eine Schicht mit sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen, die in unmittelbarer Nähe zur Sohle transportiert wird. Rennie et al. [2002] beobachtete am Fraser River (Kanada) das gleiche Phänomen. Eine exakte Unterscheidung zwischen Geschiebetrieb und sohlnahem Schwebstofftransport ist mit der ADCP-Technik nicht möglich. Es ist davon auszugehen, dass derart schwierige Fragestellungen auch unter Verwendung konventioneller Methoden nicht beantwortet werden können.

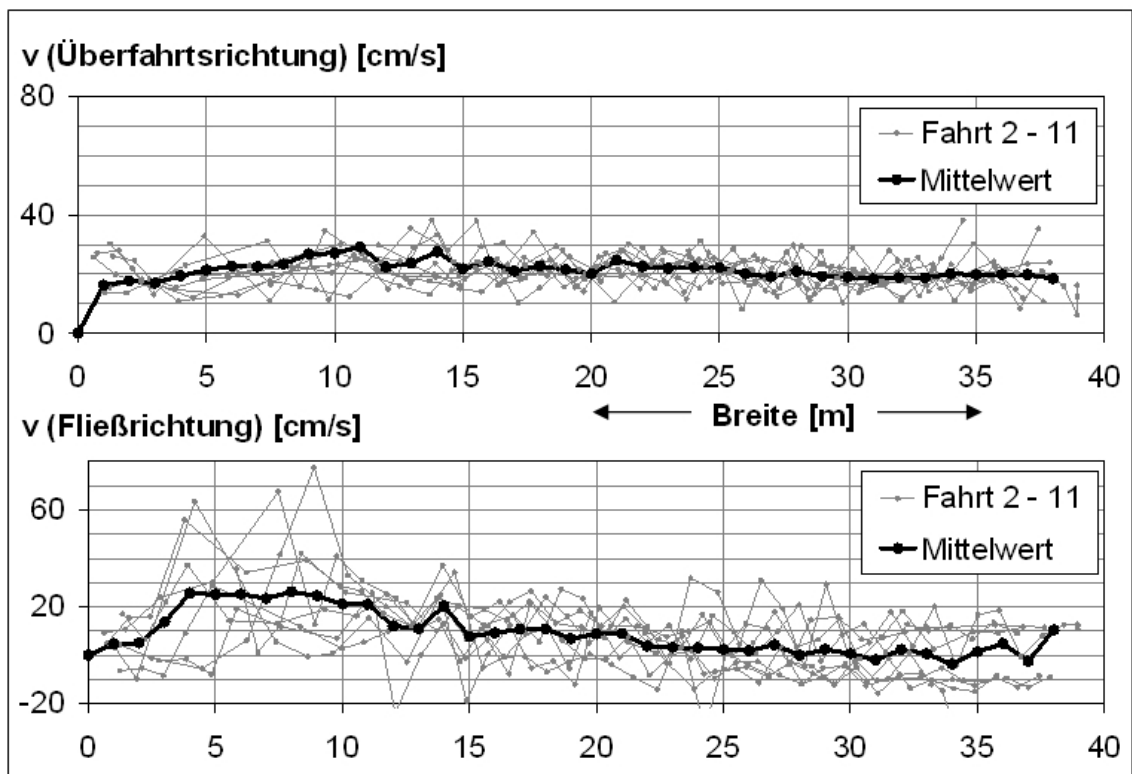
Die Ergebnisse der Messung vom 10. Juli 2007 zeigen eine etwas gleichmäßigere Verteilung der Sedimentgeschwindigkeitskomponenten über die Querschnittsbreite. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in der Darstellung in Abb. 6.50(b) auf eine unterschiedliche Signatur der einzelnen Überfahrten verzichtet worden. Die Anteile der Bootsgeschwindigkeit (Referenz BT) in Überfahrtsrichtung pendeln auch hier um einen Mittelwert von $v_m^{par} = 0.2$ m/s, was der an der Seilkrananlage eingestellten Überfahrtsgeschwindigkeit entspricht. Die Komponenten in Fließrichtung liegen im rechten Bereich des Querschnitts nahe Null. Der Anstieg der Geschwindigkeitskurve beginnt hier jedoch schon wesentlich früher als im August 2006. War damals die Geschiebegeschwindigkeit nur auf den linken 15 m zu beobachten, so erstreckt sich bei dieser Messung die Sedimentbewegung an der Sohle auf einen 25 m breiten Bereich. Dieser Unterschied entspricht auch den Differenzen der Fließgeschwindigkeitsverteilungen bei beiden Messungen. Im Juli 2007 liegt das Maximum der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten zwar auch im linken Bereich des Fließquerschnitts, der Abfall in Richtung des rechten Ufers fällt aber lange nicht so deutlich aus wie bei der Messung im August 2006. Dementsprechend ist die Sohle auch auf einem größeren Bereich der Querschnittsbreite in Bewegung. Der berechnete Mittelwert der Geschwindigkeiten in Fließrichtung erreicht maximal $v^{vert} = 0.3$ m/s. Durch die Differenzen im Abfluss sind dermaßen große Abweichungen nicht erklärbar, weil hier nur Unterschiede von wenigen Prozent beobachtet wurden. Es ist daher davon auszugehen, dass im August

6 ADCP-Messungen

2006 die Auswertung der Geschiebegeschwindigkeiten durch den sohnahen Transport von Schwebstoffen nach oben hin verfälscht worden ist. Der Grund für dieses Phänomen muss ereignisbezogen gesucht werden. Eine Möglichkeit stellt ein durch Starkregen, Uferanbrüche, oder Murabgänge verursachter erhöhter Sedimenteintrag im Oberwasser dar, der temporär zu einer sohnahen Abfuhr von großen Mengen an Sedimenten geführt haben könnte.



(a) Messung am 8. August 2006



(b) Messung am 10. Juli 2007

Abbildung 6.50: Komponenten der Bootsgeschwindigkeit (Referenz BT) in Überfahrtsrichtung und in Fließrichtung

6.3.5.3 Echointensitäten und Schwebstoffkonzentrationen

Für die Auswertung der ADCP-Daten in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen wurden die aufgezeichneten Echointensitäten mit konventionellen Vielpunktmessungen verglichen. Abbildung 6.53 zeigt die aus den ADCP-Fahrten ermittelten Verteilungen der Rückstreuintensitäten. Wie auch am Inn wurden pro Messeinsatz alle vorhandenen Messfahrten gemittelt, um das durch die Momentaufnahme der Strömung verursachte *Rauschen* zu reduzieren. Zeitnah zu zwei ADCP-Messeinsätzen wurden von der Brücke oberhalb des Pegels Staudach aus Vielpunktmessungen der Schwebstoffkonzentrationen durchgeführt. Am 8. August 2006 wurden zwischen 13:00 - 14:25 über den Querschnitt verteilt 15 Proben entnommen, die an der TUM ausgewertet wurden (Abb. 6.51). Die ADCP-Messungen an diesem Tag fanden zwischen 15:10 - 15:30 statt. Zwischen den beiden Messungen sank der Abfluss von 161 auf 143 m³/s. Am 9. Mai 2007 wurden in der Zeit von 09:00 - 11:00 insgesamt 29 Proben entnommen und danach von Mitarbeitern des WWA Traunstein ausgewertet (Abb. 6.51). Die ADCP-Überfahrten an diesem Tag wurden zwischen 15:15 - 15:45 durchgeführt. Der Abfluss lag zu Beginn der Schwebstoffmessung bei 158 m³/s, erreichte gegen Mittag seinen Maximalwert von 192 m³/s und fiel dann bis zum Ende der ADCP-Messungen leicht ab. Durch die Abflussschwankungen während und zwischen den einzelnen Messungen können die Ergebnisse zwar miteinander verglichen werden, die Vorgehensweise ist jedoch mit gewissen Unsicherheiten behaftet, weil davon ausgegangen werden muss, dass sich vor allem während des Ablaufs von Hochwasserwellen mit dem Abfluss auch die Schwebstoffkonzentrationen ändern.

Abbildung 6.51 ist zu entnehmen, dass die Schwebstoffkonzentrationen im August 2006 trotz des geringeren Abflusses während der Messungen um einiges größer waren als im Mai 2007. Der Grund dafür ist in der zeitlichen Entwicklung des Abflusses vor den Messungen zu suchen. Wurden die Messungen am 8. August 2006 während des absteigenden Astes einer Hochwasserwelle mit $Q_{max} \approx 400 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt, erfasste man im Mai 2007 mit etwa 190 m³/s fast den Scheitel der Hochwasserwelle. Aufgrund der starken Auswirkungen der jeweiligen Abflussvorgeschichte auf die Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt ist es nicht möglich, eine direkte Beziehung zwischen den Größen „Abfluss“ und „Schwebstoffkonzentrationen“ aufzustellen.

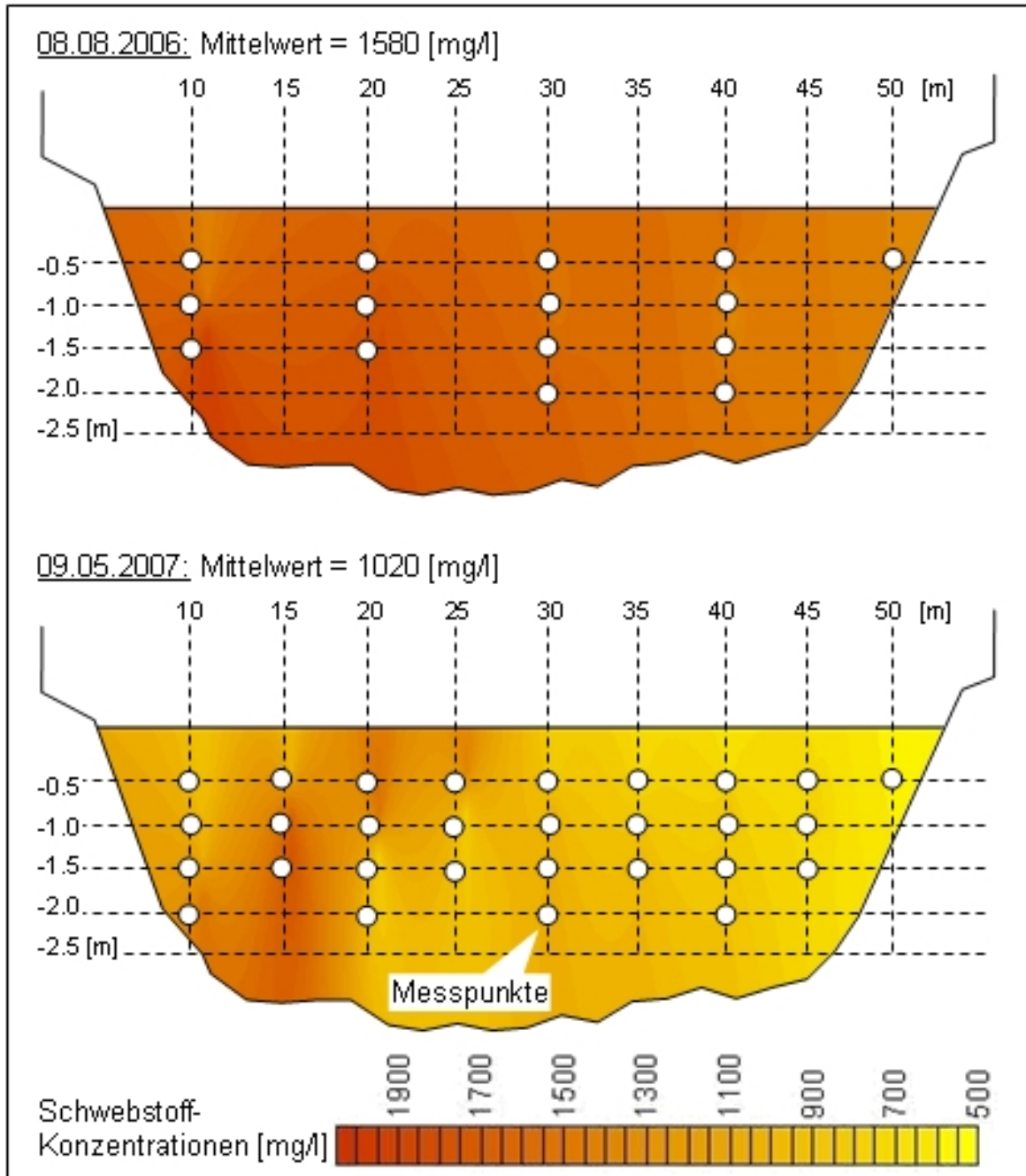


Abbildung 6.51: Mittels Vielpunktmessungen ermittelte Verteilungen der Schwebstoffkonzentrationen am Pegel Staudach

Aus den gemittelten EI-Verteilungen der beiden ADCP-Einsätze wurden jene Werte ausgelesen, deren Lage im Querschnitt ungefähr mit jener der konventionellen Probenentnahmen übereinstimmt. Diese Daten wurden den Schwebstoffkonzentrationen

gegenübergestellt und die Variablen A und B aus Glg. 4.19 ermittelt. Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise sind in Abb. 6.52 dargestellt.

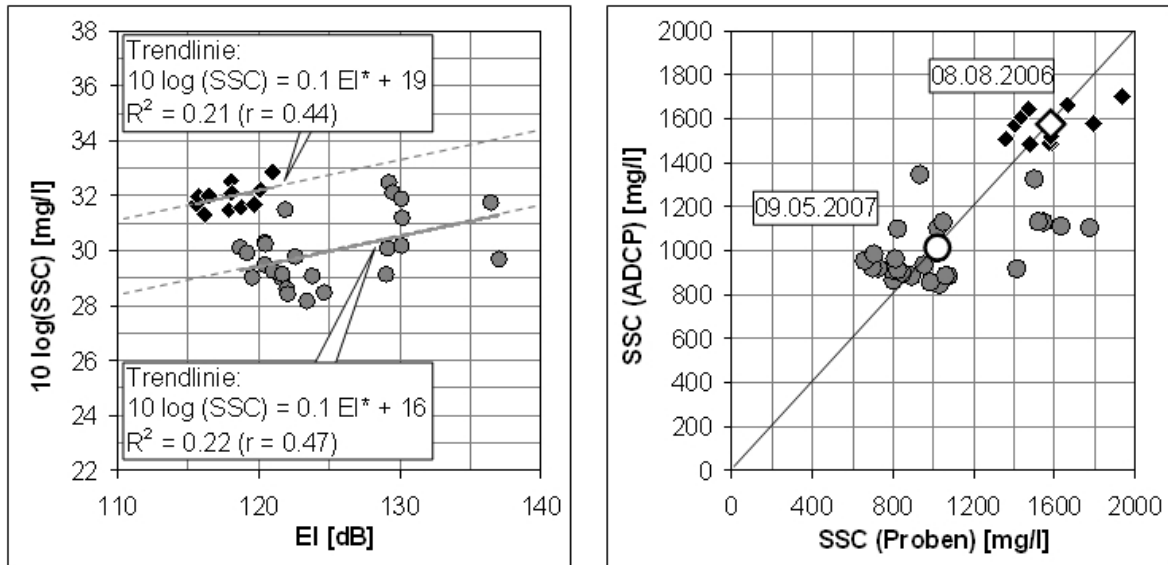


Abbildung 6.52: Aus den ADCP-Echointensitäten berechnete Schwebstoffkonzentrationen

Betrachtet man die Geraden, die für die beiden Messungen die Beziehung zwischen den EI-Werten des ADCP und dem Logarithmus der Schwebstoffkonzentrationen darstellen, so fällt auf, dass die Neigung der beiden Linien gleich ist. In beiden Fällen ist $A = 0.1$, B hingegen variiert von 16 - 19. Das Bestimmtheitsmaß beträgt für beide Messungen nur etwas mehr als 0.2, was als relativ schlechte Übereinstimmung gewertet werden muss. Betrachtet man jedoch die Gegenüberstellung der aus den ADCP-Messungen berechneten Schwebstoffkonzentrationen mit den gemessenen Konzentrationen, so kann man erkennen, dass die Mittelwerte der beiden Messungen fast perfekt übereinstimmen. So lag die aus den Vielpunktentnahmen berechnete mittlere Schwebstoffkonzentration am 8. August 2006 bei 1580 mg/l, aus den ADCP-Daten wurde ein Mittelwert von 1584 mg/l berechnet. Am 9. Mai 2007 lag der aus den konventionell ermittelten Schwebstoffkonzentrationen bestimmte Mittelwert bei 1020 mg/l, das Ergebnis der ADCP-Messungen betrug 1006 mg/l. Das bedeutet, dass bei Kenntnis der beiden Parameter A und B die Auswertung der ADCP-Daten sehr gute Ergebnisse bringt.

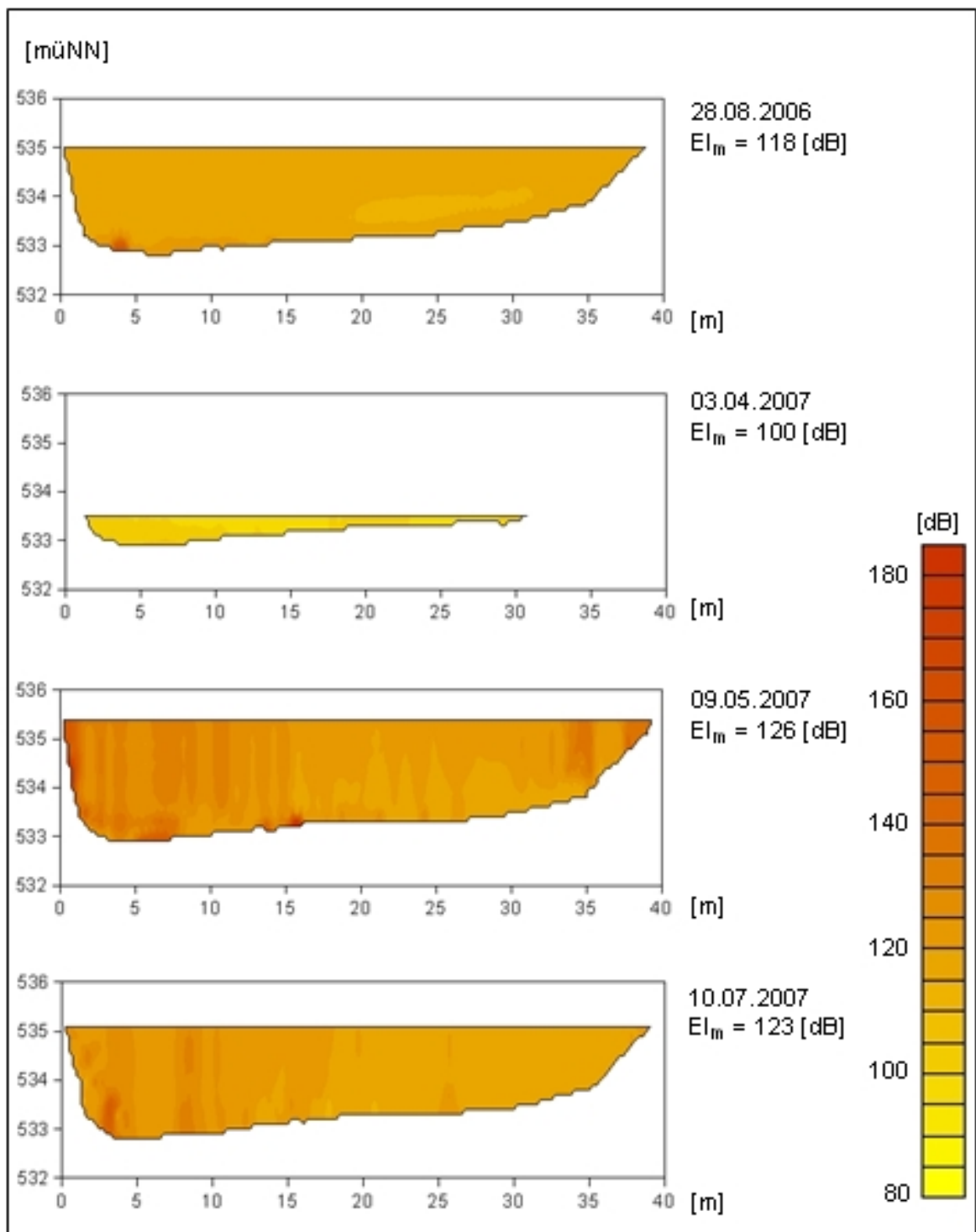


Abbildung 6.53: Gemittelte Verteilung der Echointensitäten EI während mehrerer ADCP-Messungen am Pegel Staudach an der Tiroler Achen

6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Am Pegel Staudach an der Tiroler Achen wurden in den Sommermonaten 2006 und 2007 drei ADCP-Messungen während erhöhter Abflüsse durchgeführt (Abb. 6.40). Aus den Messdaten konnten wertvolle Informationen über die hydromorphologischen Vorgänge während Hochwasser gewonnen und neue Erfahrungen über die Anwendungsgebiete der ADCP-Technik und deren Grenzen gesammelt werden. Der Einsatz einer Totalstation zur zusätzlichen Erfassung des ADCP-Messpfads während der Einsätze erwies sich als sehr erfolgreich. Der aus allen Einzelfahrten berechnete mittlere Abfluss während der ADCP-Einsätze weist eine gute Übereinstimmung mit den Vergleichswerten am Pegel auf. Die zeitnah durchgeführten Flügelmessungen konnten nur bedingt zur Validierung der ADCP-Daten verwendet werden, weil sich zwischen den beiden Messungen aufgrund des instationären Abflusses die Strömungsbedingungen änderten.

Die unterschiedliche Referenzierung der ADCP-Daten (BT und GPS) zeigte deutliche Differenzen in den Ergebnissen auf. Aufgrund des Sedimenttransports im Bereich der Sohle war die Verwendung des *Bottom Track*-Signals des ADCP zur Auswertung der Daten nicht zielführend (Abb. 6.49). Wie auch am Inn interpretierte das Gerät die Bewegung der Partikel als Eigenbewegung stromaufwärts, was zu einer Unterschätzung der Fließgeschwindigkeiten und somit auch zu einer Unterschätzung des Abflusses führte. Für ADCP-Messungen am Pegel Staudach ist daher bei erhöhtem Abfluss der Einsatz externer Geräte zur Erfassung des Messwegs unbedingt erforderlich.

Die Sohlenverläufe der einzelnen Messungen wurden miteinander verglichen, um mögliche Veränderungen während der Zeit feststellen zu können. Es stellte sich heraus, dass sich die Sohlenhöhen zwischen den Messeinsätzen im August 2006 und im Juli 2007 um bis zu 20 cm änderten. Regelmäßige Abflussmessungen sind daher erforderlich, um die Veränderungen im Pegelquerschnitt erfassen zu können.

Die ADCP-Daten wurden auch in Hinblick auf die Geschiebengeschwindigkeiten im Querschnitt ausgewertet. Dazu wurden die vom ADCP erfassten *Boat Velocities*, also die Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Messgerät und der Sohle, untersucht. Die Auswertung der Messwerte vom August 2006 und vom Juli 2007 brachte sehr aussagekräftige Ergebnisse. Bei der Interpretation der Geschiebengeschwindigkeiten ist jedoch zu berücksichtigen, dass das *Bottom Track*-Signal nicht zwischen „echtem“ Geschiebetransport und sohlnahem Schwebstofftransport unterscheiden kann. Wird in den untersten Zentimetern der Wassersäule eine Schicht mit hohen Schwebstoffkonzentra-

tionen (vergleichbar mit einem Trübestrom) transportiert, so wird diese vom *Bottom Track*-Signal des ADCP als Sohle interpretiert. Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Phänomenen ist zur Zeit noch nicht möglich und kann auch mit Hilfe konventioneller Methoden nicht bewerkstelligt werden.

Die Auswertung der Echointensitäten in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen brachte sehr wertvolle Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der ADCP-Technik auf diesem Gebiet. Zeitnah zu den ADCP-Messungen im August 2006 und im Mai 2007 wurden ungefähr 150 m oberhalb des Pegels Vielpunktmessungen der Schwebstoffkonzentrationen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden zur Auswertung der Echointensitäten und zur Beurteilung der Qualität dieser Vorgehensweise herangezogen. Während anhand der konventionellen Messungen im August 2006 wesentlich höhere Konzentrationen ermittelt wurden als im Mai 2007, lagen die Echointensitäten der ADCP-Messungen im Mai 2007 höher als jene im August 2006 (Abb. 6.53). Innerhalb einer Messung kann jedoch durchaus ein Zusammenhang zwischen den EI-Werten des ADCP und den konventionell ermittelten Schwebstoffkonzentrationen gefunden werden. Abbildung 6.52 stellt dieses Phänomen sehr deutlich dar. Die Gegenüberstellung der beiden Kalibriergeraden zeigt zwar eine übereinstimmende Steigung von 0.1, der Ordinatenwert der beiden Auswertergebnisse unterscheidet sich jedoch. Als Grund dafür können beispielsweise unterschiedliche Korngrößenverteilungen der Schwebstoffe während der beiden Ereignisse genannt werden. Hierüber liegen jedoch keine Informaionen vor. Systematische Probenentnahmen zur Auswertung der Korngrößenverteilungen im Querschnitt würden hier wertvolle Erkenntnisse liefern. Betrachtet man den grafischen Vergleich der aus den ADCP-Daten berechneten und der konventionell erfassten Schwebstoffkonzentrationen, so ist zwar eine gewisse Streuung der Einzelwerte zu sehen, die aus den Daten berechneten Mittelwerte der jeweiligen Messungen liegen jedoch fast exakt auf der Geraden, die eine vollkommene Übereinstimmung der beiden Ergebnissen darstellt. Das bedeutet, dass bei Kenntnis der beiden Parameter A und B aus Glg. 4.19 die mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt mit Hilfe von ADCP-Messungen sehr gut erfasst werden können. Um weitere Erkenntnisse über den zeitlichen Verlauf dieser beiden Variablen zu erlangen und deren Schwankungsbreite bestimmen zu können, sind umfangreiche ADCP- und Schwebstoffmessungen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen erforderlich.

6 ADCP-Messungen

Tabelle 6.6 beinhaltet eine Zusammenstellung der wichtigsten Messgrößen, die während der ADCP-Messungen am Pegel Staudach an der Tiroler Achen gesammelt werden konnten.

Datum	Q	WSP	v_m	h_m	v_G	EI_m	SSC
	[m ³ /s]	[müNN]	[m/s]	[m]	[m/s]	[dB]	[mg/l]
08.08.2006	150	535.08	2.17	1.77	< 0.7	118	1580
03.04.2007	29	533.86	1.29	0.68	0	100	—
09.05.2007	190	535.47	2.42	2.08	—	126	1020
10.07.2007	160	535.15	2.29	1.79	< 0.3	123	—

Tabelle 6.6: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der ADCP-Messungen vom Sommer 2006 bis zum Sommer 2007

7 Fazit

Im Rahmen der verschiedenen Untersuchungen und Projekte, die dieser Arbeit zugrunde liegen, konnten wertvolle Erfahrungen bei der Durchführung von ADCP-Messungen gewonnen, wichtige Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen dieser Technik gesammelt sowie ein Überblick über den aktuellen Stand des Wissens gewonnen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Naturmessungen zusammengefasst und Empfehlungen für die Durchführung derartiger Messungen formuliert. Der daran anschließende Ausblick gibt Hinweise auf noch zu untersuchende Fragestellungen und bestehendes Forschungspotential auf diesem Gebiet.

7.1 Zusammenfassung der Naturmessungen

Es wurden ADCP-Messungen während Hochwasser an der Nußdorfer Brücke am Inn sowie am Pegel Staudach an der Tiroler Achen durchgeführt. Die dafür verwendeten Trägergeräte sind für Messungen bei derartigen Abflussbedingungen nur bedingt geeignet. In beiden Fällen konnten die Boote nur unzureichenden Schutz vor Treibgut bieten. Der am Inn verwendete Katamaran aus Aluminium ist zwar stabiler als der an der Tiroler Achen eingesetzte Trimaran, erfordert aber aufgrund der strömungungünstigen Bugform erhebliche Kraftanstrengungen, um dem Strömungswiderstand standzuhalten und das Boot über das Gewässer zu ziehen. Der Trimaran weist eine wesentlich günstigere Form auf, sein geringes Gewicht verhindert jedoch eine stabile, ruhige Lage auf der Wasseroberfläche. Das Ziehen des Trägergerätes mit Hilfe der am Pegel Staudach installierten Seilkrananlage erwies sich als sehr komfortabel und vorteilhaft in Hinblick auf eine gleichmäßige Überfahrtsgeschwindigkeit und einen geradlinigen, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung liegenden Messweg. Dies ist für die Durchführung von ADCP-Messungen zwar nicht zwingend erforderlich, gewährleistet jedoch eine gleichmäßige Verteilung der erfassten Messdaten und erleichtert die optische Kontrolle der Messergebnisse vor Ort. Das während Hochwasser an beiden Flüssen mobilisierte Treibgut stellte eine große Herausforderung für das durchführende Messpersonal dar, da eine Kollision mit dem Trägergerät nach Möglichkeit

verhindert werden musste. Entsprechende Ausweichmanöver waren am Inn einfacher durchzuführen, weil die Lage der herantreibenden Gegenstände von der Brücke aus besser eingeschätzt werden konnte als vom Ufer der Tiroler Achen aus.

Die Hochwassermessungen am Inn zeigten sehr deutlich die Anwendungsgrenzen der ADCP-Technik. Aufgrund der hohen Schwebstoffkonzentrationen, der turbulenten Strömungsmuster und der an den Brückenpfeilern eingetragenen Luftblasen konnten die ausgesendeten Messsignale zeitweise die Wassersäule nicht durchdringen. Die erste während des Augusthochwassers durchgeführte Messfahrt beinhaltete nur im ufernahen Bereich aufgezeichnete Daten, auch während der darauf folgenden Überfahrten konnten in mehreren Teilbereichen des Querschnitts keine Daten aufgezeichnet werden.

Da bei den beschriebenen Messungen die Sohle im Bereich des Messquerschnitts in Bewegung war, war die Erfassung des vom ADCP zurückgelegten Messwegs mit externen Messgeräten erforderlich. Am Inn kamen GPS-Antennen zum Einsatz, an der Tiroler Achen wurde eine Totalstation verwendet. Beide Systeme wiesen eine zufriedenstellende Genauigkeit der aufgezeichneten Messwerte auf. Die dGPS-Technik bietet den Vorteil, dass die Daten direkt in die ADCP-Dateien implementiert werden können. Dies ermöglicht zum Einen eine sofortige Kontrolle der Messdaten noch während der Messung und zum Anderen die Berücksichtigung der Daten im Zuge einer weiteren Datenauswertung mit Programmen, die nur die ADCP-Rohdaten einlesen können. Als Nachteil muss erwähnt werden, dass die GPS-Antennen permanenten Kontakt zu mindestens vier Satelliten benötigen. Am Inn kam es im Bereich der Ufer aus diesem Grund zu temporären Lücken in den Datensätzen. In engen Tälern, bei dichter Bebauung oder bei schmälere Gewässern mit Uferbewuchs muss daher mit Problemen bei der Aufzeichnung von GPS-Daten gerechnet werden.

Bei Referenzierung der Datensätze auf die extern erfassten Lageinformationen war die Genauigkeit der Abflussergebnisse an beiden Gewässern zufriedenstellend. Trotz der teils schwierigen Messbedingungen lieferten die ADCP-Daten im Vergleich mit anderen zur Verfügung stehenden Daten stets eine gute Übereinstimmung. In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass die Durchführung von ADCP-Messungen nur einen Bruchteil der Zeit benötigt, die beispielsweise Flügelmessungen in Anspruch nehmen, und dabei eine viel höhere Datendichte liefert als herkömmliche Messverfahren.

Auch die jeweiligen Sohlhöhen in den Messquerschnitten konnten an beiden Gewässern erfolgreich erfasst werden. Am Inn gelang es dadurch erstmalig, die durch Hoch-

7.2 Empfehlungen für die Durchführung von ADCP-Messungen

wasser verursachten Sohlerosionen von 2 m im Nahbereich der Staustufe Nußdorf messtechnisch zu erfassen. An der Tiroler Achen wurden Schwankungen der Sohlhöhen von bis zu 20 cm beobachtet. Analog zur erfolgreichen Erfassung der Sohlhöhen war unter Verwendung der aufgezeichneten ADCP-Daten auch eine Abschätzung der vorhandenen Geschiebegeschwindigkeiten während der Messungen möglich. Am Inn wurde eine mittlere Geschwindigkeit des transportierten Geschiebes von zirka 0.6 m/s ermittelt. An der Tiroler Achen ergab die Auswertung Geschiebegeschwindigkeiten von bis zu 0.7 m/s. Die Messungen zeigten auch, dass die Strömungsverhältnisse im Messquerschnitt in Abhängigkeit der jeweiligen Abflussvorgeschichte sehr unterschiedlich sein können.

Die Auswertung der erfassten Rückstreuintensitäten der ausgesendeten Messsignale lieferte vor allem an der Tiroler Achen wertvolle Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen dieser Messgröße und den Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt. Am Inn lagen keine ausreichenden Vergleichsmessungen zur Auswertung der ADCP-Daten vor. Anhand der vorhandenen Einzelmessungen konnten nur sehr grobe, qualitative Aussagen über den Informationsgehalt der ADCP-Messwerte gemacht werden. An der Tiroler Achen hingegen konnten zwei Vielpunktmessungen von Schwebstoffkonzentrationen für die Auswertung der ADCP-Daten verwendet werden. Die unter Verwendung der Kalibriergleichung berechneten Schwebstoffkonzentrationsverteilungen weichen zwar etwas von den gemessenen Werten etwas ab, es konnte aber eine fast perfekte Übereinstimmung zwischen den daraus berechneten mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt und dem Mittelwert der konventionell gemessenen Schwebstoffkonzentrationen festgestellt werden. Das bedeutet, dass ADCP-Messungen bei Kenntnis der beiden Kalibrierparameter auch zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen verwendet werden können.

7.2 Empfehlungen für die Durchführung von ADCP-Messungen

Aus den während der Naturmessungen gesammelten Erfahrungen leiten sich folgende Empfehlungen für die zukünftige Durchführung von ADCP-Messungen ab.

- Vor allem bei schwierigen Messbedingungen weisen die Ergebnisse der ADCP-Einzelfahrten, die ja Momentaufnahmen des Abflusszustands darstellen, große Schwankungen auf. Erst die Mittelung mehrerer Messfahrten gewährleistet unter

derartigen Randbedingungen eine homogene Verteilung der Messgrößen über den Querschnitt und eine zufriedenstellende Qualität der Ergebnisse.

- Der geräteinterne Kompass sollte regelmäßig kalibriert werden, um eine Verdrehung der Datensätze im Vergleich zur realen Situation zu vermeiden. Eine korrekt angenommene Nordrichtung ist bei der Verwendung zusätzlicher Lageortungsgeräte wichtig.
- Bei der Verwendung von externen Lagemessgeräten, die sich auf die geografische Nordrichtung beziehen, ist die für den Ort der Messung angegebene Deklination zu berücksichtigen.
- Die pro Messensemble veranschlagte Zeitspanne wird von der Messsoftware vor allem in Abhängigkeit der angegebenen maximalen Fließtiefe und der Anzahl der Messpings pro Ensemble berechnet. Um ungenützte Pausen zwischen den einzelnen Messensembles zu verhindern, sollte die maximale Fließtiefe möglichst genau angegeben werden.
- Vor allem wenn der Verdacht auf eine bewegliche Gewässersohle besteht, sollte auf externe Messgeräte zur Aufzeichnung des Messpfads nicht verzichtet werden. Die Verwendung von GPS-Antennen stellt zur Zeit die einzige Möglichkeit dar, um zusätzlich erfasste Lagedaten direkt in die ADCP-Datensätze zu implementieren.

7.3 Ausblick

Vor allem auf dem Gebiet der Schwebstoffkonzentrationsmessung mit der ADCP-Technik besteht noch erheblicher Untersuchungs- und Forschungsbedarf. In erster Linie werfen die beiden unbekanntenen Kalibrierparameter, die zur Umrechnung der Echointensitäten in Schwebstoffkonzentrationen benötigt werden, noch Fragen auf. Untersuchungen in tidebeeinflussten Gewässern belegen zwar die zeitliche Varianz beider Größen, ob diese Schwankungen in Binnengewässern auch vorhanden sind, wurde jedoch noch nicht untersucht. Umfangreiche ADCP-Messungen mit zeit- und ortsgleich dazu durchgeführten Vielpunktprobenentnahmen sind hierzu notwendig. Eine Auswertung der Wasserproben in Hinblick auf Schwebstoffkonzentrationen und Korngrößenverteilungen der Schwebstoffe würde wertvolle Erkenntnisse über die Abhängigkeit der Kalibriervariablen von diesen Größen bringen. Mit den Messungen müsste einerseits ein Großteil des vorhandenen Abflussspektrums abgedeckt werden,

andererseits müssten mögliche, jahreszeitlich bedingte Einflüsse – wie beispielsweise die unterschiedliche Entstehung von Hochwasserereignissen und daraus resultierende Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der Schwebstoffe – untersucht werden. Dies bedingt vorerst sicherlich einen erheblichen Mehraufwand an Personal und Zeit. Wären jedoch einmal gesicherte Kenntnisse über die Größenordnungen sowie die zeitlichen Schwankungen der beiden Kalibrierparameter vorhanden, könnten die vom ADCP aufgezeichneten Echointensitäten – eigentlich nur ein Abfallprodukt der Abflussmessung – zur Ermittlung von Schwebstoffkonzentrationen verwendet werden. Dies würde langfristig eine erhebliche Verbesserung der Quantität und Qualität von Schwebstoffkonzentrationsmessungen bedeuten und gleichzeitig den dafür benötigten Personalbedarf deutlich senken.

Danksagung

Dank zu sagen ist fast so schwer, wie eine Doktorarbeit zu verfassen – wenn auch nicht ganz so langwierig. Die besondere Herausforderung besteht in diesem Fall darin, all den vielen Helfern, Helfeshelfern und Wegbegleitern der letzten Jahre gebührend Dank zu zollen, und dabei trotzdem eine angemessene Kürze der Ausführungen zu wahren.

Besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Theodor Strobl. Er nahm mich am Lehrstuhl mit wahrlich väterlicher Fürsorge auf, stand mir all die Jahre mit Rat und Tat zur Seite und hatte immer eine beschützende Hand über seinen „Haufen junger Wilder“, wie er uns Assistenten manchmal im Scherz nannte. Das einzigartige Arbeitsklima, das maßgeblich zum Gelingen unserer Arbeiten beitrug, ist vor allem ihm zu verdanken. Aber auch sein Charisma, sein fachlicher Weitblick und sein Verhandlungsgeschick, mit dem er auch den skeptischsten Gesprächspartner von seinen Ideen überzeugen und die schwierigsten Diskussionen in eine positive Richtung lenken konnte, haben mich sehr beeindruckt und werden mir immer als Vorbild in Erinnerung bleiben.

Darüber hinaus möchte ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Manhart und o. Univ.-Prof. Dr.techn. Gerald Zenz für die Übernahme der Koreferate danken. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Rutschmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großes Dankeschön auch an die Auftraggeber des operativen Entwicklungsvorhabens, der E.ON Wasserkraft GmbH und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt, die maßgeblich zur Finanzierung meiner Promotion beigetragen haben. Bei der Durchführung der ADCP-Messungen wurde ich von den Wasserwirtschaftsämtern Landshut, Rosenheim und Traunstein unterstützt - den hilfsbereiten Kollegen vor Ort, die keine Mühen scheuten und stets bereit waren, den ADCP durch die Fluten zu ziehen, bin ich zu großem Dank verpflichtet.

Trotz der geringen Durchflüsse boten auch die ADCP-Testmessungen in Obernach jede Menge an Herausforderungen, die es zu meistern galt. Doch mit vereinten Kräften und der Unterstützung der gesamten Obernacher Mann- und Frauschaft konnte jedes Problem gelöst werden.

Ein herzliches Dankeschön für die vielen Schaufeln Sand, die handwerkliche Hilfe und auch für die vielen offenen Ohren, denen ich bei Problemen mein Leid klagen konnte!

Abgesehen von den ADCP-Messungen verbrachte ich jedoch die meiste Zeit in München am Lehrstuhl. Ich möchte diese Gelegenheit nützen, um mich noch einmal ganz herzlich bei meinen ehemaligen Kollegen für das konstruktive Arbeitsklima, die gute Zusammenarbeit, die kreativen Gespräche, die Unterstützung bei Problemen, aber auch den vielen Spaß, den wir hatten und die legendären Abende im Steinheil zu danken. Jungs, es war eine tolle Zeit und ich möchte keinen Tag davon missen!

Auch der „guten Seele“ des Lehrstuhls, Frau Dorothea Petry, gebührt mein Dank, denn ohne sie wäre der Lehrstuhllalltag sicher nicht immer so reibungslos verlaufen.

Abschließend möchte ich mich bei meinem persönlichen Umfeld für die immer-währende Unterstützung bedanken. Da sind natürlich meine Eltern zu nennen, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben und mir auch in schweren Zeiten immer zur Seite standen. Ganz besonderer Dank gebührt auch meinem Partner Jürgen. Abgesehen von seiner Hilfe bei der Erstellung Zeitmanagements annahm und die zeitgerechte Fertigstellung meiner Doktorarbeit maßgeblich ihm zu verdanken ist, bewies er unendliche Geduld und Verständnis während der heißen Phase der Arbeit, ertrug alle meine Launen und spendete mir Trost und Zuspruch, wann immer ich es brauchte.

DANKE

Literaturverzeichnis

- Aardoom, J. H. und Mol, J.-W. (2005): “Quantification of sediment concentrations and fluxes from ADCP measurements”, in: Akustische Dopplergeräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, Heft 12.05, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, S. 117–130.
- Adler, M. (1993): “Messungen von Durchflüssen und Strömungsprofilen mit einem Ultraschall-Doppler-Gerät (ADCP)”, Wasserwirtschaft, 83(4), S. 192–196.
- Adler, M. und Nicodemus, U. (2000): “AGILA: Ein neues Computermodell zur Verarbeitung der Daten von Akustischen Doppler Strömungsmessgeräten (ADCP)”, Wasserwirtschaft, 90(10), S. 494–498.
- Adler, M. und Nicodemus, U. (2007): Benutzerhandbuch AGILA 6, Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- Ahammer, H. (1979a): “Die Verlandung der Stauhaltungen des Inn - Versuch einer rechnerischen Erfassung des zu erwartenden Gleichgewichtszustandes”, Wasserwirtschaft, 69(2), S. 50–56.
- Ahammer, H. (1979b): “Versuch einer Erfassung des zeitlichen Ablaufs der Verlandung von Stauhaltungen (Beispiel Inn)”, Wasserwirtschaft, 69(7), S. 243–248.
- Alpreserv (2007): “Sustainable Sediment Management of ALPine RESERVoirs considering ecological and economical aspects”, URL <http://www.alpreserv.eu/>, [Online; Stand 10.03.2008].
- BayGewZustVO (2004): Bayerische Gewässerbestandsaufnahme- und -zustandseinstufungsverordnung, Dr. Edmund Stoiber, Bayerischer Ministerpräsident, bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 5/2004, München, den 15. März 2004.
- BayWG (1994): Bayerisches Wassergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. Juli 1994 (mit Änderungen bis 2007), Bayerische Staatsregierung.
- Borucki, H. (1989): Einführung in die Akustik, Wissenschaftsverlag.
- Burz, J. (1967): “Verteilung der Schwebstoffe in offenen Gerinnen”, in: Symposium on River Morphology, S. 279–296.
- Deines, K. L. (1999): “Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers”, Oceans 99 MTS / IEEE Conference Proceedings.

- Demel, S. und Amesmaier, Ch. (2007): “Entlandungssituation an steirischen Wasserkraftwerken”, in: Wasserbausymposium Graz 2006: Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne, 46/1, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, S. 194–209.
- DIN18123 (1996): DIN 18123: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Deutsche Norm.
- DIN38409 (1980): DIN 38409-9: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen; Bestimmung des Volumenanteils der absetzbaren Stoffe in Wasser und Abwasser, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Deutsche Norm.
- DIN4049 (1994): DIN 4049-3: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Deutsche Norm.
- DVWK125 (1986): Regel 125 – Schwebstoffmessungen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Regeln zur Wasserwirtschaft.
- DVWK127 (1992): Regel 127 – Geschiebemessungen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Regeln zur Wasserwirtschaft.
- Eberstaller, J.; Zauner, G.; Friedl, Th. und Kerschbaumer, G. (2001): “Sedimentation in Flusstauhaltungen – Ökologische Aspekte”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 53(11/12), S. 269–275.
- Elsner, T. (2005): “Flussraum Agenda Alpenraum – Sedimentologische Untersuchungen von Schwebstoffdaten”, Workpackage ist-zustandserfassung und -analyse, Institut für Hydrotechnik, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Bechteler GmbH, Modellgewässer Tiroler Achen.
- Fiedler, K.; Steinbacher, F.; Strobl, Th. und Zunic, F. (2008): “Sohlen- und Abflussmessungen: Vorteile und Grenzen der ADCP-Technik”, Wasserwirtschaft, 97(1-2), S. 27–31.
- FISP (2008): “Operator’s Manual for the US P-61-A1 Point-Integrating Suspended-Sediment Sampler”, , Federal Interagency Sedimentation Prpject, URL http://fisp.wes.army.mil/Catalog_Page_US_P-61A1.htm, [Online; Stand 01.05.2008].
- Fujita, I.; Tsubaki, R. und Deguchi, T. (2007): “PIV Measurement of Large-Scale River Surface Flow during Flood by using a High Resolution Video Camera from a Helicopter”, in: 2007 Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference; Lake Placid / USA, Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers and International Association of Hydraulic Engineers, S. 344–349.

- Gartner, J. W. (2002): “Estimation of Suspended Solids Concentrations Based on Acoustic Backscatter Intensity: Theoretical Background”, in: *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*.
- Gartner, J. W. (2004): “Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California”, *Marine Geology*, 211, S. 169–187.
- Gray, J. R.; Melis, Th. S.; Patino, E.; Larsen, M. C.; Topping, D. J.; Rasmussen, P. P. und Figueroa-Alamo, C. (2003): “U.S. Geological Survey Research on Surrogate Measurements for Suspended Sediment”, in: *First Interagency Conference on Research in the Watersheds; Benson / USA, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service*, S. 95–100.
- Grosso, V. A. Del und Mader, C. W. (1972): “Speed of Sound in Pure Water”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 52(5B), S. 1442–1446.
- Haimann, M. (2007): “Schwebstoffmonitoring an der Sulm und an der Enns”, Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Department für Wasser - Atmosphäre - Umwelt an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Hanes, D.M.; Vincent, C.E.; Huntley, D.A. und Clarke, T.L. (1988): “Acoustic measurements of suspended sand concentration in the C2S2 experiment at Stanhope Lane, Prince Edward Island”, *Marine Geology*, 81, S. 185–196.
- Hofer, B. und Reindl, R. (2001): “Der Kampf und die kleinen Erfolge der Betreiber von Wasserkraftanlagen gegen Stauraumverlandungen”, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 53(11/12), S. 282–287.
- Innwerk (1992): *Bayerischer Inn - Ausbau der Wasserkraft zwischen Kiefersfelden und Passau*, Innwerk Aktiengesellschaft, Töging.
- Irmer, U.; Naumann, S. und Schrader, N. (2007): “Anforderungen an die Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen aus gewässerökologischer Sicht unter dem Blickwinkel der Europäischen Leitfäden”, *Wasserstraßen – Verkehrswege und Lebensraum in der Kulturlandschaft: Berücksichtigung ökologischer Belange an Bundeswasserstraßen*.
- Jensen, J.; Gran, F.; Udesen, J.; Nielsen, M. und Nielsen, K. (2006): “Vector blood velocity estimation in medical ultrasound”, in: *Proceedings of the 5th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Laboratory of Food Process Engineering, Institute of Food Science Nutrition, ETH Zürich*, S. 3–7.
- Jurisch, R. (1995): “Messungen von Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen in Flüssen mit dem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)”, *Wasserwirtschaft*, 85(10), S. 500–503.

- Kölling, Ch. (1994): “Finite - Element - Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen”, Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, mitteilungsheft des Lehrstuhls Nr. 60.
- Knoblauch, H.; Hartman, S. und de Cesare, G. (2005): “Sedimentmanagement in alpinen Speichern - Das EU-INTERREG III Projekt ALPRESERV”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57(11/12), S. 185–190.
- Knoblauch, H.; Hartmann, S. und de Cesare, G. (2007): “Maßnahmen gegen die Verlandung von Stauräumen im Alpenraum”, in: 14. Deutsches Talsperrensymposium, S. 234–238.
- LAWA (1997): Pegelvorschrift, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- LfU (2008): “Hochwassernachrichtendienst”, URL <http://www.hnd.bayern.de/>, [Online; Stand 08.04.2008].
- LfW (2000): Schwebstoffmessung, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, merkbblatt 2.4/2.
- Meselhe, E.; Peeva, T. und Muste, M. (2004): “Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows”, Journal of Hydraulic Engineering, 130(9), S. 937–940.
- Mueller, D. S. und Wagner, C. R. (2006): “Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements biased by Sediment Transport”, Scientific Investigations Report 5079, United States Geological Survey.
- Mueller, D. S. und Wagner, C. R. (2007): “Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, 133(12), S. 1329–1336.
- NGDC (2005): “US/UK World Magnetic Model – Epoch 2005.0, Main Field Declination (D)”, URL <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/wmm-D05.pdf>, [Online; Stand 30. April 2008].
- Patino, E. und Byrne, M. J. (1998): “Use of Acoustic Instruments for Estimating Total Suspended Solids Concentrations in Streams – The South Florida Experience”, URL <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/Patino.pdf>, [Online; Stand 27.02.2008].
- Poerbandondo und Mayerle, R. (2004): “Assessment of Approaches for Converting Acoustic Echo Intensity into Suspended Sediment Concentration”, 3rd FIG Regional Conference for Asia and the Pacific.

- Poerbandono (2003): “Sediment transport measurements and modelling in the Meldorf Bight tidal channels, German North Sea coast”, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Sachgebiet Geowissenschaften.
- Poerbandono und Mayerle, R. (2003): “Effectiveness of Acoustical Backscatter Measurements from Acoustical Profilers for Estimation of Suspended Sediment Concentration”, in: IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology, S. 207–210.
- Pöschl, S. (2001): “Erfahrungsbericht - Sedimentation in einer Kraftwerkskette”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 53(11/12), S. 292–298.
- RDI (1996): “Principles of Operation - A Practical Primer”, Second edition for broadband adcps, RD Instruments.
- RDI (1999): “When to Use Differential GPS in Place of Bottom Track”, Acoustic doppler current profilers application note fsa-006, RD Instruments.
- RDI (2002): WorkHorse Commands and Output Data Format, RD Instruments.
- RDI (2003): WinRiver I User’s Guide - International Version, RD Instruments.
- Reichel, K. G. und Nachtnebel, H.-P. (1993): “Suspended Sediment Monitoring in a fluvial Environment: Advantages and Limitations applying an Acoustic Doppler Current Profiler”, Water Resources, 28(4), S. 751–761.
- Rennie, C. D.; Millar, R. G. und Church, M. A. (2002): “Measurement of Bed Load Velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler”, Journal of Hydraulic Engineering, 128(5), S. 473–483.
- Schiller, H. (1977): Hochwasseruntersuchung Inn – Hochwasser der Jahresreihe 1840-1975, 6, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Schimpf, H. und Harreiter, H. (2001): “Feststoffhaushalt der österreichischen Donau”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 53(11/12), S. 276–280.
- Schleiss, A. und Oehy, Ch. (2002): “Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit”, wasser, energie, luft, 94(7/8), S. 227–234.
- Schmautz, M. (2003): Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.
- Simpson, M. R. (2001): “Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler”, Open-File Report 01-1, United States Geological Survey.
- Simpson, M. R. und Oltmann, R. N. (1993): “Discharge-Measurement System Using an Acoustic Doppler Current Profiler with Applications to Large Rivers and Estuaries”, Water-Supply Paper 2395, United States Geological Survey.

- Smerdon, A. M. und Caine, St. J. (2007): “A Commercial Multi-Frequency Acoustic Backscatter Instrument for Profiling of Suspended Sediment Size Distribution and Load”, in: 2007 Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference; Lake Placid / USA, Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers and International Association of Hydraulic Engineers, S. 494–499.
- Steiner, H. und Moser, A. (2002): “Verlandungs- und Sohlkontrollen in den Flussstauräumen der Drau”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54(11/12), S. 199–204.
- Stimpfl, G. B. (2006): “Schwebstoffmonitoring an Mur und Raab”, Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Department für Wasser - Atmosphäre - Umwelt an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Urlick, R. (1975): Principles of Underwater Sound for Engineers, McGraw-Hill Book Company.
- Wall, G. R.; Nystrom, E. A. und Litten, S. (2006): “Use of an ADCP to Compute Suspended-Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York”, Scientific Investigations Report 5055, United States Geological Survey.
- Westrich, B. (1981): “Verlandung von Flußstauhaltungen”, Wasserwirtschaft, 71(10), S. 277–282.
- WHG (2002): Wasserhaushaltsgesetz, Jürgen Trittin, Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 59, ausgegeben zu Bonn am 23. August 2002.
- WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Europäische Wasserrahmenrichtlinie.
- WRRL (2006): Good practice in managing the ecological impacts of hydropower schemes; flood protection works; and works designed to facilitate navigation under the Water Framework Directive, Konferenz der Wasserdirektoren, Technical Paper.
- WWA-D (2008): “Wertach vital – natürlich für Augsburg”, URL http://www.wwa-don.bayern.de/service/infomaterial/doc/wertachvital_flyer2007_1-4.pdf, [Online; Stand 19.05.2008].
- WWA-T (2008): “Verlandung des Chiemsee – Informationen über die abschließenden Ergebnisse der Rahmenuntersuchung Chiemsee”, URL <http://www.wasserwirtschaftsamt-traunstein.de>, [Online; Stand 24.04.2008].
- Zauner, F. (2001): “Der Verlandungsprozess in den Stauhaltungen am Unteren Inn”, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 53(11/12), S. 287–291.

Bisher erschienene Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

- Nr. 1 **Häusler Erich:** Energieumwandlung bei einem frei fallenden, kreisrunden Strahl in einem Wasserpolster, 1962, *vergriffen*
- Nr. 2 **Spiekermann, Günter:** Instabile Formen des Schußstrahles beim Abfluß unter Schützen und seine Kraftwirkungen auf die Schützenkonstruktion, 1962, *vergriffen*
- Nr. 3 **Linder Gaspar:** Über die Gestaltung von Durchlaßausläufen, 1963, *vergriffen*
- Nr. 4 **Knauss Jost:** Modellversuche über die Hochwasserentlastungsanlagen an kleinen Rückhaltespeichern in Südbayern, 1963, *vergriffen*
- Nr. 5 **Mahida Vijaysinh:** Mechanismus der Schnellsandfiltration, 1964, *vergriffen*
- Nr. 6 **Rothmund, Hermann:** Energieumwandlung durch Strahlumlenkung in einer Toskammer, 1966, *vergriffen*
- Nr. 7 **Häusler Erich:** Luftsiphons für den pneumatischen Verschuß von Wassereinlauföffnungen, 1966, *vergriffen*
- Nr. 8 **Seus Günther J.:** Die Anfangskavitation, 1966, *vergriffen*
- Nr. 9 **Knauss Jost:** Schießender Abfluß in offenen Gerinnen mit fächerförmiger Verengung, 1967, *vergriffen*
- Nr. 10 **Häusler Erich; Bormann Klaus:** Schießender bzw. strömender Abfluß in Bächen
Schultz Gert A.: Die Anwendung von Computer-Programmen für das Unit-Hydrograph-Verfahren am Beispiel der Iller
Bauch Wolfram: Untersuchungen über Wasserstandsvorhersagen an einem 600 m langen Modell der Donau-Strecke Regensburg-Straubing, 1967, *vergriffen*
- Nr. 11 **Schultz Gert A.:** Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention (Hyreun-Verfahren), 1968, *vergriffen*
- Nr. 12 **Raumer Friedrich von:** Verteilung von Bewässerungswasser in Kanälen - Eine Systematik großer Kanalsysteme zur Verteilung von Bewässerungswasser unter besonderer Berücksichtigung von Regulier- und Meßvorgängen, 1968, *vergriffen*
- Nr. 13 **Bormann Klaus:** Der Abfluß in Schußrinnen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme, 1968
- Nr. 14 **Scheuerlein Helmut:** Der Rauherinneabfluß, 1968, *vergriffen*
- Nr. 15 **Koch Kurt:** Die gegenseitige Strahlablenkung auf horizontaler Sohle, 1968
- Nr. 16 **Bauch Wolfram:** Die Hochwasserwelle im ungestauten und gestauten Fluß, 1968
- Nr. 17 **Marr Gerhard:** Vergleich zweier Differenzenverfahren in einem mathematischen Modell zur Berechnung von instationären Abflußvorgängen in Flüssen, 1970, *vergriffen*
- Nr. 18 **Herbrand Karl:** Der räumliche Wechselsprung, 1970, *vergriffen*
- Nr. 19 **Seus Günther J.:** Betrachtungen zur Kontinuitätsbedingung der Hydromechanik;
Zielke Werner: Zur linearen Theorie langer Wellen in Freispiegelgerinnen, 1971
- Nr. 20 **Häusler Erich:** Entnahmetürme mit Luftsiphons, 1971, *vergriffen*
- Nr. 21 **Herbrand Karl:** Das Tosbecken mit seitlicher Aufweitung, 1971
- Nr. 22 **Knauss Jost:** Hydraulische Probleme beim Entwurf von Hochwasserentlastungsanlagen an großen und kleinen Staudämmen, 1971, *vergriffen*
- Nr. 23 **Zielke Werner:** Berechnung der Frequenzganglinien und Eigenschwingungen von Rohrleitungssystemen
Zielke Werner; Wylie E. Benjamin: Zwei Verfahren zur Berechnung instationärer Strömungen in Gasfernleitungen und Gasrohrnetzen, 1971
- Nr. 24 **Knauss Jost:** Wirbel an Einläufen zu Wasserkraftanlagen, 1972, *vergriffen*
- Nr. 25 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 1, 1972, *vergriffen*
- Nr. 26 **Keller Andreas:** Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Problem der modellmäßigen Behandlung von Strömungskavitation, 1973, *vergriffen*
- Nr. 27 **Horn Heinrich:** Hochwasserabfluß in automatisch geregelten Staustufen, 1973
- Nr. 28 **Bonasoundas Markos:** Strömungsvorgang und Kolkproblem am runden Brückenpfeiler, 1973
- Nr. 29 **Horn Heinrich; Zielke Werner:** Das dynamische Verhalten von Flußstauhaltungen, 1973

- Nr. 30 **Uslu Orhan:** Dynamische Optimierung der Fließbeiwerte in mathematischen Flußmodellen und Berücksichtigung der Vorlandüberströmung - Eine Anwendung des Operations Research im theoretischen Flußbau, 1974
- Nr. 31 **Kotoulas Dimitrios:** Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands, Teil 2, 1975, *vergriffen*
- Nr. 32 **50 Jahre Versuchsanstalt Obernach**
Hartung Fritz: Einführung: Was treiben eigentlich die Obernacher?
Knauss Jost: Strategien und Entscheidungshilfen beim Hochwasserschutz in Städten, dargestellt am Beispiel der Hochwasserfreilegung der Stadt Harburg an der Wörnitz
Häusler Erich: Abstürze und Stützwälle in hydraulischer und konstruktiver Betrachtung (Mindestfallhöhen zur Erzielung einer genügenden hydraulischen Wirksamkeit)
Seus Günther J.; Hack Hans-Peter: Erster Vergleich der Ergebnisse des physikalischen Modells in Obernach mit denen des neuen mathematischen Modells
Uslu Orhan; Schmitz Gerd: Parameteridentifikation und Sensitivitätsanalyse bei mathematischen Modellen in der Hydrologie
Keller Andreas; Zielke Werner: Veränderung des freien Gasgehaltes in turbulenten Rohrströmungen bei plötzlichen Druckabsenkungen
Herbrand Karl: Zusammenführung von Schußstrahlen. Zwei praktische Beispiele konstruktiver Lösungen aus Modellversuchen
Zielke Werner: Grenzen der deterministischen Betrachtungsweise in der Strömungsmechanik, 1976
- Nr. 33 **Probleme der Arbeit des beratenden Ingenieurs in der Wasserwirtschaft der Entwicklungsländer.** Symposium am 13.10.1976 in Wallgau
Bauch Wolfram: Besondere Probleme bei der Planung und Ausführung der Gesamtentwässerung Busan/Korea
Bormann Klaus: Wasserkraftstudie West Kamerun und Bau der Wasserkraftanlage Batang Agam, Indonesien, zwei Entwicklungshilfe-Projekte unter extremen Bedingungen
Raumer Friedrich von: Zielvorstellungen und Verwirklichung eines wasserwirtschaftlichen Mehrzweckprojektes in Ecuador
Krombach Jürgen: Der beratende Ingenieur in Entwicklungsländern gestern und heute: Berater, Kontrolleur, Entwicklungshelfer oder Geschäftsmann? (am Beispiel wasserwirtschaftlicher Projekte), 1977
- Nr. 34 **50 Jahre Versuchsanstalt Obernach, Feierstunde am 14.10.1976 in Wallgau**
Hartung Fritz: Die Wasserbauversuchsanstalt Obernach im Strom der Zeit
Bischofsberger Wolfgang: Laudatio für Professor Dr.-Ing. E. Mosonyi
Mosonyi Emil: Wasserbau, Technik oder Kunst? 1977
- Nr. 35 **50 Jahre Versuchsanstalt Obernach,**
Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, Seminar am 15.10.1976 in Obernach
Cecen Kazim: Die Verhinderung des Geschiebeeinlaufes zu Wasserfassungsanlagen
Midgley D.C.: Abstraction of water from sediment-laden rivers in Southern Africa
Jacobsen J.C.: Geschiebefreie Triebwasserfassungen - Modellversuche am Beispiel des sogenannten Geschiebeabzuges
Scheuerlein Helmut: Die Bedeutung des wasserbaulichen Modellversuchs für die Gestaltung von Ausleitungen aus geschiebeführenden Flüssen, 1977
- Nr. 36 **Hack Hans-Peter:** Lufteinzug in Fallschächten mit ringförmiger Strömung durch turbulente Diffusion, 1977
- Nr. 37 **Csallner Klausotto:** Strömungstechnische und konstruktive Kriterien für die Wahl zwischen Druck- und Zugsegment als Wehrverschluß, 1978
- Nr. 38 **Kanzow Dietz:** Ein Finites Element Modell zur Berechnung instationärer Abflüsse in Gerinnen und seine numerischen Eigenschaften, 1978
- Nr. 39 **Keller Andreas; Prasad Rama:** Der Einfluß der Vorgeschichte des Testwassers auf den Kavitationsbeginn an umströmten Körpern - Ein Beitrag zur Frage der Rolle der Kavitationskeime bei Strömungskavitation, 1978
- Nr. 40 **Hartung Fritz:** 75 Jahre Nilstau bei Assuan - Entwicklung und Fehlentwicklung, 1979, *vergriffen*
- Nr. 41 **Knauss Jost:** Flachgeneigte Abstürze, glatte und raue Sohlrampen
Scheuerlein Helmut: Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen
Häusler Erich: Unkonventionelle neuere Stauhaltungswehre an bayerischen Flüssen als gleichzeitige Sohlsicherungsbauwerke, 1979, *vergriffen*

- Nr. 42 **Seus Günther J.; Joeres Erhard P.; Engelmann Herbert M.:** Lineare Entscheidungsregeln und stochastische Restriktionen bei Bemessung und Betrieb von Speichern, 1979, *vergriffen*
- Nr. 43 **Meier Rupert C.:** Analyse und Vorhersage von Trockenwetterabflüssen - Eine Anwendung der Systemhydrologie, 1980, *vergriffen*
- Nr. 44 **Treske Arnold:** Experimentelle Überprüfung numerischer Berechnungsverfahren von Hochwasserwellen, 1980, *vergriffen*
- Nr. 45 **Csallner Klausotto; Häusler Erich:** Abflußinduzierte Schwingungen an Zugsegmenten - Ursachen, Sanierung und allgemeine Folgerungen
Herbrand Karl; Renner Dietrich: Aufnahme und Wiedergabe der Bewegung von Schwimmkörpern mit einem Video-Meßsystem
Keller Andreas: Messungen des Kavitationskeimspektrums im Nachstrom eines Schiffes - die ersten Großausführungsmessungen mit der Laser-Streulichtmethode
Knauss Jost: Neuere Beispiele für Blocksteinrampen an Flachlandflüssen
Scheuerlein Helmut: Der gelbe Fluß - nach wie vor Chinas Sorge oder die Unerbittlichkeit der Natur gegenüber 4000 Jahren menschlicher Bemühungen
Seus Günther J.: Nochmals: Das Muskingum-Verfahren. Fingerübungen zu einem bekannten Thema als "gradus ad parnassum" sowie neue Gedanken zur Interpretation des Anwendungsbereiches und eine Lösung des Problems der Nebenflüsse
Treske Arnold: Hochwasserentlastung an Dämmen. Zwei konstruktiv ähnliche Lösungen im Modellversuch, 1981, *vergriffen*
- Nr. 46 **Schmitz Gerd:** Instationäre Eichung mathematischer Hochwasserablauf-Modelle auf der Grundlage eines neuen Lösungsprinzips für hyperbolische Differentialgleichungs-Systeme, 1981, *vergriffen*
- Nr. 47 **Scheuerlein Helmut:** Der wasserbauliche Modellversuch als Hilfsmittel bei der Bewältigung von Verlandungsproblemen in Flüssen
Knauss Jost: Rundkronige und breitkronige Wehre, hydraulischer Entwurf und bauliche Gestaltung
Keller Andreas: Maßstabeffekte bei der Anfangskavitation, 1983, *vergriffen*
- Nr. 48 **Renner Dietrich:** Schifffahrtstechnische Modellversuche für Binnenwasserstraßen - Ein neues System und neue Auswertungsmöglichkeiten, 1984, *vergriffen*
- Nr. 49 **Sonderheft: Erhaltung und Umbau alter Wehre** (Wasserbau im historischen Ensemble, drei Beispiele aus dem Hochwasserschutz bayerischer Städte), 1984, *vergriffen*
- Nr. 50 **Knauss Jost; Heinrich B.; Kalczyk H.:** Die Wasserbauten der Minyer in der Kopais - die älteste Flußregulierung Europas, 1984, *vergriffen*
- Nr. 51 **Hartung Fritz; Ertl Walter; Herbrand Karl:** Das Donaumodell Straubing als Hilfe für die Planung und Bauausführung der Staustufe Straubing, 1984
- Nr. 52 **Hahn Ulrich:** Lufteintrag, Lufttransport und Entmischungsvorgang nach einem Wechselsprung in flachgeneigten, geschlossenen Rechteckgerinnen, 1985
- Nr. 53 **Bergmann Norbert:** Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Auswertung von Strömungsfeldern am wasserbaulichen Modell, 1985
- Nr. 54 **Schwarz Jürgen:** Druckstollen und Druckschächte - Bemessung und Konstruktion, 1985, *vergriffen*
- Nr. 55 **Schwarz Jürgen:** Berechnung von Druckstollen - Entwicklung und Anwendung eines mathematischen Modells und Ermittlung der felsmechanischen Parameter, 1987
- Nr. 56 **Seus Günther J.; Edenhofer Johann; Czirwitzky Hans-Joachim; Kiefer Ernst-Martin; Schmitz Gerd; Zunic Franz:** Ein HN-Modellsystem für zweidimensionale, stationäre und instationäre Strömungen beim Hochwasserschutz von Städten und Siedlungen, 1987
- Nr. 57 **Knauss Jost:** Die Melioration des Kopaisbeckens durch die Minyer im 2. Jt.v.Chr. - Kopais 2 - Wasserbau und Siedlungsbedingungen im Altertum, 1987
- Nr. 58 **Mtalo Felix:** Geschiebeabzug aus Kanälen mit Hilfe von Wirbelröhren, 1988
- Nr. 59 **Yalin M. Selim; Scheuerlein Helmut:** Friction factors in alluvial rivers
Yalin M. Selim: On the formation mechanism of dunes and ripples
Keller Andreas: Cavitation investigations at one family of NACA-hydrofoils at different angles of attack, as a contribution to the clarification of scale effects at cavitation inception, 1988

- Nr. 60 **Schmitz Gerd H.:** Strömungsvorgänge auf der Oberfläche und im Bodeninneren beim Bewässerungslandbau. Grundlagen, Kritik der herkömmlichen Praxis und neue hydrodynamisch-analytische Modelle zur Oberflächenbewässerung, 1989
- Nr. 61 **Muckenthaler Peter:** Hydraulische Sicherheit von Staudämmen, 1989, *vergriffen*
- Nr. 62 **Kalenda Reinhard:** Zur Quantifizierung der hydraulischen Versagenswahrscheinlichkeit beweglicher Wehre, 1990
- Nr. 63 **Knauss Jost:** Kopais 3, Wasserbau und Geschichte, Minysche Epoche - Bayerische Zeit (vier Jahrhunderte - ein Jahrzehnt), 1990
- Nr. 64 **Kiefer Ernst-Martin, Liedl Rudolf, Schmitz Gerd H. und Seus Günther J.:** Konservative Strömungsmodelle auf der Basis krummliniger Koordinaten unter besonderer Berücksichtigung von Wasserbewegungen im ungesättigt-gesättigten Boden, 1990
- Nr. 65 **Hartung Fritz:** Der ägyptische Nil 190 Jahre im Spiel der Politik (1798-1988)
Hartung Fritz: Gedanken zur Problematik der Nilwehre
Döscher Hans-Dieter und Hartung Fritz: Kritische Betrachtungen zum Stützwehr im Toschka-Entlastungsgerinne des Assuan-Hochdammes, 1991
- Nr. 66 **Schmitz Gerd H., Seus Günther J. und Liedl Rudolf:** Ein semi-analytisches Infiltrationsmodell für Füllung und Entleerung von Erdkanälen
Keller Andreas P.: Chinese-German comparative cavitation tests in different test facilities on models of interest for hydraulic civil engineering, 1991
- Nr. 67 **Liedl Rudolf:** Funktionaldifferentialgleichungen zur Beschreibung von Wasserbewegungen in Böden natürlicher Variabilität - Beiträge zur Theorie und Entwicklung eines numerischen Lösungsverfahrens, 1991
- Nr. 68 **Zunic Franz:** Gezielte Vermaschung bestehender Kanalisationssysteme - Methodische Studien zur Aktivierung freier Rückhalteräume unter besonderer Berücksichtigung der Abflusssteuerung, 1991
- Nr. 69 **Eickmann Gerhard:** Maßstabeffekte bei der beginnenden Kavitation - Ihre gesetzmäßige Erfassung unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußgrößen, 1991
- Nr. 70 **Schmid Reinhard:** Das Tragverhalten von Erd- und Steinschüttdämmen mit Asphaltbeton-Kerndichtungen, 1991
- Nr. 71 **Kiefer Ernst-Martin:** Hydrodynamisch-numerische Simulation der Wasserbewegung im ungesättigten und gesättigten Boden unter besonderer Berücksichtigung seiner natürlichen Variabilität, 1991
- Nr. 72 **Strobl Th., Steffen H., Haug W. und Geiseler W.-D.:** Kerndichtungen aus Asphaltbeton für Erd- und Steinschüttdämme, 1992
- Nr. 73 **Symposium: Betrieb, Unterhalt und Modernisierung von Wasserbauten.**
Garmisch-Partenkirchen, 29. - 31. Oktober 1992
- Nr. 74 **Heilmair Thomas und Strobl Theodor:** Erfassung der sohnnahen Strömungen in Ausleitungsstrecken mit FST-Halbkugeln und Mikro-Flowmeter - ein Vergleich der Methoden, 1994
- Nr. 75 **Godde Dominik:** Experimentelle Untersuchungen zur Anströmung von Rohrturbinen - Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufs, 1994
- Nr. 76 **Knauss Jost:** Von der Oberen zur Unteren Isar
Alte und neue Wasserbauten rund um die Benediktenwand. Bachumleitungen - Treibholzfänge - durchschwallte Rohre - eine besondere Entlastungsanlage
Sohlensicherung an der Unteren Isar. Sohlstufenkonzept - Belegung der Sohle mit größeren Steinen in offener Anordnung, 1995
- Nr. 77 **Knauss Jost:** Argolische Studien: Alte Straßen - alte Wasserbauten. Talsperre von Mykene; Flußumleitung von Tiryns; Hydra von Lerna; Küstenpass Anigraia, 1996
- Nr. 78 **Aufleger Markus:** Ein Beitrag zur Auswertung von Erddruckmessungen in Staudämmen, 1996
- Nr. 79 **Heilmair Thomas:** Hydraulische und morphologische Kriterien bei der Beurteilung von Mindestabflüssen unter besonderer Berücksichtigung der sohnnahen Strömungsverhältnisse, 1997
- Nr. 80 **Maile Willibald:** Bewertung von Fließgewässer-Biozönosen im Bereich von Ausleitungskraftwerken (Schwerpunkt Makrozoobenthos), 1997
- Nr. 81 **Knauss Jost:** Olympische Studien: Herakles und der Stall des Augias. Kladeosmauer und Alpheiosdamm, die Hochwasserfreilegung von Alt-Olympia, 1998

- Nr. 82 **Symposium: Planung und Realisierung im Wasserbau - Vergleich von Zielvorstellungen mit den Ergebnissen**, Garmisch-Partenkirchen 15. – 17. Oktober 1998
- Nr. 83 **Hauger Stefan**: Verkehrssteuerung auf Binnenwasserstraßen – Ein Beitrag zur Optimierung der Schleusungsreihenfolge in Stillwasserkanälen und staugeregelten Flüssen, 1998
- Nr. 84 **Herbrand Karl**: Schifffahrtstechnische Untersuchungen der Versuchsanstalt Oberrach; Ein Rückblick auf ein traditionelles Untersuchungsgebiet der VAO, 1998
- Nr. 85 **Hartlieb Arnd**: Offene Deckwerke – Eine naturnahe Methode zur Sohlstabilisierung eintiefungsgefährdeter Flußabschnitte, 1999
- Nr. 86 **Spanning Michael**: Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers – Parameterstudie an einem numerischen Modell, 1999
- Nr. 87 **Kleist Frank**: Die Systemdurchlässigkeit von Schmalwänden. Ein Beitrag zur Herstellung von Schmalwänden und zur Prognose der Systemdurchlässigkeit, 1999
- Nr. 88 **Lang Tobias**: Geometrische Kriterien zur Gestaltung von Kraftwerkseinläufen. Experimentelle Untersuchungen an Rohr-S-Turbine und Durchströmturbine, 1999
- Nr. 89 **Aufleger Markus**: Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau, 2000
- Nr. 90 **Knauss Jost**: Späthelladische Wasserbauten. Erkundungen zu wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen der mykenischen Welt, 2001
- Nr. 91 **Festschrift** aus Anlass des 75-jährigen Bestehens der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München in Oberrach – Oskar v. Miller-Institut, 2001
- Nr. 92 **Wildner Harald**: Injektion von porösem Massenbeton mit hydraulischen Bindemitteln, 2002
- Nr. 93 **Wildbach Naturversuche**
Loipersberger Anton und Sadgorski Constantin: Schwemmholz in Wildbächen – Problematik und Abhilfemaßnahmen; Geschiebeuntersuchungen; 1D und 2D Abflussmodelle in einem Wildbach
Rimböck Andreas: Naturversuch Seilnetzsperrern zum Schwemmholzurückhalt in Wildbächen – Planung, Aufbau, Versuchsdurchführung und Ergebnisse
Hübl Johannes und Pichler Andreas: Zur berührungslosen Erfassung der Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit in einem Wildbachgerinne zum Zeitpunkt des Durchganges der Hochwasserwelle, 2002
- Nr. 94 **Rimböck Andreas**: Schwemmholzurückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von Seilnetzsperrern, 2003
- Nr. 95 **Nothhaft Sabine**: Die hydrodynamische Belastung von Störkörpern, 2003
- Nr. 96 **Schmautz Markus**: Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke – Entwicklung und Untersuchungen an einem numerischen Modell, 2003
- Nr. 97 **Neuner Johann**: Ein Beitrag zur Bestimmung der horizontalen Sicherheitsabstände und Fahrrinnenbreiten für Wasserstraßen, 2004
- Nr. 98 **Göhl Christian**: Bypasseinrichtungen zum Abstieg von Aalen an Wasserkraftanlagen, 2004
- Nr. 99 **Haimerl Gerhard**: Groundwater Recharge in Wadi Channels Downstream of Dams - Efficiency and Management Strategies, 2004
- Nr. 100 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 1**; Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 101 **Symposium: Lebensraum Fluss – Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie. Band 2**; Wallgau, Oberbayern, 16. bis 19. Juni 2004
- Nr. 102 **Huber Richard**: Geschwindigkeitsmaßstabseffekte bei der Kavitationserosion in der Scherschicht nach prismatischen Kavitatoren, 2004
- Nr. 103 **Exposed Thermoplastic Geomembranes for Sealing of Water Conveyance Canals**, Guidelines for Design, Supply, Installation, 2005
- Nr. 104 **Workshop „Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau“**. Wallgau, Oberbayern, 29. und 30. September 2005
- Nr. 105 **Conrad Marco**: A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams – Field and numerical investigations, 2006
- Nr. 106 **Schäfer Patrick**: Basic Research on Rehabilitation of Aged Free Flow Canals with Geomembranes, 2006

- Nr. 107 **Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern.** Beiträge zur Fachtagung am 13. und 14. Juli 2006 in Wallgau, Oberbayern, 2006
- Nr. 108 **Porras Pablo:** Fiber optic temperature measurements – Further Development of the Gradient Method for Leakage Detection and Localization in Earthen Structures, 2007
- Nr. 109 **Perzmaier Sebastian:** Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen, 2007
- Nr. 110 **Wasserbau an der TU München** – Symposium zu Ehren von Prof. Theodor Strobl am 16. März 2007 in Wallgau, Oberbayern, 2007
- Nr. 111 **Haselsteiner Ronald:** Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung, 2007
- Nr. 112 **Schwarz Peter und Strobl Theodor:** Wasserbaukunst - Oskar von Miller und die bewegte Geschichte des Forschungsinstituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach am Walchensee (1926-1951). 120 Seiten, Preis: 9,80 €, 2007
- Nr. 113 **Flutpolder: Hochwasserrückhaltebecken im Nebenschluss.** Beiträge zur Fachtagung am 19. und 20. Juli 2007 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-03-6, 240 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2007
- Nr. 114 **Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees.** Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD. ISBN 978-3-940476-04-3, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2007
- Nr. 115 **14. Deutsches Talsperrensosymposium** (14th German Dam Symposium) and **7th ICOLD European Club Dam Symposium.** Beiträge zur Tagung am 17. bis 19. September 2007 in Freising (Contributions to the Symposium on 17 - 19 September 2007 in Freising, Germany). ISBN 978-3-940476-05-0, 570 Seiten, Preis: 49,80 €, 2007
- Nr. 116 **Niedermayr Andreas:** V-Rampen – Ökologisch weitgehend durchgängige Querbauwerke. ISBN 978-3-940476-06-7, 240 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 117 **Hafner Tobias:** Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis. ISBN 978-3-940476-07-4, 206 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 118 **Wang Ruey-wen:** Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps. ISBN 978-3-940476-10-4, 280 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 119 **Fischer Markus:** Ungesteuerte und gesteuerte Retention entlang von Fließgewässern – Beurteilung der Wirksamkeit möglicher Maßnahmen unter Verwendung hydrodynamisch-numerischer Modellierung. ISBN 978-3-940476-11-1, 220 Seiten, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 120 **Fiedler Katharina:** Erfassung hydromorphologischer Vorgänge bei Hochwasser mit Hilfe von ADCP-Messungen. ISBN 978-3-940476-12-8, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 121 **Hoepffner Roland:** Distributed Fiber Optic Strain Sensing in Hydraulic Concrete and Earth Structures. Measuring Theory and Field Investigations on Dams and Landslides. ISBN 978-3-940476-13-5, Preis: 29,80 €, 2008
- Nr. 122 **Gewässermorphologie und EU-WRRL:** Beiträge zur Fachtagung am 24. und 25. Juli 2008 in Wallgau, Oberbayern. ISBN 978-3-940476-15-9, 230 Seiten, durchgehend farbige Abbildungen, Preis: 34,80 €, 2008