

**Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften**



**Numerische Simulation einer Fließgewässervereinigung
am konkreten Fall der Vereinigungsstelle Sill-Valserbach
in Stafflach bei Matrei am Brenner**

MASTERARBEIT

erstellt am Institut für Wasserwesen,
Professur für Hydromechanik und Wasserbau

Eingereicht von: Daniel Holzer
Studiengang: Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften 2010
Matrikel-Nr.: 1100090

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Phys. Andreas Malcherek
Zweitgutachter: Dr.-Ing. Helmut Kulisch
Abgabe: 04.07.2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Hochwassergefährdung in Österreich.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
1.2.1 Thema der Arbeit	2
1.2.2 Vorgehen	2
1.3 Beschreibung der Vereinigungsstelle	4
2 Hydraulik von Fließgewässervereinigungen	7
2.1 Qualitative Beschreibung der Abflussvorgänge	7
2.1.1 Flusssdynamikmodell nach Mosley.....	7
2.1.2 Scherebenen	8
2.1.3 Zirkulierende Strömungen	8
2.1.4 Untersuchung der Fließgeschwindigkeiten	10
2.1.5 Einfluss von Abflussverhältnissen und Zusammenflusswinkel.....	12
2.2 Quantitative, empirische Betrachtung einer Vereinigungsstelle	14
2.2.1 Vereinfachungen	14
2.2.2 Energiehöhe und Energieverluste	14
2.2.3 Energieverluste der Vereinigungsstelle.....	16
3 Vorstellung des Modells	20
3.1 Hydro_AS.....	20
3.1.1 Navier-Stokes-Gleichungen	20
3.1.2 Flachwassergleichungen (FWG).....	21
3.1.3 Diskretisierung	23
3.2 SMS	27
4 Aufbau und Plausibilisierung des Grundlagennetzes	28
4.1 Gitternetzaufbau	28
4.2 Detailmodellierungen abflussrelevanter Stellen.....	31
4.2.1 Brücke B182 und Steinschüttung vor Kraftwerk.....	31
4.2.2 Eintritt Sill in Vereinigung und Ausspülungen am westlichen Ufer.....	32
4.3 Randbedingungen	33
4.4 Kalibrierung.....	35

4.5	Plausibilisierung des Modells.....	37
5	Optimierung des Vereinigungsbereichs	38
5.1	Vorgaben des Auftraggebers	38
5.1.1	Konstruktive Randbedingungen.....	38
5.1.2	Bemessungslastfälle	40
5.2	Ausbaustufen	40
5.2.1	Ausbaustufe 0: Ist-Zustand	40
5.2.2	Ausbaustufe 1: Rechtes Leitwerk.....	40
5.2.3	Ausbaustufe 2: Sporn	41
5.3	Ergebnisse der Rechnungsläufe.....	43
5.3.1	Messstrategie.....	43
5.3.2	Ergebnisse: Valserbach	44
5.3.3	Ergebnisse: Sill.....	50
5.3.4	Untersuchung der Überschwemmungsbereiche.....	52
5.4	Weitere Optimierungsmöglichkeiten.....	55
5.4.1	Schließen des Sporns durch ein Schott	55
5.4.2	Reduzierung der Sohlrauigkeit.....	56
6	Zusammenfassung und Ausblick	59
	Anhang.....	VIII
	Literaturverzeichnis	XIV
	Eidesstattliche Erklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinigung Sill-Valserbach mit Siedlungsstruktur der Gemeinde Stafflach [basierend auf Google Maps, Stand 30.06.14]	4
Abbildung 2: Vereinigung Sill-Valserbach , Blickrichtung Süd-Ost	6
Abbildung 3: Flussdynamikmodell einer Fließgewässervereinigung [Best, 1987]	7
Abbildung 4: Sekundärströmung hervorgerufen durch Scherebenen [Ashmore, 1982]	9
Abbildung 5: Beispielhafte Ausbildung von Geschwindigkeitsverteilungen und Wasserständen an einer Fließgewässervereinigung	11
Abbildung 6: Dimensionslose Größe des Fließtrennungsgebietes in Abhängigkeit von Abflussverhältnissen und Zusammenflusswinkel [Best und Raid, 1984]....	12
Abbildung 7: Mögliche Anströmsituationen der Vereinigungsstelle [(A): Ashmore und Parker 1982; (B): Ashmore et. al., 1992; (C): De Serres et. al., 1999].....	13
Abbildung 8: Zustandsdiagramm für einen Fließquerschnitt [Zanke, 2002].....	15
Abbildung 9: Energieverluste bei einem Zusammenflusswinkel von 45° [Idelchik et. al., 1989]	16
Abbildung 10: Energieverluste bei einem Zusammenflusswinkel von 90° [Idelchik et. al., 1989].....	18
Abbildung 11: Gitternetzarten: a) kartesisch; b) strukturiert nichtorthogonal; c) unstrukturiert [Nujic, 1998]	24
Abbildung 12: von links nach rechts: Zellenmittelpunkt-FVM; Zelleneckpunkt-FVM. Zelleneckpunkt-Finite Element Methode (FEM) unstrukturiertes Netz [Iv. 4, Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24].....	25
Abbildung 13: Berechnungsgebiet Valserbach-Schmirnbach mit relevantem Ausschnitt der Vereinigung Sill-Valserbach.....	29
Abbildung 14: Vergleich der Vereinigungsstelle zwischen dem alten Modell mit der neu modellierten Version	30
Abbildung 15: Detailmodellierung der Brücke B182 und Steinschüttung vor Kraftwerk	31
Abbildung 16: Detailmodellierung: Eintritt der Sill in die Vereinigung und Ausspülungen am westlichen Ufer	32
Abbildung 17: Materialtypen der Topografie im Vereinigungsbereich	33
Abbildung 18: Vorläufiger Lageplan der Optimierungsmaßnahmen [in Anlehnung an Ettinger, Juni 2014]	39
Abbildung 19: Ausbaustufen: oben links: Ist-Zustand; oben rechts: Sporn 1; unten links: Sporn 2; unten rechts: Sporn 3	42
Abbildung 20: Ergebnisvisualisierung mit SMS, Sporn 2 Lastfall 3	43
Abbildung 21: Verlauf der Messstrecke, Tabellendarstellung der abgegriffenen Werte.....	44
Abbildung 22: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 1	45
Abbildung 23: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 2	46

Abbildung 24: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 3	47
Abbildung 25: Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Vereinigung, Lastfall 3	48
Abbildung 26: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 4	49
Abbildung 27: Wassertiefen der Sill bis zur Vereinigung, Lastfall 3.....	51
Abbildung 28: Wassertiefen der Sill bis zur Vereinigung, Lastfall 4.....	51
Abbildung 29: Überschwemmungsgebiete Ist-Zustand, Lastfall 2	52
Abbildung 30:Überschwemmungsgebiete Ist-Zustand, Lastfall 3	53
Abbildung 31: Repräsentativer Querschnitt der Wassertiefen im überschwemmten Gemeindegebiet	54
Abbildung 32: Darstellung der ungünstig wirkenden Geometrie links: Sporn 2; rechts Sporn 3.....	55
Abbildung 33: Vergleich Sporn 2 mit und ohne Schott, Lastfälle 1-3	56
Abbildung 34: Änderung der Wassertiefen durch Reduktion der Sohlrauigkeit im Lastfall 2	57
Abbildung 35: Hydrologischer Längsschnitt der Sill [Wildbach und Lawinenverbauung 2010]	VIII
Abbildung 36: Fließgeschwindigkeiten im Valserbach, Lastfall 1.....	IX
Abbildung 37: Fließgeschwindigkeiten im Valserbach, Lastfall 2.....	IX
Abbildung 38: Fließgeschwindigkeiten im Valserbach, Lastfall 4.....	X
Abbildung 39: Wasserstände in der Sill, Lastfall 1	X
Abbildung 40: Wasserstände in der Sill, Lastfall 2	XI
Abbildung 41: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 1	XI
Abbildung 42: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 2	XII
Abbildung 43: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 3	XII
Abbildung 44: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 4	XIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung der Rauigkeiten auf die einzelnen Flächentypen	34
Tabelle 2: Verringerte Strickler-Beiwerte der Bachsohlen.....	35
Tabelle 3: Ergebnisse der Kalibrierungsläufe.....	36
Tabelle 4: Wahl der Strickler-Beiwerte für Optimierungsläufe	36

Abkürzungsverzeichnis

ca.	-	circa
d.h.	-	das heißt
FEM	-	Finite Element Methode
FVM	-	Finite Volumen Methode
FWG	-	Flachwassergleichungen
HQ	-	Hochwasserbemessungsabfluss
Iv.	-	Internetverweis
Mio.	-	Millionen
NSG	-	Navier-Stokes-Gleichungen
SMS	-	Surface Modelling System

1 Einführung

1.1 Hochwassergefährdung in Österreich

Aufgrund der relativ dichten Besiedlung Österreichs und den durch das Gebirge vorgegebenen, hauptsächlich in Tallage vorhandenen Bebauungsmöglichkeiten entstanden die meisten Siedlungsstrukturen an Bächen, Flüssen oder Vereinigungsbereichen zweier Fließgewässer, welche von den Bergen in die Täler fließen. Gefahren entstehen hier bei Starkregenereignissen und Schneeschmelzen. Bedingt durch das karge, steile Gebirge fließen in kürzester Zeit sehr große Mengen Wasser aufgrund fehlender Retentionsmöglichkeiten direkt in die Wildbäche und lassen diese um ein Vielfaches ihrer eigentlichen, normalen Abflussspende anwachsen [Iv.1]. Zusätzlich kann das mitgerissene Geschiebe den entstehenden Schaden an Wohn- und Infrastruktur nochmals erhöhen. Von besonderer Bedeutung sind Vereinigungsgebiete von Wildbächen in Dorf- oder Stadtnähe. Eingedämmt durch die Siedlung, tritt das Wasser bei Extremereignissen und unzureichendem hydraulischem Abflussvermögen über die kanalisierten Ufer.

Das österreichische Umweltbundesamt gibt als Schadenshöhe für das Hochwasser 2013 eine Summe von ca. 870 Mio. € direkter Schäden an [Iv.2]. Ein Großteil der Summe entfällt auf den Ausuferungsbereich der Donau, da sich hier der Großteil der Industrie sowie große Städte angesiedelt haben. Dennoch kann man auch auf den enormen Schaden im Bereich der ebenfalls hochwasserbelasteten Flüsse und Bäche im Einzugsgebiet der Donau schließen. Eine Betrachtung dieser Gefahren und gegebenenfalls eine Optimierung solcher Fließgewässervereinigungen ist von großer Wichtigkeit, da eine Verbesserung der Abflusssituation maßgeblich zum Schutz von Leib und Leben sowie der lokalen Infrastruktur beiträgt und darüber hinaus ein sorgenfreieres Leben im Schutz ausgebauter und hydraulisch optimierter Vereinigungsbereiche ermöglicht.

1.2 Aufgabenstellung

1.2.1 Thema der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird im Vereinigungsbereich zweier Wildbäche eine numerische Simulation mit hydraulischer Optimierung durchgeführt.

Konkret geht es um den Zusammenfluss von Sill und Valserbach in Stafflach bei Matrei am Brenner, Österreich. Ausgelöst durch Extremwetterereignisse kam es in den letzten Jahren immer wieder zu erheblichem Rückstau und Ausuferungen des Valserbachs. Zur Verbesserung der Situation soll nun die genannte Schlüsselstelle mittels 2D-numerischer Simulation analysiert und baulich optimiert werden.

Die Arbeit basiert auf einem Projekt des forsttechnischen Dienstes für Wildbach und Lawinenverbauung des österreichischen Lebensministeriums, welcher im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Auftraggeber bezeichnet wird. Hierbei bestand der Auftrag darin, auf Grundlage eines bereits verfügbaren Modells des Valserbachs die Vereinigung mit der Sill zu modellieren und diese im Anschluss zu optimieren. Dieses verbesserte Modell sollte daraufhin mit zuvor definierten Hochwasserabflüssen im Bereich HQ30-HQ100 belastet, die Ergebnisse dokumentiert und mit dem Ist-Zustand verglichen werden.

Ziel dieser Arbeit und des Projekts ist die Herausarbeitung einer Optimierungsvariante, welche die Abflusssituation des Zusammenflusses von Sill und Valserbach verbessert und das bei einem Extremhochwasser entstehende Überschwemmungsgebiet im Siedlungsbereich reduziert.

Ein erster Überblick des Vorgehens ist im nachfolgenden Abschnitt aufgeführt.

1.2.2 Vorgehen

Zur Vorbereitung auf das Projekt erfolgt zunächst eine Grundlagenrecherche zum Thema Hochwassergefährdung in Österreich, deren Ergebnisse die Relevanz und Dringlichkeit dieses Themas hervorheben. Daraufhin werden die Vereinigungsstelle Sill-Valserbach besichtigt und mit Fotos dokumentiert. Eine Beschreibung des Ist-Zustandes der Vereinigungsstelle Sill-Valserbach mit allen hydraulisch wichtigen Bereichen folgt in Abschnitt 1.3.

Ausgehend von dieser spezifischen Vereinigungsstelle wurde in Kapitel 2 zunächst für eine modellhafte, allgemeine Vereinigung mittels einer Literaturrecherche alle hydraulisch relevanten Parameter erfasst und diese im Hinblick auf ihre Wichtigkeit und Optimierbarkeit bewertet.

Im dritten Kapitel wird das numerische Modell, dessen Einsatzgrenzen und die im Modell gewählten Diskretisierungen von Raum und Zeit vorgestellt. Außerdem werden die grundlegenden Schritte beschrieben, die notwendig sind, um die allgemeinen Navier-Stokes Gleichungen in die Flachwassergleichungen zu überführen, welche im Modell implementiert sind.

Auf Grundlage der in Kapitel 2 gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 4 auf Basis eines bereits vorhandenen Modells die Vereinigungsstelle Sill-Valserbach durch Einarbeitung von Daten aus Orts- und Überfliegungsvermessung modelliert und in hydraulisch wichtigen Bereichen verfeinert. Daran anschließend erfolgt eine Kalibrierung des Modells.

Dieses kalibrierte Modell wird in Kapitel 5 in verschiedenen Ausbausritten optimiert und durch zuvor definierter Lastfälle mit dem Ist-Zustand der Vereinigungsstelle verglichen. Außerdem erfolgt eine Untersuchung der Verbesserung der Überschwemmungsverhältnisse durch Veränderungen der Geometrien im Bereich der Vereinigung.

In Kapitel 6 werden die Arbeit sowie die Ergebnisse aus Kapitel 5 zusammengefasst.

1.3 Beschreibung der Vereinigungsstelle

Der Zusammenfluss von Sill und Valserbach passiert am westlichen Ende von Stafflach bei Matri am Brenner. Es durchquert zunächst der Valserbach die Gemeinde von Ost nach West und mündet in die von Süden nach Norden fließenden Sill (siehe Abbildung 1). Die in dieser Abbildung genutzten Bezeichnungen wichtiger Bereiche der Vereinigungsstelle dienen als Grundlage für weitere Positionsbestimmungen in dieser Arbeit.



Abbildung 1: Vereinigung Sill-Valserbach mit Siedlungsstruktur der Gemeinde Stafflach [basierend auf Google Maps, Stand 30.06.14]

Im Bereich der Siedlungsstrukturen ist der Valserbach kanalisiert und wird in einem ca. 2 m tiefen Rechteckgerinne unterhalb der Straßennarbe abgeführt. Die Wände des Gerinnes wurden teilweise mit Beton erneuert, teilweise liegen aber noch alte, durch Hochwasser ausgewaschene, marode Steinmauern vor. Im rückstaurelevanten Bereich des Flusses liegen zwei Brücken, die das Gerinne überspannen, dieses im Querschnitt nach oben begrenzen und daher hydraulisch genauer untersucht werden müssen. Zusätzlich verringert eine ca. 1,3 m breite Steinschüttung am westlichen Ausgang der Brücke B182 den Fließquerschnitt. Daran anschließend verläuft im Abstand von ca. 1,5 m ein

Abwasserrohr orthogonal zur Fließrichtung auf Höhe der Fahrbahnunterkante der Brücke. Im weiteren Verlauf öffnet sich der Querschnitt des Valserbachs leicht und wird nun an beiden Seiten durch Steinschüttungen trapezartig kanalisiert. Kurz vor der Vereinigungsstelle wird der Fließquerschnitt durch Geröllanhäufungen an einer Leitmauer eines Kraftwerksauslasses wieder verringert. Der Valserbach fließt über die beschriebene Strecke mit einer Neigung von ca. 6.4 m/km in die Vereinigungsstelle ein und führt in hochwasserfreien Zeiten deutlich unter 10 m³/s.

Der Verlauf der Sill ist bis ca. 30 m vor der Vereinigungsstelle ebenfalls kanalisiert. Ein Überfallwehr staut hier das Wasser auf und ermöglicht eine Wasserentnahme für das angrenzende Kleinwasserkraftwerk, dessen Auslass sich im Bereich der Vereinigung befindet. In hochwasserfreien Zeiten wird fast das gesamte Wasser, ebenfalls deutlich unter 10 m³/s, zur Stromproduktion umgeleitet. Das ursprüngliche Bachbett der Sill ist nach dem Wehr bis zu Vereinigung äußerst uneben und voller Geröllablagerungen. Das Bett hat hier eine Neigung von 5.7 m/km und wird im Osten durch das senkrechte Fundament des Kraftwerkshauses und im Westen durch eine steil ansteigende Bergflanke begrenzt. Kurz vor dem Eintritt in den Vereinigungsbereich erfolgt eine leichte Querschnittsverengung durch Geröllablagerungen an der Bergflanke.

Die Sill tritt in den Bereich der Vereinigung annäherungsweise mit einem Winkel von 0° in Bezug auf den abfließenden Unterstrom ein und kann deshalb als Hauptströmungsrichtung betrachtet werden. Die Westseite des Zusammenflusses wird weiterhin durch die Bergflanke begrenzt. Allerdings können hier schon massive Auswaschungen und freigelegte Wurzeln beobachtet werden. Speziell in Verlängerung der Einströmrichtung des Valserbachs sind die Auswaschungen am größten. Der Valserbach trifft hier mit einem Innenwinkel von 85° auf die Vereinigungsstelle. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, begrenzt im Süden der Auslass des Wasserkraftwerks den Zusammenfluss und kann zunächst als dritter einfließender Strom betrachtet werden. Nach der Vereinigung strömt die Sill unter einer Brücke durch und fließt in Hochwasser unkritischen Bereichen weiter. Im gesamten Bereich der Vereinigung sowie in den Oberströmen erschweren große Geröllablagerungen und steinige, unebene Flussbette das Abfließen.

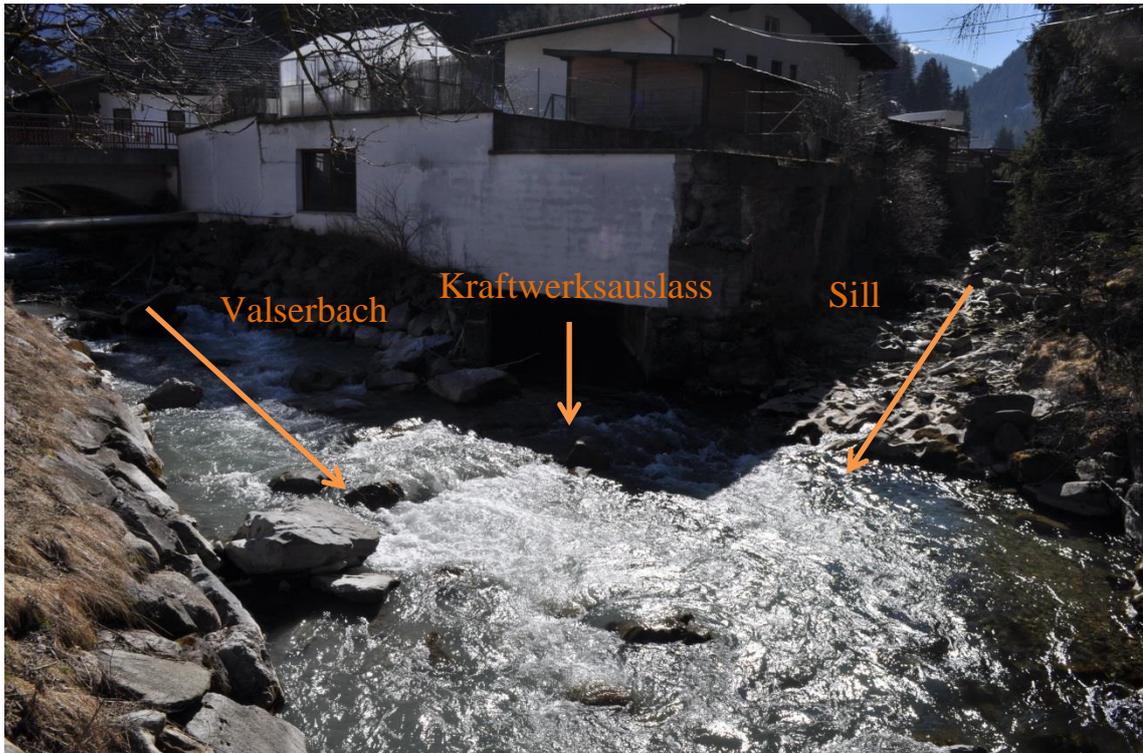


Abbildung 2: Vereinigung Sill-Valsertalbach , Blickrichtung Süd-Ost

Zusammengefasst betrachtet ist der Zusammenfluss von Valsertalbach und Sill sehr komplex, da es im Bereich der Vereinigung weder kanalartige, homogene Flussbettstrukturen gibt noch das Abflussverhalten in Abhängigkeit des Durchflusses gleichmäßig verläuft. Die Sohle ist durch Geröllablagerungen hydraulisch sehr ungünstig und stört ein widerstandsarmes, turbulenzfreies Fließverhalten. Aus diesem Grund ist zunächst eine Literaturstudie zwingend notwendig, um die abflussrelevanten Parameter sowie das grundlegende Fließverhalten zweier Flüsse im Bereich einer Vereinigung erkennen zu können.

2 Hydraulik von Fließgewässervereinigungen

Es erfolgt zunächst eine qualitative Betrachtung einer Vereinigungsstelle. Im Anschluss wird quantitativ über analoge, empirische Methoden abgeschätzt, wie sich eine Vereinigung zweier Fließgewässer abflussrelevant auswirkt.

2.1 Qualitative Beschreibung der Abflussvorgänge

2.1.1 Flussschichtmodell nach Mosley

Grundlage dieser Untersuchung bildet das Schaubild in Abbildung 3, welches zunächst von Mosley (1976) erstellt und daraufhin von Best (1987) weiterentwickelt wurde.

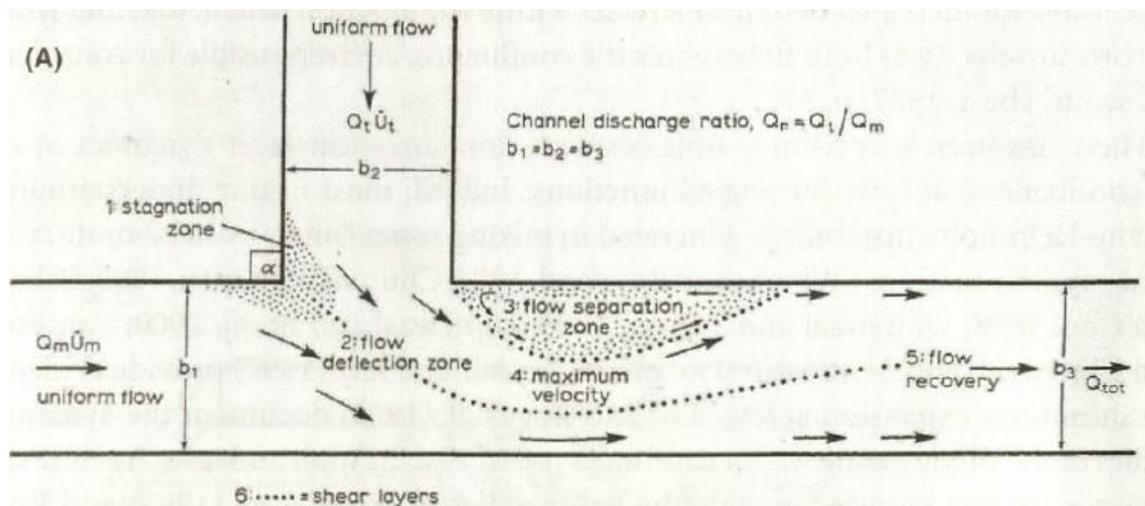


Abbildung 3: Flussschichtmodell einer Fließgewässervereinigung [Best, 1987]

Best zeigt hier am Beispiel einer 90° Einmündung sechs relevante Zonen im Bereich des Zusammenflusses auf, die im Folgenden näher erläutert werden.

Zunächst erfahren beide Strömungen beim Einfließen in die Vereinigungsstelle eine gegenseitige Beeinflussung aufgrund ihrer Trägheit und ihres Impulses, welcher sie beim Zusammentreffen an den unteren Rand des Hauptkanals ablenkt (flow deflection zone) [2]. Diese Ablenkung schafft eine Stelle [1], in welcher geringe bis gar keine Fließbewegungen herrschen, die Stagnationszone (stagnation zone).

Da der Großteil des ankommenden Abflusses abgelenkt an den unteren Bereich fließt, entsteht ein Fließtrennungsgebiet (flow separation zone) [3] ähnlich der Stagnationszo-

ne, in welcher das Wasser mit verringerter Geschwindigkeit, beeinflusst durch das vorbei strömende Wasser, kreisartig fließt.

Durch die Reduktion des Fließquerschnitts aufgrund des Fließtrennungsgebietes entstehen Zonen maximaler Fließgeschwindigkeiten (maximum velocity)[4].

Zuletzt erfolgt unterstrom der Vereinigung eine Normalisierung (flow recovery) und Ebnung des Fließzustandes hin zum Normalabfluss [5].

2.1.2 Scherebenen

Von besonderer Bedeutung für die Wirkungsweise und das Verständnis der Vereinigungsstelle sind die Scherebenen [6] zwischen den verschiedenen Zonen unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten [Biron et. al., 2008]. Hier treffen hohe und niedrige Geschwindigkeiten zusammen. In Abbildung 3 lassen sich zwei Scherebenen erkennen. Im Vergleich zur Fließgeschwindigkeit des Hauptstroms fließt das Wasser im Fließtrennungsgebiet nur sehr langsam, sodass sich eine Scherebene zwischen den beiden Zonen bildet. Das schnell fließende Wasser des Hauptstroms wird hier gebremst und bildet Wirbelströmungen. Die zweite Scherebene entsteht durch das Aufeinandertreffen der beiden ankommenden Abflüsse. Speziell bei unterschiedlichen Neigungen, Querschnitten und Durchflüssen der beiden Ströme kommt es zu extremen Geschwindigkeitsunterschieden. Es entstehen Verwirbelungen und Sekundärströmungen, auf die im Folgenden noch genauer eingegangen wird. Diese Turbulenzen und Strömungen sind maßgeblich für die Erhöhung des Fließwiderstandes im Bereich der Vereinigungsstelle verantwortlich [Biron et. al., 2008].

2.1.3 Zirkulierende Strömungen

Die oben angesprochenen Sekundärströmungen bilden sich nach Ashmore (1982) in zwei gegenläufigen Haupthelizes aus. Entsteht durch ungünstige Einströmung der beiden Oberströme ein Fließtrennungsgebiet kann hier ebenfalls an der Scherebene eine Helixströmung entstehen. In Abbildung 4 lässt sich erkennen, dass die beiden zusammentreffenden Strömungen den Wasserspiegel an der Scherebene leicht anheben. Das Wasser strömt in vertikaler Richtung unter großen Turbulenzen nach unten, um an den Außenwänden des Flussbettes wieder nach oben und unterhalb des Wasserspiegels wieder zusammen zu fließen [Mosley, 1976]. Außerdem lässt sich erkennen, dass durch diese vertikalen Strömungszustände das Flussbett bei geeigneten Korngrößen der Sohle ausgespült wird.

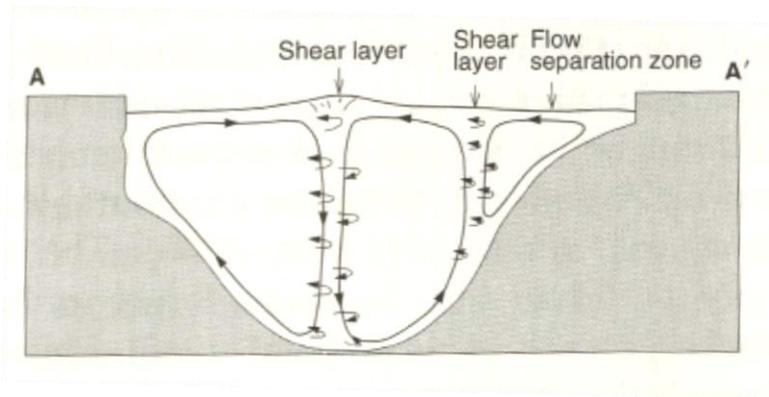


Abbildung 4: Sekundärströmung hervorgerufen durch Scherebenen [Ashmore, 1982]

Aufgrund der Gefahr der Auswaschung des Flussbettes beschäftigt sich ein Großteil der die Fließgewässervereinigung betreffenden Literatur im Schwerpunkt mit der Erforschung dieser dreidimensionalen Spiralströmung. Gerade in den Bereichen der Vereinigung großer Fließgewässer mit sandiger Sohle ist die Gefahr der Veränderung des morphologischen Zustandes groß. Da es in dieser Arbeit aber ausschließlich um die Optimierung der Vereinigungsstelle der beiden Gebirgsbäche Sill und Valserbach geht, wird im Folgenden nicht weiter allgemein auf die Morphologie eines Zusammenflusses eingegangen. Dies kann im Rahmen der Betrachtung von Gebirgsbächen vernachlässigt werden, da diese im Allgemeinen, bedingt durch höhere Neigungen der Sohle, hohe Fließgeschwindigkeiten bei geringer Wassertiefe aufweisen, was eine Ausbildung von zirkulierenden Strömungen verhindert. Hinzu kommt, dass die Strömungen durch das Weiterfließen in Hauptströmungsrichtung einen dreidimensionalen Charakter haben. Dies kann in einem 2D-Modell, welches dieser Arbeit zugrunde liegt und im weiteren Verlauf näher erläutert wird, nicht wiedergegeben werden.

2.1.4 Untersuchung der Fließgeschwindigkeiten

Neben den oben beschriebenen Spiralströmungen sind Veränderungen im Geschwindigkeitsfeld an der Vereinigungsstelle verantwortlich für Energieverluste.

Durch die Bildung eines Fließtrennungsgebiets an den Rändern des Flussbetts wird der Fließquerschnitt an dieser Stelle erheblich reduziert. Dies hat zur Folge, dass das Wasser, dem Kontinuitätsgrundsatz folgend, auf das bis zu 1.5 -fache der ursprünglichen Fließgeschwindigkeit beschleunigt wird [Roy et. al., 1988]. Die erhöhte Geschwindigkeit hat zur Folge, dass sich die örtlichen Energieverluste h_v an der Vereinigungsstelle gemäß der Gleichung von Darcy-Weisbach in zweiter Potenz erhöhen [Zanke, 2002].

$$h_v = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

mit: ζ = Widerstandsbeiwert [-]

v = Fließgeschwindigkeit [m/s]

g = Gewichtskraft [m²/s]

Nach dem Zusammenfließen der beiden Ströme erfolgt eine Beruhigung und Glättung der Strömungen. Laut Roy et. al. (1988) kann hier eine Entschleunigung der Fließgeschwindigkeit beobachtet werden, deren Durchschnittsgeschwindigkeit gegenüber denjenigen an der Vereinigungsstelle geringer sind.

Abbildung 5 zeigt hier noch einmal beispielhaft das Strömungsverhalten an einer Vereinigungsstelle mit einem Innenwinkel von 60°.

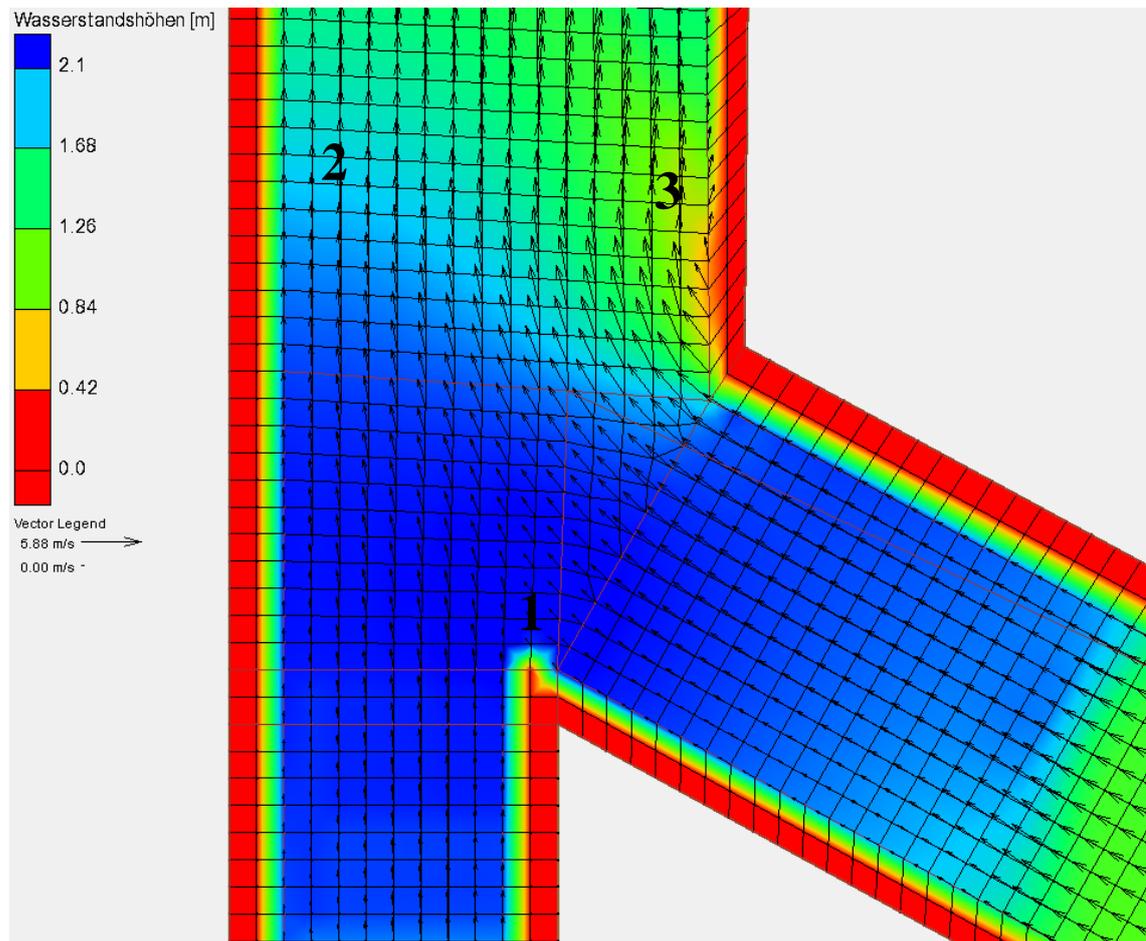


Abbildung 5: Beispielhafte Ausbildung von Geschwindigkeitsverteilungen und Wasserständen an einer Fließgewässervereinigung

An der Stelle [1] sind hier eine starke Reduktion der Geschwindigkeit und eine Erhöhung des Wasserstandes zu vermerken. Die Wassermassen prallen hier zunächst aufeinander. Es entstehen Turbulenzströmungen und Impulsverluste. Von besonderer Bedeutung sind die Positionen [2] und [3] mit einem Wasserspiegelhöhenunterschied von 30 cm. Die Wassermassen des Nebenflusses werden durch ihren Impuls an die linke Seite des Hauptflusses gedrückt. Außerdem erfolgt eine Geschwindigkeitszunahme, die auf der einen Seite durch den verengten Querschnitt des Fließtrennungsgebietes bedingt ist. Auf der anderen Seite erfolgt eine Beschleunigung durch die Entstehung eines Wellentals nach vorherigem Aufstauen durch das Zusammenprallen.

Im folgenden Abschnitt werden die Abflussverhältnisse und der Zusammenflusswinkel als maßgebende Parameter für die Ausprägung eines Fließtrennungsgebietes betrachtet.

2.1.5 Einfluss von Abflussverhältnissen und Zusammenflusswinkel

Bei der Betrachtung einer Vereinigungsstelle fällt auf, dass Scherebenen und Fließtrennungsgebiete nicht konstant in Bezug auf ihre Position, ihre Größe oder ihr grundsätzliches Vorhandensein sind. Hierbei sind hauptsächlich das Abflussverhältnis zwischen den beiden ankommenden Strömen und der Zusammenflusswinkel von Bedeutung [Best und Raid, 1984]. Abbildung 6 zeigt hier das Zusammenspiel dieser zwei Parameter in Bezug auf die Größe des Fließtrennungsgebiets.

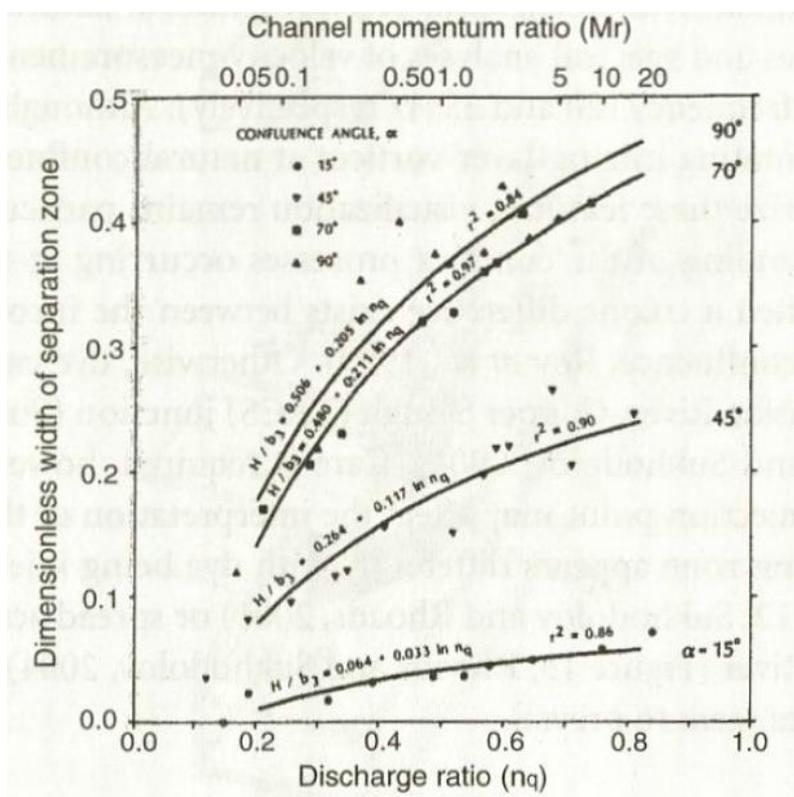


Abbildung 6: Dimensionslose Größe des Fließtrennungsgebietes in Abhängigkeit von Abflussverhältnissen und Zusammenflusswinkel [Best und Raid, 1984]

Die Abbildung bezieht sich auf einen Hauptstrom, in welchen, abhängig vom Zusammenflusswinkel (confluence angle), ein Nebenstrom einfließt. Das Abflussverhältnis n_q (discharge ratio) bezieht sich hier auf das Verhältnis von:

$$n_q = \frac{\text{Wassermasse Nebenstrom}}{\text{Wassermasse gesamt}} \quad (2)$$

Demnach erhöht sich die Weite des Fließtrennungsgebiets je größer der Zusammenflusswinkel ist und je mehr Wasser im Verhältnis zum Hauptstrom aus dem Nebenstrom in die Vereinigungsstelle fließt. Resultierend hieraus erhöhen sich die Energieverluste größerer Fließgeschwindigkeiten aufgrund eines verkleinerten Fließquerschnitts. Das Verhältnis des Impulses der ankommenden Wassermassen beider Ströme nimmt eben-

falls mit steigendem Winkel und Abflussverhältnis zu und drückt die Wassermassen am Beispiel von Abbildung 3 an den unteren Rand der Zusammenflussstelle.

Neben diesen zwei Hauptparametern sind noch weitere Größen für eine sich einstellende Fließsituation verantwortlich. Ebenso wie der Zusammenflusswinkel sind die Geometrie der Vereinigungsstelle, die Sohlhöhenlagen und Sohlhöhenunterschiede statische Größen, die essentiell zum Verständnis und zur Analyse von Vereinigungsstellen sind [Best und Raid, 1984].

Erschwerend für eine allgemeine Betrachtung einer Fließgewässervereinigung kommen verschiedene Anströmverhältnisse der beiden ankommenden Ströme zum Zusammenfluss hinzu. In Abbildung 3 strömt das Wasser gerade auf die Vereinigungsstelle zu. Das Wasser bewegt sich Drall frei und ohne vorherige Beeinflussung.

Abbildung 7 zeigt verschiedene natürliche Situationen, in welchen das Wasser durch einen gekrümmten Fließweg in Drall versetzt wurde [Biron et. al., 2008].

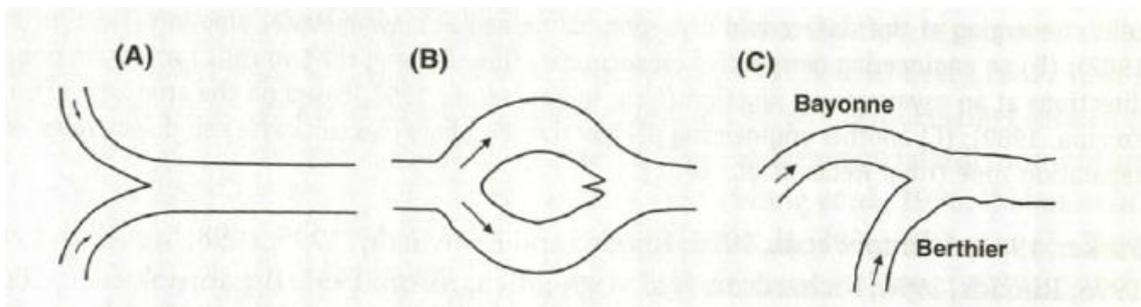


Abbildung 7: Mögliche Anströmsituationen der Vereinigungsstelle [(A): Ashmore und Parker 1982; (B): Ashmore et. al., 1992; (C): De Serres et. al., 1999]

Der eingetragene Impuls muss beim Zusammentreffen der beiden Oberströme an der Vereinigungsstelle berücksichtigt werden. Dies hat sowohl Einfluss auf die Ausbildung eines Fließtrennungsgebiets als auch auf die turbulenten Sekundärströmungen. So hat zum Beispiel die Teilabbildung (C) zwei gleich gekrümmte Oberströme. Es entstehen hier Sekundärströmungen, die, in Blickrichtung Zusammenfluss, beide gegen den Uhrzeigersinn drehen. Dies wirkt wiederum gegen die sich im Normalfall ausbildenden gegenläufigen Spiralströmungen beim Zusammenfluss.

Zusammengefasst ergeben alle betrachteten Parameter einer Vereinigungsstelle ein sehr komplexes und individuell zusammengesetztes Bild, welches zwar qualitativ beschrieben werden kann, aber nur sehr schwer zu verallgemeinern ist. So können Abflussverhältnis und Zusammenflusswinkel in Beziehung zum Fließverhalten gesetzt werden

(siehe Abbildung 6), die Geometrie jedoch bedarf aufgrund ihrer Komplexität eine Einzelfalluntersuchung.

Es wird im Folgenden dennoch versucht mit Vereinfachungen, empirisch ermittelten Formeln und Tabellenwerte, eine Abschätzung über die Energieverluste infolge des Zusammenflusses zweier Ströme zu ermitteln, um damit auf eine mögliche Anhebung des Wasserspiegels und eine damit einhergehende Überschwemmungsgefahr schließen zu können.

2.2 Quantitative, empirische Betrachtung einer Vereinigungsstelle

2.2.1 Vereinfachungen

Empirische Berechnungsformeln und Tabellenwerke zu Energiehöhenverlusten existieren aufgrund der hohen Individualität natürlicher Vereinigungen ausschließlich für kanalartige Zusammenflüsse. Hierbei sind die Geometrie und die Sohlbeschaffenheit genau definiert. Relevant und maßgeblich entscheidend für das Abflussverhalten sind demnach nur der Einströmwinkel sowie das Abflussverhältnis. Hinzu kommt lediglich noch der Einfluss aus den Querschnittsverhältnissen der Oberströme, welche in Verbindung mit dem Durchfluss entscheidend für die Einströmgeschwindigkeiten in die Vereinigungsstelle sind.

2.2.2 Energiehöhe und Energieverluste

Ergebnis dieser Gleichungen und Tabellen ist stets eine Aussage über die lokale Energieverlusthöhe der Vereinigungsstelle. Streicht man diese Verluste sowie die Sohlhöhe z zunächst für das Verständnis aus der Energiegleichung und nimmt eine gleichbleibende Druckverteilung an,

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_v = \text{const.} \quad (3)$$

so ergibt sich die spezifische Energiehöhe: h_E :

$$h_E = h + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

mit: h = Wassertiefe [m]

v = Fließgeschwindigkeit [m/s]

g = Gewichtskraft [m^2/s],

mit der das Wasser abfließt [Zanke, 2002]. Es muss jedoch eine Mindestenergiehöhe h_{gr} vorhanden sein, damit das Wasser überhaupt fließt. Ist dies nicht der Fall, steigt der Wasserspiegel so lange bis: $h_E = h_{gr}$, was beispielsweise bei einem angeströmten Wehr der Fall ist, bis die Kronenhöhe erreicht wird. Bei $h_E > h_{gr}$ kann das Wasser wie in Abbildung 8 zu sehen in zwei verschiedenen Stadien, strömend oder schießend, abfließen.

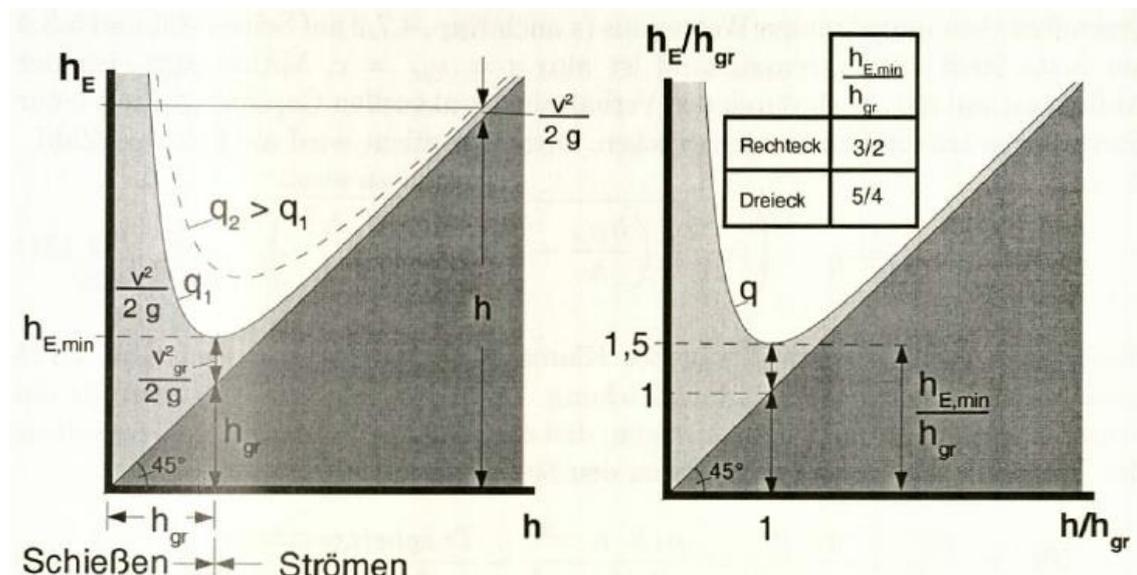


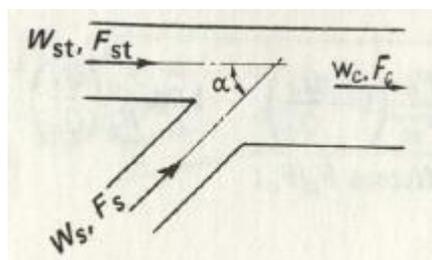
Abbildung 8: Zustandsdiagramm für einen Fließquerschnitt [Zanke, 2002]

Verändern sich im Verlauf eines Gewässers nur beispielsweise Sohlrauigkeit oder Querschnitt und bremsen die Strömung ab, so nähert sich die Energiehöhe dem Grenzzustand sofern kein weiterer Energieeintrag in Form von Beschleunigung aufgrund steilerer Sohlage erfolgt. Betrachtet man die Oberläufe einer Vereinigung in Bezug auf Sohlage, Querschnitt und Rauigkeit als konstant, so fließt das Wasser mit Normalabfluss ab [Zanke, 2002]. Das heißt, dass die Strömungsgeschwindigkeit genau so schnell ist, dass sich Energieverluste infolge Sohlrauigkeit und Beschleunigung durch eine geneigte Sohlage ausgleichen. Betrachtet man die Vereinigungsstelle weiter als einen punktuellen Energieverlust, so reduziert sich die Energiehöhe von oberstrom zu unterstrom der Vereinigung. Am Zusammenfluss direkt erfolgt eine Reduktion der Geschwindigkeit, da sich die Impulse der aufeinander treffenden Wassermassen zum Teil durch entstehende Turbulenzen aufheben. Die Energiehöhe sinkt hier unter das Minimum, sodass sich zwangsläufig der Wasserstand erhöhen muss, um die Wassermassen abzuführen. Im weiteren Verlauf des Flusses erfolgen eine Abnahme der Turbulenz und eine Erhöhung der Geschwindigkeit durch eine Beschleunigung der Wassermassen auf der geneigten Sohle. Der Wasserstand senkt sich hin zum Normalabfluss [Zanke, 2002].

Zur Bestimmung einer Wassertiefe mittels Kenntnis der Verlusthöhe an der Vereinigung benötigt man die Geschwindigkeit im Bereich des Zusammenflusses. Dies ist aber aufgrund der komplizierten Strömungsverhältnisse nur mittels Differentialgleichungen lösbar und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch näher behandelt. Dennoch ist die Höhe der Energieverluste ein Richtwert, der auf die Erhöhung des Wasserstandes schließen lässt. Es wird daher im Folgenden, anhand von Tabellenwerten aus empirischen Versuchserhebungen abgeschätzt, welche Parameterkonfigurationen sich günstig und ungünstig auswirken.

2.2.3 Energieverluste der Vereinigungsstelle

Abbildung 9 zeigt Tabellenwerte der Energieverluste einer Vereinigungsstelle auf Grundlage von Abflussverhältnissen und Querschnittsverhältnissen bei einem gesetzten Zusammenflusswinkel von $\alpha = 45^\circ$ und einer Aufweitung des Unterstromquerschnittes auf den addierten Querschnitt beider Oberströme.



Values of $\zeta_{c,s}$ (in numerator) and $\zeta_{c,st}$ (in denominator)

F_s/F_c	Q_s/Q_c											
	0	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
0.06	$\frac{-1.12}{0.00}$	$\frac{-0.70}{0.05}$	$\frac{-0.20}{0.05}$	$\frac{1.82}{-0.05}$	$\frac{10.3}{-0.59}$	$\frac{23.8}{-1.65}$	$\frac{42.4}{-3.21}$	$\frac{64.3}{-5.13}$	-	-	-	-
0.10	$\frac{-1.22}{0.06}$	$\frac{-1.00}{0.10}$	$\frac{-0.78}{0.12}$	$\frac{0.06}{0.11}$	$\frac{3.00}{-0.15}$	$\frac{7.64}{-0.71}$	$\frac{13.9}{-1.55}$	$\frac{22.0}{-2.71}$	$\frac{31.9}{-3.73}$	-	-	-
0.20	$\frac{-1.50}{0.20}$	$\frac{-1.40}{0.25}$	$\frac{-1.25}{0.30}$	$\frac{-0.85}{0.30}$	$\frac{0.12}{0.26}$	$\frac{1.42}{0.04}$	$\frac{3.00}{-0.33}$	$\frac{4.86}{-0.86}$	$\frac{7.05}{-1.52}$	$\frac{9.50}{-2.40}$	$\frac{12.4}{-3.42}$	-
0.33	$\frac{-2.00}{0.37}$	$\frac{-1.82}{0.42}$	$\frac{-1.69}{0.45}$	$\frac{-1.38}{0.48}$	$\frac{-0.66}{0.50}$	$\frac{-0.10}{0.40}$	$\frac{0.70}{0.20}$	$\frac{1.48}{-0.12}$	$\frac{2.24}{-0.50}$	$\frac{3.10}{-1.01}$	$\frac{3.95}{-1.60}$	$\frac{5.76}{-3.10}$
0.50	$\frac{-3.00}{1.30}$	$\frac{-2.80}{1.30}$	$\frac{-2.60}{1.30}$	$\frac{2.24}{1.27}$	$\frac{-1.50}{1.20}$	$\frac{-0.85}{1.10}$	$\frac{-0.24}{0.90}$	$\frac{-0.30}{0.61}$	$\frac{0.79}{0.22}$	$\frac{1.26}{-0.20}$	$\frac{1.60}{-0.68}$	$\frac{2.18}{-1.52}$

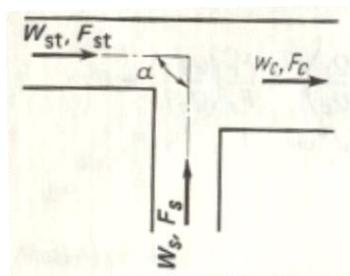
Abbildung 9: Energieverluste bei einem Zusammenflusswinkel von 45°
 [Idelchik et. al., 1989]

Idelchik (1989) ermittelte in seiner Arbeit die Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit der Querschnittsverhältnisse von Nebenarm zu dem Querschnitt des gesamten Stroms F_s/F_c sowie den Verhältnissen der Abflussmengen derselben Q_s/Q_c . Des Weiteren

ren ermittelte er getrennt die Widerstandsbeiwerte beider ankommenden Oberströme, wobei die Werte im Zähler die des Nebenstroms $\zeta_{c,s}$ und die Werte im Nenner die des Hauptstroms sind $\zeta_{c,st}$.

Geht man im konkreten Fall von ähnlichen Querschnittsverhältnissen und Abflussmengen von Haupt- und Nebenstrom aus, so sind die Werte im unteren Mittelfeld der Tabelle von Bedeutung. Der Tabellenbereich oben rechts zeigt einen schießenden Abfluss des Nebenstroms, da bei geringem Querschnitt sehr viel Wasser pro Sekunde fließt, was sehr extreme Widerstandsbeiwerte zur Folge hat. Negative Werte beschreiben eine Beschleunigung von einem der beiden Ströme durch die mitreißende Wirkung des anderen, größeren Stroms. So erfährt beispielsweise das Fluid im Nebenstrom bei einem Verhältnis $F_s/F_c = 0,06$ und $Q_s/Q_c = 0,03$ eine Beschleunigung. Überträgt man diese Beschleunigung jedoch auf die Abflussmenge, so erleidet das Gesamtsystem eine Energie-reduktion, da der positive, bremsende Widerstandsbeiwert von 0,05 auf 97% der Wassermassen wirkt.

Vergleicht man die Tabellenwerte der 45° Vereinigung aus Abbildung 9 mit der 90° Vereinigung aus Abbildung 10, stellt man fest, dass sich die Verlustbeiwerte ab einem Abflussmengenverhältnis von 0,1 günstiger entwickelt als bei der 90° Vereinigung. Je mehr Wasser der Nebenstrom in die Vereinigung einbringt, desto extremer fallen die Verlustbeiwerte aus.



Values of $\zeta_{c,s}$ (in numerator) and $\zeta_{c,st}$ (in denominator)

F_s/F_c	Q_s/Q_c											
	0	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
0.06	-1.12	-0.75	-0.20	2.06	11.2	25.0	46.2	72.5	-	-	-	-
	0.02	0.05	0.08	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-
0.10	-1.22	-1.00	-0.75	0.20	3.58	8.91	16.2	25.5	36.7	-	-	-
	0.04	0.08	0.10	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-
0.20	-1.40	-1.25	-1.10	-0.68	0.50	2.13	4.20	6.70	9.70	13.1	17.0	-
	0.08	0.12	0.18	0.25	0.34	0.32	-	-	-	-	-	-
0.33	-1.80	-1.78	-1.50	-1.20	-0.45	0.56	1.59	2.70	4.05	5.42	6.93	10.4
	0.45	0.50	0.52	0.59	0.66	0.64	0.62	0.58	-	-	-	-
0.50	-2.75	-2.55	-2.35	-1.96	-1.15	-0.35	0.42	1.25	2.05	2.80	3.65	5.25
	1.00	1.04	1.06	1.16	1.25	1.28	1.22	1.10	0.88	0.70	-	-

Abbildung 10: Energieverluste bei einem Zusammenflusswinkel von 90° [Idelchik et. al., 1989]

Daraus lässt sich schließen, dass der Zusammenflusswinkel und die daraus resultierenden Verlustbeiwerte maßgeblich das Abflussverhalten beeinflussen. Je flacher der Zusammenflusswinkel ist, desto weniger Verluste entstehen durch Turbulenzen und Verwirbelungen, da sich die Impulsrichtungen der beiden Ströme annähern. Eine Änderung des Zusammenflusswinkels lässt sich durch den Einbau eines Leitsporns im Bereich des ersten Zusammenfließens realisieren. Hierbei verhindert der Sporn zunächst den Zusammenfluss, leitet die Ströme im Idealfall nahezu parallel in die Vereinigung ein und schafft an seiner Spitze ein verlustarmes Verschmelzen der Abflüsse ohne Ausbildung einer Stagnationszone (siehe hierzu [1], Abbildung 3).

Eine weitere Erkenntnis aus dem Vergleich der Tabellenwerte besteht in der Optimierung der Querschnitte. Fließt sehr wenig Wasser durch einen großen Querschnitt sind die Energieverluste im Vergleich zu einem größeren Abflussvolumen im selben Querschnitt erhöht, da prozentual mehr Wasser direkt von der Sohle beeinflusst und gebremst wird. Im umgekehrten Fall sind bei einem großen Abflussvolumen in einem kleinen Querschnitt die Fließgeschwindigkeiten erhöht, was ebenfalls, in Verbindung mit Gleichung 1 (siehe Kapitel 2.1.4), zu hohen Energieverlusten führt.

Im vorigen Abschnitt wurde bereits erläutert, dass Erhöhungen des Wasserstandes an Störstellen mit der Höhe der Energieverluste in der Vereinigungsstelle einhergehen. Demnach tragen die Erkenntnisse, die aus den Tabellenwerten von Idelchik (1989) gewonnen werden können, maßgeblich zu einer Optimierung des Zusammenflusses bei. Allerdings wurden zur Ermittlung dieser Werte erhebliche Vereinfachungen getroffen. Es wurden lediglich Zusammenflusswinkel sowie Querschnitts- und Abflussverhältnisse für die Berechnung hinzu gezogen. Weitere, sehr spezifische Größen, wie die genaue Geometrie, verschiedene Rauheiten oder etwaige Sohllagenanomalien wurden zugunsten einer einfach handhabbaren, kanalartigen, glatten Vereinigungsstelle vernachlässigt. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die realen, natürlichen Bedingungen hydraulisch suboptimal sind und somit zu mehr Verlusten und Erhöhungen der Wassertiefe führen. Für eine exakte Beschreibung und Verbesserung einer bestimmten Fließgewässervereinigung ist daher ein Modell unumgänglich. Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Vereinigungsstelle Sill-Valserbach zu optimieren, ist ein hydraulisches rechnergestütztes Modell dem Labormodell vorzuziehen. Es ermöglicht nämlich eine größere Anzahl verschiedener Parametereinstellungen in kürzerer Zeit.

Die Wahl des Modells fiel, wie vom Auftraggeber vorgegeben, auf das 2D-Strömungsmodell Hydro_AS-2D. Dieses Modell bildet die sehr komplexen 3D Strömungen eines fließenden Gewässers unter erheblichen Vereinfachungen auf eine 2D Ebene ab. Möglich aber auch notwendig ist dies, da die Eingangsdaten sowie die Daten zur Gitternetzherstellung in ihrem Detaillierungsgrad nicht ausreichend fein genug sind, um die Realität so exakt wie nötig wiederzugeben und stabile Ergebnisse aus einer 3D Berechnung zu erhalten. Dies ist für die in dieser Arbeit behandelte Thematik des Hochwasserschutzes auch nicht notwendig, da lediglich die Abflusstiefe und die Hauptströmungsrichtungen für eine Optimierung der Situation maßgeblich sind. Diese können mit einem 2D-Simulationsprogramm unter gewissen Voraussetzungen, die im nächsten Kapitel behaltet werden, ausreichend exakt ermittelt werden. Des Weiteren benötigen 2D-Modelle erheblich weniger Rechenkapazitäten und Zeit und ermöglichen es so, in kürzerer Zeit mehr Rechnungslaufvarianten zu testen. Neben dem numerischen Modell wurde zur Bearbeitung und Visualisierung der Gitternetzstruktur das Programm SMS verwendet. Die beiden Programme und deren grundlegendste Gleichungen werden im Folgenden vorgestellt und erläutert.

3 Vorstellung des Modells

Zunächst erfolgen eine Beschreibung des Programms Hydro_AS sowie einer grundlegenden Erklärung des darin enthaltenen Lösungsalgorithmus und dessen Einsatzgrenzen. Im Anschluss wird das Programm SMS vorgestellt, welches zur Visualisierung und Bearbeitung des Modells eingesetzt wird.

3.1 Hydro_AS

Kern des Modells bildet das 2D-Strömungsmodell Hydro_AS-2D, welches von M.Nujic 1998 entwickelt und kommerzialisiert wurde und seitdem weiter verbessert wird. Durch eine explizite zeitliche sowie eine räumlichen Diskretisierung über Finite Volumen werden vereinfachte Navier-Stokes-Gleichungen, die Flachwassergleichungen, numerisch gelöst. Durch eben jene Wahl der Diskretisierung gelingt es mit dem Modell sehr stabile Ergebnisse, bei stark variierenden Geländeformen ohne Volumenverluste zu erreichen, sodass das Modell in einem breiten Spektrum unterschiedlichster hydraulischer Probleme zur Lösung eingesetzt werden kann [Iv. 3].

3.1.1 Navier-Stokes-Gleichungen

Grundlage aller Berechnungen hydraulischer Fließvorgänge für newtonsche Fluide bilden die Navier-Stokes-Gleichungen, da sie sowohl Masse, Impuls als auch Energie in einem System erhalten. Sie lauten in ausgeschriebener Form (Gleichung 5-7) inklusive der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 8) für inkompressible, homogene Fluide:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + f_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + f_z \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Hierbei beschreiben die jeweils linken Seiten der drei Navier-Stokes-Gleichungen (Gleichungen 5-7) die Advektion. Der jeweils erste Term auf der rechten Seite dieser Gleichungen beschreibt den auf das Fluidpartikel einwirkenden Druck, gefolgt von drei

Termen, welche die Viskosität beschreiben. Der jeweils letzte Term auf der rechten Seite fasst alle äußeren Kräfte, wie zum Beispiel den Windeinfluss auf die Wasseroberfläche, zusammen. Aufgrund ihrer Komplexität sind die Gleichungen analytisch nur unter starken Vereinfachungen lösbar. Selbst numerisch sind die Gleichungen durch ihre nichtlinearen Terme der advektiven Beschleunigung nur für laminare und schwach turbulente Strömungen möglich. Wollte man stark turbulente Strömungen mithilfe der Navier-Stokes-Gleichungen berechnen, müsste man das Berechnungsgebiet in einem extrem feinen Gitter diskretisieren. Dies wäre sehr rechenzeitaufwändig und würde die Lösung der meisten hydraulischen Fragestellungen nur unwesentlich verbessern. [Iv. 4] Aus diesem Grund werden die Navier-Stokes-Gleichungen durch Aufspaltung der Geschwindigkeits- und Druckgrößen in einen zeitlichen Mittelwert und einen Fluktuationswert in die Reynoldsgleichungen umgewandelt.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (8)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (9)$$

mit: u_i, p = gemessene Geschwindigkeits- und Druckgrößen
 \bar{u}_i, \bar{p} = über die Zeit gemittelte Geschwindigkeits- und Druckgrößen
 u'_i, p' = Fluktuationswerte der Geschwindigkeits- und Druckgrößen

Diese Gleichungen lassen sich dann vereinfacht mit Hilfe des Schließungsansatzes mit dem Prinzip der Wirbelviskosität nach Boussinesq lösen [Schwanenberg, 2003].

3.1.2 Flachwassergleichungen (FWG)

Die Reynoldsgleichungen lassen sich für spezielle Fälle, zu welchen, in Abhängigkeit an die Genauigkeitsanforderungen, auch das in dieser Arbeit betrachtete Problem der Fließgewässervereinigung zweier Gebirgsbäche gehört, noch weiter vereinfachen.

3.1.2.1 Entwicklung der FWG aus Reynoldsgleichung

Unter der Annahme, dass natürliche Gewässer im Vergleich zu ihrer Breite relativ flach sind, können die vertikalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aus den Impulstermen vernachlässigt werden. Somit wird eine vertikale Druckverteilung als hydrostatisch vorausgesetzt. Aus diesen dreidimensionalen FWG lassen sich weiter, unter Zuhilfenahme des Satzes von Leibnitz, die horizontalen Geschwindigkeiten über die Tiefe mitteln. Die tiefengemittelten 2D FWG lauten daher in kompakter Vektorform [Nujic, 1998]:

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} + \mathbf{s} = 0 \quad (10)$$

$$\text{mit } \mathbf{w} = \begin{bmatrix} H \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 0,5gh^2 - vh \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - vh \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(I_{EX} - I_{SX}) \\ gh(I_{EY} - I_{SY}) \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\partial u}{\partial y} \\ v^2h + 0,5gh^2 - vh \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$$

In diesen Vektoren sind enthalten:

H = Wasserspiegellage, berechnet aus der Addition der Wassertiefe h [m]
und dem Bezugsniveau z [m]

v = Viskositätskoeffizient [m^2/s]

I_{SX}, I_{SY} = Sohlgefälle mit $I_{SX} = \frac{\partial z}{\partial x}$ und $I_{SY} = \frac{\partial z}{\partial y}$

I_{EX}, I_{EY} = Reibungsgefälle

Das Reibungsgefälle wird nach Darcy-Weisbach berechnet [Nujic, 1998].

3.1.2.2 Einsatzgrenzen der FWG

Durch die oben beschriebenen Vereinfachungen und der Annahme der hydrostatischen Druckverteilung obliegt der Einsatz der Flachwassertheorie für die Berechnung von Fließgewässern bestimmten Restriktionen, sodass nur unter Einhaltung derselben realitätsnahe Ergebnisse erreicht werden können.

Wichtigstes Kriterium sind kleine Vertikalgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Horizontalgeschwindigkeiten. Dies ist bei langen, flachen Oberflächenwellen (Wellenlänge/Wellenhöhe > 20), einer Amplitude kleiner als die Wassertiefe und einem flachen Sohlgefälle ($> 10\%$) gegeben. Das einzelne Partikel kann hier Drall frei abfließen. Des

Weiteren sollten die Horizontalgeschwindigkeiten möglichst konstant über die Wassertiefe sein [Vreugdenhil, 1994].

Ebenfalls wichtig sind das Vorhandensein von Sekundärströmungen und deren Ergebnisrelevanz, welche beispielsweise durch eine gekrümmte Anströmung oder eine Fließgewässervereinigung entstehen. Diese Strömungen bilden ebenfalls große Turbulenzen und Vertikalgeschwindigkeiten aus, sodass lokal abweichende Ergebnisse entstehen [Vreugdenhil, 1994].

Treten in einem Flussbett Sohlanomalien oder Diskontinuitäten, wie große Steine, Stufen oder Einengungen auf, so erfährt der Wasserspiegel eine Änderung aufgrund hoher Vertikalgeschwindigkeiten an diesen Stellen. Somit ist auch hier die Anwendbarkeit der FWG eingeschränkt, da keine hydrostatische Druckverteilung mehr herrscht. Ebenso ist die Tiefenmittelung der Geschwindigkeit durch diese lokalen Einschnitte und Geschwindigkeitsspitzen nicht mehr möglich [Vreugdenhil, 1994; Iv. 4].

Trotz der oben beschriebenen Einschränkungen wird der Einsatz von Hydro_AS und den implementierten Flachwassergleichungen als sinnvoll angesehen, da der Berechnungsfehler im Vergleich zu einer 3D Simulation im Verhältnis zur Unsicherheit der Eingangsdaten und dem damit eingebrachten Fehler als vernachlässigbar klein angenommen wird.

3.1.3 Diskretisierung

Durch die immer schneller wachsenden Prozessor- und Rechenkapazitäten der letzten Jahre gelingt es zunehmend mittels „computational fluid dynamics“, also rechnergestützt, immer genauere Ergebnisse hydraulischer Fließvorgänge zu liefern. Generell muss das vorliegende Problem, welches in der Realität unendlich viele Freiheitsgrade und Partikelimpulse besitzt, zunächst auf eine endliche Menge an Freiheitsgraden reduziert werden. Rechner werten daraufhin genau an diesen örtlich und zeitlich definierten Stellen die partiellen Differentialgleichungen aus [Iv.4]. Diese punktierte Zerstückelung nennt man Diskretisierung. Je feiner die Diskretisierung aufgrund der Rechenleistung gewählt werden kann, desto kleiner fällt der Berechnungsfehler durch Reduzierung eines örtlichen und zeitlichen Bereiches auf einen Punkt aus. Im Folgenden werden die in Hydro_AS implementierten Verfahren beschrieben.

3.1.3.1 Räumliche Diskretisierung

Zunächst erfolgt eine räumliche Diskretisierung des zu berechnenden Gebietes. Man unterteilt die entstehenden Gitternetze in strukturierte und unstrukturierte Gitter wie in Abbildung 11 dargestellt.

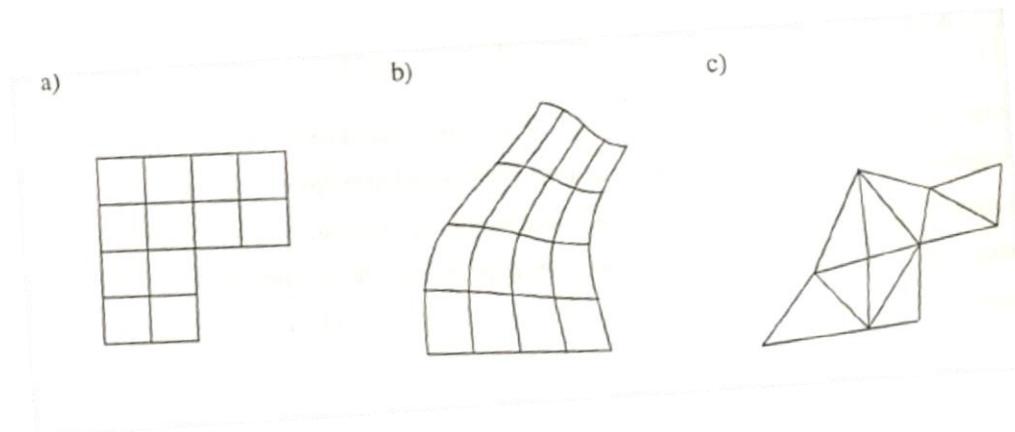


Abbildung 11: Gitternetzarten: a) kartesisch; b) strukturiert nichtorthogonal; c) unstrukturiert [Nujic, 1998]

Die Gitter a) und b) sind hierbei am einfachsten zu konstruieren und weisen den geringsten Verbrauch an Speicher- und Rechenkapazitäten auf, da jede Zelle eine genau definierte Anzahl an Nachbarzellen und Knoten hat. Unstrukturierte Gitter hingegen sind sehr komplex zu generieren, da die Anzahl der Nachbarzellen und Knoten beliebig und variabel ist. Es werden erheblich mehr Koordinateninformationen benötigt, um beispielsweise eine Zelle und deren Knoten zu beschreiben. Sie weisen jedoch die größere Flexibilität in der räumlichen Gestaltung der Gitternetze auf und sind daher für die Abbildung komplizierter Geländeformen mit kantigen Strukturen besser geeignet [Iv. 4]. In Hydro_AS werden aufgrund der Vorteile beider Netztypen sowohl die Gitter b), hauptsächlich zur Abbildung von Flussschläuchen, und c) für komplexe Geometrien verwendet.

Das in Hydro_AS implementierte Verfahren zur numerischen Lösung der Flachwassergleichung ist die Finite Volumen Methode (FVM). Generell unterscheidet man bei der FVM nach dem Kontrollvolumenmittelpunkt. Neben der Zellenmittelpunkt-FVM gibt es das in Hydro_AS genutzte Verfahren der Zelleneckpunkt-FVM.

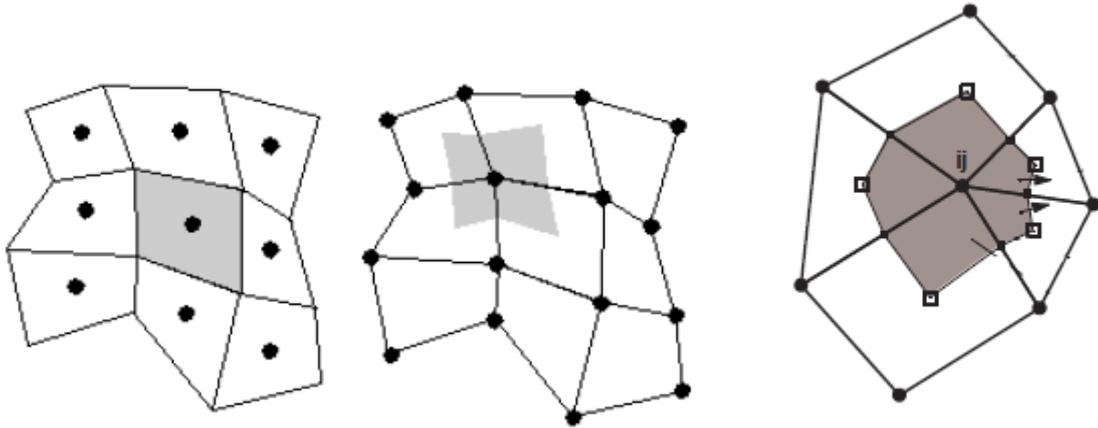


Abbildung 12: von links nach rechts: Zellenmittelpunkt-FVM; Zellenmittelpunkt-FEM. Zellenmittelpunkt-Finite Element Methode (FEM) unstrukturiertes Netz [Iv. 4, Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24]

In beiden Fällen werden die Flachwassergleichungen in ihrer integralen Form angewandt, indem die Gleichungen, unter Zuhilfenahme des Integralsatzes von Gauß, über das Kontrollvolumen integriert werden. Dies hat den Vorteil, dass Masse, Impuls und Energie in den konvektiven und diffusiven Flüssen zwingend erhalten bleiben und somit eine ausgeglichene Bilanz von ein- und ausströmenden Flüssen erreicht wird [Iv. 4, Nujic, 1998]. Die FVM-Methode ist deshalb gut geeignet, um diskontinuierliche Übergänge wie Wechsellagen und Querschnittsänderungen des Flussbettes zu berechnen. Probleme entstehen im Allgemeinen nur bei schmalen, sehr spitzwinkligen Elementen, die zu Oszillationen in der numerischen Lösung führen können. Des Weiteren wurden zur Vermeidung von Instabilitäten des Systems bei der Differenzierung der advektiven Terme Upwind-Verfahren implementiert [Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24]. Diese wählten die Diskretisierungsfunktionen in Abhängigkeit der Konvektionsgeschwindigkeit, anstatt das Mittel des Flusses über eine Zelle zu verwenden [IV. 4].

3.1.3.2 Zeitliche Diskretisierung

Für die zeitliche Diskretisierung wurde in Hydro_AS ein explizites Runge-Kutta-Verfahren zweiter Ordnung gewählt [Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24]. Explizite Zeitschrittverfahren zeichnen sich gegenüber den implizierten Verfahren dahingehend aus, dass sie zur Berechnung der Werte zum neuen Zeitschritt lediglich von den Werten zum bekannten Zeitschritt abhängig sind. Probleme entstehen, wenn die Zeitschritte zu groß gewählt werden, da bei expliziten Verfahren die Korrektheit der Ergebnisse nicht zwingend gegeben ist. Dies ist bei implizierten Verfahren der Fall, da sie den

Wert an einem Knoten zum neuen Zeitpunkt von den Werten der anderen umliegenden Knoten zum neuen Zeitpunkt in Abhängigkeit setzen. Es entsteht im Verhältnis zur Größe des Gitternetzes ein Gleichungssystem, welches zu jedem Zeitschritt iterativ gelöst werden muss [Malcherek, 2012]. Das implizierte Verfahren ist somit rechenaufwändiger, erlaubt aber größere Zeitschritte. Dieser Vorteil geht jedoch im hoch instationären Anwendungsbereich von Hydro_AS verloren, da die Zeitschrittweite durch das Benetzen und Trockenfallen einzelner Gitterzellen im Verlauf einer Simulation eingeschränkt ist [Nujic, 1998].

Die Zeitschrittlänge muss durch das explizite Vorgehen die Courant-Lawy-Friedrichs Stabilitätsbedingung für jedes verbundene Knotenpaar erfüllen [Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24]:

$$\Delta t \leq \min \frac{\Delta L}{|v| + \sqrt{gh}} \quad (12)$$

mit: ΔL = charakteristische Länge der Knotenverbindung

v = Komponentenvektor der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit

Da das Programm auf Grundlage dieser Formel den maximalen Zeitschritt für das gesamte Berechnungsgebiet nach dem minimalen Knotenabstand bestimmt, muss bei der Erstellung des Gitternetzes auf eine Vermeidung unnötig kleiner Abstände geachtet werden [Hydro_AS Benutzerhandbuch, Version 1.24].

Die Grundidee des expliziten Runge-Kutta-Verfahrens basiert auf einer Unterteilung der Lösungsfunktion in Intervalle, welche dann mittels Tylorreihenentwicklung iterativ gelöst werden können. Die Ordnungszahl des Verfahrens beschreibt hier die immer kleiner werdenden Teilintervalle [Deuflhard et. al., 2008; Stoer et. al., 1973; Iv. 5].

3.2 SMS

Im Rahmen der Erstellung des Gitternetzes an der Vereinigungsstelle Sill-Valsertal sowie der anschließenden Auswertung und Visualisierung der numerisch errechneten Ergebnisse wurde als Pre- und Postprozessor das Programm SMS in der Version 10.0 verwendet. Hierzu liefert das Programm Hydro_AS eine Applikation, welche in SMS implementiert werden kann, um benutzerfreundlich globale Einstellungen, wie Berechnungszeiten, Schreibintervalle und Rauigkeiten der verschiedenen Bodenelemente vorzunehmen. Des Weiteren verfügt die Applikation über eine Kontrollfunktion, welche das Gitternetz sowie die Randbedingungen vor dem eigentlichen Start des Programms Hydro_AS prüfen kann. SMS selbst verfügt bei der Erstellung des Gitternetzes über Verbesserungs- und Kontrollfunktionen, die beispielsweise numerisch ungünstige Winkel oder Seitenverhältnisse der einzelnen Elemente lokalisieren und optimieren können. Nach der Berechnung des Fließverhaltens der eigetragenen Abflüsse in das Modell lassen sich im Postprozessormodus von SMS die gewählten Zeitschritte der Simulation sowie alle errechneten Basisgrößen, wie Wasserstände oder Fließgeschwindigkeiten, anzeigen. Mit Hilfe eines Kalkulators besteht die Möglichkeit, für einzelne Zeitschritte aus den Basisdaten weitere Größen wie Reynolds- oder Froudzahl zu berechnen und diese anzeigen zu lassen.

Im Folgenden wird der Aufbau des Gitternetzes als Diskretisierung des Modellgebietes auf Grundlage der Visualisierung durch SMS beschrieben.

4 Aufbau und Plausibilisierung des Grundlagennetzes

Grundlage des Modells der Vereinigungsstelle Sill-Valserbach bildet ein bereits vorhandenes Modell der Vereinigungsstelle Valserbach-Schmirnbach. Dieser Zusammenfluss findet ca. 1 km westlich im Stadtkern von St. Jodok statt und wurde in einem vorangegangenen Auftrag bereits hydraulisch optimiert. Das Modell gilt als vollständig validiert. Die relevante, östliche Modellgrenze reicht bis zur Vereinigungsstelle Sill-Valserbach, welche aber nicht modelliert wurde. Auf dieser Basis musste der Verlauf der Sill ober- und unterstrom der Vereinigung sowie die Vereinigungsstelle selbst modelliert und an das vorhandene Modell angefügt werden.

4.1 Gitternetzaufbau

Da der Auftrag darin bestand, ausschließlich die Vereinigung Sill-Valserbach zu untersuchen, ohne eventuelle günstig oder ungünstig wirkende Einflüsse flussaufwärts stattfindender, hochwasserbedingter Ausuferungen zu beachten, wurde das Modell, zur Reduzierung der Rechenlaufzeiten, 300 m oberhalb der Vereinigung gekappt. Somit ist ein ausreichender Abstand von mehr als 50 hydraulischen Durchmessern zur Vereinigungsstelle gegeben, um mögliche unnatürliche Strömungsverhältnisse durch das künstliche Einströmen des Abflusses am Modellrand zu beruhigen. Abbildung 13 zeigt rot das Gebiet des alten Modells, welches für die Berechnung der Abflussvorgänge im Bereich Sill-Valserbach relevant ist.

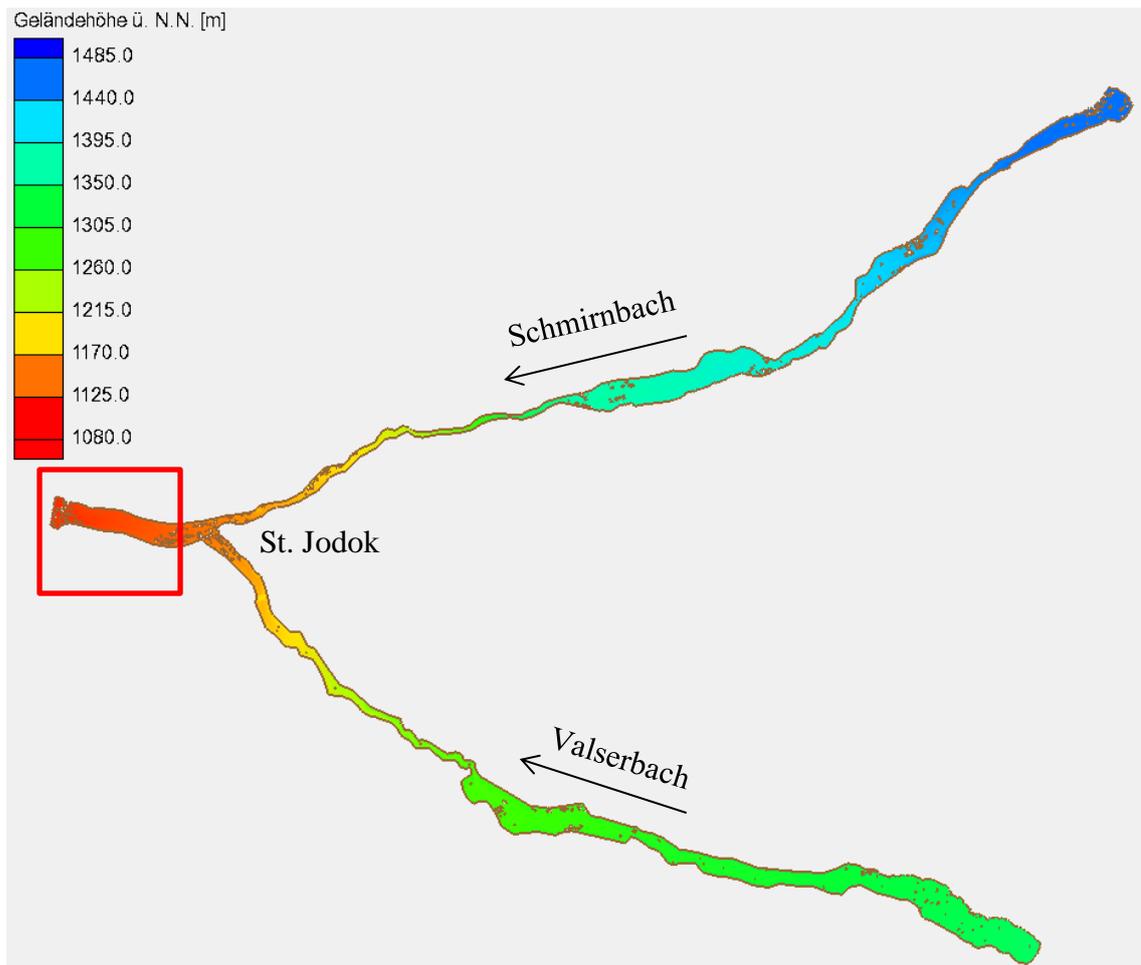


Abbildung 13: Berechnungsgebiet Valsertal-Schmirnbach mit relevantem Ausschnitt der Vereinigung Sill-Valsertal

Weiterhin mussten große Bereiche der westlichen Uferzonen der Sill entfernt oder erheblich detailreicher gestaltet werden, da diese Bereiche im ursprünglichen Modell sehr großen Abstand zur Vereinigung Valsertal-Schmirnbach hatten und daher nicht im Detail ausmodelliert waren. Der Bereich nördlich des Zusammenflusses von Sill und Valsertal musste dagegen neu in das Modell eingearbeitet werden. Hierzu wurden vom Auftraggeber Rasterprofile aus Überfliegungsvermessungen bereitgestellt. In einigen Profilen waren die Rasterlinien zusätzlich im Bereich der Flusssohlen mit GPS Ortsvermessungen nachverbessert. Die Koordinaten konnten hierbei problemlos in die Gitternetzdatei eingelesen werden, wobei im Bereich des Flusses die exakteren Ortsvermessungen und im Außenbereich die gröberen Überfliegungsdaten genutzt wurden. Die Höhenkoordinaten allerdings waren nur in einem lokalen Koordinatensystem des digitalen Plans vorhanden und mussten erst in ein globales System transferiert werden. Die eingearbeiteten Änderungen sind in Abbildung 14 anschaulich dargestellt.

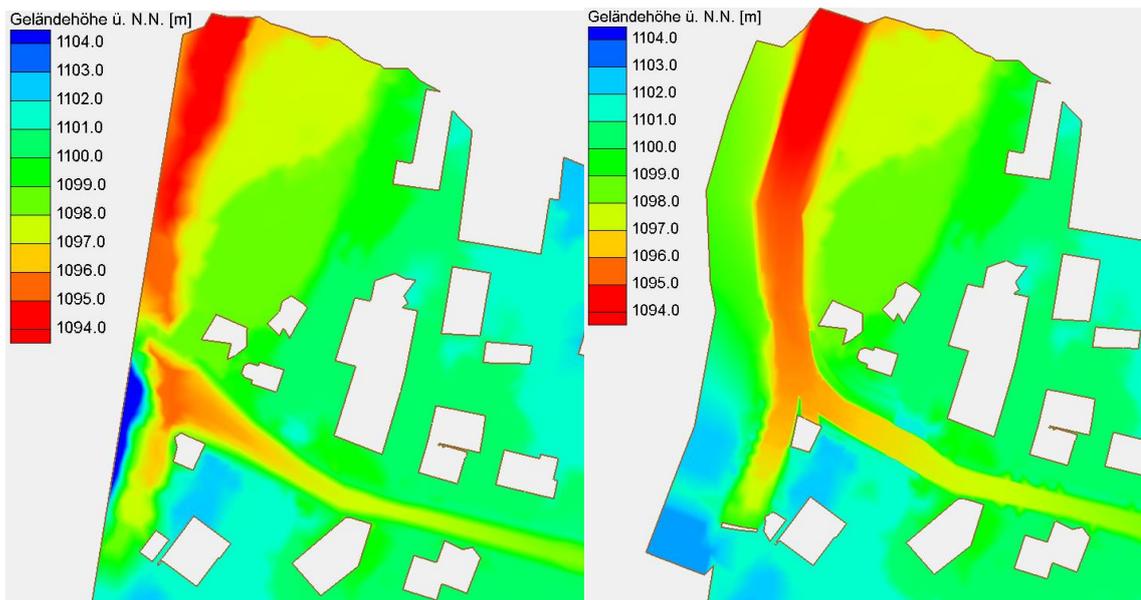


Abbildung 14: Vergleich der Vereinigungsstelle zwischen dem alten Modell mit der neu modellierten Version

Bei der Einarbeitung der Daten in das vorhandene Modell wurde festgestellt, dass die zur Verfügung gestellten Profile, speziell im Bereich der Vereinigung, nicht die ausreichende Dichte besaßen, um das Modell mit der nötigen Detailgenauigkeit zu erstellen. In einer weiteren Vermessung vor Ort wurden dann die benötigten Größen aufgenommen, indem Abstandsmessungen zu bereits modellierten Fixpunkten durchgeführt wurden. Eine Nachverdichtung der Sohlhöheninformationen wurde nicht vorgenommen, da dies mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich war. Die Sohle weist nämlich durch Geröllablagerungen auf kurze Distanzen Änderungen von bis zu 1 m auf. Zur exakten Modellierung solcher zerklüfteter Flusssohlen wäre eine nicht vorhandene Dichte an Messpunkte nötig. Eine andere Möglichkeit die Sohle ausreichend exakt zu beschreiben, besteht darin, mittels hoher Rauigkeitswerte eine nur grob vermessene und somit glattere Sohle über die Fläche dem Verhalten der zerklüfteten Sohle anzunähern. Dies wird im weiteren Verlauf noch näher beschrieben.

Zusätzlich wurden die Abmessungen des Wehrs im Oberstrom der Sill in Bezug auf die Vereinigung sowie Querschnitte der drei im hydraulischen Einflussbereich der Vereinigung befindlichen Brücken aufgenommen. Diese Querschnitte wurden später durch Vermessungen des Auftraggebers bestätigt.

Es folgt eine Beschreibung wichtiger Bereiche der Vereinigungsstelle, welche in den Abbildungen 15 und 16 im Detail modelliert sind.

4.2 Detailmodellierungen abflussrelevanter Stellen

4.2.1 Brücke B182 und Steinschüttung vor Kraftwerk

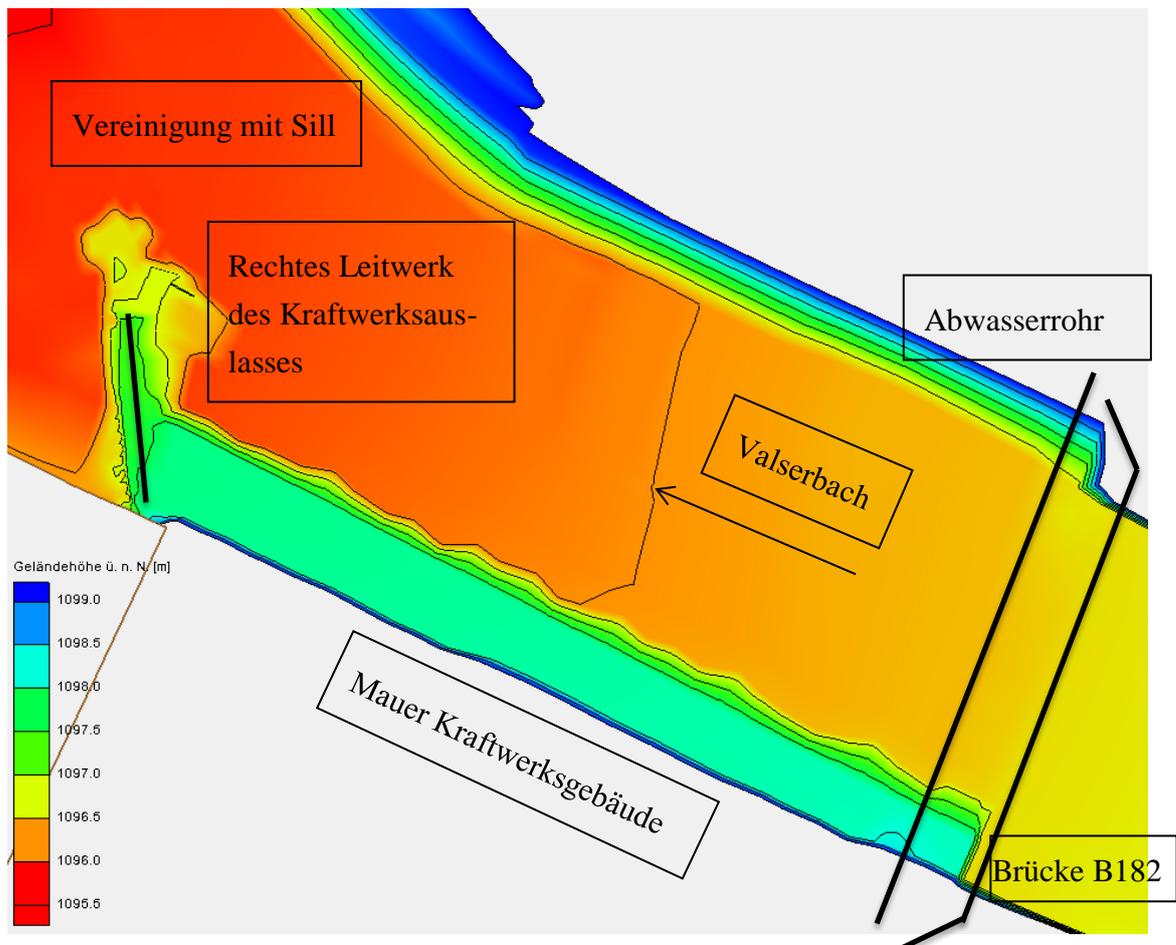


Abbildung 15: Detailmodellierung der Brücke B182 und Steinschüttung vor Kraftwerk

Besondere Bedeutung für die Modellierung galt dem Endbereich des Valserbachs kurz vor der Vereinigung. Hier strömt der Bach unter der Brücke der Bundesstraße 182 hindurch. Die Brücke ist in ihrem Querschnitt ausreichend bemessen. Allerdings erfährt der Bach am westlichen Ende in Fließrichtung eine Querschnittsverengung aufgrund einer Steinschüttung vor der Mauer des Kraftwerkshauses. Diese ist ungefähr 1,3 m breit und von der Bachsohle aus gemessen 1,5 m hoch. Hydraulisch ungünstig wirkt sich der fast rechtwinklige Anfangsbereich der Schüttung aus, da das Wasser frontal anprallt. Im weiteren Verlauf des Bachs quert in 1,5 m Abstand zur Brücke ein Abwasserrohr den hochwasserrelevanten Querschnitt des Bachs und begrenzt diesen nach oben. Am Ende der Steinschüttung befindet sich das rechte Leitwerk des Kraftwerksauslasses. Problematisch sind hier massive Geröllanhäufungen, welche den Fließquerschnitt weiter einengen.

4.2.2 Eintritt Sill in Vereinigung und Ausspülungen am westlichen Ufer

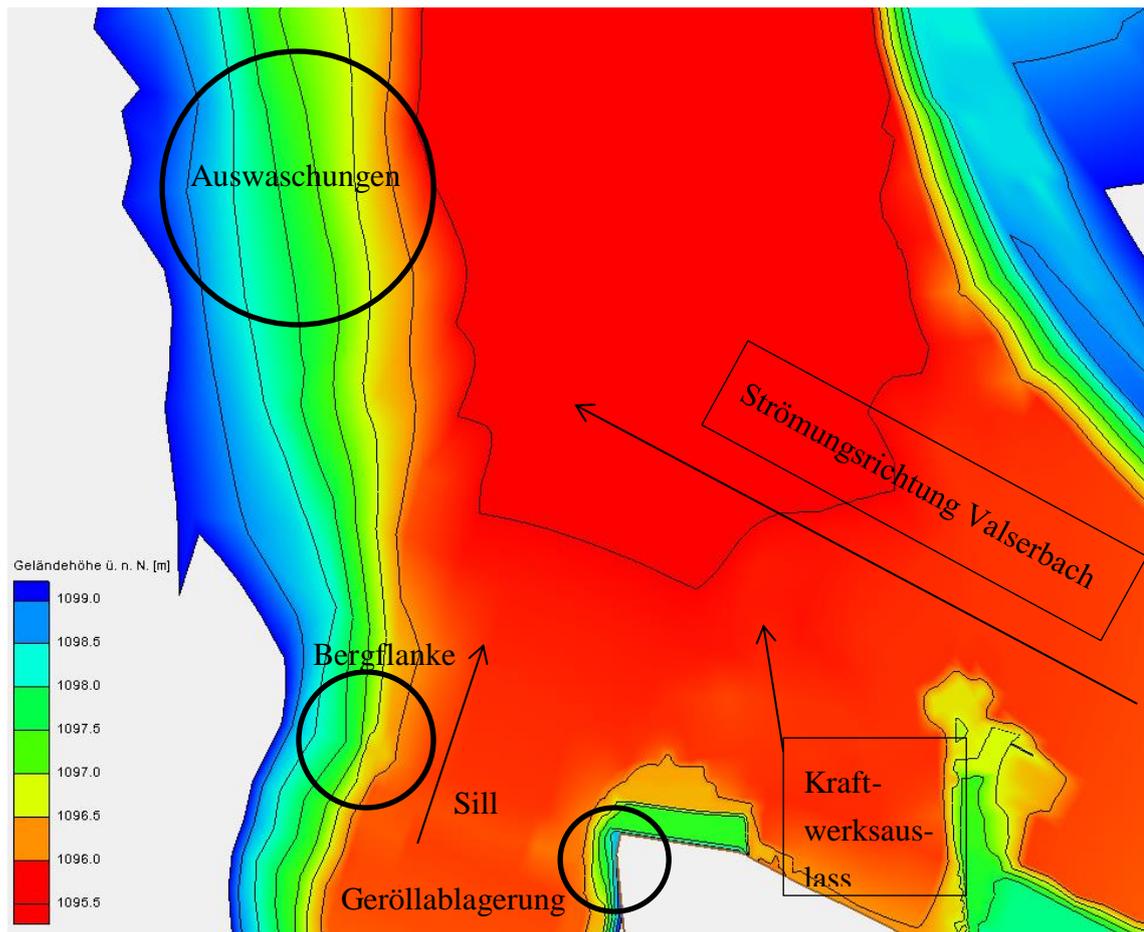


Abbildung 16: Detailmodellierung: Eintritt der Sill in die Vereinigung und Ausspülungen am westlichen Ufer

Kurz vor dem Eintritt der Sill in die Vereinigung erfährt der Fließquerschnitt eine Verengung aufgrund einer Geröllanhäufung am linken, maroden Mauerrand des Kraftwerks. Außerdem reicht die Bergflanke am linken Ufer der Sill hier etwas weiter in das Flussbett hinein. Nach dieser Verengung öffnet sich der Bach und fließt mit dem einfließenden Valsebach zusammen. Führt man die Strömungsrichtung des Valsebachs durch die Vereinigung fort, lässt sich die Ursache der weit fortgeschrittenen Erdausspülungen am westlichen Rand der Vereinigung erklären. Diese wurden hier durch eine zuvor gemessene, flach ansteigende Bergflanke modelliert.

Neben dem Gitternetz, welches die Topografie des betrachteten Gebiets wiedergibt und somit entscheidend für das Fließverhalten der eingesteuerten Abflüsse ist, sind der Rand des Gitternetzes sowie die Sohle und die Höhe der simulierten Abflüsse für eine realitätsnahe Modellierung wichtig und werden im nächsten Abschnitt behandelt.

4.3 Randbedingungen

Das Gitternetz ist an seinen Außenbereichen mit geschlossenen Rändern definiert, was ein Austreten des Wassers ausschließt. Lediglich die als Zu- und Abflussbereiche ausgewiesenen Ränder ermöglichen eine Änderung der Wassermenge im Gesamtnetz. Hierbei sind die Zuflüsse der Sill und des Valserbachs als konstante Zuflüsse eingestellter Wassermengen mit einer Einströmrichtung definiert. Der Abfluss simuliert eine weiterlaufende Sohlneigung, die für alle Rechnungsläufe auf 5 m/km festgelegt wurde. Der Auslass des Kraftwerks als potentieller dritter Zufluss wird vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass das Kraftwerk bei extremen Hochwasserereignissen abgeschaltet wird. Neben der eigentlichen Topografie bestimmen die Rauigkeitswerte als Randbedingungen der Sohle das Fließverhalten am meisten. Diese werden in Hydro_AS als Strickler-Beiwerte angegeben. Abbildung 17 zeigt die definierten Rauigkeitsverteilungen im Bereich der Vereinigungsstelle.



Abbildung 17: Materialtypen der Topografie im Vereinigungsbereich

Für die verschiedenen Flächentypen sind entsprechend Rauigkeiten (Strickler-Beiwerte) hinterlegt, was Tabelle 1 wiedergibt [Kulisch, 2014].

Tabelle 1: Zuordnung der Rauigkeiten auf die einzelnen Flächentypen

Flächentypen	kst [$m^{1/3}/s$]	Flächentypen	kst [$m^{1/3}/s$]
Störsteine/Steinschüttung	10	Wald	10
Gewässer1	16	Weide	20
Gewässer2	15	Streuwiesen	20
Gewässer3	16	Straßenanlagen	40
Gewässer4	18	Sonstiges	81
Wiese	20	Disable	-
Bauflächen befestigt	40		

Die Strickler-Beiwerte der verschiedenen Fließgewässerabschnitte (Gewässer 1-4) im Bereich der Vereinigung wurden zudem noch genauer untersucht, da davon ausgegangen werden kann, dass der größte Teil des ankommenden Abflusses von diesen Rauigkeitswerten beeinflusst wird und so entscheidend für das Fließverhalten und für mögliche Hochwasserstände ist. In der Literatur findet sich für Gebirgsbäche mit steiniger Sohle und Blöcken ein Strickler-Beiwert Bereich von $14,4 - 25 m^{1/3}/s$ [Schröder, 1990]. Je rauer und steiniger die Sohle wird, desto kleiner muss der Strickler-Beiwert gewählt werden. Neben diesen Werten wurden über eine Formel zur Berechnung von Sohlgleiten mit Störsteinbauweise die Strickler-Beiwerte bestimmt [Kulisch et. al., 2009]. Die gewählten beziehungsweise errechneten Strickler-Beiwerte für die verschiedenen Gewässerabschnitte können der Tabelle 1 entnommen werden. Nach Fertigstellung des Grundmodells erfolgte zunächst eine Kalibrierung dessen, welche im folgenden Abschnitt behandelt wird.

4.4 Kalibrierung

Aufgrund fehlender Messpegel und Kontrolleinrichtungen im Bereich der Vereinigung musste für die Kalibrierung des Modells ein Augenzeugenbericht genutzt werden. Dieser sagt aus, dass sich beim letzten Hochwasser, welches als ein HQ30 nachgewiesen werden konnte, der Höchstwasserstand ca. 20 cm unterhalb des quer verlaufenden Abwasserrohrs nahe der Brücke der B182 verlief. In Absprache mit dem Auftraggeber wurden für diesen Kalibrierungsfall folgende Abflusswerte vereinbart:

Fall 0 (Kalibrierungsfall): VB+SB: 30 m³/s (=HQ30 VB; HQ5 SB); Sill 25 m³/s

mit: VB = Valserbach SB = Schmirnbach

Eine erste Berechnung mit den oben definierten Parametern ergab im Bereich des Abflussrohres einen Wasserstand von ca. 1,75 m. Aus dem Modell wurde zuvor eine mögliche Durchflusshöhe von 2,35 m bestimmt, was durch Subtraktion einen Abstand von ca. 60 cm zwischen Rohr und Wasserspiegel ergab. Im Folgenden wurde versucht, den deutlich größeren Abstand zwischen Wasserspiegel und Rohrunterkante durch Kalibrierungsmaßnahmen zu verringern. Hierfür wurden zunächst die Strickler-Beiwerte gemäß Tabelle 2 verringert, um eine größere Sohlreibung hervorzurufen.

Tabelle 2: Verringerte Strickler-Beiwerte der Bachsohlen

Flächentypen	kst [$m^{1/3}/s$]
Gewässer1	13
Gewässer2	12
Gewässer3	13
Gewässer4	18

Die daran anschließende neue Berechnung des Hochwasserfalls ergab einen Wasserstand von 1,83 m, was einem Abstand von 52 cm zwischen Rohr und Wasserspiegel entsprach. Aufgrund dieses immer noch unzufrieden stellenden Ergebnisses wurden auf Grundlage der Tabellen 1 und 2 die Abflussmengen des Valserbachs erhöht, um diesen Einfluss beurteilen und in die Kalibrierung aufnehmen zu können. Die Ergebnisse der Wasserstandsänderungen können der Tabelle 3 entnommen werden, wobei die Abkürzungen LowStri für die niedrigen Strickler-Beiwerte der Tabelle 2 und MedStri für die Beiwerte aus Tabelle 1 stehen. Des Weiteren geben die Zahlen hinter den Abkürzungen die Abflussmengen des Valserbachs in m³/s an. Die Abflusswerte der Sill wurden bei 25 m³/s belassen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Kalibrierungsläufe

Parametereinstellung	Wasserstand/ Abstand zu Rohr	Parametereinstellung	Wasserstand/ Abstand zu Rohr
LowStri25	1,62 m / 73 cm	MedStri25	1,55 m / 80 cm
LowStri30	1,83 m / 52 cm	MedStri30	1,72 m / 63 cm
LowStri33	1,89 m / 46 cm	MedStri33	1,80 m / 55 cm
LowStri36	1,97 m / 36 cm	MedStri36	1,89 m / 44 cm
LowStri39	2,06 m / 25 cm	MedStri39	1,97m / 36 cm

Die Tabelle zeigt den deutlichen Einfluss der Wahl der Strickler-Beiwerte auf den Wasserspiegel. Neben diesem Parameter hat ein möglicher, erhöhter Abfluss große Auswirkungen auf die Wasserspiegellage. Trotzdem konnten die Beobachtungen des Augenzeugen nicht nachgewiesen werden. Mögliche Erklärungen hierfür gibt der folgende Abschnitt. Die Strickler-Beiwerte der Tabelle 2 kommen dem Bericht des Augenzeugen zwar im Verhältnis zum Abfluss näher als die Werten der Tabelle 1, sind aber in ihrer Quantität gegenüber Literaturwerten und eigenen Berechnungen nicht zu rechtfertigen. Deshalb werden für die Optimierungsläufe der Vereinigungsstelle folgende Strickler-Beiwerte gewählt:

Tabelle 4: Wahl der Strickler-Beiwerte für Optimierungsläufe

Flächentypen	kst [$m^{1/3}/s$]
Gewässer1	14,5
Gewässer2	14
Gewässer3	14,5
Gewässer4	18

Abschließend wird das kalibrierte Modell unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Daten bewertet.

4.5 Plausibilisierung des Modells

Da aufgrund fehlender Pegelstände und Abflussmessungen eine Validierung nicht möglich war, erfolgt lediglich eine Plausibilisierung des Modells. Hierzu muss zunächst der einzigen vorhandenen Aussage eines Zeugen etwas an Stärke und Endgültigkeit genommen werden, da es äußerst schwierig ist, in einem hoch turbulenten Bereich eines Flusses einen Abstand zwischen einem Rohr und einer, sich ständig verändernden, Wasseroberfläche aus 5 m Entfernung abzuschätzen. Des Weiteren umfasst die Bezeichnung HQ30 eines Hochwassers in Abhängigkeit der betrachteten Einzugsgebiete unterschiedliche Abflussvolumina. So wurde im Fall 0 in Absprache mit dem Auftraggeber eine Abflussspende des Valserbachs von insgesamt 30 m³/s festgelegt. Andere Quellen (siehe Anlage A) ermitteln 37 m³/s Abflussvolumen im Falle eines HQ30, was den Beobachtungen des Zeugen sehr viel näher kommt.

Zusammenfassend betrachtet sind eine Kalibrierung sowie eine vollständige Validierung des Modells aufgrund fehlender Messwerte nur eingeschränkt möglich. Der Aussage des Augenzeugen steht zudem entgegen, dass das ursprüngliche, als validiert geltende Modell der Vereinigung Valserbach-Schmirnbach, die Brücke B182 beinhaltet hat und diese mit der daran anschließenden Topografie bis auf kleine Änderungen in das neue Modell übernommen wurde.

Im folgenden Kapitel werden nun auf Grundlage des kalibrierten Modells verschiedene Optimierungsmöglichkeiten der Vereinigungsstelle im Hinblick auf eine Reduzierung der Wassertiefen im Flussbett sowie eine Reduzierung der Überschwemmungsbereichen der örtlichen Infrastruktur untersucht.

5 Optimierung des Vereinigungsbereichs

Es erfolgt zunächst eine Darstellung der vom Auftraggeber vorgegebenen Randbedingungen der Optimierungsmöglichkeiten, gefolgt von der Beschreibung der daraus resultierenden, konstruierten Ausbaustufen. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Rechnungsläufe erläutert und mit dem gesteckten Ziel, der Verringerung der Wassertiefen, verglichen. Eine Untersuchung weiterer Optimierungsmöglichkeiten beendet dieses Kapitel.

5.1 Vorgaben des Auftraggebers

5.1.1 Konstruktive Randbedingungen

Die Planungen des Auftraggebers bestanden darin, im Ortskern der Gemeinde Stafflach einen Sporn im Bereich der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Stagnationszone zu errichten. Der Sporn hat hier zwei verschiedene positive Auswirkungen auf das Abflussverhalten. Zum einen füllt er den Totwasserbereich der Stagnationszone und verhindert so einen Energieverlust an der sonst vorhandenen Scherebene, zum anderen verkleinert er den Zusammenflusswinkel und verringert so die Verluste durch Turbulenzbildung ungünstig aufeinander treffender Strömungen. Die Planung sah außerdem eine Optimierung der Uferbereiche des Valserbachs bis zur Vereinigung vor, die im Folgenden als rechtes und linkes Leitwerk bezeichnet werden. Abbildung 18 zeigt dies noch einmal in konstruierter Form.

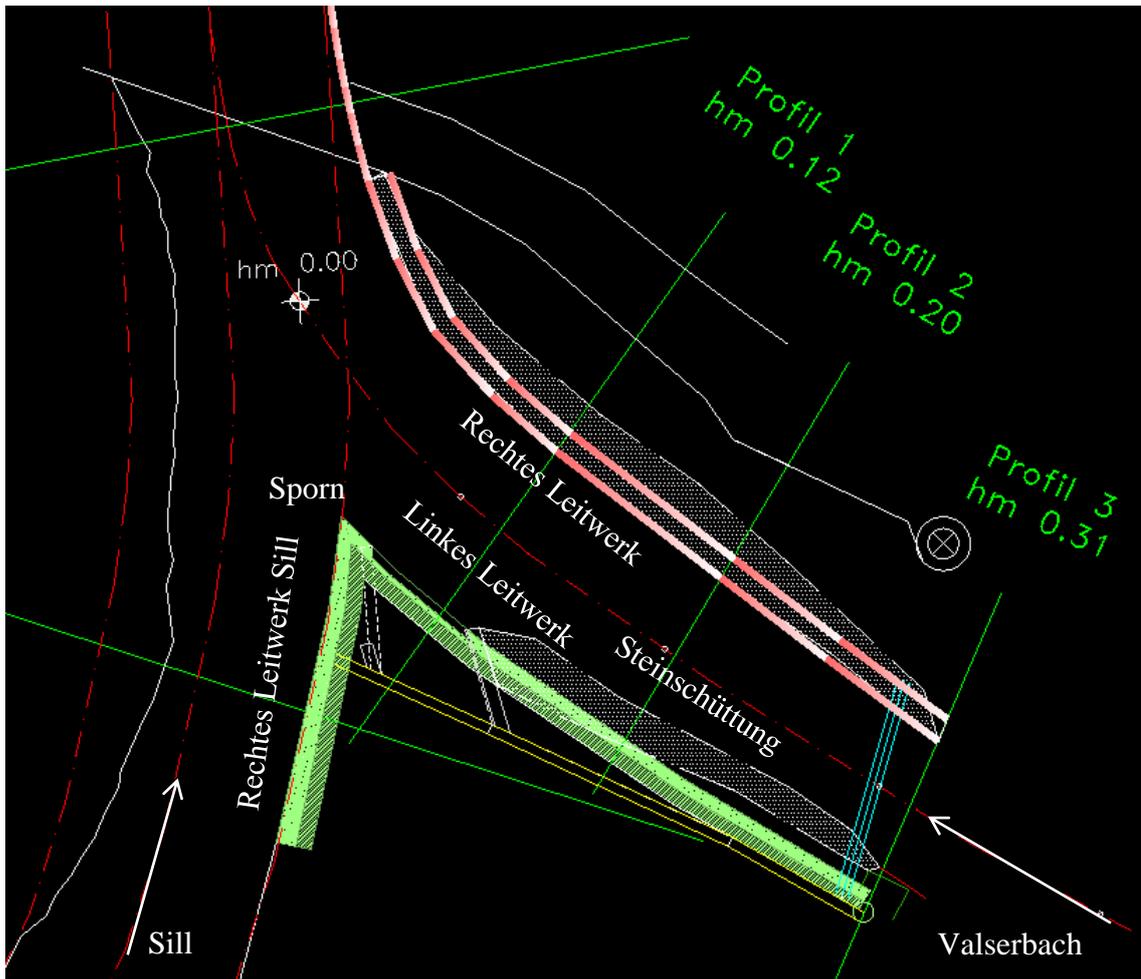


Abbildung 18: Vorläufiger Lageplan der Optimierungsmaßnahmen [in Anlehnung an Etinger, Juni 2014]

Besonderes Augenmerk muss auf den Bereich des Kraftwerkauslasses gelegt werden. Dieser ist zwingend in seinen vorhandenen Maßen beizubehalten, weswegen im Sporn in Verlängerung der Leitmauern des Auslasses eine 2,35 m hohe Öffnung verbleibt. Dem Plan kann außerdem entnommen werden, dass das linke Leitwerk des Valserbachs in Richtung Sporn einen Fixpunkt bei den Koordinaten der westlichen, äußeren Ecke der rechten Leitmauer des Auslasses hat. Der Ansatzpunkt des linken Leitwerks des Valserbachs wurde ebenfalls durch Entfernen der Steinschüttung im Bereich der Brücke und des Kraftwerkshauses verbessert. Mit Ausnahme der Optimierung des rechten Leitwerks der Sill zur Ausbildung des Sporns verbleibt die Sill sowie der restliche Bereich der Vereinigung in ihrem natürlichen Zustand. Eine Optimierung der Sohlrauigkeit ist im gesamten Bereich nicht vorgesehen.

5.1.2 Bemessungslastfälle

Neben den konstruktiven Bedingungen ist eine klare Definition der einzelnen, einzusteuernden Bemessungshochwasser notwendig, um die Optimierungsvarianten untereinander sowie mit dem Ist-Zustand vergleichen zu können. Es wurden nach Absprache mit dem Auftraggeber folgende vier Lastfälle definiert:

- Fall 1 : VB = 30 m³/s (= HQ30 VB ; HQ5 SB) ; Sill = 25 m³/s
- Fall 2 : VB = 60 m³/s (= HQ30 VB ; HQ30 SB) ; Sill = 25 m³/s
- Fall 3 : VB = 105 m³/s (= HQ30 VB ; HQ100 SB) ; Sill = 25 m³/s
- Fall 4 : VB = 60 m³/s (= HQ30 VB ; HQ30 SB) ; Sill = 43 m³/s

mit: VB = Valserbach

SB = Schmirnbach (Zusammenfluss mit Valserbach in St. Jodok)

5.2 Ausbaustufen

Auf Basis der vorgegebenen Randbedingungen wurden drei, aufeinander aufbauende Ausbaustufen konstruiert: Ist-Zustand, rechtes Leitwerk, Sporn in den Varianten 1, 2 und 3

5.2.1 Ausbaustufe 0: Ist-Zustand

Der Ist-Zustand ist das Resultat der Kalibrierungsläufe und wurde unverändert als Referenzwert des derzeitigen Zustands der Vereinigungsstelle übernommen (Abbildung 19 oben links).

5.2.2 Ausbaustufe 1: Rechtes Leitwerk

Das rechte Leitwerk stellt eine Optimierung der bereits vorhandenen Blocksteinmauer dar. Die neue Mauer wird gemäß dem Plan in Abbildung 18 die alte ersetzen, sodass der Querschnitt auf Höhe der Flusssohle erhalten bleibt. Mit einer Steigung von 4:1 ist sie nach oben deutlich steiler als die alte Mauer und verringert so den Querschnitt für große Abflüsse. Dem entgegen wirkt wiederum eine Verbesserung der Rauigkeitswerte, da die neue Mauer wesentlich glatter ausgebildet sein wird als die alte.

5.2.3 Ausbaustufe 2: Sporn

Auf Grundlage des in Abbildung 18 dargestellten Plans wurden drei Spornvarianten entwickelt. Das rechte Leitwerk der Ausbaustufe 1 bleibt bei jeder Variante erhalten.

Ausgangspunkt für den ersten Sporn bildet der südwestliche Brückenpfeiler der Brücke B182. Die Steinschüttungen am Auslass der Brücke sowie vor der Mauer des Kraftwerkshauses wurden vollständig durch ein fast gradlinig verlaufendes linkes Leitwerk des Valserbachs ersetzt. Der Querschnitt des Bachs wurde dadurch auf Höhe der Brücke um ca. 1 m breiter. Dieser verringert sich aber wieder auf den ursprünglichen Querschnitt auf Höhe der östlichen Leitmauer des Kraftwerksauslasses, da deren Ende als Fixpunkt für den Verlauf des Leitwerks festgesetzt wurde. Die Mauer verläuft in der Fluchtgeraden über den Brückenpfeiler und den Fixpunkt an der Leitmauer weiter in den Vereinigungsbereich hinein, wobei zwischen den Leitmauern des Kraftwerksauslasses die zuvor beschriebene Aussparung freigelassen wird. Die Spornspitze entsteht durch den Schnittpunkt der Geraden der Verlängerung des linken Leitwerks mit der gedachten Verlängerung der westlichen Mauer des Kraftwerkshauses (Abbildung 19 oben rechts).

Sporn 2 ragt im Vergleich zu Sporn 1 deutlich weiter in die Vereinigungsstelle hinein und ermöglicht so eine deutlich größere Umlenkung des Valserbachs. Der Sporn wurde auf Grundlage den hinterlegten Koordinaten der CAD-Pläne des Auftraggebers in das vorhandene Modell eingebaut und gibt den Ausbaurzustand aus Abbildung 19 exakt wieder (Abbildung unten links).

Auf Grundlage des Sporn 2 wurde die Spitze von Sporn 3 nochmals weiter in den Vereinigungsbereich gelegt, wobei darauf geachtet wurde, den Querschnitt des Valserbachs als bestimmenden Abflussgeber nicht zu verringern (Abbildung unten rechts).

Abbildung 19 fasst die einzelnen Ausbaustufen in einer Grafik zusammen. Das rechte Leitwerk wurde hierbei vernachlässigt, da die Veränderungen im Vergleich zum Ist-Zustand zu geringfügig und in den Spornvarianten bereits integriert sind.

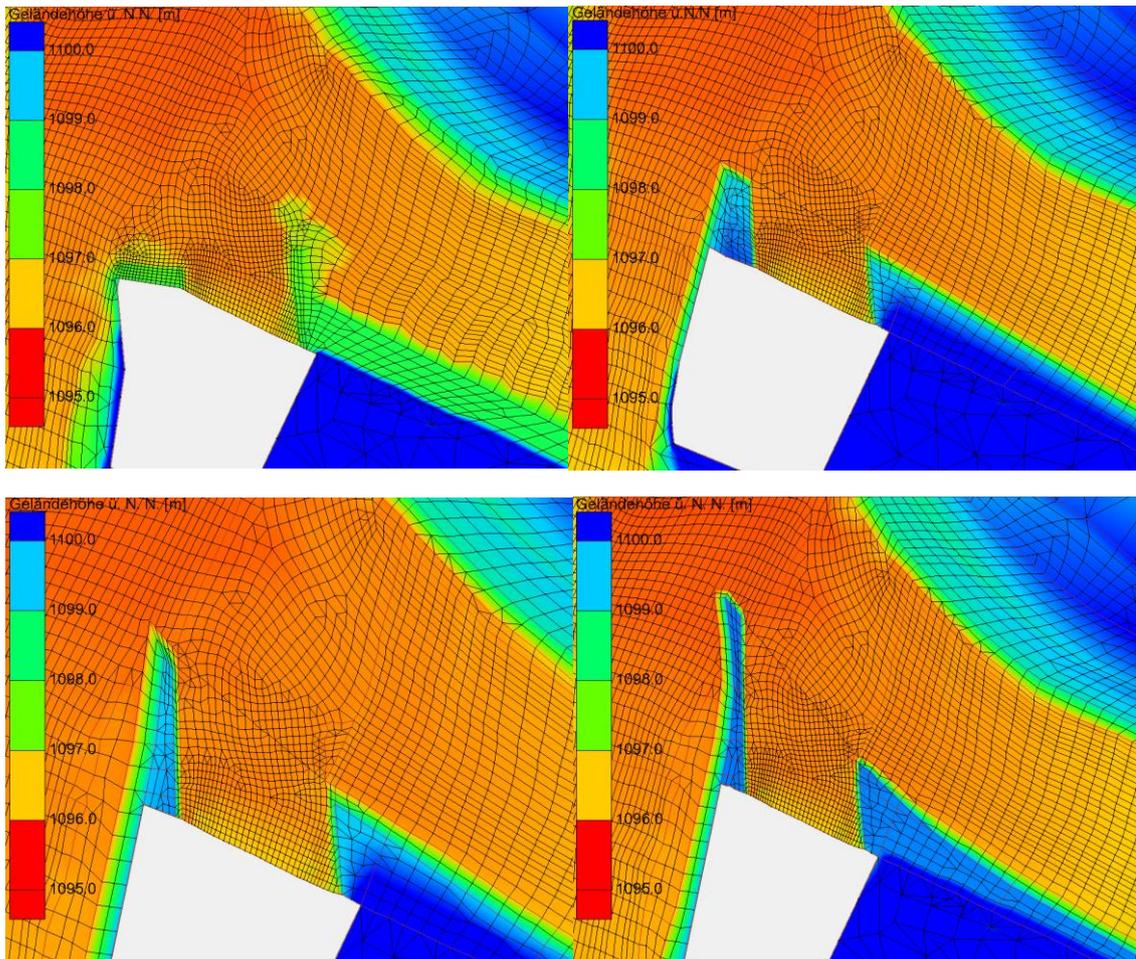


Abbildung 19: Ausbaustufen: oben links: Ist-Zustand; oben rechts: Sporn 1; unten links: Sporn 2; unten rechts: Sporn 3

Die beschriebenen Ausbaustufen wurden daraufhin mit den zuvor definierten Hochwassern belastet. Die Ergebnisse der Simulationen werden im folgenden Kapitel analysiert und ausgewertet.

5.3 Ergebnisse der Rechnungsläufe

5.3.1 Messstrategie

Als Ergebnis der Simulation eines Modells gibt Hydro_AS die Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit an jedem diskretisierten Punkt aus. Abbildung 20 zeigt diese Größen am Beispiel der eingebauten Sporngeometrie 2 und dem Lastfall 3, wobei die Wassertiefen über eine Farbskala und die Geschwindigkeiten als Vektoren dargestellt sind.

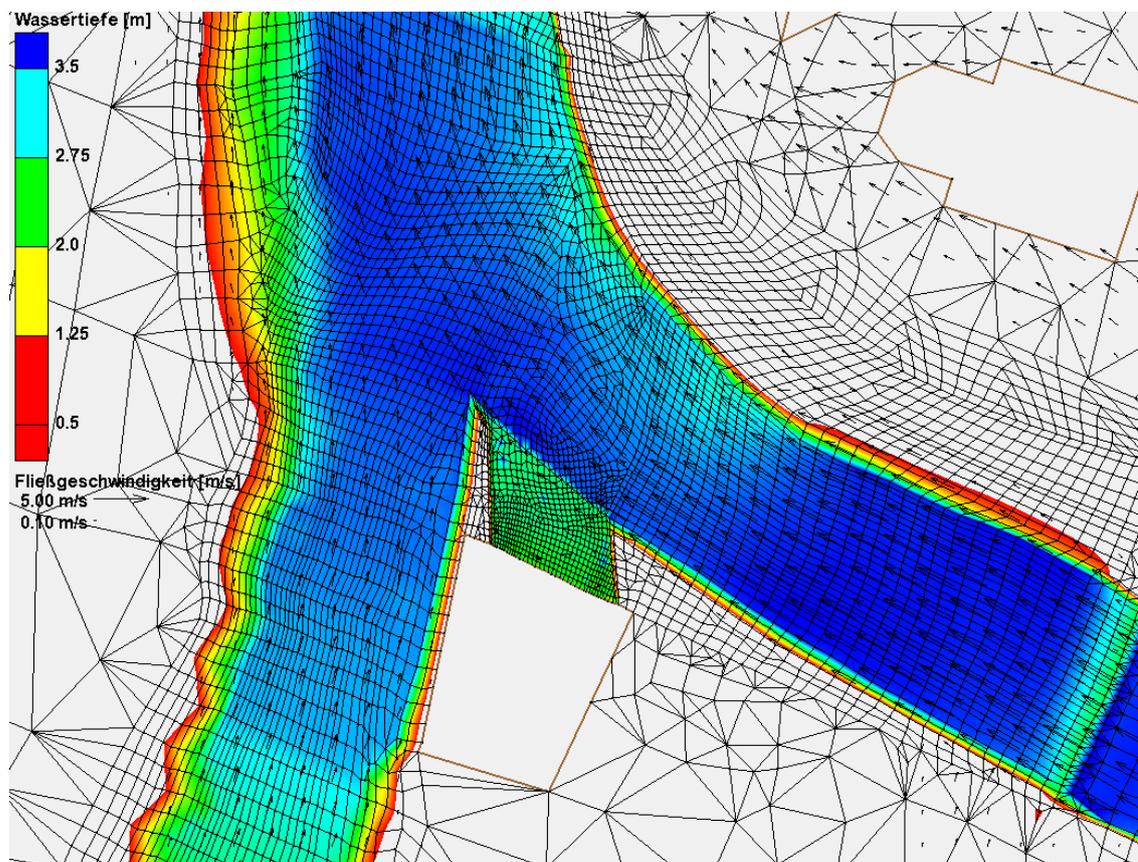


Abbildung 20: Ergebnisvisualisierung mit SMS, Sporn 2 Lastfall 3

Vorteilhaft sind hierbei die schnelle, qualitative Vergleichsmöglichkeit zwischen den einzelnen Ausbaustufen sowie eine anschauliche Betrachtung von bestimmten Ausmaßen, wie beispielsweise der Überschwemmungsflächen oder der flächenhaften Ausbreitung von Höchstwasserbereichen. Nachteilig ist jedoch, dass exakte Werte, wie die Wassertiefe oder die Strömungsgeschwindigkeit an einem oder mehreren Punkten einzeln abgelesen werden müssen und somit quantitativ schwer vergleichbar sind. SMS bietet deshalb die Möglichkeit, Längsprofile entlang frei wählbarer Strecken zu erstellen, um so die auf diesen Profilen liegenden Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten entlang von Kurvenverläufen miteinander zu vergleichen. Zur besseren Über-

sichtlichkeit und Vergleichbarkeit wurde diese Methode der Visualisierung der Simulationsergebnisse gewählt. Die Ergebnisse wurden entlang der in Abbildung 21 dargestellten Linien, welche ungefähr der Flussachse entsprechen, aus den Schaubildern abgegriffen und als Längsprofil in ein Diagramm überführt. Als Startpunkt der Linien wurde zuvor ein Gitternetzpunkt am südlichen Rand der Brücke nach der Vereinigungsstelle definiert. Ein Zwischenpunkt sowie die Endpunkte wurden ebenfalls nach diesem Schema festgelegt, sodass beispielsweise der Endpunkt der Messlinie Valserbach im Bereich der Brücke B182 liegt.

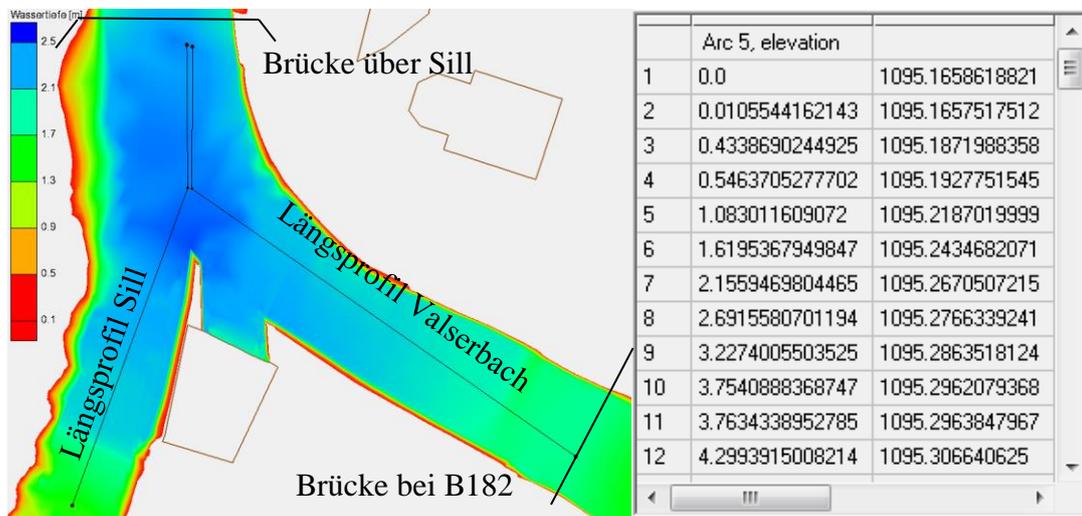


Abbildung 21: Verlauf der Messstrecke, Tabellendarstellung der abgegriffenen Werte

Auf Basis dieser Längsprofile werden zunächst die Ergebnisse der Wassertiefen- und Fließgeschwindigkeitsverteilungen im Valserbach und anschließend die Verteilungen in der Sill dargestellt.

5.3.2 Ergebnisse: Valserbach

Abbildung 22 zeigt die sich einstellenden Wassertiefen des Valserbachs für die verschiedenen Ausbaustufen im Lastfall 1. Die Fließrichtung wurde im Schaubild in negativer x-Achsen Richtung aufgetragen, was der realen Fließrichtung des Valserbachs von Ost nach West entspricht. Die Stelle 0 entspricht dem südlichen Rand der Brücke über der Sill direkt nach der Vereinigungsstelle. Hiervon ausgehend erfolgt bei einer Distanz von 12 m flussaufwärts das erste Aufeinandertreffen der beiden Bäche Sill und Valserbach. In ca. 40 m Entfernung zum Nullpunkt befindet sich die Brücke der Bundesstraße B182.

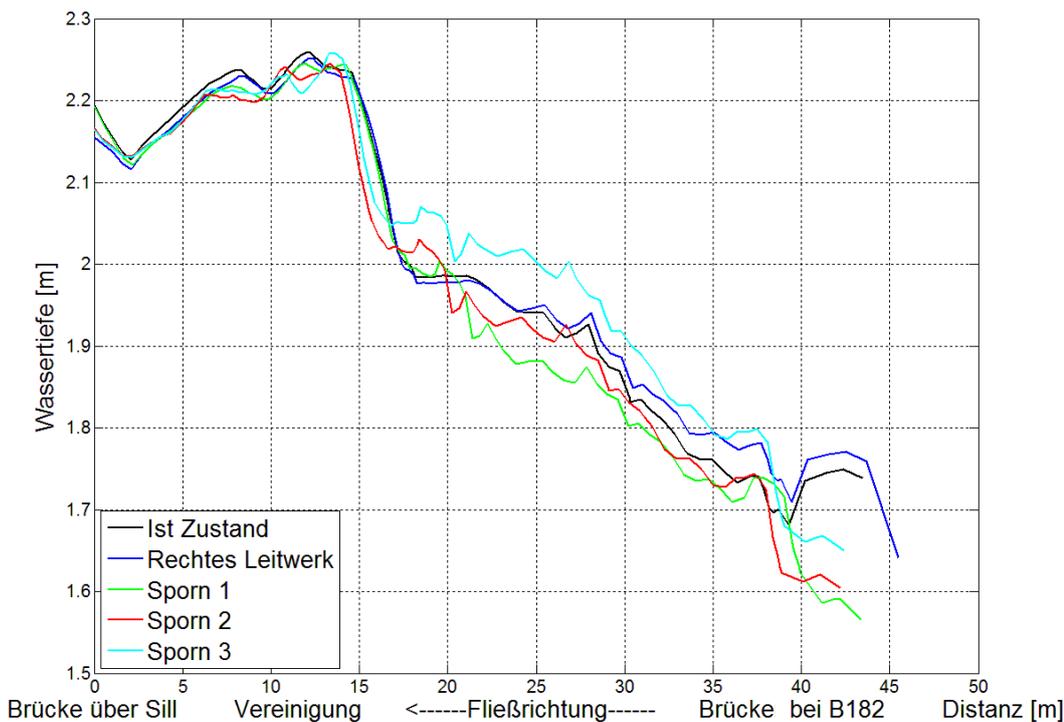


Abbildung 22: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 1

Betrachtet man zunächst die beiden Kurven des Ist-Zustands und des rechten Leitwerkes, fällt auf, dass sich das rechte Leitwerk zunächst durch einen steileren, verengenden Querschnitt leicht negativ auswirkt, was sich im weiteren Verlauf des Flusses aber egalisiert. Die Spornvarianten 1 und 2 wirken sich hingegen auf Höhe der Brücke B182 positiv aus. Die Begründung hierfür liegt in der Optimierung des linken Leitwerks durch Entfernen der Steinanschüttung und einer damit einhergehenden Verbreiterung des Fließquerschnittes im Bereich der Brücke. Allerdings gleichen sich die Kurven ebenfalls bis zur Vereinigungsstelle an den Ist-Zustand an, wobei die Spornvariante 1 im Vergleich zur Variante 2 besser abschneidet. Der Sporn 3 wirkt sich zunächst ebenfalls durch die genannte Optimierung positiv aus, schneidet aber ab einer Distanz von ca. 37 m zum Nullpunkt schlechter ab als der Ist-Zustand. Im Bereich der Vereinigung treffen die beiden Strömungen aufeinander, weswegen bei einer Distanz von 15 m vor der Brücke über der Sill eine deutliche Zunahme der Wassertiefe zu verzeichnen ist.

Zusammenfassend führt keine der Spornvarianten im Lastfall 1 im Bereich der Vereinigung sowie flussaufwärts zu einer ernsthaften Verbesserung der Wassertiefen. Für eine detailliertere Betrachtung werden zunächst die Ergebnisse der Berechnungen im Lastfall 2 hinzugezogen, da durch die Verdopplung des Abflussvolumens deutlich größere Dif-

ferenzierungen der Wassertiefen für die einzelnen Ausbaustufen zu erwarten sind. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt.

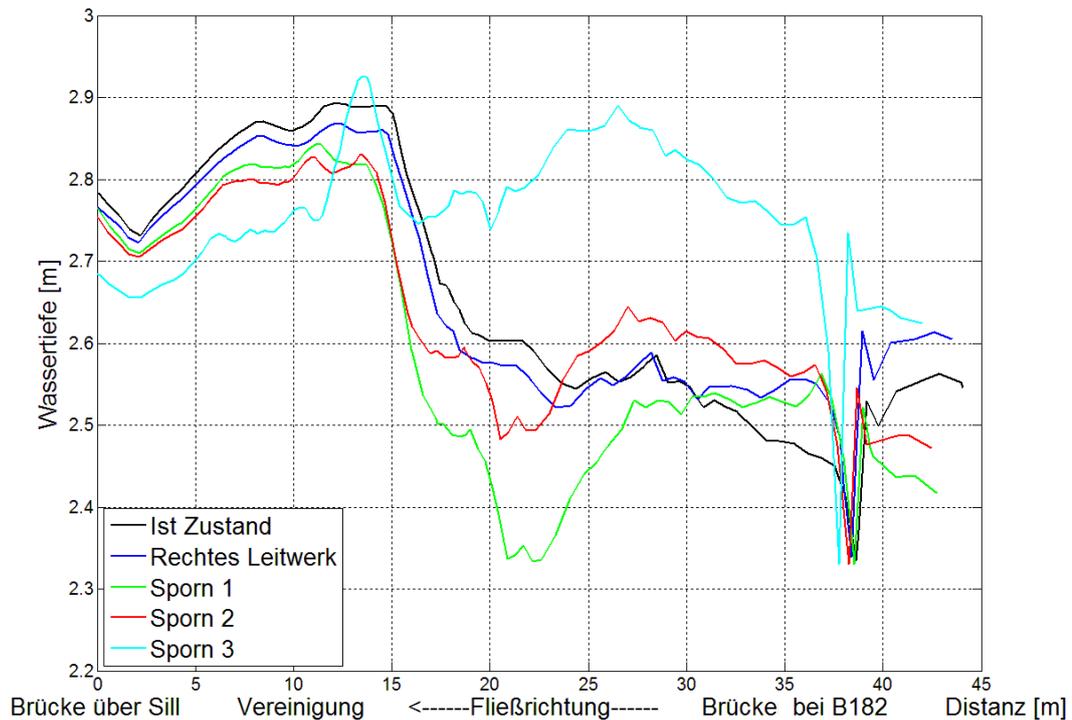


Abbildung 23: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 2

Auffällig ist die markante Wassertiefensenke bei einer Distanz zur Brücke über der Sill von 38 m. Diese ist auf das quer verlaufende Abwasserrohr zurückzuführen, unter welchem das Wasser in einem Druckabfluss mit erhöhter Geschwindigkeit hindurchfließt. Die Simulationsergebnisse weichen in diesem Bereich von den natürlichen, realen Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten ab und sind daher nur bedingt belastbar. Grund hierfür ist die Reduzierung der Abflusssituation auf die zweidimensionale Ebene des Modells Hydro_AS. Bei einer realen Abflusssituation würde das Rohr unter- sowie überströmt werden. Dieses Fließverhalten kann nur in einem dreidimensionalen Modell dargestellt werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich alle Abflüsse, inklusive der HQ100 Abflüsse aus Lastfall 3, deutlich (Froudzahl $< 0,4$) in strömendem Zustand befinden. Im Bereich des Druckabflusses unterhalb des Rohres wurden ebenfalls nur maximale Froudzahlen von 0,5 errechnet. Die anschließende Öffnung des Querschnittes nach dem Abwasserrohr führt zu einer Erhöhung des Wasserstandes. Hier verlaufen die Kurven der Sporne 1 und 2 ähnlich dem Ist-Zustand und weisen im weiteren Verlauf eine geringere Wassertiefe auf, was sich aber im Bereich der Vereinigungsstelle wiederum egalisiert.

Sporn 3 hingegen hat bis zur Vereinigung über die gesamte Strecke eine negative Auswirkung auf das Abflussverhalten. Dies lässt sich durch die Betrachtung der Sporngeometrie und Position im Bereich der Vereinigung erklären. Der Sporn ragt sehr weit in den Vereinigungsbereich hinein und verringert den Abflussquerschnitt des Valserbachs, welcher in den bisher betrachteten Lastfällen deutlich mehr Abflussvolumen hat als die Sill. Konnte der Abfluss des Valserbachs im Ist-Zustand bei Erreichen des Zusammenflusses noch den kompletten Querschnitt der Vereinigung nutzen, so reduziert der Sporn 3 zunächst den Querschnitt, was zu einem Rückstau führt. Dies ist in abgeminderter Form auch bei Sporn 1 und 2 der Fall, wobei Sporn 1 in beiden Lastfällen durch eine minimierte Eingrenzung des Fließweges des Valserbachs in die Vereinigung am besten abschneidet. Eine Abflussoptimierung durch die Sporne tritt in stabiler Form lediglich nach dem Zusammenfluss unterhalb einer Distanz zur Brücke über der Sill von ca. 12 m auf, da hier die leitende Wirkung der Sporne dazu führt, dass der Zusammenflusswinkel reduziert wird und so weniger Turbulenzen hervorgerufen werden, die zu Erhöhungen der Wassertiefen führen.

Die oben beschriebenen, Wasserstand ändernden Vorgänge können ebenfalls zur Erklärung der Kurvenverläufe der Wassertiefen im Lastfall 3 in Abbildung 24 herangezogen werden.

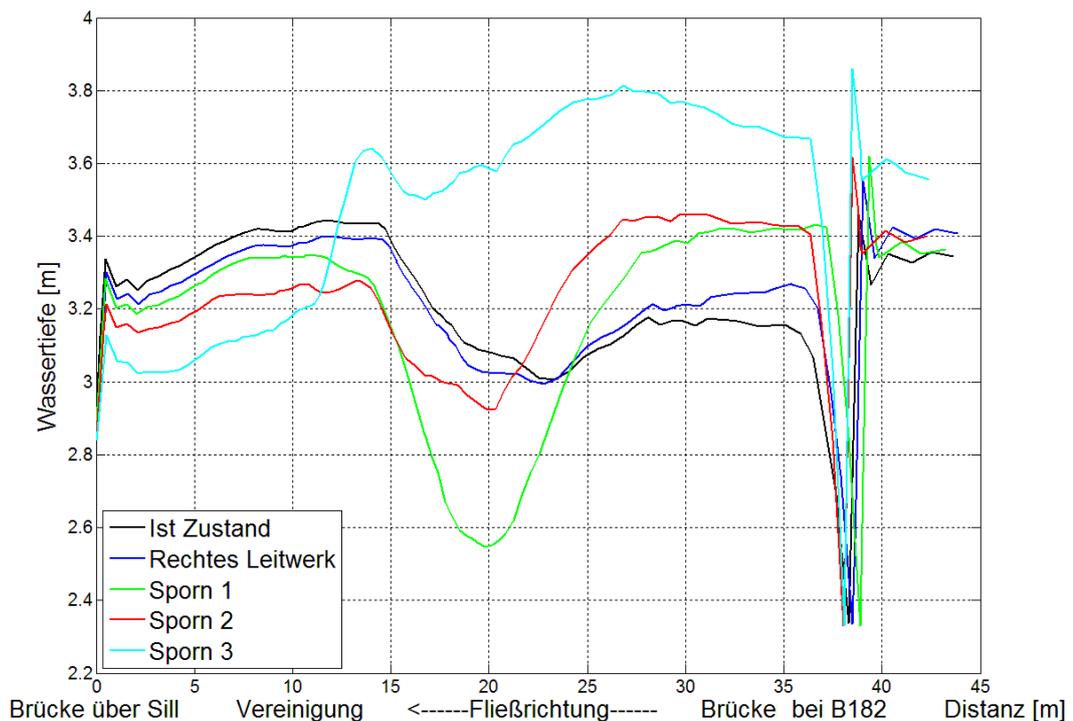


Abbildung 24: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 3

Der Kurvenverlauf von Sporn 1 weist im Lastfall 3 bis zur Vereinigung die niedrigsten Wassertiefen auf. Nach dem Druckabfluss steigt der Wasserstand, bedingt durch das Abwasserrohr, und verbleibt über eine Strecke von 7-8 m auf dieser Höhe. Allerdings erfolgt die Absenkung des Wasserstands mit eingebautem Sporn 1 deutlich früher und tiefer als beispielsweise bei Sporn 2, was auf die frühere Aufweitung des Bachs in die Vereinigung durch einen sehr kurzen Sporn zurückzuführen ist. Im Bereich der Brücke über der Sill nach der Vereinigung, d.h. nahe dem Ursprung des Schaubildes in Abbildung 24, kommt es im Lastfall 3 zu einem Aufstau vor der Brücke sowie einem Druckabfluss. Da die Sill nach der Brücke aber in einem breiten, natürlichen Gerinne in infrastrukturell sichere Gebiete abfließt, wird diesem Druckabfluss und dessen Auswirkungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine Beachtung geschenkt.

Die oben beschriebenen Ursachen, die zu einer Änderung der Wassertiefen der einzelnen Spornvarianten führen, dienen auch zur Erklärung der Fließgeschwindigkeitsverläufe im Bereich der Vereinigung. Beispielhaft sind in Abbildung 25 die Verläufe im Lastfall 3 dargestellt.

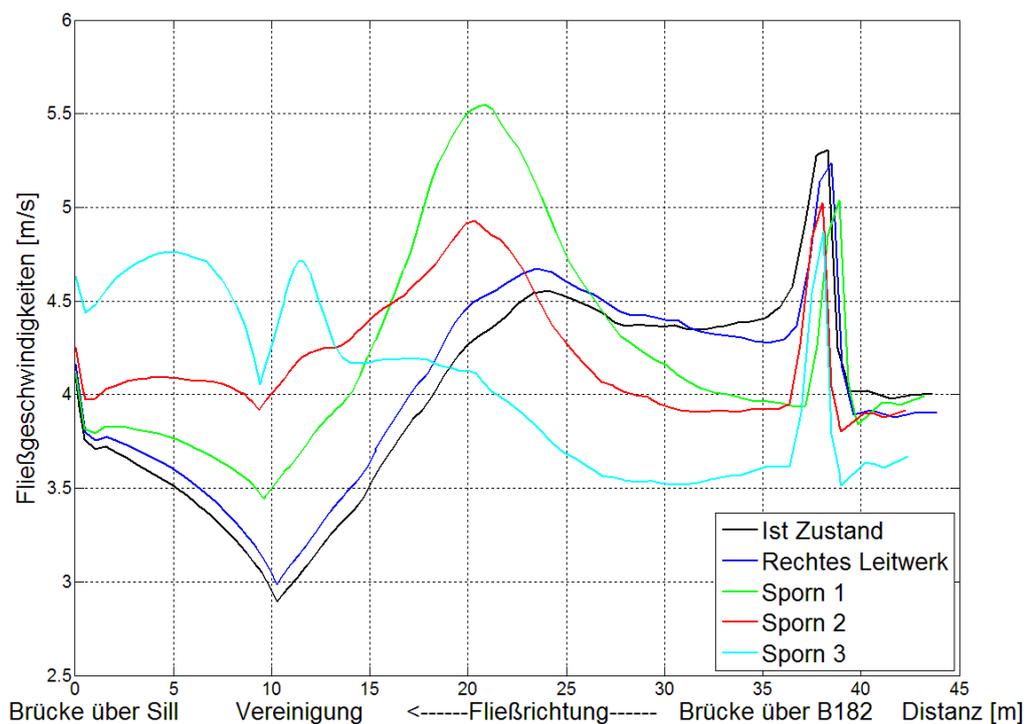


Abbildung 25: Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Vereinigung, Lastfall 3

Unterhalb des Abwasserrohrs erhöhen sich die Fließgeschwindigkeiten, bedingt durch den verringerten Querschnitt und den nachdrückenden Wassermassen. Hierauf erfolgt eine Normalisierung des Fließverhaltens. Da im Ist-Zustand sowie im Ausbauzustand

des rechten Leitwerks die Geröllablagerungen auf der Seite des linken Leitwerks noch vorhanden sind, ist der Querschnitt im Vergleich zu den optimierten linken Leitwerken der drei Spornvarianten geringer, weswegen die Fließgeschwindigkeiten erhöht bleiben. Im Bereich 20-25 m vor der Brücke über der Sill überragen die Geschwindigkeiten der Sporne 1 und 2 die Geschwindigkeiten des Ist-Zustands, was mit einer Reduzierung der Wassertiefen einhergeht. Dies ist ebenfalls auf die Verbesserung des linken Leitwerks zurückzuführen, wobei Sporn 1 durch die geringere Einschränkung des Querschnittes im Bereich der Vereinigung deutlich bessere Werte erzielt. Die anschließende Abnahme der Geschwindigkeiten ist auf das Einfließen des Valserbachs in die Vereinigung zurückzuführen. Rückschlüsse vom Geschwindigkeitsverlauf auf die Wassertiefe können hier nur noch sehr eingeschränkt getroffen werden, da sich der Querschnitt erheblich verändert hat.

Neben den ersten drei Lastfällen, in welchen davon ausgegangen wird, dass bei einem Extremhochwasserereignis hauptsächlich das Abflussvolumen des Valserbachs anschwillt und der Abfluss der Sill bei relativ niedrigen $25 \text{ m}^3/\text{s}$ verbleibt, sollt dieser im Lastfall 4 auf $43 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden. Das Abflussverhältnis zwischen Sill und Valserbach ähnelt somit dem Abflussverhältnis im Lastfall 1, was Abbildung 26 wiedergibt.

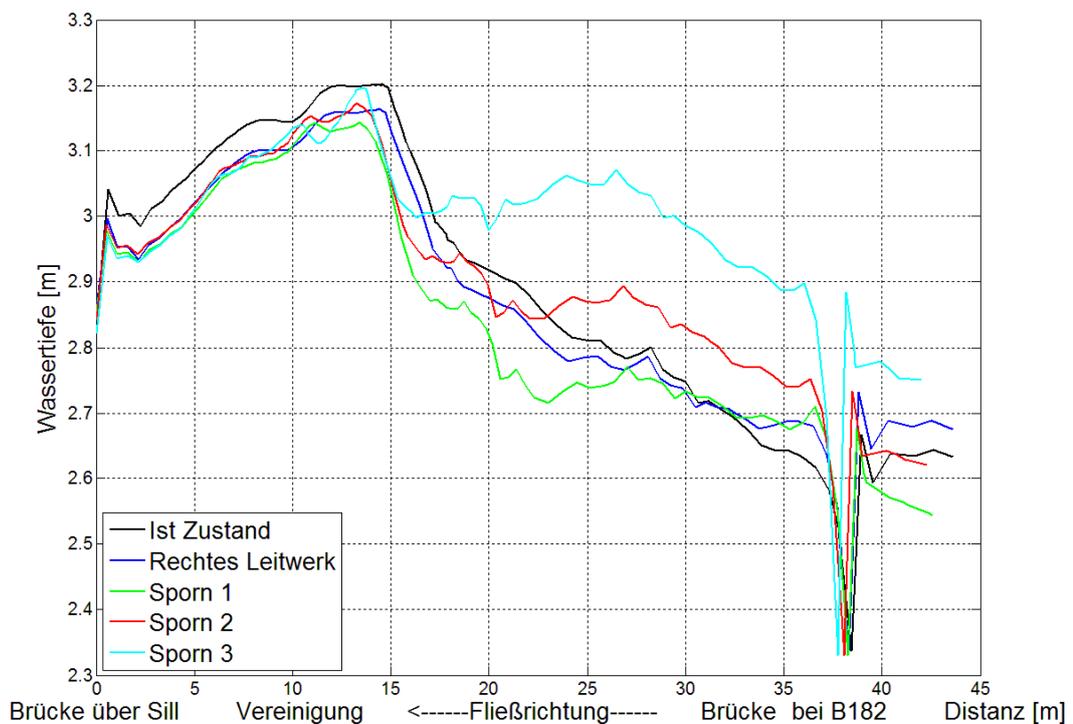


Abbildung 26: Wassertiefen des Valserbachs bis zur Vereinigung, Lastfall 4

Ausgehend von der großen Erhöhung der Wassertiefe nach dem Druckabfluss unterhalb des Abwasserrohrs steigt der Wasserstand kontinuierlich bis zur Vereinigung. Dies kann auch bei Lastfall 1 festgestellt werden. Vergleicht man die Kurven der Abbildung 23 mit den Kurven der Abbildung 26, fällt auf, dass die Wassertiefensenke in einer Entfernung von ca. 23 m zur Brücke nach der Vereinigung im Lastfall 4 in Abbildung 26 fehlt. Grund hierfür ist der erhöhte Abfluss der Sill, welcher den Abfluss des Valserbachs nach Verlassen der querschnittsverengenden Wirkung der Sporne daran hindert, sich im gesamten Bereich der Vereinigung auszubreiten. Dies hat zur Konsequenz, dass sich der Valserbach bis zum quer verlaufenden Abwasserrohr nochmals weiter anstaut.

Nach der Analyse der Auswirkungen der Ausbaustufen auf das Abflussverhalten des Valserbachs bringt keine der ausgearbeiteten Spornvarianten über den gesamten Verlauf der Kurven eine positive Wirkung. Betrachtet man den Bereich oberhalb der Vereinigungsstelle, ist die Spornvariante 1 die geeignetste Lösung. Dabei fällt die Reduktion des Wasserstands gegenüber dem Ist-Zustand nur gering aus. Die Sporne 2 und 3 verschlechtern in manchen Bereichen sogar das Abflussverhalten, da sie den Querschnitt einengen. Stromabwärts der Vereinigung optimiert der dritte Sporn das Abflussverhalten am günstigsten, da bei dieser Variante der Zusammenflusswinkel am stärksten reduziert wird.

Im Folgenden werden die Wassertiefenverläufe der Sill im Hinblick auf die verschiedenen Ausbaustufen analysiert.

5.3.3 Ergebnisse: Sill

Zunächst muss herausgestellt werden, dass die Betrachtung der Optimierungsmöglichkeiten des Abflussverhaltens der Sill oberhalb der Vereinigung zwischen dem Wehr und der Vereinigungsstelle im Vergleich zu der zwingenden Optimierungsnotwendigkeit des Zulaufs des Valserbachs zur Vereinigung eine untergeordnete Rolle spielt, da bei einem Aufstau der Sill, im Gegensatz zum Valserbach, keine Schäden an der Infrastruktur zu befürchten sind. Daher werden zur Analyse der Eignung der Ausbaustufen lediglich die Lastfälle 3 und 4 in den Abbildungen 27 und 28 dargestellt, da die Lastfälle 1 und 2 die gleichen Ergebnisse in geringerer Deutlichkeit zeigen.

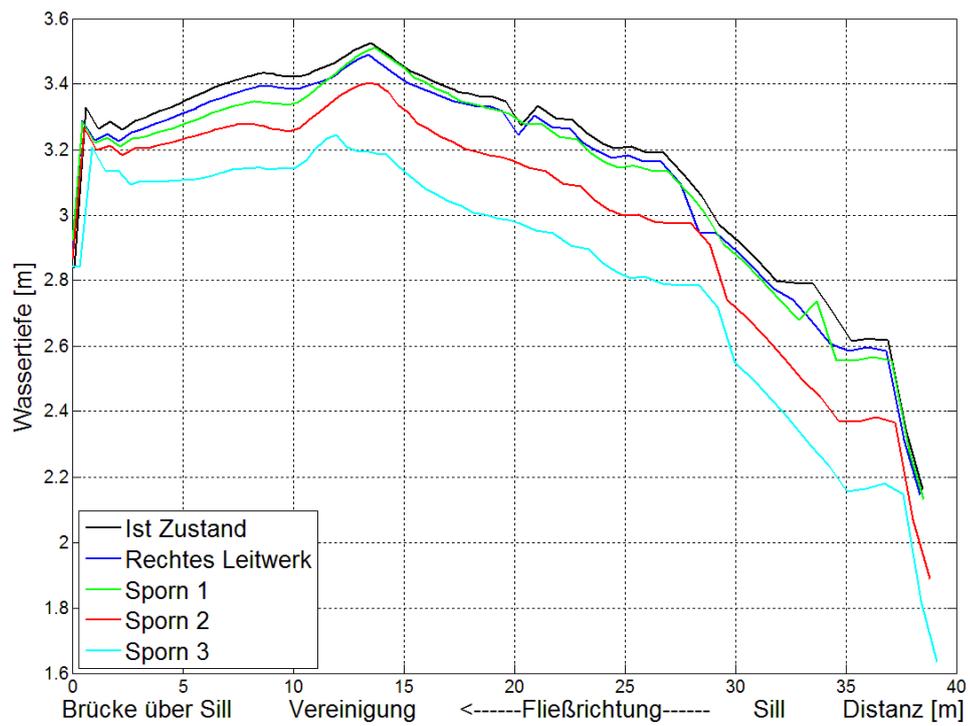


Abbildung 27: Wassertiefen der Sill bis zur Vereinigung, Lastfall 3

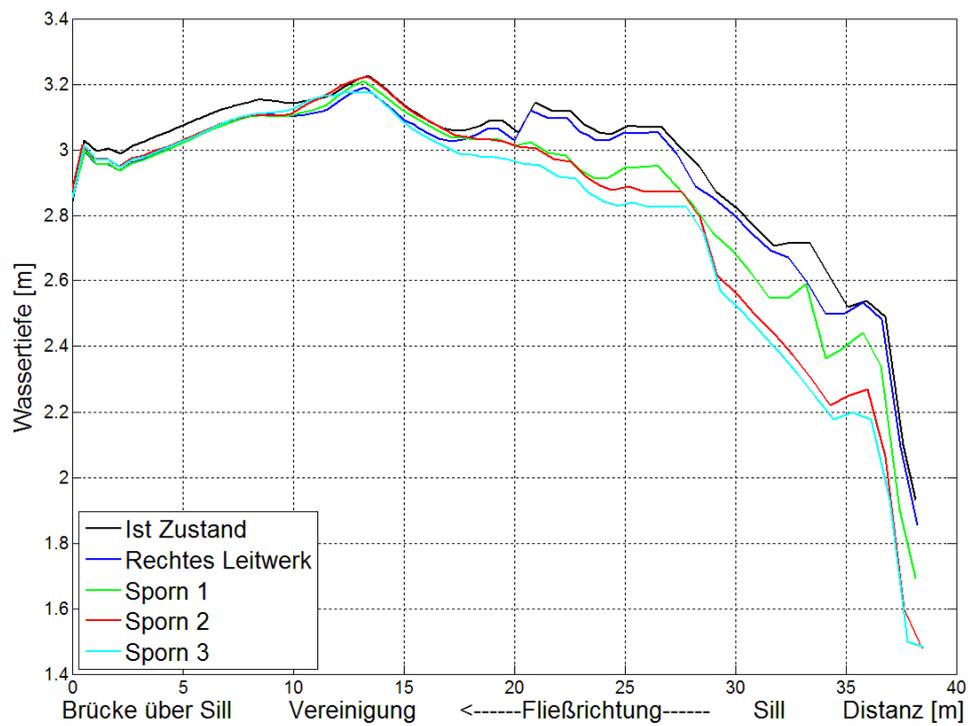


Abbildung 28: Wassertiefen der Sill bis zur Vereinigung, Lastfall 4

Bei der Betrachtung beider Abbildungen lässt sich eine klare Reihenfolge der optimalen Spornvarianten erkennen. Sporn 3 zeigt die besten Ergebnisse in Bezug auf eine Reduzierung der Wasserstände. Im Ist-Zustand strömt der Abfluss des Valserbachs ohne Ablenkung durch einen Sporn direkt in den Vereinigungsbereich und beeinflusst so durch eine deutlich größere Abflusspende das Fließverhalten der Sill negativ, da der Abfluss der Sill durch das fast senkrecht einfließende Wasser des Valserbachs gebremst und aufgestaut wird. Sporn 3 lenkt den Abfluss des Valserbachs bis zur Mitte der Vereinigung und reduziert zudem den Zusammenflusswinkel zugunsten eines besseren Abflusses. Dies ist in Abbildung 28 deutlich an den sich angleichenden Kurven des Ist-Zustandes und des Sporn 3 zu sehen. Die Angleichung erfolgt deutlich später als bei einer Beeinflussung der beiden Bäche mit eingebautem Sporn 1, wodurch die geringeren Wasserstände zustande kommen.

Weitere Diagramme der Wassertiefen- und Geschwindigkeitsverläufe von Sill und Valserbach können dem Anhang B entnommen werden

5.3.4 Untersuchung der Überschwemmungsbereiche

Neben der Optimierung der Abflussverhältnisse im Vereinigungsbereich soll im Verlauf dieser Arbeit die Auswirkung derselben auf die Überschwemmungsbereiche im Gemeindegebiet untersucht werden. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen den Ist-Zustand der Überschwemmungsbereiche für die Lastfälle 2 und 3. Im Lastfall 1 findet keine Überschwemmung der örtlichen Infrastruktur statt.



Abbildung 29: Überschwemmungsgebiete Ist-Zustand, Lastfall 2

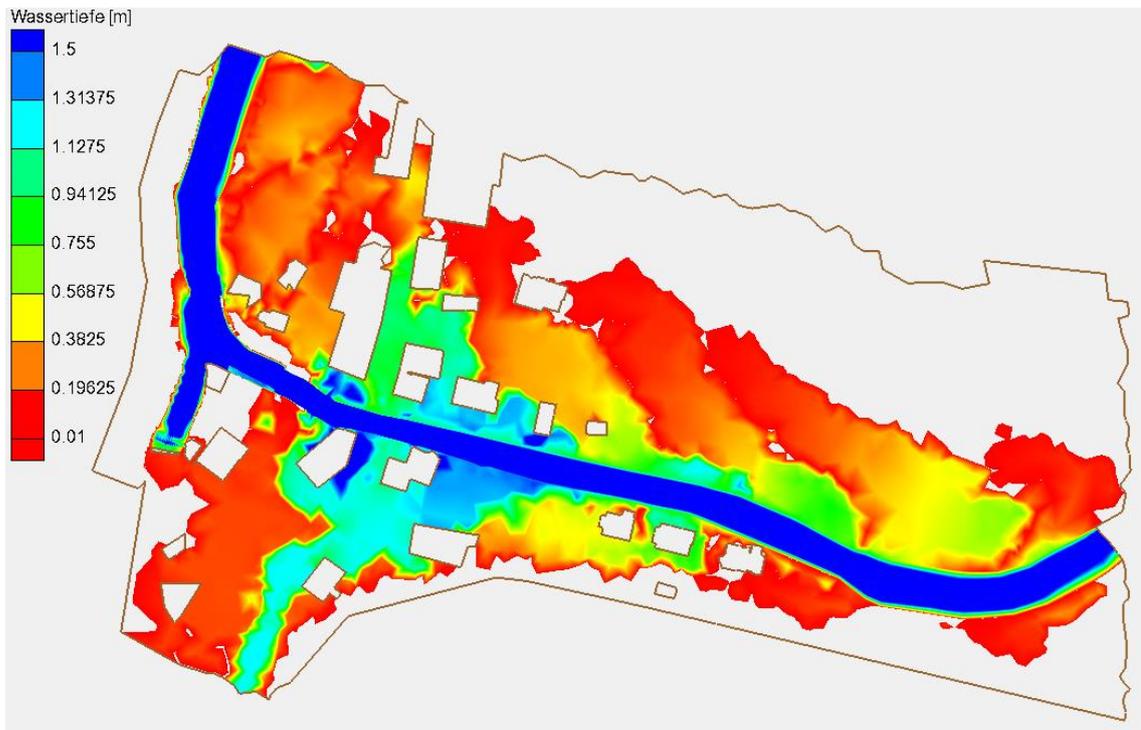


Abbildung 30:Überschwemmungsgebiete Ist-Zustand, Lastfall 3

Abbildung 29 zeigt deutlich, dass das Wasser weit vor der eigentlichen Vereinigungsstelle auf Höhe einer kleinen, einspurigen Brücke, ca. 25 m östlich der Brücke B182 übertritt. Zur besseren Visualisierung wurden entlang einer am Nordufer des Valserbachs verlaufenden Linie die Wasserstände im Lastfall 2 mit den Ausbautuständen Ist-Zustand und Sporn 2 abgegriffen und in einem Diagramm dargestellt. Des Weiteren wurde eine Optimierungsvariante untersucht, in welcher die querschnittseinschränkende Brücke entfernt wurde. Die Ergebnisse wurden in Abbildung 31 dargestellt.

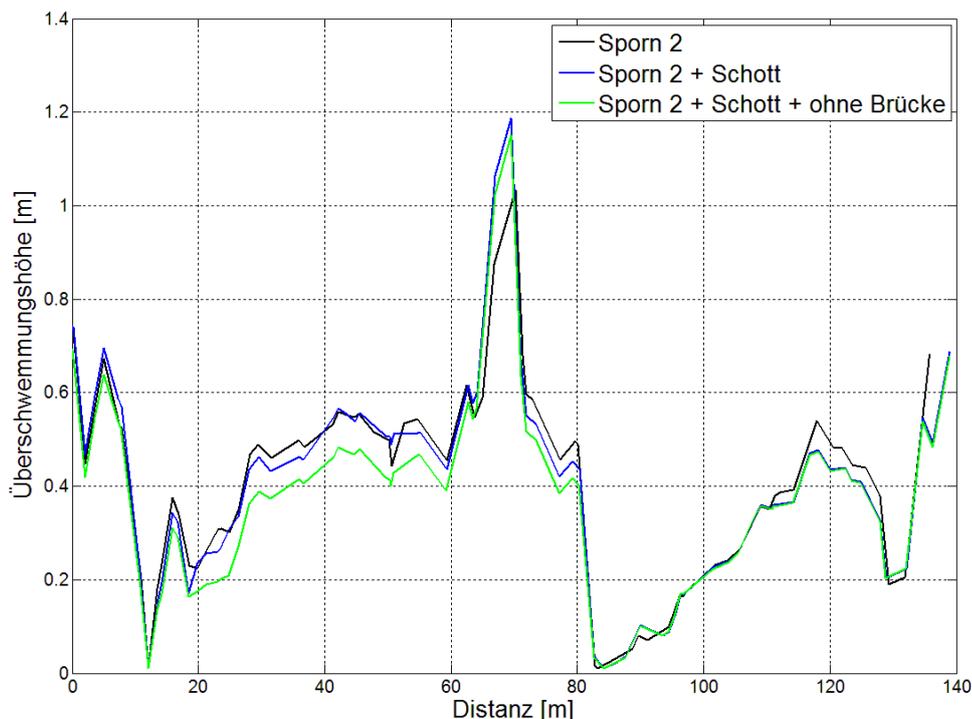


Abbildung 31: Repräsentativer Querschnitt der Wassertiefen im überschwemmten Gemeindegebiet

Deutlich zu erkennen ist, dass weder eine Optimierung der Vereinigungsstelle mit entsprechenden Sporngeometrien noch das einzelne Entfernen der Brücke Veränderungen in der Überschwemmungshöhe und somit auch in den Ausmaßen des Überschwemmungsgebietes bewirken. Ein Grund hierfür könnte die Einengung und Kanalisierung des Valserbachs ab dem östlichen Dorfrand sein. Der Bach wird hier von einem natürlichen Fließgerinne mit einer Breite von ca. 8,5 m bis zur einspurigen Brücke auf 5,7 m verengt. Ab hier verbreitert sich der Querschnitt stetig bis auf die Durchflussbreite von 8,4 m unter der Brücke B182. Da es nicht Gegenstand dieser Arbeit war, Optimierungsvarianten im Bereich oberstrom der einspurigen Brücke zu finden, wurden an dieser Stelle keine weiteren Untersuchungen durchgeführt. Diese sind aber zwingend notwendig, um die Überschwemmungsflächen bei extremen Hochwasserereignissen zu minimieren.

Die in diesem Kapitel beschriebenen und analysierten Ausbaustufen und Spornvarianten wurden auf Grundlage der von Auftraggeber gestellten Randbedingungen entwickelt. Der folgende Abschnitt untersucht Optimierungsvarianten, welche unabhängig der Randbedingungen eine Verbesserung der Abflusssituation bewirken können.

5.4 Weitere Optimierungsmöglichkeiten

5.4.1 Schließen des Sporns durch ein Schott

Bei genauer Betrachtung der Sporngeometrie stellt man fest, dass speziell die Sporne 2 und 3 auf der Ostseite, bedingt durch den Kraftwerksauslass, eine Aussparung aufweisen, sodass das ankommende Wasser des Valserbachs in einem ungünstigen Winkel auf die verbleibende Sporngeometrie auftrifft. Die Strömungssituationen werden in Abbildung 32 mit eingebautem Sporn 2 und Sporn 3 dargestellt. Sporn 1 weist durch seine gerade, dem Verlauf des Valserbachs folgende Geometrie keinen Aufprallbereich auf, was ein weiterer Grund für ein besseres Abflussverhalten im Vergleich zu Sporn 2 und 3 sein könnte.

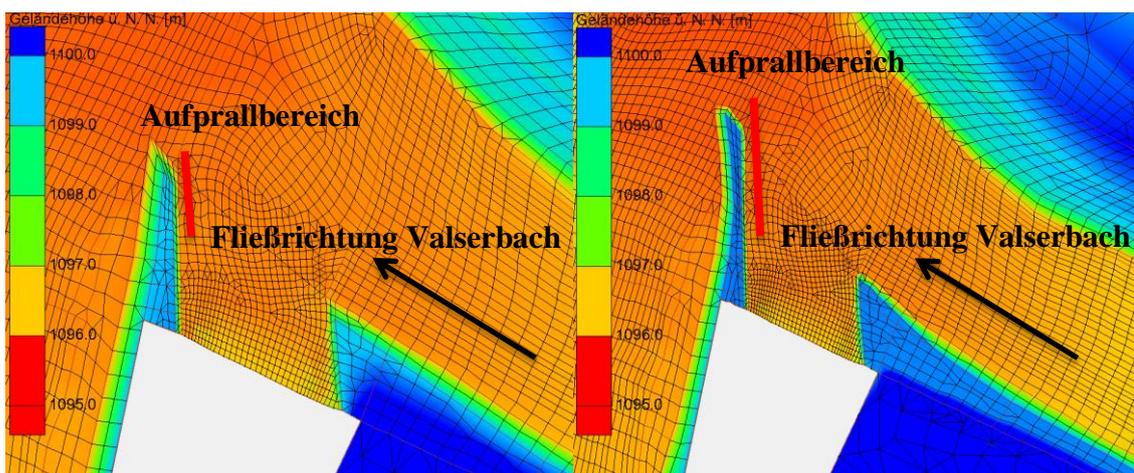


Abbildung 32: Darstellung der ungünstig wirkenden Geometrie links: Sporn 2; rechts Sporn 3

Unter der bereits getätigten Annahme, dass im Fall extremer Hochwasser das Kraftwerk ausgeschaltet wird, wurde der Kraftwerksauslass durch Einbau eines absenkbaren Schotts neu modelliert. Die Ergebnisse wurden vergleichend mit der ursprünglichen Geometrie des Sporn 3 für die Lastfälle 1 bis 3 in Abbildung 33 visualisiert.

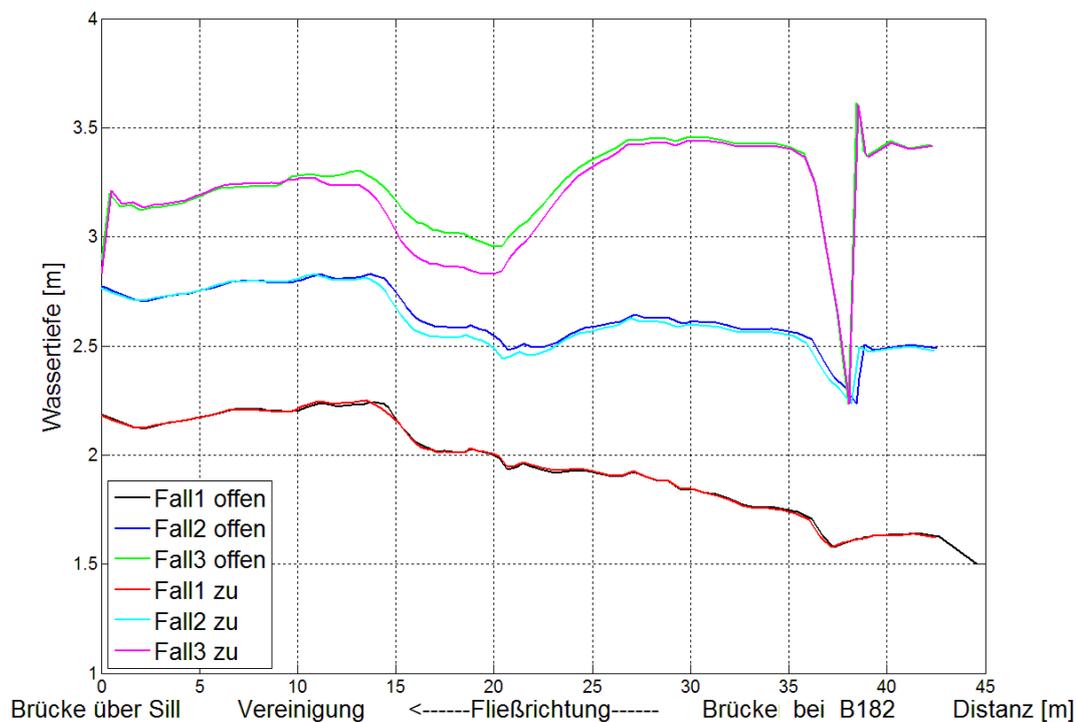


Abbildung 33: Vergleich Sporn 2 mit und ohne Schott, Lastfälle 1-3

In keinem der drei getesteten Lastfälle führt das Schließen des Auslasses durch ein abenkbares Schott zu einer markanten Verbesserung der Abflusssituation. Minimale Verbesserungen durch den Einbau des Schotts konnten nur direkt am Einbau desselben bei einer Distanz von ca. 15 m zur Brücke B182 in den Lastfällen 2 und 3 ermittelt werden, was aber keine Auswirkungen auf die umliegenden Bereiche hat. Grund hierfür ist die Ausbildung eines Fließtrennungsgebiets zwischen dem strömenden Wasser des Valserbachs und dem zirkulierenden Wasser im Kraftwerksauslass, welches als eine Art Wasserleitwand wirkt und den Abfluss, vergleichbar mit dem Schott, umlenkt. Die Reibungsbeiwerte des Schotts und der Scherebene zwischen den beiden Fließgebieten sind sich sehr ähnlich. Da die Energieverluste gemäß Gleichung 1 (siehe Kapitel 2.1.1) in Abhängigkeit zur Fließgeschwindigkeit mit zweiter Potenz zunehmen, sind diese im Lastfall 1 und damit bei geringen Geschwindigkeiten nahezu identisch. Erhöht sich das Abflussvolumen und somit die Geschwindigkeit in einem Bach wie in Lastfall 3, driften die Energieverluste auseinander, wodurch sich die geringere Wassertiefe im Lastfall 3 in der Nähe des eingebauten, hydraulisch günstiger wirkenden Schotts erklärt.

5.4.2 Reduzierung der Sohlrauigkeit

Neben den natürlich gegebenen und zusätzlich von Menschenhand geschaffenen, abflusslenkenden Geländeformen trägt die Rauheit der Sohle sehr stark zur vorhandenen Abflusssituation bei. Abbildung 34 zeigt die sich ausbildenden Abflusstiefen bei einer

Änderung der in Tabelle 4 genannten Gewässertypen auf einen Strickler-Beiwert von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, was einer kiesigen Sohle mit wenigen Steinblöcken entspricht. Die Wassertiefen wurden im Lastfall 2 mit eingebautem Sporn 2 gemessen.

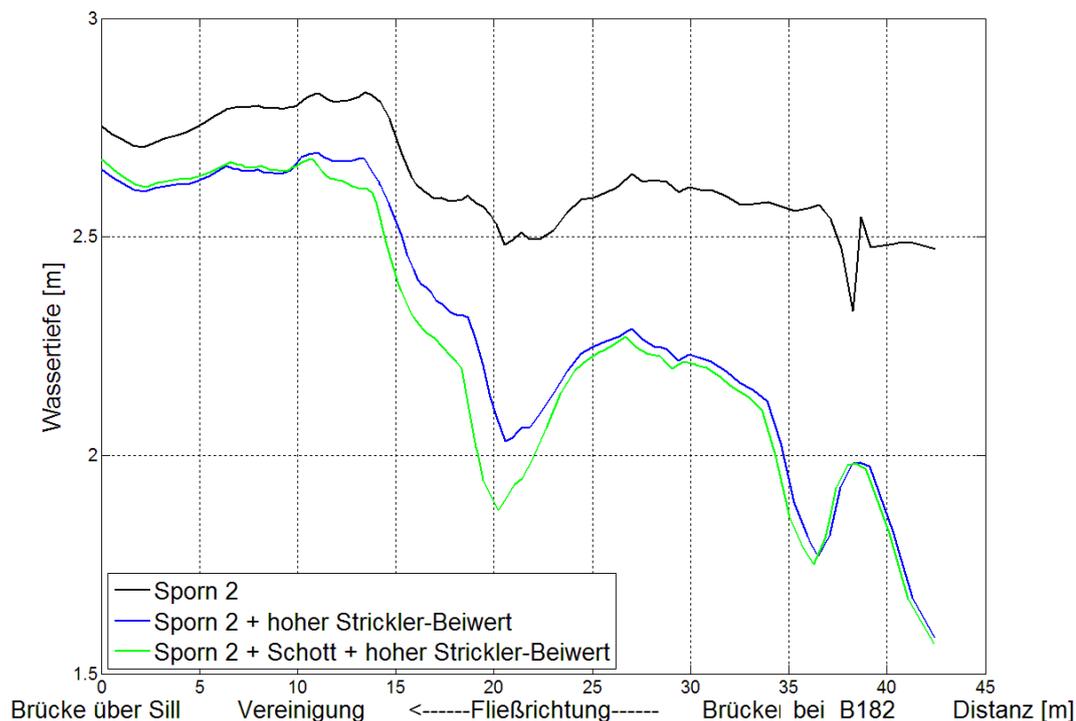


Abbildung 34: Änderung der Wassertiefen durch Reduktion der Sohlrauigkeit im Lastfall 2

Die Reduzierung der Sohlrauigkeit zeigt über die gesamte Messstrecke eine positive Wirkung auf die Abflusstiefe, was mit einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten in Verbindung zu setzen ist. Der Einbau des Schotts wirkt sich bei höheren Geschwindigkeiten durch die im vorigen Abschnitt genannten Gründe erneut günstig aus. Den positiven Wirkungen der glatteren Sohle steht aber entgegen, dass Gebirgsbäche, wie der Valserbach oder die Sill, selbst bei Normalabfluss oder nur leicht erhöhtem Abflussvolumen bei jährlichen Hochwassern Geröll transportieren, welches sich absetzt und so die Sohle durch seinen Wasserwiderstand lokal aufraut. Demnach müsste bei der Berücksichtigung einer Sohlverbesserung diese ständig überwacht und Geröllablagerungen entfernt werden, woraus zusätzliche Kosten entstehen.

Die Analyse weiterer Optimierungsmöglichkeiten im Bereich der Vereinigung ergab nur geringfügige Verbesserungen der Abflusssituation, die im Falle der Sohlglättung zusätzlich mit einem Überwachungsaufwand einhergehen. In Verbindung mit der Untersuchung der Ausbaustufen und Spornvarianten konnten im Hinblick auf das Ziel, der Reduzierung der Überschwemmungsflächen im Dorfgebiet keine nennenswerten Ver-

besserungen ermittelt werden. In Kapitel sechs werden das Vorgehen in dieser Arbeit von der grundlegenden Literaturstudie bis zur Analyse der Rechnungsläufe der Optimierung sowie wichtige Eckpunkte und Ergebnisse nochmals zusammengefasst. Daran anschließend folgt ein Ausblick zum weiteren Vorgehen in Bezug auf das Erreichen des Ziels, der Minimierung der Überschwemmungsflächen im Siedlungsbereich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Aufgabenstellung, der hydraulischen Optimierung zweier Wildbäche am konkreten Fall des Zusammenflusses von Sill und Valserbach in Stafflach bei Matri am Brenner, wurde in Kapitel 1 die Relevanz einer Betrachtung und Verbesserung der Hochwassersituation im Hinblick auf die Kosten und Schäden an der Infrastruktur sowie die Gefahr für Leib und Leben dargestellt. Der in dieser Arbeit betrachtete Valserbach tritt durch ein ungünstiges Abflussverhalten bei einem HQ60 so weit über die Ufer, dass der gesamte Dorfbereich nahe der Vereinigung mit der Sill sowie die Bundesstraße 182 überflutet wird. Ziel dieser Arbeit war es daher, den Vereinigungsbereich zu optimieren, um die Überschwemmungsbereiche im Dorfgebiet durch ein besseres Abflussverhalten zu reduzieren.

Hierfür erfolgte in Kapitel 2 eine Literaturstudie, in welcher abflussrelevante Parameter untersucht und nach ihrer Optimierungsmöglichkeit bewertet wurden. Es wurde herausgearbeitet, dass neben den Querschnitts- und Abflussverhältnissen beider in die Vereinigung eintretenden Ströme, der Zusammenflusswinkel eine entscheidende Rolle spielt. Neben diesen Parametern sind weitere Größen, wie die Ausbildung von Scherebenen, zirkulierende Strömungen und Drall fördernde Zuströmverhältnisse vor der Vereinigung, von Bedeutung. Diese Größen wurden aber im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet, da sie zur fehlerfreien Abbildung in einem Modell eine 3D-Simulation benötigen, die aber nicht vorgesehen war. Aufgrund der Komplexität und Einzigartigkeit jeder Fließgewässervereinigung war ein Modell zur detailgenauen Abbildung der Fließverhältnisse dennoch unumgänglich. Die Wahl fiel auf das 2D Modell Hydro_AS.

In Kapitel 3 wurden die in das Programm implementierten Flachwassergleichungen beschrieben und deren Einsatzgrenzen herausgearbeitet. Neben diesen Gleichungen ist eine räumliche und zeitliche Diskretisierung des Modellgebiets notwendig. Ausgehend von der Betrachtung verschiedener Gitternetzdiskretisierungen wurden die Vorteile der in Hydro_AS genutzten Finite Volumen Methode bei einer zeitlichen Diskretisierung mittels des 2-stufigen Runge-Kutta Verfahrens erläutert. Des Weiteren wurde das pre- und postprozessing Visualisierungsprogramm SMS vorgestellt.

Mittels Kenntnis dieser Programme wurde daraufhin das Modellgebiet in Kapitel 4 modelliert. Grundlage hierfür bildete das bereits aus einem vorherigen Projekt validierte Modell einer Fließgewässervereinigung stromaufwärts des Valserbachs. In dieses Modell wurden gewonnene Daten aus Überfliegungs- und Ortsvermessungen integriert, um den Vereinigungsbereich von Sill und Valserbach darstellen zu können. Es erfolgten

einige Probeläufe gefolgt von einem Kalibrierungslauf auf Basis eines Augenzeugenberichts. Die von Augenzeugen geschätzten Wasserstände konnten hierbei nur bedingt erreicht werden. Da aber keine weiteren Messdaten oder Berichte vorlagen, konnte keine weitere Kalibrierung oder Validierung durchgeführt werden.

Aufbauend auf dem plausibelsten Modell wurden in Kapitel 5 unter Einhaltung gewisser vorgegebener Randbedingungen drei Ausbaustufen sowie drei verschiedene Sporngeometrien konstruiert. Diese wurden in einer Simulationsreihe mit zuvor definierten Abflusslastfällen beschickt. Keine der Sporngeometrien konnte maßgeblich zu einer Verbesserung des Abflussverhaltens beitragen.

Es wurden zwei Bereiche herausgearbeitet, in welchen unterschiedliche Spornvarianten vorteilhafte sowie nachteilige Auswirkungen haben. Oberhalb der Vereinigung wirkte sich die kürzeste Spornvariante positiv aus, da sie lediglich die westliche Uferseite des Valserbachs optimierte, ohne eine leitende Wirkung für den Abfluss zu haben, was den Abflussquerschnitt des Bachs einengen würde. Diese Einengung wirkte sich bei den weiter in die Vereinigung ragenden Spornen nachteilig aus. Dem entgegen erreichte der eingebaute längste Sporn stromabwärts der Vereinigung eine positive Wirkung auf das Abflussverhalten, da er durch Umlenkung des Valserbachs den Zusammenflusswinkel stark reduzieren konnte. Dies führt zu weniger Turbulenzen und Energieverlusten führt.

Neben der Optimierung der Wasserstände im Bereich der Vereinigung wurden die Auswirkungen der Ausbaustufen und Spornvarianten auf die Ausmaße der Überschwemmungsgebiete untersucht. Die Simulationen zeigten, dass die Hochwasserstände im Gemeindegebiet entgegen der Vermutung keine Beeinflussung durch die baulichen Veränderungen im Vereinigungsbereich erfahren. Grund hierfür ist eine starke Verengung des Fließquerschnittes des Valserbachs am östlichen, entgegengesetzten Ende des Gemeindegebietes. Weitere Optimierungsversuche der Vereinigungsstelle durch Reduzierung der Sohlrauigkeit oder Veränderung der Sporngeometrie durch Schließen des Kraftwerksauslasses im Bereich der Sporne ergaben nur eingeschränkt eine Verbesserung der Abflusssituation.

Da das gesteckte Ziel der Reduktion der Überschwemmungsflächen im Gemeindegebiet durch die simulierten Veränderungen im Bereich der Vereinigung nicht erreicht wurde, müssen weitere bauliche Veränderungen untersucht und simuliert werden. Es wurde herausgearbeitet, dass die Kanalisierung und die Reduktion der Fließquerschnittsbreite des Valserbachs maßgeblich für die Überschwemmungen verantwortlich ist, weswegen an diesem Punkt mit weiteren Optimierungsversuchen angesetzt werden muss. Eine Verbreiterung des kanalisierten Fließweges könnte hier zu einer Verbesserung der Situation beitragen, ebenso wie eine Eindeichung. Beide Möglichkeiten sind aber aufgrund der dicht an den Bach gebauten Häuser und Straßen schwer zu realisieren. Sollte

eine Optimierung dieser verengten Fließbereiche des Valserbachs Erfolg haben, muss der Vereinigungsbereich von Sill und Valserbach erneut untersucht werden, da sich die Abflusssituationen oberstrom ändern.

Diesem Schema folgend, müssen in naher Zukunft weitere Bereiche stromabwärts der Sill optimiert werden, da durch eine Verbesserung der Abflusssituation im Oberstrom mehr Wasser im Flussbett verbleibt und nicht mehr in überschwemmten Gebieten versickert. Dies führt zu einer erhöhten Gefährdung der Bewohner sowie Infrastruktur im weiteren Verlauf des Bachs.

Anhang

Anlage A

Tabelle 2: Geschriebener Hydrologischer Längsschnitt der Sill, Stand 9.4.2010

Beschreibung (Flächenverzeichnis 1984)	Gesamt- EZG	HQ ₅	HQ ₁₀	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀
	[km ²]	[m ³ /s]				
Sill Ausfluss Brennersee	18,3	5,5	7,0	9,2	11,4	13,4
bis Klamm	18,9	5,7	7,2	9,5	11,7	13,8
einschl. Klammbach r.	21,3	6,4	8,2	10,7	13,2	15,5
Pegel Lueg Sill	22,2	6,7	8,5	11,1	13,8	16,2
bis Obernberger Seebach	23,4	7,1	9,0	11,7	14,5	17,1
einschl. Obernberger Seebach l.	81,7	17,3	20,7	26,0	36,0	42,5
bis Schlierbach	82,9	17,7	21,2	26,6	36,8	43,4
einschl. Schlierbach l.	86,2	18,8	22,5	28,2	39,0	46,0
bis Gschnitzernbach	89,6	19,9	23,8	29,9	41,4	48,8
einschl. Gschnitzernbach l.	91,4	20,6	24,6	30,8	42,6	50,3
bis Schmirnbach	91,9	20,7	24,8	31,1	43,0	50,7
einschl. Schmirnbach r. (Valser Bach)	201,7	46,3	55,3	69,3	96,0	113
bis Wolfmühlbach	202,1	46,4	55,4	69,5	96,2	114
einschl. Wolfmühlbach l.	204,9	47,2	56,4	70,8	98,0	116
bis Felperbach	207,4	48,0	57,3	71,9	100	117

Abbildung 35: Hydrologischer Längsschnitt der Sill [Wildbach und Lawinenverbauung 2010]

Anlage B:

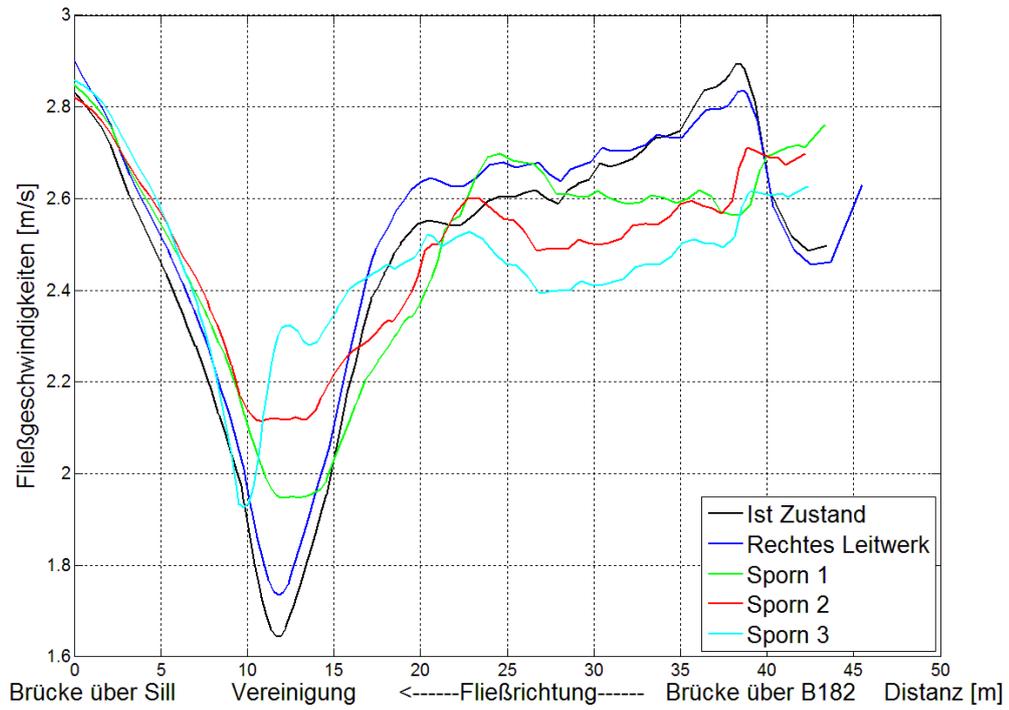


Abbildung 36: Fließgeschwindigkeiten im Valsertal, Lastfall 1

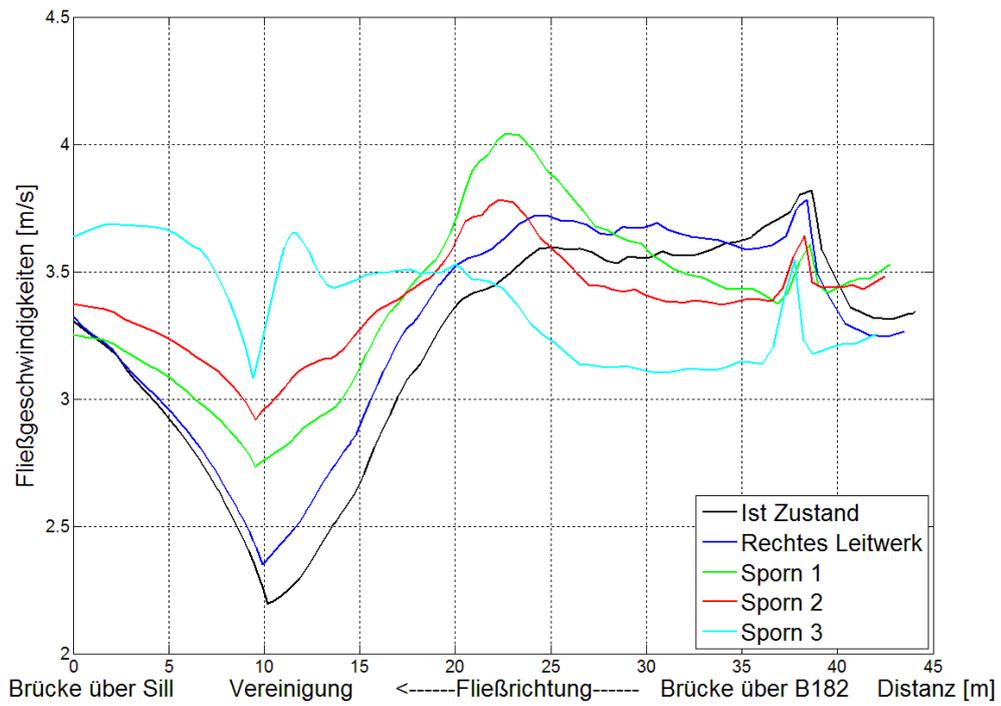


Abbildung 37: Fließgeschwindigkeiten im Valsertal, Lastfall 2

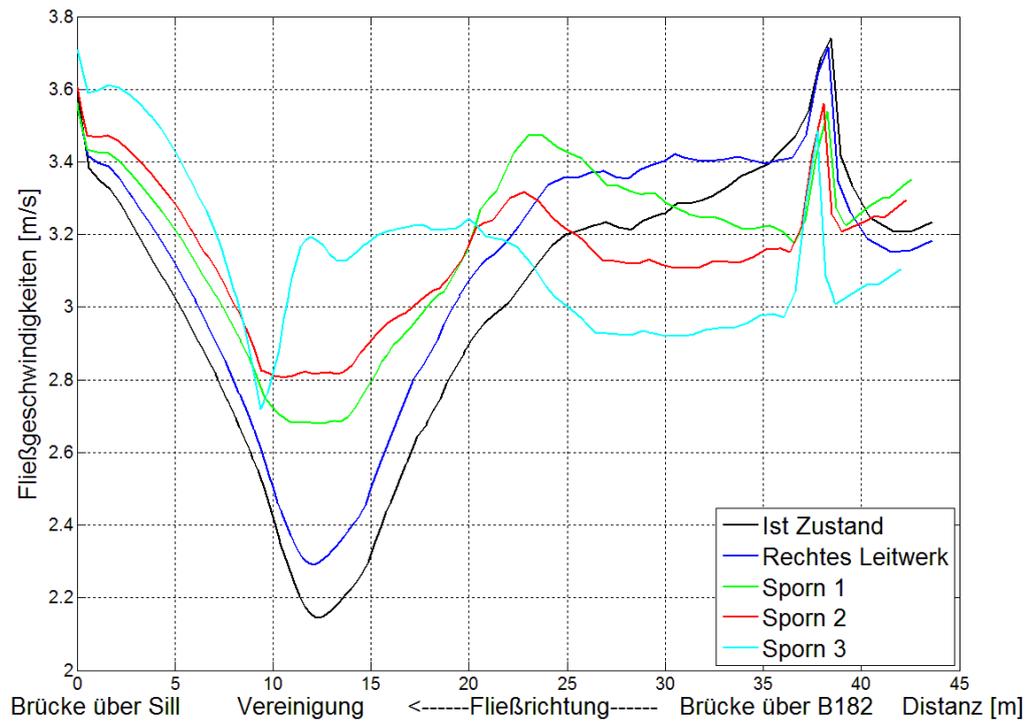


Abbildung 38: Fließgeschwindigkeiten im Valsertal, Lastfall 4

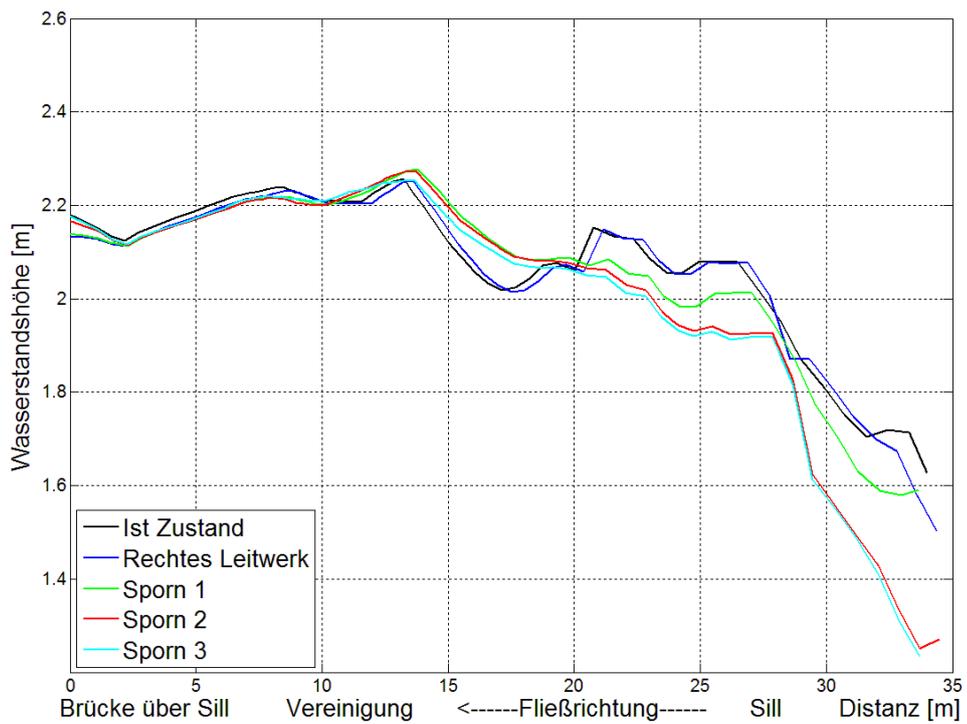


Abbildung 39: Wasserstände in der Sill, Lastfall 1

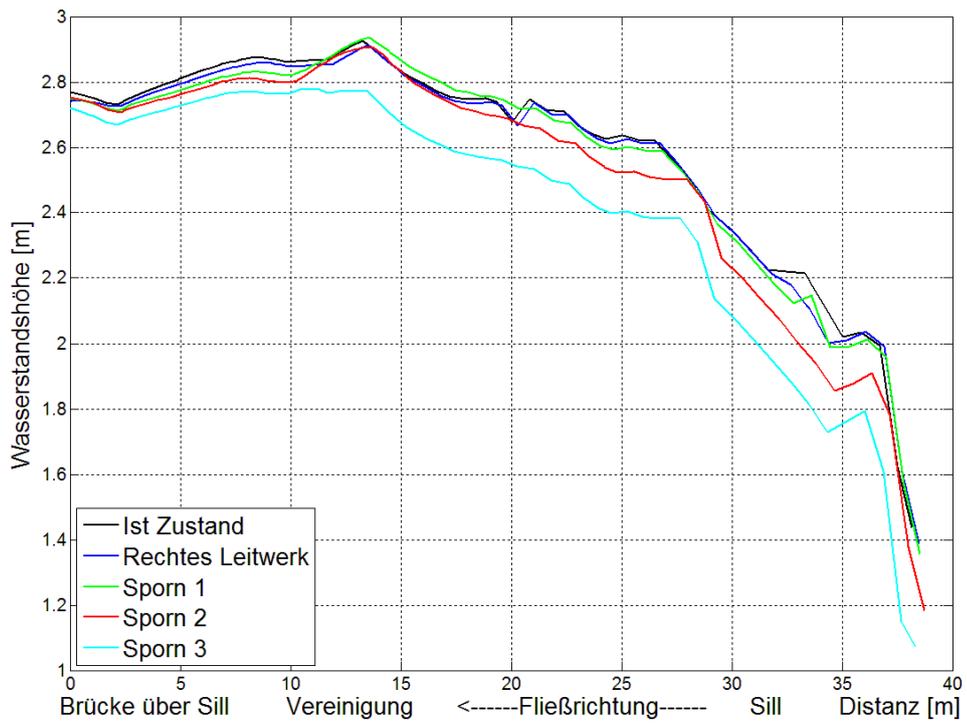


Abbildung 40: Wasserstände in der Sill, Lastfall 2

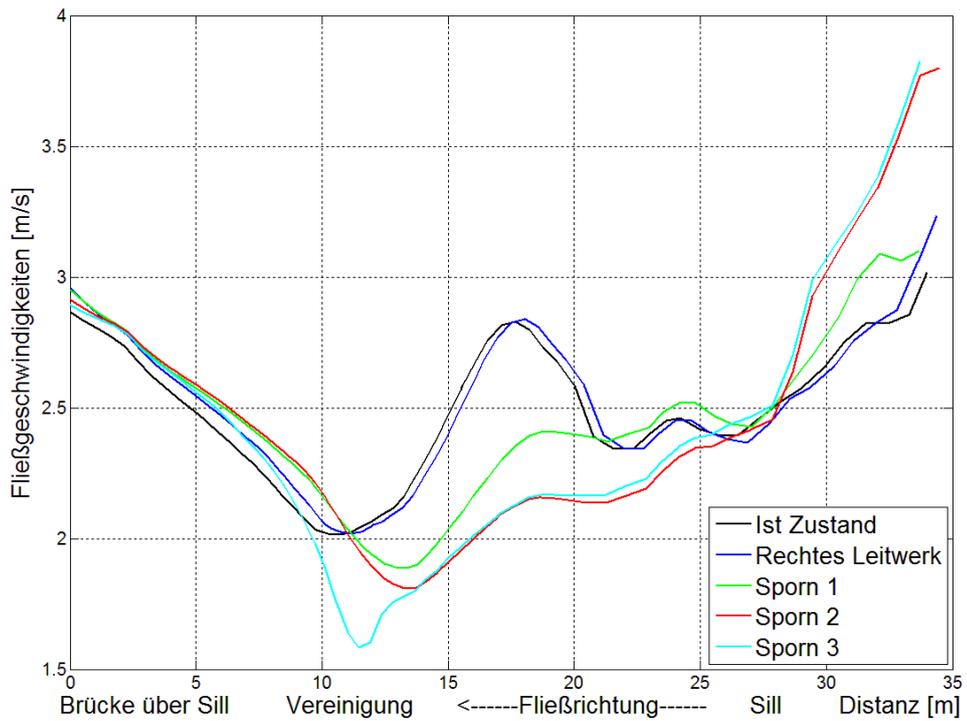


Abbildung 41: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 1

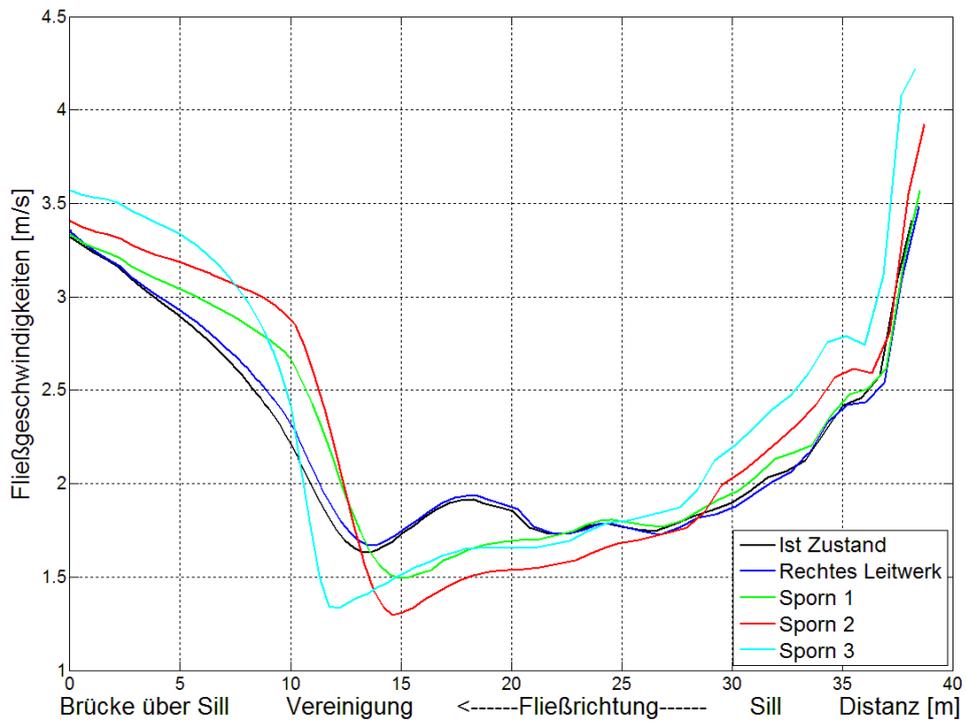


Abbildung 42: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 2

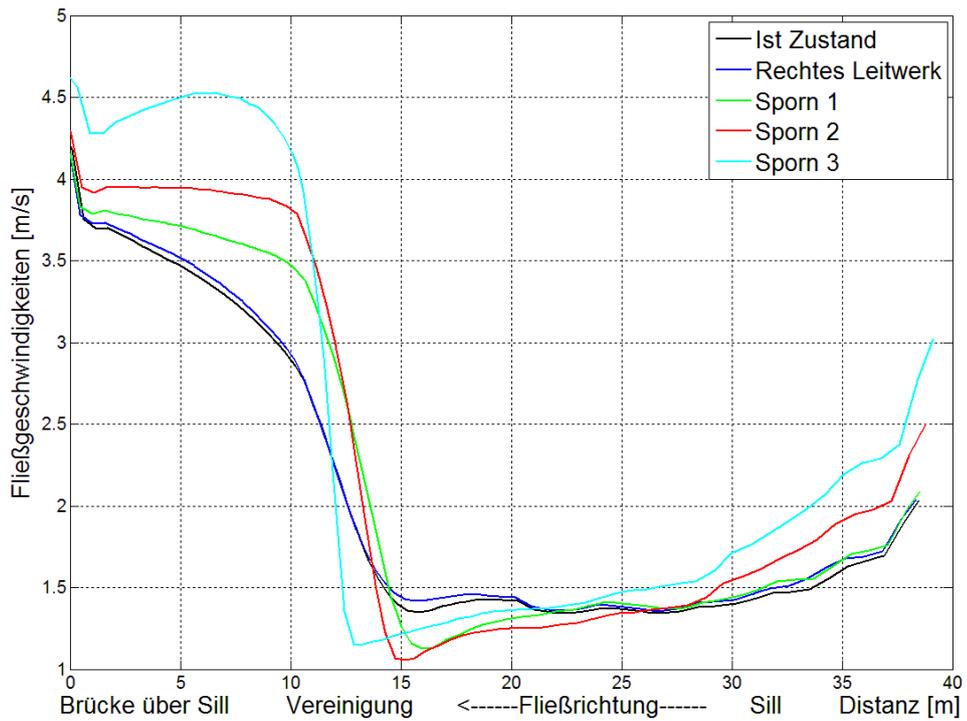


Abbildung 43: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 3

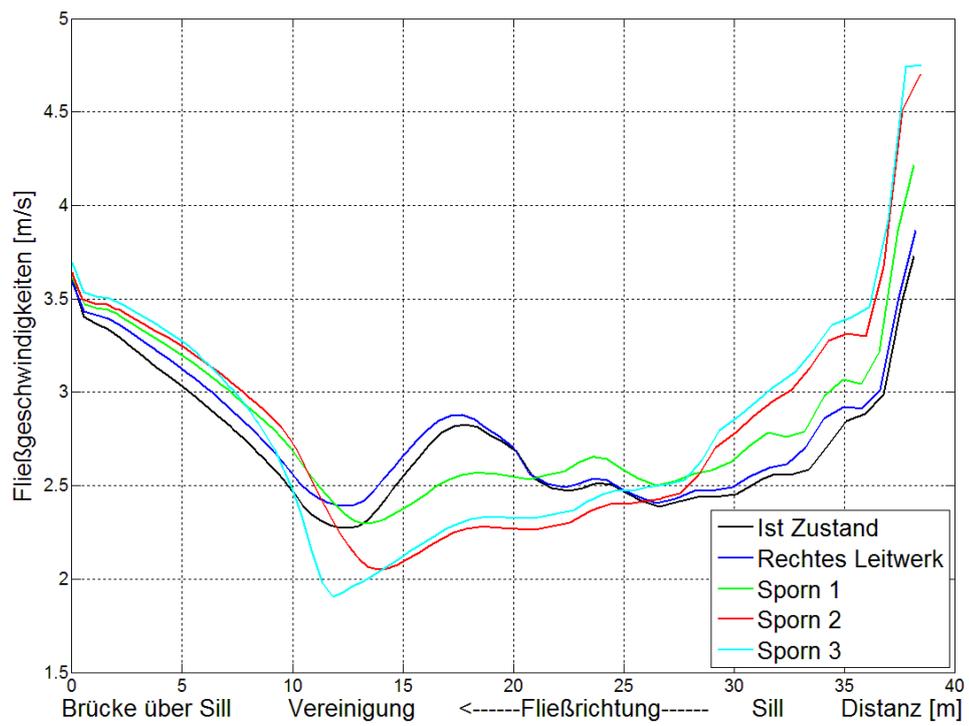


Abbildung 44: Fließgeschwindigkeiten in der Sill, Lastfall 4

Literaturverzeichnis

- Ashmore, P. E. 1982. *Laboratory Modelling of Gravel Braided Stream Morphology*, Earth Surface Processes and Landforms Vol. 7
- Ashmore, P. E. und Parker, G. 1983. *Confluence scour in coarse braided streams*, Water Resources Research 19: 392-402
- Ashmore, P.E., Ferguson, R.I., Prestegard, K.L., Ashworth P.J. und Paola, C. 1992. *Secondary flow in anabranch confluence of a braided, gravel bed stream*, Earth Surface Processes and Landforms 17: 299-311
- Best, J. L. 1987. *Flow Dynamic at River Channel Confluence: Implication for Sediment Transport and Bed Morphology*, Recent Develops in Fluvial Sedimentology, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication No. 39
- Best, James und Reid, I. 1984. *Separation zone at open-channel junctions*, Journal of Hydraulic Engineering 110: 1588-1594
- Biron, P. M. und Lane, S. N. 2008. *Modelling hydraulic and sediment transport at river confluences*, *River Confluences, Tributaries and Fluvial Network*, Wiley Verlag
- De Serres, B., Roy A.G., Biron, P.M. und Best, J.L. 1999. *Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channels with discordant beds*, *Geomorphology* 26: 313-335
- Deuffhard, P. und Bornemann, F. 2008. *Numerische Mathematik I, dritte Auflage*, Verlag: Walter de Gruyter
- Ettinger, S. Juni 2014. *Lageplan Valserbach mit vorläufiger Optimierungsplanung*, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol
- Idelchik, I.E. und Fried, E. 1989. *Flow Resistance: A design guide for engineers*, Hemisphere Publishing Corporation
- Kulisch, H. und Aberle, J. 2009. *Hydraulik und numerische Simulation*, DWA Themen: Naturnahe Sohlgleiten
- Kulisch, H. 2014. *Hydrodynamische-numerische Untersuchung am Zusammenfluss von Valserbach und Schmirnbach in St. Jodok am Brenner, Österreich*, Abschlussbericht, Auftraggeber: Wildbach und Lawinenverbauung, Gebirgsbauleitung Mittleres Inntal
- Malcherek, A. 2012. *Numerische Methoden der Strömungsmechanik Version 6.3*, Vorlesungsskript

- Mosley, P. M. 1976. *An Experimental Study of Channel Confluences*, Journal of Geology Vol. 84, No.5, University of Chicago Press
- Nujic, M. 1998. *Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen*, Institut für Wasserwesen Heft 62/1998, Universität der Bundeswehr München
- Roy A. G. und Bergeron, N. 1988. *Flow and principle paths at a nature river confluence coarse bed material*, Geomorphology Vol. 3 1990, Elsevier Science Publisher B.V. Amsterdam
- Schröder R. C. M. 1990. *Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten*, DVWK Schriften 92, Verlag Paul Parey
- Stoer, J. und Bulirsch, R. 1973. *Einführung in die Numerische Mathematik II*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Schwanenberg, D. 2003. *Die Runge-Kutta-Diskontinuous-Galerkin-Methode zur Lösung konvektionsdominierter tiefengemittelter Flachwasserprobleme*, Rheinische-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- Vreugdenhil C.B. 1998. *Numerical Methods for Shallow-Water-Flow*, Kluwer Academic Publisher
- Wildbach und Lawinenverbauung, Lebensministerium, Österreich, 2010. *Geschriebener Hydrologischer Längsschnitt der Sill Stand.9.4.2010*
- Zanke, U. C.E. 2002. *Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer*, Parey Buchverlag Berlin

Internetverweise

- [1] - Autor unbekannt-
<http://www.bmlfuw.gv.at/forst/schutz-naturgefahren/naturgefahren/wildbaeche/Wildbaeche.html>
Stand 03.11.2011; Abgerufen am 30.06.14
- [2] -Autor unbekannt-
http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/wasser/hochwasser_wasser/
Stand: keine Angabe; Abgerufen am 30.06.14
- [3] Nujic, Marinko
<http://www2.hydrotec.de/unternehmen/hydrothemen/hydrothemen07/hydro-as-2d/>
Stand: keine Angabe; Abgerufen am 30.06.14

[4] Kinzelbach W., Hydraulik II, Hydraulikskript

http://www.ifu.ethz.ch/GWH/education/graduate/Hydraulik_II/Vorlesungen/index

Stand: 30.11.12 ; Abgerufen am 30.06.14

[5] Fendt, Walter

<http://wikis.zum.de/zum/Datei:Runge-Kutta.pdf>

Stand: 14.06.11; Abgerufen am 30.06.14

Eidesstattliche Erklärung

zu folgender Arbeit:

Name des Verfassers/der Verfasserin: Daniel Holzer

Titel/Untertitel: Numerische Simulation einer Fließgewässervereinigung am konkreten Fall der Vereinigung Sill-Valserbach in Stafflach bei Matrei am Brenner

Abgabedatum: 04.07.14

Angefertigt im Rahmen der Veranstaltung (Titel + Trim.): Masterarbeit, Institut für Wasserwesen

Dozent/in: Prof. Dr. -Ing. habil. Dipl. -Phys. Andreas Malcherek

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich

- die vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe,
- dazu keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe,
- die Verwendung der angegebenen Quellen in meiner Arbeit nach den geltenden Standards für wissenschaftliches Arbeiten vollständig und eindeutig (nicht nur pauschal) dokumentiert habe, sodass nachvollziehbar ist, für welche meiner Ausführungen ich mich auf welche Passagen aus den angegebenen Quellen beziehe.
- die vorliegende Arbeit oder wesentliche Teile daraus zwecks Scheinerwerb/ als Prüfungsleistung nur hier und sonst nirgends eingereicht habe.

Ich versichere an Eides Statt, dass ich die vorgenannten Angaben nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe und dass die Angaben der Wahrheit entsprechen und ich nichts verschwiegen habe.

Mir ist bekannt, dass auch bei nachträglicher Aufdeckung eines Verstoßes dagegen die zu unrecht erworbene Leistung wieder aberkannt wird und ich sämtliche weitergehenden Konsequenzen eines Täuschungs-/Betrugsversuches zu tragen habe.

Die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung ist mir bekannt, namentlich die Strafandrohung gemäß § 156 StGB bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 163 Abs. 1 StGB bis zu einem Jahr Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei fahrlässiger Begehung.

Neubiberg, den