



**Universität für Bodenkultur  
Institut für Alpine Naturgefahren  
und Forstliches Ingenieurwesen**



Peter Jordan Str. 82

Tel.: #43-1-47654-4350

**WLS REPORT 43-2**

**Hydraulische Modellversuche zur Optimierung des  
Mündungsbereiches des Schwarzbaches  
in die Leoganger Ache**



Im Auftrag:

**Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft**

**Umwelt und Wasserwirtschaft VC 7**

**Projektleitung:** Hübl Johannes  
**Mitarbeiter:** Jugovic Cedomil Josip  
Erlmoser Martin  
Steinwendtner Harald  
Holzinger Gerhard  
Gruber Harald

Wien, Juni 2002

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2	ZIELSETZUNG .....	1
1.3	METHODIK .....	1
<b>2</b>	<b>PROBLEMDARSTELLUNG.....</b>	<b>3</b>
2.1	MÜNDUNGSCHARAKTERISTIKA.....	3
2.1.1	<i>Geschiebeproblematik und Gestaltungsgrundsätze.....</i>	<i>8</i>
2.2	SITUATION IM PROJEKTBEREICH.....	12
2.2.1	<i>Der Schwarzbach und sein Einzugsgebiet.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Die Leoganger Ache und ihr Einzugsgebiet.....</i>	<i>19</i>
2.2.3	<i>Beschreibung des Mündungsgebietes .....</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Wasserbauliche Maßnahmen im Mündungsgebiet .....</i>	<i>24</i>
<b>3</b>	<b>PHYSIKALISCHES MODELL .....</b>	<b>28</b>
3.1	GEGENÜBERSTELLUNG PHYSIKALISCHES MODELL – NUMERISCHES MODELL.....	28
3.2	ÄHNLICHKEIT.....	29
3.3	MODELL DES MÜNDUNGSBEREICHES SCHWARZBACH/LEOGANGER ACHE.....	33
3.3.1	<i>Maßstabswahl.....</i>	<i>34</i>
3.3.2	<i>Auswahl des modellierten Korngrößenbereiches.....</i>	<i>35</i>
<b>4</b>	<b>MODELLVERSUCH: DATEN UND ERGEBNISSE.....</b>	<b>40</b>
4.1	IST-ZUSTAND .....	40
4.1.1	<i>Fließcharakteristik.....</i>	<i>40</i>
4.1.2	<i>Geschiebetransportverhältnisse .....</i>	<i>55</i>
4.1.3	<i>Sedimenttransport in steilen Gerinnen am Beispiel Schwarzbach.....</i>	<i>67</i>
4.2	VARIANTE 1 - TRENnwAND .....	69
4.2.1	<i>Fließcharakteristik.....</i>	<i>70</i>
4.2.2	<i>Geschiebetransportverhältnisse .....</i>	<i>76</i>
4.2.3	<i>Sedimenttransportberechnungen .....</i>	<i>80</i>
4.2.4	<i>Untersuchungen des Geschiebetransportes bei eingebauten Buhnen.....</i>	<i>81</i>
4.3	VARIANTE 2 – ABGESENKTE TRENnwAND.....	83
4.3.1	<i>Fließcharakteristik.....</i>	<i>84</i>
4.3.1	<i>Geschiebetransportverhältnisse .....</i>	<i>85</i>
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN .....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG – ABBILDUNGEN UND PLANSKIZZEN .....</b>	<b>94</b>

---



---

Abb. 1: Fließzonen in einem Mündungsbereich (BRISTOW, et al. 1993).....	4
Abb. 2: Sedimentationsformen in einem symmetrischen Mündungsgebiet (BRISTOW, et al., 1993)....	6
Abb. 3: Stationäre Bänke und Kolke in Zusammenflüssen (JÄGGI, 1995).....	8
Abb. 4: Einstau von $Q_2$ während des Durchgangs $Q_{1max}$ (JÄGGI, 1995).....	9
Abb. 5: Ausschnitt aus dem Leoganger Achental (Quelle: BEV).....	12
Abb. 6: Neigungen im Einzugsgebiet des Schwarzbaches.....	13
Abb. 9: Abflussganglinien (VOLK, 1999).....	17
Abb. 8: Überschreitungsdauerlinie der Leoganger Ache beim Pegel Uttenhofen .....	19
Abb. 9: Mündungsbereich Schwarzbach-Leoganger Ache (mit alter Bundesstraßenbrücke) .....	21
Abb. 10: Blick von der Schotterbank Richtung flussauf .....	22
Abb. 11: Morphologie des Mündungsgebietes.....	23
Abb. 12: Blick von der B164 nach flussab.....	24
Abb. 13: Blick vom 1. Absturzbauwerk nach flussab .....	24
Abb. 14: Absturzbauwerk 1; Blick flussauf.....	25
Abb. 15: Einlauf - Streichwehr.....	25
Abb. 16: Blick von der Mündung nach flussab.....	25
Abb. 17: Blick vom Mündungssporn des Schwarzbaches nach flussauf.....	26
Abb. 18: Grundriss des Modells des Mündungsbereichs Schwarzbach-Leoganger Ache .....	34
Abb. 19: Längsschnitt des Modells Mündungsbereich Schwarzbach-Leoganger Ache .....	35
Abb. 20: Summenkurven der Geschiebeprobe und Korngrößenbereich des Modells <sub>N</sub> .....	38
Abb. 21: Lageplan des Mündungsbereiches mit eingezeichneten Fließabschnitten .....	43
Abb. 22: Pegelschlüsselkurve und Schlüsselkurve der Grenzwassertiefe $h_{gr}$ am Pegel STPS .....	44
Abb. 23: Pegelschlüsselkurve und Schlüsselkurve der kritischen Wassertiefe am Pegel STPS .....	46
Abb. 24: Färbeversuch V.0.R.1.1; Blick flussauf.....	47
Abb. 25: Lageplan mit der sohnahen Fließgeschwindigkeitsverteilung in einzelnen Profilen.....	48
Abb. 26: Pegelschlüsselkurve beim Pegel STPS.....	49
Abb. 2: Reinwasserversuch V.0.R.1.3.....	49
Abb. 28: Oberer modellierter Abschnitt der Leoganger Ache .....	52
Abb. 29: Versuch V.0.R.1.3: Mündung mit Überflutungsbereichen .....	52
Abb. 30: Beziehung zwischen Geschiebetrieb und Rüttlerstufe bei der Geschiebedotation .....	56
Abb. 31: Lage des Ablagerungskörpers beim Versuch V.0.G.1.3 .....	59
Abb. 32: Versuch V.0.G.1.3; Blick vom Mündungsbereich Richtung flussauf.....	59
Abb. 33: Ablagerung beim Profil SB03; Blick nach flussauf.....	60
Abb. 34: Lageplan mit Ablagerungskörper nach Versuch V.0.G.2.3 .....	63
Abb. 35: Anlandung beim Versuch V.0.G.2.3; Blick vom Mündungsbereich nach flussauf.....	63
Abb. 36: Ablagerung beim Versuch V.0.G.3.3; Blick nach flussauf .....	66
Abb. 37: Ablagerungen bei den Versuchen des IST-Zustandes.....	66

---



---

<i>Abb. 38: Vergleich der Geschiebetriebdaten im Profil SB10.....</i>	<i>68</i>
<i>Abb. 39: Blick auf den Mündungsbereich mit Trennwand.....</i>	<i>70</i>
<i>Abb. 40: Strömender Durchfluss beim Pegel STPA.....</i>	<i>71</i>
<i>Abb. 41: Pegelschlüsselkurve in der Leoganger Ache beim Profil LA21 .....</i>	<i>73</i>
<i>Abb. 42: Pegelschlüsselkurve beim Pegel STPS.....</i>	<i>74</i>
<i>Abb. 43: Lageplan mit Ablagerungskörper nach Versuch V.1.G.1.3 .....</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 44: Vergleich der drei Ablagerungskörper .....</i>	<i>78</i>
<i>Abb. 45: Blick vom 1. Absturzbauwerk nach flussauf; V.1.G.1.3.....</i>	<i>80</i>
<i>Abb. 46: Lageplan mit Geschiebeablagerung beim Versuch V.1.G.1.3 mit einer Öffnung.....</i>	<i>80</i>
<i>Abb. 47: Spezifische Geschiebetransportrate im Profil SB13.....</i>	<i>81</i>
<i>Abb. 48: Spezifische Geschiebetransportrate beim Profil SB10.....</i>	<i>81</i>
<i>Abb. 49: V.1.G.1.3 (Blick vom 1.Absturzbauwerk flussauf) .....</i>	<i>82</i>
<i>Abb. 50: V.1.G.1.3 mit eingebauter Buhne .....</i>	<i>82</i>
<i>Abb. 51: Ablagerungskörper bei fünf eingebauten Buhnen und dem Versuch V.1.G.1.3.....</i>	<i>82</i>
<i>Abb. 52: Variante 2 – Absenkte Leitwand .....</i>	<i>83</i>
<i>Abb. 53: Pegelschlüsselkurve Profil LA19; linksufrig; .....</i>	<i>84</i>
<i>Abb. 54: Ablagerung beim Versuch V.2.G.1, Blick vom Absturz nach flussauf.....</i>	<i>86</i>
<i>Abb. 55: Ablagerung beim Versuch V.2.G.2 .....</i>	<i>88</i>
<i>Abb. 56: Ablagerungen bei den Versuchen mit abgesenkter Trennwand.....</i>	<i>88</i>

---

---

<i>Tab. 1: Übersicht der Jahreswerte der Leoganger Ache am Pegel Uttenhofen .....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2: Repräsentative Korngrößen (STELCZER, 1981).....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 3: Übersicht der Versuche zur Ermittlung der Fließcharakteristik.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4: Pegelwasserstände der Reinwasserversuche .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 5: Freibord bei den Reinwasserversuchen .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6: An die Transportkapazität angepasster Geschiebetrieb.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7: HWW 1 des Schwarzbaches (Naturwerte) .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8: Simulierte Geschiebeganglinie bei der HWW 1 .....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 9: Ablagerungshöhen beim Versuch V.0.G. 1.3.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 10: Abflussganglinie des Schwarzbaches bei HWW 2 .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 11: Simulierte Geschiebeganglinie bei der Hochwasserwelle 2 .....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 12: Übersicht der Ablagerungsmächtigkeit im Schwarzbach.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 13: HWW 3 des Schwarzbaches.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 14: Simulierte Geschiebeganglinie bei der HWW 3.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 15: Übersicht der Ablagerungsmächtigkeit im Schwarzbach.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 16: Ablagerungskoten und Ablagerungsmächtigkeiten.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 17: Vergleich mit den Ergebnissen des Ist-Zustandes.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 18: Ablagerungen beim Versuch V.2.G.1 .....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 19: Ablagerung beim Versuch V.2.G.2 .....</i>	<i>87</i>

---



---

Symbol	Dimension	Bedeutung
A	[m <sup>2</sup> ]	Durchflussfläche im Hauptkanal
A <sub>r</sub>	$\tilde{\square}$	Maßstabszahl der Fläche
$\square$	[m]	Gerinnebreite
b <sub>m</sub>	[m]	mittlere Sohlbreite
d	[m]	Korndurchmesser (häufig ident mit d <sub>m</sub> )
d <sub>i</sub>	[m]	beliebiger Korndurchmesser eines Korngemisches; Korndurchmesser einer beliebigen Kornfraktion, welche begrenzt ist durch deren kleinsten Durchmesser d <sub>1</sub> und deren größten d <sub>2</sub>
d <sub>m</sub>	[m]	mittlerer/maßgebender Korndurchmesser eines
d <sub>max</sub>	[m]	maximaler Korndurchmesser
d <sub>n</sub>	[m]	jener Korndurchmesser, für den gilt, dass n Prozent der
d <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl des Korndurchmessers
F <sub>m</sub>	[N]	Kraft im Modell
F <sub>n</sub>	[N]	Kraft in der Natur
F <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Kräfte
Fr	[-]	Froude-Zahl
Fr*	[-]	Froudesche Zahl des Kornes, dimensionslose Schubspannung,
Fr* <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Froudeschen Zahlen des Kornes
Fr <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Froude-Zahlen
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Fallbeschleunigung
g <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Fallbeschleunigungen
h	[m]	Abflusstiefe
h <sub>gr</sub>	[m]	Grenztiefe zwischen Strömen und Schießen
h <sub>m</sub>	[m]	mittlere Abflusstiefe, Abflusstiefe im Modell
h <sub>n</sub>	[m]	Abflusstiefe in der Natur
h <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Abflusstiefen
I	[-]	Gefälle
I <sub>r</sub>	[-]	Maßstabszahl der Gefälle

---



---

$l_s$	[-]	Sohlgefälle
$L_m$	[m]	Längen im Modell
$L_n$	[m]	Längen in der Natur
$L_r$	[-]	Maßstabszahl der Längen
$q$	[m <sup>3</sup> /(s*m)]	spezifischer Abfluss je Zeit- und Längeneinheit
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss
$q_B$	[m <sup>3</sup> /(s*m)]	spezifische Geschiebeführung
$Q_{Gr}$	[-]	Maßstabszahl des Geschiebetriebes
$Q_r$	[-]	Maßstabszahl der Durchflüsse
$Re$	[-]	Reynolds-Zahl
$Re^*$	[-]	Reynolds-Zahl des Kornes
$Re_r^*$	[-]	Maßstabszahl der Reynolds-Zahl des Kornes
$t_m$	[s]	Zeit im Modell
$t_n$	[s]	Zeit in der Natur
$u^*$	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
$u_c^*$	[m/s]	kritische Schubspannungsgeschwindigkeit
$u_r^*$	[-]	Maßstabszahl der Schubspannungsgeschwindigkeit
$v$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
$v_c$	[m/s]	kritische Fließgeschwindigkeit
$v_{gr}$	[m/s]	Grenzfließgeschwindigkeit
$v_m$	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit
$v_r$	[-]	Maßstabszahl der Fließgeschwindigkeit
$\square$	[-]	relative Dichte
$\square p_i$	[-]	prozentualer Anteil einer Kornfraktion am Gesamtgemisch
$\Delta_r$	[-]	Maßstabszahl der relativen Dichte
$\square$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität des Wassers
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Sohlmaterials (Feststoffdichte)
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$\tau_c$	[Pa]	kritische Schubspannung beim Transportbeginn

---

---

## **1 Einleitung**

### **1.1 Problemstellung**

Für die Planung auszuführender geschiebebewirtschaftender Massnahmen stellt der Mündungsbereich des Schwarzbaches in die Leoganger Ache ein Schlüsselstelle dar. Die Aufweitung des Schwarzbaches unterhalb der neu errichteten Bundesstraßenbrücke und die Sohllagenerhöhung der Leoganger Ache durch ein WLV Verbauungsprojekt von 1935 ermöglichen ein Geschiebeablagerung, die beim Bemessungsereignis zur bachaufwärts schreitenden Verlandung des Schwarzbachgerinnes mit dementsprechender Ausuferung führen wird. Durch das WLV Verbauungsprojekt 1997 ist zwar mit einer Geschiebeverringerng aus dem Schwarzbach zu rechnen, ein völliges Unterbinden der Geschiebenachlieferung in das Schwemmkegelgerinne kann jedoch nicht erreicht werden.

### **1.2 Zielsetzung**

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Simulation der bestehenden Geschiebetransportverhältnisse im Mündungsbereich „Leoganger Ache – Schwarzbach“. Nach Analyse der morphologischen Änderungen im Mündungsbereich während der charakteristischen Hochwasserereignisse und deren Auswirkungen auf die hydraulischen Verhältnisse (Ausuferungen, Rückstau, usw.) sind durch mehrere Umbauvarianten die Verbesserungen in Hinsicht auf die Geschiebefreihaltung und freie Durchflussbedingungen zu überprüfen.

### **1.3 Methodik**

Zur Geschiebesimulation wird ein hydraulisches Modell mit fester Sohle verwendet, das vom Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau erstellt wurde. Als Modellgeschiebe wird Quarzsand verwendet, womit der mittlere Bereich der charakteristischen Geschiebegränulometrielinie dargestellt ist.

Um die hydraulische Kapazität des Mündungsbereiches festzustellen und die Referenzparameter für den Vergleich mit anderen Versuchsvarianten zu ermitteln, werden zu Beginn des Untersuchungsprogrammes Reinwasserversuche durchgeführt. Danach werden Kombinationen verschiedener Hochwasserszenarien beider Bäche und entsprechender Geschiebekonzentrationen nachgebildet. Dadurch werden die Geschiebetransportverhältnisse im Schwarzbach bei kurzfristige starker Beeinflussung durch die Leoganger Ache ermittelt.

Für den Schwarzbach wurden die Abflussganglinien nach VOLK 1999, die Geschiebezugabe nach HÜBL und LEBER 2000 übernommen. Der Abfluss für die Leoganger Ache wurde durch eine extremwertstatistische Auswertung des Pegels Uttenhofen ermittelt. Die als Grundlage zur Modellerstellung dienende Vermessung wurde am Institut für alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen durchgeführt.

## 2 Problemdarstellung

### 2.1 Mündungscharakteristika

#### Allgemeines

Die hydraulische Charakteristik von Mündungsbereichen ist komplex. Im Schrifttum steht: [...] "*the channel junction problem is complex and that a complete analysis of the problem is not possible with current information*" (RICE, 1993). Um diese Informationen zu erlangen, ist das physikalische Modell immer noch ein sehr geeignetes Mittel. In diesem Kapitel werden die Arbeiten von Autoren, die sich speziell mit Mündungscharakteristika beschäftigt haben, zusammengefasst, und daraufhin mit den Ergebnissen der hier vorliegenden Modelluntersuchung verglichen. Viele der zitierten Autoren verwendeten bei ihren grundlegenden Forschungsarbeiten ein physikalisches Modell.

#### **Abflusssituation in Flussmündungen**

Im Folgenden wird auf das komplexe Fließverhalten in Mündungsbereichen eingegangen. Versuche mit superkritischem Abfluss in rechteckigen offenen Gerinnemündungen erklären die gegenseitige Beeinflussung zweier Gerinne in ihrer Mündung (RICE, 1993).

Die Versuchsbedingungen erfolgten bei einem Einströmwinkel eines Zubringers in den Hauptkanal von 30°. Es wurde die Bildung und die Bewegung eines Wechselsprunges, verursacht durch die sich vereinenden Abflüsse dokumentiert. In Versuchsdurchführung 1 beschränkte sich der Abfluss auf den Hauptkanal und es entstanden stehende Wellen durch die Erweiterung des Querschnittsprofils nach der Mündung des Seitenkanals. Bei steigendem Abfluss im Seitengerinne bildete sich ein Wechselsprung, der immer höher wurde und im Hauptkanal flussaufwärts wanderte. Der Abfluss im Hauptkanal als auch der Abfluss im Seitenkanal waren zusammen mit dem Breitenverlauf im Hauptkanal und dem Mündungswinkel die wichtigsten Parameter, die zum Fließverhalten in einem Mündungsabschnitt beitragen. Im Falle von Mündungsbereichen mit superkritischen Gefälle sind flussauf der Mündung Wechselsprünge sowohl im Hauptkanal als auch im Seitengerinne zu beobachten. Nur in wenigen Fällen bilden sich Wechselsprünge auch im direkten Mündungsbereich. Nämlich vor allem dann, wenn nur im Seitengerinne ein Abfluss vorhanden ist.

Die generalisierte Darstellung der Abflusssituation in offenen Gerinnemündungen unterscheidet sechs verschiedene Zonen, nämlich Regionen der Fließstagnation, Fließablenkung, Abflusstrennung, Zone mit maximaler Geschwindigkeit, Zone der Wiederherstellung des Abflusses flussab der Mündung und Scherschichten. Ort und Ausbildung dieser Zonen, insbesondere der Abflusstrennungszone, der Scherschichten zwischen den zwei Abflüssen und der Fließablenkzone variieren mit verändertem Mündungswinkel und verändertem Abflussverhältnis der beiden Zubringer. Die Abflussnatur in Mündungsbereichen bestimmt die Bettmorphologie. Dabei bildet sich in der Separationszone häufig eine Ablagerung und ein tiefer Kolk formiert sich unter der Maximalgeschwindigkeitszone und der Mischschicht. Von den zwei gegengleich rotierende schneckenförmigen Strömungszellen wird angenommen, dass sie für die Bildung und Erhaltung des Mündungskolkes eine entscheidene Rolle spielen (BRISTOW, et al. 1993).

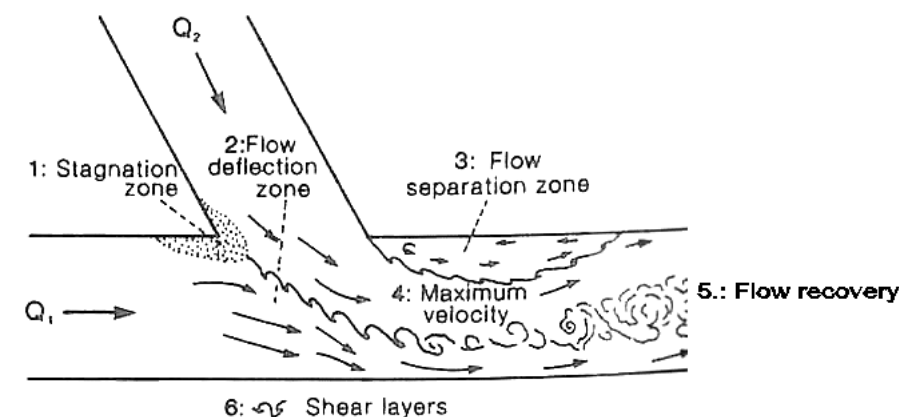


Abb. 1: Fließzonen in einem Mündungsbereich (BRISTOW, et al. 1993)

Die Einmündung eines seitlichen Zubringers in den Hauptstrom bewirkt eine Abtrennung der Strömung unmittelbar flussab der Mündung. In Mündungsbereichen bildet die Fließtrennung in der Regel eine Zone mit geringer Fließgeschwindigkeit, die sogenannte Separationszone. Sie verengt den Durchflussquerschnitt im vereinigten Gerinne und bildet so zusätzlich eine beschleunigte Fließzone. Es besteht eine Beziehung zwischen Größe der Separationszone und Durchfluss des Zubringers. Breite und Länge der Zone mit geringer Fließgeschwindigkeit hängen vom Einmündungswinkel ab. Je nach Problemstellung ist es wichtig die Separationszone nach Lage und Größe zu beeinflussen. Anhand eines physikalischen Modells wurden Experimente durchgeführt, bei welchen eine Mündungssituation durch einen Hauptkanal und einem in seinem Mündungswinkel veränderbaren Seitenkanal nachgebildet wurde. Bei allen Versuchen herrschten strömende Abflüsse (BEST und REID, 1984).

Hinsichtlich der Länge als auch der Breite der Separationszone ist der Einmündungswinkel von entscheidendem Einfluss. Je größer dieser ausgebildet ist, desto stärker ist auch die Separationszone ausgeprägt. Klarersichtlich ist, dass bei steigendem Durchfluss des Zubringers die Größe der untersuchten Zone zunimmt. Die Form der Separationszone bleibt im wesentlichen konstant. In den 45°, 70° und 90° Mündungen reiht sich das Verhältnis der Breiten zu den Längen um einen konstanten Wert ein, mehr oder weniger unabhängig von der Erhöhung des Durchflussverhältnisses der beiden Kanäle. Bei einem Mündungswinkel von 15° nimmt der Faktor Breite zu Länge mit steigendem Durchflussverhältnis zu. Das bedeutet die Separationszone wird bei steigendem Durchfluss im Zubringer breiter. „*The size of the separation zone at stream confluences is significant because it delimits the width of the combined flow of tributary and mainstream and this has a direct bearing on expected freestream flow velocities and bed shear. Besides this, the separation zone itself is an area of reduced pressure and recirculating flow, and sediment tends to accumulate with consequences for hydraulic geometry, channel roughness, and so on*“ (BEST und REID, 1984).

Die Fließbeschleunigung in Mündungsbereichen wird einerseits durch den erhöhten Durchfluss und andererseits durch den verkleinerten Durchflussquerschnitt aufgrund der Separationszone verursacht.

#### Untersuchungen mit Sohlungleichheiten im Mündungsbereich

Im Mündungsbereich Schwarzbach/Leoganger Ache ist ein Sohlhöhenunterschied zwischen den beiden Wildbächen festzustellen. Aber nur wenige Untersuchungen wendeten sich der Erfassung des Abflussverhaltens in Mündungen bei Sohlungleichheiten zu. Um diese Wissenslücke zu verkleinern, wurden anhand von physikalischen Modellen Versuche durchgeführt (BIRON, et al., 1996). Sohlhöhenungleichheiten in den Zubringern des Mündungsbereiches treten in der Natur häufig auf. Vier der sechs charakteristischen Fließzonen in Mündungsbereichen werden durch eine Stufe an der direkten Einmündung eines Zubringers gegenüber einem sohlkonkordanten Mündungsbereich bedeutend verändert. Konkordanz bedeutet Sohlhöhengleichheit. Dies wirkt sich auf den Sedimenttransport und die Morphologie aus. In diskordanten Mündungsbereichen treten keine ausgeprägten Mündungskolke auf. Dies lässt sich teilweise auf eine fehlende Fließbeschleunigung durch die Abwesenheit einer Separationszone zurückführen. Die Zone der Fließablenkung ist in Mündungen mit Gerinnen gleicher Sohlage deutlich ausgeprägt. Die Stromlinien des Hauptstroms werden vom Seitenstrom abgelenkt. Bei Sohlungleichheiten ist die Stromlinienablenkung im

Hauptstrom nur sehr lokal ausgeprägt. Daraus folgt eine kleinere Zone mit beschleunigtem Fließverhalten im vereinigten Gerinne.

## Morphologie von Flussmündungen

Der Mündungsbereich von zwei Flüssen stellt einen Punkt signifikanten Wechsels im Flussnetzwerk dar. Flussmündungen sind einerseits von Flächen der Erosion und andererseits von Bereichen der Anlandung geprägt. Die Gestalt dieser Elemente ist hauptsächlich vom Einmündungswinkel und vom Verhältnis der Durchflüsse der beiden Flüsse abhängig. Vier charakteristische Sedimentationsformen können im Mündungsbereich festgestellt werden (BRISTOW, et al., 1993):

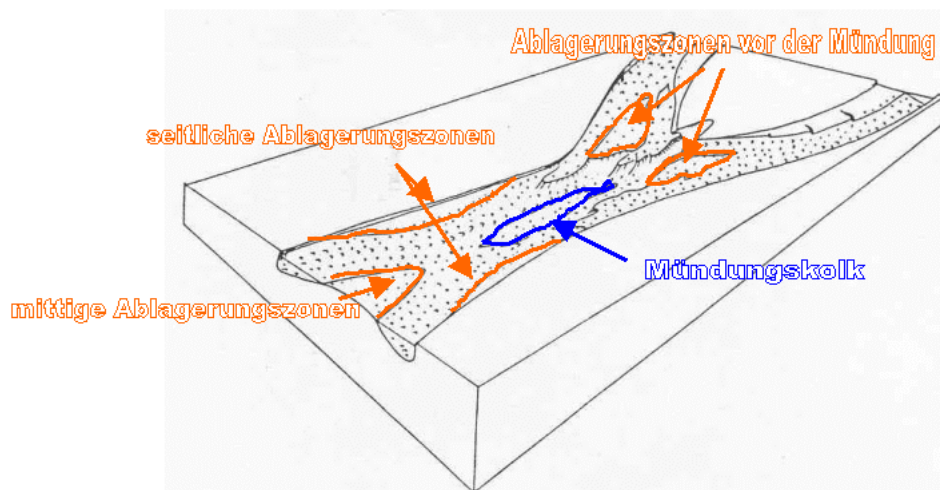


Abb. 2: Sedimentationsformen in einem symmetrischen Mündungsgebiet (BRISTOW, et al., 1993)

### Ablagerungszonen unmittelbar vor der Mündung

Bei geringen Mündungswinkeln und einem kleinen Durchflussverhältnis zwischen Nebenfluss und Hauptfluss reicht die Ablagerungszone des Hauptflusses weiter in den Mündungsbereich hinein, da der Nebenfluss eine geringe Transportkapazität aufweist. Bei steigendem Mündungswinkel und steigendem Durchflussverhältnis wird hingegen die Ablenkung der Strömung des Hauptflusses größer und die Ablagerungszone im Hauptfluss geht in Richtung flussauf zurück. Die innere Struktur dieser Ablagerungszone weist eine Kreuzschichtung auf. Die Größe steht in engem Verhältnis zur Erosionszone der Mündung. Der Sedimenttransport konzentriert sich auf zwei Zonen an den Seiten des Kolkes im Mündungsbereich und entlang der Seiten der Ablagerungszonen.

## Kolk im Mündungsbereich

Der Kolk wird durch das Zusammenwirken von drei Faktoren gebildet und erhalten.

Die Flussbettersosion unter der turbulenten Scherschicht, die sich zwischen den Mündungsströmungen bildet.

Die Erzeugung einer Strömungstrennung und von Strömungszellen im Lee von der Anlandungsbank vor der Mündung

Erhaltung des Kolkes durch die Aufteilung der Sedimente rund um das Mündungszentrum

Mündungskolke, die die tiefsten Erosionszonen im Flussbett darstellen, sind gekennzeichnet durch relativ wenig Sedimenttransport. Die Tiefe des Kolkes ist abhängig vom Mündungswinkel und dem Gesamtdurchfluss. Im Allgemeinen wird der Kolk größer mit steigendem Mündungswinkel. Bei Winkel kleiner als  $15^\circ$  bildet sich kein ausgeprägter Kolk. Eine mögliche Auffüllung des Mündungskolkes resultiert aus der Wanderung der Ablagerungszonen der Flüsse in den Kolk

## Ablagerungen in der Mündungstrennzone

Die Strömungstrennzone flussab der Mündung weist geringere Fließgeschwindigkeiten und Drücke als die umgebende Strömung auf. Das Sediment akkumuliert in diesem Bereich und bildet Bänke. Die Feststoffe dieser Ablagerungszone sind aufgrund der niedrigen Fließgeschwindigkeiten relativ feinkörnig

## Mittige Flussbettablagerungen nach der Mündung

Die Ablagerung bildet sich häufig flussab vom Mündungskolk und ist durch die Gerinneaufweitung sowie einer Fließgeschwindigkeitsreduktion flussab begründet. Die Entwicklung der mittigen Flussbettablagerung wird unterstützt durch die Anhäufung von Sedimentmaterial, welches vom Kolk erodiert wird. In asymmetrischen Mündungen gibt es oft keine flussmittigen Ablagerungszonen flussab der Mündung.

## **Morphologische Elemente**

Der Zusammenflussbereich kann als die Kombination einer Flusskrümmung und einer Geraden (bei seitlichem Zufluss) oder von zwei Flusskrümmungen betrachtet werden. Ihnen entsprechend bilden sich Kolke und stationäre Bänke aus. Die

morphologischen Elemente geben Rückschluss auf die hydraulischen Verhältnisse (JÄGGI, 1995).

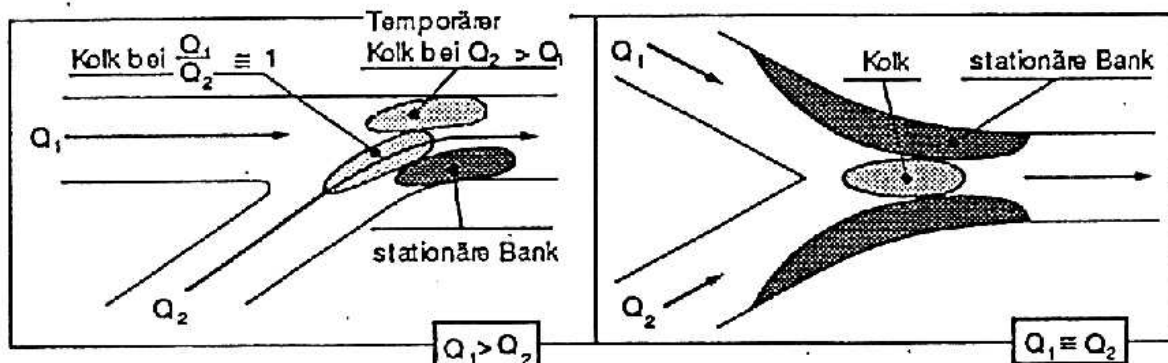


Abb. 3: Stationäre Bänke und Kolke in Zusammenflüssen (JÄGGI, 1995)

In der Beschreibung des modellierten Projektbereiches Kapitel 2.2.3 sind auch die im Mündungsbereich Schwarzbach/Leoganger Ache vorkommenden morphologischen Elemente angeführt.

### 2.1.1 Geschiebeproblematik und Gestaltungsgrundsätze

Bei Untersuchungen von sedimentologischen Prozessen stellt sich stets die Frage ob diese einer langfristigen Tendenz unterliegen oder aufgrund von kurzfristigen Szenarien zurückzuführen sind. Diese Problematik ist v.a. am Beginn von Planungen hinsichtlich Geschiebemanagement und Hochwasserschutz zu beachten, da sie sich für die zu treffenden Maßnahmen entscheidend auswirkt.

#### Langfristige Gesichtspunkte

Ist einer der Zuflüsse stark geschiebeführend, so tritt die Geschiebeproblematik gegenüber der rein hydraulischen Betrachtungsweise in den Vordergrund. Im Fall von seitlichen Zuflüssen ergibt sich oft im Zusammenflussbereich ein starker Gefällsknick. Zwar ist im vereinigten Fluss die Wassermenge erhöht, doch reicht diese Erhöhung oft nicht aus, um die Gefällsreduktion zu kompensieren. In solchen Fällen müssen am Zufluss selber oder am vereinigten Fluss direkt nach dem Zusammenfluss Bewirtschaftungsstrecken angeordnet werden. Je nach den Breitenverhältnissen und den durchschnittlichen Abflusskombinationen wird sich die Sohlenlage in beiden Zuflüssen auf einen theoretischen Sohlenfixpunkt ausrichten. Für beide Zuflüsse können die Fixpunkte auf unterschiedlichen Höhenlagen liegen. Im Fall der hier vorliegenden Untersuchung ist der Fixpunkt die 1. Absturzkante. Das Sohlgefälle der Leoganger Ache ist dadurch oberwasserseitig festgelegt. Der Schwarzbach weist in seinem untersten Abschnitt ein höheres Gefälle auf als die

Ache. Dadurch kommt es bei der Mündung zu einem Gefällsknick. Die Gesamtbreite des vereinigten Flusses ist in der Regel kleiner als die Summe der Breiten der Zuflüsse. Dies wirkt sich in einer Anhebung der massgebenden Sohlenlage in den Zuflüssen aus. Die Vereinigungsverluste führen zu einer weiteren Anhebung (JÄGGI, 1995).

### Kurzfristige Gesichtspunkte

Es gibt eine Vielzahl von Kombinationen der Abflüsse und der resultierenden Wasserstände. Meist treffen die Hochwasserspitzen zweier Zuflüsse zeitverschieben im Zusammenflussbereich ein. Der Zufluss, der im Verhältnis mehr Wasser führt, staut den anderen momentan ein. Dieser lagert sein Geschiebe temporär in der Form eines Mündungswalls ab. Nach Abklingen des Hochwassers fließt der vorher eingestaute Zufluss in den Mündungswall. Die in der Modelluntersuchung Schwarzbach – Leoganger Ache durchgeführten Versuche simulieren in beiden Wildbächen gleichzeitig Hochwässer, sie liefern daher Ergebnisse entsprechend des worst case Szenarios. Die Kapazität hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse bei diesen sehr ungünstigen Bedingungen lässt jedoch wichtige Rückschlüsse auf die notwendige Dimensionierung zu der Geschiebebewirtschaftung im Schwarzbach zu.

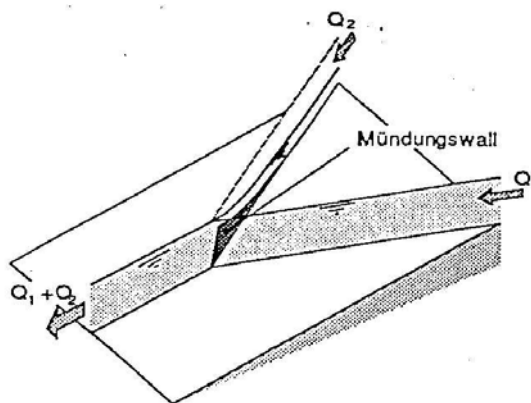


Abb. 4: Einstau von  $Q_2$  während des Durchgangs  $Q_{1max}$  (JÄGGI, 1995)

Trägt vorerst der Spitzenabfluss des einen Zuflusses viel Geschiebe in den Zusammenflussbereich und überlastet diesen, so wird sich örtlich ein Auflandungsprofil einstellen. Folgt der zweite Abfluss mit einer hohen Abflussspitze, so wird er die Ablagerung im vereinigten Fluss wegerodieren. Es verbleibt dann eine Restablagerung in der Form eines Mündungswalls im zweiten Zufluss, in dem sich nach Abklingen Rinnen einfressen können.

## Gestaltungsgrundsätze

Eine der drei Hauptaufgaben des Flussbaus ist die Veränderung der Geschiebetransportverhältnisse oder der Abflussverhältnisse. Entspricht die Sedimenttransportkapazität der Sedimentzufuhr so herrscht ein dynamisches Gleichgewicht vor. Das Erreichen eines stabilen Zustandes, der auf einem dynamischen Gleichgewicht basiert, stellt ein Hauptziel des Flussbaus dar. Die Verbauungen im Mündungsbereich Schwarzbach - Leoganger Ache sollten neben der Gewährleistung einer optimalen Wasserentnahme durch das Wehr eine Speicherung der Sedimente bewirken. Zwischen den Absturzbauwerken wurde das Bachbett der Leoganger Ache zu diesem Zweck verbreitert. Die Verbauung mit Querbauwerken (in diesem Fall Absturzbauwerken) gewährleistet die Gerinnestabilität. Dabei werden einzelne Punkte des Längsprofils fixiert. Zwischen diesen Fixpunkten kann sich ein flacheres Längsgefälle einstellen. Ist bei allen Abflüssen ein vollkommener Überfall vorhanden, so wird sich zwischen den Abstürzen ein Sohlgefälle einstellen, das flacher ist als das Talgefälle, und das einer Transportkapazität entspricht, welche gleich der diesem Feld zugeführten Geschiebemenge ist. Die Dynamik der Gerinnebildung kann sich im Bereich zwischen den Fixpunkten im Längsprofil ausbilden. Ziel des Flussbaus ist nach heutigem Ermessen die Zahl der Fixpunkte möglichst gering und die Länge der dynamischen Strecken möglichst hoch zu halten. Viele Fixpunkte führen zum Totalausbau des Flusses und zu negativen ökologischen Folgen. Im Mündungsbereich ist vor allem das erste Absturzbauwerk hinsichtlich einer Verringerung des Sohlgefälles flussauf als ungünstig zu betrachten.

Spielt das Geschiebe keine Rolle, so kann der Zusammenfluss rein hydraulisch optimiert werden. Im hier bearbeiteten Mündungsbereich müssen die Maßnahmen so getroffen werden, dass sowohl die Gefahr von Geschiebeablagerung als auch von Überschwemmungen klein gehalten wird. Es erfordert also eine hydraulische und geschiebetechnisch optimale Lösung. Bei bedeutender Geschiebeführung ist es wichtig, die verschiedenen beschriebenen Vorgänge auseinander zu halten. Aus einer temporären Ablagerung oder einem Mündungswall kann nicht auf eine generelle Auflandungstendenz geschlossen werden. Ein häufiger Überlegungsfehler besteht in der Erwartung, dass ein kleiner Vereinigungswinkel die Transportverhältnisse im vereinigten Fluss verbessern würde. Hierbei ist die örtliche Transportkapazität – unabhängig von der Zusammenflussgeometrie – maßgebend. Der Zusammenflussbereich wirkt sich nur nach oben und nicht nach unten aus. Da es im Bereich von Zusammenflüssen oft zu temporären Ablagerungen kommt, darf dieser Bereich bezüglich temporärer Wasserspiegelanhebungen nicht zu empfindlich

sein. Aufweitungen im Zusammenflussbereich dämpfen die möglichen temporären Sohlenhebungen. Im Fall des Schwarzbaches wurde durch eine Vergrößerung des Querschnitt der Bundesstraßenbrücke darauf eingegangen.

## 2.2 Situation im Projektbereich

Das Mündungsgebiet Schwarzbach – Leoganger Ache liegt ca. 300 m westlich des Ortskernes von Leogang im Salzburger Pinzgau. Das Leoganger Achental befindet sich in den österreichischen Ostalpen und trennt die Nördlichen Kalkalpen im Norden von der Nördlichen Grauwackenzone im Süden ab.

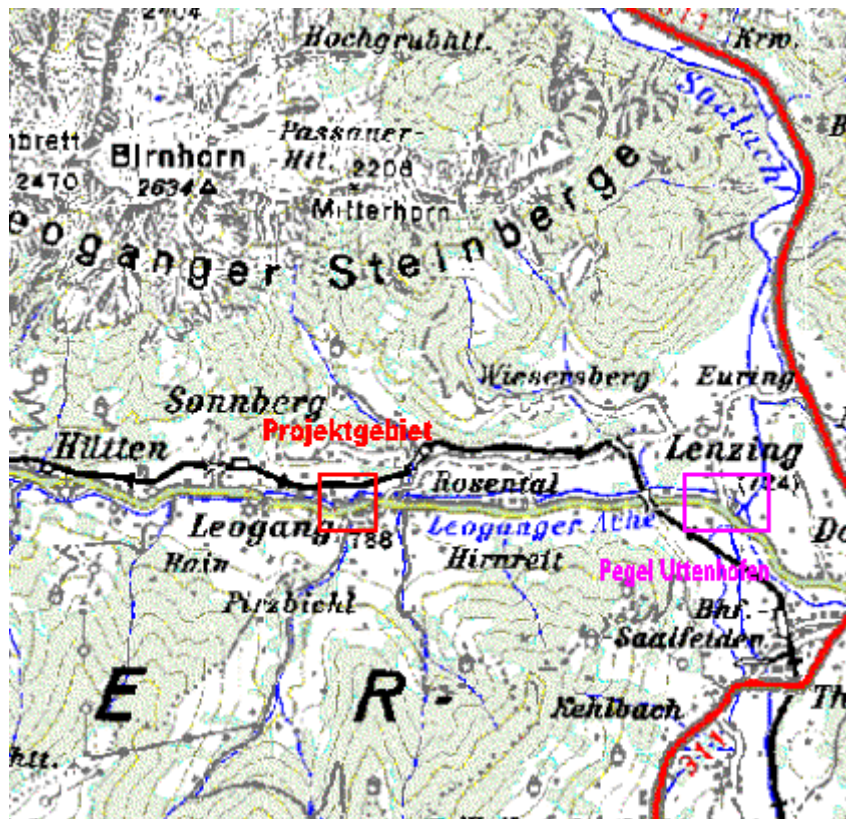


Abb. 5: Ausschnitt aus dem Leoganger Achental (Quelle: BEV)

### 2.2.1 Der Schwarzbach und sein Einzugsgebiet

#### Charakterisierung des Schwarzbaches

Der Schwarzbach ist durch einen flachen Gerinneabschnitt im unteren Einzugsbereich und durch steile Gerinneabschnitte im oberen Einzugsgebiet gekennzeichnet. Insgesamt weist er eine hohe Gerinnedichte auf. „Durch die zum Teil hohe Lockermaterialmächtigkeit und die geringe Strukturierung des Alluvions durch Grobkomponenten können beträchtliche Sedimentmengen mobilisiert werden“ (HÜBL und LEBER, 2000). Generell sind im Schwarzbach gut eingeregelter seitliche Ablagerungen und eine gute Geschiebespeicherwirkung festzustellen. Daneben herrschen jedoch stark schwankende Transportverhältnisse, bedingt durch die rasche Abnahme der Hochwasserwelle nach dem Scheiteldurchgang.

## Morphologie und Fluvialgeomorphologie des Einzugsgebietes

Das Einzugsgebiet des Schwarzbaches, welches eine Gesamtfläche von 12.72 km<sup>2</sup> bedeckt und eine Höhererstreckung von 755 – 1914 m ü.A. aufweist, gliedert sich in fünf Teileinzugsgebiete. Namentlich sind es jene des Dunkelkendlbaches, des Klamm-baches, der Zubringer N und S der Embachalm sowie des Schwarzbaches. Die mittlere Geländeneigung des Einzugsgebietes beträgt 16,55 %, die mittlere Gerinneneigung 43,5 %. Die Gerinnegesamtlänge nimmt 60,3 km ein.

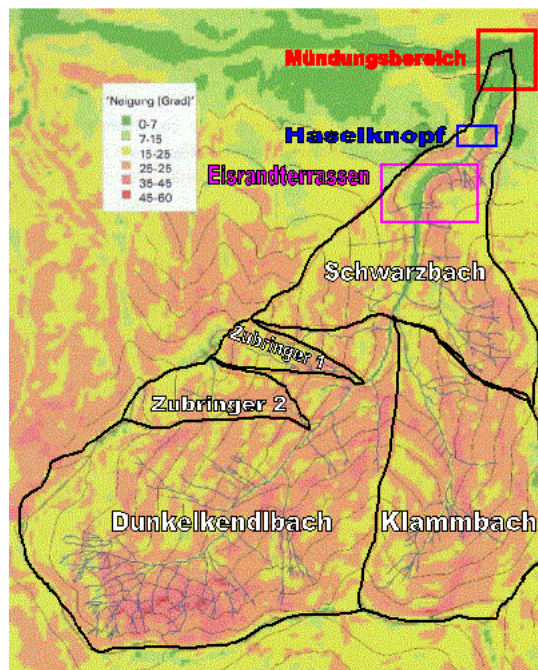


Abb. 6: Neigungen im Einzugsgebiet des Schwarzbaches

## Landnutzung in den einzelnen Einzugsgebieten

Im oberen Bereich der Wildbachgerinne befindet sich ein hoher Anteil an steilen Hangbereichen, welche vorwiegend einer forstwirtschaftlichen Nutzung unterliegen. Der oberste Bereich des Dunkelkendlbaches fungiert als Schigebiet, der Mittel- und Unterlaufbereich wird weidewirtschaftlich und als Mähwiesen verwendet. Der flache Schwarzbach ist oberhalb der quartären Eisrandterrassen durch Weidewirtschaft und Mähwiesen landwirtschaftlich genutzt. In seinen Oberhangbereichen überwiegt hingegen forstwirtschaftliche Nutzung.

## Katasteraufzeichnungen

Anhand von Katasteraufzeichnungen aus dem Jahr 1920 kann aufgrund der dort verzeichneten Landnutzungsformen (Wald, Weide) auf eine regelmäßige

Überschwemmung des Ablagerungskegels und des untersten Niveaus geschlossen werden. Auf den höheren 2. und 3. Terrassenniveaus sind hingegen Ackerbau- und Siedlungsflächen verzeichnet. Der Talweg lag zu dieser Zeit ebenfalls auf dem sicheren 3. Terrassenniveau und wurde auf das unterste Niveau verlegt. Im Bereich des Ablagerungskegels hat die Siedlungstätigkeit, vor allem im Bereich des untersten Niveaus stark zugenommen.

Aus den chronologischen Aufzeichnungen ist zu entnehmen, dass keine Murgänge am Ablagerungskegel aufgetreten sind. Bis zum 20. Jahrhundert liegen keine genaueren Aufzeichnungen hinsichtlich Schäden im Einzugsgebiet vor. Erst seit den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts ist eine steigende Häufigkeit von Extremereignissen sowie größer werdende Schäden, die dadurch verursacht werden, dokumentiert. Dies lässt den Schluss zu, dass vorher, wie schon oben erwähnt, Besiedelung in tieferen Tallagen vermieden wurde. Die erste Dokumentation der Gefährdung von Wohnhäusern liegt aus dem Jahre 1961 vor. Durchgeführte Verbauungen des Schwarzbach wurden erstmals im Jahre 1929 erwähnt und nahmen in den 60er und 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts umfangreich zu. Dies darf als eine Reaktion auf die wachsende Gefährdung der Bevölkerung durch steigende Besiedelung des Nahbereiches des Schwarzbaches gedeutet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Schäden im Schwarzbach nur durch Hochwässer und Eisstöße bekannt sind. Der Klamm Bach und der nördliche und südliche Zubringer der Embachalm waren von Murgängen betroffen. Diese lagerten sich in ihren Unterabschnitten bzw. im Oberlauf des Schwarzbaches an.

### Niederschlagscharakteristik und Geschiebelieferung aufgrund von Zeugenbefragungen

Unwetter ziehen meist von Westen oder Süden auf. Im Frühjahr führen starke Niederschläge auf die Schneedecke zu Extremereignissen, wohingegen im Sommer Hochwässer nach Gewitterregen mit Hagel auftreten. Hinsichtlich der Geschiebelieferung ist festzustellen, dass sich der Schwarzbach in den letzten hundert Jahren zur rechten Eisrandterrasse hinverlagert hat. Dies bewirkte, dass dieser Hang verstärkt unterschritten und instabilisiert wurde.

### Geologie

Die Gesteine gehören der Glemmtaleinheit der oberostalpinen Nördlichen Grauwackenzone an. Die nördliche Grauwackenzone trennt die südlich gelegenen

---

zentralalpiner Einheiten von den Nördlichen Kalkalpen. Diese geologische Zone ist durchschnittlich 5 – 10 km breit und verläuft in Richtung WSW – ENE. Der Wildschönauer Schiefer, das ist ein feinklastisches Metasediment, bildet das Hauptgestein. Metasedimente sind schwach metamorph. Zusätzlich sind metamorphe basische Magmatite eingeschaltet. Im Einzugsgebiet liegen als lithologische Einheiten hauptsächlich Tonschiefer und Phyllite vor. Phyllite sind sandig, tonige Metamorphite mit blättrigem Gefüge. Außerdem finden sich neben Silt- und Tonsteinwechsellagerungen auch untergeordnet Quarzite und Metabasite vor. Die Lockergesteine, die im Einzugsgebiet vorkommen, sind neben Bereichen rezenter, fluvialer Ablagerungen, Terrassensedimente bzw. Grundmoränen und Hangschutt (HÜBL und LEBER, 2000).

### Beschreibung der vorkommenden Gesteine

**Siltsteine:** Sie sind aus Tonmineralien und Quarz aufgebaut. Ihre Bestandteile haben Korngrößen im Bereich zwischen 0.002 – 0.063 mm. Siltstein ist charakterisiert durch eine deutliche Körnung und seinem Quarzgehalt.

**Tonsteine:** Dieses Gestein, das aus Komponenten der Tonfraktion aufgebaut ist, hat eine geringe Härte und lässt sich mit der Hand zerreiben. Es besitzt eine feine Bankung und weist eine plättchenförmige Verwitterung auf. Einige Anteile im oberen Bereich des Einzugsgebietes sind schwach metamorph. Sie werden als Tonschiefer bzw. Phyllite klassifiziert.

**Tonschiefer, Phyllite:** Der Unterschied dieser beiden Gesteine liegt an ihrem Metamorphosegrad. Geotechnisch weisen Tonschiefer und Phyllite ein ähnliches Verhalten auf. Ihre verwitterungsbedingte Zerlegung erfolgt in Stücken von zwei bis 30 cm Korngröße. Das Gestein bricht dabei splittrig. Gebiete mit Tonschiefer sind rutschungsanfällig.

**Eisrandsedimente:** Diese mittel- bis gutgerundete Schotter mit einer Korngröße von 0.2 bis 20 cm wurden in Seen am Eisrand abgelagert. Sie setzen sich aus Tonsteinen, Sandsteinen, Siltsteinen, Quarzgeröllen, Feinkonglomeraten, Tonschiefer, Grauwacken und Dolomite zusammen. Es ist eine sehr große Instabilität sowie eine geringe Festigkeit der Terrassenschotter gegeben.

**Hangschuttmaterial:** Es besteht aus Siltsteinen mit Korngrößen von 5 bis 50 cm und Tonsteinen bzw. Tonschiefer mit Korngrößen von 0.5 bis 5 cm. *„In Bereichen, wo vor allem Tonschiefer und Phyllite vorkommen, regeln sich die platten- bis*

---

*blättchenförmigen Komponenten vorwiegend in Hangrichtung ein, wodurch die Stabilität des an sich schon lockeren Materials noch zusätzlich verringert wird.“*  
(HÜBL und LEBER, 2000)

#### Hydrologie (VOLK, 1999)

Es liegen keinerlei hydrologische Zeitreihen für den Schwarzbach vor. In unmittelbarer Nähe zum Schwarzbach befindet sich allerdings der hydrologisch ähnliche Löhnersbach, von dem eine größere Anzahl von Kartierungen (u.a. Hydrogeologie, Vegetation, Böden) vorhanden sind. Darüberhinaus konnten im Juli 1995 zwei größere Ereignisse beobachtet werden. Mit Hilfe dieser Daten wurde die Kalibrierung eines hydrologischen Modells durchgeführt. Dahinter steht die Überlegung, dass von einem Modell, das im Löhnersbach befriedigende Ergebnisse liefert, angenommen werden kann, dass es auch bei einer Anwendung auf den Schwarzbach realitätskonform reagiert.

Zur Abschätzung des hydrologischen Verhaltens des Schwarzbaches wurde das räumlich verteilte hydrologische Modell ACURAT (Abflussmodell zur computerunterstützten Risikoabschätzung von Wildbacheinzugsgebieten) angewendet. Durch das Infiltrationsmodell, mit dem Ansatz nach HOLTAN, 1961 (zit. in VOLK, 2000) wird der Oberflächenabfluss gebildet. Dieser wird über ein Rastermodell zum linearen Gerinnenetz geroutet und mittels eines linearen Flood routings zu einer Hochwasserganglinie an beliebigen Stellen des Einzugsgebietes zusammengeführt.

Als meteorologische Datengrundlage für die Hochwasserrisikoabschätzung wurden die Starkregenwerte der Station Schmittenhöhe herangezogen. Eine dreizehnjährige Reihe mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute wurde extremwertstatistisch für ein hundertjährliches Niederschlagsereignis ausgewertet.

Beleuchtet man die Abflussprozesse im Löhnersbach, so stellt man fest, dass sich selbst bei sehr intensiven Ereignissen die Abflussfracht sehr gut aus dem Abfluss von sogenannten „Feuchflächen“ erklären lässt. Diese Flächen, die besonders schnell auf den Niederschlag reagieren, nehmen im Löhnersbach 9 %, im Schwarzbach 6 % der Gesamteinzugsfläche ein. Aufgrund zweier intensiver Niederschlagsereignisse wurde eine Modellparametrisierung am Löhnersbach durchgeführt. Mit diesen Erkenntnissen erfolgte eine Parametrisierung des hydrologischen Modells ACURAT für den Schwarzbach.

Die Simulationen ergaben die höchste Durchflussrate bei einem endbetonten Ereignis von dreißigminütiger Dauer ( $> 45 \text{ m}^3/\text{s}$ ). „Für den Geschiebetrieb sind vor allem Ereignisse, die über längere Zeit Durchflussraten von über  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  liefern, relevant“ (VOLK, 1999). Aus dem Simulationsergebnissen der hydrologischen Studie gehen als Ausgangsdaten für die Simulation der Hochwasserganglinien im physikalischen Modell die Hochwasserwellen aufgrund eines dreißigminütigen endbetonten, eines sechzigminütigen gleichverteilten sowie eines hundertzwanzigminütigen gleichverteilten Niederschlagsereignisses ein. Die Simulation dient dazu um die Abflusscharakteristik des Schwarzbaches zu erfassen. Die simulierten Abflussganglinien entsprechen keiner charakteristischen Jährlichkeit.

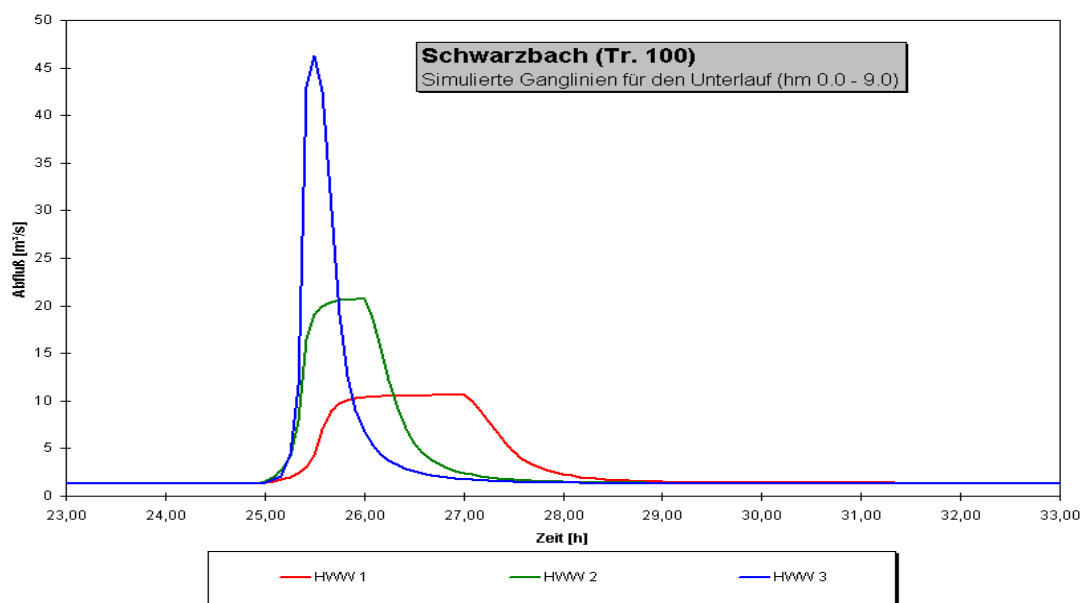


Abb. 9: Abflussganglinien (VOLK, 1999)

Mit diesen Hochwasserwellen werden verschiedene Wildbachgefahrenszenarien berücksichtigt. Die Hochwasserwelle 3 mit dem größten Durchfluss ist vor allem in hydraulischer Hinsicht für das Mündungsgebiet gefährlich. Die beiden anderen Hochwasserwellen sind aufgrund ihrer längerfristigen hohen Durchflüsse bezüglich des Geschiebetransportes zu untersuchen.

### Geschiebehaushalt

Das Institut für Wildbach und Lawinenschutz der Universität für Bodenkultur in Wien hat unter der Zusammenarbeit mit dem Institut für Geologie der Universität Wien eine Geschiebehaushaltsstudie für den Schwarzbach durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war, den Geschiebehaushalt des Einzugsgebietes des Schwarzbaches für ein Bemessungsereignis zu quantifizieren.

„Für die Simulation des Geschiebehaushaltes des Schwarzbaches wurde das für Gebirgsbäche bis 20 % Gefälle anwendbare Programmpaket MORMO (Morphologisches Modell) verwendet. Es dient zur eindimensionalen Berechnung des Sedimenttransportes in geschiebeführenden Bächen und Flüssen“ (HÜBL und LEBER, 2000).

Bis in die Leoganger Ache hinein werden maximal 1400 bis 2000 m<sup>3</sup> Geschiebe transportiert. Unterhalb des Haselknopfes (hm 7.0 – 9.0) steigt die Transportkapazität an, dabei sind Geschiebefrachten bis 6000 m<sup>3</sup> möglich. *„Das bedeutet, dass selbst bei völliger Unterbindung des Geschiebetransportes durch eine Sperre bei entsprechendem Geschiebeangebot aus Ufer- oder Hangbereichen unterhalb der Sperre bis zu 6000 m<sup>3</sup> Feststoffe in den Ortsbereich gelangen können“* (HÜBL und LEBER, 2000).

Bei der Berechnung der Geschiebefrachten und Transportkapazitäten unter Berücksichtigung von seitlichen Geschiebeeinträgen und Sohlveränderungen ergeben sich für den Mündungsbereich folgende relevante Ergebnisse: Zwischen der Mündung in die Leoganger Ache und hm 3.0 besteht die Tendenz zur Eintiefung. Szenarien mit lang anhaltenden gleichmäßig hohem Abfluss führen zu einer starken Sohlerhöhung im oberen Schwemmkegelbereich, während das dreißigminütige endbetonte Szenario mit einem Spitzenabfluss von 45 m<sup>3</sup>/s zwar nur eine geringe Auflandungstendenz aufweisen, aber dafür mit Abflusshöhen von über drei Meter (hm 1.5 – 3.0) ein ernstes Problem für den Siedlungsraum darstellt.

Die Simulation des Geschiebehaushaltes des Schwarzbaches zeigt, dass für einen hohen Geschiebehaushalt vor allem die lang anhaltenden Niederschlagsereignisse ausschlaggebend sind. *„Dies führt dazu, dass durch diese langen Ereignisse im Ortsbereich die Gefahr durch Auflandungen bis zu 1 m besteht“* (HÜBL und LEBER, 2000). Die kurzen Niederschlagsereignisse sind vor allem durch ihre hohen Spitzenabflüsse und dem damit verbundenen Überborden im Siedlungsraum gefährlich. *„Durch den relativ starken Anstieg der Geschiebefracht zwischen hm 8.5 und 13.0 ist ein Dosier- und Sortierwerk im Bereich des Haselknopfes (hm 9.0) sinnvoll. Diese Sperre sollte größere Auflandung am besiedelten Schwemmkegel verhindern und mindestens 10000 m<sup>3</sup> Geschiebe aufnehmen können“* (HÜBL und LEBER, 2000). Die Zusammenfassung der Studie beinhaltet folgende Aussage über die Situation im Mündungsbereich: Die hohen Abflussspitzen und kurzen Ereignisse sowie die Kombination aus erhöhtem Abfluss und starker Auflandung im Falle der lange anhaltenden Ereignisse führen in jedem Fall zu einem Überschreiten der Aufnahmefähigkeit des Schwemmkegelgerinnes und in weiterer Folge vor allem im

unteren Schwemmkegelbereich zu massiven Überschwemmungen. Ohne entsprechende Maßnahmen, die zu einer Abflussertüchtigung des Gerinnes im Ortsbereich oder im Oberlauf zu einer Verminderung des Spitzenabfluss während eines Ereignisses führen, ist jede nur auf einen Rückhalt des transportierten Geschiebes ausgelegte Maßnahme nicht zielführend. Zusätzlich müssen Rückstaueffekte durch Auflandungen im Mündungsbereich des Schwarzbaches in die Leoganger Ache in die Überlegungen miteinbezogen werden. Da diese komplexen Vorgänge nur in sehr beschränktem Ausmaß simuliert werden können, bieten sich weiterführende Modellversuche an, die zu einer Optimierung des sensiblen Bereiches führen können (HÜBL und LEBER, 2000).

## 2.2.2 Die Leoganger Ache und ihr Einzugsgebiet

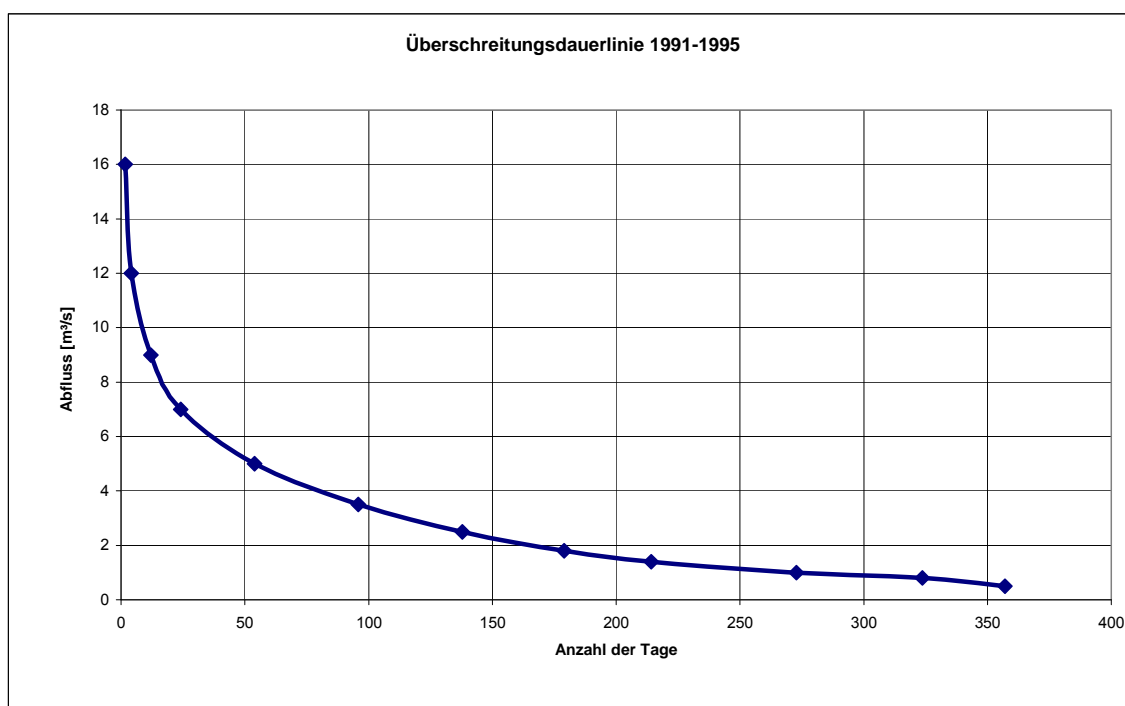


Abb. 8: Überschreitungsdauerlinie der Leoganger Ache beim Pegel Uttenhofen  
(Quelle: HYDROGRAPHISCHES JAHRBUCH, 1997)

Die oben dargestellte Überschreitungsdauerlinie wurde anhand von Werten aus dem Hydrographischen Jahrbuch für die Leoganger Ache am Pegel Uttenhofen erstellt. Dieser Pegel wurde als einziger angeführt, und befindet sich nahe der Mündung in die Saalach. Die dargestellten Werte sind also etwas größer als beim Mündungsbereich. An knapp dreihundert Tagen ist der Abfluss kleiner als 5 m³/s.

Jahreswerte für die Reihe 1961 - 1996		
m³/s		
NQ	0.25	
MQ	2.91	
MJHQ	23.90	
HQ	62.00	04.08.1967

Tab. 1: Übersicht der Jahreswerte der Leoganger Ache am Pegel Uttenhofen  
(Quelle: HYDROGRAPHISCHES JAHRBUCH, 1997)

### 2.2.3 Beschreibung des Mündungsgebietes

Der obere Schwarzbach verläuft im modellierten Abschnitt relativ geradlinig. Durch Verbauungen wurde eine Trapezprofil geschaffen, dessen Uferböschungen mit bewachsenen Steinplatten gesichert sind. Die Korngröße der Sohlendeckschicht bewegt sich zwischen 0.1 und 0.3 m, vereinzelt wurden Uferverbauungsblöcke mit einer Korngröße von ca. 0.5 m in die Sohle eingebracht. Im Zuge des Neubaus der Bundesstraßenbrücke wurde auch ein etwa 10 m langer Bachabschnitt unmittelbar flussauf der Brücke in seinem Querschnitt erweitert.

Es handelt sich um ein symmetrisches Mündungsgebiet mit relativ stark unterschiedlichen mittleren Durchflüssen. Die Leoganger Ache führt bei Mittelwasser in der Regel den drei- bis fünffachen Durchfluss des Schwarzbaches (vgl. 2.2.1 und 2.2.2). Der Mündungswinkel beträgt ca. 100°. Die Leoganger Ache vollführt in der Mündung des Schwarzbaches eine starke Linkskurve.

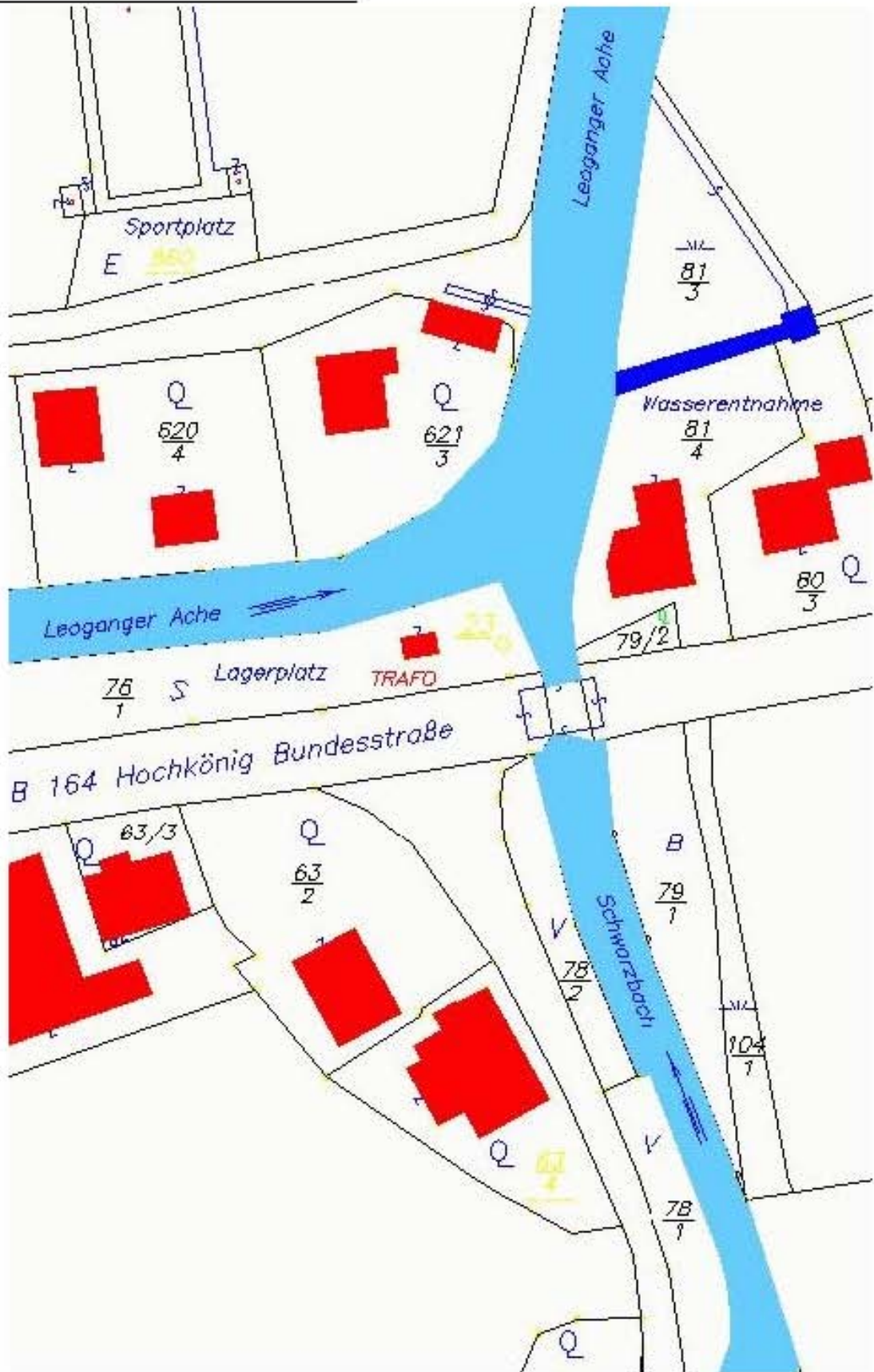


Abb. 9: Mündungsbereich Schwarzbach-Leoganger Ache (mit alter Bundesstraßenbrücke)



Abb. 10: Blick von der Schotterbank Richtung flussauf

Im Folgenden wird auf die vier charakteristischen Sedimentationsformen in Mündungsbereichen in Bezug auf Schwarzbach und Leoganger Ache eingegangen (vgl. 2.5.2 und BRISTOW, et al., 1993). Ablagerungszonen, die sich knapp flussauf der Mündung quer über die gesamte Breite bilden, sind in beiden Gerinnen gegeben. Im Bachbett des Schwarzbaches unmittelbar bei der Mündung ist eine Sohlstufe von etwa 0.3 m zu beobachten. Diese Sohlstufe wird von den unterschiedlichen Transportkapazitäten der beiden Bäche hervorgerufen. Die Ablagerungszone im Schwarzbach flussauf der Mündung reicht bis unter die Bundesstraßenbrücke. Die Korngrößenverteilung der Deckschicht des unteren Schwarzbaches weist im Bereich der Bundesstraßenbrücke einen hohen Anteil an Sandfraktionen ( $d \cong 0.5 \text{ cm}$ ) auf. Zudem waren in diesem Bereich zum Zeitpunkt der Geländevermessung am 09.04.2001 Unholzablagerungen gegeben. Dies lässt auf eine niedrige Transportkapazität im unteren Schwarzbach schließen. Kurz vor der Mündung in die Leoganger Ache ist eine abwechselnde Korngrößenlagerung im Bachbett festzustellen. In ca. 0.3 m breiten Streifen wechseln sich Bereiche mit Korngrößen von ca. 10 – 15 cm mit Bereichen mit  $d = 1-5 \text{ cm}$  ab. Die innere Struktur der Ablagerungszone wird im Schrifttum als kreuzgeschichtet bezeichnet (BRISTOW, et al., 1993). Die abwechselnde Korngrößenlagerung könnte dieser Beschreibung entsprechen.

Die Leoganger Ache fließt vor der Mündung des Schwarzbaches von West nach Ost. Linksufrig werden die angrenzenden Flächen durch eine Ufermauer aus

Granitsteinen geschützt. Dahinter befindet sich ein Grundstück mit einem Objekt. Auf der rechten Uferseite ist das Ufer abgebösch, wobei diese Böschung mit einem schmalen Gehölzsaum bewachsen ist. Angrenzend an diesen Uferbewuchs befindet sich ein Parkplatz und die Bundesstraße B164. Im Bereich des Streichwehreinflaues am Prallufer des Linksbogens der Leoganger Ache hat sich ein Kolk gebildet, der einerseits auf die Konzentration des Abflusses im rechten Bachbettbereich der Ache aufgrund des Bogens zurückzuführen sein könnte, oder andererseits sich auch teilweise aufgrund der Wasserentnahme und der damit verbundenen hohen Fließgeschwindigkeiten im Einlaufbereich gebildet haben könnte. Aufgrund des meist geringen Durchflusses im Schwarzbach ist eine mögliche Ursache durch die Mündung zu verwerfen.

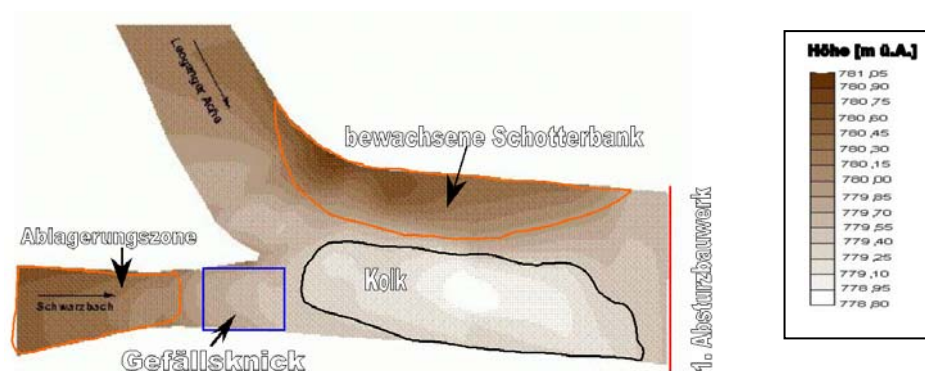
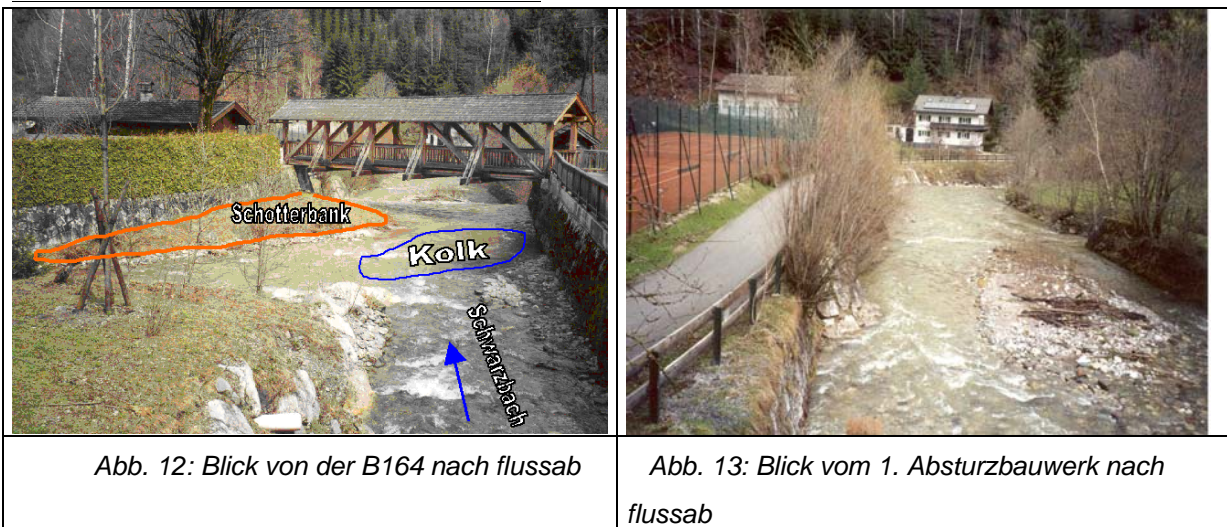


Abb. 11: Morphologie des Mündungsgebietes

Ablagerungen durch eine Mündungstrennzona und mittige Flussbettablagerungen nach der Mündung konnten als charakteristische Sedimentationsformen von Mündungen hier nicht festgestellt werden. Allerdings hat sich auf der Innenseite der Kurve eine mit Sträuchern bewachsene Schotterbank gebildet, die auf eine Zone mit unzureichender Transportkapazität hinweist und sich aufgrund des Linksbogens der Ache entwickelt hat. Am Rand der Schotterbank wurden Sandfraktionen festgestellt. Der Bewuchs lässt ebenfalls auf eine Ablagerung kleiner Kornfraktionen schließen, da diese ein geeignetes Substrat für Pflanzen bildet. Im Bereich des Bachbettes der Leoganger Ache in der Hauptströmungszone sind Kornfraktionen von 0.1 bis 0.3 m zu finden.



## 2.2.4 Wasserbauliche Maßnahmen im Mündungsgebiet

Durch die steigende Siedlungstätigkeit im Bereich der Mündung des Schwarzbaches in die Leoganger Ache wurden Maßnahmen der Wildbachverbauung notwendig. Die Verbesserungen hinsichtlich des Hochwasserschutzes stellten immer die Reaktion von entstandenen Schäden dar. Der größte anthropogene Eingriff in die Morphologie des Mündungsgebietes Schwarzbach – Leoganger Ache wurde nach einem Katastrophenhochwasser im Jahre 1935 durchgeführt. Dieses Hochwasser riss im Außenbogen der Leoganger Ache im unmittelbaren Mündungsbereich große Uferbereiche weg, und bewirkte eine erhebliche Laufveränderung in diesem Gebiet. Eine bestehende Wehranlage zur Speisung eines Mühlgerinnes wurde vollständig zerstört. Ziel der Verbauungsmaßnahmen Mitte der dreißiger Jahre war es, die Leoganger Ache im Mündungsbereich in ein reguliertes Flussbett zu führen, und darüberhinaus die Wasserentnahme zur weiteren Nutzung wieder herzustellen. Priorität bei dieser Verbauung hatte vor allem eine verbesserte Nutzung des Streichwehres und die Stabilisierung des Flussbettes. Im Zuge der Sanierung wurde die Leoganger Ache linksufrig sowie rechtsufrig mit Ufermauern verbaut und die Sohle wurde mittels drei Absturzbauwerken stufenförmig ausgebildet. Dadurch wurde das ursprünglich hohe Gefälle reduziert und es entstand ein Sohlgefällsknick im Bachverlauf des Schwarzbaches unmittelbar bei der Mündung.



Abb. 14: Absturzbauwerk 1; Blick flussauf

Der Einlauf für die Wassernutzung wurde rechtsufrig etwa 12 m flussauf des 1. Absturzbauwerkes gebaut. Die Wasserentnahme erfolgt rund um die Uhr mit einer Konsenswassermenge von  $1.04 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nach Angaben der Betreiber kommt es nur bei großen Hochwässern zu keiner Wasserentnahme. Das entnommene Wasser wird von einem Freispiegelgerinne erfasst. Die Wehranlage ist mit einem Überlauf ausgestattet, der ab einem bestimmten Durchfluss im Ausleitungsgerinne anspringt. Das Überlaufwasser wird in einem Mühlgerinne wieder zur Ache geführt.



Abb. 15: Einlauf - Streichwehr



Abb. 16: Blick von der Mündung nach flussab

Das erste Absturzbauwerk hat eine Höhe von ca. 2.50 m und ist aus Granitsteinen errichtet. Teile der Absturzkante sind bereits erodiert. Flussab des 1. Absturzes erweitert sich das Querschnittsprofil auf ca. 25 m. Nach ca. 40 m befindet sich das

zweite Absturzbauwerk mit einer Höhe von ca. 0.5 m. Unmittelbar flussab der Absturzbauwerke haben sich stark ausgeprägte Kolke entwickelt. Im verbreiterten Bachbett zwischen erstem und zweitem Absturzbauwerk ist eine erhöhte Geschiebespeicherfunktion festzustellen. Bei Nieder- und Mittelwasser verzweigt sich der Bachlauf der Ache. In der Mitte der beiden Bacharme hat sich eine Schotterbank gebildet. Die abgelagerten Geschiebekörner weisen zu ca. 40 % Korngrößen im Bereich von 0.3 m auf den Rest bilden Korngrößen von 0.1 bis 0.2 m. Im gesamten Bereich zwischen 1. und 2. Absturzbauwerk sind die Uferböschungen durch Ufermauern mit steilem Anzug verbaut. In diesem Bereich sind keine Gebäude in der unmittelbaren Gefahrenzone des Baches.

In den siebziger Jahren wurden verstärkt Verbauungen mit Ufermauern sowie Blocksteinverbauungen im unteren Schwarzbach durchgeführt (siehe Kap. 2.2.3). Um der akuten Gefährdung der Bundesstraßenbrücke durch Hochwässer im Schwarzbach entgegenzuwirken, wurde sie 1999 neu gebaut. Die neuausgeführte Brücke weist einen größeren Durchflussquerschnitt (ca. 12 m<sup>2</sup>) auf, und die Brückenoberkante wurde angehoben. Überdies wurde der Bachquerschnitt unmittelbar flussauf der Brücke in einem Bereich von 30 m auf ca. 5 – 6 m aufgeweitet.



*Abb. 17: Blick vom Mündungssporn des Schwarzbaches nach flussauf*

Gemäß der neuen Planungsform des gesamtheitlichen Konzeptes startete die Wildbach- und Lawinerverbauung ein Schutzprojekt für den gefährdeten Bereich im Einzugsgebiet des Schwarzbaches. Dies wurde unter anderen auf Grund der Ergebnisse der Geschiebehaushaltsstudie initiiert. Dieses Schutzprojekt beinhaltet

---

eine Geschiebesortier- bzw. Geschiebedosieranlage, eine Vergrößerung des Durchflussquerschnittes im unteren Teil des Schwarzbaches und eine Verbesserung der Geschiebetransportkapazität des Mündungsbereiches in die Leoganger Ache.

Durch den hydraulisch ungünstigen Einmündungswinkel des Schwarzbaches sowie die künstliche Anhebung des Sohlgefälles aufgrund der Errichtung von Absturzbauwerken, erweist sich der Mündungsbereich als von Ablagerungen stark gefährdetes Gebiet. Der Mündungsbereich stellt eine sensible Zone dar, weil Geschiebeablagerungen, erzeugt durch eine gegenseitige Beeinflussung beider Wildbäche, möglicherweise zu einer Überflutung der verbauten Gefahrenzone führen können zudem wäre in einem solchen Fall mit einer Verklausung des Brückenquerschnittes der Bundesstraßenbrücke an der B164 zu rechnen. Ergebnisse von Untersuchungen hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse im Mündungsbereich sollen in die Planung des Geschiebebewirtschaftungsanlage einfließen, um so eine gesamtheitliche Lösung zu erreichen.

### 3 Physikalisches Modell

Um einer wasserbaulichen Aufgabenstellung eine Modelluntersuchung zu unterziehen, stellt sich zunächst die Frage, ob die Lösung mit Hilfe eines physikalischen Modells oder eines numerischen Modells ermittelt werden soll. Es gibt keine allgemein anwendbaren Verfahren der Entscheidungsfindung, aber einige Entscheidungskriterien, die für jedes Projekt einzeln geprüft werden müssen (KOBUS, 1984). Im Entscheidungsprozess kommt den limitierenden Faktoren beider Modelltypen eine bedeutende Rolle zu.

#### 3.1 Gegenüberstellung Physikalisches Modell – Numerisches Modell

In der prinzipiellen Vorgangsweise zur Lösung wasserbaulicher Aufgaben ist es zunächst notwendig die Aufgabenstellung zu definieren. Infolgedessen hat eine Identifizierung der wesentlichen wirksamen Kräfte zu erfolgen. Dies ist bei beiden Modelltypen erforderlich. Bei den numerischen Modellen ist im nächsten Schritt die Aufstellung des Gleichungssystems und die Formulierung der Randbedingungen von Nöten. Aufgrund dieser Vorarbeiten lässt sich ein numerisches Lösungsverfahren entwickeln. Mit der Variation der Beiwerte erfolgt das Eichen des Modells. Nach einer vorläufig errechneten Lösung kommt es zur Optimierung des Lösungsvorschlages gemäß der Aufgabenstellung. Beim physikalischen Modell erfolgt eine Aufstellung der Ähnlichkeitsforderungen und eine Formulierung der Randbedingungen. Danach wird das Modell gebaut. Nach dem Eichen des Modells durch z.B. Variation der Rauigkeit können die geplanten Messungen durchgeführt werden. Durch Modellumbauten wird eine Optimierung der Lösung gemäß der Aufgabenstellung erreicht. Zuletzt erfolgt eine Umrechnung auf die Naturverhältnisse und eine Überprüfung.

Für die Entscheidung, ob man ein Problem entweder mit Hilfe eines physikalischen Modells oder eines numerischen Modells bearbeitet, ist vor allem wesentlich, welche Genauigkeitsanforderungen an das Modell gestellt werden (KOBUS, 1984). Für die Untersuchung der geschieberelevanten Aspekte des Einzugsgebietes des Schwarzbach war es sinnvoll ein numerisches Modell zu verwenden. Ziel der Studie war, „den Geschiebehaushalt des Untersuchungsgebietes für ein Bemessungsereignis zu quantifizieren“ (HÜBL und LEBER, 2000). Das Untersuchungsgebiet war über 12 km<sup>2</sup> groß, und wäre für eine physikalische Modelluntersuchung ungeeignet gewesen. Die Ergebnisse, die aus der Simulation des numerischen Modells gewonnen wurden, sind Richtwerte, jedoch als Dimensionierungsgrundlage für geschiebewirtschaftliche Maßnahmen wertvoll.

Zum Unterschied dazu beschränkt sich das Modellgebiet des Mündungsbereiches Schwarzbach - Leoganger Ache auf einen relativ kleinen Bereich. Die Untersuchungsergebnisse sind von lokalen Gegebenheiten stark abhängig, und die Strömungsverhältnisse in Mündungsbereichen sind sehr komplex. „[...] *the channel junction problem is complex and that a complete analysis of the problem is not possible with current information*“ (RICE, 1983). Die entscheidende Einschränkung des numerischen Modells besteht darin, dass für die überwiegende Mehrzahl der im Wasserbau interessanten Strömungsvorgänge kein in sich geschlossenes Gleichungssystem angegeben werden kann. Dies hat die gravierende Konsequenz, dass man beim heutigen Stand der Forschung, den numerischen Modellen für turbulente Strömungen in der Regel die Prognosefähigkeit absprechen muss (KOBUS, 1984). Obwohl dieses Zitat bereits älter ist, kann man auch heute noch feststellen, dass sich numerische Modelle im allgemeinen zur Modellierung großräumiger Strömungsvorgänge eignen, wohingegen physikalische Modelle besser zur Untersuchung lokaler Strömungserscheinungen herangezogen werden. Bei beiden Modelltypen kann man unterschiedliche limitierende Faktoren beobachten. Im physikalischen Modell gelten als prinzipielle Beschränkungen die Modellgröße aufgrund von begrenzten Platzangeboten, von Durchfluss und Energiehöhe, sowie von begrenzter Pumpkapazität und der Modellgesetze. Bei numerischen Modellen hingegen sind Speicherkapazität, Rechengeschwindigkeit und bei vollständigen Gleichungen die Turbulenzhypothese als prinzipielle Beschränkungen festzuhalten.

Im physikalischen Modell gibt es eine Reihe praktischer Beschränkungen, die vor allem die Kosten einer Modelluntersuchung in die Höhe treiben. Es ist ein Mindestmaßstab des Modells notwendig um Faktoren wie Oberflächenspannung, Zähigkeit und Rauigkeit realitätsnahe berücksichtigen zu können. Zudem sind geeignete Messmethoden zur Datenerfassung zu verwenden. Das physikalische Modell ist der geeignete Modelltyp für lokale Probleme mit komplexer Geometrie bei Flüssen und Bächen. Für großräumige Probleme mit einfacher Geometrie ist eine Bearbeitung mit dem numerische Modell zweckmäßig.

### **3.2 Ähnlichkeit**

Für ein Modell mit Sedimenttransport sind zwei Forderungen zu beachten:

- die dynamisch ähnliche Nachbildung der Flüssigkeitsbewegung
- die dynamisch ähnliche Nachbildung der Sedimentbewegung

Es versteht sich von selbst, dass die richtige Nachbildung der Flüssigkeitsbewegung eine Vorbedingung für die Modellierung der Feststoffbewegung ist (ZANKE, 1982). In einem physikalischen Modell müssen die geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit eingehalten werden. Es müssen alle geometrischen Längen  $L_n$  in der Natur in einem konstanten Verhältnis zu den entsprechenden Längen  $L_m$  im Modell stehen. Das Verhältnis  $L_r$  wird als Maßstabszahl des Modells bezeichnet. Korrespondierende Zeitintervalle in der Natur und im Modell stehen in einem konstanten Verhältnis zueinander  $t_r = t_n/t_m$ . Diese Forderung stellt die kinematische Ähnlichkeit dar. Dynamische Ähnlichkeit bedeutet, dass einander entsprechende Kräfte in der Natur und im Modell stets in einem konstanten Verhältnis stehen (Kräftemaßstabszahl  $F_r = F_n/F_m$ ).

Die entscheidende Voraussetzung zur Festlegung der Ähnlichkeitsanforderungen besteht in der Identifizierung der wirksamen Kräfte, welche den Strömungsvorgang beeinflussen. Bei Strömungen mit freier Oberfläche sind Schwerkrafteinflüsse für das Strömungsfeld ausschlaggebend. Dabei ist die Froude-Zahl ein bedeutender Parameter.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times L}}$$

Für ein geometrisch ähnliches Modell ist die geometrische Kennzahl (z.B. der Verlustbeiwert) eine Funktion der relativen Rauigkeit, der Reynoldszahl und der Froudezahl. Findet in Modell und Natur dasselbe Fluid Verwendung, ist es nicht möglich, das Froudesche und das Reynoldsche Modellgesetz in einem verkleinerten Modell gleichzeitig einzuhalten. In Strömungen unter Schwerkrafteinfluss (z.B. Strömungen mit freier Oberfläche) muss neben der geometrischen Ähnlichkeit auch sichergestellt sein, dass die Froudezahl  $Fr$  in Modell und Natur gleich groß gehalten wird. Das Froudesche Modellgesetz lautet:

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g_r \times L_r}} = 1$$

wobei  $Fr_r$  die Maßstabszahl der Froudezahl ist,  $v_r$  die Geschwindigkeitsmaßstabszahl,  $g_r$  die Verhältniszahl der Gravitationskonstanten und  $L_r$  die Maßstabszahl des Modells darstellt.

Daraus ergibt sich ein Geschwindigkeitsmaßstab von:

$$v_r = (g_r \times L_r)^{1/2} = L_r^{1/2}, \text{ für } g_r = 1;$$

Mit dieser Beziehung ergeben sich folgende Übertragungsregeln für die Modellgrößen:

Längen: 
$$L_r = \frac{L_n}{L_m},$$

wobei  $L_n$  die Längen in der Natur und  $L_m$  die Längen im Modell darstellen.

Flächen : 
$$A_r = L_r^2, \text{ } A_r \text{ ist die Flächenmaßstabszahl;}$$

Geschwindigkeiten: 
$$v_r = L_r^{1/2}, \text{ bei } g_r = 1.$$

Zeiten: 
$$t_r = \frac{L_r}{v_r} = L_r^{1/2}$$

Durchfluss: 
$$Q_r = v_r \times A_r = L_r^{5/2}$$

Um eine geometrisch ähnliche Nachbildung des Wasserspiegels zu erreichen, muss bei Modellen mit freier Oberfläche das Froudesche Modellgesetz eingehalten werden. Im verkleinerten Modell haben die Zähigkeitskräfte stets eine relativ größere Bedeutung als in der Natur. Dies bleibt jedoch ohne Konsequenzen, wenn die Strömung sowohl in der Natur als auch im Modell im hydraulisch rauhen Bereich liegt.

### Ähnlichkeitsbetrachtungen hinsichtlich des Sedimenttransportes

Für jedes Sediment existiert ein sogenannter kritischer Zustand, unter dem kein Transport stattfindet. Für den kritischen Zustand kann man die zugehörige kritische Geschwindigkeit  $v_c$ , die kritische Schubspannung  $\tau_c$  oder kritische Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^*_c$  als maßgebend ansetzen. Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^*$  enthält im Gegensatz zur mittleren Geschwindigkeit  $v_m$  den Einfluss der Turbulenz, die Rauigkeit der Sohle sowie die Wassertiefe. Das Verhältnis  $v_m / u^*$  ist darum im allgemeinen veränderlich. Bei gleicher  $v_m$  kann die Schubspannung an der Sohle z.B. durch künstliche Dämpfung oder Erhöhung der Turbulenz deutlich verändert werden. Beim Strömungs- und Transportvorgang sind zwei Bereiche zu unterscheiden, bei denen entweder die

Schwere- oder die Zähigkeitswirkung überwiegt. Die folgenden dimensionslosen Parameter bestimmen einen solchen Vorgang.

$Re = \frac{v \times d}{\nu}$	REYNOLDS-Zahl
$Re_* = \frac{u_* \times h}{\nu}$	REYNOLDS-Zahl des Kornes
$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times h}}$	FROUDE-Zahl
$Fr_* = \frac{u_*^2}{\Delta \times g \times d}$	FROUDE-Zahl des Kornes

In diesen Gleichungen bedeutet  $\nu$  die kinematische Zähigkeit,  $u_*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit,  $h$  die Wassertiefe,  $d$  die Korngröße und  $\Delta$  die relative Dichte darstellen. Aufgrund ihrer Dimensionslosigkeit stellen sie gleichzeitig auch Ähnlichkeitsbedingungen zwischen Natur und Modell dar. Die Bewegung der Sedimente kann durch die folgenden dimensionslosen Parameter beschrieben werden: Die Trägheitskräfte und Gravitationskräfte werden durch die FROUDE-Zahl des Kornes beschrieben, Trägheits- und Zähigkeitseinflüsse durch die REYNOLDS-Zahl des Kornes. Das Verhältnis  $h/d$  beschreibt die Rauigkeit und  $\rho_s / \rho_w$  stellt das Massenverhältnis dar. Vollständige dynamisch ähnliche Verhältnisse in Modell und Natur sind gegeben, wenn:

$$Fr_{*r} = Re_{*r} = (h/d)_r = (\rho_s/\rho_w)_r = 1; \text{ wobei } r \text{ der Maßstab ist; z.B. } h_r = h_n \text{ (Natur) / } h_m \text{ (Modell).}$$

Befinden sich die Transportvorgänge sowohl in der Natur als auch im Modell im vollkommen hydraulisch rauhen Bereich ( $Re_* = 70$ ), ist der Zähigkeitseinfluss auf den Prozess gering. Der Einfluss von  $Re_*$  kann dann vernachlässigt werden.

Unter Verzicht auf die Bedingung  $Re_{*r} = 1$ , folgt:

$$\Delta_r = \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)_r = 1$$

$$g_r = 1 ;$$

$$h_r = d_r ;$$

$$(u_*^2)_r = d_r .$$

Da in einem FROUDE-Modell  $v_r = (h_r)^{0,5}$  ist, folgt

$$u_{*r} = v_r .$$

Wegen

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot J}$$

folgt

$$J_r = \left(\frac{u_*}{v}\right)_r = (Fr^2)_r$$

und wegen

$$\left(\frac{v}{u_*}\right)_r = Fr_r$$

ergibt sich

$$J_r = 1 .$$

Unter der Voraussetzung, dass die Größe von  $Re_*$  ohne Einfluss auf den Transportvorgang ist, kann die Natur in einem geometrisch verkleinerten Modell ohne Verzerrung dargestellt werden. Der Maßstab der Transportraten, die unter den gleichen Bedingungen stattfinden, d.h. unabhängig von  $Re_*$ , ist dann nur von der Größe von  $Fr_*$  abhängig.  $Q_{Gr} = (h^{5/2})_r$ , wobei  $Q_{Gr}$  der Geschiebetrieb [ $m^3/s$ ] ist.

### **3.3 Modell des Mündungsbereiches Schwarzbach/Leoganger Ache**

Aufgrund der genannten Entscheidungskriterien eignete sich für die Untersuchung der Geschiebetransportverhältnisse im Mündungsbereich dieser beiden Wildbäche ein physikalisches Modell am besten. Das Modell wurde mit fester Sohle ausgeführt. Die Leoganger Ache wurde in einer Länge von ca. 160 m und der Schwarzbach in einer Länge von ca. 90 m modelliert. Die Geschiebedotation erfolgte im Profil SB10 mittels eines Rüttlers. Die Zugabe erfolgte in dem Maß, dass sich ein „Teppich“ mit einer Dicke von wenigen Korngrößen im Bachbett durchgehend bewegen konnte.

Bei der Festlegung des Modellbereiches wurde auf die Modellierung des in den Querschnittsprofilen LA05 – LA07 vorkommenden Mühlgerinnes verzichtet. Der Einlauf zum Streichwehr wurde modelliert und das entnommene Wasser wurde über ein Thomson-Wehr in ein Rigol geführt. Durch die Passage der Entnahmewassermenge durch das Messwehr konnten der Durchfluss des Streichwehrs im Modell bestimmt werden.

### 3.3.1 Maßstabswahl

Aufgrund der Platzverhältnisse in der Laborhalle und der Größenanforderungen hinsichtlich der Ähnlichkeitsgesetze wurde das Modell im Maßstab 1:15 ausgeführt (KOBUS, 1984). Bei der Standortwahl waren zwei Erfordernisse zu berücksichtigen. Einerseits sollte der zu untersuchende Mündungsbereich unter dem hydraulischen Experimentierfeld situiert werden, und andererseits sollten die Entnahmestellen und die Rigole zweckmäßig genützt werden.

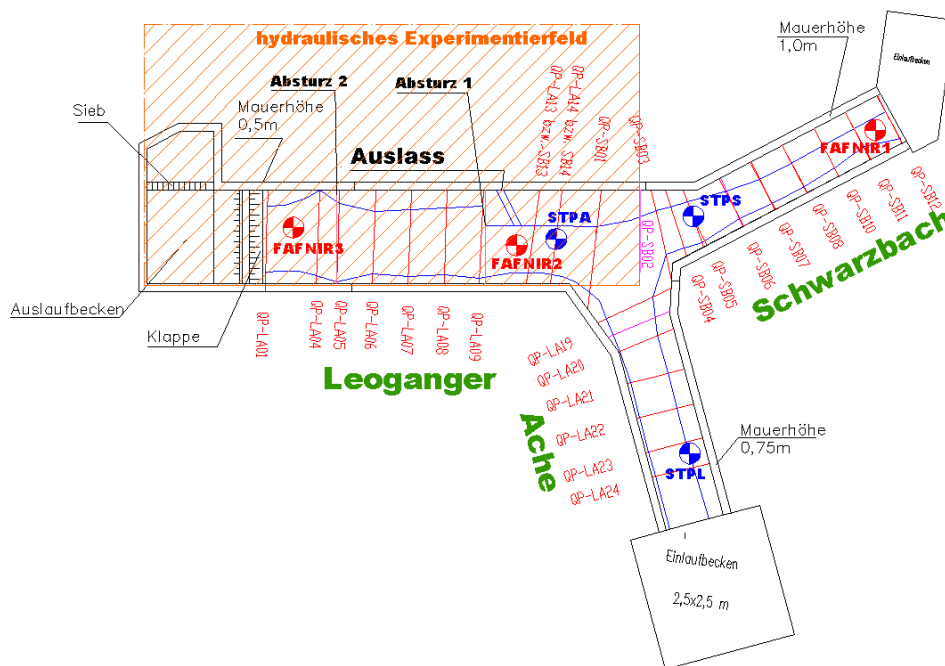


Abb. 18: Grundriss des Modells des Mündungsbereichs Schwarzbach-Leoganger Ache

Die markierten Punkte STPA, STPS sowie STPL stellen Stechpegel dar, wobei STPA als mobiler Stechpegel auf der Messanlage angebracht wurde. Die drei verwendeten FAFNIR-Sonden sind ebenfalls in ihrer Lage eingezeichnet. Zudem stellt der schraffierte Bereich einen Ausschnitt des hydraulischen Experimentierfeldes dar. Um sich besser orientieren zu können sind die Querschnittsprofile abgebildet. Diese basieren auf einer Vermessung des Institutes für alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur in Wien.



offenen Gerinnen ist in der Regel von mehreren Kornfraktionen bestimmt. Die Geschiebeprobeentnahme steht somit am Beginn der Bestimmung der modellierten Korngröße.

In Flussabschnitten variieren die Kornverteilungskurven erstens mit der Lage der Probeentnahme und zweitens zeitlich in Abhängigkeit von Durchfluss und Fließgeschwindigkeit. Da die Geschiebeproben in der Praxis bei Niederwasser entnommen werden, sind sie Zeugnis des historischen Geschiebehaushalts. Sie sind eine Situationsaufnahme eines Prozesses. Dieser Sedimenttransportprozess ist aufgrund von Schwankungen im Abflussverhalten sowie im Sedimenteintrag, die auf verschiedenen Einflüssen beruhen, einer mehr oder weniger großen Variabilität ausgesetzt. Hinsichtlich der Geschiebeprobeentnahme ist noch zu unterstreichen, dass aufgrund von Prozessen wie der Sohlpflasterung die Daten kritisch zu betrachten sind. Die entnommenen Geschiebeproben repräsentieren nicht die tatsächlichen Kornverteilungen bei vollem Geschiebetransport (Hochwasser), sondern sie stellen nur einen Anhaltspunkt für deren Abschätzung dar. Die Sohlpflasterung bewirkt eine Konzentration an größeren Körnern an der Sohle. Sie entsteht folgendermaßen: Unter ganz geringen Strömungsintensitäten kann eine Umsortierung in der oberen Sohlenschicht auftreten, wobei sich die obere Sohle selbst gegen den Sedimenttransport schützt. Feines Sediment wird ausgewaschen und nicht bewegliche Kornanteile bilden schließlich eine feste obere Lage. Unter solchen Verhältnissen kommt ein anfänglich schwacher Transport allmählich zum Erliegen. Die Sohlpflasterung ist Ergebnis einer längeren Zeitspanne, bei der die sohlnahe Fließgeschwindigkeit nahe an der kritischen Geschwindigkeit liegt. Kommt es infolge von Hochwässern zu einem Transport der Deckschicht, so ist aufgrund des fehlenden Schutzes eine größere Geschiebefracht zu erwarten. Die abgelagerten Korngrößen sind aufgrund der oben genannten Phänomene sehr heterogen verteilt. Deshalb stellt sich die Frage, welche Kornverteilungskurve für die Betrachtung des Geschiebetransports beim Hochwasser als repräsentativ angenommen werden soll.

### Die repräsentative Korngröße

Zur Erfassung des Geschiebetransportes gilt es jenen Korngrößenfaktor oder jenes Korngrößenverhältnis auszuwählen, das die Bewegung eines gemischtkörnigen Geschiebes am besten charakterisiert. Untersuchungen zeigen, dass die Korngrößenverteilung für den Geschiebetransport wenig Bedeutung hat, und dass es zweckmäßig ist, eine repräsentative Korngröße oder einen engeren Bereich der Kornverteilungskurve zu wählen. Um qualitative Ergebnisse hinsichtlich der

Ablagerungsvolumina zu erhalten, sollte die gewählte Kornfraktion den natürlichen Maßen möglichst entsprechen, unter den Modellverhältnissen im oberen Modellierungsbereich transportiert werden und mit theoretischen Arbeiten hinsichtlich des Sedimenttransportes im Einklang stehen.

Zur Ermittlung der repräsentativen Korngröße sind drei Schritte durchgeführt worden. Einerseits wurden vom gesamten unteren Schwarzbachbereich 30 Geschiebeproben entnommen. Zum Zweiten wurden speziell vom Mündungsbereich Geschiebeproben gezogen. Die beiden Kornverteilungskurven sind in Abb. 20 dargestellt. Aus diesen Daten wurde aufgrund von im Schrifttum angeführten Formeln die repräsentative Korngröße ermittelt.

Die meisten Formeln zur Abschätzung des Transportvorganges basieren auf einem als maßgebend angenommenen Korndurchmesser, i.d.R.  $d_{40}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  oder auf einem auf verschiedener Weise bildbaren maßgebenden  $d_m$ -Wert. In einigen Formeln wiederum soll der Transport durch Aufteilen der Kornverteilung in Einzelfractionen ermittelt werden. Die Berechnung wird dann auf der Grundlage der zugehörigen Klassendurchmessers vorgenommen. Anschließend werden die Einzeltransportraten anteilig aufsummiert. Im Schrifttum gehen hinsichtlich der Wahl einer repräsentativen Korngröße die Meinungen der Autoren auseinander. Im folgenden sind einige Autoren und das Publikationsjahr mit den repräsentativen Korngrößen angeführt:

Autor	Jahr	Korngröße
Einstein	1950	$d_{35}$
Shields	1936	$d_{50}$
Herheulidze	1958	$d_{70}$
Bauer	1965	$d_{90}$
Gessler	1965	$d_{max}$

Tab. 2: Repräsentative Korngrößen (STELCZER, 1981)

Die Tabelle zeigt eine zeitliche Entwicklung zu größeren repräsentativen Korngrößen. Im Schrifttum steht jedoch auch geschrieben: Für Untersuchungen der Sedimentbewegung sollten kleinere repräsentative Korngrößen gewählt werden, da die bewegten Körner in der Regel feiner sind als Körner aus der Sohle (CHIEN und WAN, 1999). Als eine repräsentative Korngröße wurde deshalb  $d_{50}$  aus den Geschiebeproben des Mündungsbereiches gewählt. Das ist jene Korngröße einer Korngrößenverteilung, bei der 50 Gewichtsprozent der Körner kleiner sind. Die Größe von  $d_{50}$  beträgt 16 mm.

Als zweiten Ansatz wurde die modifizierte Form der Gleichung von MEYER-PETER und MÜLLER, 1949, zit. in ZANKE, (1982); für den maßgebenden Korndurchmesser natürlicher Sedimente  $d_m$  herangezogen:

$$d_m = \frac{\sum_{p=10\%}^{p=90\%} (d_i \times \Delta p)}{\sum_{p=10\%}^{p=90\%} \Delta p}$$

wobei  $d_i$  die einzelnen Korngrößen der verschiedenen Kornfraktionen und  $\Delta p$  den Gewichtsprozentanteil der jeweiligen Kornfraktion darstellt. Die Randbereiche  $d < d_{10}$  und  $d > d_{90}$  bleiben bei der Berechnung unberücksichtigt. Der maßgebende Korndurchmesser für natürliche Sedimente beträgt im Mündungsbereich aufgrund der Formel von MEYER-PETER und MÜLLER, 1949; zit. in ZANKE, 1982; 36 mm.

Es wurde ein Korngrößenbereich zwischen  $d_{50}$  (16 mm) der Kornverteilungskurve des Mündungsbereiches und  $d_m$  (36 mm) als repräsentativ gewählt.

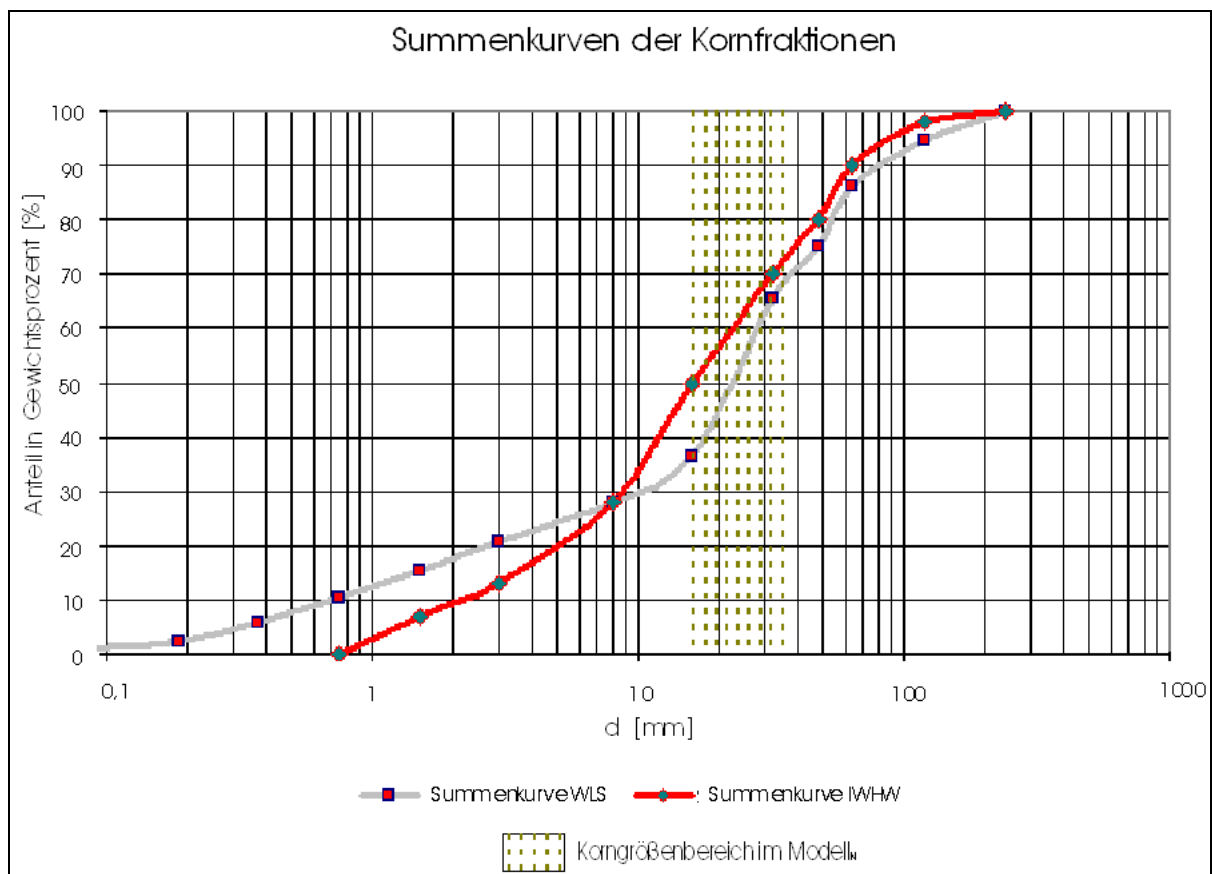


Abb. 20: Summenkurven der Geschiebeproben und Korngrößenbereich des Modells<sub>N</sub>

Zu den Einschränkungen der Aussagekräftigkeit der ermittelten Kornverteilungskurven aufgrund von natürlichen Gründen kommen Überlegungen hinsichtlich des physikalischen Modells hinzu. Es bestehen Unterschiede der

Rahmenbedingungen durch die Übertragung der Charakteristika der natürlichen Prozesse und Zustände auf jene des Modells. Die simulierten Prozesse beschränken sich auf den Geschiebetransport. Suspendierte Korngrößen passieren zum Großteil den Mündungsbereich, und werden während einer Hochwasserwelle wegtransportiert.

Beim natürlichen Geschiebetransport während Extremereignisse des Abflusses bewegen sich kleine Korngrößenfraktionen mit höherer Geschwindigkeit als große Körner. Sie gehen also vom Volumen gesehen stärker in die Verteilung der transportierten Körner ein als die langsameren großen Korngrößen.

Es ist zweckmäßig verschiedene Zustände der Sohle nach ihrem Einfluss auf das Transportverhalten zu unterscheiden. „For understanding bed-load transport phenomena, information on the bottom is essential since movement takes place over the bottom“ (STELCZER, 1981). Beim Transportverhalten des Sohlbettmaterials und des „wash load“ kann man zwei Zustände unterscheiden: Der Fall, bei dem beide Feststofftypen die gleichen kritischen Geschwindigkeiten aufweisen und die Situation, bei der das Sohlbettmaterial nicht im Transport involviert, oder der Transportbeginn erst bei wesentlich höheren Geschwindigkeiten erfolgt. Das „wash load“ ist jenes transportierte Sediment, das nicht zur Sohle des Baches gehört. Beim Geschiebetransport während eines Hochwasserereignisses kommt es zu Umlagerungen der Sedimente und so zu einem verändertem Abflussverhalten. Dabei ist die Sohle mehr oder weniger in Bewegung. Ist bei einer physikalischen Modelluntersuchung das Geschiebetransportvermögen von Interesse, so ist es zweckmäßig die Sohle zu fixieren, um den Vorgang reproduzierbar machen zu können. Dabei ergibt sich eine Vereinfachung gegenüber den natürlichen Prozessen.

## 4 Modellversuch: Daten und Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Messdaten und Ergebnisse der Modellversuche. Es wurden drei Modellausführungen untersucht, nämlich IST-Zustand, Umbauvariante mit Trennwand und Umbauvariante mit abgesenkter Trennwand. In dieser Reihenfolge werden sie auch in diesem Bericht näher erläutert. Bei jeder Modellvariante wurden zuerst Reinwasserversuche zur Ermittlung der hydraulischen Kapazität durchgeführt. Die Geschiebetransportversuche sollen vor allem Erkenntnisse über die Sedimenttransportverhältnisse bei Extremereignissen bringen. Vor allem kurzfristige Gesichtspunkte hinsichtlich der Geschiebeproblematik (siehe Kap. 2.1.4) wie etwa ein Einstau des Schwarzbaches bei hohen Abflüssen in der Leoganger Ache sind von Interesse.

### 4.1 *IST-Zustand*

#### 4.1.1 Fließcharakteristik

„Selbst bei völliger Unterbindung des Geschiebetransportes durch eine Sperre kann durch entsprechendem Geschiebeangebot aus Ufer- oder Hangbereichen unterhalb der Sperre bis zu 6000 m<sup>3</sup> Feststoffe in den Ortsbereich gelangen können" (HÜBL und LEBER, 2000). Bei diesem möglichen Szenario stellt das Mündungsgebiet den sensibelsten Bereich bezüglich der Gefährdungen durch Feststoffablagerungen dar. Um den Mündungsbereich dementsprechend zu untersuchen, ist zunächst die Ermittlung der hydraulischen Kapazität des Mündungsbereiches und die Feststellung der Ursachen von möglichen Ablagerungsbereichen bzw. von kritisch hohen Wasserständen zweckmäßig. Die Ergebnisse sollen als Referenzparameter für den Vergleich mit anderen Versuchsvarianten dienen. Ziel der Untersuchung ist es darüberhinaus die kritischsten Fälle für weiterführende Versuche festzulegen. Um die Fließcharakteristik erfassen zu können, wurden folgende Parameter für unterschiedliche Fließabschnitte im Mündungsbereich untersucht.

- Der Strömungsverlauf setzt sich aus der Messung der Fließgeschwindigkeit sowie der Feststellung der Strömungsrichtung zusammen. Die Fließgeschwindigkeit wurde mit einem Mikroflügel gemessen. Die Messung erfolgte sohlnahe und der angegebene Messwert stellt den Mittelwert einer fünf Sekunden dauernden Messung dar.
- Der Wasserstand wurde mit stationären sowie mobilen Stechpegel aufgenommen. Am Modell wurden drei fixe Pegel und ein mobiler

(koordinative Positionierung mittels wasserbaulichen Experimentierfeld) angebracht. Es wurden auch Wasserstände außerhalb des wasserbaulichen Experimentierfeldes gemessen.

Das ungünstigste Szenario hinsichtlich massiver temporärer Geschiebeablagerungen im Mündungsbereich bildet ein Einstau des Schwarzbaches durch eine hochwasserführende Ache dar. Es stellt sich die Frage, ab welchem Durchfluss in der Leoganger Ache bedeutende Veränderungen im Durchflussverhalten des unteren Schwarzbaches zu beobachten sind, und in welchem Ausmaß sich diese Veränderungen ausbilden. Um den Einfluss beschreiben zu können, wurden aus den Messwerten Pegelschlüsselkurven für den Pegel STPS bei der Bundesstraßenbrücke bei verschiedenen Durchflüssen der Leoganger Ache erstellt. Zusätzlich wurden für die entsprechenden Durchflüsse im Schwarzbach die Grenztiefen ermittelt. Dazu wurde die Formel für rechteckförmige Querschnitte verwendet. Reinwasserversuche dienten zur Ermittlung der Fließcharakteristik. Die Ergebnisse wurden den beobachteten Fließabschnitten zugeordnet, um die ungünstigsten Hochwasserkombinationen für die Geschiebedotationsversuche zu erhalten.

Versuchsprogramm und Eingangsdaten

Zur Ermittlung der Fließcharakteristika wurden den Versuchen folgende Hochwasserkombinationen der beiden Wildbäche zugrundegelegt.

Leoganger Ache	Schwarzbach		
	HWW1	HWW2	HWW3
HQ <sub>1</sub>	V.0.R.1.1	V.0.R.2.1	V.0.R.3.1
HQ <sub>30</sub>	V.0.R.1.2	V.0.R.2.2	V.0.R.3.2
HQ <sub>100</sub>	V.0.R.1.3	V.0.R.2.3	V.0.R.3.3

*Tab. 3: Übersicht der Versuche zur Ermittlung der Fließcharakteristik*

HWW1, HWW2 und HWW3 sind drei Abflussganglinien infolge eines hundertjährigen Niederschlagsereignisses im Einzugsgebiet des Schwarzbaches (siehe Kap. 2.2.1), wobei HWW1 mit einer Abflussspitze von ca. 11 m<sup>3</sup>/s die Folge eines zweistündigen gleichverteilten Niederschlagsereignisses ist, HWW2 (Q<sub>max</sub> = 21 m<sup>3</sup>/s) auf einem einstündigen gleichverteilten Ereignis beruht und HWW3 (Q<sub>max</sub> = 44 m<sup>3</sup>/s) einem dreißigminütigen endbetonten Niederschlagsereignis folgt. Die drei Hochwasserwellen wurden ins Versuchsprogramm genommen, um ihre unterschiedlichen Auswirkungen dokumentieren zu können. Dabei sind die

Abflussganglinien infolge längerer Niederschlagsereignisse vor allem hinsichtlich der Ablagerungsproblematik von Interesse, hingegen könnte Hochwasserwelle drei durch den hohen Durchfluss und damit durch einen hohen Wasserstand im Schwarzbach gefährdend wirken. In den meisten Fällen passieren die Hochwasserwellen zweier Wildbäche den Mündungsbereich zeitversetzt. Dabei kommt es zu geringen gegenseitigen Beeinflussungen der Durchflussbedingungen. Als erstes Untersuchungsziel dieser Arbeit gilt es die für Geschiebeablagerungen im unteren Schwarzbach ungünstige Verhältnisse eines gleichzeitigen Hochwasserscheiteldurchgangs zu erforschen. Die Durchflüsse der Leoganger Ache und des Schwarzbaches wurden stationär beschickt. Der Modellbachabschnitt der Leoganger Ache wurde mit Abflüssen folgender charakteristischen Hochwasserereignisse dotiert (Quelle: Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen):

HQ<sub>1</sub> 11m<sup>3</sup>/s

HQ<sub>30</sub> 50m<sup>3</sup>/s

HQ<sub>100</sub> 80m<sup>3</sup>/s

Die drei HQ-Abflussganglinien des Schwarzbaches wurden dem Bericht zur Hydrologie des Schwarzbachs im Gemeindegebiet von Leogang/Salzburg entnommen (VOLK, 1999). Bei den Reinwasserversuchen wurden die Abflussscheitelwerte der Hochwasserwelle als konstanter Durchfluss angesetzt.

### **Fließabschnitte**

In Mündungsbereichen gibt es im allgemeinen eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Bäche. Diese hängt von dem jeweiligen Durchfluss des anderen Baches ab. Betrachtet man den Schwarzbach im hydraulischen Modell so stellt man fest, dass bei steigendem Durchfluss der Leoganger Ache der von ebendieser beeinflusste Fließabschnitt von der Mündung immer weiter flussauf reicht. Dieser Abschnitt weist eine geringere Fließgeschwindigkeit, einen höheren Wasserstand und zumeist strömende Fließverhältnisse auf. Der unbeeinflusste Schwarzbach ist aufgrund des hohen Sohlgefälles durchwegs durch schießende Verhältnisse charakterisiert. Gleiches gilt für den im Modell nachgebildeten Bachabschnitt der Leoganger Ache flussauf der Mündung. Der Bereich von der Mündung bis zum ersten Absturzbauwerk bildet ebenfalls einen Fließabschnitt.

Die im Lageplan dargestellten Fließabschnitte des beeinflussten und unbeeinflussten Schwarzbaches sind in ihrer Lage und Größe je nach der Durchflusskombination der beiden Wildbäche variabel. Der durchflussbeeinflusste Abschnitt im unteren Schwarzbach verschwindet bei einem Trockenfallen der Leoganger Ache.

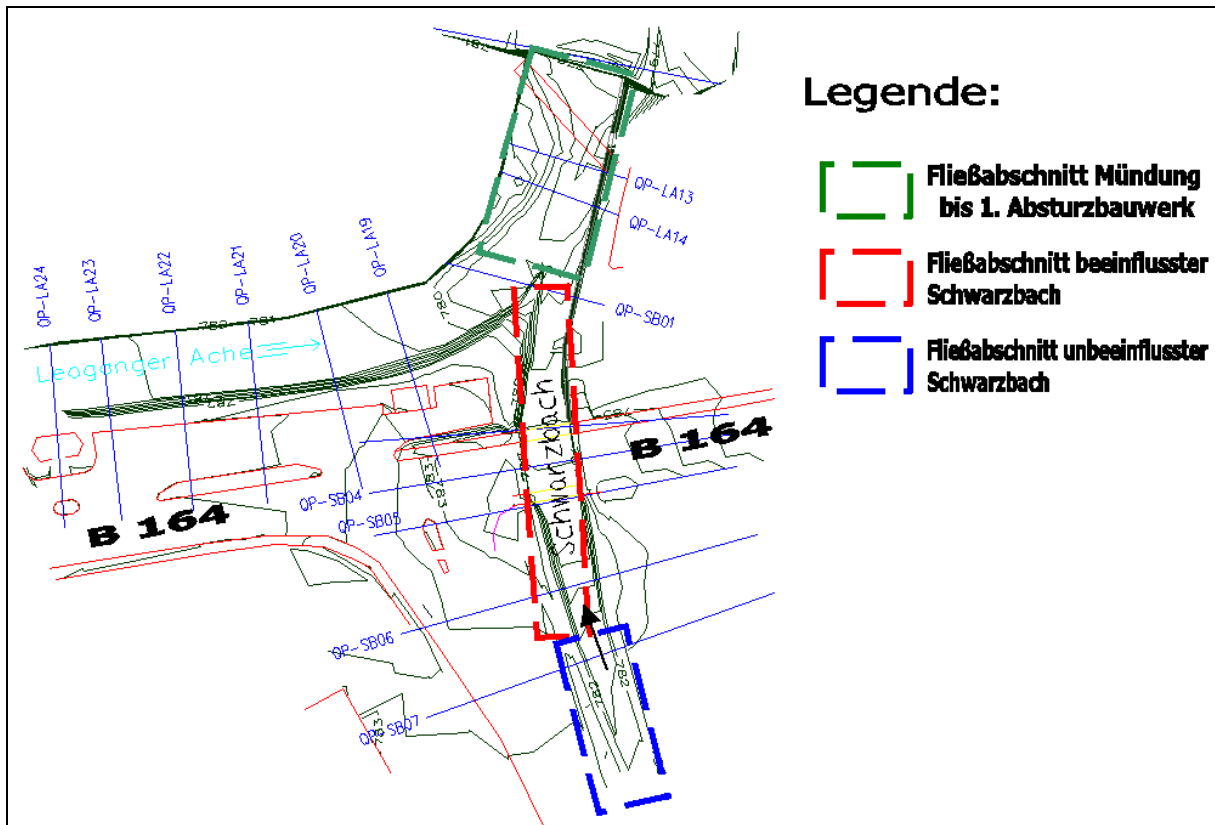


Abb. 21: Lageplan des Mündungsbereiches mit eingezeichneten Fließabschnitten

### Unbeeinflusster Fließabschnitt des Schwarzbaches

Zur Erläuterung wird der Versuch V.0.R.Referenz beschrieben, der im Schwarzbach einen Durchfluss von 11 m<sup>3</sup>/s und in der Leoganger Ache einen Durchfluss von 0 m<sup>3</sup>/s führt. Diese Untersuchung dient dazu, Referenzparameter zu ermitteln und so den Einfluss der Leoganger Ache auf die Durchflussbedingungen im Schwarzbach quantifizieren zu können. Die Auftrittswahrscheinlichkeit dieser Durchflusskombination ist relativ gering. Vorstellbar wäre eine Situation nach einer längeren Trockenphase im Einzugsgebiet der Leoganger Ache und einem Gewitter mit lokalen Starkregen im Schwarzbacheinzugsgebiet.

### Der Strömungsverlauf

Im Abschnitt vor der leichten Rechtskurve des Schwarzbaches im Bereich der Bundesstraßenbrücke beträgt die mittlere sohlnahe Geschwindigkeit etwa 2.5 m/s.

Der Bereich nördlich der Brücke bis zur Mündung weist rechtsufrig eine geringere Geschwindigkeit auf. Es sind hydraulische Verluste durch Ablösung der Strömung bei der Brücke festzustellen. Diese verminderte Geschwindigkeit beträgt ca. 1.0 m/s. Durch die Rechtskurve des Schwarzbaches verlagert sich die Hauptströmung und somit auch der Bereich der größten Fließgeschwindigkeit auf die linke Bachbettseite.

Der Wasserstand

Am Stechpegel STPS beim Profil SB05 knapp südlich der Bundesstraßenbrücke beträgt der Wasserstand 0.53 m und stellt somit keine Gefahr für die Brücke dar. Der Durchfluss in Schwarzbach wird gefahrlos abgeführt. Der maximale Wasserstand während HWW3 im Schwarzbach beträgt bei der Brücke 1.37 m. Bei einer Höhe des Brückenquerschnittes von ca. 2.00 m, ergibt sich ein Freibord von über 0.60 m.

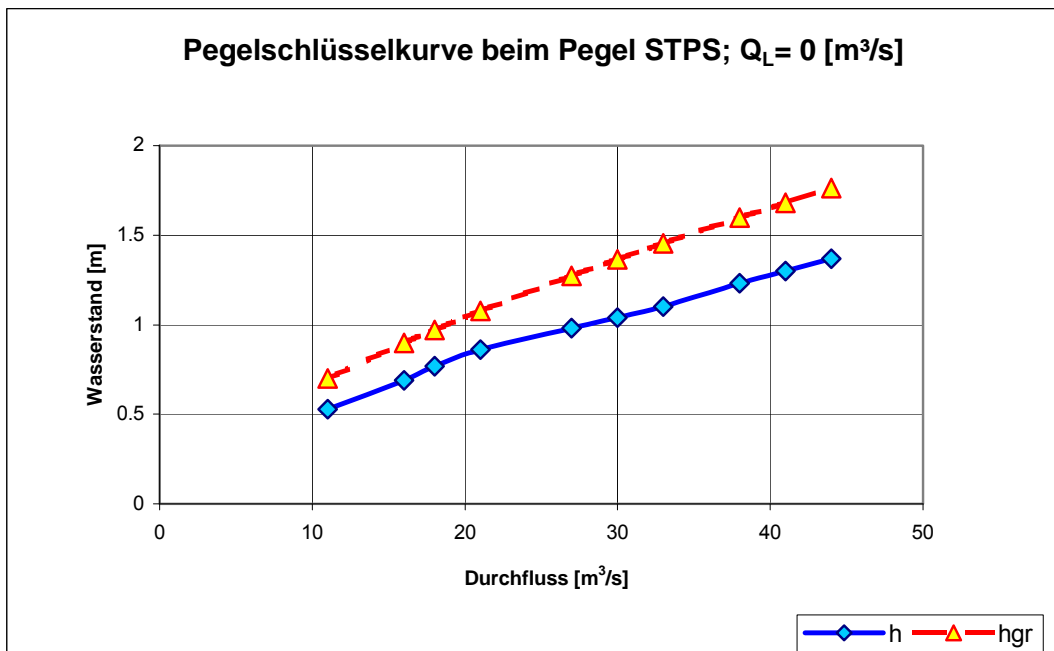


Abb. 22: Pegelschlüsselkurve und Schlüsselkurve der Grenzwassertiefe  $h_{gr}$  am Pegel STPS

Aus Abb. 22 ist zu entnehmen, dass der Abfluss im unbeeinflussten Schwarzbach bei jedem der betrachteten Durchflüsse am Pegel STPS im schießenden Bereich liegt. Das ist durch das hohe Gefälle von 3.4 % zurückzuführen. Der Wasserstand liegt zwischen 0.2 m im unteren Durchflussbereich und 0.4 m im oberen unterhalb der Grenztiefe.

## Zusammenfassung

Der in seinem Durchfluss unbeeinträchtigte Schwarzbach weist bei den gesamten simulierten Durchflüssen durchwegs schießende Verhältnisse auf. Die Fließgeschwindigkeiten liegen bei einem Durchfluss von  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  von  $1.0 \text{ m/s}$  in ruhigen Zonen, bis zu  $2.5 \text{ m/s}$  in der Hauptströmung. Der Wasserstand bei der Brücke beträgt bei einem deißigminütigen endbetonten 100-jährlichen Niederschlagsereignis ( $44 \text{ m}^3/\text{s}$ )  $1.37 \text{ m}$  und stellt keine akute Gefahr dar.

### Durchflussbeeinträchtigter Schwarzbach

Von den neun durchgeführten Reinwasserversuchen möchte ich zwei aussagekräftige Versuche herausgreifen und anschließend die Fließcharakteristika im beeinflussten Bereich beschreiben. Zunächst folgt eine Analyse des Versuches V.0.R.1.1, bei dem die Durchflüsse in beiden Wildbächen  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  betragen.

### Der Strömungsverlauf

Ab dem Profil SB07 ist ein störungsfreier, schießender Abfluss zu beobachten. Die Hauptströmung des Schwarzbaches verläuft im Bereich der Bundesstraßenbrücke zu deren linken Brückenmauer. Es ist festzustellen, dass linksufrig die Geschwindigkeit vom Profil SB05  $3.3 \text{ m/s}$  bis zum Ende der Brücke beim Profil SB03 auf ca.  $1.94 \text{ m/s}$  abnimmt. In der Bachbettmitte ist ein leichter Rückgang der Geschwindigkeit im oben genannten Bereich auszumachen (von  $2.94 \text{ m/s}$  auf  $2.32 \text{ m/s}$ ). Hingegen tritt rechtsufrig ein deutlicher Abfall der Geschwindigkeit zwischen dem Profil SB05 ( $1.98 \text{ m/s}$ ) auf  $0.35 \text{ m/s}$  im Profil SB04 auf. Von der Brücke flussab ergeben sich auch Bereiche im Schwarzbach mit geringer Fließgeschwindigkeit. Diese „ruhigen“ Zonen reichen rechtsufrig mit einer Breite von  $1.05 \text{ m}$  vom Profil SB05 bis  $6.00 \text{ m}$  flussab des Profiles SB03. Im linken Bachbettbereich beginnt die Totwasserzone bei SB03 und reicht  $6.00 \text{ m}$  flussab. Der untere Bereich des Mündungsspornes wird vom Ende des Spornes bis  $6.75 \text{ m}$  flussauf überströmt.

An der engsten Stelle im Schwarzbach zwischen Brückenende und Mündung beim Profil SB 02 ergibt sich die höchste Geschwindigkeit linksufrig mit  $2.4 \text{ m/s}$ . Im direkten Mündungsbereich beim Profil SB01 misst man schwarzbachseitig im ganzen Bachbett relativ hohe Geschwindigkeiten mit der höchsten im Schwarzbach gemessenen Geschwindigkeit von  $3.37 \text{ m/s}$  in der Mitte.

Die Wasserstände

Bei einem Durchfluss im Schwarzbach von 11 m<sup>3</sup>/s beträgt der Wasserstand beim Profil SB05 0.55 m. Die Wasserspiegelhöhe im Bereich zwischen LA24 und LA23 beträgt 0.7 m. Bei diesen Durchflüssen der beiden Wildbäche ergeben sich keinerlei Gefährdungen der Uferbereiche. Lediglich der Sporn im Mündungsbereich wird im unteren Teil überströmt.

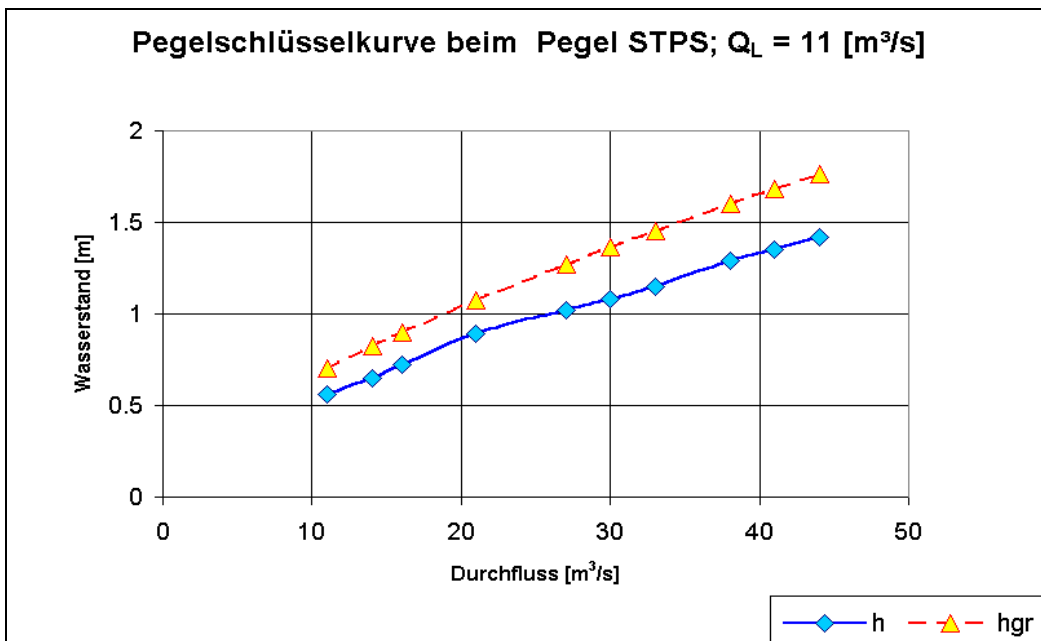


Abb. 23: Pegelschlüsselkurve und Schlüsselkurve der kritischen Wassertiefe am Pegel

STPS

Vergleicht man die Pegelschlüsselkurve des Schwarzbaches bei einem Durchfluss von 11 m<sup>3</sup>/s in der Leoganger Ache mit jener des unbeeinflussten Schwarzbaches, so stellt man keinen wesentlichen Unterschied fest. Die Wasserstände sind annähernd gleich. Daraus ergibt sich, dass bei Versuch V.0.R.1.1 beim Pegel STPS kein Einfluss der Leoganger Ache auftritt. Der Abfluss im Schwarzbach beim Pegel STPS ist im betrachteten Durchflussbereich schießend, wobei bei geringeren Durchflüssen der Wasserstand näher dem kritischen Wasserstand liegt, wohingegen bei großen Durchflüssen der Abstand größer wird.



Abb. 24: Färbeversuch V.0.R.1.1; Blick flussauf

In Abb. 24 sind die Zonen mit niedriger Fließgeschwindigkeit an den Ufern des unteren Schwarzbaches zu sehen. Beide Bäche nehmen in etwa dieselbe Querschnittsfläche im vereinigten Gerinne ein.

#### Zusammenfassung:

Durch den Einfluss der Leoganger Ache ergibt sich eine stark ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung im Schwarzbach im Bereich des Profils SB04 bis zur Mündung.

Dort bildet sich im linken Bachbettbereich eine Zone mit geringer Fließgeschwindigkeit. Gefährdungen für die Uferbereiche durch hohe Wasserstände treten bei dieser Hochwasserkombination nicht auf.

#### Versuch V.0.R.1.3

$$Q_S = 11 \text{ m}^3/\text{s} ; Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s} (\text{HQ}_{100})$$

#### Der Strömungsverlauf

Farbversuche mit Kaliumpermanganat zeigen eine Kehrströmung nahe des linken Ufers bis ca. 2,5 m flussab SB07. Der Bereich der Kehrströmung ist ca. 2.25 m breit. Auf der rechten Seite des unteren Schwarzbaches erstreckt sich ein Bereich mit geringer Fließgeschwindigkeit bzw. ein Bereich mit Kehrströmung von 2.55 m flussauf SB05 bis flussab SB01. Er reicht am Ende des Mündungsspornes fast über

die gesamte Bachbettbreite. Im Bachabschnitt flussauf der Bundesstraßenbrücke befindet sich die Hauptströmung mittig, so ist bei Profil SB05 dort die größte Geschwindigkeit mit 1.74 m/s. Diese Hauptströmungslage verlagert sich weiter flussab nach links. Die mittige Geschwindigkeit sinkt im Profil SB04 auf 0.43 m/s, wohingegen  $v_{\text{links}}$  von 1.28 m/s beim Profil SB05 auf 1.90 m/s in SB04 steigt. In allen Profilen ist von SB05 bis zur Mündung rechtsufrig eine geringe Fließgeschwindigkeit festzustellen. Im Mündungsprofil SB01 ist im Schwarzbach eine Reduktion der Fließgeschwindigkeit besonders links und mittig gegenüber V.0.R.1.2 zu beobachten. So beträgt die  $v_{\text{mitte}}$  nur noch 1.05 m/s. Die Hauptströmung verlagert sich von der Mitte nach links. Durch den Rückstau der Leoganger Ache bildet sich vor allem im rechten Bachbett eine Zone mit geringer Fließgeschwindigkeit. Kehrströmungen an den Uferseiten reichen bis flussauf der Bundesstraßenbrücke.

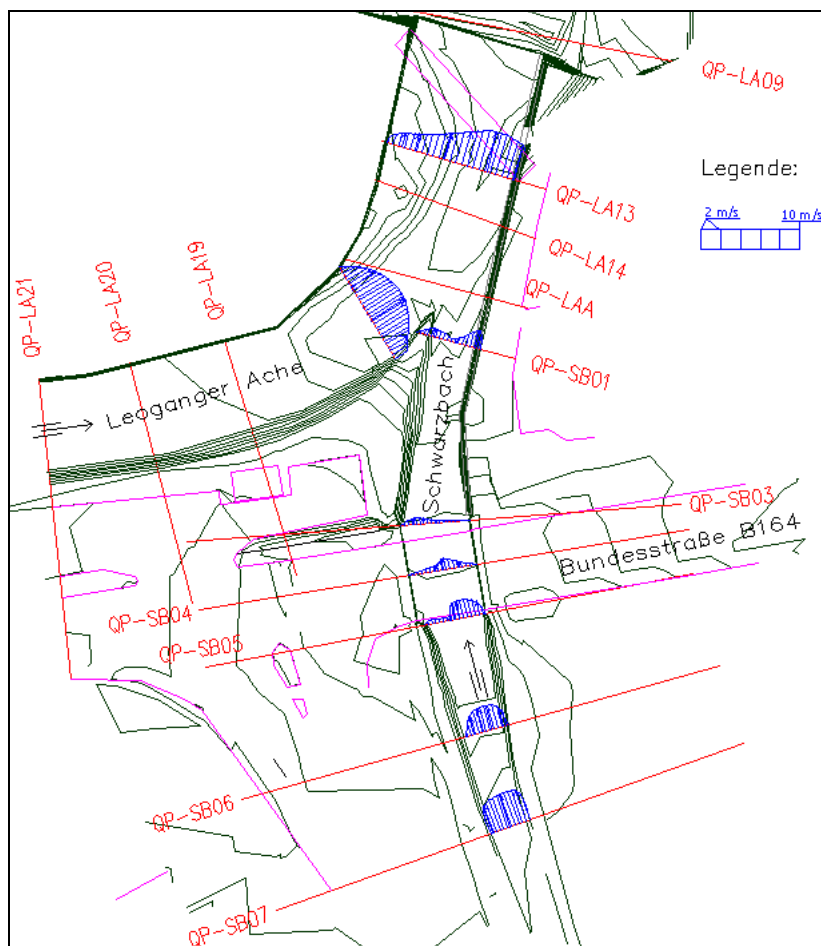


Abb. 25: Lageplan mit der sohlnahen Fließgeschwindigkeitsverteilung in einzelnen Profilen

### Die Wasserstände

Der Wasserstand im Schwarzbach beträgt beim Stechpegel STPS 1.34 m, das ergibt einen Aufstau des Schwarzbaches gegenüber V.0.R.1.1 von zusätzlich 0.79 m. Die Leoganger Ache ist beim Stechpegel STPL 2.12 m und nach Einmündung des Schwarzbaches beim Stechpegel STPA 2.49 m tief.

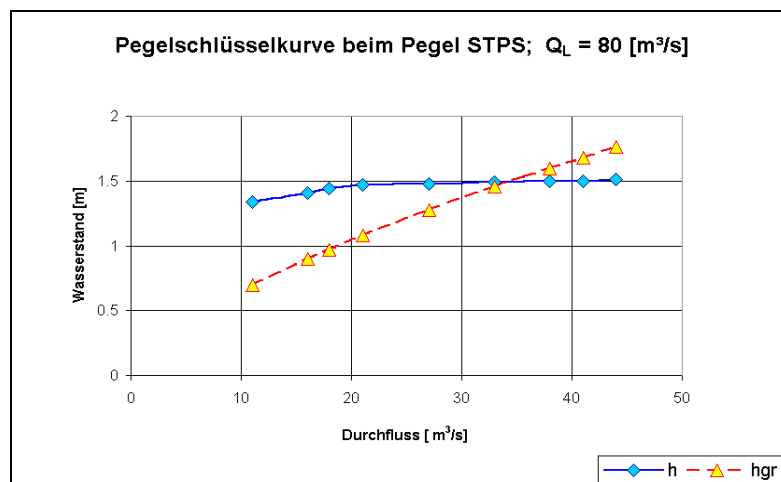


Abb. 26: Pegelschlüsselkurve beim Pegel STPS

An der Pegelschlüsselkurve ist zu erkennen, dass der Abfluss im Schwarzbach bis ca.  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  im strömenden Bereich liegt. Darüber wird der Abfluss schießend. Der Rückstauereffekt der Leoganger Ache ist besonders bei kleinen Durchflüssen im Schwarzbach stark ausgebildet, so beträgt bei einem Durchfluss von  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  der Wasserstand beim Pegel STPS  $1.34 \text{ m}$ . Bei  $44 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt die Abflusstiefe bei etwa  $1.50 \text{ m}$ , um nur  $0.16 \text{ m}$  höher. Im Durchflussbereich von  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  bis  $44 \text{ m}^3/\text{s}$  kommt es zu keiner Erhöhung des Wasserspiegels, der erhöhte Durchfluss wird durch eine höhere Fließgeschwindigkeit abgeführt.

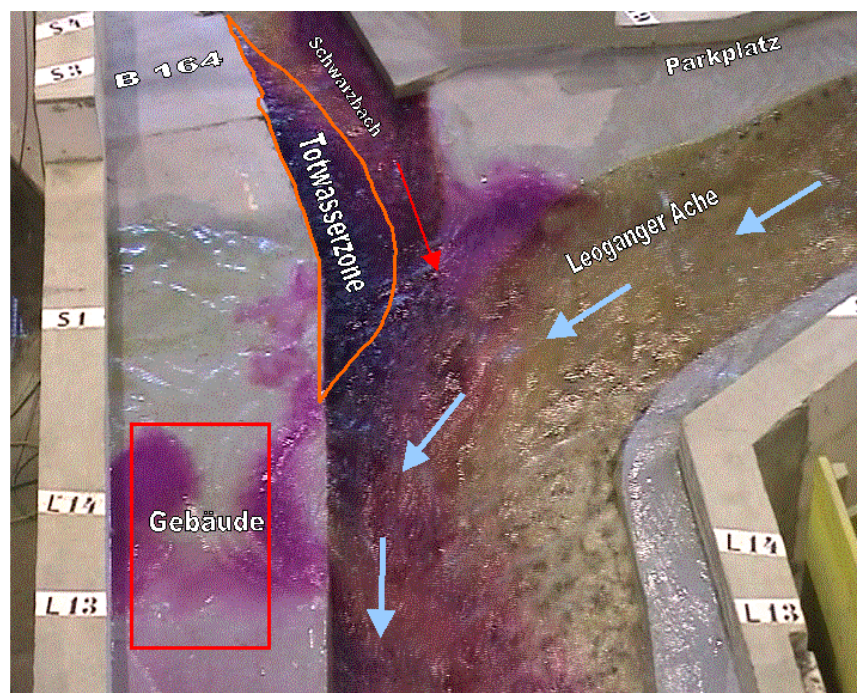


Abb. 2: Reinwasserversuch V.0.R.1.3

Der Einfluss der Leoganger Ache reicht im unteren Schwarzbach rechtsufrig  $2.5 \text{ m}$  flussauf dem Profil SB05 und linksufrig  $2.5 \text{ m}$  flussab dem Profil SB07. Es ergibt sich

also bei einem Durchfluss der Leoganger Ache von  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  erwartungsgemäß ein größerer Rückstauereffekt als bei  $Q_L = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### Vergleich des beeinflussten mit dem unbeeinflussten Fließabschnitt des Schwarzbaches

Die Fließcharakteristika des unbeeinflussten Fließabschnittes des Schwarzbaches bei einem Durchfluss von  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  lassen sich wie folgt zusammenfassen. Im Hauptströmungsbereich herrschen durchwegs schießende Abflussverhältnisse. Der Wasserstand ist niedrig und die Geschwindigkeiten bewegen sich linksufrig im Bereich von  $2.5 \text{ m/s}$ . Im Bereich der Brücke bildet sich rechtsufrig eine Zone mit Fließgeschwindigkeiten um  $1.0 \text{ m/s}$ .

Die Wasserstände sind im unteren beeinflussten Schwarzbach ( $Q_S = 11 \text{ m}^3/\text{s}$ ) generell höher als im unbeeinflussten. Die Fließgeschwindigkeitsverteilung ist sehr ungleichmäßig, vor allem rechtsufrig sind niedrige Fließgeschwindigkeiten festzustellen. Die Fließgeschwindigkeiten sind im unbeeinflussten Schwarzbach gleichmäßiger verteilt, so liegt die maximal gemessene Geschwindigkeit im Mündungsprofil um  $1.8 \text{ m/s}$  niedriger als im selben Profil beim beeinflussten Schwarzbach. Hingegen sind im zweiten Fall Strömungsbereiche mit sehr geringer Geschwindigkeit (um  $0.3 \text{ m/s}$ ) gegeben. Die minimale Geschwindigkeit beim unbeeinflussten Schwarzbach beträgt immer noch bei ca.  $1.0 \text{ m/s}$ . Der Einfluss der Leoganger Ache reicht bis ca. Profil SB04. Die Wasserstände beim Pegel STPS bei beiden betrachteten Szenarien liegt bei ca.  $0.55 \text{ m}$ . Er ist von der Leoganger Ache unbeeinflusst. Beim Versuch V.0.R.1.3 ist der Einfluss der Leoganger Ache auf das Fließverhalten des unteren Schwarzbaches besonders ausgeprägt. Es kommt zu einer Wasserspiegelerhöhung um  $0.79 \text{ m}$ , der durch den Aufstau des Schwarzbaches verursacht wird.

### Fließabschnitt Mündung – 2.Absturzbauwerk

#### Versuch V.0.R.1.1

$$Q_S = 11 \text{ m}^3/\text{s} ; Q_L = 11 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### Der Strömungsverlauf

Im Abschnitt von der Mündung bis zum 1. Absturzbauwerk verläuft die Hauptströmung rechts. Dies ist auf den Linksbogen der Leoganger Ache

zurückzuführen. Aufgründessen ist ein größerer Durchfluss auf der rechten Seite des Absturzes festzustellen. Ein Bereich mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit ist im rechten Bereich des 1. Absturzes bis 21.00 m flussab mit einer Breite von 2.25 m zu beobachten. Kehrwasserbereiche ergeben sich im rechten Bachbettbereich flussab des 1. Absturzes bis 7.5 m flussab, sowie rechts- und linksufrig flussab des 2. Absturzes.

Im Bachbett der Leoganger Ache misst man geringere Geschwindigkeiten als im selben Profil im Schwarzbach, wobei man rechts die höchsten Geschwindigkeiten beobachtet. Im Abschnitt zwischen SB01 und dem ersten Absturzbauwerk ist die größte Geschwindigkeit rechts und liegt bei rund 2.70 m/s. Im Profil LA19 ist eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung mit ca. 1.95 m/s gegeben.

### Der Wasserstand

Es wird ein Teil der Schotterbank in der Innenkurve der Leoganger Ache überflutet. Der trockene Bereich erstreckt sich von 6.00 m flussauf des 1. Absturzes bis ca. 3.00 m flussab des Profiles SB01. Die Breite dieser trockenen Zone beträgt 3.00 m. Rechts davon bildet sich eine ebensobreite strömungsberuhigte Zone.

### Versuch V.0.R.1.3

$$Q_S = 11 \text{ m}^3/\text{s} ; Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s} (\text{HQ}_{100})$$

### Strömungsverlauf

Im Profil LA13 tritt die höchste Geschwindigkeit rechts mit 4.7 m/s auf. Linksseitig ist die Fließgeschwindigkeit mit 2.8 m/s niedriger. Im mittleren Bereich der Schotterbank beträgt die Geschwindigkeit ca. 1.3 m/s. Beim 1. Absturz ist die Geschwindigkeit mittig und rechtsufrig mit 4.9 m/s bzw. 5.2 m/s am größten.

### Überschwemmungsbereiche

Vom Profil LA24 bis zum Profil LA19 sind die angrenzenden Flächen rechts- und linksufrig überschwemmt. Linksufrig reicht die überflutete Zone noch von LA19 bis 3.8 m flussauf Absturz 1.

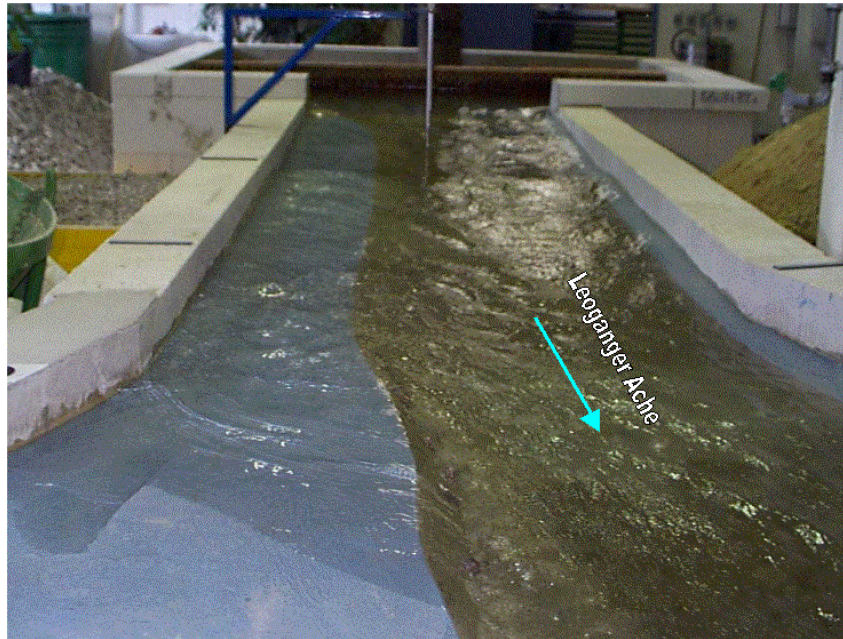


Abb. 28: Oberer modellierter Abschnitt der Leoganger Ache

Im Mündungsbereich ergibt sich rechtsufrig an Schwarzbach bzw. Leoganger Ache angrenzende Gebiete ab 9 m flussab bis zur rechten Einlaufmauer des Streichwehres eine Störungswelle, deren Wasserspiegel bis über das Gelände reicht. Flussab Absturz 1 sind folgende Bereiche überflutet: Rechtsufrig von 6.0 m flussauf LA07 bis zum 2. Absturz und von LA04 bis LA01. Linksufrig im Bereich LA07 und des 2. Absturzbauwerkes. Ab einem Durchfluss von ca.  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  kommt es rechtsufrig beim Pegel STPA zu einer Überschwemmung. Der Abfluss ist durchwegs im strömenden Bereich.

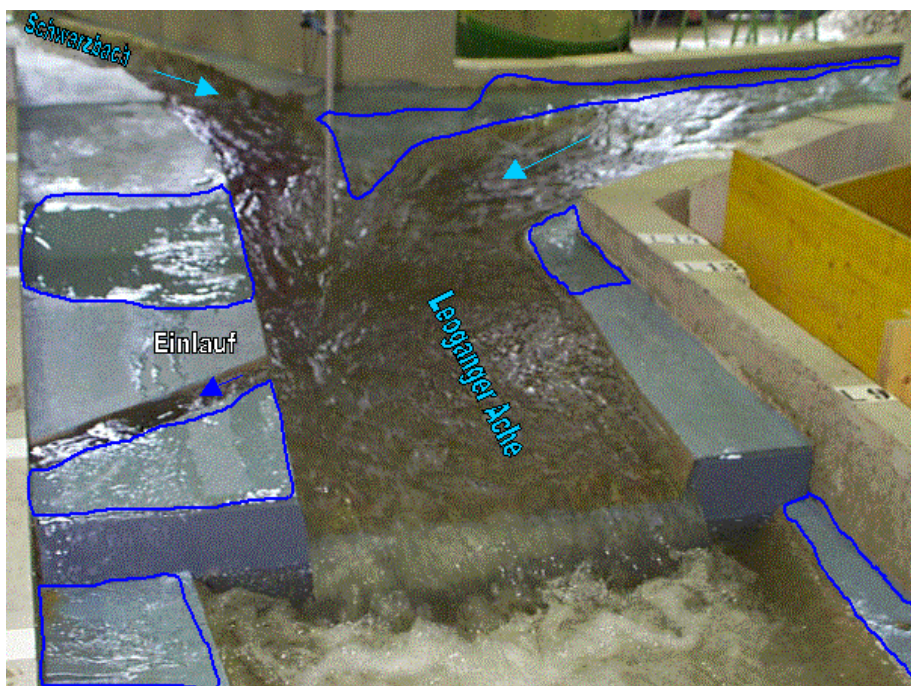


Abb. 29: Versuch V.O.R. 1.3: Mündung mit Überflutungsbereichen

Zusammenfassung:

Bedingt durch die Rechtskurve der Leoganger Ache treten rechtsufrig die größten Fließgeschwindigkeiten mit ca. 5.0 m/s auf. Je größer die Durchflüsse im Schwarzbach sind desto weiter nach links wandert die Hauptströmung flussab der Mündung.

	Q <sub>S</sub> [m³/s]	Q <sub>L</sub> [m³/s]	Stechpegel L [m]	Stechpegel S [m]	Stechpegel A [m]
V1R11	10	10	0.70	0.55	1.11
V1R11	10	10	0.73	0.56	1.23
V1R12 (S.o.)	10	51	1.64	0.90	1.61
V1R12 (S.g.)	10	51	-	0.91	1.75
V1R13	10	80	2.12	1.34	2.49
V1R21 (S.o.)	21	10	0.74	0.89	1.46
V1R21 (S.g.)	21	10	0.74	0.89	1.48
V1R22 (S.o.)	21	51	1.72	0.95	2.25
V1R22 (S.g.)	21	51	1.72	0.95	2.28
V1R23 (S.o.)	21	80	2.12	1.47	2.81
V1R23 (S.g.)	21	80	2.00	1.73	2.81
V1R31	44	10	0.78	1.42	2.05
V1R32	44	51	1.74	1.47	2.57
V1R33	44	80	2.04	1.51	3.11

Tab. 4: Pegelwasserstände der Reinwasserversuche

	Q <sub>S</sub> [m³/s]	Q <sub>L</sub> [m³/s]	Stechpegel L [m]	Stechpegel S [m]	Stechpegel A [m]
V1R11	10	10	1.02	1.41	1.96
V1R11	10	10	0.99	1.40	1.84
V1R12 (S.o.)	10	51	0.08	1.06	1.46
V1R12 (S.g.)	10	51	-	1.05	1.32
V1R13	10	80	-0.40	0.62	0.58
V1R21 (S.o.)	21	10	0.98	1.07	1.61
V1R21 (S.g.)	21	10	0.98	1.07	1.59
V1R22 (S.o.)	21	51	0.00	1.01	0.82
V1R22 (S.g.)	21	51	0.00	1.01	0.79
V1R23 (S.o.)	21	80	-0.40	0.49	0.26
V1R23 (S.g.)	21	80	-0.28	0.50	0.26
V1R31	44	10	0.94	0.54	1.02
V1R32	44	51	-0.02	0.49	0.50
V1R33	44	80	-0.32	0.45	-0.04

Tab. 5: Freibord bei den Reinwasserversuchen

Die unterlegten Werte stellen Überflutungshöhen dar. Durch die Begrenzung des Modells kommt es zum Aufstau in den Überflutungsbereichen, weshalb die Werte nicht qualitativ zu betrachten sind. Sie dienen lediglich zum Vergleich der einzelnen

Situationen. Der Bereich der Leoganger Ache flussauf der Mündung ist durch Überflutungen gefährdet.

### **Feststellung der Problembereiche aufgrund der Ergebnisse der Reinwasserversuche**

#### **Niedrige Fließgeschwindigkeiten durch den Rückstau des Schwarzbaches**

Der Einmündungswinkel des Schwarzbaches wirkt sich vor allem bei größeren Durchflüssen der Leoganger Ache hydraulisch negativ aus. Die Ache bewirkt eine Veränderung der Durchflussbedingungen im unteren Schwarzbach. Der fast orthogonale Mündungswinkel verursacht ungleichförmige Fließgeschwindigkeitsverteilungen und einen höheren Wasserstand gegenüber dem unbeeinflussten unteren Schwarzbach. Als ungünstigstes Szenario hat sich ein  $HQ_{100}$  in der Leoganger Ache erwiesen. Dabei kommt es im Schwarzbach im Bereich der Bundesstraßenbrücke zu markanten Wasserspiegelerhöhungen und zu niedrigen Fließgeschwindigkeiten verursacht durch den Rückstau. Zum Effekt des Rückstaus kommt noch eine Konzentration des unteren Schwarzbaches auf die linke Bachzone, bedingt durch die leichte Rechtskurve, hinzu. Dadurch entstehen linksseitig Bereiche mit geringerer Fließgeschwindigkeit.

#### **Künstlich verringertes Sohlgefälle im Mündungsbereich**

Im Zuge der Mündungsneugestaltung in Folge des Katastrophenhochwassers im Jahr 1935 wurde die Sohle der Leoganger Ache flussab der Mündung des Schwarzbaches angehoben. Aus den hydraulischen Beobachtungen sind Fließwechsel im Mündungsbereich als Indikatoren für das erniedrigte Sohlgefälle, vor allem im Abschnitt des Schwarzbaches zu entnehmen.

#### **Kritisch hohe Wasserstände**

Dabei sind besonders drei gefährdete Uferbereiche festgestellt worden:

- Durch den Rückstau der Leoganger Ache kommt es im Bachbereich bei der Bundesstraßenbrücke zu Wasserständen von bis zu 1.51 m, wobei festzustellen ist, dass schon bei einem Durchfluss im Schwarzbach von 11  $m^3/s$  ein Wasserstand von 1.34 m gemessen wurde. In Verbindung mit möglichen Geschiebeablagerungen könnte es zu Beeinträchtigungen der

Nutzung bzw. sogar zu Schäden der Brücke kommen. Der hohe Wasserstand wird vom Rückstau des Schwarzbaches durch die Leoganger Ache verursacht.

- Im Bereich der rechten Uferseite beim Profil LA14 wirkt sich die fast orthogonale Strömungsrichtung in der Leoganger Ache zur Ufermauer negativ aus. Das angrenzende Ufer ist mit zwei Objekten verbaut und darüberhinaus führt ein Geh- bzw. Radweg am Ufer entlang. Diese Anlagen sind nicht gegenüber ein  $HQ_{100}$  der Leoganger Ache geschützt.
- Im oberen Abschnitt der Leoganger Ache kommt es ab einem Durchfluss von ca.  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , dieser Wert ist geringer als der des  $HQ_{30}$  ( $51 \text{ m}^3/\text{s}$ ), zu Überflutungen. Besonders betroffen ist die Innenkurve ab Profil LA19 linksufrig. Dabei ergibt sich bei einem  $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s}$  und einem  $Q_{SB} = 11 \text{ m}^3/\text{s}$  bei SB01 der Ache linksufrig zu einem Wasserstand von  $0.24 \text{ m}$  über der Geländeoberfläche. Im gesamten Uferbereich der oberen Leoganger Ache besteht kein ausreichender Schutz gegenüber einem  $HQ_{30}$  Ereignis.

### **Weiterführende Überlegungen:**

Hinsichtlich unzureichender Geschiebetransportverhältnisse ergeben sich aus den Reinwasserversuchen, dass das vom Rückstau einer hochwasserführenden Leoganger Ache beeinträchtigte Gebiet am meisten gefährdet ist. Ziel der weiterführenden Untersuchungen mit Umbauvarianten ist es, diesen Einfluss möglichst zu verkleinern, und keinerlei Verschlechterung der Situation gegenüber dem IST-Zustand zu bewirken. Als ungünstigste Hochwasserkombinationen für weitere Versuche mit Geschiebedotation wurden jene gewählt, die ein  $HQ_{100}$  der Leoganger Ache aufweisen, da dabei der negative Einfluss am größten ist.

#### 4.1.2 Geschiebetransportverhältnisse

Die Feststellung der Auswirkungen von Hochwasserwellen mit entsprechenden Geschiebeganglinien auf die Morphologie des Mündungsbereiches soll in diesem Abschnitt erläutert werden. Dabei wird jeweils ein einzelnes Extremereignis betrachtet, um Erkenntnisse über eine mögliche kurzfristige Geschiebeproblematik zu erhalten. Diese Versuche sollen die möglichen Gefahren solcher Hochwasserereignisse mit Geschiebe dokumentieren und als Referenzsituation für die Geschiebetransportverhältnisse von Umbauvarianten dienen.

Im Schwarzbach werden drei Abflussganglinien mit entsprechender Geschiebedotation simuliert. Als Geschiebe wird Quarzsand verwendet, welcher mittels einer Stahlschnecke, in einen Behälter oberhalb des Rüttlers transportiert wird. Der Rüttler ermöglicht eine genaue Einstellung des Geschiebetriebes. Die Geschiebezugabe richtet sich nach der Transportkapazität bei den verschiedenen Durchflüssen. Um die Geschiebezugabe quantifizieren zu können, müssen zuvor die maßgebenden Parameter wie Abstand des Zwischenbehälters und einzustellende Rüttlerstufe bestimmt werden.

**Geschiebedotationseichung**

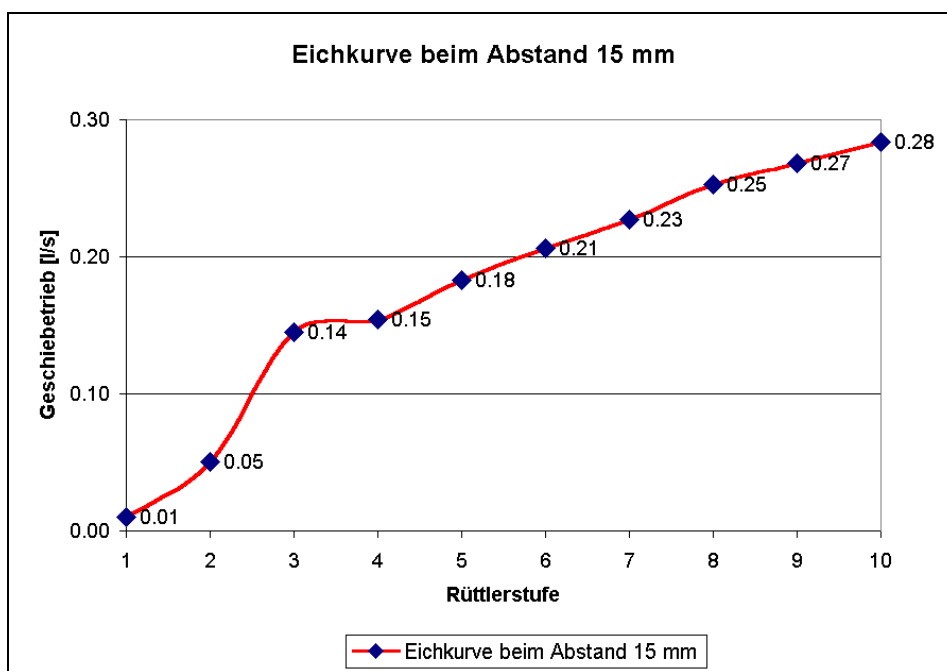


Abb. 30: Beziehung zwischen Geschiebetrieb und Rüttlerstufe bei der Geschiebedotation

Die Geschiebedotation erfolgt nach der Transportkapazität im Schwarzbach bei Profil SB08. Bedingung für eine der Transportkapazität entsprechenden Geschiebemenge ist es, dass sich am Ort der Dotierung ein nur wenige Körner hoher „Geschiebeteppich“, der nach flussab wandert, bildet.

$Q_{\text{modell}}$ [l/s]	$Q_{\text{Natur}}$ [m³/s]	Rüttlerstufe [-]	$Q_{\text{G Modell}}$ [l/s]	$Q_{\text{G Natur}}$ [l/s]
2	1.7	0.5	0.005	4.4
5	4.4	1.0	0.010	8.7
10	8.7	1.5	0.030	26.1
15	13.1	2.0	0.050	43.6
20	17.4	2.5	0.095	82.8
24	20.9	3.0	0.140	121.9
50	43.6	5.0	0.180	156.8

Tab. 6: An die Transportkapazität angepasster Geschiebetrieb

Versuch V.0.G.1.3

Eingangsdaten

Der Geschiebedotationsversuch wird mit einem stationären Durchfluss von 80 m³/s in der Leoganger Ache durchgeführt. Der Durchfluss des Schwarzbaches wird gemäß der unterhalb angeführten Tabellenwerte instationär beschickt.

	Zeit			Q
	[h]	[min]	[s]	[m³/s]
		38	44	2
		4	58	4
		4	58	9
1	15	1	1	11
		4	58	9
		10	1	4
		20	1	3
		38	44	2
Σ	2	17	25	

Tab. 7: HWW 1 des Schwarzbaches (Naturwerte)

Die Hochwasserwelle 1 hat den niedrigsten Abflussscheitel aller drei simulierten Abflussganglinien. Dieser dauert jedoch am längsten nämlich über eine Stunde und fünfzehn Minuten.

HWW 1				
$Q_G \text{ Mod}$	$Q_G \text{ Natur}$	$\text{Zeit}_{\text{Mod}}$	$\text{Zeit}_{\text{Natur}}$	$\text{Volumen}_{G \text{ Natur}}$
[l/s]	[l/s]	[s]	[s]	[m³]
0,007	5,79	600	2324	13,5
0,013	11,59	77	298	3,5
0,040	34,77	77	298	10,4
0,053	46,36	1162	4500	208,6
0,040	34,77	77	298	10,4
0,013	11,59	155	600	7,0
0,008	6,95	310	1201	8,3
0,007	5,79	600	2324	13,5
			Σ	275,1

Tab. 8: Simulierte Geschiebeganglinie bei der HWW 1

Der generelle Sedimenttransport beginnt im Unterlauf des Schwarzbaches bei 5.0 – 5.5 m³/s (HÜBL und LEBER, 2000). Dieser Wert wird in einer Dauer von knapp einer Stunde und 25 Minuten überschritten. Die gesamte simulierte Welle dauert ca. 2 Stunden und 17 Minuten. Diese Geschiebeganglinie resultiert aus dem Abfluss eines gleichverteilten hundertjährigen Niederschlagsereignisses mit einer Dauer von zwei Stunden. Dabei gibt das natürliche Geschiebevolumen jenes Volumen an, das bei dem entsprechenden Abfluss, bei der Untersuchung zugegeben, und auch in Form eines dünnen Teppichs weiterbewegt worden ist. Übereinstimmend mit der Abflussganglinie wird in dem größten Zeitabschnitt mit einem Abfluss von ca. 11 m³/s das weitaus größte Geschiebevolumen nämlich ca. 208 m³ transportiert. In Summe wird von der Hochwasserwelle eine Kubatur von ca. 275 m³ an Geschiebe im Bereich des Profils SB08 des Schwarzbaches weitergetragen.

Die Geschiebetransportversuche bestätigen die Ergebnisse der Reinwasserversuche. Aufgrund des Rückstaus, der von der Leoganger Ache bewirkt wird, und des Sohlgefällsknickes im Bereich des Profils SB01, verringert sich die Transportkapazität des Schwarzbaches drastisch. Das im Profil SB08 noch vollständig transportierte Geschiebe gelangt zum großen Teil nicht in die Leoganger Ache. Besonders gefährdet ist die neu errichtete Brücke der B164. Im Lageplan (vgl. Abb. 31) ist die Geschiebeablagerung nach der Hochwasserwelle 1 eingezeichnet. Der abgelagerte Sedimentkörper erstreckt sich von 3.6 m flussauf Profil SB01 bis 3.25 m flussauf Profil SB06. Die gesamte Länge der Ablagerungszone beträgt ca. 40.0 m.

Die leichte Rechtskurve des Schwarzbaches bewirkt zum Ersten durch die höhere Geschwindigkeit in der Außenkurve, dass der abgelagerte Körper sich linksseitig weiter bewegt als rechtsseitig. Zum Zweiten ist die Ablagerungsmächtigkeit im Bereich der Bundesstraßenbrücke im linken geringer als im rechten Bachbettbereich.

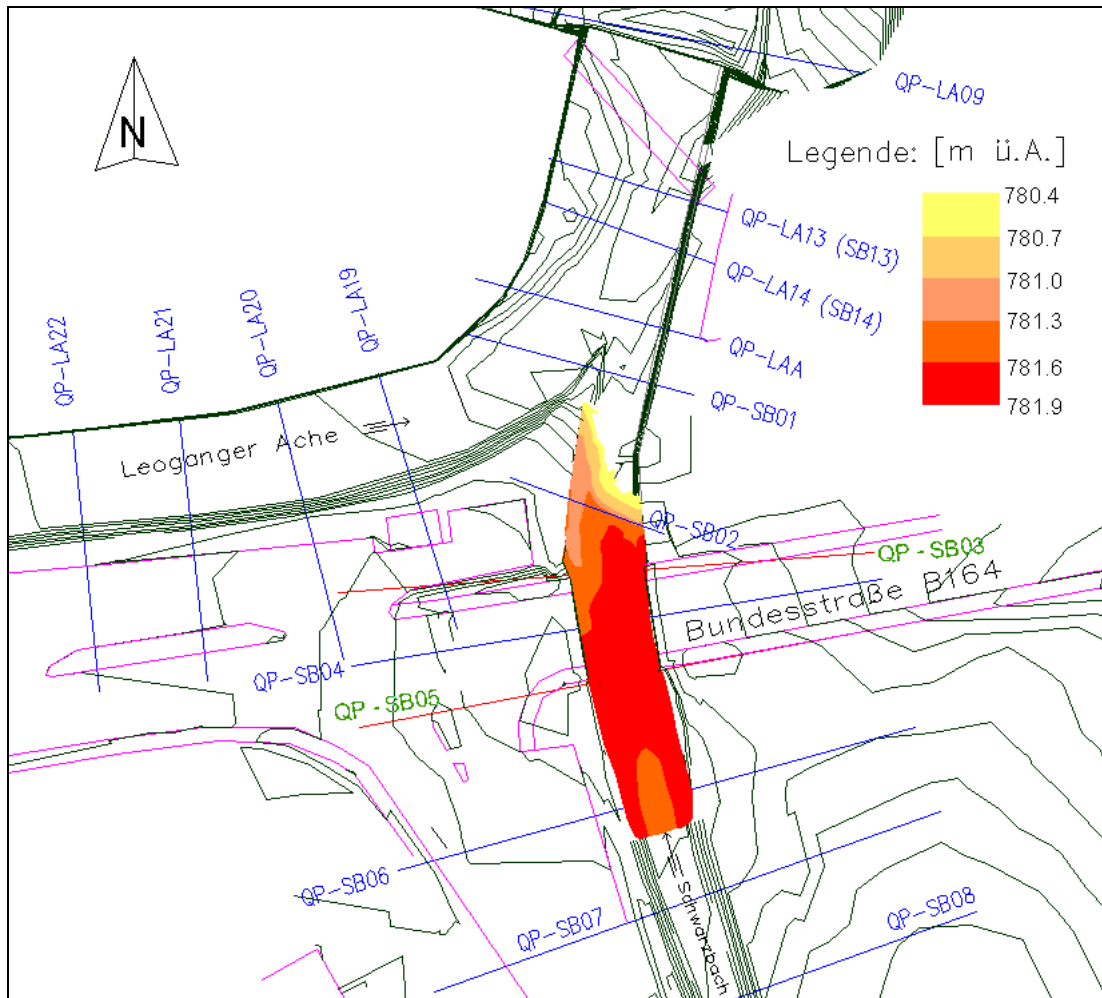


Abb. 31: Lage des Ablagerungskörpers beim Versuch V.O.G.1.3



Abb. 32: Versuch V.O.G.1.3; Blick vom Mündungsbereich Richtung flussauf

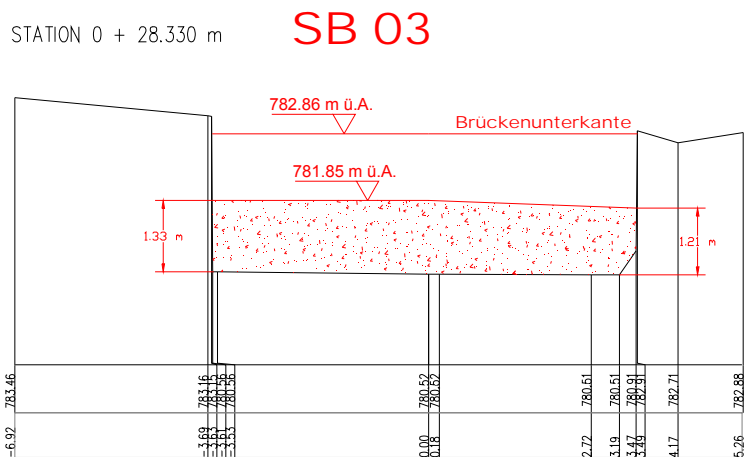


Abb. 33: Ablagerung beim Profil SB03; Blick nach flussauf

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB02	780.4		
links		781.41	1.01
mitte		781.81	1.41
rechts		781.81	1.41
SB03	780.52		
links		781.73	1.21
mitte		781.86	1.34
rechts		781.85	1.33
SB04	780.73		
links		781.73	1.00
mitte		781.82	1.08
rechts		781.85	1.12
SB05	780.9		
links		781.83	0.93
mitte		781.8	0.90
rechts		781.83	0.93
SB06	781.22		
links		781.83	0.61
mitte		781.67	0.44
rechts		781.88	0.65

Tab. 9: Ablagerungshöhen beim Versuch V.O.G. 1.3

Die oben angeführte Tabelle gibt einen Überblick der Anlandungsmächtigkeiten in den einzelnen Profilen. Das Profil SB02 befindet sich zwischen SB01 und SB03. Das ursprüngliche Sohlgefälle zwischen dem Profil SB03 und dem Profil SB06 beträgt

3.23 %. Durch die Ablagerung vermindert sich das Gefälle auf den Wert von – 0.09 %. Es entsteht ein negatives Gefälle, wodurch weitere Ablagerungen in diesem Bereich möglich sind. Die größere Fließgeschwindigkeit im linken Bachabschnitt bedingt durch die leichte Rechtskurve verursacht eine zum Teil deutlich geringere Ablagerung in diesem Bereich. Die größte Mächtigkeit wurde beim Profil SB02 rechtsseitig mit 1.41 m gemessen. Bei einer Ufermauerhöhe von 2.17 m würde bei einem erneuten Hochwasser schon bei einem Wasserstand von 0.76 m in den bebauten Uferbereich austreten. Das abgelagerte Volumen beträgt ca. 260 m<sup>3</sup>. Das entspricht knapp 95 % des zugegebenen Geschiebevolumens.

Versuch V.0.G.2.3

Eingangsdaten

Dieser Geschiebedotationsversuch wurde mit einem stationären Durchfluss von 80 m<sup>3</sup>/s in der Leoganger Ache durchgeführt. Der Durchfluss des Schwarzbaches wurde gemäß der unterhalb angeführten Tabellenwerte instationär beschickt.

Zeit			Q
[h]	[min]	[s]	[m <sup>3</sup> /s]
	38	44	2
	15	29	6
	9	41	18
	10	1	20
	20	1	21
	19	22	16
	15	29	7
	10	1	4
	20	1	3
Σ 2	38	49	

Tab. 10: Abflussganglinie des Schwarzbaches bei HWW 2

Diese Hochwasserganglinie resultiert aus einem gleichverteilten hundertjährlichen Niederschlagsereignis mit einer Dauer von einer Stunde. Dabei tritt beim Abflussscheitel ein Durchfluss von ca. 21 m<sup>3</sup>/s für eine Zeitspanne von ca. 40 Minuten auf. Es weist also über einen Zeitraum von ca. einer Stunde ein höherer Durchfluss auf als bei der Hochwasserwelle 1. Die Gesamtdauer der Welle ist mit knapp zwei Stunden und vierzig Minuten auch größer als bei der Abflussganglinie 1.

HWW 2				
Q <sub>G Mod</sub>	Q <sub>G Natur</sub>	Zeit <sub>Mod</sub>	Zeit <sub>Natur</sub>	Volumen <sub>G Natur</sub>
[l/s]	[l/s]	[s]	[s]	[m³]
0,007	7,53	600	2324	17,5
0,027	23,18	240	930	21,5
0,133	115,90	150	581	67,3
0,186	162,26	155	600	97,4
0,186	162,26	310	1201	194,8
0,100	86,92	300	1162	101,0
0,033	28,97	240	930	26,9
0,011	9,27	155	600	5,5
0,008	6,95	310	1201	8,3
			Σ	540,4

Tab. 11: Simulierte Geschiebeganglinie bei der Hochwasserwelle 2

Das Geschiebevolumen ist bei Hochwasserwelle 2 mit 540 m³ das bei weitem größte der drei Wellen. Es ist damit fast doppelt zu groß als bei der Hochwasserwelle 1 mit 275 m³.

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB02	780.4		
links		781.61	1.21
mitte		781.97	1.57
rechts		782.00	1.60
SB03	780.52		
links		781.82	1.29
mitte		782.03	1.51
rechts		782.13	1.61
SB04	780.73		
links		781.94	1.20
mitte		781.98	1.25
rechts		782.18	1.45
SB05	780.9		
links		781.97	1.06
mitte		781.98	1.08
rechts		782.10	1.20
SB06	781.22		
links		782.12	0.90
mitte		782.06	0.83
rechts		781.98	0.76
SB07	781.65		
links		781.98	0.76
mitte		782.06	0.83
rechts		782.10	0.88

Tab. 12: Übersicht der Ablagerungsmächtigkeit im Schwarzbach

Es treten Ablagerungshöhen von maximal 1.61 m auf. Der Bereich mit der größten Ablagerungsmächtigkeit ist beim Profil SB03 bei der Bundesstraßenbrücke ersichtlich. Die Mächtigkeit des Geschiebekörpers ist in den Profilen SB02 bis SB05 rechtsufrig größer, wobei sich beim Profil SB02 ein Höhenunterschied von 0.39 m ergibt. Im Gegensatz zum Versuch V.0.G.1.3 erstreckt sich der Ablagerungsbereich bis zum Mündungsprofil SB01. Dies ist auf eine größere Transportkapazität des Schwarzbaches zurückzuführen. Das abgelagerte Geschiebevolumen beträgt 436 m<sup>3</sup>. Das entspricht knapp 81 % des eingebrachten Geschiebevolumens.

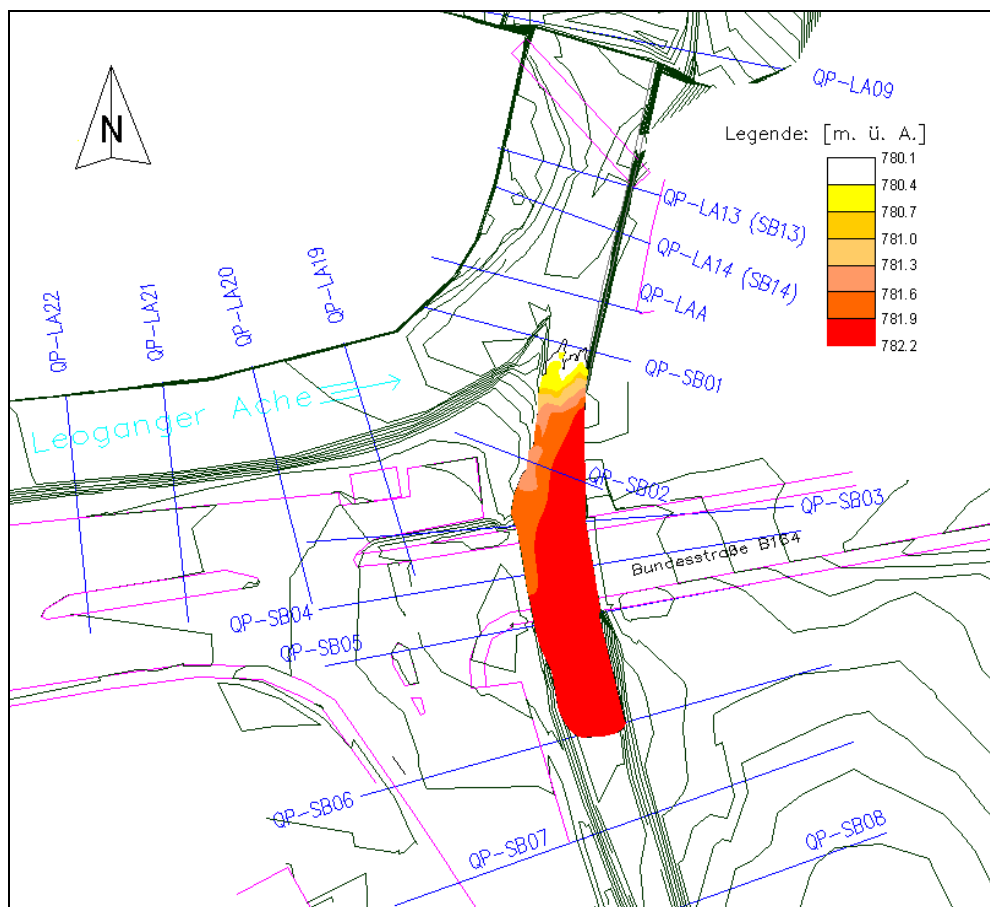


Abb. 34: Lageplan mit Ablagerungskörper nach Versuch V.0.G.2.3



Abb. 35: Anlandung beim Versuch V.0.G.2.3; Blick vom Mündungsbereich nach flussauf

**Versuch V.0.G.3.3**

Dieser Geschiebedotationsversuch wurde mit einem stationären Durchfluss von 80 m<sup>3</sup>/s in der Leoganger Ache durchgeführt. Der Durchfluss des Schwarzbaches wurde gemäß der unterhalb angeführten Tabellenwerte instationär beschickt.

Zeit			Q
[h]	[min]	[s]	[m <sup>3</sup> /s]
	19	22	2
	9	56	9
	19	22	44
	15	29	13
	15	29	7
	10	1	5
	10	1	4
	20	1	3
	19	22	2
Σ	2	19	3

Tab. 13: HWW 3 des Schwarzbaches

Diese Hochwasserwelle hat mit 44 m<sup>3</sup>/s den größten Abflussscheitelwert aller drei Wellen. Dabei steigt der Durchfluss in kurzer Zeit stark an um nach 20 Minuten Dauer des größten Durchflusses wieder stark abzusinken. Die Dauer der gesamten Abflussganglinie, die im hydraulischen Modell simuliert wird, beträgt knapp zwei Stunden und zwanzig Minuten.

HWW 3				
Q <sub>G Mod</sub>	Q <sub>G Natur</sub>	Zeit <sub>Mod</sub>	Zeit <sub>Natur</sub>	Volumen <sub>G Natur</sub>
[l/s]	[l/s]	[s]	[s]	[m <sup>3</sup> ]
0,007	5,79	300	1162	6,7
0,040	34,77	154	596	20,7
0,239	208,62	300	1162	242,4
0,067	57,95	240	930	53,9
0,033	28,97	240	930	26,9
0,023	20,28	155	600	12,2
0,011	9,27	155	600	5,6
0,008	6,95	310	1201	8,3
0,007	5,79	300	1162	6,7
			Σ	383,5

Tab. 14: Simulierte Geschiebeganglinie bei der HWW 3

Bei dieser Hochwasserwelle wird ein großes Geschiebevolumen in einer Zeit von nur ca. 19 Minuten transportiert.

Ergebnisse:

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB02	780.4		
links		780.86	0.46
mitte		781.47	1.07
rechts		781.52	1.12
SB03	780.52		
links		781.21	0.69
mitte		781.38	0.86
rechts		781.54	1.02
SB04	780.73		
links		781.28	0.55
mitte		781.46	0.73
rechts		781.62	0.89
SB05	780.9		
links		781.23	0.33
mitte		781.53	0.63
rechts		781.68	0.78
SB06	781.22		
links		781.35	0.13
mitte		781.46	0.24
rechts		781.43	0.21

Tab. 15: Übersicht der Ablagerungsmächtigkeit im Schwarzbach

Bei Versuch V.0.G.3.3 treten die geringsten Ablagerungshöhen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Schwarzbach beim Scheiteldurchfluss von 43.6 m³/s die größte Transportkapazität aufweist. Vor allem beim Profil SB02 ist ein großer Unterschied der Ablagerungsmächtigkeit zwischen rechter Bachbettseite 1.12 m und linker Bachbettseite 0.46 m festzustellen. Das abgelagerte Geschiebevolumen entspricht mit ca. 270 m³ rund 70 % des zugeführten Geschiebes.



Abb. 36: Ablagerung beim Versuch V.0.G.3.3; Blick nach flussauf

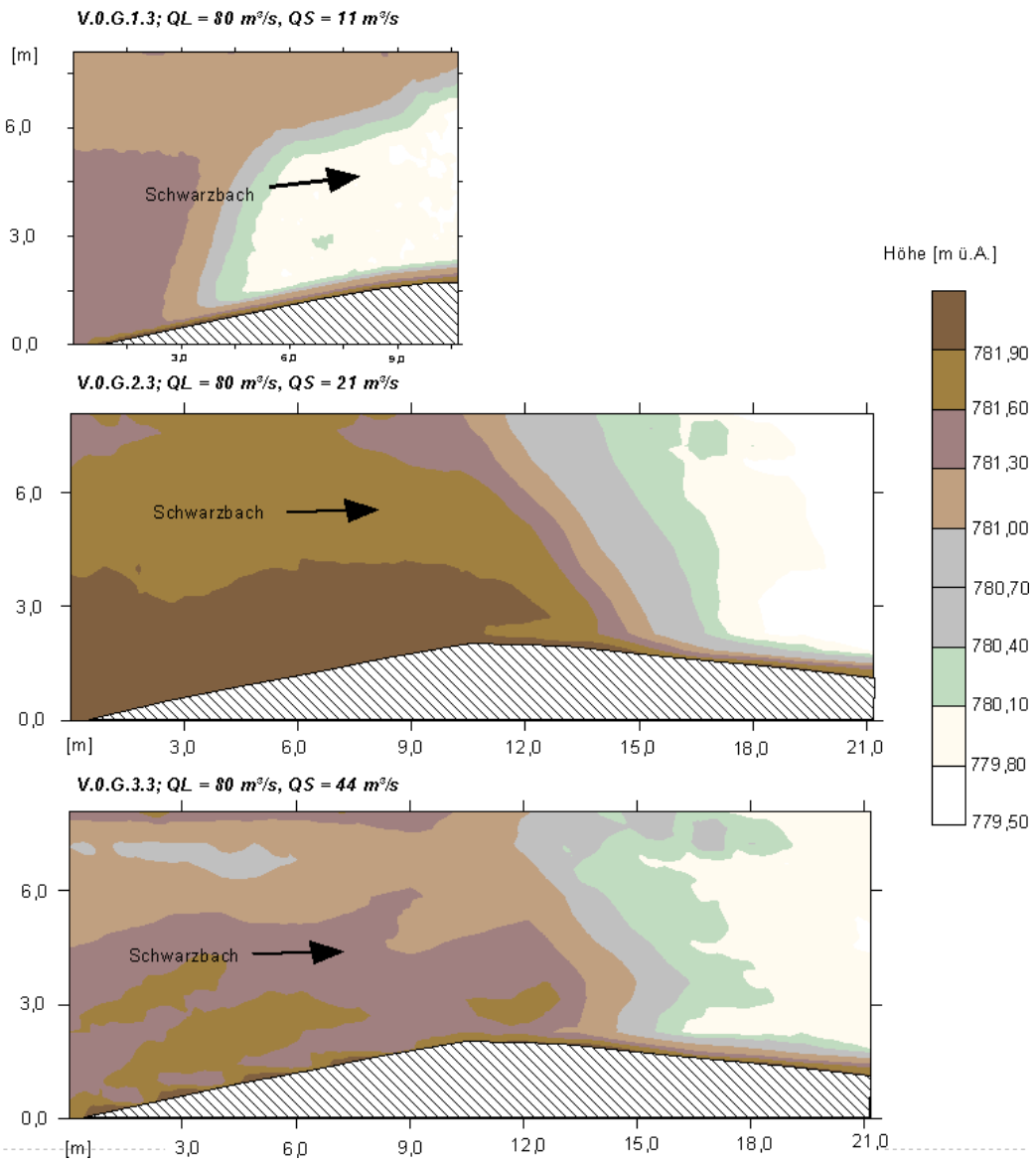


Abb. 37: Ablagerungen bei den Versuchen des IST-Zustandes

### **Geschiebeproblematik**

Die Versuche zeigen, dass sich die Transportkapazität im Mündungsbereich gegenüber jener im Profil SB08 verringert. Der Rückstau des Schwarzbaches durch die hochwasserführende Leoganger Ache bewirkt eine temporäre Ablagerung, die als Mündungswall in Erscheinung tritt. Hinsichtlich der Geschiebeproblematik gilt es langfristige und kurzfristige Aspekte zu beachten (JÄGGI, 1995). In dieser Hinsicht handelt es sich bei der Problematik um kurzfristige Gesichtspunkte (vgl. 2.5.4). Bei den Versuchen wurden lediglich temporäre Ablagerungen erfasst, daraus lässt sich jedoch keine generelle Auflandungstendenz erkennen. Von temporären Ablagerungen ist vor allem der Bachbereich bei der Bundesstraßenbrücke gefährdet. Um die Geschiebetransportverhältnisse bei hohem Wasserstand in der Leoganger Ache zu verbessern, ist eine Trennwand im Mündungsbereich zweckmäßig. Damit würde der Einfluss der Leoganger Ache auf das Abflussverhalten im unteren Schwarzbach eliminiert.

#### 4.1.3 Sedimenttransport in steilen Gerinnen am Beispiel Schwarzbach

Der Geschiebetrieb wurde bei den Modellversuchen, wie in Kapitel 4.2 bereits erwähnt, der Transportkapazität im Profil SB10 (Dotierstelle) angepasst. Klar ersichtlich steigt der Geschiebetrieb mit steigendem Durchfluss. Es besteht eine Geschiebetrieb – Durchflussbeziehung in jedem Bachprofil. Ablagerungsmächtigkeiten sind maßgebend von der Geschiebezugabe abhängig. Um die Ergebnisse der Geschiebetransportversuche in ihrer Qualität zu bewerten, ist es sinnvoll die Geschiebezugabe mit Daten aus einer numerischen Simulation bzw. empirischen Näherungsformel zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse der Geschiebehaushaltsstudie des Schwarzbaches (HÜBL und LEBER, 2000) und eine Abschätzung mit einer Sedimenttransportformel (SMART und JÄGGI, 1983) (siehe Kap. 2.1.2) herangezogen. Das Ergebnis ist in Abb. 36 dargestellt. Folgende Eingangswerte (SB10) wurden für die Sedimenttransportformel verwendet:  $b_m = 5.0$  m;  $l_s = 3,4$  %;  $d = 0.03$  m.

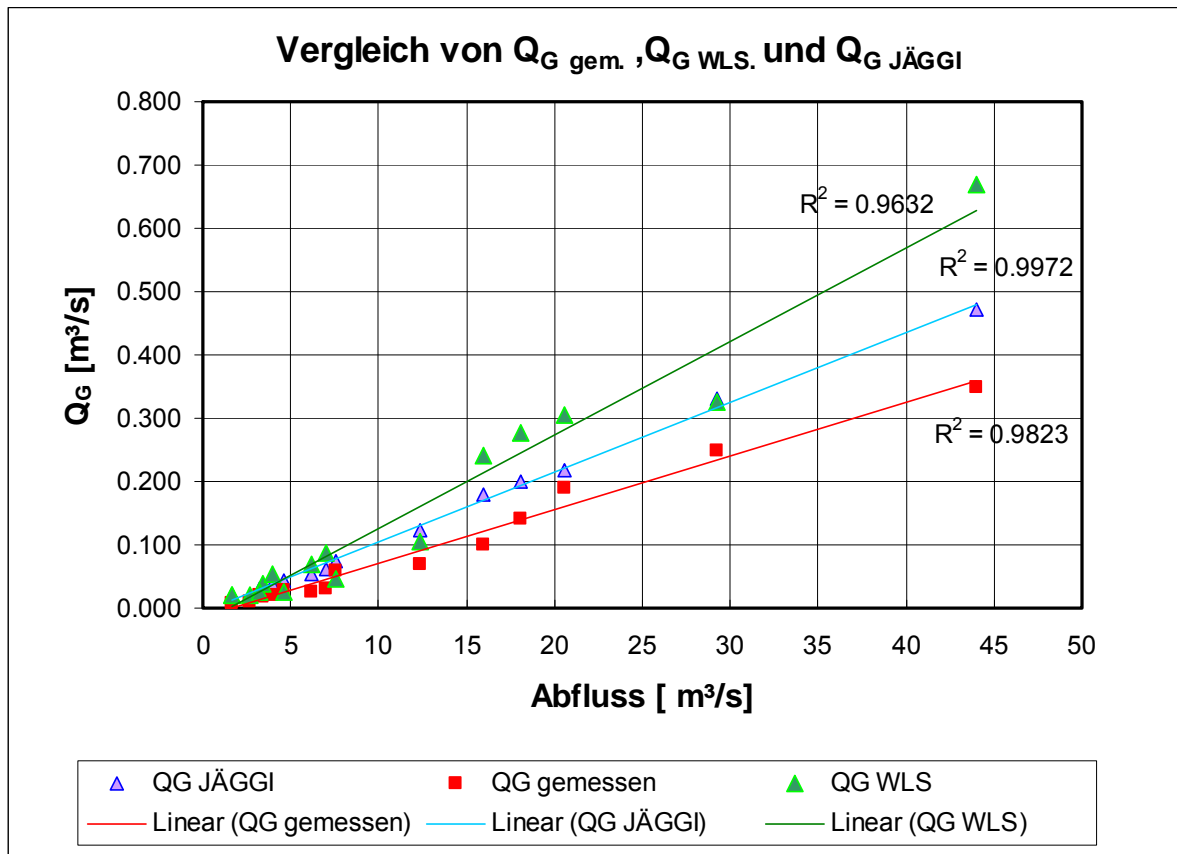


Abb. 38: Vergleich der Geschiebetriebdaten im Profil SB10

Der Vergleich zeigt, dass die am Modell gemessenen Geschiebetriebwerte am niedrigsten sind. Die höchsten Werte ergeben sich aus der Geschiebehaushaltsstudie. Für diese niedrigeren Geschiebezugabewerte gibt es folgende Ursachen:

- Das physikalische Modell ist mit fester Sohle ausgeführt. Die Geschiebezugabe wurde so gewählt, dass sich ein ständig wandernder "Teppich" ausbilden konnte. Das bedeutet, die Sohle ist nicht in Bewegung, wie dies beim natürlichen Prozess der Fall ist. Aufgrund dieser vereinfachenden Annahme ist weniger Geschiebe beweglich.
- In der Geschiebetransportuntersuchung gehen Schwebstoffe nicht ein, da sie von den Wildbächen abtransportiert werden. Dies wurde bei der Wahl des repräsentativen Modellkornbereiches bereits berücksichtigt. Die Menge an zugegebenem Sediment reduziert sich dementsprechend.

Durch diese aus praktischen Gründen gewählten Randbedingungen kommt es zu unterschiedlichen Transportmechanismen.

## 4.2 Variante 1 - Trennwand

Die Untersuchungen der Fließcharakteristik und der Geschiebetransportverhältnisse bestätigten die Annahmen einer Gefährdung des Mündungsbereiches durch Hochwässer und Feststoffe. Dabei konnten aufgrund der Ergebnisse drei Hauptursachen der Problematik festgestellt werden: Rückstau des Schwarzbaches ab einem  $HQ_{30}$  in der Leoganger Ache durch einen ungünstigen Mündungswinkel. Dadurch wird die Fließgeschwindigkeit geringer und die Fließgeschwindigkeitsverteilung ungleichmäßig. Geringes Sohlgefälle der Leoganger Ache von der Mündung des Schwarzbaches bis zum ersten Absturzbauwerk. Der Rechtsbogen des Schwarzbaches knapp vor der Mündung bewirkt eine mächtigere Ablagerung im rechten Bachbereich.

Ziel dieser Modellmodifikation ist es, den Einfluss der Leoganger Ache auf die Durchflussbedingungen im Schwarzbach bei den untersuchten Hochwasserkombinationen zu unterbinden. Die Bereitstellung der Konsenswassermenge der Wasserentnahme sollte weiterhin gewährleistet werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Trennwand im Bereich der Mündung errichtet. Dieses Bauwerk beginnt an der Stelle des ursprünglichen Mündungsspornes und erstreckt sich bis 4.5 m flussauf des ersten Absturzbauwerkes. Die Oberkante der Trennwand verläuft horizontal auf Höhe der Kote 782.86 m ü. A., welche der Höhe der Brückenunterkante entspricht. Die Lage der Wand im Bachbett wurde bei den Reinwasserversuchen des IST-Zustandes bestimmt. Dabei wurde mittels eines Leitbleches bei verschiedenen Hochwasserkombinationen die hydraulisch günstigste Lage ermittelt. Die Trennwand darf die Wasserentnahme nicht beeinträchtigen. Diese liegt nach dem Linksbogen der Leoganger Ache knapp vor dem 1. Absturzbauwerk. Im IST-Zustand führt die Hauptströmung der Leoganger Ache direkt zum Wehreinlass. Durch die Trennwand würde die Speisung durch die Leoganger Ache stark beeinträchtigt werden.



Abb. 39: Blick auf den Mündungsbereich mit Trennwand

### **Die Gewährleistung der Konsenswassermenge der Wasserentnahme**

Im Ist-Zustand entnimmt das Frickwehr den Großteil des Wassers aus der Leoganger Ache. Die Anlage zur Wasserentnahme wurde in den dreißiger Jahren mit dem Ziel einer optimalen Dotierung gebaut. Zu diesem Zweck errichtete man das Wehr an der Außenkurve der Ache.

Durch die Trennwand würde die Wasserentnahme beinahe vollständig von ihrer Hauptquelle getrennt werden. Modellversuche bei Niederwasser in der Leoganger Ache zeigten zwar selbst bei geringen Durchflüssen eine Gewährleistung der Konsenswassermenge, dies ist aber auf den Kolk beim Einlaufbauwerk zurückzuführen. Durch diesen ergibt sich ein Gefälle von der Absturzkante des 1. Bauwerkes zum Streichwehr hin. Dieser Kolk würde aber wahrscheinlich mit der Abtrennung der Ache mit der Zeit verschwinden und eine Aufrechterhaltung der Wasserspeisung wäre unmöglich. Um den Betrieb des Frickwehres nach Errichtung der Trennwand aufrechterhalten zu können, wurden im Modell insgesamt drei Öffnungen in der Trennwand vorgesehen. Diese Auslässe wurden im Bereich vor und auf der Höhe des Einlaufes der Wasserentnahme ausgeführt. Die Öffnungen maßen 1.3 m in der Breite und waren 2.0 m hoch.

#### 4.2.1 Fließcharakteristik

##### Versuch V.1.R.1.3

Diesem Versuch liegen folgende Durchflüsse zugrunde:  $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $Q_S = 11 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Strömungsverlauf im Schwarzbach

Die Hauptströmung im Bereich des Profils SB08 befindet sich mittig im Bachbett. Beim Profil SB04 trifft die Strömung bedingt durch die Rechtskurve auf die linke Brückenmauer und verläuft dem Außenbogen entlang. Die größte Fließgeschwindigkeit im Bereich der Brücke ist mittig mit ca. 2.6 m/s gegeben. Ab dem Profil SB03 sinkt die Geschwindigkeit rechts stark ab. Beim Profil SB01 beträgt die Geschwindigkeit im rechten Bachbereich ca. 2.4 m/s, wohingegen flussab bei Profil SB13 die Fließgeschwindigkeit auf 1.8 m/s absinkt. Die höchsten Geschwindigkeitswerte, gemessen beim 1. Absturzbauwerk im abgetrennten Schwarzbach, betragen knapp 2.8 m/s.

Zusammenfassend kann man hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse eine gefährdete Zone feststellen. Aufgrund des ungünstigen Zusammenwirkens des erniedrigten Sohlgefälles und der Rechtskurve kommt es zwischen dem Profil SB01 und dem Einlauf zum Streichwehr besonders rechts zu geringen Geschwindigkeiten von ca. 0.6 m/s.

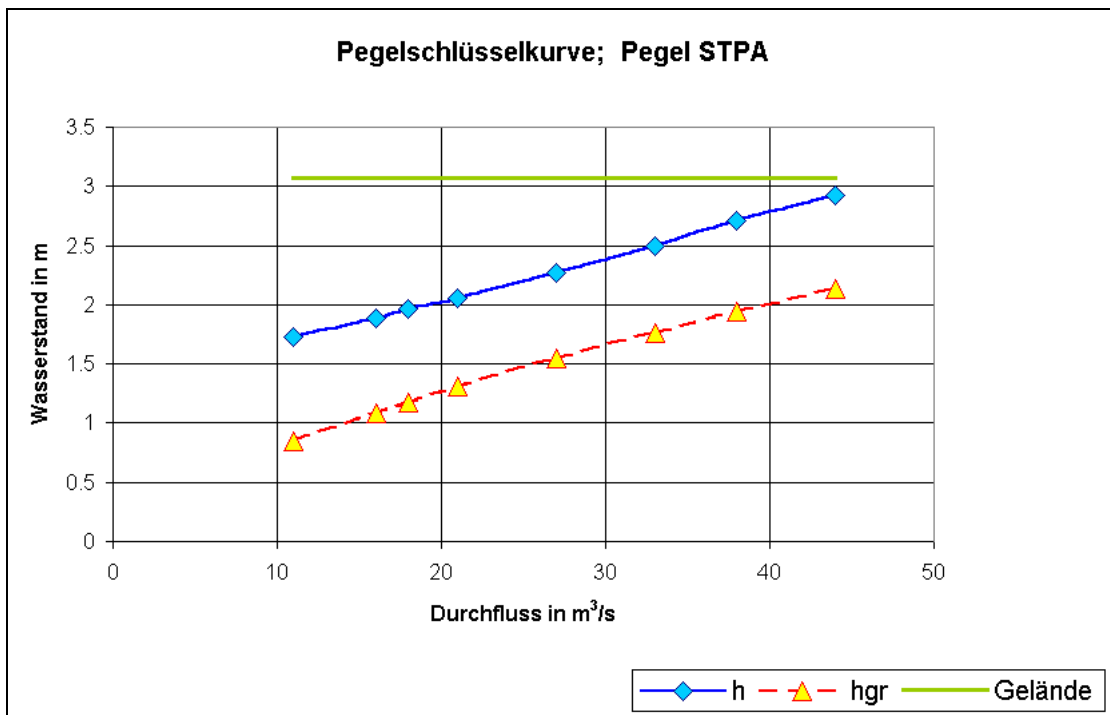


Abb. 40: Strömender Durchfluss beim Pegel STPA

Die hier angeführte Pegelschlüsselkurve dient zur Beschreibung der Fließcharakteristika. Beim Pegel STPA stellt man strömende Verhältnisse fest. Dies ist auf den verkleinerten Fließquerschnitt und dem niedrigen Gefälle von 8 Promille in diesem Bereich zurückzuführen.

### Der Strömungsverlauf in der Leoganger Ache

Durch die Trennwand wird die Durchflusskapazität in der Leoganger Ache erhöht, da der Fließquerschnitt um ein Drittel vermindert wurde. In der Modellmodifikation wurde die Schotterbank in der Innenkurve beseitigt. Durch den starken Bogen des Bachlaufes ergibt sich eine mittige Fließgeschwindigkeit im Mündungsprofil SB01 von ca. 1.7 m/s. Im Profil LA19 beträgt die mittige Geschwindigkeit noch knapp 2.4 m/s. Hohe Werte (ca. 4.2 m/s) wurden im Profil LA13 in der Mitte gemessen.

### Der Wasserstand im Schwarzbach

Aus der Pegelschlüsselkurve bei STPA ist ersichtlich, dass bei allen simulierten Durchflüssen keine Überflutungen der Uferbereiche eintreten. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber dem IST-Zustand dar. Im Profil STPS beträgt der Wasserstand bei einem  $HQ_{100}$  aufgrund eines 30 minütigem endbetonten Niederschlagsereignis maximal 1.37 m. Das ergibt nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber dem IST-Zustand. Bei offenem Schütz der Wasserentnahme würde ein Abfluss von 4.2 m<sup>3</sup>/s dem Schwarzbach entnommen werden. Dies entspricht mehr als einem Drittel des bei diesem Versuch simulierten Hochwassers des Schwarzbaches.

### Der Wasserstand in der Leoganger Ache

Die Verringerung des Durchflussquerschnittes bewirkt eine negative Auswirkung auf den Wasserstand am linken Ufer an der Innenseite des Bogens der Leoganger Ache. Aus der Pegelschlüsselkurve beim Profil LA21 ist eine Überbordhöhe von ca. 0.8 m zu entnehmen. Dies bedeutet eine um 0.56 m größere Überflutungshöhe gegenüber dem IST-Zustand. Durch Zentrifugalkräfte werden in der Außenkurve an der Trennwand um bis zu 0.40 m höhere Wasserstände gemessen als in der Innenkurve.

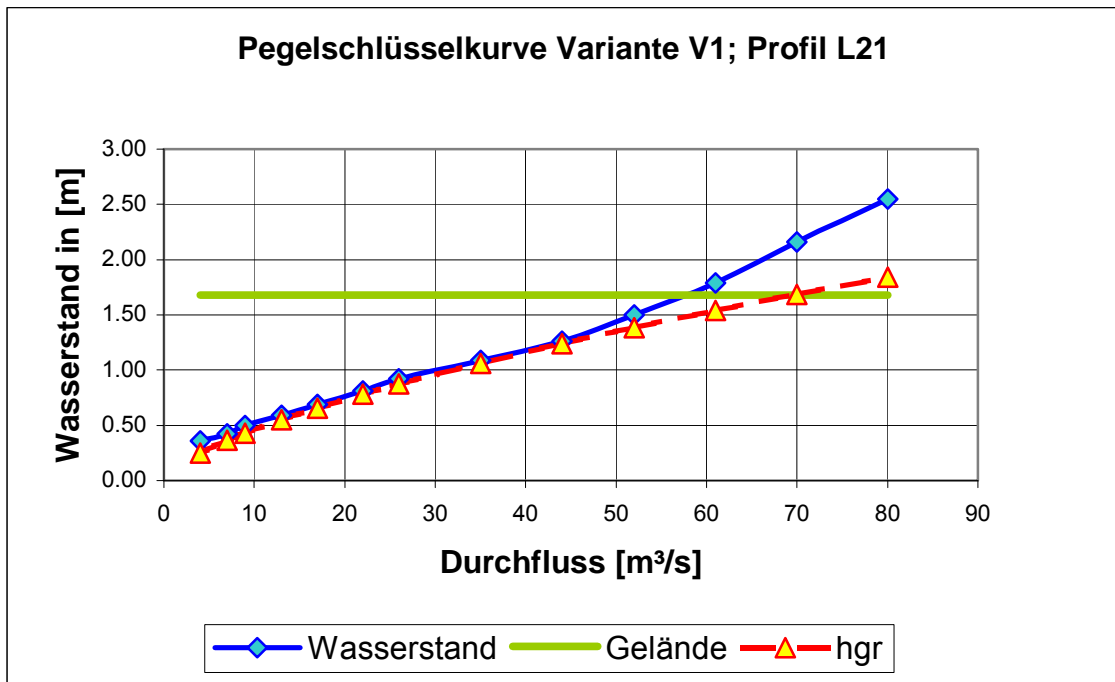


Abb. 41: Pegelschlüsselkurve in der Leoganger Ache beim Profil LA21

### Versuch V.1.R.2.3

Bei diesem Reinwasserversuch wurden in der Leoganger Ache ein Durchfluss von 80 m³/s und im Schwarzbach von 21 m³/s simuliert.

### Der Strömungsverlauf im Schwarzbach

Im Bereich der Bundesstraßenbrücke liegt die maximale Fließgeschwindigkeit bei allen drei untersuchten Querschnittsprofilen mittig. Die Werte befinden sich im Bereich von 3.5 m/s. Die Geschwindigkeit auf der rechten Uferseite nimmt vom Profil SB05 bis SB03 von ca. 3.5 m/s auf 1.7 m/s ab. Im Profil SB13 misst man links mit ca. 4.1 m/s die maximale sohlnahe Fließgeschwindigkeit überhaupt, sodass der Messwert im rechten Bereich auf 1.7 m/s sinkt. Zwischen SB01 und SB13 kommt es zu einer bedeutenden Geschwindigkeitsreduktion. Links sind Werte von ca. 2.8 m/s zu beobachten, die mittigen und rechten Werte liegen bei 1.7 bzw. 1.0 m/s. Der Grund dafür ist anhand der Pegelschlüsselkurven dokumentiert.

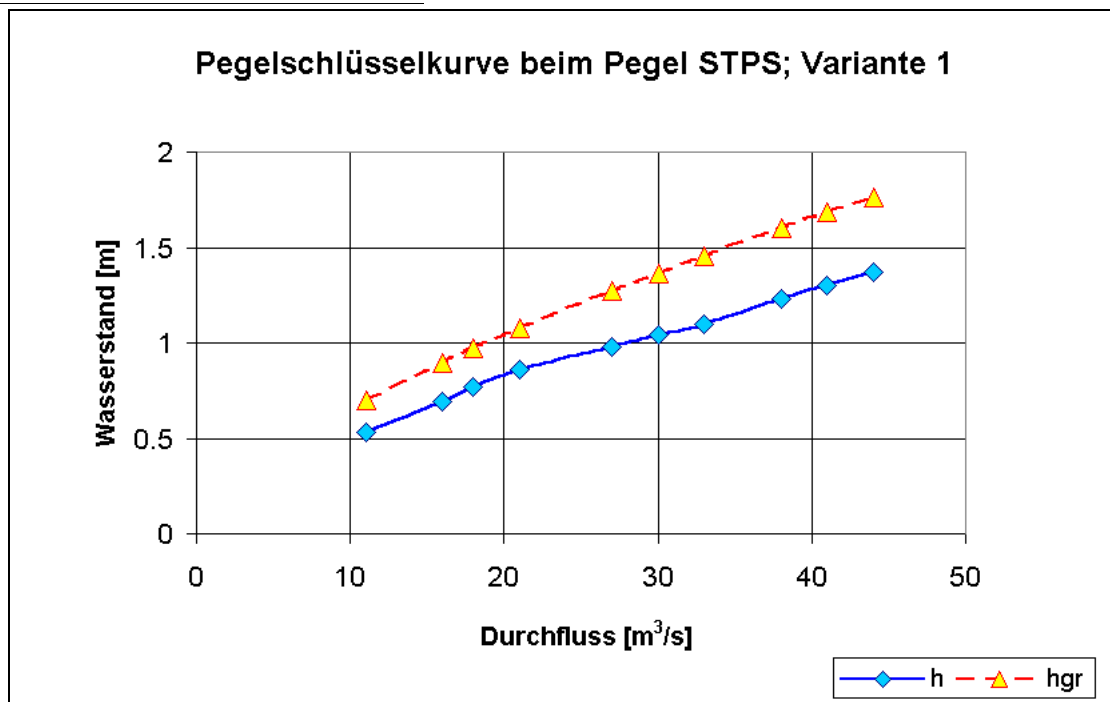


Abb. 42: Pegelschlüsselkurve beim Pegel STPS

In Abb. 42 ist ersichtlich, daß über die gesamten Durchflusswerte schießende Verhältnisse vorherrschen, wohingegen in Abb. 40 die Wasserspiegelhöhen durchwegs größer sind als die zugehörigen Grenztiefen. Es findet also zwischen Profil SB05 und dem Profil des Pegels STPA ein Fließwechsel statt. Dieser ist auf den Sohlgefällsknick beim Profil SB01 zurückzuführen. Beim 1. Absturzbauwerk betragen die Fließgeschwindigkeiten etwa 4.1 m/s.

Der Wasserstand im Schwarzbach

Der Wasserstand beim Pegel STPS beträgt 0.86 m, während beim Pegel STPA der Pegelstand 2.05 m misst. Zusätzliche Werte sind den entsprechenden Pegelschlüsselkurven zu entnehmen. Es ist eine Wasserstandserhöhung vom Pegel STPS bis Pegel STPA von 1.19 m festzustellen. Bei offenem Schütz würden an der Wehranlage ca. 4.5 m³/s Wasser aus dem Schwarzbach entnommen werden. Das entspricht mehr als einem Fünftel des Hochwasserdurchflusses im Schwarzbach.

Versuch V.1.R.3.3

Die Durchflüsse der beiden Wildbäche betragen 80 m³/s bzw. 44 m³/s.

### Der Strömungsverlauf im Schwarzbach

Vom Profil SB05 bis zum Profil SB04 verschiebt sich das Maximum der sohnahen Geschwindigkeit von der rechten Bachseite in die Mitte, wobei die Messwerte jeweils ca. 3.9 m/s betragen. Im Profil SB01 sind große Unterschiede zwischen linksufriger und mittiger bzw. rechtsufriger Fließgeschwindigkeiten festzustellen. Erstere betragen 5.1 m/s wohingegen weiter rechts nur mehr 2.3 m/s gemessen werden. Bei SB13 ist die größte Geschwindigkeit des Profils ebenfalls links mit 3.6 m/s gegeben. Auch hier tritt eine Geschwindigkeitsreduktion weiter rechts auf. Die linksseitige Geschwindigkeit verändert sich von SB01 bis SB13 von 5.1 m/s auf 3.6 m/s. Die maximale Geschwindigkeit dieses Versuches ist beim 1.Absturzbauwerk linksseitig mit 5.4 m/s gegeben.

### Der Wasserstand im Schwarzbach

Der Wasserstand beim Pegel STPS beträgt 1.37 m, während beim Pegel STPA der Pegelstand 2.92 m misst. Zusätzliche Werte sind den entsprechenden Pegelschlüsselkurven zu entnehmen. Der markante Wasserstandsanstieg zwischen STPS und STPA von 1.55 m ist auf den Fließwechsel von schießend zu strömend aufgrund der Sohlgefällsreduktion, sowie auf die Verkleinerung des Durchflussquerschnittes im Schwarzbach zurückzuführen. Dieser Versuch wurde bei offenem Schütz der Wehranlage durchgeführt. Dabei entnimmt man dem Schwarzbach bei dieser Modellmodifikation ca. 6.2 m<sup>3</sup>/s. Das entspricht etwa einem Siebtel des gesamten Abflusses im Schwarzbach. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass bei einem derartigen Hochwasser das Schütz geöffnet wird.

### Zusammenfassung

Durch die Rechtskurve im Schwarzbach wechselt die Hauptströmung im Bereich der Bundesstraßenbrücke von der Mitte des Bachbereiches auf die linke Bachseite. Rechtsufrig ist dadurch ab dem Profil SB04 eine Zone mit geringerer Fließgeschwindigkeit festzustellen. Die Geschwindigkeit steigt links bis zum Profil SB01 auf ein Maximum an, um bis zum Profil SB13 wieder deutlich zu sinken. Diese Veränderung ist auf einen Fließwechsel aufgrund des Sohlgefällsknickes knapp flussab vom Profil SB01 zurückzuführen. Im Profil SB13 sind deutlich niedrigere Geschwindigkeiten dafür aber höhere Wasserstände gegeben. Die Wasserentnahme stieg vom Versuch V.1.R.1.3 von 4.2 m<sup>3</sup>/s bis auf ca. 6.2 m<sup>3</sup>/s beim Versuch V.1.R.3.3 an.

#### 4.2.2 Geschiebetransportverhältnisse

Diese Versuche dienen dazu, die Änderungen hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse gegenüber dem IST-Zustand zu dokumentieren. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden dieselben Hochwasser und Geschiebeganglinien simuliert. Zudem gilt es die mithilfe der Sedimenttransportformel nach SMART & JÄGGI (1983) berechneten Werte mit den Modellergebnissen zu überprüfen.

##### Versuch V.1.G.1.3

##### Eingangsdaten

Die Geschiebedotation sowie die Hochwasserganglinie entsprechen jenen bei Versuch V.0.G.1.3.

##### Ergebnisse

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB02			
links	780.40	780.57	0.17
mitte	780.40	780.59	0.19
rechts	780.40	780.77	0.37
SB01			
links	779.91	780.09	0.18
mitte	779.81	780.41	0.60
rechts	780.18	780.53	0.35
SB14			
links	779.29	779.81	0.51
mitte	779.39	780.06	0.67
rechts	779.53	780.35	0.82
SB13			
links	779.22	779.96	0.74
mitte	779.27	780.05	0.77
rechts	779.33	780.08	0.75

Tab. 16: Ablagerungskoten und Ablagerungsmächtigkeiten

Die Ergebnisse der Geschiebetransportversuche zeigen gegenüber dem IST-Zustand ein geändertes Bild hinsichtlich der Ablagerungszone. Durch die Eliminierung des Einflusses der Leoganger Ache wandert der Sedimentkörper weiter flussab, und kommt zwischen SB02 und flussab des Einlaufes zur Ablagerung. Durch die Ablagerung kommt

es in dem Bereich zu einer Sohlgefällsreduktion von 3.34 % auf 1.85 %. Zu der mächtigsten Ablagerung kommt es im Profil SB13 mit ca. 0.75 m Höhe. Dieses Profil befindet sich in einer Sohlgefällssenke. Die Sohlkoten steigen bis zum ersten Absturzbauwerk auf ca. 779.50 m ü. A wieder an. Generell ist eine steigende Ablagerungsmächtigkeit von flussauf nach flussab festzustellen. Stark unterschiedliche Ablagerungsmächtigkeiten im Querprofil sind bei den Profilen SB01 und SB14 zu bemerken, wobei in SB01 links eine besonders geringe Ablagerungsmächtigkeit vorhanden ist. Das gesamte abgelagerte Geschiebevolumen beträgt ca. 84 m<sup>3</sup>.

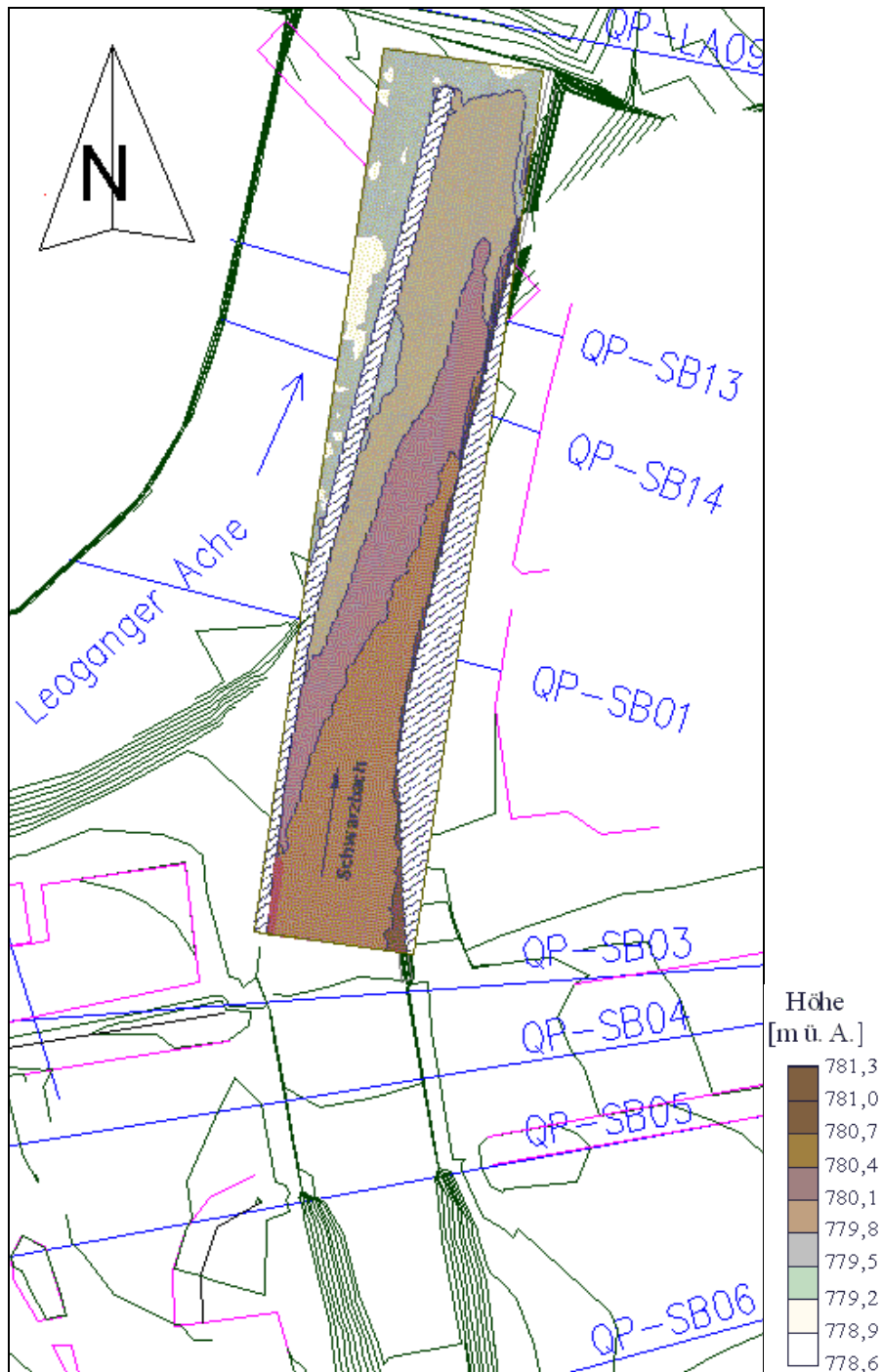


Abb. 43: Lageplan mit Ablagerungskörper nach Versuch V.1.G.1.3

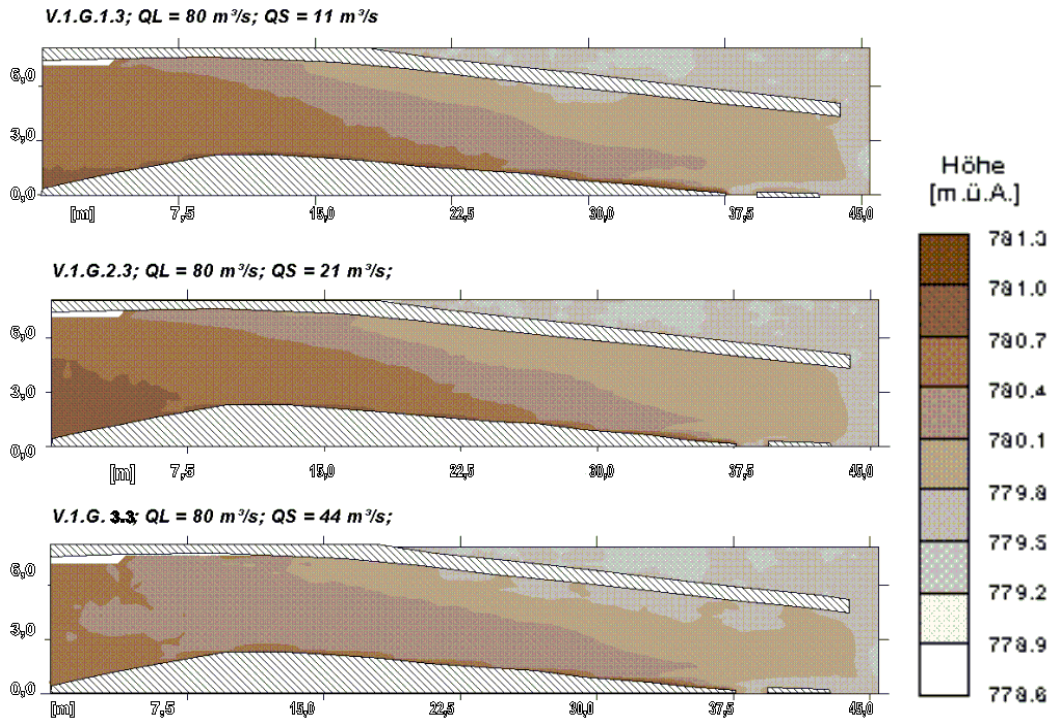


Abb. 44: Vergleich der drei Ablagerungskörper

		V.0.G.1.3	V.1.G.1.3	Differenz
Geschiebevolumenzugegeben [m³]		275.4	275.4	0
abgelagertes Volumen [m³]		260	84	176
Ablagerungsmächtigkeit [m]				
SB06	links	0.61	0.00	0.61
	mitte	0.44	0.00	0.44
	rechts	0.65	0.00	0.65
SB05	links	0.93	0.00	0.93
	mitte	0.90	0.00	0.90
	rechts	0.93	0.00	0.93
SB04	links	1.00	0.00	1.00
	mitte	1.08	0.00	1.08
	rechts	1.12	0.00	1.12
SB03	links	1.21	0.00	1.21
	mitte	1.34	0.00	1.34
	rechts	1.33	0.00	1.33
SB02	links	1.01	0.17	0.84
	mitte	1.41	0.19	1.22
	rechts	1.41	0.37	1.04
SB01	links	0.00	0.18	-0.18
	mitte	0.00	0.60	-0.60
	rechts	0.00	0.35	-0.35
SB13	links	0.00	0.51	-0.51
	mitte	0.00	0.67	-0.67
	rechts	0.00	0.82	-0.82
SB14	links	0.00	0.74	-0.74
	mitte	0.00	0.77	-0.77
	rechts	0.00	0.75	-0.75

Tab. 17: Vergleich mit den Ergebnissen des Ist-Zustandes

## **Verbesserung der Geschiebetransportsituation durch Öffnungen**

Die Geschiebetransportversuche im Rahmen der Modellmodifikation mit Trennwand zeigten bei allen drei Szenarien beträchtliche Ablagerungen vor allem im Bereich des Streichwehreinlaufes. Um die Situation für den Kraftwerksbetreiber zu verbessern, testete man die Wirkung der Öffnungen hinsichtlich ihrer Unterstützung der Transportkapazität im Bereich des Einlaufes. Es kommt zu einer Wasserströmung von der Ache in den Schwarzbach. Dies ist hydraulisch gesehen mit einem Mündungsbereich zu vergleichen. Dabei stellt die Wassermenge durch die Öffnungen einen Seitenkanal und der Schwarzbach einen Hauptkanal dar. Es gelten also die selben hydraulischen Gegebenheiten, die im Kapitel 2.1.3 angeführt sind (BEST and REID, 1984). Durch die Kenntnis der bestehenden Gesetzmäßigkeiten kann man mit Hilfe geeigneter Modifikationen eine Verbesserung der hydraulischen Verhältnisse erzielen.

Der Mündungswinkel ist für die Lage und Größe der Separationszone ausschlaggebend. Bei Mündungswinkeln von  $90^\circ$  kommt es durch eine große Separationszone zu einer starken Ablenkung der Hauptströmung im Gerinne. Ziel unserer Untersuchung war es, den Öffnungswinkel mit der optimalen Geschiebetransportsituation für den Bereich des Streichwehreinlaufes zu ermitteln. Dabei wurden pro Öffnung je zwei Keile mit verschiedenen Winkeln zur Veränderung des Mündungswinkels eingebracht. Bei Geschiebetransportversuchen ohne eingebrachter Keile zur Veränderung des Mündungswinkels von  $90^\circ$  bewirkte die orthogonale Strömung des Durchlassstromes einerseits eine stark ausgeprägte Separationszone, die durch ihren lokal niederen Druck und die niedere Fließgeschwindigkeit einen Ablagerungskörper darstellte. Andererseits kam es zum Aufstau im Oberwasser des Schwarzbaches und die Ablagerung wurde aus diesem Grunde höher (siehe Abb. 46). Um dem entgegenzuwirken wurden auch Versuche mit Mündungswinkeln von  $45^\circ$  und  $30^\circ$  durchgeführt. Dabei verkleinerte sich die Separationszone flussab der Öffnung und es kam zu einer geringeren Beeinflussung des Oberwassers im Schwarzbach. Hingegen wurde die flussab gerichtete Strömungskomponente verstärkt. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Öffnungen keine wesentliche Verbesserung der Geschiebesituation bringen. Es kommt lediglich zu lokalen Änderungen der Ablagerungsstruktur. Als günstigste der untersuchten Öffnungs- bzw. Mündungswinkel stellt jener mit  $30^\circ$  dar. Dabei entsteht keine nennenswerte Beeinflussung des Oberwasserbereiches im Schwarzbach.



Abb. 45: Blick vom 1. Absturzbauwerk nach flussauf; V.1.G.1.3

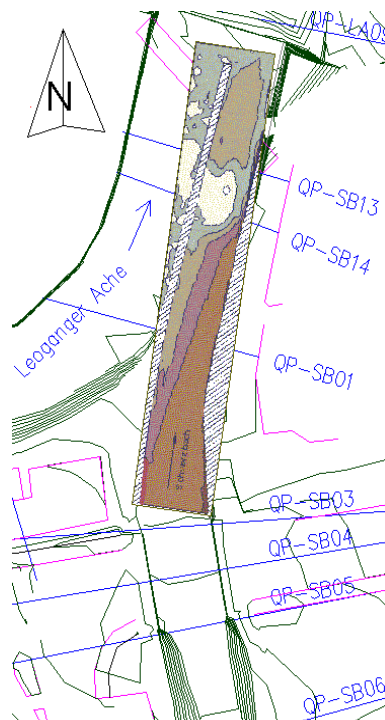


Abb. 46: Lageplan mit Geschiebeablagerung beim Versuch V.1.G.1.3 mit einer Öffnung

In Abb. 46 ist die Separationszone, aufgrund der Ablenkung der Hauptströmung im Bachbett des Schwarzbaches, durch den Ablagerungskörper zu sehen. Sie liegt nördlich der Profils LA13. Durch den Rückstau ergibt sich eine massive Ablagerung knapp flussauf der Öffnung.

#### 4.2.3 Sedimenttransportberechnungen

Um die Geschiebetransportversuche besser interpretieren zu können, wurden Sedimenttransportberechnungen an zwei verschiedenen Profilen im Mündungsbereich durchgeführt. Dabei wurden die Profile SB10 im oberen modellierten Bereich des Schwarzbaches sowie SB13 (bzw. LA13) in der Nähe des Einlaufes zum Streichwehr herangezogen, wobei SB10 flussauf des Sohlgefällsknickes ein Gefälle von 3.4 % aufweist, wohingegen beim Profil SB13 nach dem Gefällsknick nur noch ein Sohlgefälle von 0.8 % gegeben ist. Ziel dieser Berechnungen ist es, den Einfluss des Gefällsknickes beim Profil SB01 abschätzen zu können. Die Sedimenttransportformel von SMART & JÄGGI (1983) für ein Gefälle von 0.2 –20 % bildet die Berechnungsgrundlage für die in den Abb. 45 und 46 dargestellten Beziehungen zwischen Geschiebetransportraten und Durchflüssen. Als Eingangswerte dienten die Geometrieabmessungen im Profil SB13 bzw. jene für das Profil SB10. Die Querschnittsgeometrie wurde vereinfachend als Rechteck angenommen. Als Sohlgefälle wurde bei der ersten Berechnung ein  $I_s = 8 ‰$  angesetzt. Für das Profil SB10 wurde ein  $I_s$  von 3.4 % veranschlagt. Als hydraulische

Eingangswerte wurden die Messungen aus den Reinwasserversuchen bei der Variante mit Trennwand herangezogen.

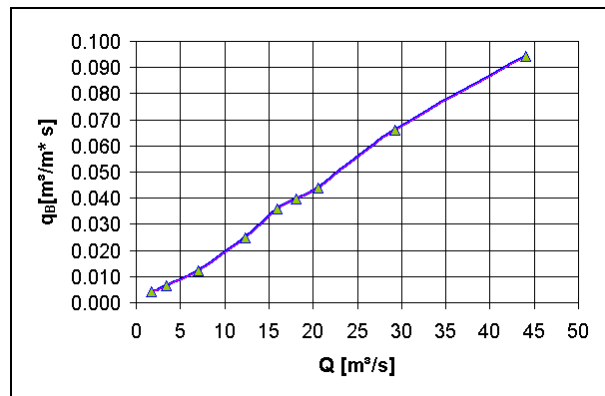
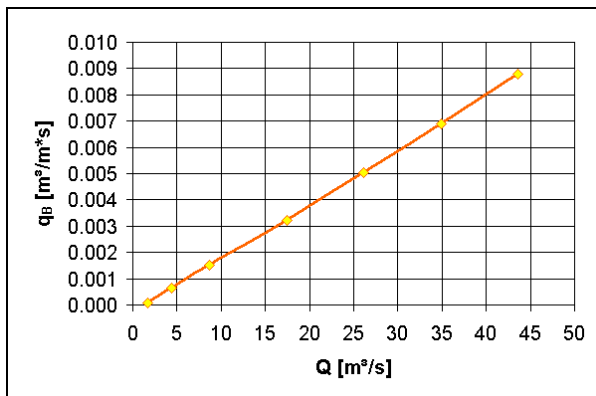


Abb. 47: Spezifische Geschiebetransportrate im Profil SB13

Abb. 48: Spezifische Geschiebetransportrate beim Profil SB10

Vergleicht man die spezifischen Geschiebetransportraten miteinander, so wird ein stark verringerter Wert bei allen Durchflüssen im Profil SB13 (nach dem Gefällsknick) deutlich. Die Werte sind etwa um den Faktor 10 verringert. Das heißt die Transportkapazität im Mündungsbereich sinkt ab der Mündung des Schwarzbaches in die Leoganger Ache bis zum ersten Absturzbauwerk auf ein Zehntel des Wertes des unteren Schwarzbaches ab. Diese Ergebnisse wurden durch Geschiebetransportversuche bestätigt.

#### 4.2.4 Untersuchungen des Geschiebetransportes bei eingebauten Buhnen

Durch die Modellmodifikation Trennwand wurde die Rückstauwirkung der hochwasserführenden Leoganger Ache eliminiert. Das geringe Gefälle zwischen Mündung und erstem Absturzbauwerk verursacht allerdings Ablagerungen, die besonders im linken Uferbereich ausgeprägt sind. Es wurde versucht mittels eingebauter Buhnen die Hauptströmung von der linken auf die rechte Bachseite zu lenken und somit eine vergrößerte Geschiebetransportkapazität zu erzielen. Dies konnte allerdings nur lokal erreicht werden. Allerdings kam es durch einen verstärkten Rückstau effekt zu größeren Ablagerungen oberwasserseitig der Einbauten. Beim Versuch mit fünf Buhnen konnte zwar eine geringere Ablagerungshöhe im rechten Bachbereich erreicht werden, jedoch konnte insgesamt keine Verminderung der Ablagerungsvolumina erzielt werden.



Abb. 49: V.1.G.1.3 (Blick vom 1.Absturzbauwerk flussauf)



Abb. 50: V.1.G.1.3 mit eingebauter Buhne

Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt eindeutig die Wirkungsweise der Buhne. Oberwasserseitig wird der Schwarzbach aufgestaut. Es bildet sich deshalb ein ausgeprägter Ablagerungskörper als bei Versuch V.1.G.1.3. Durch die Buhne wird die Hauptströmung zur rechten Ufermauer abgelenkt. Dadurch treten im rechten Bereich flussab der Buhne höhere Fließgeschwindigkeiten auf. Im Strömungsschatten der Buhne wird vermehrt Sediment abgelagert.



Abb. 51: Ablagerungskörper bei fünf eingebauten Buhnen und dem Versuch V.1.G.1.3

### 4.3 Variante 2 – Abgesenkte Trennwand

Variante 1 brachte hinsichtlich des Geschiebetransportes im Mündungsbereich Verbesserungen. Es wurde eine Ursache der Ablagerungen, nämlich der Rückstau des Schwarzbaches durch Hochwässer in der Leoganger Ache, eliminiert. Es besteht allerdings eine geringere Geschiebetriebrate im Bereich zwischen Mündung und erstem Absturzbauwerk aufgrund des niedrigeren Sohlgefälles (siehe Abb. 47). Die Geschiebetransportversuche der Variante 1 bestätigten diese Überlegungen. Im Rahmen einer Besprechung mit dem Auftraggeber einigte man sich auf die Ausführung der zweiten Umbauvariante. Eine Erhöhung des Sohlgefälles im Mündungsbereich kommt für die Praxis vorerst nicht in Frage, denn diese bedarf einer Ablöse des Wasserrechts, welche mit Schwierigkeiten bzw. hohem finanziellen Aufwand verbunden sein könnte.

Um die negativen Auswirkungen der Variante 1, nämlich die Erhöhung des Wasserspiegels im linken Uferbereich bei der Innenkurve der Leoganger Ache, auszuschalten, entschloss man sich für die Absenkung der Trennwand. Dadurch entsteht für größere Hochwässer in der Leoganger Ache eine Erweiterung des Durchflussquerschnittes. Zudem wurde die Ausgestaltung, der durch die Trennwand verbundenen stärkeren Linkskurve, im Sinne einer hydraulischen Verbesserung durchgeführt. Der Kote der abgesenkten Trennwand liegt bei 781.26 m ü.A., das entspricht 0,5 m unter der Wasserspiegelanschlagslinie des HQ<sub>30</sub> in der Leoganger Ache. Im Bereich des Einlaufes der Wasserentnahme wurden bei der abgesenkten Trennwand zwei Öffnungen mit einem Öffnungswinkel von 30° eingelassen. Diese sollten die Konsenswassermenge jederzeit gewährleisten.



Abb. 52: Variante 2 – Absenkte Leitwand

### 4.3.1 Fließcharakteristik

Bei einem  $HQ_{100}$  in der Leoganger Ache und einem Durchfluss von  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  im Schwarzbach bildet sich im Schwarzbach eine Zone mit geringer Fließgeschwindigkeit und mit einer Breite von bis zu 3 m vom Profil SB05 bis LA14 im rechten Uferbereich. Es ist ein Einfluss der Leoganger Ache auf das Abflussverhalten im Schwarzbach festzustellen. Ab dem Profil SB05 kommt es zu Unterschieden in der Fließgeschwindigkeit mittig, rechts und links. Beträgt im Profil SB07 die Geschwindigkeit im ganzen Bachbett ca.  $3.8 \text{ m/s}$ , so steigt diese beim Profil SB05 mittig auf  $4.5 \text{ m/s}$  an. Im gleichen Profil sinken jedoch die Fließgeschwindigkeiten im linken und rechten Bereich des Bachbettes auf  $2.2 \text{ m/s}$  ab. Diese unregelmäßige Fließgeschwindigkeitsverteilung ist neben der Wirkung der Linkskurve, Hinweis auf den Einfluss der Leoganger Ache. Bei Untersuchungen am Modell mit einem  $Q_S$  ist Null, reicht der Wasserspiegel der  $HQ_{100}$  führenden Leoganger Ache bis zum Profil SB05. Generell misst man im Mündungsbereich im rechten Bachbett der Leoganger Ache die größeren Fließgeschwindigkeiten, während im Schwarzbach in allen Profilen im Mündungsbereich die größten Werte links gemessen wurden.

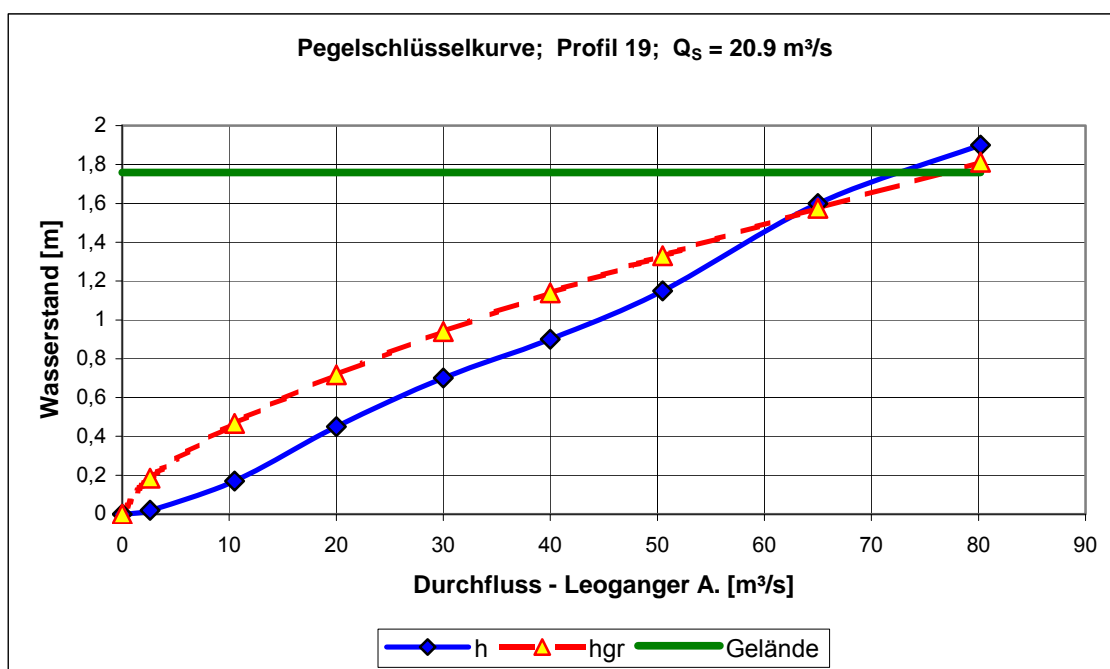


Abb. 53: Pegelschlüsselkurve Profil LA19; linksufrig;

### Überflutungsbereiche der Leoganger Ache

Ab einem Durchfluss von ca.  $49 \text{ m}^3/\text{s}$  kommt es zu Überflutungen im Oberlauf zwischen den Profilen LA22 und LA23. Bei einer Wasserführung entsprechend dem

HQ<sub>30</sub> sind Überschwemmungen im linken Uferbereich beim Profil SB01 festzustellen. Bei 61 m<sup>3</sup>/s kommt es im gesamten Oberlauf der Leoganger Ache zu Überschwemmungen.

#### 4.3.1 Geschiebetransportverhältnisse

### Versuch V. 2. G. 1

#### Eingangsdaten

Bei diesem Versuch wurden die Durchflüsse bzw. Geschiebeganglinien gewählt, die bei der Geschiebetransportanalyse des IST-Zustandes, die größten Ablagerungen bewirkten. Im Schwarzbach wurde die Hochwasserwelle 2 mit einem Abflussscheitel von 21 m<sup>3</sup>/s instationär simuliert, und in der Leoganger Ache wurde ein HQ<sub>100</sub> stationär nachgebildet.

#### Ergebnisse

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB04	780.73		
links		780.73	0.00
mitte		780.83	0.10
rechts		780.87	0.14
SB03	780.52		
links		780.56	0.04
mitte		780.96	0.44
rechts		781.07	0.55
SB02	780.40		
links		780.40	0.00
mitte		780.81	0.41
rechts		781.17	0.77
SB01			
links	779.91	780.00	0.09
mitte	779.81	780.25	0.44
rechts	780.18	780.80	0.62

Tab. 18: Ablagerungen beim Versuch V.2.G.1

Durch den Einfluss der Leoganger Ache kommt es zu einem Rückstau im Schwarzbach und es ergeben sich Ablagerungen im Bereich der Bundesstraßenbrücke. Die Ablagerungshöhen sind im rechten Bachbettbereich des Schwarzbaches deutlich größer als linksseitig. Dies wird einerseits durch den

Einfluss der Leoganger Ache und andererseits durch die Rechtskurve im Schwarzbach verursacht. Als gesamtes abgelagertes Volumen wurde ein Wert von ca. 70 m<sup>3</sup> ermittelt. Der Ablagerungskörper erstreckt sich vom Profil SB04 unter der Bundesstraßenbrücke bis etwa 3.00 m flussauf des Profils LA14. Hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse im Brückenbereich ist eine Verschlechterung gegenüber der Variante 1 zu erkennen.



Abb. 54: Ablagerung beim Versuch V.2.G.1, Blick vom Absturz nach flussauf

## Versuch V. 2. G. 2

### Eingangsdaten

Bei diesem Versuch wurde ein  $Q_L$  von 51 m<sup>3</sup>/s und ein  $Q_S$  von 44 m<sup>3</sup>/s nachgebildet. Es wurde dabei der mögliche gegenseitige Einfluss der beiden Bäche geprüft. Die Abflüsse von Schwarzbach und Leoganger Ache liegen im selben Größenbereich, sodass der Schwarzbach durch den Rückstauereffekt in seinem Sedimenttransportvermögen nicht zu stark eingeschränkt werden könnte.

### Ergebnisse

Das abgelagerte Volumen beträgt ca. 53 m<sup>3</sup> und liegt etwas unter der Kubatur des Versuches V.2.G.1. Die Ablagerungsmächtigkeit nimmt vom linken Bachbettbereich zum rechten Bachbettbereich zu. Die größten Ablagerungshöhen treten im rechten Bachbereich bei SB01 auf. Dies ist ein Bereich mit niedriger Fließgeschwindigkeit

aufgrund des Rückstaus des Schwarzbaches durch die Leoganger Ache. Aus Abb. 55 ist zu sehen, dass durch den höheren Durchfluss des Schwarzbaches die Transportkapazität gegenüber dem Versuch V.2.G.1 vergrößert ist. Der Ablagerungskörper erstreckt sich rechtsufrig bis zum Einlauf der Wasserentnahme. Die Annahme eines geringeren Rückstaus im Schwarzbach durch dessen hohen Abfluss wurde nicht bestätigt. Aus Abb. 56 ist die Rückstaubedingte Ablagerung deutlich ersichtlich. Sie ist nur unwesentlich geringer als bei Versuch V.2.G.1.

Profil	Sohlkoten [m ü.A.]	Ablagerungskoten [m ü.A.]	Ablagerung [m]
SB04			
links	780.73	780.77	0.04
mitte	780.73	780.81	0.08
rechts	780.73	780.85	0.12
SB02			
links	780.40	780.52	0.12
mitte	780.40	780.72	0.32
rechts	780.40	780.80	0.40
SB01			
links	779.91	780.71	0.12
mitte	779.81	780.53	0.72
rechts	780.18	780.30	0.80
SB14			
links	779.29	779.29	0.00
mitte	779.39	780.39	0.00
rechts	779.53	780.20	0.67
SB13			
links	779.22	779.22	0.00
mitte	779.27	779.27	0.00
rechts	779.33	780.01	0.68

Tab. 19: Ablagerung beim Versuch V.2.G.2



Abb. 55: Ablagerung beim Versuch V.2.G.2

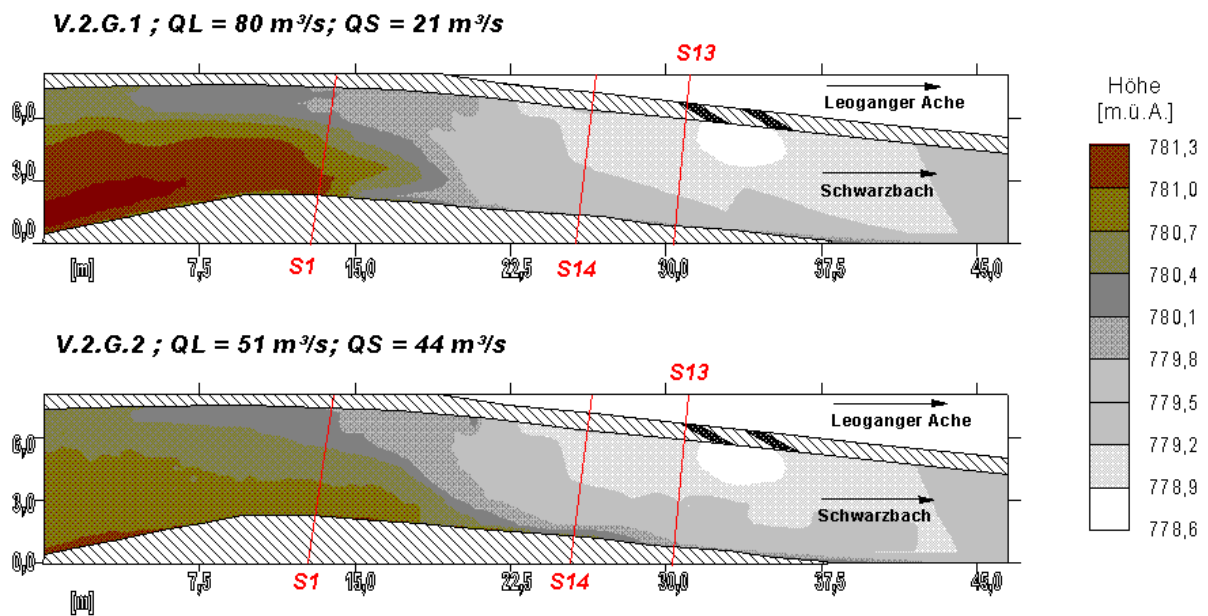


Abb. 56: Ablagerungen bei den Versuchen mit abgesenkter Trennwand

Zusammenfassung:

Die Umbauvariante 2 – abgesenkte Trennwand ermöglicht einen verbesserten Geschiebetransport des Schwarzbaches im Mündungsbereich gegenüber dem IST-Zustand. Die Forderungen der Verbesserung der Hochwasserstände im linken Uferbereich beim Profil SB01 der Leoganger Ache werden erfüllt. Die Wasserstände in diesem Bereich bewegen sich im Bereich des IST-Zustandes.

## 5 Zusammenfassung und Folgerungen

Der Mündungsbereich Schwarzbach – Leoganger Ache stellt hinsichtlich des Geschiebetransportes eine sensible Zone dar. Im Rahmen eines Schutzprojektes soll eine experimentelle Modelluntersuchung die Ursachen einer vermuteten unzureichenden Geschiebetransportkapazität dokumentieren, und mittels zweier Umbauvarianten des Mündungsbereiches eine Verbesserung der Situation des IST-Zustandes anstreben. Die Ergebnisse der Untersuchung sollen als Planungsgrundlage für Geschiebetransportverbesserungen dienen.

Bei den Versuchen des IST-Zustandes werden Kombinationen extremer Hochwasserereignisse beider Wildbäche und entsprechende Geschiebeganglinien während der Hochwasserereignisse im Schwarzbach nachgebildet. Dadurch werden die Geschiebetransportverhältnisse im Schwarzbach bei kurzfristig starker Beeinflussung durch die Leoganger Ache ermittelt. Zu Beginn der Untersuchung des IST-Zustandes steht die Erhebung der hydraulischen Fließcharakteristika. Dabei wird eine starke Veränderung des Abflussverhaltens im unteren Schwarzbach aufgrund von Rückstauwirkungen durch die Leoganger Ache und durch ein verkleinertes Sohlgefälle im Mündungsbereich deutlich. Es werden besonders in dieser beeinflussten Zone geringe Fließgeschwindigkeiten im Bereich von 0.1 bis 0.5 m/s festgestellt. Der gesamte modellierte Oberlauf der Leoganger Ache vom Querprofil LA24 bis LA19 sowie Gebäude am rechten Ufer direkt bei der Mündung des Schwarzbaches erweisen sich durch Überschwemmungen als besonders gefährdet. Die nachfolgenden Geschiebetransportversuche bestätigen die Ergebnisse der Reinwasserversuche. Es kommt zu massiven Ablagerungen im Bereich der Bundesstraßenbrücke als Folge des Rückstaus des Schwarzbaches durch die Leoganger Ache. Es werden maximale Ablagerungshöhen von 1.6 m gemessen, und es kommt zu Überschwemmungen der Bundesstraßenbrücke, aufgrund des durch die Ablagerungen unzureichenden Abflussquerschnittes. Bei einem hundertjährigen Hochwasser der Leoganger Ache und der Hochwasserwelle, bedingt durch ein einstündiges hundertjähriges Niederschlagsereignis im Schwarzbach ( $Q_{\text{Scheitel}} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tritt ein Ablagerungsvolumina von über 400 m<sup>3</sup> auf. Diese Kubatur entspricht etwa 80 % der Geschiebemenge, die während der simulierten Hochwasserwelle transportiert wird.

Die Ergebnisse der Untersuchung des IST-Zustandes bestätigen den Handlungsbedarf im Mündungsgebiet. Um Verbesserungen hinsichtlich der Geschiebetransportverhältnisse im Schwarzbach herbeizuführen werden folgende Überlegungen angestellt. Die temporären Ablagerungen im untersten Abschnitt des

Schwarzbaches resultieren aus einem Rückstau durch die Leoganger Ache. Um diesen negativen Effekt zu eliminieren ist eine Trennung der beiden Wildbäche erforderlich. Durch die Umbauvariante eins mit Trennwand wird dies erreicht. Durch die Trennwand wird zusätzlich ein verstärkter Schutz für das rechte Ufergebiet bei der Mündung erzielt. Die Reinwasserversuche zeigen größere Fließgeschwindigkeiten im abgetrennten Bachbereich des Schwarzbaches. Aber aufgrund des geringen Sohlgefälles kommt es zu geringeren Fließgeschwindigkeiten und zu strömendem Abfluss. Als negative Begleiterscheinung dieser Umbauvariante ist der erhöhte Wasserspiegel im linken Uferbereich der Leoganger Ache beim Profil SB01 hervorzuheben. Im rechten Bachbettbereich kommt es beim Linksbogen der Leoganger Ache zu einer Kehrwasserzone. Diese könnte auf längere Sicht gesehen Ablagerungen im Bachbett hervorrufen. Um die Konsenswassermenge der Wasserentnahme gewährleisten zu können, werden Öffnungen in der Trennwand vorgesehen. Längerfristig kann aber nicht abgesehen werden, ob es zu keiner Verschlechterung hinsichtlich der Wasserentnahme kommt. Die Geschiebetransportversuche bei der Variante 1 ergeben wesentliche Verbesserungen des Geschiebetransportes im Mündungsbereich. Die abgelagerten Volumina betragen nur noch knapp ein Drittel, der des IST-Zustandes. Dieses Ergebnis lässt allerdings auf eine zusätzliche Ursache für den ungenügenden Sedimenttransport im Mündungsbereich schließen, nämlich das künstlich verminderte Sohlgefälle im vereinigten Gerinne zwischen der Einmündung des Schwarzbaches und dem ersten Absturzbauwerk. Um eine vollständige Lösung der Problematik erreichen zu können, müsste das Sohlgefälle im Bachbett des Schwarzbaches zwischen Querprofil SB01 und erstem Absturzbauwerk erhöht werden. Diese Maßnahme kommt vorerst aufgrund der bestehenden Wasserentnahme in selbigen Bereich nicht in Frage.

Im Zuge einer Besprechung mit dem Auftraggeber einigte man sich auf die Absenkung der Trennwand und eine hydraulische Verbesserung des Linksbogens der Leoganger Ache als zweite Umbauvariante. Diese stellt eine Kompromisslösung dar, bei der die Erhöhung des Wasserstandes im linken Uferbereich, die bei der ersten Umbauvariante gegenüber dem IST – Zustand auftritt, unterbunden wird. Dies ist durch eine Absenkung der Trennwand möglich, da bei höheren Durchflüssen der Leoganger Ache ein erhöhter Durchflussquerschnitt für den Bach gewährleistet wird. Reinwasserversuche zeigen eine Verbesserung der Situation am linken Ufer der Leoganger Ache jedoch einen Rückstau des Schwarzbaches. Dieser ist ab größeren Abflüssen als  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  im Bachbett des Schwarzbaches im Mündungsbereich festzustellen. Die Geschiebetransportversuche ergeben eine Verbesserung

hinsichtlich der Ablagerungen im Vergleich zum IST-Zustand und vergleichbare Ergebnisse gegenüber Variante 1 (siehe Tab.18 und 19).

Durch die Untersuchung des IST-Zustandes sind die Ursachen der Problematik eindeutig festgestellt worden. Mit zwei untersuchten Varianten ist eine bedeutende Verbesserung hinsichtlich der Geschiebefreihaltung erzielt worden. Um die vollständige Lösung der Problematik im Sinne einer Annäherung zum ursprünglichen Naturzustand herbeiführen zu können, erweist sich eine Vergrößerung des Sohlgefälles im Mündungsbereich als notwendig. Diese Maßnahme ist besonders wichtig bei Hochwässern mit großen Geschiebefrachten. Eine regelbare Wehranlage an Stelle des ersten Absturzprofiles in Kombination mit der untersuchten Trennwand (Variante 2) stellt einen Kompromiss zwischen IST-Zustand (Kraftwerksbetrieb) und Geschiebefreihaltung im Mündungsbereich bei katastrophalen Hochwässern dar. Dabei ermöglicht die abgesenkte Trennwand neben der Verminderung des Rückstaueffekts durch die Leoganger Ache eine Eintiefung der Sohle und eine Ausführung des Wehres lediglich im Bereich des Bachbettes des Schwarzbaches. Die Wirksamkeit einer solchen Variante sollte durch weitere Modelluntersuchungen überprüft werden.

---

## 6 Literaturverzeichnis

**ARMANINI, A. und G. DI SILVIO**, 1991: Lecture Notes in Earth Sciences, Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Springer Verlag

**BEST, J.L. und I.REID**, 1984: Separation zone at open channel junctions, Proceedings American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering, 110, 1588-1595

**BRADBROOK, K.F., S.N.LANE, K.S. RICHARDS, P.M. BIRON, and A.G. ROY**, 2000:  
Large Eddy Simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. Journal of Hydraulics Research 38(3), 207-215

**BRADBROOK, K.F., S.N.LANE, K.S. RICHARDS**, 2000: Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. Water Resources Research 36, 2731-2746

**BRADBROOK, K.F., S.N.LANE, K.S. RICHARDS, P.M. BIRON, and A.G. ROY**, 2001:  
Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. Journal of Hydraulic Engineering 127, 351-368

**BREUSERS, H.N.C.**, 1983: International Course in Hydraulic Engineering; Lecture Notes on Sediment Transport 1; Delft

**BRISTOW, C.S., et al.** 1993: Morphology and facies models of channel confluences. In Marzo, M., and Puigdefabregas, C. (Eds.) Alluvial Sedimentation. International Association of Sedimentologists Special Publication 17, pp. 91-100

**CHIEN, N. und Z. WAN**, 1999: Mechanics of Sediment Transport; American Society of Civil Engineers Press

**DRACOS, T.**, 1990: Hydraulik, Vorlesungsunterlagen, 3., überarbeitete Auflage, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH-Hönggerberg, Verlag der Fachvereine Zürich

**FINK, M.**, 1986: Österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK), Schriftenreihe Nr. 50, Österreichischer Bundesverlag-Schulbuchzentrum

**HÜBL, H. und D. LEBER**, 2000: WLS-Report 43; Erfassung der geschieberelevanten Parameter des Leoganger Schwarzbaches, (Entwurf)

**JÄGGI, M.**, 1992: Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten; Mitteilungen 119 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

**JÄGGI, M.**, 1995: Flussbau, Vorlesungsunterlagen, ETH-Zürich Abteilung II, VIII und XC

**KOBUS, H.**, 1984: Wasserbauliches Versuchswesen, DVWK-Schriften, 2., revidierte Auflage, Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

**KRON, W.**, 1996: Stochastische Simulation des Geschiebetransports am Zusammenfluss zweier Gewässer, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe, Heft 59

**RAUDKIVI, A.J.**, 1982: Grundlagen des Sedimenttransportes, Springer Verlag

**SIEBEN, A.**, 1993: Hydraulics and morphology of mountain rivers; A literature survey; TU Delft

**SMART, G.M. und M. JÄGGI**, 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie, Nr.64, ETH-Zürich

**ZANKE, U.**, 1982: Grundlagen der Sedimentbewegung; Springer Verlag Berlin Heidelberg NewYork

---

## **7 Anhang – Abbildungen und Planskizzen**

### **A) Abbildungen**

Trockenaufnahmen der Modellvarianten

Vergleich der Wasserstände bei den drei Modellvarianten

Geschiebeablagerung und deren Auswirkung auf das Abflussverhalten im unteren Schwarzbach

Vergleich der Ablagerungskörper bei den drei Modellvarianten;  $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_S = 44 \text{ m}^3/\text{s}$

### **B) Planskizzen**

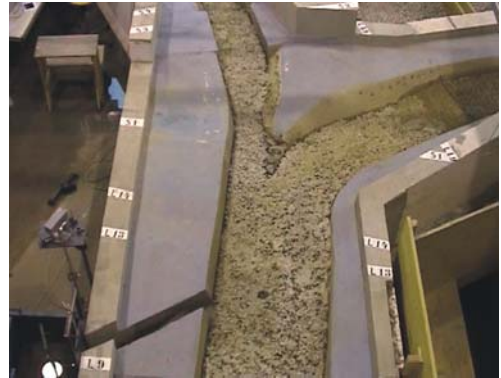
Grundriss des Modells

Lageskizze des Mündungsbereiches mit abgesenkter Trennwand

## Trockenaufnahmen der Modellvarianten



ISF-Zustand, Blick vom Absturzbauwerk nach flussauf



ISF-Zustand, Mündungsbereich - Blick nach flussauf



Variante Trennwand,  
Blick vom Absturzbauwerk nach flussauf



Variante Trennwand, Mündungsbereich  
Blick nach flussauf



Variante abgesenkte Trennwand,  
Blick vom Absturzbauwerk nach flussauf



Variante abgesenkte Trennwand,  
Mündungsbereich - Blick nach flussauf

Vergleich der Wasserstände bei den drei Modellvarianten  
 $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_S = 21 \text{ m}^3/\text{s}$



ISFZustand



Variante 1: Trennwand



Variante 2: Abgesenkte Trennwand

Geschiebeablagerung und deren Auswirkungen auf die Abflussleistung im unteren Schwarzbach bei einem  $HQ_{100}$  in beiden Wildbächen



Blick von der Mündung flussauf auf den unteren Schwarzbach



Blick vom ersten Absturzbauwerk flussauf

Vergleich der Ablagerungskörper bei den Durchflüssen  
 $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q_S = 24 \text{ m}^3/\text{s}$



ISFZustand



Variante 1: Trennwand



Variante 2: Abgesenkte Trennwand

# Lageskizze des Mündungsbereiches mit abgesenkter Trennwand

Maße [m]

