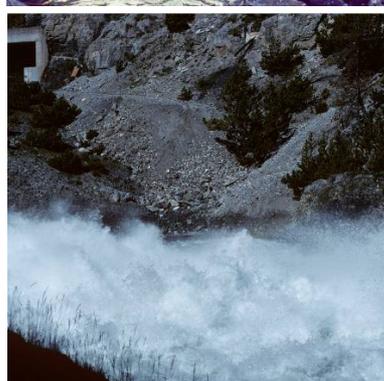
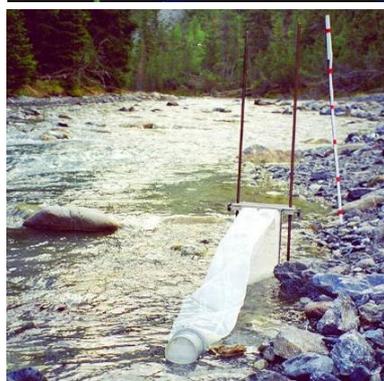
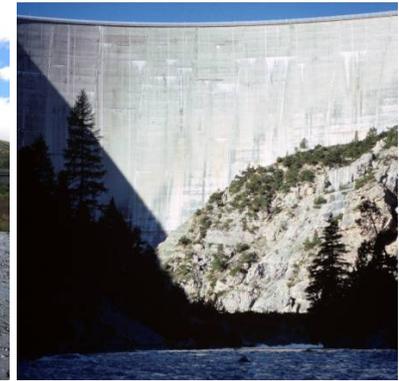
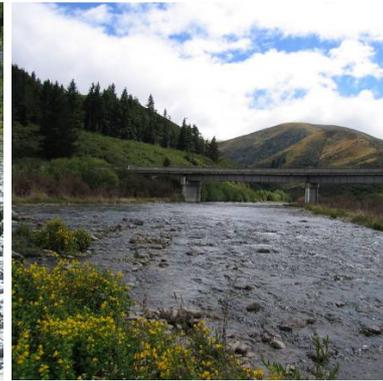


# Der Einfluss künstlicher Hochwasser auf Drift, Seston und die Flussmorphologie im Spöl (CH) und im Opuha River (NZ)



**Diplomarbeit von Tobias Buser**

**Departement Umweltwissenschaften, ETH Zürich**

**Geschrieben an der EAWAG  
Dübendorf, Dezember 2007**

**Betreuer:  
PD Dr. Christopher T. Robinson  
Dr. Urs Uehlinger**



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>5</b>
3.1	UNTERSUCHUNGSGEBIETE .....	5
3.1.1	<i>Der Spöl im Schweizerischen Nationalpark .....</i>	<i>5</i>
3.1.2	<i>Der Opuha in Neuseeland .....</i>	<i>8</i>
3.2	DRIFT UND SESTON .....	10
3.2.1	<i>Standorte .....</i>	<i>10</i>
3.2.2	<i>Probenahme.....</i>	<i>11</i>
3.2.3	<i>Analyse der Proben .....</i>	<i>12</i>
3.3	HABITATSCHARAKTERISIERUNG UND FLUSSBETTSTABILITÄT .....	13
3.3.1	<i>Standorte .....</i>	<i>13</i>
3.3.2	<i>Feld- und Laborarbeit .....</i>	<i>14</i>
3.3.3	<i>GPS/GIS .....</i>	<i>15</i>
3.3.4	<i>Statistische Analyse .....</i>	<i>15</i>
<b>4</b>	<b>RESULTATE .....</b>	<b>17</b>
4.1	DRIFT UND SESTON .....	17
4.1.1	<i>Driftdiagramme der sechs untersuchten künstlichen Fluten im Spöl und Opuha .....</i>	<i>17</i>
4.1.2	<i>Sestondiagramme der sechs künstlichen Fluten .....</i>	<i>19</i>
4.1.3	<i>Wasserproben und Trübung .....</i>	<i>21</i>
4.1.4	<i>Kombinationen .....</i>	<i>22</i>
4.1.5	<i>Hysteresekurven als Darstellungsmethode.....</i>	<i>23</i>
4.1.6	<i>Vergleiche anhand von Steigungen der Drift/Seston und Abflusskurven.....</i>	<i>25</i>
4.2	HABITATCHARAKTERISIERUNG UND FLUSSBETTSTABILITÄT .....	26
4.2.1	<i>Tiefe.....</i>	<i>26</i>
4.2.2	<i>Fliessgeschwindigkeit.....</i>	<i>27</i>
4.2.3	<i>Sedimentgrösse.....</i>	<i>27</i>
4.2.4	<i>Periphyton .....</i>	<i>28</i>
4.2.5	<i>Kombinationen .....</i>	<i>28</i>
<b>5</b>	<b>INTERPRETATION .....</b>	<b>30</b>
5.1	ENTWICKLUNG VON DRIFT UND SESTON SEIT BEGINN DES FLUTPROGRAMMS .....	30
5.2	INTERPRETATION VON DRIFT- UND SESTONDIAGRAMMEN .....	30
5.3	VERÄNDERUNG DER MORPHOLOGIE .....	32
5.4	EINFLUSS DER KÜNSTLICHEN FLUT AUFS PERIPHYTON .....	33
5.5	WEITERFÜHRENDE FORSCHUNG.....	33
<b>6</b>	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>38</b>
8.1	GIS-KARTEN.....	38



---

# 1 Zusammenfassung

Seit 2000 ist im Schweizerischen Nationalpark im Spöl unterhalb der beiden Staudämme Punt dal Gall und Ova Spin ein Flutprogramm im Gange. Mit künstlichen Hochwassern soll wieder ein möglichst natürliches Flussökosystem erreicht werden. Durch einen sehr konstanten Abfluss nach dem Beginn der Stromproduktion 1970 bis 2000 sammelte sich im Spöl feines Sediment an und Zuflüsse schichteten grosse Sedimentfächer bei deren Einmündungen auf. Eine bis drei künstliche Fluten pro Jahr sollen Abhilfe dagegen schaffen, die Habitatsdiversität im Fluss erhöhen und die eher lentische Artenzusammensetzung zu einer lotischen verschieben. Mit einer Langzeituntersuchung aller Aspekte des Flutprogramms soll die Entwicklung festgehalten werden und Wissen für andere Projekte gesammelt werden. Davon konnte auch ein neuseeländischer Fluss profitieren. Seit 2005 wird das Opuha-Opihi Flusssystem regelmässig geflutet, in erster Linie um die dicken Algenmatten zu entfernen.

2006 können wir während einer künstlichen Flut im Opuha Daten zu der Menge transportierter Organismen (Drift) und organischem Material (Seston) sammeln. Im Spöl stehen uns solche Daten von vier Hochwasserereignissen von den Jahren 2001/02 zur Verfügung. Im Juli und September 2007 erweitern wir den Datensatz mit zwei weiteren künstlichen Fluten, im Verlauf derer wir in regelmässigen Abständen Drift- und Wasserproben sammeln. Ein Ziel der Arbeit ist es herauszufinden, wie sich die Drift- und Sestonmenge seit Beginn des Flutprogrammes im Spöl entwickelt hat. Des Weiteren wird versucht gewisse Muster im Verlauf der Drift- und Sestonkurven während der Hochwasser zu finden und mit den Opuhadaten zu vergleichen. Damit könnten Vorhersagen ermöglicht werden.

Es besteht eine Tendenz, dass die Steilheit der Abflusskurve einen Einfluss auf die Drift- und Sestonmenge hat. Je abrupter das Wasser ansteigt, desto mehr Organismen und organisches Material werden weggeschwemmt. In allen beprobten Fluten können wir einen schnellen Anstieg der Drift und des Sestons erkennen. Der Peak wird bei acht von zehn Driftdiagrammen vor dem Abflussmaximum erreicht, sowohl im Spöl als auch im Opuha und in weiteren wissenschaftlichen Artikeln.

Ein abschliessender Vergleich zwischen den Jahren und den beiden Flusssystemen ist wegen einer zu geringen Anzahl Fluten und vielen unkontrollierbaren Einflussfaktoren nicht möglich, dafür müssen mehr künstliche Hochwasser beprobt werden.

Auch die morphologischen Veränderungen, die durch die künstlichen Fluten 2007 hervorgerufen werden, sind Thema der Arbeit. Vor und nach dem Hochwasser werden Tiefe, Fliessgeschwindigkeit, Sedimentgrösse und die Menge Periphyton in einem schluchtartigen und einem offenen Abschnitt des Spöls gemessen. Hier ist das Ziel, das Mass der Veränderung aufzuzeigen und abzuschätzen, wo der Einfluss einer künstlichen Flut grösser ist.

Im offenen Flussabschnitt, kurz vor Zernez, verändern sich alle vier morphologischen Faktoren signifikant. In der Schlucht hingegen nimmt nur das Periphyton signifikant ab. Der Grund dafür ist bei dem heterogenen und stabileren Flussbett im Kerbtal zu suchen, während sich bei Zernez viel Sediment umgelagert und somit die Tiefe und Fliessgeschwindigkeit beeinflusst werden.

## 2 Einleitung

Dämme haben tief greifende Wirkungen auf das gesamte Flussökosystem (Kondolf 1997, Friedl und Wüest 2002). Neben physikalischen und chemischen Veränderungen in Flüssen unterhalb von Reservoirs, spielen vor allem das Zurückhalten von Sediment und die fehlenden Abflussschwankungen eine wichtige Rolle bei der Beeinträchtigung des lotischen Ökosystems. Störungen in Form von Fluten sind essentiell, um die Bio- und Habitatsdiversität zu erhalten (Poff et al. 1997, Tockner 2000). Da es weltweit im Jahr 1997 ca. 40000 Dämme, die höher als 15 m sind und 20 Mal mehr Kleinere (Oud und Muir 1997, Jackson et al. 2001) gab, sind zahlreiche Fließgewässer von diesen Effekten betroffen.

Reservoirs benötigen von Zeit zu Zeit eine Säuberung von angesammeltem Sediment oder die Flutwehre müssen getestet werden. Es werden aber immer mehr Projekte lanciert, die nicht nur einen wirtschaftlichen Hintergrund für die Dammbetreiber haben, sondern in erster Linie zur Wiederherstellung des Ökosystems durchgeführt werden (Patten et al. 2001, Harada und Yasuda 2004, Petts 1996, Kondolf 1998, Tockner und Waringer 1997, Wilcock und Matthews 1996).

In dieser Diplomarbeit werden biologische Daten von künstlichen Fluten ausgewertet, die von zwei verschiedenen langfristigen Revitalisierungsprogrammen stammen. Das Eine begann im Jahr 2000 im Spöl (Scheurer und Molinari 2003), der durch den Schweizerischen Nationalpark fließt. Das Andere startete 2005 auf der neuseeländischen Südinsel im Opuha River.

Ein erstes Ziel des Spölprojekts wurde schon mit den ersten vier Fluten annähernd erreicht. Habitate wurden erneuert und Dynamik in das Flussbett gebracht. Durch die langsame Erholung des Systems werden aber erst Langzeituntersuchungen zeigen, ob sich wirklich wieder natürliche Bedingungen einstellen. So sind einige erwartete Effekte bis heute ausgeblieben (Mannes 2007).

Ein sehr wichtiger Aspekt davon, bezogen auf die aquatischen Insekten, ist der Transport von Makroinvertebraten (Drift) und organischem Material (Seston). Für die Populationsdynamik der Organismen ist dieser Vorgang essentiell (Brittain und Eikeland 1988).

Drift im Allgemeinen ist ein sehr gut untersuchtes Thema der Flussökologie (Waters 1972, Céréghino und Lavandier 1998, Matthaei et al. 1998, Hieber et al. 2003, Brittain und Eikeland 1988). Der Transport von Insekten und organischem Material während Flutereignissen wurde hingegen erst selten beprobt (Robinson et al. 2004A, Robinson et al. 2004B, Mochizuki et al. 2006). Künstliche Fluten sind dafür prädestiniert, da sie geplant werden können. Diese positiven Voraussetzungen, mehrere vorhersehbare künstliche Fluten zur Verfügung zu haben, laden dazu ein, Fragen zu beantworten:

Ist ein Muster in der katastrophalen Drift erkennbar welches überall auf der Welt in lotischen Systemen wieder auftaucht und eine gewisse Vorhersage zulässt? Sind damit Planungen von anderen künstlichen Fluten möglich? In welche Richtung entwickelte sich das Ökosystem Spöl seit Beginn des Projekts?

Daraus haben sich folgende Hypothesen ergeben:

- 1 Es ist zu erwarten, dass die Sestondichte während der Hochwässer seit 2000 bis im Jahr 2007 abgenommen hat, da Moos und Periphyton regelmässig durch künstliche Fluten in ihrem Wachstum gestört werden und sich damit eventuell widerstandsfähigere Arten angesiedelt haben. Einerseits die erhöhte Fließgeschwindigkeit, aber vor allem das Sediment, das sich während der Flut aneinander reibt, führen zu dieser Reduktion. Für die Invertebratendrift wird

angenommen, dass sie quantitativ auf gleichem Niveau bleibt, sich die Artenzusammensetzung aber langsam verändert. Tiere können sich durch ihr Verhalten an regelmässige Störungen anpassen und die entstehenden Lücken in der Fauna könnten durch störungsresistentere Arten gefüllt werden.

- 2 Die Driftdiagramme vom Spöl und Opuha zeigen die gleichen Muster und qualitativen Merkmale. Auch im Vergleich zwischen den Jahren 2001/02 und 2007 im Spöl sind Gemeinsamkeiten zu erwarten.

Diese Hypothesen versuchen wir mit einer Zeitreihe von Driftmessungen während der künstlichen Flut zu testen.

Der zweite Teil meiner Diplomarbeit untersucht die Veränderung der Morphologie und des Periphytons durch die künstlichen Fluten im Spöl. Die Flussbettstabilität und Veränderung der Morphologie kann ein wichtiger Faktor für das Ausmass der Drift und des Sestons sein (Gibbins et al. 2007). Durch fehlende Hochwasser können Habitate, wie Pools, verloren gehen, da sie durch feines Sediment aufgefüllt werden (Milhous 1998). Das zieht weit reichende Folgen für die Organismen nach sich. Fische finden keine Brutplätze mehr (Ortlepp und Mürle 2003) und die Lebensräume für aquatische Insekten verschwinden. Im Spöl unterhalb der Punt dal Gall Staumauer hingegen fehlen diese Störungen und der Einfluss der einmündenden Fliessgewässern ist zu klein (Mürle et al. 2003). Zur Flussmorphologie im Spöl sind folgende Frage aufgetaucht:

Hängt der Einfluss der künstlichen Flut auf die Morphologie von der Beschaffenheit des Tales ab?  
Wie gross sind die zu erwartenden Veränderungen durch die künstlichen Hochwässer?

Folgende Hypothesen werden getestet:

- 1 Die künstliche Flut hat unterschiedliche Veränderungen der Flussmorphologie zur Folge, je nach dem ob der Flussabschnitt schluchtartig oder offen ist. Es ist zu erwarten, dass im schluchtartigen Abschnitt die Veränderungen kleiner ausfallen werden, da das Flussbett durch Muttergestein und grosse Felsblöcke stabilisiert wird. Im offenen Abschnitt hingegen ist das Flussbett breiter und das Sediment kleiner und weniger variabel.
- 2 Das Periphyton wird in beiden untersuchten Flussabschnitten durch die künstliche Flut stark reduziert werden. Im offenen Abschnitt wird ein stärkerer Effekt erwartet, da sich das Sediment stärker bewegen wird

Vorher-nachher Messungen der Flussmorphologie und des Periphytons sollen Aufschluss darüber geben, ob diese beiden Hypothesen richtig oder falsch sind.

Ein mögliches Ziel dieser Arbeit kann es sein, eine Vorhersage der Auswirkungen künstlicher Fluten zu ermöglichen, sodass das Wissen aus dem Spölprojekt auf andere Flusssysteme übertragen werden kann. Wie schon Kondolf und Wilcock (1996) erkannt haben, machen künstliche Fluten zur Verbesserung der Ökologie nur Sinn, wenn vorher klare Ziele definiert werden. Somit kann das Flutprogramm genau an die definierten Anforderungen angepasst werden. Dazu sind allerdings

umfassende Probenahmen und ein fortlaufendes Monitoring nötig. Unsere Untersuchungen am Spöl können als Teil des Langzeitmonitorings angesehen werden, welches seit 1999 läuft und die Entwicklung des Ökosystems aufzeigt. Mit diesen Informationen und weiteren Daten aus der Zukunft wird es immer besser möglich sein, künstliche Fluten so effektiv wie möglich durchzuführen und damit die Hürde zur Anwendung des Programms in möglichst vielen regulierten Flüssen zu verringern.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Untersuchungsgebiete

#### 3.1.1 Der Spöl im Schweizerischen Nationalpark

Der Spöl entspringt im hinteren Valle die Livigno, fliesst an Livigno vorbei in den Livignostausee. Ein Teil des Wasserreservoirs wird vom Acqua del Gallo gespeist, welcher vor dem Bau ungefähr bei der Staumauer mit dem Spöl zusammenfluss. Auf seinem weiteren Weg befindet sich ein schluchtartiger Abschnitt mit teilweise senkrechtem Ufer, bis er beim zweiten Damm nochmals gestaut wird. Unterhalb von Ova Spin öffnet sich das Tal langsam und der Spöl mündet bei Zernez in den Inn. Das gesamte Einzugsgebiet beträgt 286 km<sup>2</sup>, wovon jedoch nur 6 km<sup>2</sup> zwischen dem Punt dal Gall Staudamm und der Punt Periv Brücke liegen. Grosse Zuflüsse gibt es nur wenige, erwähnenswert ist lediglich der Ova da Cluozza welcher das Cluozzatal entwässert und der Fuorn, der kurz vor dem Ova Spin Reservoir dazu fliesst. Beide Flüsse sind nicht reguliert. Zwischen dem Punt dal Gall Damm und Ova Spin wird durch wenige kleine Nebenflüsse Sediment in den Spöl gespült.

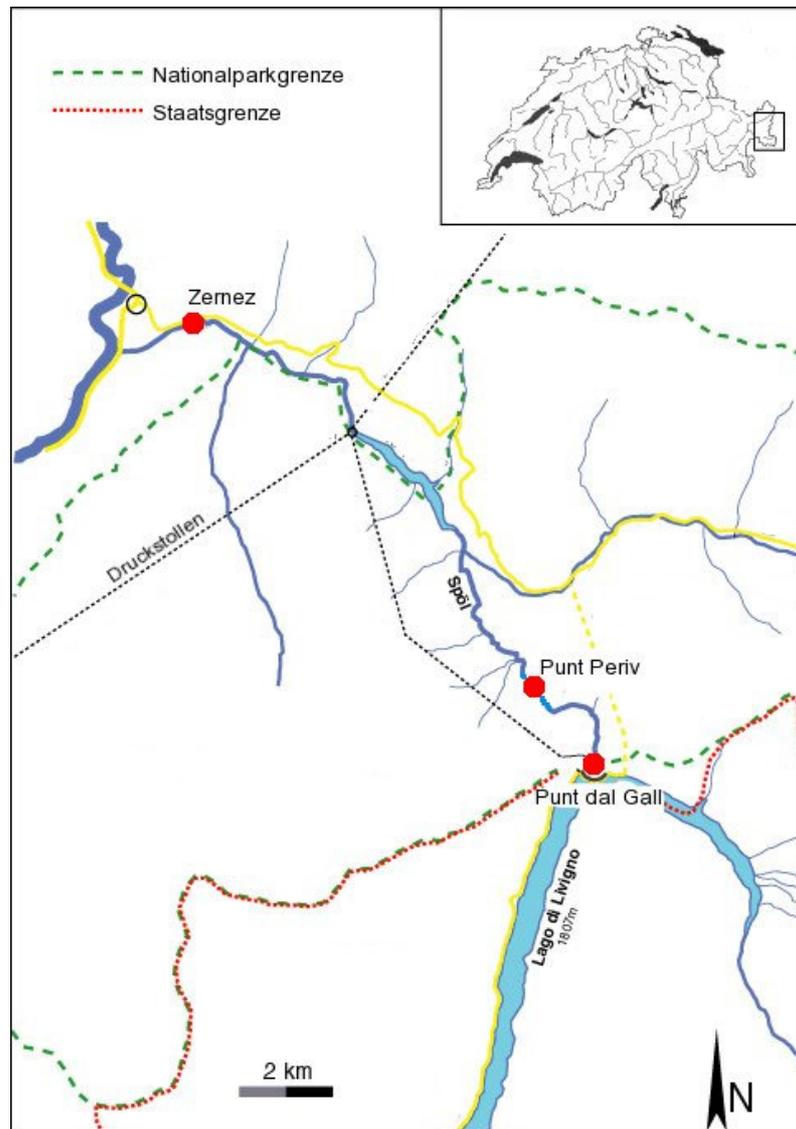


Abbildung 1: Der Spöl zwischen Lago di Livigno und Inn mit Kraftwerksanlagen (Druckstollen, Punt dal Gall und Ova Spin Staudamm)



Abbildung 2: Der Spöl vom Punt dal Gall Staudamm aus fotografiert.

Die ursprüngliche Hydrologie war durch regelmässige Hochwasser im Sommerhalbjahr charakterisiert (Abbildung 4). Der durchschnittliche Abfluss lag bei 6 bis 12 m<sup>3</sup>/s und die Maximalereignisse überschritten regelmässig die 50 m<sup>3</sup>/s Marke (Abbildung 3). Die seit Messbeginn grösste Flut wurde im Jahr 1960 bei 140 m<sup>3</sup>/s gemessen. Eine erste Veränderung des Fließregimes fand nach 1963 statt, als der Abfluss durch Wasserentnahme aus dem Acqua del Gallo in Italien verringert wurde. Nach einer Volksabstimmung im Jahr 1956 wurde entgegen starkem Widerstand vom Nationalpark um 1960 mit dem Bau der Staumauern und um 1970 mit der Stromproduktion begonnen. Damit wurde die gesamte Hydrologie komplett geändert. Hochwasser blieben weitgehend aus, abgesehen von einigen Ereignissen zur

Wartung des Reservoirs. Es fanden lediglich drei Fluten statt, die grösser als 40 m<sup>3</sup>/s waren. Während und nach der Flut im Jahr 1990 wurden zum ersten Mal Daten gesammelt, um den Einfluss des neuen Fließregimes auf die Ökologie des Spöls abzuschätzen. Auf Grund dessen starteten 1996 Diskussionen zwischen der Nationalparkkommission und den Engadiner Kraftwerke um ein Flutprogramm, das die Ökologie des Flusses wieder möglichst nahe an den natürlichen Zustand bringen soll. Glücklicherweise ergab sich eine Situation, die für alle Akteure befriedigend war. Da Informationen von ähnlichen Flutprogrammen zu dem Zeitpunkt noch fehlten musste eine Art Vorreiterprojekt ausgearbeitet werden. Es gab zwei Rahmenbedingungen, die eingehalten werden mussten. Einerseits durfte die Energieproduktion nicht abnehmen, es musste also kostenneutral gearbeitet werden und andererseits durfte die jährliche Abflussmenge nicht erhöht werden. Der maximale Abfluss wurde auf 30 m<sup>3</sup>/s festgelegt, da ein Ablagern des feinen Sediments im Ova Spin Reservoir verhindert werden wollte.

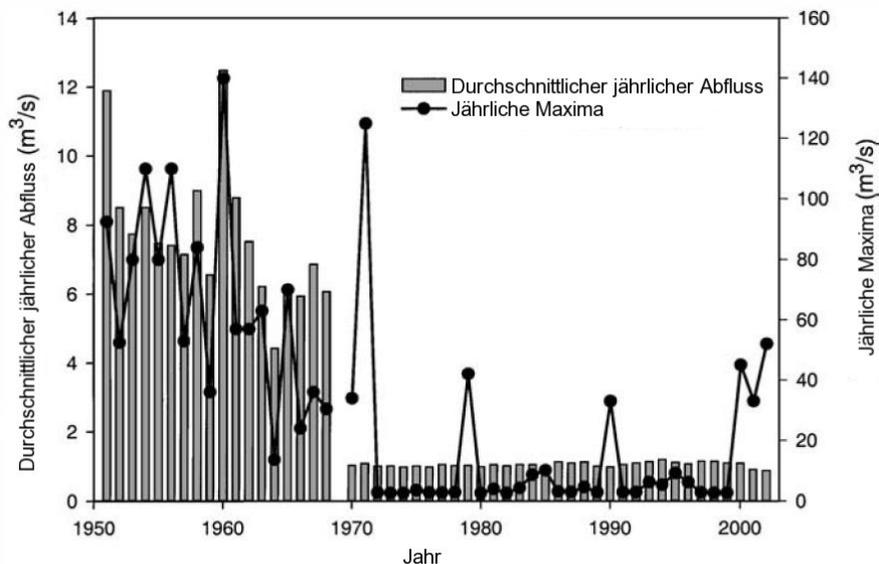


Abbildung 3: Durchschnittlicher jährlicher Abfluss und jährliche Maxima im Spöl, vor und nach dem Dammbau.

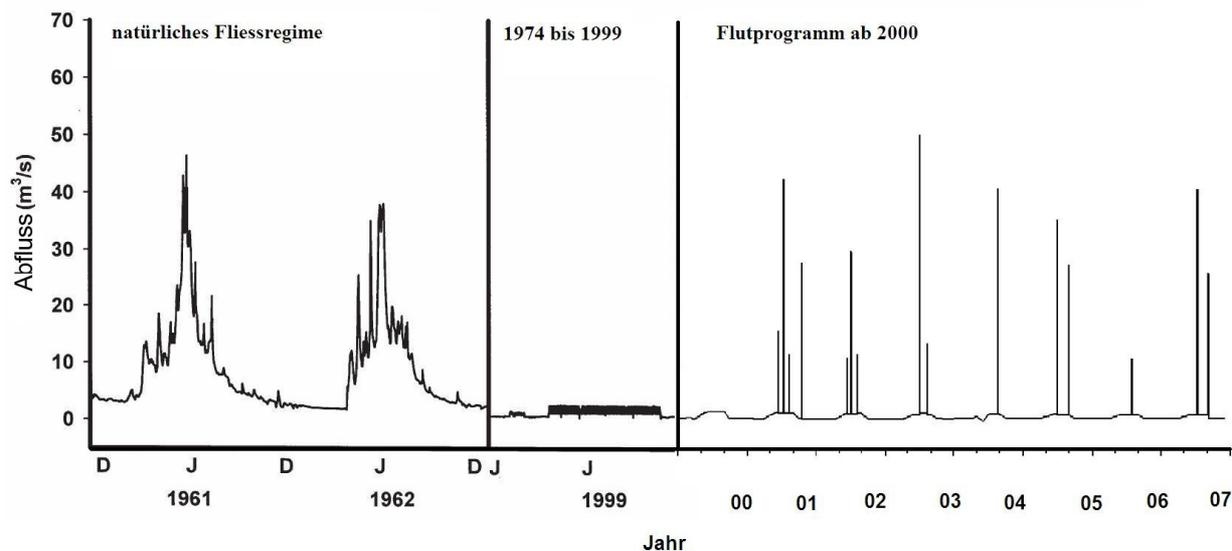


Abbildung 4: Abfluss im Spöl während den drei Perioden: natürliche Situation, nach dem Dammbau ohne Flutprogramm und mit Flutprogramm ab dem Jahr 2000.

Man konnte sich auf eine dreijährige Testphase einigen. Während dieser Zeit sollten Daten gesammelt werden, um die optimale Frequenz, Dauer und den Maximalabfluss der künstlichen Fluten zu bestimmen. Das Wasser, das für die Fluttag abgelassen wurde, konnte durch einen leicht verringerten durchschnittlichen Abfluss kompensiert werden (Tabelle 1). In der Testphase fanden insgesamt 11 geplante Fluten und eine ungeplante, wegen starken Regenfällen (Anspringen der Hochwasserentlastung bei der Staumauer Punt dal Gall), statt. Bei Punt dal Gall waren es neun Fluten in den drei Jahren und unterhalb von Ova Spin waren es drei. Wegen Regulationsproblemen beim Wasserauslass der Dämme konnten die angestrebten Maximalen Abflüsse selten genau erreicht werden und wurden meistens überschritten. In den nachfolgenden Jahren wurden im oberen Spöl abwechselnd eine oder zwei künstliche Fluten durchgeführt und im unteren je eine.

Tabelle 1: Die Abflussdaten vor und nach dem Dammbau und während dem Flutprogramm unterhalb des Livigno und Ova Spin Reservoirs.

			Oberer Spöl (unterhalb Punt dal Gall)	Unterer Spöl (unterhalb Ova Spin)
bis 1970			Durchschnittlich 6 bis 12 m <sup>3</sup> /s	Durchschnittlich 6 bis 12 m <sup>3</sup> /s
1970 bis 1999	16. Mai bis 30. September	6:00 bis 18:00	2.47 m <sup>3</sup> /s	1 m <sup>3</sup> /s
	16. Mai bis 30. September	18:00 bis 6:00	1 m <sup>3</sup> /s	1 m <sup>3</sup> /s
ab 1999	1. Oktober bis 15. Mai		0.55 m <sup>3</sup> /s	0.3 m <sup>3</sup> /s
	16. Mai bis 30. September		1.44 m <sup>3</sup> /s	0.9 m <sup>3</sup> /s
	1. Oktober bis 15. Mai		0.55 m <sup>3</sup> /s	0.3 m <sup>3</sup> /s

Für meine Diplomarbeit konnte ich auf Daten von insgesamt acht Fluten zurückgreifen (Tabelle 4 und Tabelle 6). Unterhalb von Punt dal Gall berücksichtigten wir vier Fluten vom Beginn des Projekts 2001/02 und von zwei Fluten im Jahr 2007 sammelten wir die Daten und Proben selber. Unterhalb von Ova Spin benutzten wir die Juli-Flut im Jahr 2007 für unsere Analysen.

### 3.1.2 Der Opuha in Neuseeland

Der Opuha ist ein Teil des stark verästelten Opihi Flusssystem im Zentrum der Südinsel Neuseelands, im südlichen Canterbury (Abbildung 5). Er entspringt an zwei Stellen einem rund 2000 Meter hohen Hügelland, das den Südalpen vorgelagert ist. Nach ungefähr 25 km Fließstrecke des North Opuha mündet er mit dem South Opuha in das Staubecken des Opuha Dam. Von der Staumauer sind es weitere 55 km bis der Opuha bei Temuka in den Südpazifik fließt. Kurz nach dem Reservoir schlängelt sich der Fluss durch eine schwer zugängliche Schlucht und setzt seinen Weg als mäandrierender Tieflandfluss durch eine mehrheitlich ebene Landschaft fort.

Das Einzugsgebiet bei der Skipton Bridge beträgt 458 km<sup>2</sup>. Es ist fast durchgehend landwirtschaftlich genutzt, überwiegend als extensive Schaf- und Rinderweiden. Bewaldung ist durchwegs nicht vorhanden, lediglich ein Streifen Ufergebüsch befindet sich entlang dem Gewässer. Die Flussmorphologie ist weitgehend natürlich geblieben, nirgends wird der Fluss durch Dämme eingeschränkt.

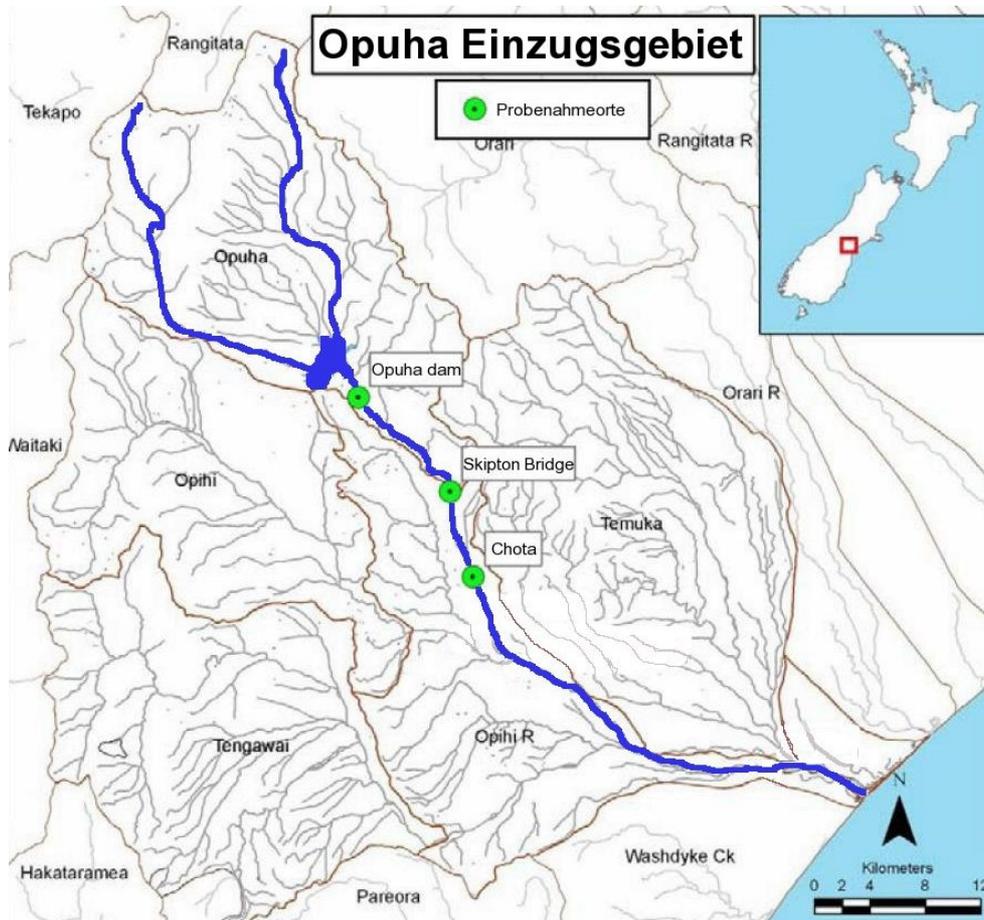


Abbildung 5: Einzugsgebiet des Opuha auf der Südinsel Neuseelands mit dem Reservoir in der oberen Hälfte und den drei Probenahmestellen, Opuha dam, Skipton Bridge und Chota Bari Farm.

Die hydrologische Situation vor dem Dammbau war von natürlichen Hochwässern geprägt. Bei der Skipton Bridge war der durchschnittliche jährliche Abfluss 9.8 m<sup>3</sup>/s. Der jährliche Durchschnitt des maximalen Tagesabflusses betrug seit Messbeginn im Jahr 1963 114 m<sup>3</sup>/s. Im Mai 1994 wurde die

bisher grösste Flut gemessen, mit einem maximalen Tagesabfluss von 346 m<sup>3</sup>/s. Nachdem der Damm gebaut wurde, wurde der durchschnittliche Abfluss etwa um die Hälfte reduziert und beträgt typischerweise 4 m<sup>3</sup>/s (Abbildung 6).

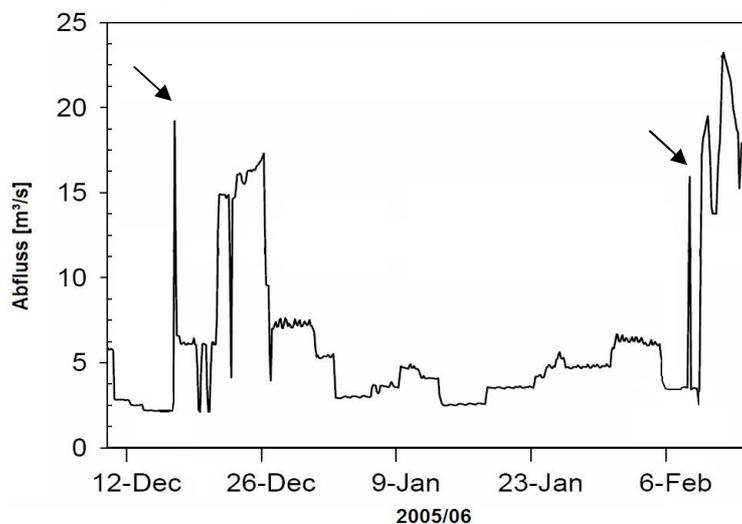


Abbildung 6: Abflussdaten vom Opuha bei der Skipton Bridge im Sommer 2005/06. Die Pfeile bezeichnen die beiden künstlichen Fluten im Dezember und Februar.



Abbildung 7: Der Probenahmestandort unterhalb des Opuha Damms.

Der Bau wurde von einem Dambruch im Februar 1997 überschattet, welcher dazu führte, dass 13 Mio. m<sup>3</sup> Wasser den Opuha hinunter flossen. Direkt unterhalb des Damms wurde der Abfluss in dieser Nacht auf 1800 bis 2000 m<sup>3</sup>/s geschätzt. Schlussendlich konnten die Bauarbeiten aber trotzdem im April 1999 abgeschlossen und der Betrieb aufgenommen werden.

Der Grund, weshalb das Flutprogramm durchgeführt wird ist vor allem beim Periphyton zu suchen (Arscott et al. 2007). Das Flussbett ist von dichten Algenmatten bedeckt, teilweise auch von der invasiven Art *Didymosphenia geminata*. Der Anstoss zu den Massnahmen kam vor allem von Seiten der Fischerei, aber auch der Landwirtschaft. Einige Cyanobakterien führten zu Vergiftungen von Hunden und Vieh.

Im März 2005 wurde deshalb die erste künstliche Flut durchgeführt und anschliessend drei weitere bis im Februar 2006. Der maximale Abfluss während der Flut war immer etwa gleichhoch (ca. 20m<sup>3</sup>/s),

lediglich der Erhöhungsfaktor zum durchschnittlichen Abfluss vorher veränderte sich zwischen 2.5 und 8.1 (Tabelle 2).

Datum	Durchschnittlicher Abfluss vor der Flut [m <sup>3</sup> /s, Durchschnitt einer Woche]	Maximaler Abfluss während der Flut	Magnitude [x durchschnittlicher Abfluss]
06.03.2005	7.3	18.1	2.5
13.05.2005	2.7	21.8	8.1
17.12.2005	2.7	21.5	8.0
08.02.2006	5.3	21	4.0

Tabelle 2: Alle bisher durchgeführten künstlichen Fluten im Opuha. Die markierte Flut wurde von uns beprobt.

Es wurden zwei Ziele formuliert, die mit den künstlichen Fluten erreicht werden sollten:

1. Algenmatten, die dicker als 3 mm sind sollen nicht mehr als 60% des Flussbettes überwuchern.
2. Filamentöse Algenbedeckung, die mehr als 2 cm lang ist, soll nicht mehr als 30 % des Flussbettes bedecken.

Beide Ziele beziehen sich auf die neuseeländischen Periphyton Richtlinien (Biggs 2000).

Für meine Diplomarbeit standen mir die Drift- und Sestonaten der Februar 2006 Flut zur Verfügung. Wir haben sie im Rahmen des Flutprogrammes der NIWA (National Institute for Water and Atmospheric Research, Christchurch) zwischen dem 7. und 9. Februar 2006 am Opuha gesammelt. Ausgewertet wurden die Proben später an der EAWAG in Dübendorf.

## 3.2 Drift und Seston

Es wird zwischen den driftenden Makroinvertebraten und dem restlichen organischen Material unterschieden. Folgende Wortdefinitionen für die beiden Fraktionen sind in der Literatur üblich:

Drift: Die Gesamtheit der transportierten Makroinvertebraten (Robinson 2004).

Seston: Robinson et al. (2004) definierte das Seston als transportiertes organisches Material. Aus methodischen Gründen ist bei meiner Arbeit das Seston dasselbe, jedoch abzüglich der Drift.

### 3.2.1 Standorte

Am Spöl im Schweizerischen Nationalpark nahmen wir an zwei Standorten mit unterschiedlichen Abständen zum Punt dal Gall Damm Proben (Tabelle 3). Die Wahl war von der Zugänglichkeit abhängig. Der Probenahmeort Punt dal Gall befand sich 200 Meter unterhalb des Dammes und konnte über den Tunnel Munt la Schera mit dem Auto erreicht werden. Punt Periv konnte zu Fuss ab Punt la Drossa erreicht werden. Dieser Standort liegt ungefähr 50 Meter oberhalb der Periv Brücke. Aus Sicherheitsgründen mussten wir die Proben vom Rand des Spöls nehmen, da es während der Flut nicht mehr möglich war das Gewässer zu überqueren. Alle Stellen waren aber auch beim Restwasserabfluss permanent überschwemmt.

Beim Opuha beprobten wir drei Standorte (Abbildung 5). „Dam“ befindet sich direkt unterhalb des Reservoirs. Nach einer längeren, unzugänglichen Schlucht führt die „Skipton Bridge“ über den Fluss,

welche unseren mittleren Standort bezeichnete. Weiter unten konnten wir den Zugang zum Opuha der „Chota Bari Farm“ nutzen. In diesem Fluss konnte einige Meter vom Ufer entfernt beprobt werden, da das Flussbett breiter ist und der Pegel deswegen nicht so stark anstieg.

Tabelle 3: Alle Probenahmestandorte im Spöl und Opuha, bei denen wir Drift und Seston beprobt haben.

Standort	Reservoir	Abstand zum Damm [km]	Höhe [m.ü.M]	Koordinaten
Punt dal Gall	Livignostausee	0.2	1697	46°37'35.34"N / 10°11'38.95"E
Punt Periv	Livignostausee	2.5	1657	46°38'12.21"N / 10°10'55.17"E
Dam	Opuha	0.2	324	44° 0'48.11"S / 170°53'58.93"E
Skipton Bridge	Opuha	12	234	44° 4'50.16"S / 170°58'43.73"E
Chota	Opuha	19	188	44° 7'19.56"S / 170°59'24.55"E

### 3.2.2 Probenahme

Drift und Seston wurden mit Driftnetzen (Maschenweite CH: 400  $\mu\text{m}$ , NZ: 250  $\mu\text{m}$ ; Netzöffnung CH: 0.045  $\text{m}^2$ , NZ: 0.0153  $\text{m}^2$ ) während der Flut ungefähr jede halbe Stunde beprobt (Abbildung 8). Im Spöl wurde das Netz nie ganz untergetaucht, so dass auch die Oberflächendrift berücksichtigt werden konnte. Bei geringem bis mittlerem Abfluss konnten die Netze während der Probenahme an Metallstangen befestigt werden, beim Maximum hingegen wurden sie für ungefähr 30 Sekunden von Hand in die Strömung gehalten. Die Probenahmedauer variierte von 20 Sekunden bis 20 Minuten und wurde angepasst, je nach dem wie schnell sie mit Seston gefüllt wurden.

Die vier Fluten aus 2001/02 im Spöl wurden von Stefan Aebischer beprobt (Robinson et al. 2004A), diejenigen von 2007 und die Opuha Flut von uns.



Abbildung 8: Das einzelne Driftnetz, das wir im Spöl verwendeten (Maschenweite: 400  $\mu\text{m}$ , Netzöffnung: 0.045  $\text{m}^2$ ) und die etwas kleineren doppelten Netze vom Opuha (Maschenweite: 250  $\mu\text{m}$ , Netzöffnung: 0.0153  $\text{m}^2$ )

Tabelle 4: Alle Probenahmeorte und –zeitpunkte für Drift und Seston im Spöl und Opuha. Die hellgrau markierten Daten wurden von uns beprobt. Die Steigung wurde zwischen dem Start der künstlichen Flut bis zum Maximalen Abfluss berechnet.

Datum	Staumauer	Probenahmeorte	Maximaler Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Dauer [h]	Steigung bis zum Maximum [(m <sup>3</sup> /s)/min]
13.06.2001	Punt dal Gall	Punt Periv	11.4	10.5	14.3
05.07.2001	Punt dal Gall	Punt Periv	50	11.1	43.5
07.08.2001	Punt dal Gall	Punt Periv	11.9	10.9	4.1
02.07.2002	Punt dal Gall	Punt Periv	48.7	12	10.8
31.07.2007	Punt dal Gall	Punt Periv	40.4	6.8	14.8
31.07.2007	Punt dal Gall	Punt dal Gall	40.4	6.8	18.7
11.09.2007	Punt dal Gall	Punt Periv	26.4	6.8	22.9
08.02.2006	Opuha	Dam	21	3.8	34.0
08.02.2006	Opuha	Skipton Bridge	16.4	6.5	11.1
08.02.2006	Opuha	Chota	15.5	8	5.1

Zusätzlich zur Drift und dem Seston nahmen wir im Spöl ungefähr 20 Wasserproben und massen die Trübung mit einem Turbidimeter (Cosmos<sup>®</sup>, Züllig AG, Rheineck) in regelmässigen Abständen im Verlauf der Fluten. Die Masseinheit ist NTU (nephelometric turbidity units).

Den Pegelstand erfassten wir im Spöl an beiden Standorten, um die Abflussdaten vom Elektrizitätswerk zu korrigieren und die Verzögerung bis zum unteren Probenahmeort zu bestimmen.

### 3.2.3 Analyse der Proben

Die Proben, die wir mit den Driftnetzen gesammelt hatten, wurden in Kühlboxen nach Dübendorf transportiert und sofort bei -20° tief gefroren. Unter dem Binokular wurden die Invertebraten nach folgenden Gruppen sortiert und gezählt: Chironomidae Larvae, Chironomidae Puppae, Simuliidae, Gammaridae, Plecoptera, Heptageniidae, Baetidae, restliche Diptera, Trichoptera, Gastropoda, Imago. Das entspricht der Unterteilung, die auch bei den früheren Untersuchungen im Spöl benutzt wurde und kann mit einem vertretbaren Zeitaufwand durchgeführt werden. Daphnien und Copepoden wurden dabei nicht berücksichtigt, da sie zu zahlreich vorhanden waren. Das restliche tote Material wurde bei 60° für einige Tage getrocknet und später nach dem Wägen bei 540° für 4 Stunden eingeäschert und erneut gewogen. Die Massendifferenz ist das Seston.

Die Wasserproben (jeweils ungefähr ein Liter) wurden gefiltert (Whatman GF/F), bei 60° getrocknet, gewogen, eingeäschert und erneut gewogen. Somit konnte zwischen dem suspendierten organischen und inorganischen Material pro Volumen unterschieden werden.

Die Abflusskurven kamen durch verschiedene Quellen zustande. Im Spöl standen uns die Abflussdaten vom Flutwehr des Punt dal Gall Staudammes zur Verfügung und die Pegelmessungen an beiden Standorten. Damit konnte die Abflusskurve für Punt Periv genau bestimmt werden. Im Opuha hingegen waren die Distanzen zwischen den Probenahmeorten einiges grösser, wodurch sich das Maximum und die Dauer der Flut flussabwärts veränderten. Beim Damm standen uns die Daten von Alpine Energy Ltd. zur Verfügung, weiter unten erhoben wir selber manuelle Pegel- und Abflussmessungen. Die Feldmessungen bei der Skipton Bridge waren nicht sehr verlässlich, da die Messstation eigentlich nur als Flutwarnung dient. Deshalb wurde die Kurve für diese Arbeit so

angepasst, dass das gesamte Flutvolumen auch beim mittleren Probenahmeort den beiden anderen Kurven entsprach.

Die Fläche der Hysteresekurven ist so definiert, dass alles dazuzählt, was sich innerhalb der Kurve befindet. Verglichen wurden sie anhand eines Indexes, bei dem die grösste Fläche als 1 bezeichnet wurde und die kleineren mit dem prozentualen Anteil davon.

### 3.3 Habitatscharakterisierung und Flussbettstabilität

#### 3.3.1 Standorte

Die Habitatscharakterisierung wurde an zwei ungefähr 700 Meter langen Flussabschnitten durchgeführt (Tabelle 5). 3.5 km unterhalb des Punt dal Gall Staudamms befindet sich ein Abschnitt mit Schluchtcharakter, wie er am oberen Spöl üblich ist. Wir gelangten von Punt la Drossa zu Fuss an den Ort, der etwa einen Flusskilometer unterhalb der Periv Brücke liegt. 4.5 km unterhalb des Ova Spin Damms, kurz vor Zernez, weitet sich das Tal auf, weshalb wir hier unseren zweiten Standort festlegten. An beiden Standorten befindet sich kurz vorher ein Zufluss. Beim oberen Untersuchungsstandort fliessen zwei Seitenflüsse aus dem Val da l'Acqua und dem Val da la Fögliä direkt vorher in den Spöl, bei Zernez ist es der Ova da Cluozza, etwa 1.3 km vor dem beprobten Abschnitt. Beide Orte sind also zusätzlich zu der künstlichen Flut auch teilweise von natürlichen Hochwassern beeinflusst und es findet ein beachtlicher Sedimenteintrag aus den Seitentälern statt.

Tabelle 5: Die beiden Probenahmeorte, bei denen wir die Morphologie massen.

Standort	Reservoir	Abstand zum Damm [km]	Schlucht/offen	Höhe [m.ü.M]	Koordinaten	Gefälle [%]
Punt Periv	Livignostausee	3.5	Schlucht	1658	46°38'38.45"N 10°10'28.24"E	1.17
Zernez	Ova Spin	4.5	offen	1482	46°41'43.51"N 10° 6'3.03"E	1.02



Abbildung 9: Die beiden Standorte, an denen wir die Morphologieveränderung erfassten. Links ist der schluchtartige Abschnitt unterhalb von Punt Periv zu sehen und rechts der offene kurz vor Zernez.

### 3.3.2 Feld- und Laborarbeit

Innerhalb der ausgewiesenen Flussabschnitte haben wir mit Zufallsnummern alle zehn Meter für einen Transekt zwei Punkte ausgewählt, womit wir einen Datensatz mit je ca. 130 Punkten erhielten. Überall wurde die Morphologie anhand der Fliessgeschwindigkeit, des Sedimentdurchmessers (längster und zweitlängster Durchmesser) und Tiefe gemessen. Bei der Hälfte der Punkte wurde zusätzlich das Periphyton erhoben. Die Fliessgeschwindigkeit wurde mit einem MiniAir 2 (Schiltknecht, Gossau, ZH) bei 60 % der Tiefe gemessen. Für das Periphyton wurde jeweils zufällig ein Stein ausgewählt und direkt im Feld weiterverarbeitet. Mit einer Kupferbürste wurde eine kleine Fläche auf der wasserzugewandten Seite abgeschabt und mit etwas Flusswasser in einen Behälter gespült. Nach dem Notieren des Volumens und dem Vermessen der abgeschabten Fläche, wurden zwischen 10 und 20 ml mit einer Handpumpe gefiltert und der Filter (Whatman GF/F) in Petrischalen nach Dübendorf transportiert. Im Tiefkühler wurden sie konserviert. Nach einigen Tagen im Trockner bei 60°C bestimmten wir die Masse des Filters und kurz nach dem Einäschern (4h, 540°C) noch einmal. Das Periphyton wurde als AFDM/cm<sup>2</sup> ausgedrückt.

Bei Punt Periv wurde die Flut vom 31.7.2007 beprobt und bei Zernez die Flut vom 4.7.2007 (Tabelle 6). Beim Periphyton war es wichtig dass der Abstand zum Fluttermin nicht allzu gross war, da sich die Algen sehr schnell erholen. Die Daten wurden also so gewählt, dass nach der Flut nicht mehr als drei Tage bis zur erneuten Probenahme vergingen (Tabelle 7).

Tabelle 6: Die beiden beprobten Fluten.

Datum	Staumauer	Probenahmeorte	Maximaler Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Dauer [h]
31.07.2007	Punt dal Gall	Punt Periv	40.4	6.8
04.07.2007	Ova Spin	Zernez	40.5	10.5

Tabelle 7: Daten, an denen wir die Morphologie und das Periphyton erhoben.

	Vor der Flut	Nach der Flut
Punt Periv Morphologie	13.6.2007	2.8.2007
Punt Periv Periphyton	19.7.2007	2.8.2007
Zernez Morphologie	11.6.2007	19.7.2007
Zernez Periphyton	3.7.2007	6.7.2007

### 3.3.3 GPS/GIS

Für jeden Punkt an dem wir die Morphologie und das Periphyton gemessen haben, bestimmten wir die exakten Koordinaten mit einem differentiellen GPS-Gerät von Trimble (DGPS, Pro XR/XRS™, Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, CA, USA). Zur differentiellen Korrektur der Daten verwendeten wir die RINEX-Daten der AGNES Referenzstation in Ardez im Unterengadin. Swipos-GIS/GEO stellt uns die Dateien zur Verfügung (Swisstopo 2007). Die Korrektur wurde im Pathfinder Office Version 2.70 (Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, Ca, USA) durchgeführt. Weiter verarbeitet wurden die räumlichen Informationen in ArcMap™ 9.1 (©1999-2005 ESRI Inc., Redlands, CA, USA). Für die Interpolation der einzelnen Messpunkte auf die ganze Fläche wurde die Methode Inverse Distance Weighting (IDW) angewandt.

### 3.3.4 Statistische Analyse

Für die statistische Analyse verwendete ich das Programm SPSS 15.0.1 (© 2006 SPSS Inc.). Für den vorher-nachher Vergleich der Morphologie wurde ein multivariater Test, Wilks-Lambda, verwendet. Das Periphyton wurde mit einem allgemeinen linearen Modell verglichen. Das Signifikanzniveau wurde bei 0.05 festgelegt. Bei der statistischen Auswertung der morphologischen Veränderungen wurden 13 Flussabschnitte mit je 10 Messpunkten zusammengefasst. Beim Periphyton waren es 11 bzw. 5 Abschnitte mit je 5 bis 7 Messpunkten.



## 4 Resultate

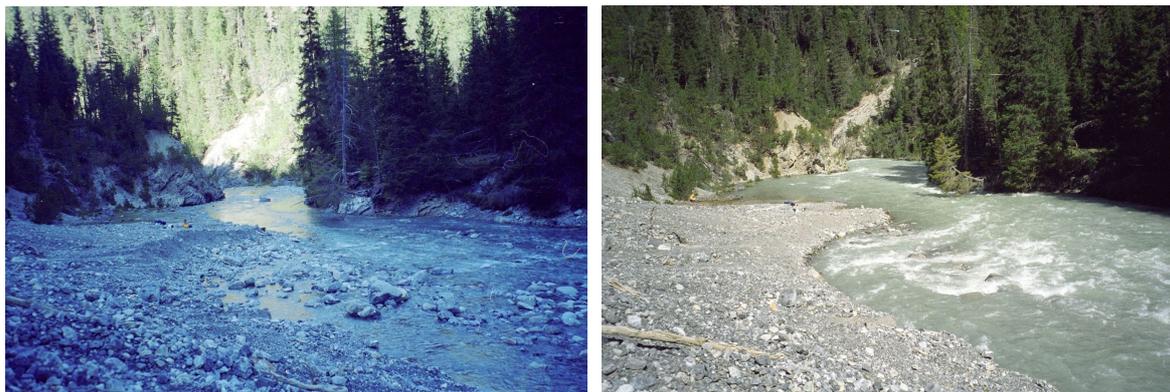
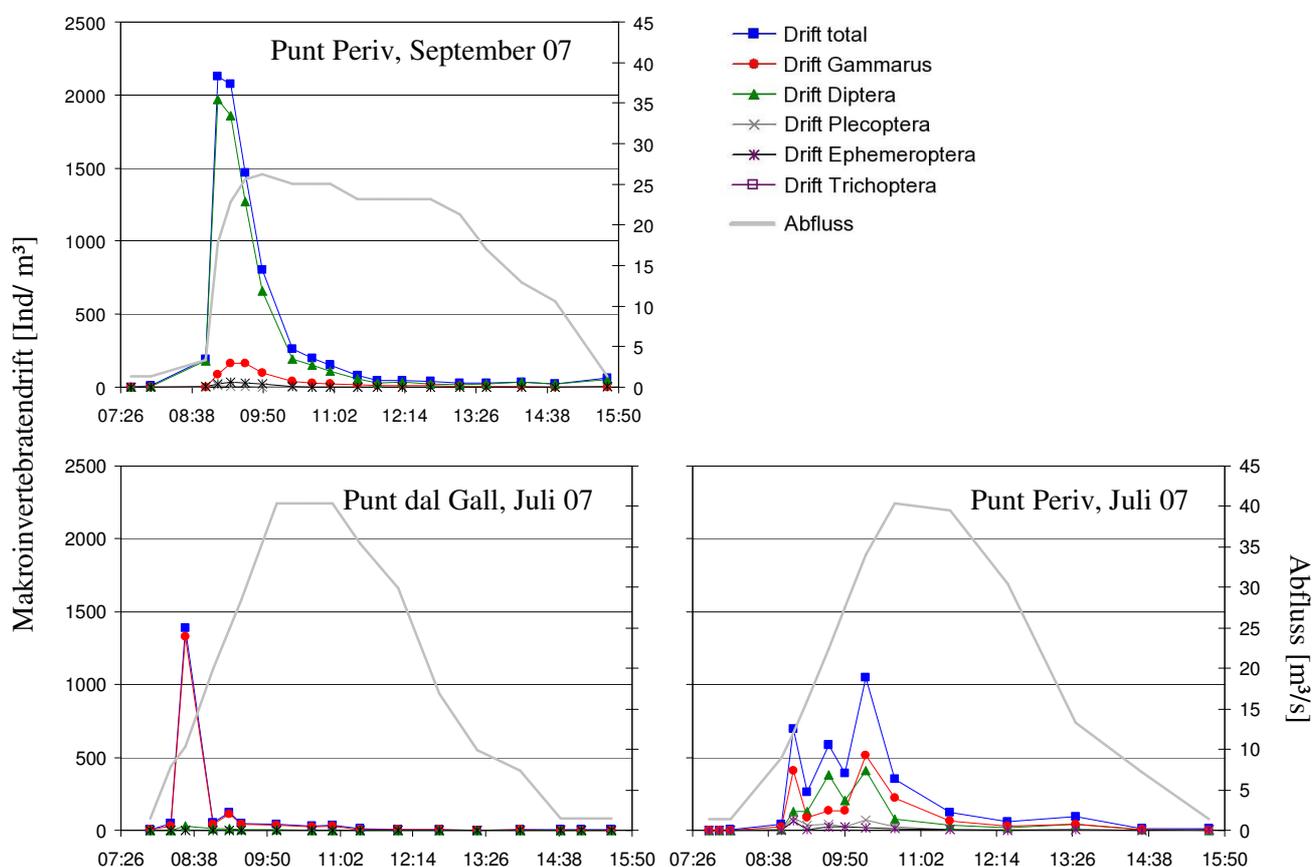


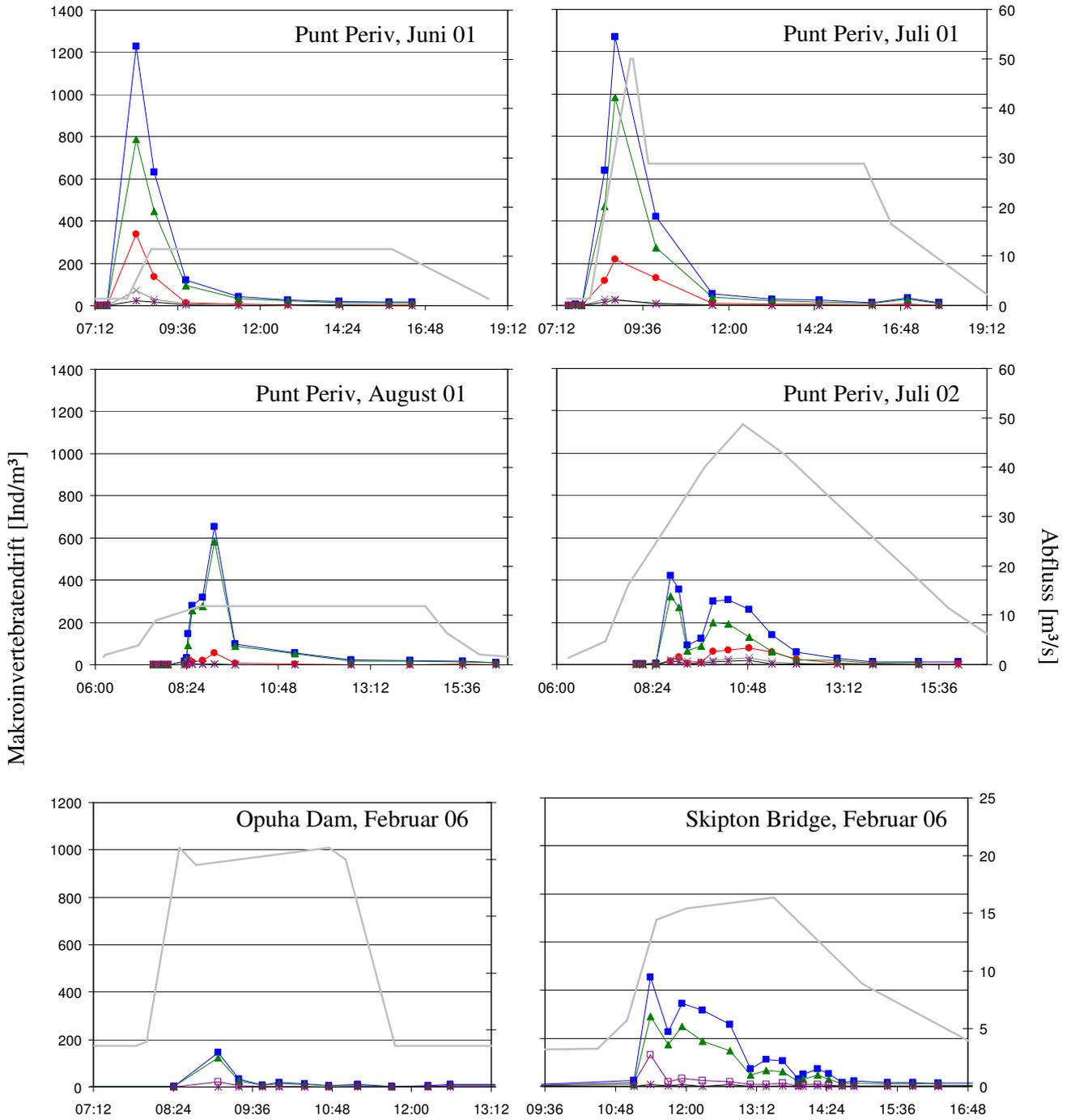
Abbildung 10: Der Spöl vor und während der Septemberflut 2007 (Maximum 26 m<sup>3</sup>/s) beim Standort Punt Periv.

### 4.1 Drift und Seston

#### 4.1.1 Driftdiagramme der sechs untersuchten künstlichen Fluten im Spöl und Opuha

Bei allen beprobten Fluten nahm die Anzahl transportierter Makroinvertebraten schnell zu und nachdem der Peak überschritten wurde auch schnell wieder ab. Die maximale Drift ist häufig schon vor dem Abflussmaximum erreicht. Im Nationalpark variiert die maximale Anzahl Makroinvertebraten zwischen 2130 (September 2007, Punt Periv) und 420 Individuen pro m<sup>3</sup> (Juli 2002, Punt Periv), im Opuha zwischen 147 (Opuha Dam) und 1045 (Chota); dort allerdings für die gleiche Flut an verschiedenen Probenahmeorten.





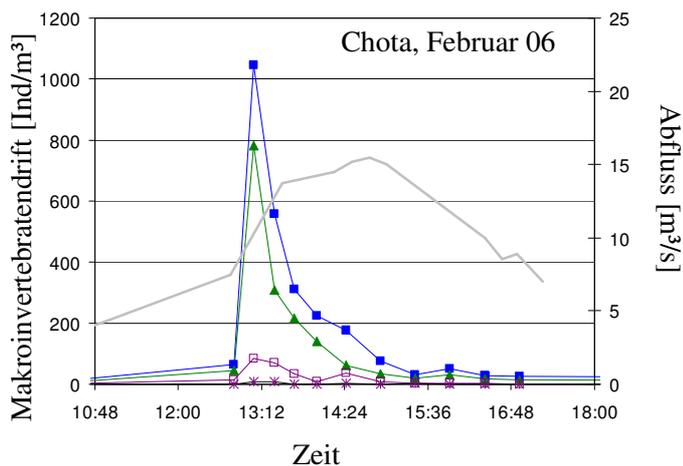
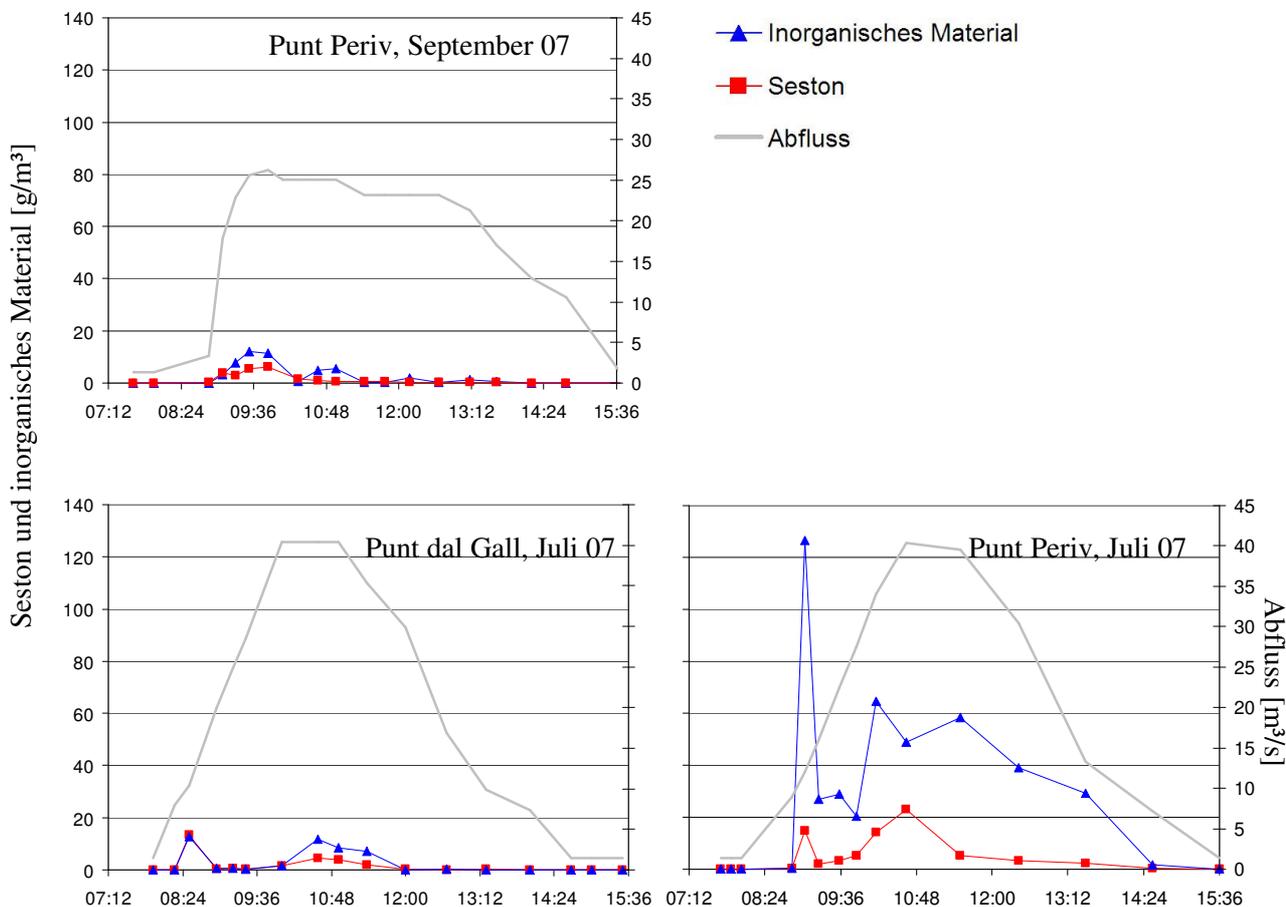
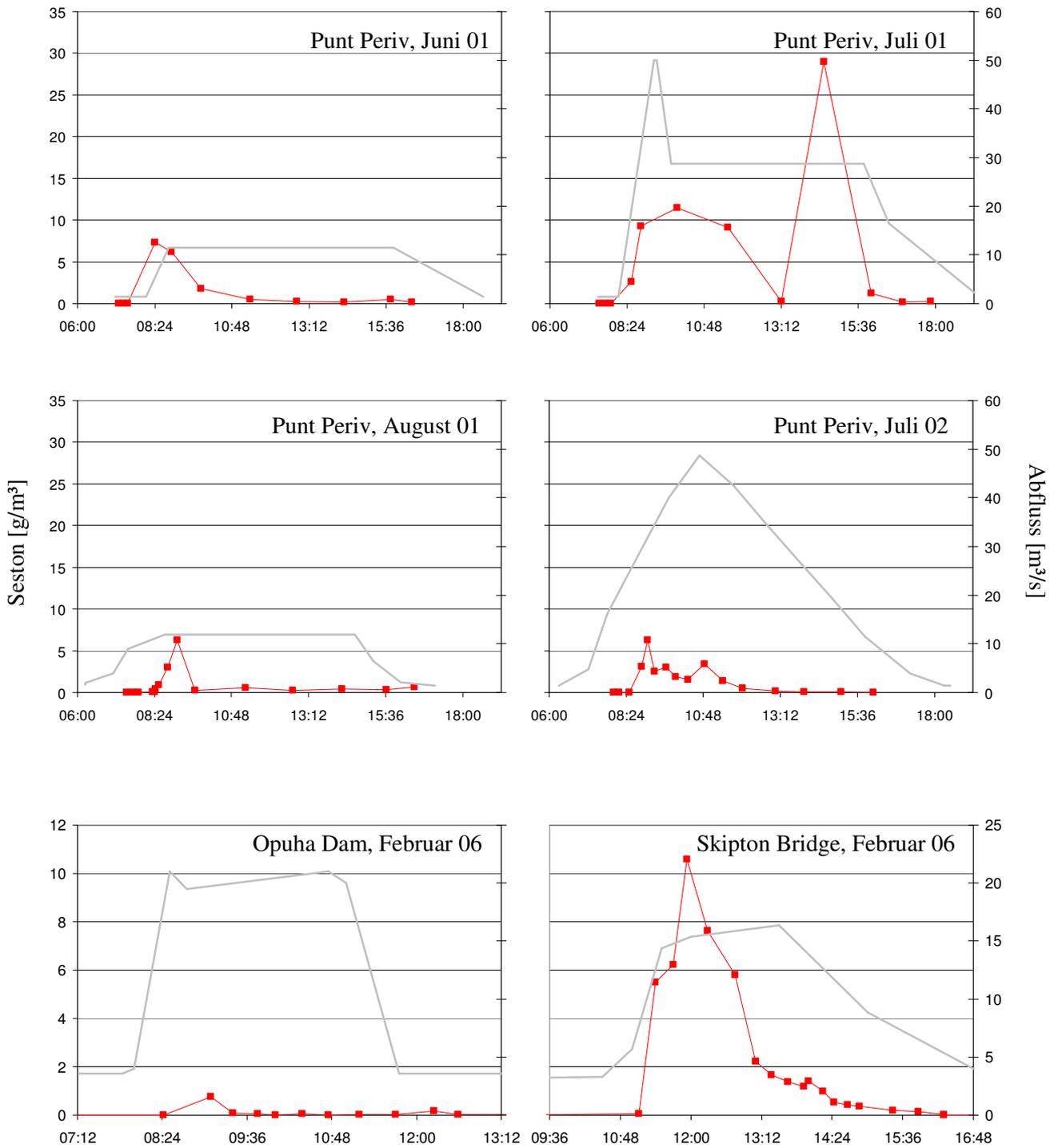


Abbildung 11: Driftdiagramme für alle untersuchten Fluten. Die Skalen der Achsen wurden wo möglich gleich gewählt, der Übersicht halber wurden sie aber teilweise etwas angepasst. Die graue Linie zeigt den Abfluss während der Flut, blau steht für die gesamte Anzahl driftender Makroinvertebraten und die fünf weiteren Linien zeigen die Drift nach wichtigsten systematischen Gruppen unterteilt.

#### 4.1.2 Sestondiagramme der sechs künstlichen Fluten

Beim Seston ist ein ähnliches Muster wie bei der Drift zu erkennen. Das transportierte organische und inorganische Material nimmt zu Beginn der Flut sehr rasch zu und geht dann etwas langsamer wieder auf den Ausgangswert zurück. Im Spöl ist es teilweise zu einem zweiten Peak während des maximalen Abflusses gekommen. Die Sestonwerte variieren zwischen 6 und 29 g/m<sup>3</sup>, der Transport von inorganischem Material im Spöl liegt zwischen 12 und 127 g/m<sup>3</sup>.





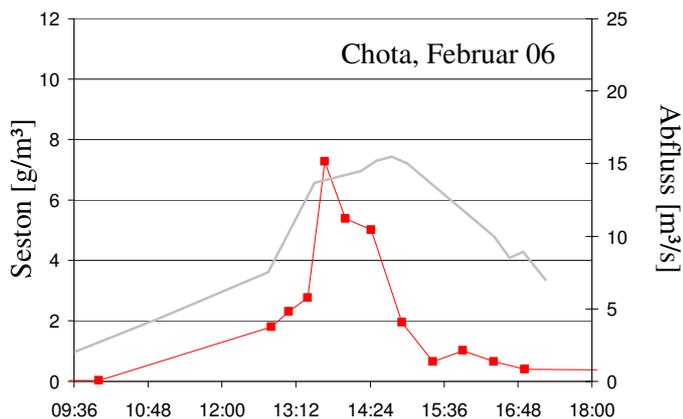


Abbildung 12: Flutdiagramme mit Seston (rote Linie) und Abfluss (graue Linie) während der Flut im Spöl und Opuha. Bei den 2007 Fluten wurde zusätzlich das inorganische Material (blaue Linie) erhoben. Die Achsenskalen wurden wo möglich gleich gewählt, es ist aber zu beachten, dass sie teilweise zur besseren Ansicht angepasst wurden.

#### 4.1.3 Wasserproben und Trübung

Die organischen und inorganischen suspendierten Anteile aus den Wasserproben zeigen in der September 07 Flut ein ähnliches Muster wie das Seston. Im Juli 07 bei Punt dal Gall befand sich der Peak des suspendierten Sediments da, wo der Abfluss schon wieder am abnehmen ist. In Punt Periv im Juli 07 sind zwei Peaks vorhanden. Beim suspendierten Sediment variieren die maximalen Werte zwischen 3645 und 467 g/m<sup>3</sup>.

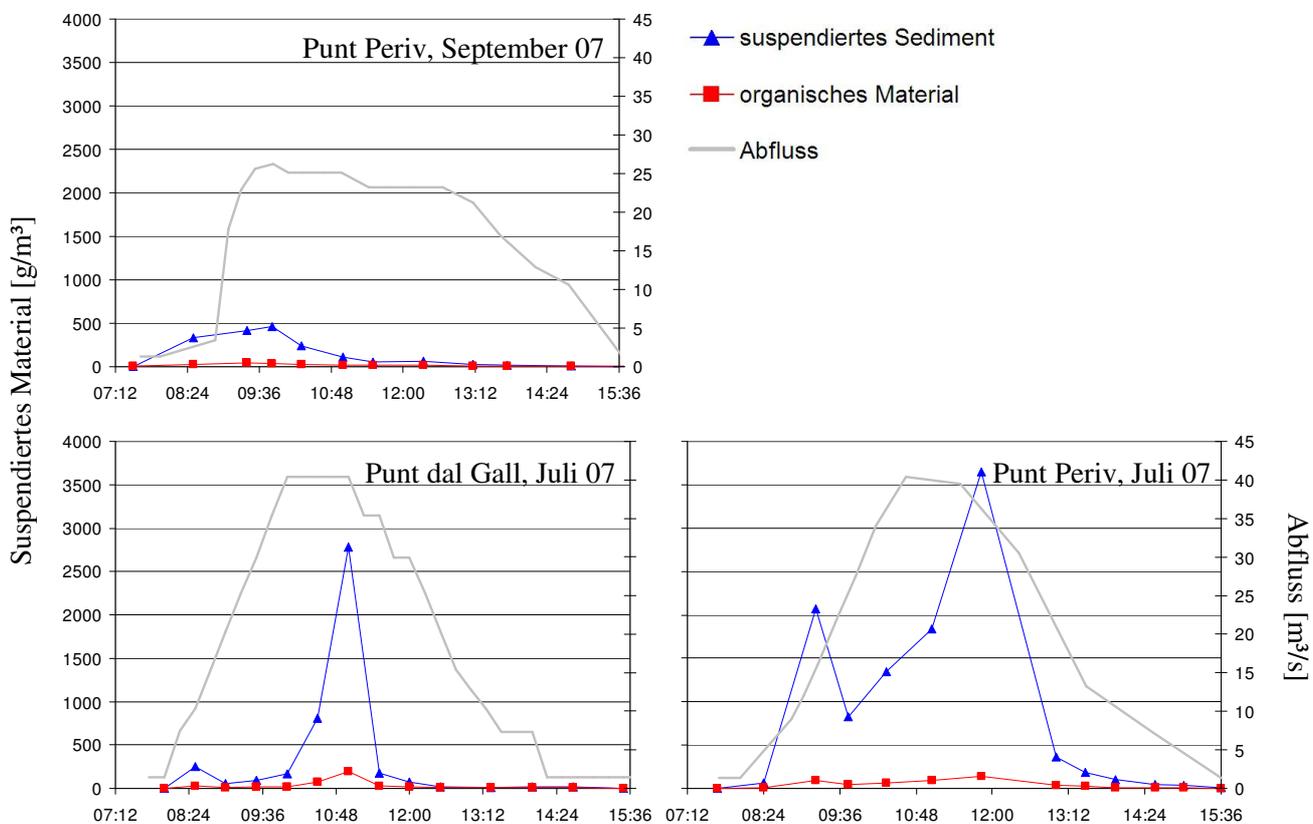


Abbildung 13: Auswertungen der Wasserproben, die während den zwei Fluten 2007 gesammelt wurden. Angezeigt wird das suspendierte organische (rot) und inorganische (blau) Material .

Sobald der Abfluss im Spöl anstieg, nahm die Trübung schlagartig um das 130 fache zu und näherte sich dann langsam wieder dem ursprünglichen Wert an.

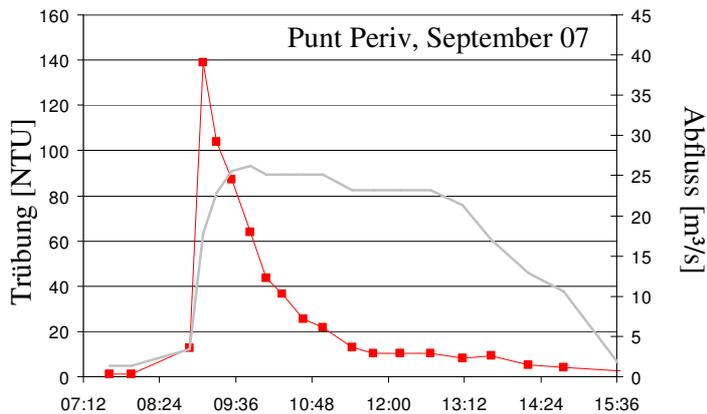


Abbildung 14: Die Trübung im Verlauf der Flut.

#### 4.1.4 Kombinationen

Die totale Anzahl Tiere, die während der gesamten Flut transportiert werden, variieren zwischen 226 Mio. im Juli 2001 und 8 Mio. unterhalb des Opuha Dammes, 2006 (Abbildung 15). Das gesamte transportierte Material während der Fluten, ausgehend von unseren Sestonbeprobungen liegt zwischen 34 und 8426 kg/Flut. Allerdings müssen die Daten vom Juli 2001 vorsichtig betrachtet werden. Die hohe Sestonmenge ist auf einen einzigen Probepunkt zurückzuführen.

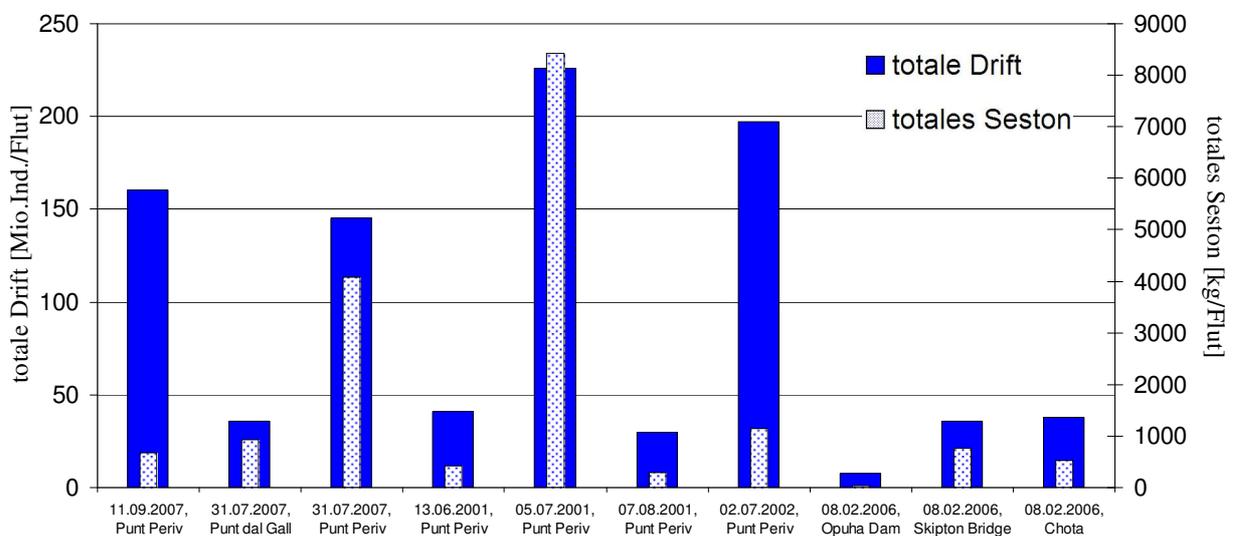
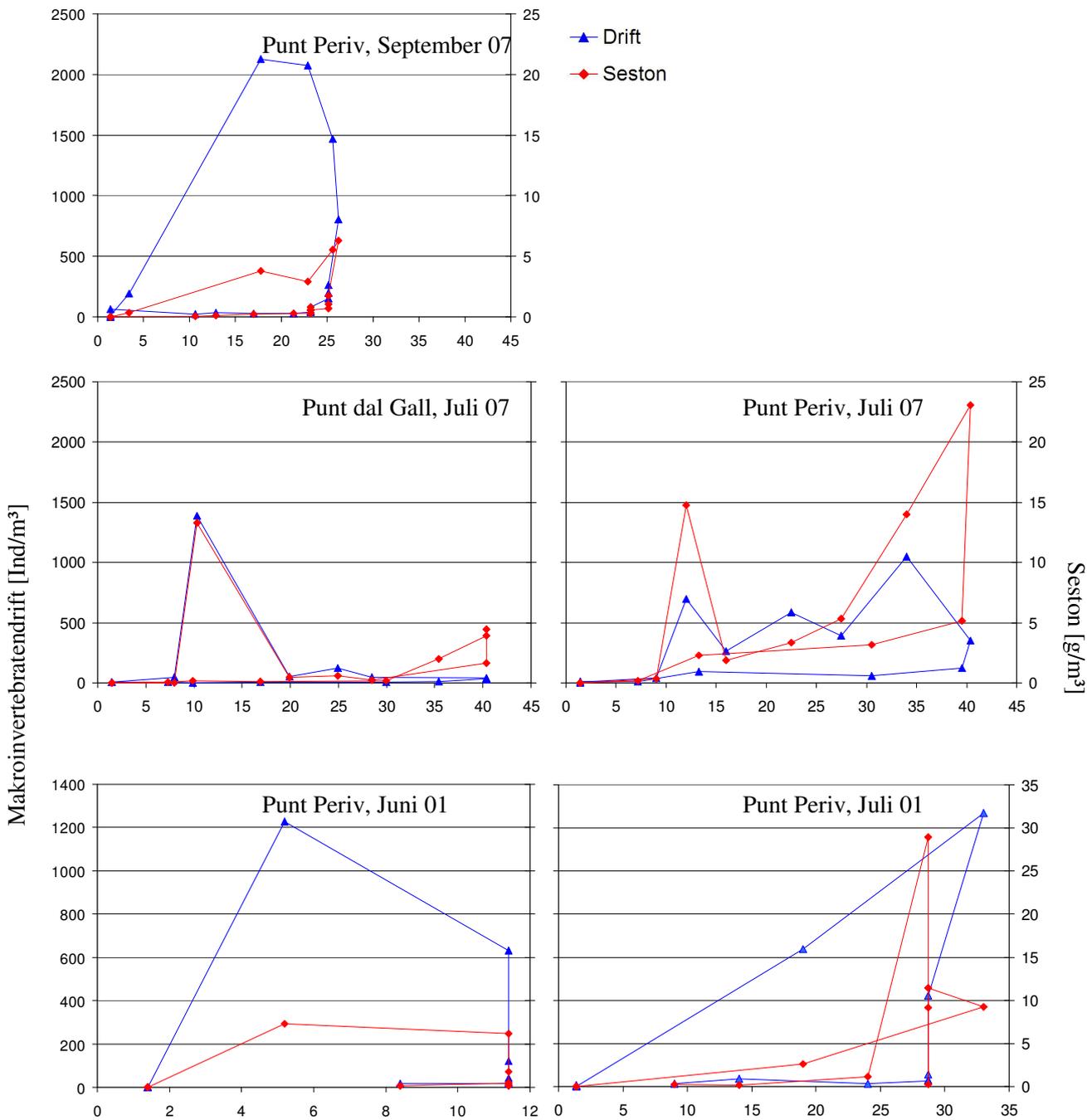


Abbildung 15: Die gesamte Drift und das Seston das während der Flut transportiert wird. Die ersten sieben Säulen sind vom Spöl die letzten drei vom Opuha. Jeder Balken repräsentiert eine künstliche Flut.

### 4.1.5 Hysteresekurven als Darstellungsmethode

Vor allem bei der Drift gibt es tendenziell sehr schöne Kurven, bei denen der Hystereseeffekt klar erkennbar ist. Im grossen und Ganzen sind die Formen aber sehr variabel.



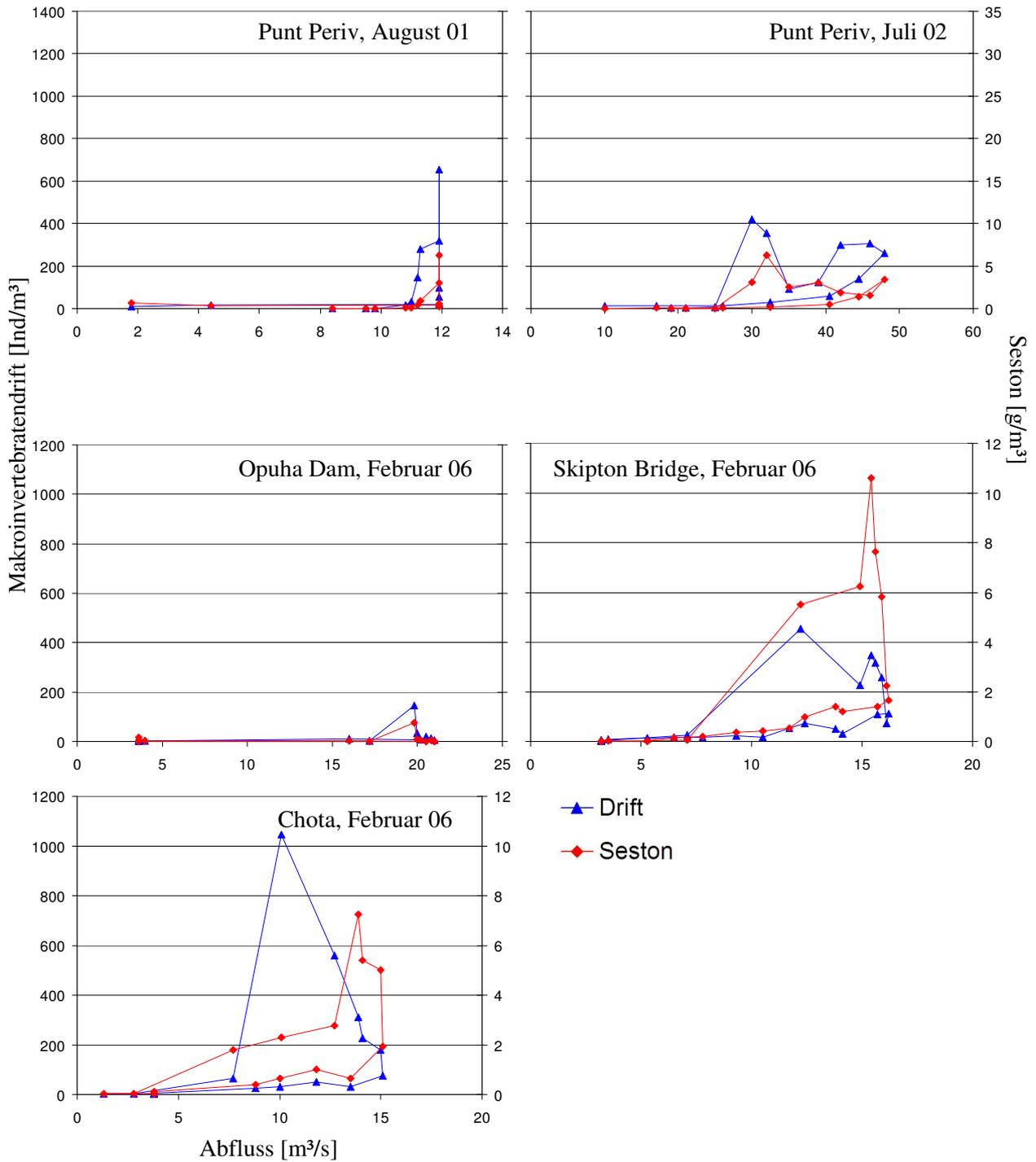


Abbildung 16: Hysteresekurven Drift (blau) / Seston (rot) vs. Abfluss. Die Skalierung der X-Achse wurde angepasst und ist nicht überall gleich.

Die Flächen innerhalb der Hysteresekurven reichen von 1 bis 0.006. Kleine Flächen sind entweder auf sehr geringe Seston- und Driftmengen zurückzuführen (Opuha Dam, Februar 06) oder auf eine spezielle, kaum hystereseeähnliche Form der Kurve.

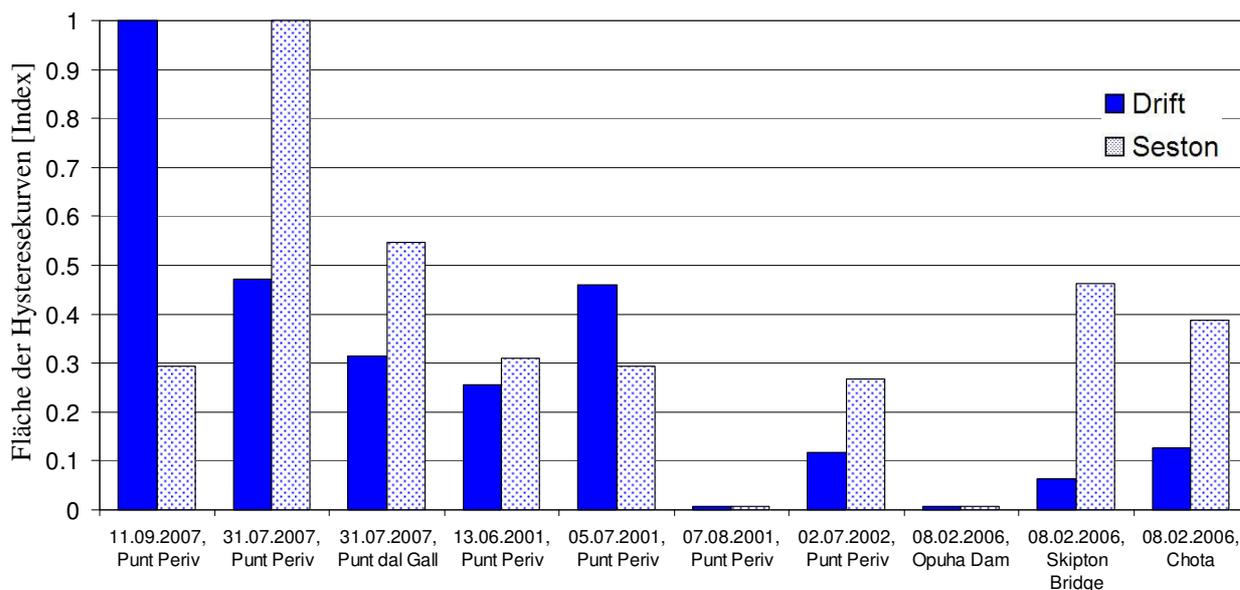
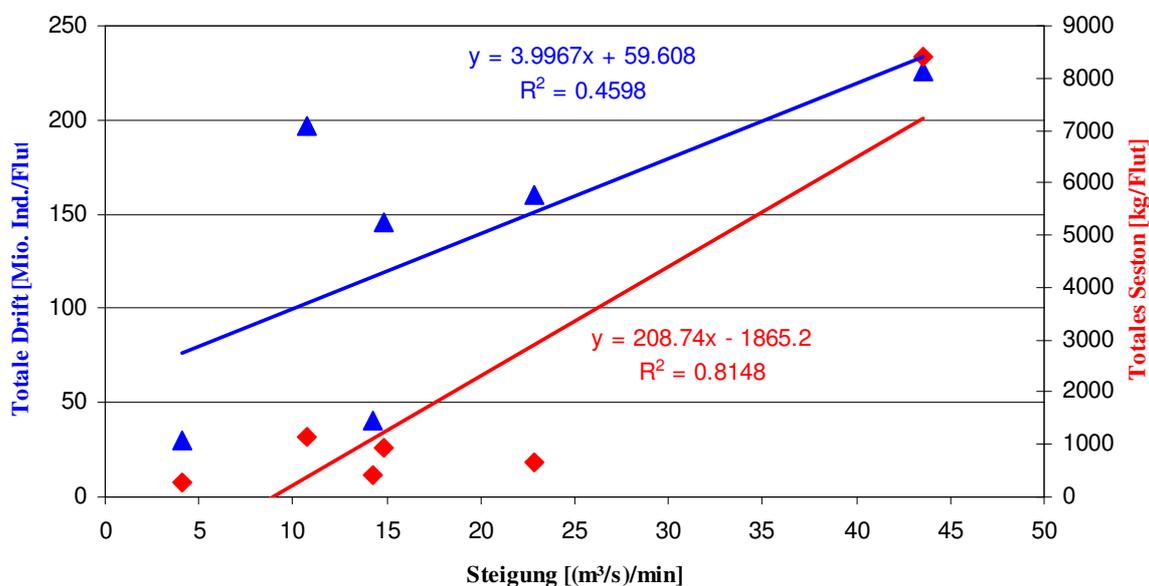


Abbildung 17: Die Fläche der Hysteresekurven für Drift (ausgefüllt) und Seston (gepunktet). Der Index ist der prozentuale Anteil an der grössten Fläche, welche 1 ist. Drift und Seston dürfen nicht direkt verglichen werden, da deren Indizes unterschiedlich sind.

#### 4.1.6 Vergleiche anhand von Steigungen der Drift/Seston und Abflusskurven

Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen der anfänglichen Abflusskurvensteigung und Drift/Seston erkennbar (Abbildung 18). Die Steigung der Regressionsgeraden ist überall positiv. Laut einer ANOVA ist das totale Seston signifikant von der Steigung abhängig (Tabelle 8).



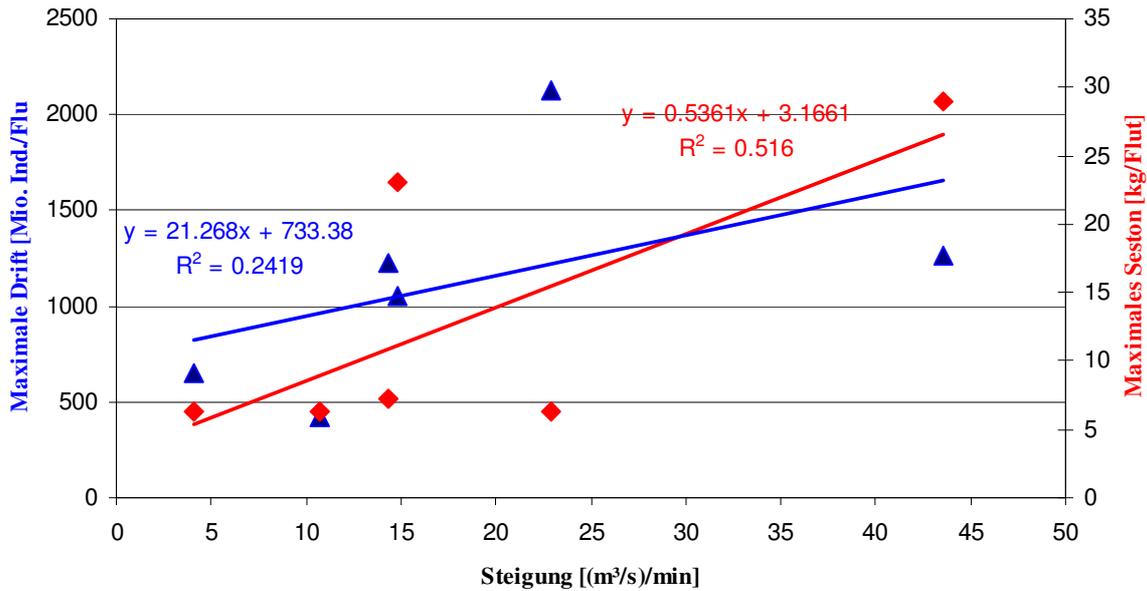


Abbildung 18: Beide Graphen zeigen den Zusammenhang zwischen der Steigung bis zum Maximum der Abflusskurve und der Drift/Seston. Berücksichtigt wurden die sechs Fluten im Spöl bei Punt Periv. Der obere Graph zeigt die totale Drift und das totale Seston, der Untere die Peaks der Drift und des Sestons.

Tabelle 8: ANOVA zur linearen Regression von oben. Es wurden jeweils die Steigung mit der Drift bzw. dem Seston verglichen.

Variabel	df	F-Wert	Signifikanz
Totale Drift	1	3.405	0.139
Totales Seston	1	17.601	0.014*
Maximale Drift	1	1.276	0.322
Maximales Seston	1	4.264	0.108

## 4.2 Habitatcharakterisierung und Flussbettstabilität

### 4.2.1 Tiefe

Die Tiefe vor und nach der Flut in Punt Periv zeigt ein ähnliches Muster, mit der geringsten durchschnittlichen Tiefe im mittleren Bereich des Flussabschnittes. Die Werte liegen zwischen 4 und 64 cm. In Zernez ist die Übereinstimmung etwas weniger ausgeprägt, hier liegen die Werte zwischen 4 und 60 cm.

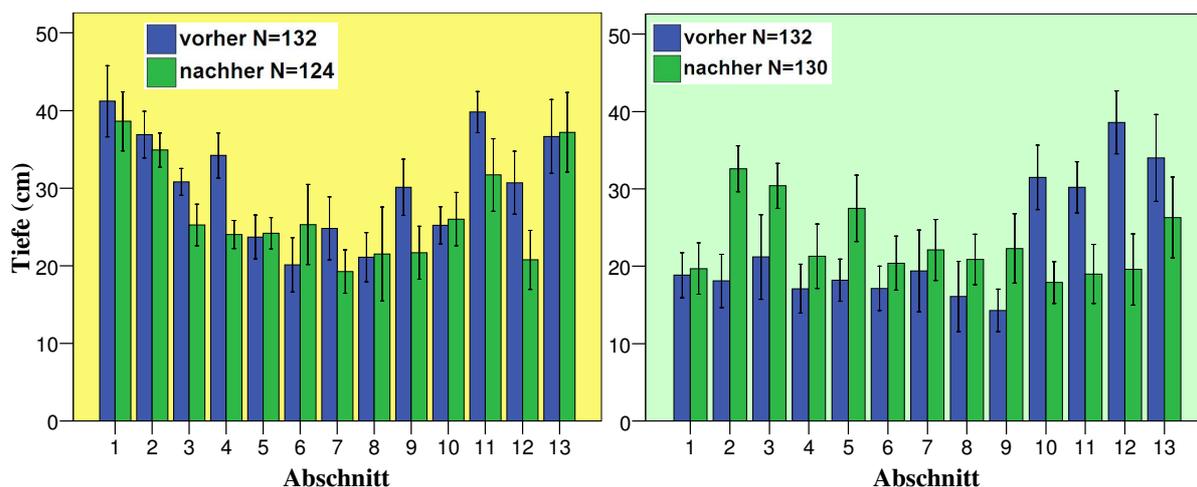


Abbildung 19: Die Tiefe ( $\pm 1$  SF) in Punt Periv (links) und Zernez (rechts). Jeder Balken zeigt den Durchschnitt von 10 beieinander liegenden Messpunkten. Der Abschnitt „1“ ist jeweils am oberen Ende des Standortes, „13“ am unteren Ende.

#### 4.2.2 Fließgeschwindigkeit

Auch bei der Fließgeschwindigkeiten ist der Unterschied zwischen vorher und nachher sowie die Schwankungen beim Standort Zernez grösser. Die Werte bewegen sich zwischen 1.55 und 0.04 m/s in Zernez und zwischen 1.42 und 0.02 m/s in Punt Periv.

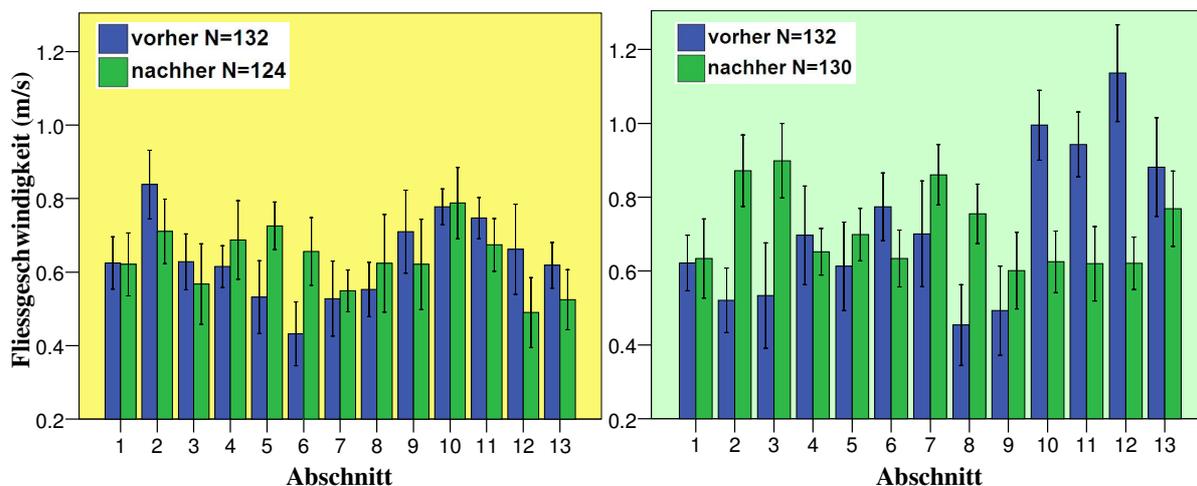


Abbildung 20: Die Fließgeschwindigkeit ( $\pm 1$  SF) in Punt Periv (links) und Zernez (rechts). Jeder Balken zeigt den Durchschnitt von 10 beieinander liegenden Messpunkten. Der Abschnitt „1“ ist jeweils am oberen Ende des Standortes, „13“ am unteren Ende.

#### 4.2.3 Sedimentgrösse

Beim Flussabschnitt Punt Periv nimmt die Sedimentgrösse flussabwärts ab. Bei Zernez ist das Sediment durchschnittlich kleiner und regelmässiger verteilt als im oberen Spöl.

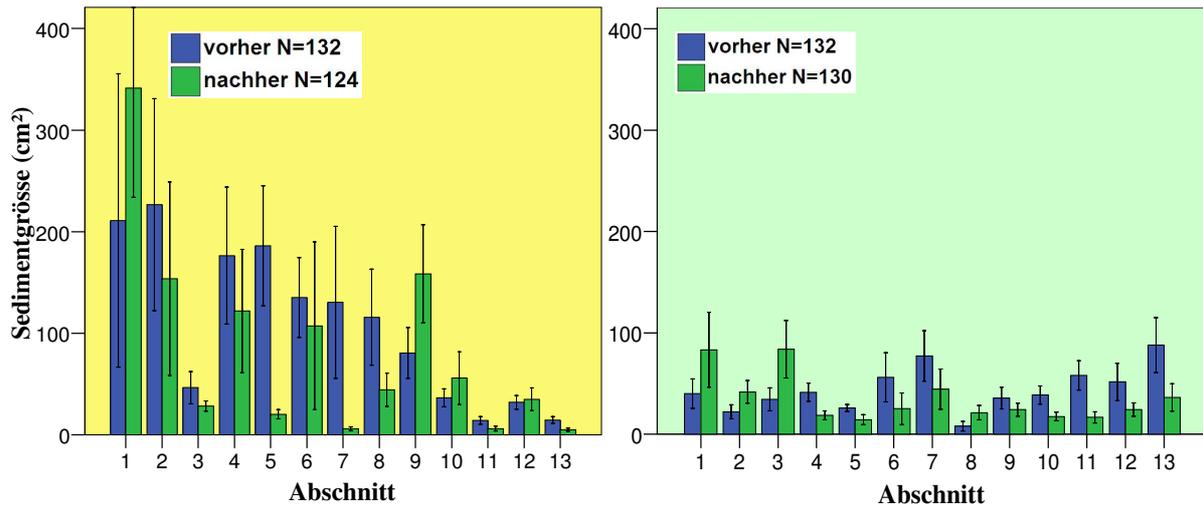


Abbildung 21: Die Sedimentgröße ( $\pm 1$  SF), längste mal zweitlängste Achse, in Punt Periv (links) und Zernez (rechts). Jeder Balken zeigt den Durchschnitt von 10 beieinander liegenden Messpunkten. Der Abschnitt „1“ ist jeweils am oberen Ende des Standortes, „13“ am unteren Ende.

#### 4.2.4 Periphyton

Das Periphyton hat sich sowohl in Punt Periv als auch in Zernez mit der künstlichen Flut signifikant verändert (Tabelle 9). Im oberen Spöl waren die Auswirkungen etwas grösser als im unteren.

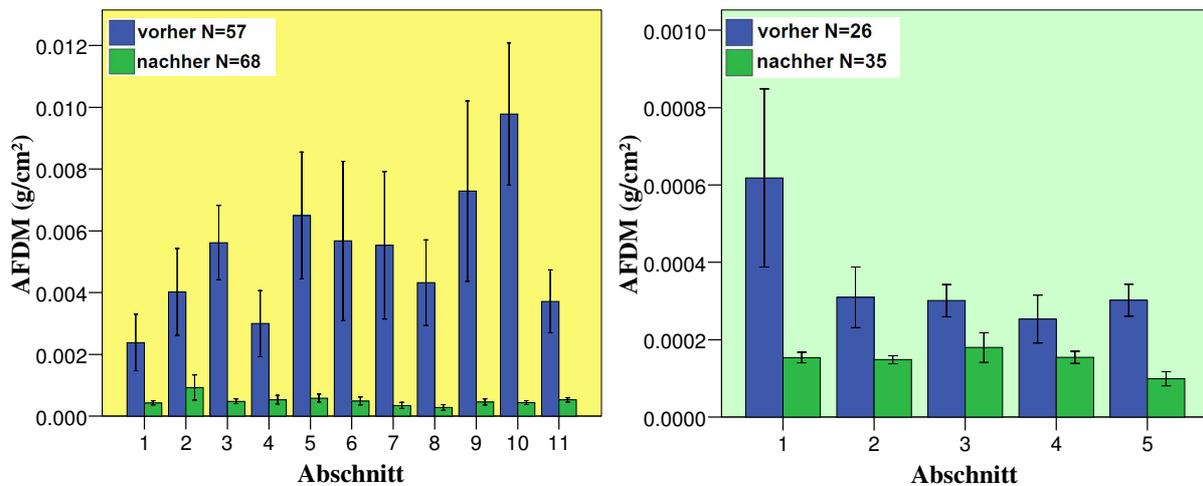


Abbildung 22: AFDM ( $\pm 1$  SF) bei den Standorten Punt Periv (links) und Zernez (rechts). Jeder Balken zeigt den Durchschnitt aus 5 bis 7 Messwerten vom gleichen Flussabschnitt. Die Skala der Y-Achse unterscheidet sich der Übersicht halber.

#### 4.2.5 Kombinationen

Werden alle drei morphologischen Faktoren zusammengefasst, ergibt sich daraus nur für Zernez einen signifikanten Unterschied (vor und nach der Flut, jeweils die einzelnen Abschnitte miteinander verglichen). Es gibt zwar auch in Punt Periv Unterschiede zwischen vor und nach der Flut, allerdings sind keine signifikant.

Tabelle 9: Statistik zur Morphologie und zum Periphyton. Angewandt wurde ein multivariater Test in SPSS (© 2006 SPSS Inc.). Die Zeile „Alles zusammen“ wurde mit Wilks-Lambda getestet. Alle Werte beziehen sich sowohl auf den Zeitpunkt (vorher/nachher), als auch auf die Abschnitte. \*\*<0.001, \*<0.05. Das Periphyton wurde mit einem allgemeinen linearen Modell berechnet.

Variable	Effekt	Standort	df	F-Wert	Signifikanz
Tiefe	vorher/nachher	Punt Periv	12	0.805	0.645
		Zernez	12	3.258	0.000**
Fliessgeschwindigkeit 60%	vorher/nachher	Punt Periv	12	0.920	0.527
		Zernez	12	3.593	0.000**
Sedimentgrösse (AxB)	vorher/nachher	Punt Periv	12	0.969	0.479
		Zernez	12	1.940	0.031*
Alles zusammen	vorher/nachher	Punt Periv	36	0.881	0.670
		Zernez	36	2.196	0.000**
Periphyton	vorher/nachher	Punt Periv	1	77.273	0.000**
		Zernez	1	17.513	0.001**

## 5 Interpretation

### 5.1 Entwicklung von Drift und Seston seit Beginn des Flutprogramms

Die transportierten Makroinvertebraten und das organische und inorganische Material können durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Die Zeit der Flut und somit die Artenzusammensetzung, der maximale Abfluss und die Steilheit der Abflusskurve bis dorthin und der genaue Probenahmeort sind wichtige Parameter. Die sieben untersuchten künstlichen Fluten stimmen aber in kaum einem solchen Parameter überein. Ein statistischer Beweis ist also wegen der zu kleinen Stichprobe und den vielen unkontrollierbaren Einflussfaktoren nicht möglich. Qualitative Vergleiche können allerdings gemacht werden.

Beim Seston ist ein Muster erkennbar, das im Juli 2007 am ausgeprägtesten ist (Abbildung 12). Sowohl das organische als auch das transportierte inorganische Material zeigen zwei Peaks. Der erste wird durch das steigende Wasser indiziert, während der zweite erst beim maximalen Abfluss auftaucht. Im Unterschied zur Invertebratendrift kann mit steigendem Wasser immer mehr Seston und inorganisches Material erreicht werden, welches als Streu und Sediment am Ufer liegt. So fanden wir in den Proben immer einen grossen Anteil an Föhrennadeln. Ein zweiter Peak kann also aus der Morphologie des Ufers resultieren und einem pulsartigen Ablassen des Wassers.

Die Geschwindigkeit des Abflussanstieges hat einen signifikanten Einfluss auf das totale transportierte Seston (Tabelle 7). Eine Tendenz ist auch beim Sestonmaximum auszumachen. Je steiler also die Abflusskurve am Anfang, desto mehr Material wird weggeschwemmt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass der Einfluss der Abflusskurvensteigung auf Drift und Seston grösser ist als der Einfluss des Zeitpunktes nach Beginn des Flutprogrammes.

Werden die totalen Drift- und Sestondaten von der Juli 2002 Flut mit denjenigen von Juli 2007 verglichen (Abbildung 15), beide bei Punt Periv, können meine Erwartungen nicht bestätigt werden. Das totale Seston während der Flut hat von 2002 bis 2007 zugenommen, während die Drift leicht abgenommen hat. Die Maxima der beiden transportierten Kompartimente sind im Juli 2007 grösser als Juli 2002 (Seston: 3.5 mal; Drift: 2.5 mal). Obwohl beides die ersten künstlichen Fluten im Jahr sind und sich im maximalen Abfluss, dem Monat und der anfänglichen Steigung ähneln, ist die Form des Hydrographen und die Dauer unterschiedlich. Auch der Probenahmeort stimmt nicht genau überein.

Ein qualitativer Vergleich der Hysteresekurven der Juli 02 und Juli 07 Flut zeigt Ähnlichkeiten in der Form. Sowohl beim Seston als auch bei der Drift sind zwei oder mehr Peaks erkennbar, die bei kleineren Fluten weniger offensichtlich sind.

Bis eine statistische Analyse zur Entwicklung der Drift und des Sestons durchgeführt werden kann, müssen noch die Daten von zukünftigen künstlichen Fluten abgewartet werden. Leider ist auch in der Literatur bis jetzt noch nichts vorhanden, mit dem ich die Entwicklung der Drift und des Sestons im Verlaufe eines Langzeitflutprogrammes verglichen werden könnte.

### 5.2 Interpretation von Drift- und Sestondiagrammen

Imbert und Perry (2000) zeigen Auswirkungen von schrittweisem Erhöhen des Abflusses auf die Drift. Sie konnten in einem experimentellen Flusslauf beweisen, dass abruptes Erhöhen des Abflusses einerseits zu einer geringeren Invertebratendichte im Benthos führt, andererseits zu einer höheren

Driftdichte als bei schrittweiser Zunahme des Abflusses. Den selben Effekt testeten sie für die Artenvielfalt. Den Zusammenhang zwischen der Steigung der Abflusskurve und der Drift- und Sestondichte konnten auch wir beweisen. Eine lineare Abhängigkeit kann erkannt werden (Abbildung 18). Es wäre also je nach Zielsetzung möglich, den Verlust an Invertebraten und Seston zu maximieren oder minimieren, je nach dem wie schnell die Flutwehre geöffnet werden.

Eine weitere Gemeinsamkeit aller Driftkurven ist die schnelle Zunahme, sobald das Wasser steigt und das Erreichen des Peaks bevor der Abfluss maximal ist. Aus den zehn künstlichen Fluten zeigten 8 dieses Muster. Auch Mochizuki et al. (2006) konnten in einem künstlichen Flusslauf einen solchen Driftverlauf messen. Auch diese Information kann für die effektive Planung einer Flut essentiell sein. Es würde auch eine kürzere Hochwasserdauer ausreichen, um den selben Effekt bei den transportierten Organismen und dem Seston zu erzielen. Da nicht überall Kostenneutralität seitens der Kraftwerke gewährleistet ist, könnte damit die Hürde zur Anwendung eines Flutprojektes verringert werden.

In Neuseeland kann der Effekt des Abstandes zum Damm gezeigt werden. Je weiter weg der Probenahmeort liegt, desto breiter ist die Basis der Driftkurve und desto höher das Maximum. Allerdings verändert sich die totale Drift zwischen der Skipton Bridge und Chota nicht mehr (Abbildung 15). Das deutet darauf hin, dass die Fließstrecke zwischen Opuha Damm und erstem Probenahmeort zu gering war, als dass sich schon viele aquatische Insekten driftend im Wasser befänden. Dieser Effekt spielt aber bei den weiter unten liegenden Probenahmeorten keine Rolle mehr, da die Zeit, die Invertebraten in der Drift verbringen selten mehr als ein paar Minuten ist (Elliott 2002). Im Spöl ist der Einfluss des Abstandes zum Damm etwas anders ausgeprägt. Die Basis der Driftkurve ist zwar bei Punt dal Gall sehr schmal, aber das Maximum übertrifft dasjenige von Punt Periv. Das deutet auf eine höhere benthische Individuendicht im Spöl hin. Die Ursache könnte aber auch im turbulenteren Abfluss vom Spöl liegen, welcher in der Lage war, mehr Invertebraten in die Drift zu schwemmen. Das Tal unterhalb des Punt dal Gall Staudammes ist enger als unterhalb des Opuha Dammes.

Einen Effekt des zurückgehenden Wassers auf die Drift konnte ebenfalls beobachtet werden. Hierbei handelt es sich aber höchstwahrscheinlich um verhaltensbedingte, aktive Drift von Ephemeroptera und Plecoptera (Abbildung 23). Es konnte schon gezeigt werden, dass ein reduzierter Abfluss zu einem solchen Verhalten führen kann (Poff und Ward 1991). Dabei spielt das Fliehen vor schlechten Umweltbedingungen eine wichtige Rolle. In den beiden Abbildungen können leichte Zunahmen der transportierten Organismen gegen Ende der künstlichen Flut erkannt werden. Beobachtungen im Feld, von Plecoptera und Ephemeroptera, die aktiv an die Wasseroberfläche schwammen, unterstützen diese Annahme. Im Vergleich zu der katastrophalen Drift, die durch die Flut hervorgerufen wurde, ist diese verhaltensbedingte Drift aber sehr gering und deshalb etwas schwierig auszumachen.

Die Flächen der Hysteresekurven zeigen bei den Fluten, während denen in verschiedenen Abständen zum Damm Proben genommen wurden, einen ähnlichen Verlauf wie die gesamte Drift und das totale Seston pro Flut. Ansonsten ist die Interpretation ziemlich schwierig und es müssten neue Methoden zur Interpretation von Hysteresekurven gefunden werden. Allenfalls kann gesagt werden, dass kleine Flächen auf eine unregelmässige, eher ungewöhnliche Hysteresekurve und somit auch auf einen speziellen Drift- und Sestonverlauf hinweisen.

Das suspendierte Sediment war in der zweiten Flut 2007 viel geringer als in der ersten. Es deutet darauf hin, dass der Grossteil des feinen Sediments mit der Juli 2007 Flut ausgewaschen wurde. Ausserdem waren im September die Sedimentfächer der Zuflüsse bereits entfernt worden.

Die Messung der Trübung im September 2007 zeigt ein Muster, das mit Seston und suspendiertem Sediment ungefähr übereinstimmt. Durch die einfache Messung mit einem Turbidimeter, sollte diese Methode in Zukunft regelmässiger gebraucht werden.

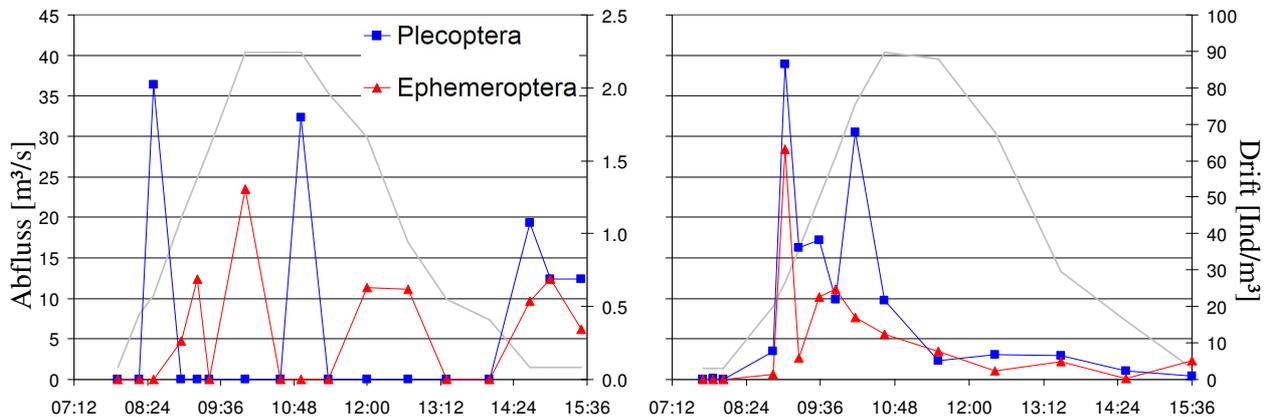


Abbildung 23: Drift von Plecoptera und Ephemeroptera während der Juli 07 Flut in Punt dal Gall (links) und Punt Periv (rechts).

### 5.3 Veränderung der Morphologie

Wichtige morphologische Veränderungen wurden schon mit den ersten vier Hochwässern erreicht (Mürle et al. 2003). Feines Sediment wurde anfangs des Flutprogrammes reduziert, Sedimentfächer von Zuflüssen wurden erodiert. Bei späteren Fluten wurde vor allem das zurückgebliebene gröbere Sediment bewegt, wodurch die Variabilität der Tiefe im Flussbett zunahm und die Habitatsdiversität erhöhte. Ich konnte aber beweisen, dass auch heute noch signifikante Unterschiede in der Sedimentgrösse, Tiefe und Fliessgeschwindigkeit durch die Flut hervorgerufen werden.

Im oberen Spöl ist die Variation der Sedimentgrösse ausgeprägter als bei Zernez. Bei einigen Stellen kommt sogar das Muttergestein zum Vorschein und grosse Felsblöcke stabilisieren das Flussbett. Diese Voraussetzung hat wahrscheinlich dazu geführt, dass die Veränderungen in Punt Periv etwas weniger stark ausfielen als bei Zernez.

Im unteren Spöl waren die Veränderungen aller drei Faktoren signifikant. Bei der Probenahme nach der Flut konnten grosse Sedimentverfrachtungen erkannt werden, die das Flussbett modifizierten. Das hatte Einfluss auf die Fliessgeschwindigkeit und Tiefe in den verschiedenen Abschnitten zur Folge. Vom Zufluss aus dem Ova da Cluozza wird regelmässig feines Sediment in den Spöl transportiert. Dieser Input fehlt bei Punt Periv weitgehend, da die dortigen Zuflüsse kleiner sind. Sie führen auch bei natürlicher Flut nicht genügend Wasser, als dass sie feines Sediment im Spöl erodieren könnten (Mürle et al. 2003).

Im Falle des Spöls ist also das offene Tal von stärkeren morphologischen Veränderungen betroffen, als der schluchartige, heterogene Abschnitt.

## 5.4 Einfluss der künstlichen Flut aufs Periphyton

Der Einfluss der Flut auf das Periphyton wurde schon im Jahr 2001 von Jakob et al. erhoben (2003). Die Resultate zeigten einen signifikanten Fluteffekt auf das Periphyton im Spöl. Auch Uehlinger et al. (2003) fanden signifikante Unterschiede.

Bei unseren Untersuchungen im Jahr 2007 wurde das Periphyton im oberen Spöl etwas stärker reduziert, als im unteren, offenen Abschnitt bei Zernez. Dort ist wahrscheinlich der Einfluss aus dem Ova da Cluozza erkennbar. Da die Morphologie weniger stabil ist, können auch kleinere Fluten, die aus dem Zufluss kommen, einen Effekt auf das Periphyton haben. Somit war schon vor dem künstlichen Hochwasser der Algenbewuchs geringer als im oberen Spöl.

Auffallend ist, dass die September 2007 Flut gegenüber der Drift eine sehr geringe Sestondichte aufweist. Das ist ein Hinweis darauf, dass das eineinhalb Monate vorher weggeschwemmte organische Material noch nicht vollständig ersetzt wurde.

## 5.5 Weiterführende Forschung

Fragen die während der Arbeit aufgetaucht sind und in weitere Forschung untersucht werden können:

Können die Muster bei Driftkurven auch in Flusssystemen mit natürlichen Hochwassern nachgewiesen werden?

Kann ein Zusammenhang zwischen dem Grad der morphologischen Veränderungen und der Drift- und Sestondichte erkannt werden?

Ist es möglich, dass sich die Artenzusammensetzung mit dem Flutprogramm im Spöl oder dem Opuha mit der Zeit anpasst?

Können die künstlichen Fluten ein Ersatz für die viel länger dauernden Schneeschmelzperioden sein?  
Wie beeinflussen diese die Morphologie, Drift und Seston?

## 6 Danksagung

Ein Dankeschön an alle, die mir bei der Diplomarbeit geholfen haben. Eine spezielle Erwähnung haben verdient:

Chris Robinson, für die Motivation mittels Feldarbeit, Kübel, Darts und exotischen Früchten.

Sabine Mannes für das Sammeln von Driftproben unter Einsatz ihres Lebens und als gute Beispieldiplomandin voranzugehen.

Ania Fijarczyk für die Hilfe bei der Feldarbeit.

Michael Döring für das geduldige Erklären des GPS Gerätes und die Hilfe im Feld.

Gaia Alghisio, Simone Blaser und Simon Galenda für die spontane Zusage zur Feldarbeit im Juli und September.

Urs Uehlinger für die Korrektur meiner Diplomarbeit.

NIWA Christchurch für das Bereitstellen von Informationen zum Opuha und das Ermöglichen der Feldtage, spezieller Dank geht an die beiden Feldassistenten Adam Hartland und Andrew Eden und an die Leiter des Projekts, Dave Kelly und Scott Larned.

Christa Jolidon für das Auswerten der Opuhaproben.

Nationalpark Engadin, der uns erlaubte, die Wege zu verlassen und für Fragen zur Verfügung stand.

Den Engadiner Kraftwerken für das Bereitstellen von Flutdaten.

---

## 7 Literatur

Arcscott, D. B., Kelly, D. J., Tuck, E. (2007). Flushing flows for the control of nuisance Periphyton growth in the Opuha-Opihi River system (2004-2006). NIWA Client Report.

Brittain, J. E., Eikeland, T. J. (1988). Invertebrate drift – A review. *Hydrobiologia* 166: 77-93.

Céréghino, R., Lavandier, P. (1998). Influence of hypolimnetic hydropeaking on the distribution and population dynamics of Ephemeroptera in a mountain stream. *Freshwater Biology* 40: 385-399.

Friedl, G., Wüest, A. (2002). Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64: 55-65.

Gibbins, C., Vericat, D., Batalla, R. J. (2007). When is stream invertebrate drift catastrophic? The role of hydraulics and sediment transport in initiating drift during flood events. *Freshwater Biology* 52(12): 2369-2384.

Harada, J., Nario, Y. (2004). Conservation and improvement of the environment in dam reservoirs. *Water Resources Development* 20(1): 77-96

Hieber, M., Robinson, C. T., Uehlinger, U. (2003). Seasonal and diel patterns of invertebrate drift in different alpine stream types. *Freshwater Biology* 48: 1078-1092.

Imbert, J. B., Perry, J. A. (2000). Drift and benthic invertebrate responses to stepwise and abrupt increases in non-scouring flow. *Hydrobiologia* 436: 191-208.

Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., Running, S. W. (2001). Water in a changing world. *Ecological Applications* 11(4): 1027-1045.

Jakob, C., Robinson, C. T., Uehlinger, U. (2003). Longitudinal effects of experimental floods on stream benthos downstream from a large dam. *Aquatic Sciences* 65: 223-231.

Kondolf, G. M., Wilcock, P. R. (1996). The flushing flow problem: Defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* 32(8): 2589-2599.

Kondolf, G. M. (1997). Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management* 21(4): 533-551.

Kondolf, G. M. (1998). Lessons learned from river restoration projects in California. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 8: 39-52.

Mannes, S. (2007). River management and the effects of artificial floods on macroinvertebrates in a regulated river. Diplomarbeit, Eawag Dübendorf, ETH Zürich: 71 S.

Matthaei, C. D., Werthmüller, D., Frutiger, A. (1998). An update on the quantification of stream drift. *Archiv der Hydrobiologie* 143(1): 1-19.

Milhous, R. T. (1998). Modelling of instream flow needs: the link between sediment and aquatic habitat. *Regulated Rivers: Research & Management* 14: 79-94.

Mochizuki, S., Kayaba, Y., Tanida, K. (2006). Drift patterns of particulate matter and organisms during artificial high flows in a large experimental channel. *Limnology* 7: 93-102.

Mürle, U., Ortlepp, J., Zahner, M. (2003). Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: The River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Sciences* 65: 191-198.

Orthophotos, National Park Map Server LV03 Cap 1.0.0., Schweizerischer Nationalpark

Ortlepp, J., Mürle, U. (2003). Effects of experimental flooding on brown trout (*Salmo trutta fario* L.): The River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Sciences* 65: 232-238.

Oud, E., Muir, T. (1997). Large dams: learning from the past, looking at the future: Engineering and economic aspects of planning, design, construction and operation of large dam projects. The World Conservation Union, Gland, Switzerland, and the World Bank, Washington, D.C., USA.

Patten, D. T., Harpman, D. A., Voita, M. I., Randle, T. J. (2001). A managed flood on the Colorado River: Background, objectives, design and implementation. *Ecological Applications* 11(3): 635-643.

Petts, G. (1996). Water allocation to protect river ecosystems. *Regulated Rivers: Research and Management* 12: 353-365.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for conservation and restoration of river ecosystems. *BioScience* 47: 769-784.

Poff, N. L., Ward, J. V. (1991). Drift responses of benthic invertebrates to experimental streamflow variation in a hydrologically stable stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 1926-1936.

Powell, K. (2002). News feature: Open the floodgates! *Nature* 420(28): 356-358.

Robinson, C. T., Aebischer, S., Uehlinger, U. (2004A). Immediate and habitat-specific responses of macroinvertebrates to sequential, experimental floods. *Journal of the North American Benthological Society* 23(4): 853-867.

Robinson, C. T., Uehlinger, U., Monaghan, M. T. (2004B). Stream ecosystem response to multiple experimental floods from a reservoir. *River Research and Applications* 20: 359-377.

Scheurer, T., Molinari, P. (2003). Experimental floods in the River Spöl, Swiss National Park: Framework, objectives and design. *Aquatic Sciences* 65(2003): 183-190.

SPSS® (2006). SPSS 15.0.1 für Windows

Swisstopo (2007). Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES).

Tockner, K., Malard, F., Ward, J. V. (2000). An extension of the flood pulse concept. *Hydrological Processes* 14: 2861-2883.

Tockner, K., Waringer, J. A. (1997). Measuring drift during a receding flood: Results from an Austrian mountain brook (Ritrodat-Lunz). *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 82: 1-13.

Uehlinger, U., Kawecka, B., Robinson, C. T. (2003). Effects of experimental floods on periphyton and stream metabolism below a high dam in the Swiss Alps (River Spöl). *Aquatic Sciences* 65: 199-209.

Waters, T. F. (1972). The drift of stream insects. *Annual Review of Entomology* 17: 253-272.

Wilcock, G. M., Matthews, W. V. G. (1996). Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Water Resources Research* 32(9): 2911-2921.

## 8 Anhang

### 8.1 GIS-Karten

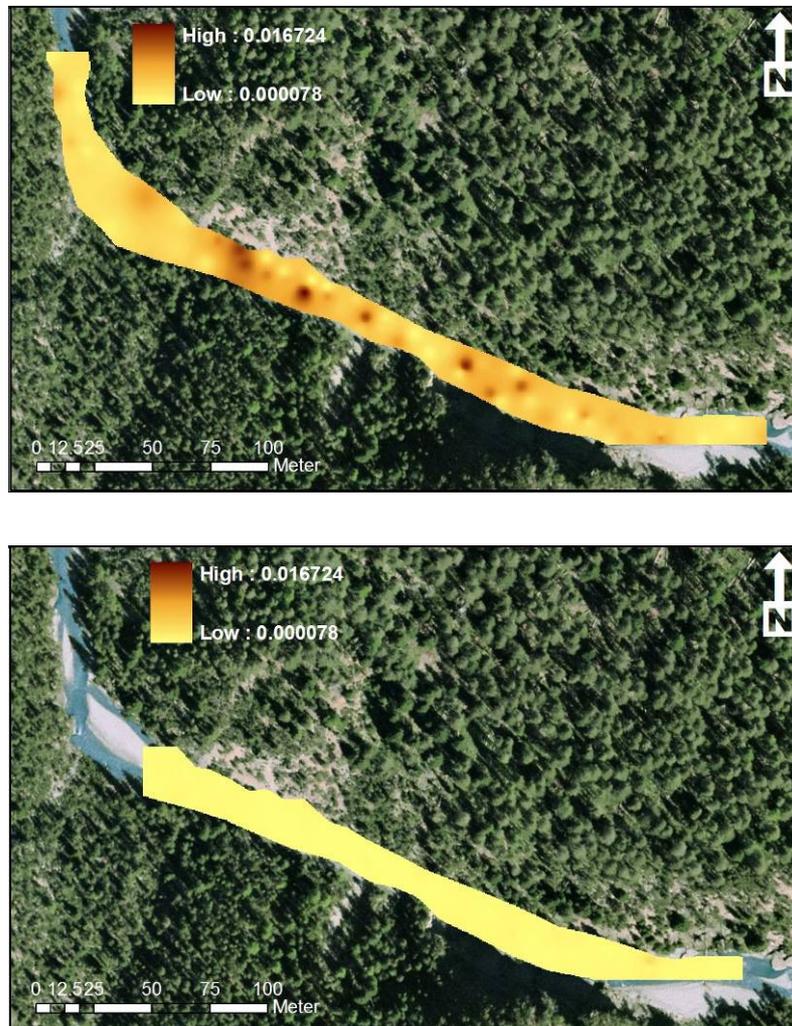


Abbildung 24 a, b: GIS-Karten vom Flussabschnitt „Punt Periv“ (a = vor der Flut; b = nach der Flut). Eingezeichnet ist die Interpolation (IDW) für das Periphyton, ausgehend von je 70 Messpunkten. Die Einheiten sind  $\text{g}/\text{cm}^2$ . Das Orthophoto stammt vom National Park Map Server LV03 Cap 1.0.0.

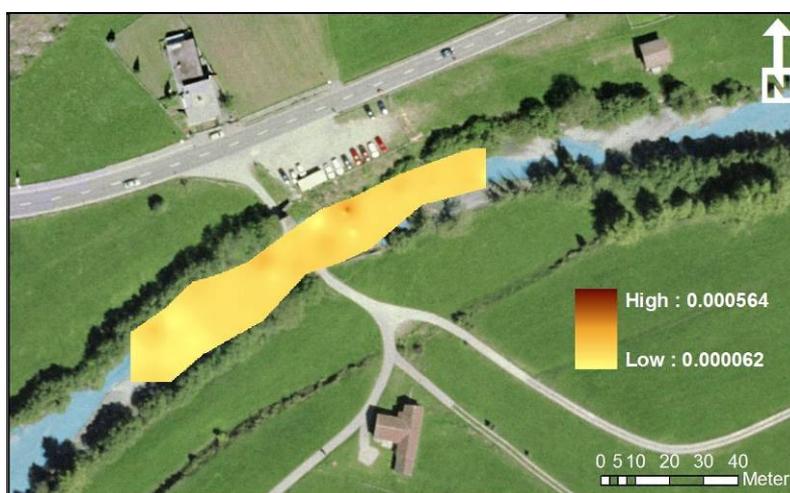
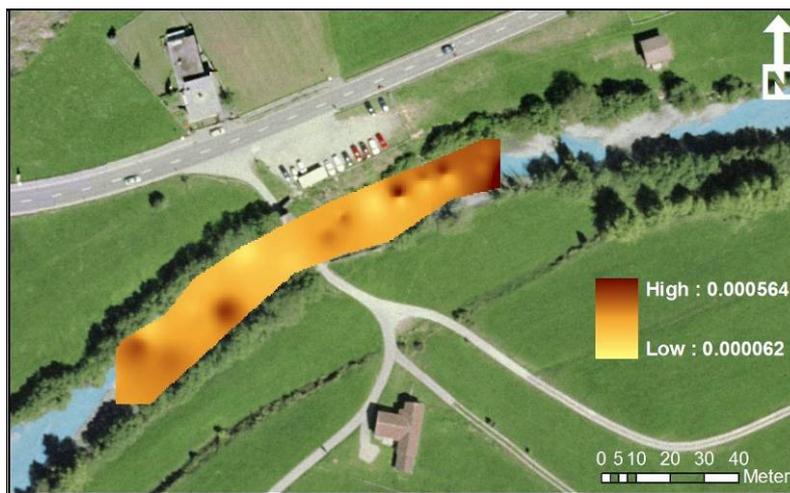


Abbildung 25 a, b: GIS-Karten vom Flussabschnitt „Zernez“ (a = vor der Flut; b = nach der Flut). Eingezeichnet ist die Interpolation (IDW) für das Periphyton, ausgehend von je 35 Messpunkten. Die Einheiten sind  $\text{g}/\text{cm}^2$ . Das Orthophoto stammt vom National Park Map Server LV03 Cap 1.0.0.