

ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Angewandte Numerik
Prof. Dr. Robert Michael Boes
Dr. Roland Fäh

Masterarbeit Sommersemester 2010

Numerische Modellierung der Regelung der Jura Randseen



Philipp Meyer
Masterstudium (4. Semester)
04-907-747

Selmattweg 14
4246 Wahlen
+41 61 761 34 89
pmeyer@student.ethz.ch

Zusammenfassung

Eine Analyse der Hochwasser der Jahre 2005 und 2007 zeigt, dass durch Optimieren der See-Regulierung der Alpenrandseen und deren Koordination untereinander Hochwasserschäden an den Mittellandflüssen gemindert werden können.

Mit einem hydrodynamischen 1D Modell der betroffenen Gewässer möchte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine neue Lagebeurteilung durchführen, um damit die Reguliervorschriften anzupassen. Anhand einer Softwareevaluation versucht das BAFU die geeignete Software dafür zu finden. In der Evaluation wird die Tauglichkeit der Software durch die Modellierung eines umfangreichen Testgebiets überprüft.

Ziel dieser Arbeit ist, das Testgebiet der Softwareevaluation mit dem Softwaresystem BASEMENT zu modellieren, und Simulationen und Szenarien gemäss BAFU-Pflichtenheft durchzuführen. Zusätzlich sollen Verbesserungsvorschläge bezüglich der Eignung der Software angebracht werden.

Das Testgebiet beinhaltet die drei Jurarandseen, den Murtensee, den Neuenburgersee und den Bielersee inklusive Broye- und Zihlkanal. Zusätzlich wird der Flussabschnitt der Aare zwischen dem Ausfluss des Bielersees bis zum Kraftwerk Ruppoldingen berücksichtigt, sowie der Flussabschnitt der Emme zwischen Emmenmatt und Mündung in die Aare. Als weiteres sollen die Bielerseeregulierung sowie die vier Flusskraftwerke der Aare im Modell implementiert werden.

Herausforderungen beim Modellieren zeigten sich einerseits bei der Kopplung, da der Fliessrichtungswechsel in den Verbindungskanälen der Seen berücksichtigt werden muss. Andererseits beim Ausfluss vom Neuenburgersee, wo der Übergang von grossen zu kleinen Querprofilen zu Stabilitätsproblemen führte. Die gestellten Anforderungen konnten mit BASEMENT gemeistert werden.

Als Verbesserungsvorschläge werden die Automatisierung der Fliesszonierung, der Querprofilfläche empfohlen, ebenso die Entwicklung eines Tools, wodurch die Anfangsbedingungen für Seen schnell generiert werden können.

Das Modell konnte erstellt, mit dem Hochwasser 2005 kalibriert werden und mit dem Hochwasser 2007 validiert werden. Somit kann mit dieser Arbeit gezeigt werden, dass die Software BASEMENT für zukünftige Projekte mit ähnlichem Format geeignet ist

Zusammenfassung	1
1 Einführung.....	1
2 Ziel.....	2
3 Vorgehen.....	2
4 Software BASEMENT	3
4.1 Systemarchitektur	3
4.2 Systemkomponenten von BASEchain	4
4.3 Numerische Stabilität.....	6
4.4 Standardmässig implementierte Strukturelemente	6
4.4.1 Randbedingungen (RB).....	6
4.4.2 Anfangsbedingungen (AB).....	7
4.4.3 Quellen/Senken.....	7
4.4.4 Regelung.....	7
4.4.5 Kopplung	9
4.5 Paralleles Rechnen	10
4.6 Eingabedateien	10
4.7 Ausgabedateien	10
4.8 Look and Feel der Software, intuitive Bedienbarkeit.....	12
4.9 Lizenz.....	13
4.10 Systemanforderungen.....	13
4.10.1 Microsoft Windows	13
4.10.2 Linux	13
4.10.3 Hardware Konfiguration.....	13
5 Testgebiet.....	15
6 Modellaufbau.....	17
6.1 Umfang des Testmodells.....	17
6.1.1 Topographische Rohdaten	18
6.1.2 Flusskraftwerke	18
6.1.3 Messstationen.....	20
6.2 Modellkonzept	20
6.3 Eingabedateien erstellen	22
6.3.1 Geometrie	23
6.3.1.1 Sohlenrauigkeiten	25

6.3.1.2	Berechnungsfläche	25
6.3.1.3	Gegliederte Querschnitte	25
6.3.1.4	Conveyance	26
6.3.1.5	Querprofilpunkte entfernen	27
6.3.1.6	Querprofile Interpolieren	28
6.3.1.7	Querprofil entfernen	29
6.4	Simulationsdatei	29
7	Simulationen/Szenarien	31
7.1	Modell Kalibrierung	31
7.1.1	Kalibrierung des Reibungsbeiwertes	31
7.1.2	Optimale Anfangsbedingungen setzen	31
7.1.3	Nicht messbare Zuflüsse	32
7.1.4	Simulationszeit	34
7.1.5	Kalibrierungsergebnisse	36
7.1.5.1	Konzessionspegel	38
7.2	Validierung	41
7.3	Stationäre Berechnungen für verschiedene Abflüsse	43
7.3.1	Emme	43
7.3.2	Aare	46
7.4	Wehr Port	47
7.5	Kraftwerk Flumenthal	48
7.6	Brücken	49
7.7	Messstation Murgenthal	49
7.8	Verzweigung / Vereinigung	50
8	Diskussion	53
9	Quellennachweis	55
10	Anhang	55
10.1	Nicht messbare Zuflüsse	55
10.2	Kalibrierung	57
10.3	Kraftwerke	58
10.4	Validierung	59
10.5	Emme	61

1 Einführung

Die jüngsten Überschwemmungen der Jahre 2005 und 2007 zeigen, dass viele Siedlungen an den Mittellandflüssen wie der Aare, der Reuss und der Limmat gegen Hochwasser in solcher Grösse nicht genügend geschützt sind. Solche Hochwasser können deshalb grosse Schäden anrichten. Eine Analyse der Hochwasser zeigt, dass der Regulierung der einzelnen Alpenrandseen wie die Juraseen, des Vierwaldstättersees und des Zürichsees sowie auch deren Koordination untereinander, eine entscheidende Rolle zukommt, um Hochwasserschäden zu vermindern. Entsprechend ist bei der Seeregulierung vor und während dem Hochwasserereignis denn auch Optimierungspotential vorhanden. Primär geht es darum, das Retentionsvolumen der Seen so zu nutzen und die Regulierung der Seeausflüsse so zu koordinieren, dass die Hochwasserspitzen in den unterliegenden Flussläufen minimiert werden können. Im weiteren Sinne geht es auch um eine ganzheitliche Betrachtung mit dem Ziel, die Schäden im Gesamtsystem zu minimieren.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) möchte auf der Basis einer eindimensionalen Modellierung der betroffenen Gewässer verschiedene Szenarien simulieren, um bei zukünftigen Hochwasserereignissen die bestehenden Reguliervorschriften anpassen zu können. Dafür soll eine geeignete Simulationssoftware beschafft werden, welche bedürfnisgerechte Anpassungen in einer späteren Phase zulässt.

Die Evaluation der Software wird von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) begleitet. Die Tauglichkeit der Software muss von den Anbietern anhand eines Testmodells nachgewiesen werden. Das Testmodell beinhaltet die Modellierung der drei Jurarandseen (Neuenburgersee, Murtensee und Bielersee inklusive Broye- und Zihlkanal, der Aare zwischen Bielersee und dem Kraftwerk Ruppoldingen, sowie dem Abschnitt der Emme zwischen Emmenbrücke bis zur Einmündung in die Aare bei Solothurn). Das Modell enthält relevante hydraulische Schwerpunkte, wie zum Beispiel diskontinuierliche Fließzustände in der Emme, Flusskraftwerke mit unterschiedlichen Regulierregeln sowie die komplexe Ausflussregelung des Bielersees.

2 Ziel

Das von dem BAFU vorgegebene Testgebiet soll mit dem Softwaresystem BASEMENT modelliert und kalibriert werden. Somit kann eine Eignung von BASEMENT anhand der vorliegenden Anforderungen wie Stabilität, Regulation und Abflussiterationen, gemäss BAFU-Pflichtenheft abgeklärt und allenfalls Verbesserungsvorschläge angebracht werden.

3 Vorgehen

Das Vorgehen wird in vier Schritte aufgeteilt. In einem ersten Schritt werden allgemeine Angaben zur verwendeten Software BASEMENT gemacht. In einem zweiten Schritt wird das zu modellierende Testgebiet analysiert. Als dritter Schritt wird der Modellaufbau mit den implementierten Regulierungen beschrieben. Als vierter Schritt werden die Ergebnisse der vorgegebenen Simulationen und Szenarien dargestellt.

4 Software BASEMENT

BASEMENT ist eine Software für numerische Simulationen von Strömungen und Sedimenttransports in Flüssen. BASEMENT ist an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), einem Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ), entwickelt worden.

4.1 Systemarchitektur

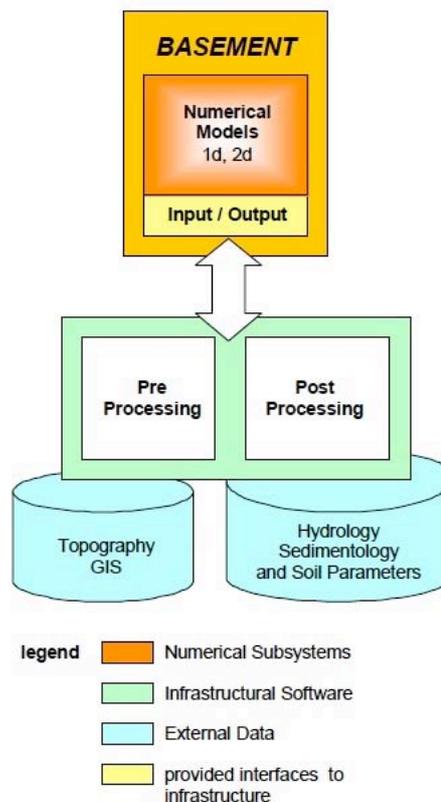


Abbildung 1: Systemarchitektur von BASEMENT

In Abbildung 1 ist die Systemarchitektur von BASEMENT dargestellt. Das in orange gefärbte Kästchen symbolisiert den Kern der Software. Er besteht aus zwei numerischen Subsystemen, dem **BASEchain** für eindimensionale und dem **BASEplane**, für zweidimensionale Simulationen. Beide Subsysteme können miteinander gekoppelt werden. Grundsätzlich sind diese Systeme in drei Systemkomponenten aufgeteilt, in denen sich die Algorithmen für die numerische Lösungen befinden. Die Codes von BASEMENT sind mit der objektorientierten Programmiersprache **C++** geschrieben.

Die Subsysteme haben eine Schnittstelle mit der Infrastruktursoftware, die in Abbildung 1 als grüner Kasten eingezeichnet ist. Der blau gefärbte Zylinder symbolisiert die externen Eingabedaten für BASEMENT. Drei Typen von Eingabedaten werden benötigt: **Topologische Daten, hydrologische Daten und granulometrische Daten**. Sie werden in unabhängigen Anwendungsprogrammen, wie zum Beispiel EXCEL oder MATLAB, aufbereitet. Somit ist BASEMENT eine sehr flexible Software und kann ohne weiteres an übliche Datenbanken, die Eingabe- und Ausgabedaten verwalten, angeschlossen werden.

4.2 Systemkomponenten von BASEchain

Da in der Arbeit ein eindimensionales Modell erstellt wurde, wird im Besonderen auf das Subsystem BASEchain eingegangen.

Abbildung 2 zeigt die drei Module aus dem das Sub-System BASEchain aufgebaut ist.

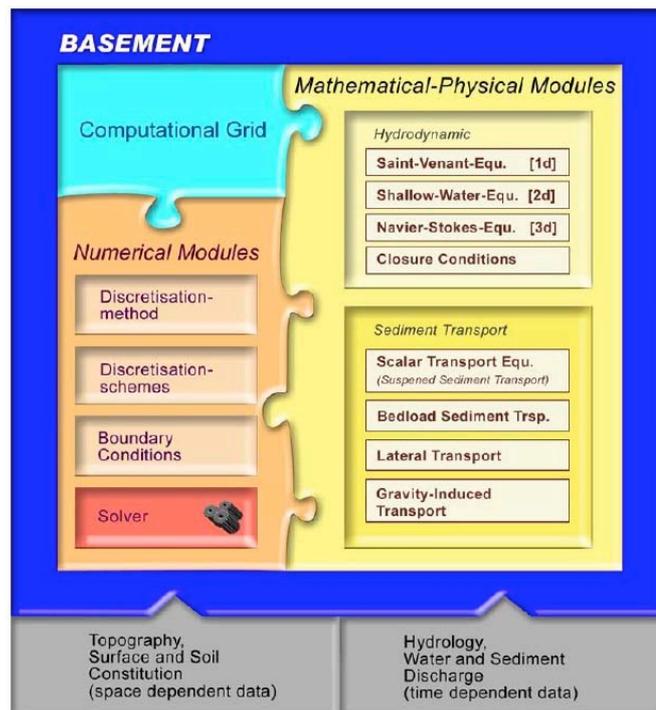


Abbildung 2: Drei Komponente mit dem ein Sub-System aufgebaut ist

Mathematisch - physikalisches Modul

Das mathematisch - physikalische Modul beinhaltet die Gleichungen der Flachwasserwelle.

Folgende Strömungsgleichung ist in BASEchain implementiert: **Saint Venant Gleichung** für instationäre Strömungen

Um alle Möglichkeiten von BASEchain aufzeigen zu können, muss noch klar erwähnt werden, dass mit BASEchain auch der Sedimenttransport simuliert werden kann. In dieser Arbeit wurde das Simulieren von Sedimenttransport aber nicht angewendet.

Für den Geschiebetransport sind folgende Formeln implementiert:

Einkorngleichungen

Meyer-Peter Müller

Power_law

Rickenmann

Smart Jaeggi

Multikorngleichungen

Meyer Peter Hunziker

Parker

Numerisches Modul

Das numerische Modul beinhaltet die Methoden, um die partiellen Differentialgleichungen numerisch lösen zu können. Die in BASEchain verwendete Saint Venant Gleichung wird mit der **Finiten- Volumen Methode (FV)** räumlich und mit dem **expliziten Euler Verfahren** zeitlich diskretisiert. Die zeitliche Diskretisierung kann in BASEchain zusätzlich auch mit einem **impliziten Schema** durchgeführt werden.

Berechnungsgebiet

Das **Berechnungsgebiet** (computationla Grid) ist die Topologie, die durch ein bestimmtes Verfahren diskretisiert wurde. Die reale Welt mit unendlich vielen Freiheitsgraden wird durch ein endliche Anzahl von Freiheitsgraden ersetzt. In BASEchain werden die Rohdaten der realen Welt in Form von Querprofilen verwendet.

4.3 Numerische Stabilität

In BASEchain kann mit impliziten sowie mit expliziten Schemata gerechnet werden. Das explizite Schema ist begrenzt durch das Stabilitätskriterium der Courant-Friedrich-Levy Zahl (CFL).

Formel 1:

$$CFL = \frac{u * \Delta t}{\Delta x} \qquad u \approx \sqrt{g * h}$$
$$CFL \leq 1$$

u Wellengeschwindigkeit *g* Gravitation
Δt diskretisierter Zeitschritt *h* Wassertiefe
Δx diskretisierter Ortsschritt

Bei der expliziten Lösung ist die Simulationszeit sehr gross, da der Zeitschritt aufgrund der CFL Zahl viel kleiner ist. Die implizite Lösung hat einen viel grösseren Zeitschritt und viel kleinere Simulationszeiten.

Das Testmodell rechnet mit der expliziten Methode, da Kopplungen, welche die einzelnen Flussabschnitte miteinander verbinden, nur für den expliziten Modus ausgelegt sind. Im Modell wird die CFL Zahl von 0.9 verwendet.

4.4 Standardmässig implementierte Strukturelemente

Es werden alle in BASEchain implementierten Strukturen, die für hydrodynamische Simulationen verwendet werden können, vorgestellt.

4.4.1 Randbedingungen (RB)

In BASEchain gibt es hydraulische Strukturen, die entweder für die obere, die untere oder für beide RB verwendet werden könne.

Obere Randbedingungen

Hydrograph: Zuflussganglinie

Untere Randbedingungen

<i>Wehr:</i>	Das Wasser fließt über einen vollkommenen Überfall aus dem Modell.
<i>Schütz:</i>	Das Wasser fließt durch ein Schütz aus dem Modell.
<i>Zero_gradient:</i>	Der Abfluss fließt beim letzten Querprofil einfach heraus, ohne den Abfluss oberhalb zu beeinflussen.
<i>H-Q Beziehung:</i>	Pegel-Abflussbeziehung
<i>zHydrograph:</i>	Diese RB definiert den während der Zeit veränderter Wasserspiegellage

Untere/Obere Randbedingungen

<i>Mauer:</i>	Wasser kann weder herein noch heraus fließen.
---------------	-----------------------------------------------

4.4.2 Anfangsbedingungen (AB)

Es gibt drei Möglichkeiten, die Anfangsbedingungen zu definieren:

1. (initial state stored in file) Diese Anfangsbedingung ruft den in einer Datei gespeicherten Anfangszustand ab.
2. (Dry channel) Der Fluss ist am Anfang der Simulation trockengelegt. Diese AB ist optimal, um ein Datei mit stationärem Anfangszustand zu generieren.
3. (Backwater calculation) Diese AB generiert einen Anfangszustand basierend auf einer Staukurvenberechnung.

4.4.3 Quellen/Senken

Es gibt drei Arten von Quelltermen, die im Berechnungsgebiet definiert werden können.

1. Die erste Art definiert an irgendeinem Querprofil im Rechnungsgebiet eine Quelle oder Senke bei der Wasser zu- oder wegfließen kann.
2. Die zweite Art ist wie die erste, nur zusätzlich kombiniert mit einem Regler
3. Die dritte Art ist, dass ein Quellterm für mehrere darauffolgende Querprofile definiert wird, also für ganze Teile von Flussabschnitten.

4.4.4 Regelung

In BASEMENT ist eine Regelungsstruktur implementiert, die durch Kombination von unteren Randbedingungen wie Wehr oder Schütz angewendet werden kann, um Stauregelungen zu simulieren.

Die Regelung ist ein Vorgang, bei dem eine Grösse, der Ist-Wert, fortlaufend erfasst und mit einer anderen Grösse, dem Soll-Wert, verglichen wird. Abhängig vom Ergebnis des Vergleichs, der sogenannten Regelabweichung, wird eine Stellgrösse so verändert, um eine Anpassung des Ist-Werts an den Soll-Wert zu beeinflussen. Diese Regelabweichung ist Eingangsgrösse des Reglers, der in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Regelabweichung und der implementierten Regelfunktion als Ausgangssignal die Stellgrösse erzeugt.

Bei einer Stauregelung kann der Soll-Wert ein Stauziel im Oberwasser eines Flusses sein. Der Ist-Wert ist der momentan gemessene Wasserspiegel im Oberwasser und die Regelabweichung ist deren Differenz. Die Stellgrösse kann bei einem Wehr die Überfallhöhe und beim Schütz die Öffnungsweite sein. Die Regelfunktion wird in BASEMENT mit einem PID Regler beschrieben.

Beim PID Regler werden drei Variablen verwendet.

P-Element: Der Proportionalregler resultiert eine Stellgrösse, die proportional zur Regelabweichung ist.

I-Element: Beim I-Regler ist nicht die Ausgangsgrösse selbst, sondern die Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsgrösse proportional zur Grösse der Regeldifferenz ausschlaggebend.

D-Element Der differentielle Regler liefert ein Ausgangssignal, das auf die Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz reagiert und somit zu Kompensationen kurzfristiger Änderungen der Regelgrösse geeignet ist.

Zusätzlich können vier weitere Parameter eingegeben werden: Der Startwert der Stellgrösse zum Beispiel die Wehrhöhe; Die maximale Änderungsrate der Stellgrösse; Der minimale und maximale Wert der Stellgrösse.

Die Wahl der Parameter hängt stark vom regulierten System ab und benötigt für die richtige Wahl Erfahrung und Geduld.

4.4.5 Kopplung

Die Kopplung ermöglicht einzelne modellierte Flussabschnitte, sogenannte Sub-Domains, miteinander zu koppeln. So kann ein Modell mit hydraulischen Strukturen wie Wehren oder Schützen innerhalb eines Flusses durch mehrere gekoppelte Flussabschnitte (Sub-domains) realisiert werden.

Die Modellierung eines ganzen Flussnetzes kann durch schrittweise Koppeln der Nebenflüsse mit dem Hauptfluss erreicht werden.

Die Kopplung ist sehr hilfreich für mehrdimensionale Modelle. So können gross skalierte 1D Simulationen mit lokalen 2D Simulationen kombiniert werden. Die Kopplungen erlaubt hydrodynamische wie morphologische Simulationen.

Folgende Kopplungstypen sind in BASEMENT implementiert:

- One-Way Kopplung: Der Austausch von Informationen ist nur in eine Richtung, nämlich vom oberen zum unteren Sub-Domain, möglich.
- Two-Way Kopplung: Der Austausch von Informationen ist in beide Richtungen möglich. Das Wasser kann aber nicht in beide Richtungen fließen. Ein Stauereignis im unteren Sub-Domain kann aber das obere Sub-Domain so beeinflussen, dass der Durchfluss sich verkleinert, damit ebenfalls ein Staueffekt auftreten kann.
- Conjunction: Zwei Flüsse, die sich vereinigen, können mit einer „Conjunction“ gekoppelt werden.
- Bifurcation: Ein Fluss, der sich stromabwärts in zwei Flüsse verzweigt, kann durch eine „Bifurcation“ gekoppelt werden.
- Connection: Die „Connection“ ermöglicht das Wasser in beide Richtungen fließen kann.

4.5 Paralleles Rechnen

In BASEMENT gibt es die Möglichkeit, parallel Rechnen zu können. Vor allem bei Modellen mit einem grossen Umfang hat es einen Einfluss auf die Simulationszeit.

4.6 Eingabedateien

Für eine simple hydraulische Simulation benötigt BASEMENT drei Eingabedateien, die folgendermassen bezeichnet werden: das „Command-File“, das „Topography-File“ sowie eine untere oder obere Randbedingungsdatei.

Alle Eingabedateien sind ASCII Dateien. ASCII Dateien sind mit jedem einfachen Dateibetrachtungsprogramm zu lesen und mit einem einfachen Texteditor zu bearbeiten, dadurch lassen sie sich leicht auf andere Betriebssysteme übertragen. Alle Eingabedateien sind also Text-Dateien mit der Endung „.txt“ ausser das „Command-File“ und das „Topography-File“. Das „Command-File“ hat die Endung „.bmc“ und das „Topography-File“ hat die Endung „.bmg“. Alle für eine Simulation verwendeten Dateien müssen im selben Ordner (Directory) abgelegt werden.

Das „Command-File“ ist die zentrale Simulationsdatei, die alle Parameter für das zu lösende Problem beinhaltet und die dazu benötigten Dateien verwaltet. Konkret heisst das, dass alle verwendeten hydraulischen Strukturen (Randbedingungen, Anfangsbedingungen, Quelle, Regelung usw.) und Simulationsparameter wie CFL-Zahl im „Command-File“ definiert werden müssen.

Im „Topography-File“ sind alle Querprofile vom betrachteten Flussabschnitt gespeichert.

Die Randbedingungsdatei kann eine Zeitreihe zum Beispiel eine Durchflussganglinie sein. Je nach Simulation müssen weitere Dateien für die hydraulischen Strukturenaufbereitet werden.

4.7 Ausgabedateien

Alle Ausgabedateien sind wie die Eingabedateien alle im ASCII Format. Wenn der Sedimenttransport vernachlässigt wird, gibt es vier Typen von Ausgabedateien, die das Programm

nach einer Simulation generiert, die Standard-Ausgabedatei, Topography-Ausgabedatei, Messpunkt-Ausgabedatei und die Restart-Datei.

Die Standard-Ausgabedatei trägt den Namen des „Command-File“ mit dem Zusatz „out“. Vor dem Start der Simulation muss noch der Zeitintervall für die Ausgabe des Resultats definiert werden. Folgende Parameter werden in dieser Datei für jedes Querprofil geschrieben:

- Namen der Querprofile
- Distanz vom Start
- Höhe vom tiefsten Querprofilpunkt
- Höhe der linken und rechten Dammkrone
- Mittlere Sohlenhöhe
- Wasserspiegellage
- Energiekurve
- Benetzte Fläche
- Durchfluss
- Numerischer Durchfluss
- Fließgeschwindigkeit
- Froud-Zahl
-

Die Topography-Ausgabedatei besitzt den Name der Topography-Eingabedatei mit dem Zusatz „out“. In dieser Datei werden die Iterationstabellen aufgelistet.

- Nummer der Iteration
- Benetzte Fläche
- Wasserspiegelhöhe
- Conveyance
- Breite

Messpunktdateien beinhalten die Informationen der gewählten Parameter für ein gewähltes Querprofil. Mögliche Parameter, die gewählt werden können, sind Abfluss, benetzte Fläche, Wasserspiegel und Fließgeschwindigkeit. Dabei können die Parameter auf vier Arten aufgezeichnet werden: Maximale oder minimale Parameterwerte pro Zeitschritt; Integrierung der gemessenen Werte über die Simulationszeit; normale Zeitreihe eines Parameters.

Die Dateien der Messpunkte oder auch Kontrollpunkte werden mit „MP“ plus gewählter Parameter plus Art der Aufzeichnung bezeichnet.

Die vierte Ausgabedatei ist die Restart-Datei. Diese Datei kann als Anfangsbedingung für eine weiterführende Simulation verwendet werden. Sie wird als Restart bezeichnet und verfügt über die Endung „.dat“.

4.8 Look and Feel der Software, intuitive Bedienbarkeit

BASEchain besitzt eine graphische Benutzeroberfläche, mit welcher das Testmodell erstellt und bearbeitet werden kann. Unter der Voraussetzung, dass Grundkenntnisse über numerische Modellierungen vorhanden sind, ist BASEchain sehr anwenderfreundlich und einfach zu bedienen. Das GUI ist logisch und übersichtlich aufgebaut. Dadurch sind die Dateien auch gut verwaltbar. Alle zu verwendenden Befehle werden im GUI beschrieben. Ein grosses Plus ist sicher auch das gut dokumentierte und sehr hilfreiche „Manual“.

Der Autor dieser Arbeit, der das Modell erstellt hat, hatte noch nie zuvor ein numerische Modell erstellt, noch hatte er Erfahrung mit der Software BASEMENT. Innert kurzer Zeit hatte er sich in die Software eingearbeitet und das Modell erstellt.

4.9 Lizenz

BASEMENT ist „Freeware“. Die Software wird zur kostenlosen Nutzung zur Verfügung gestellt. Sie kann übers Internet bezogen werden.

4.10 Systemanforderungen

4.10.1 Microsoft Windows

Die BASEMEZ Version 2.0 kann auf folgenden MS Windowssystem angewendet werden:

Windows 2000

Windows XP/XO x64

Windows Vista/ Vista64

Windows 7

4.10.2 Linux

LINUX (x86/-64):

Unbutu 9.04, alias „Karmic Koala“:

Kernel Version 2.6.31-14

GNU C Library (glibc) Version 2.9

4.10.3 Hardware Konfiguration

Es werden folgende Hardware Konfigurationen empfohlen:

Single- oder multi-core Prozessoren (x86/x86-64):

Intel (Xeon, Core2, Pentium 4)

AMF (K7,K8,K10)

RAN: +GB per core

Shared memory architecture

5 Testgebiet

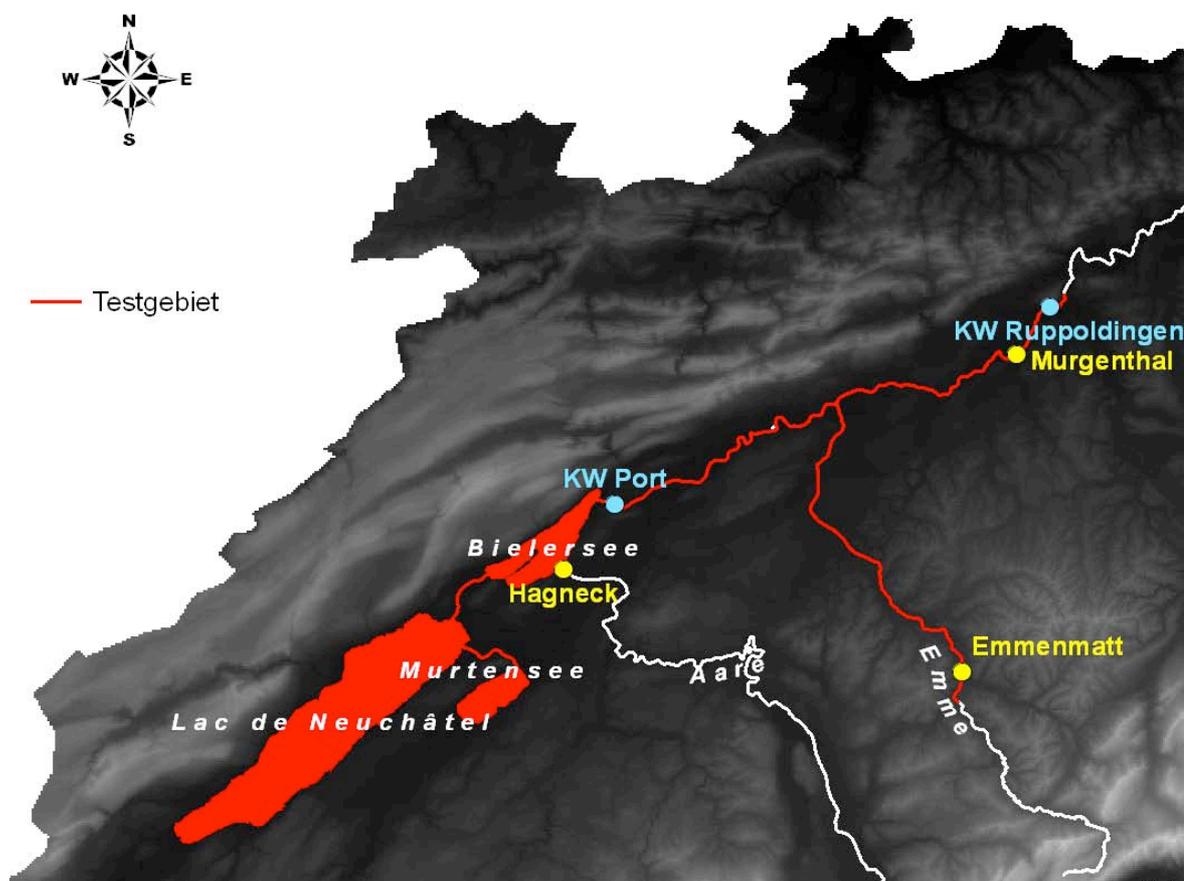


Abbildung 3: Testgebiet (rot)

Das Testgebiet ist in Abbildung 3 rot eingezeichnet. Es besteht aus den drei grossen Jura-
randseen, (Bielersee, Neuenburgersee und Murtensee) und den Flüssen Aare und Emme. Im
Testgebiet wird die Aare auf den Abschnitt zwischen dem Ausfluss des Bielersees und dem
Flusskraftwerk Ruppoldingen begrenzt. Im Modell wird bei der Emme das Teilstück zwischen
der Messstation bei Emmenmatt bis zum Emmenspitz, der Mündung der Emme in die Aare
unterhalb von Solothurn, berücksichtigt.

Das Gebiet entspricht gerade dem Gesamtwerk der Juragewässerkorrektion (JGK). Die JGK
erstreckt sich über das Hoheitsgebiet von fünf Kantonen (Waadt, Freiburg, Neuenburg, Bern,
Solothurn), fasst das Wasser aus nahezu einem Viertel der Schweiz und wirkt sich Aare ab-
wärts über die Kantone Solothurn und Aargau bis zum Rhein aus.

Seit der JGK ist der Neuenburgersee einerseits durch den Zihlkanal mit dem Bielersee und andererseits durch den Broyekanal mit dem Murtensee verbunden. Die drei Seen bilden somit einen zusammenhängenden Speicherraum, der als Pufferzone für Hochwasser dienen kann. Zugleich ist ein weiteres Kernstück der JGK die Umleitung der Aare in den Bielersee. Die Aare fliesst durch den Hagneckkanal in und durch den Nidau-Büren-Kanal aus dem Bielersee. Somit dämpft dieser komplexe Speicherraum vor allem die Hochwasserspitzen der Aare.

Die Festlegung eines optimalen Wasserstands der drei Jurarandseen bildet jeweils eine Entscheidung von grosser Tragweite. Das Regulierwehr Port regelt den Ausfluss aus dem Bielersee und hat somit einen direkten Einfluss auf den Wasserstand des Bielersees und einen indirekten auf die Wasserstände vom Neuenburger- und Murtensee. Im Normalfall fliesst das Wasser vom Murtensee in den Neuenburgersee und weiter in den Bielersee. Bei einem Lastfall kann das Wasser in den Kanälen in beide Richtungen fließen.

Der Abfluss beim Regulierwehr Port wird bei Normalbetrieb aufgrund der Linienregulierung festgelegt. Das heisst, der Abfluss wird in Abhängigkeit des Pegels vom Bielersee sowie des Datums bestimmt. Bei Hochwasser gilt die Drosselprozedur nach Aebi. Dies muss vor allem beim Hochwasserfall der Emme berücksichtigt werden. Das Ziel ist, den Abfluss beim Regulierwehr Port derart zu drosseln, dass der Abfluss der Emme und der Abfluss vom Regulierwehr Port bei der Messstelle Aare Murgenthal nicht den Abfluss von $850\text{m}^3/\text{s}$ überschreitet (Murgenthalerbedingung). Die Berechnungsprozedur basiert auf der Fliesszeit zwischen der Messstelle an der Emme bei Emmenmatt bis zur Mündung in die Aare sowie Aare Port bis Mündung Emme.

6 Modellaufbau

Für das Modellieren des Testgebietes ist folgendermassen vorgegangen worden: In einem ersten Schritt wurde anhand der zu Verfügung gestellten Daten den Umfang des Testmodells erfasst. In einem zweiten Schritt wurde das Modellkonzept erstellt. In einem dritten Schritt wurden alle benötigten Eingabedateien für das Modell aufbereitet.

6.1 Umfang des Testmodells

Im ersten Schritt des Modellaufbaus wird der Umfang des Testgebietes erfasst. Das BAFU hat die Rohdaten zur Verfügung gestellt. Die Grundlagendaten bestehen aus Daten von Messstationen, Kenndaten über Kraftwerke und EXCEL Dateien mit den entsprechenden Querprofilen im GEWISS Format. Insgesamt stehen für das Modell 881 Querprofile, aufgeteilt auf drei Seen und vier Fliessgewässer, 5 Kraftwerke und 18 Messstationen, zur Verfügung.

Die Eingabedaten für BASEMENT beschränken sich in diesem Modell auf topologische und hydrologische Daten.

6.1.1 Topographische Rohdaten

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen die Anzahl der Querprofile und Kenndaten der Seen und Fließgewässer. Mit ihnen werden später die „Topography-Files“ definiert. Es sind die Querprofile, welche die elementaren Bausteine für das Modell bilden. Insgesamt stehen 881 Querprofile zur Verfügung.

Tabelle 1: Kenndaten der Seen

Seen	Querprofile	Fläche
Neuenburgersee	50	218 km ²
Murtensee	12	23 km ²
Bielersee	29	40 km ²

Tabelle 2: Kenndaten der Fließgewässer

Fließgewässer	Von	Bis	Länge	Querprofile
Emme	Messstation Emmenmatt	Mündung	40 km	230
Aare	Biel	Murgenthal	65 km	320
Zihlkanal			8.5 km	80
Broyekanal			8.3 km	80

6.1.2 Flusskraftwerke

Für das Modell werden fünf Flusskraftwerke berücksichtigt. Sie werden behandelt wie Fixpunkte und bestimmen die unteren Randbedingungen der einzelnen Flussabschnitte. Die Kraftwerke Port, Flumenthal, Bannwil, Wynau und Ruppoldingen befinden sich alle, wie es Abbildung 4 zeigt, im Flussabschnitt der Aare zwischen dem Ausfluss des Bielersees und dem Kraftwerk Ruppoldingen.

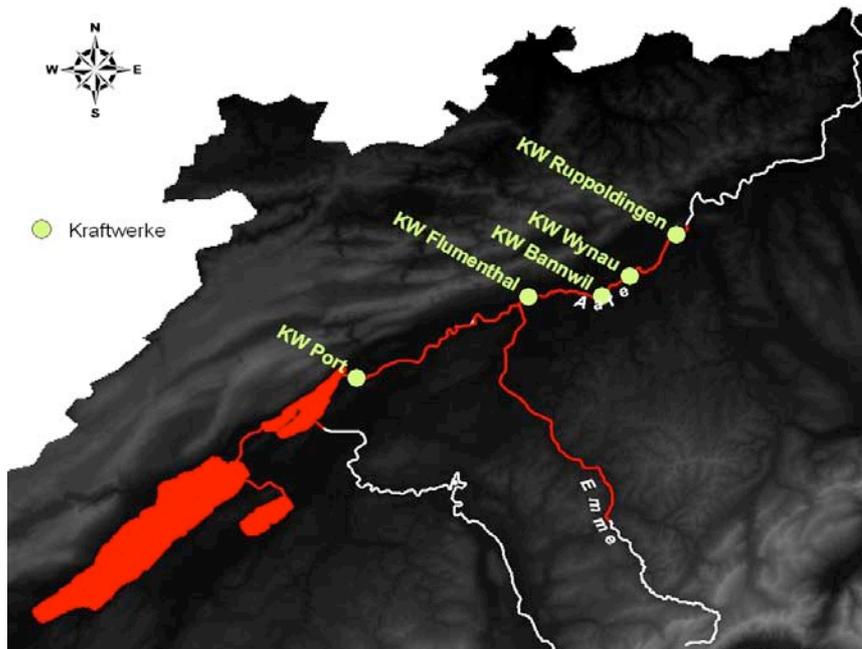


Abbildung 4: Alle Flusskraftwerke im Testgebiet, die für das Modell berücksichtigt werden müssen

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind Kenndaten der Wehre ersichtlich. Zusätzlich muss zum KW Flumenthal erwähnt werden, dass die Wasserstandsregulierung für Wendepiegel bei Rötibrücke erfolgt. Das ist ca. 4.4km oberhalb des Kraftwerkes.

Tabelle 3: Kenndaten der Wehre und Kraftwerke

Regulierstrukturen	Abflussregulierung	Stauziel
Kraftwerke		
Port	A) Linienreglement (Normalbetrieb) (Im Modell verwendet H-Q Beziehung vom 15.Juni-15.August) B) Drosselprozedur nach Aebi	
KW Flumenthal	Wendepiegel	426.00 m.ü.M
KW Bannwil	P-Q Reglement	417.30 m.ü.M
KW Wynau	KW Oberwasser	408.08 m.ü.M
KW Ruppoldingen	P-Q Reglement (Sommer)	

6.1.3 Messstationen

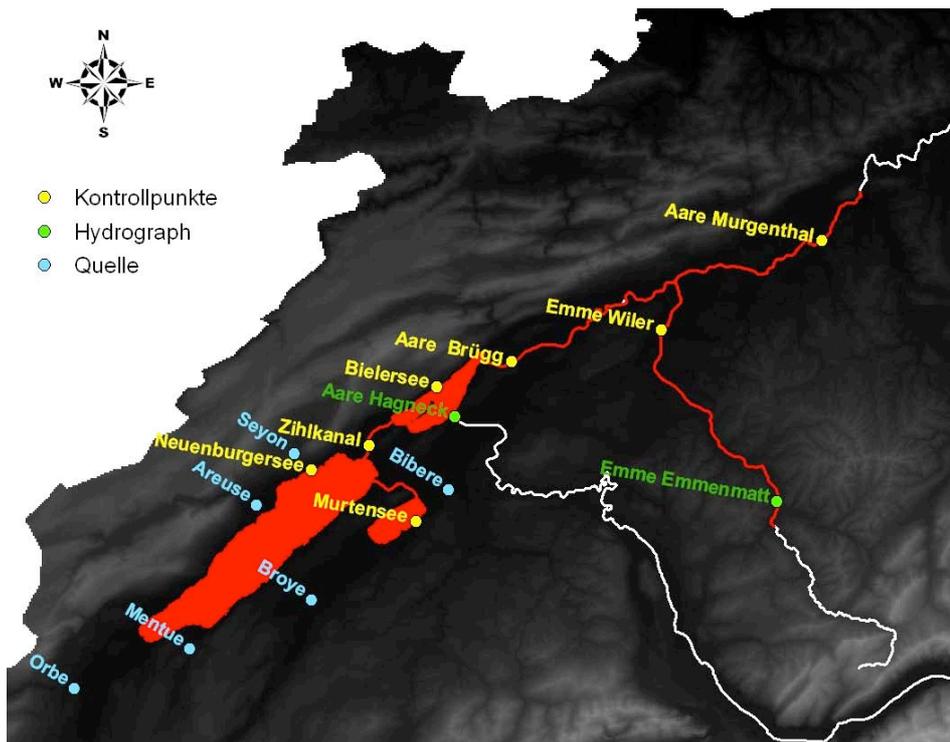


Abbildung 5: Alle vorhandenen Messstationen im Einzugsgebiet des Testgebietes

In Abbildung 5 sind alle vorhandenen Messstationen dargestellt. Die Datensätze der Messstationen sind Zeitreihen, die entweder Abfluss- oder Wasserspiegelmessungen der Hochwasser 2005 und 2007 darstellen. Im Modell werden sie entweder als Kontrollpunkte, Hydrograph oder Quellen verwendet. Messpunkte werden bei den Kontrollpunkten eingesetzt und messen während einer Simulation den gewählten Parameter. Die generierte Zeitreihe kann dann mit einer echt gemessenen Zeitreihe der Kontrollpunkte verglichen werden.

Hydrographen dienen als Eingabedaten der oberen Randbedingungen. Die Quellen sind Zuflüsse, die nicht als obere Randbedingung definiert sind.

6.2 Modellkonzept

Anhand des Modellumfanges und durch die von BASEMENT vorgegebenen Modelliermöglichkeiten wurde ein Modellkonzept aufgestellt.

Die Abbildung 6 zeigt das abstrakte Testgebiet als Modellkonzept. Wie die Legende im weissen Kästchen zeigt, besteht der Plan aus sechs Elementen. Als zusätzliche Orientierung dient die Beschriftung der Kraftwerke.

MODELLKONZEPT

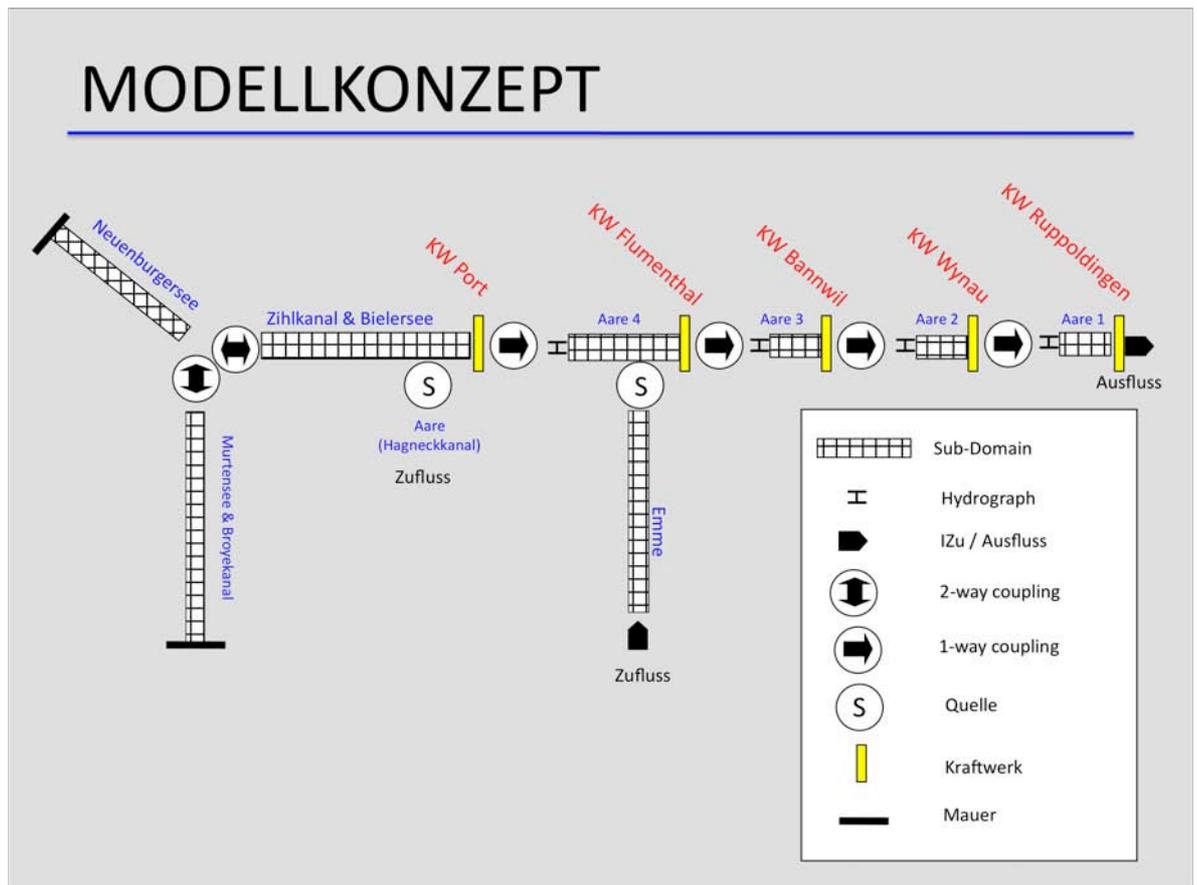


Abbildung 6: Modellkonzept des Testmodells

Der gehäuselte Balken bezeichnet den Sub-Domain, was im Modell Flussabschnitte symbolisiert. Das ganze Modell besteht aus acht Sub-domains. Folgende Gewässer bilden zusammen ein Sub-domain: Murtensee & Broyekanal, Neuenburgersee, Zihlkanal & Bielersee und Emme. Die Aare zwischen dem Kraftwerk Port und dem Kraftwerk Ruppoldingen ist in vier Flussabschnitte aufgeteilt. Im Plan werden sie als Aare1, Aare2, Aare3 und Aare4 bezeichnet.

Die einzelnen Sub-domains sind miteinander gekoppelt. Die vier Subdomains der Aare und der Zihlkanal & Bielersee sind je mit einer one-way Kopplung gekoppelt. Im Modellplan ist die one-way Kopplung als schwarzer Pfeil im Kreis symbolisiert. Das heißt, dass der Informationsaustausch der Subdomains nur in eine Richtung verläuft.

Zwischen den drei Seen, den Sub-domains Murtensee & Broyekanal, Neuenburgersee und Zihlkanal & Bielersee gibt es zwei „Connection“ Kopplungen, welche in der Legende als schwarzer Doppelpfeil im Kreis eingezeichnet sind. Das heißt, dass die Informationen in beide Richtungen der Subdomains ausgetauscht werden. Das Wasser kann also in beide

Richtungen fließen, was in der Realität bei Lastfällen auch vorkommen kann. Die „Connection“ wurde extra für diese Projekt programmiert, da dies eine seltene und nicht standardisierte Anwendung für 1D Modellierung ist.

Die Emme als Sub-domain ist einfachheitshalber nur über einen Quellterm mit dem Flussabschnitt Aare4 gekoppelt. Der Quellterm kann an irgend einem Querprofil angesetzt werden und nicht nur, wie die normalen Kopplungen, am Ende oder Anfang des Sub-Domains. Auf diese Weise muss der Flussabschnitt Aare4 in keine weiteren Subdomains unterteilt werden.

6.3 Eingabedateien erstellen

In BASEMENT muss jedes Sub-domain eine Eingabedatei für die Geometrie und eine Simulationsdatei das sogenannte „Command-File“ besitzen. Abhängig vom Sub-Domain müssen noch Anfangsbedingungs- und Randbedingungsdateien erstellt werden. All diese Dateien sind mit der graphischen Oberfläche von BASEMENT erstellt, aufbereitet und zusammengeführt worden.

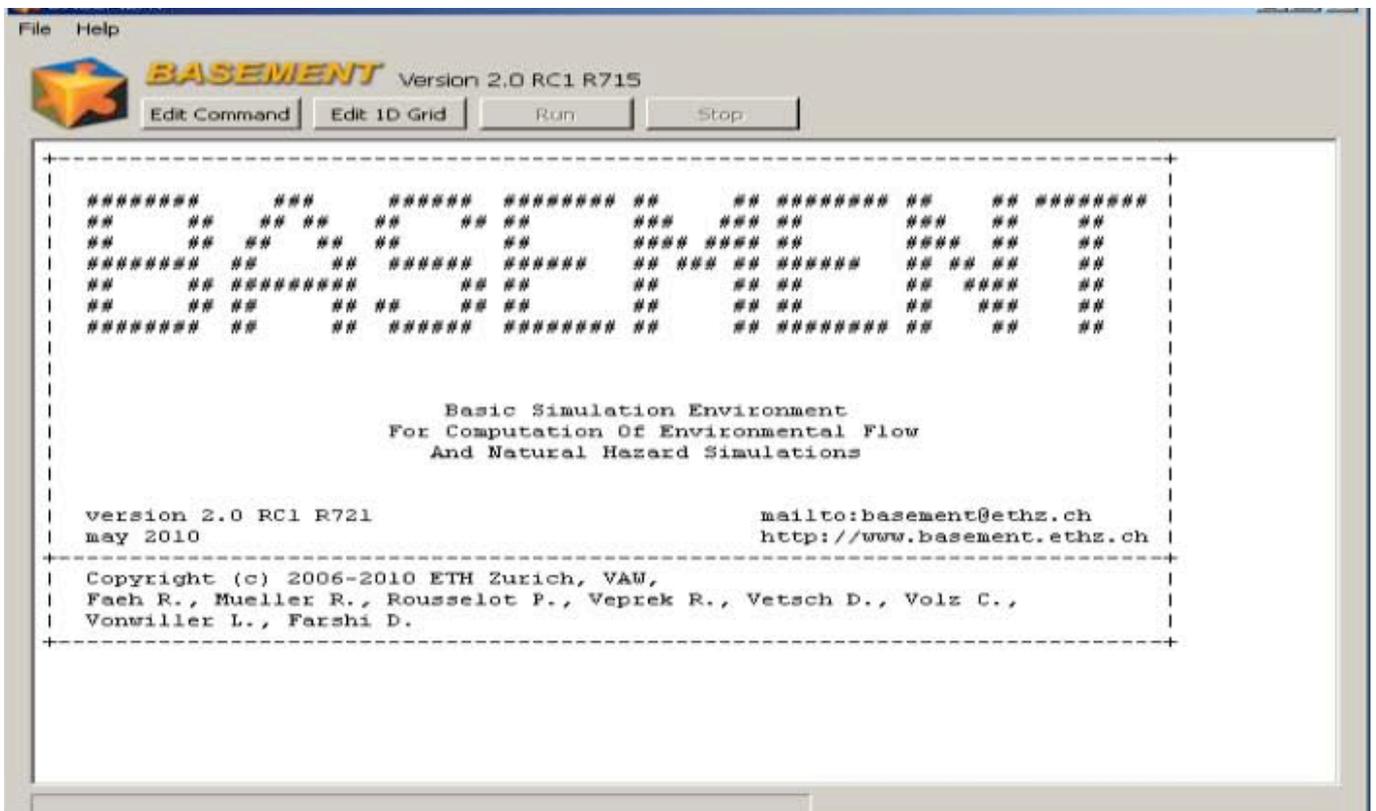


Abbildung 7: Console von BASEMENT

Abbildung 7 zeigt die Startconsole von BASEMENT mit den zwei Auswahlmöglichkeiten „Edit Command “ und „Edit 1D Grid“. Mit „Edit Command“ kann die Simulationsdatei erstellt und bearbeitet werden und mit „Edit 1D Grid “ kann das „Topography-File“ erstellt und bearbeitet werden. In den folgenden Kapiteln „Geometry“ und „Simulationsdatei“ wird beschrieben, wie die Geometrie und Simulationsdatei erstellt wurde und auf was geachtet werden musste.

6.3.1 Geometrie

Bevor irgendeine Simulation durchgeführt werden kann, muss das Gewässernetz modelliert werden. Das ist einer der aufwendigsten Arbeitsschritte beim Modellaufbau.

Die „Topography-Files“ sind die Querprofildateien von BASEMENT. Gemäss dem Modellkonzept müssen acht Querprofildateien hergestellt werden. Alle „Topography-File“ müssen am Schluss, bei Vollendung des Modells, im selben Directory abgespeichert werden.

Aus den Rohdaten müssen Querprofildateien für BASEMENT hergestellt werden. Die Querprofildateien, die in Excel-Format geliefert wurden, müssen in die Querprofildateien von BASEMENT transformiert werden. Alle Querprofildateien, die für ein Sub-domain benötigt werden, müssen in einer EXCEL-Mappe zusammengetragen werden, und zwar der Reihe nach. Das Querprofil beim Einlauf muss zuerst und das beim Auslauf zuletzt eingetragen werden. Diese acht Mappen müssen dann in eine Datei mit „.csv“ Format gespeichert werden. Mit einem extra dafür geschriebenen Programm werden die „.csv“ Dateien in das BASEMENT-Format mit der Endung „.bmg“ eingelesen.

BASEview kann alle Querprofile von einem „Topography-File“ in zwei Perspektiven zeigen. In der Vogelperspektive, wie sie Abbildung 8 zeigt, werden zuerst alle Querprofile von oben abgebildet, damit der ganze Umfang der Geometriedatei erblickt werden kann. Abbildung 9 zeigt das Querprofil in Fliessrichtung. Links kann das gewünschte Querprofil, das angeschaut werden möchte, gewählt werden. In dieser Perspektive können die Querprofile bearbeitet werden. Zusätzlich können vier Funktionen in BASEview durchgeführt werden, die für die Bearbeitung der Querprofile von Nutzen sind.

Das GUI ist auch sehr nützlich, weil es sofort anzeigt, bei welchem Querprofil ein Fehler vor-
kommt, der zum Beispiel bei der Transformierung entstanden ist.

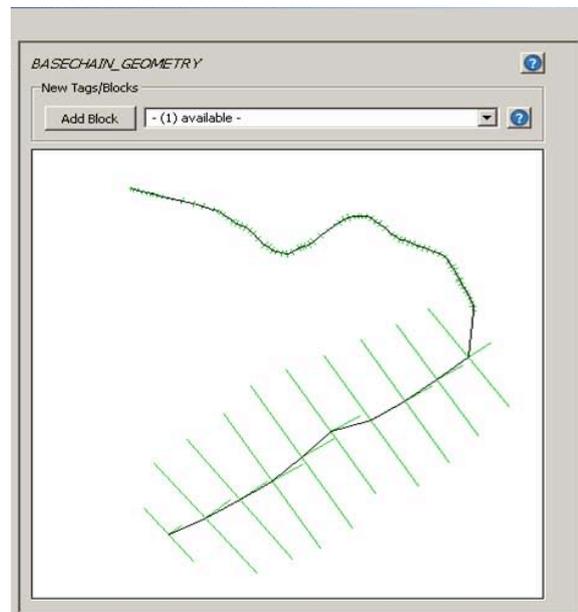


Abbildung 8: Vogelperspektive vom Sub-domain Murtensee & Broyekanal

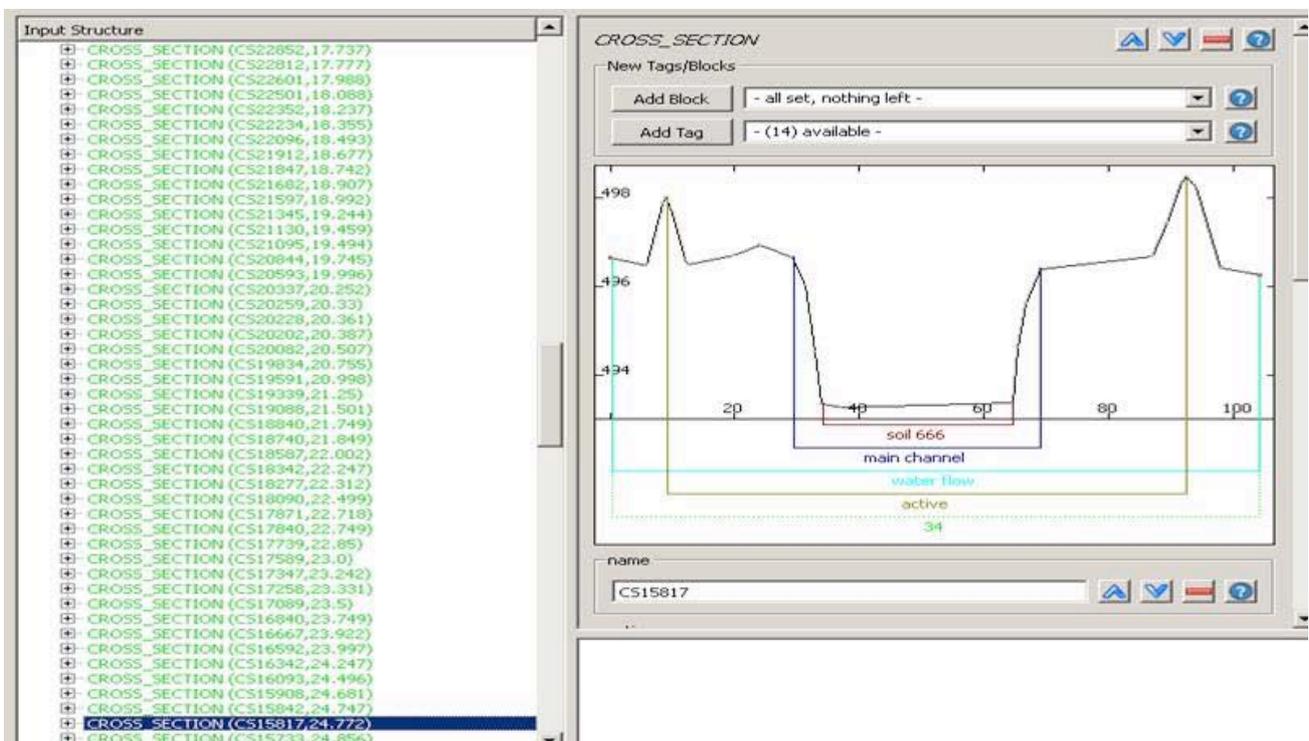


Abbildung 9: Perspektive des Querprofils in Fließrichtung, links Auswahl der Querprofile

6.3.1.1 Sohlenrauigkeiten

Zu jedem Profilpunkt können Angaben über die Oberflächenrauigkeit gemacht werden. In BASEview kann für jedes Querprofil der Reibungsbeiwerte individuell gesetzt werden. Dazu kann noch zwischen dem Reibungsbeiwert im Hauptgerinne und Vorländer unterschieden werden.

Für die Definierung des Fließwiderstandes stehen in BASEchain drei unterschiedliche Ansätze zur Auswahl: Strickler, Chézy und Darcy Weissbach. Für das Testmodell wurde der Strickler-Beiwert gewählt. Es wurden die vorgegebenen Sohlenrauigkeiten vom BAFU übernommen.

6.3.1.2 Berechnungsfläche

Der „Active Range“ berücksichtigt in einem Querprofil, wo Wasser vorkommen darf und wo nicht. Beim Doppelprofil, wie Abbildung 9 zeigt, definiert die braun eingezeichnete Linie diese Zone. In diesem Fall fließt das Wasser genau zwischen den zwei Dammkronen. Wenn nichts geändert wird, gilt das ganze Querprofil als Rechnungszone, nämlich vom äussersten linken bis zum äussersten rechten Querprofilpunkt.

Dieser „Active Range“ kann auf zwei Arten geändert werden. Die eine Methode ist den „Active Range“ manuell zu ändern. Die andere Methode ist den „Active Range“ von BASEview bestimmen zu lassen. Das Programm definiert die Berechnungszone so, dass sie genau zwischen dem höchstgelegenen Querprofilpunkten links und rechts begrenzt wird. Im Testmodell wurde der „Active Range“ mit dieser Funktion berechnet.

6.3.1.3 Gegliederte Querschnitte

In BASEMENT wird angenommen, dass die Fließgeschwindigkeit über die ganze Querprofilfläche gleich gross ist. Es ist klar, dass diese Vereinfachung nicht der Realität entspricht. Darum können die Querprofile in unterschiedliche Fließzonen aufgeteilt werden. Zusätzlich kann ein numerisches Problem bei Doppelprofilen auftreten, und zwar bezüglich Conveyance. Die Conveyance wird im darauffolgenden Teilkapitel behandelt.

Mit dem Befehl „Main Channel Range“, der in Abbildung 9 dunkelblau eingezeichnet ist, können Doppelprofile in Hauptgerinne und Vorländer unterteilt werden. Mit dem Befehl

„Water Flow Range“ wird das Querprofil in eine Fließzonen und Speicherzonen, wo keine Fließgeschwindigkeit besteht, aufgeteilt.

6.3.1.4 Conveyance

Die Conveyance wird in Formel 2 definiert.

Formel 2:

$$Q = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot A \cdot \sqrt{J}$$

$$CV = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot A \cdot \sqrt{1}$$

$$R = A/U$$

Q	<i>Abfluss</i>
k_{St}	<i>Stricklerbeiwert</i>
R	<i>hydraulischer Radius</i>
A	<i>Querschnittsfläche</i>
U	<i>Benetzter Umfang</i>
J	<i>Gefälle</i>
CV	<i>Conveyance</i>

Die Conveyance wird im Programm am Anfang der Berechnungen in Iterationstabellen berechnet. Das numerische Problem, das im vorhergehenden Kapitel erwähnt wurde, wird ersichtlich, wenn die Conveyance gegenüber den Wasserspiegelhöhen aufgetragen wird. Abbildung 10 zeigt im linken Graphen als blaue Kurve die unkorrigierte Wasserspiegel-Conveyance Kurve. Die rot gestrichelte Linie symbolisiert die Vorlandsohlenhöhe. In der Mitte ist das betroffene Doppelquerprofil in blau. Auch hier ist die Vorlandsohlenhöhe eingetragen. Rechts ist eine perfekte korrigierte CV-Kurve ersichtlich.

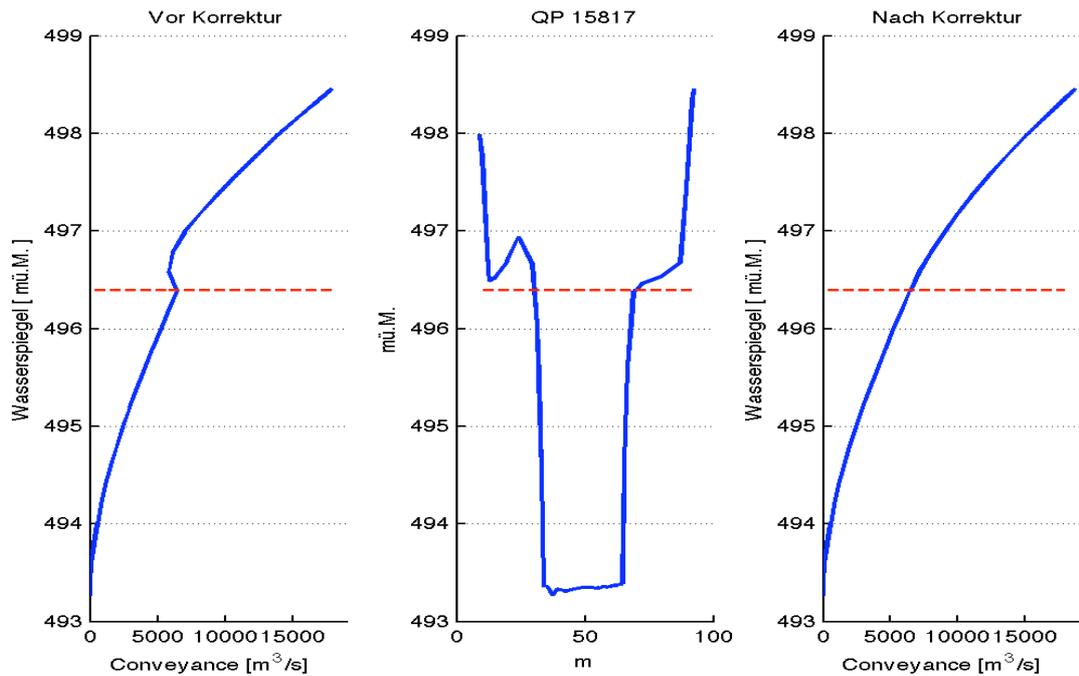


Abbildung 10: (links) CV vor Korrektur, (mitte) Querprofil, (rechts) CV nach Korrektur, (rot) höhe der Vorlandsohle

Wenn bei einem Doppelquerprofil die Wasserhöhe genau die Höhe der Vorlandsohle erreicht, ist die Änderung vom hydraulischen Radius so drastisch, dass ein unerwünschter Sprung in der Wasserspiegel-Conveyance Kurve auftritt. Genau an der Stelle des Sprungs muss das Querprofil in unterschiedliche Zonen aufgeteilt werden, damit pro Zone unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten berechnet werden können und so der Sprung korrigiert werden kann. Dies wird mit den vorgestellten Befehlen „Main Channel Range“ oder „Water Flow Range“ ausgeführt.

Im Modell mussten fast alle Querprofile auf diese Weise bearbeitet werden. Diese Arbeit benötigte einen grossen Zeitaufwand. Darum wäre es praktisch für zukünftige Projekte mit ähnlichem Umfang, ein Tool in BASEview zu implementieren, das die Wahl lässt, diesen Sprung in der Wasserspiegel-Conveyance Kurve automatisch zu korrigieren.

6.3.1.5 Querprofilpunkte entfernen

Eine weitere Funktion in BASEview ist, benachbarte Querprofilpunkte, deren Höhendifferenz zueinander innerhalb einer vorgegebenen Spannweite liegen, zu entfernen, ohne dass die Formeigenschaft der einzelnen Profile verloren geht. So lassen sich zum Beispiel alle Quer-

profilpunkte, die in der Querprofildatei des Sub-domain Murtensee-Broyekanal vorkommen, auf die Hälfte reduzieren. Dies hat eine optimierende Wirkung auf die Rechenleistung.

6.3.1.6 Querprofile Interpolieren

Wie im Modellkonzept in Abbildung 6 ersichtlich ist, sind zwischen den drei Seen-Sub-Domains zwei „Connecion“ Kopplungen verwendet worden, weil da das Wasser bei Lastfällen einen Fliessrichtungswechsel macht. Der Neuenburgersee hat zwei untere Randbedingungen, welche mit der unteren Randbedingung vom Murtensee-Broyekanal sowie mit der oberen Randbedingung Zihlkanal-Bielersee verbunden sind.

Nun mussten im Sub-Domain vom Neuenburgersee beim Ausfluss Querprofile interpoliert werden. Der Grund war der zu grosse Grössenunterschied vom zweitletzten zum letzten Querprofile, der zu Stabilitätsproblemen führte.

In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind im Sub-Domain vom Neuenburgersee die interpolierten Querprofile blau eingezeichnet. Links sieht man den Umfang vom ganzen Sub-domain. Die grünen Querprofile sind im Schnitt 800 Metern voneinander entfernt.

Die Querprofile konnten über BASEview interpoliert werden. Damit kein abrupter Übergang vom zweitletzten zum drittletzten Querprofil auftreten würde, wurden zusätzliche Querprofile zwischen dem zweitletzten und dem fünftletzten Querprofil mit einem grösseren, vorgegebenen Abstand interpoliert. Dies ist sehr gut in Abbildung 12 erkennbar.

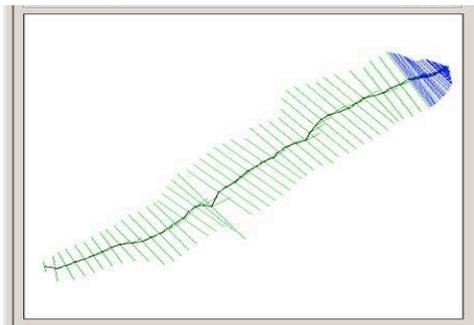


Abbildung 11: Sub-Domain des Neuenburgersees

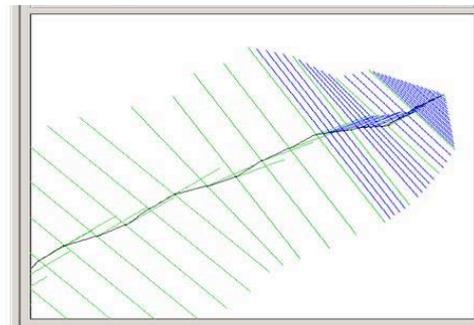


Abbildung 12: Vergrössertes Sub-Domain des Neuenburgersees

6.3.1.7 Querprofil entfernen

Weil das Modell mit dem expliziten Verfahren rechnet, versuchte man einen Zeitschritt von 10 Sekunden für jedes Sub-Domain zu erhalten, bevor sie miteinander gekoppelt wurden. Natürlich hängt der Zeitschritt von der CFL-Zahl ab. Das heisst, der Abstand der einzelnen Querprofile beeinflusst den Zeitschritt. Ist der Abstand gross – als Erfahrungswert gilt ein Wert über hundert Metern – kann ein grosser Zeitschritt erreicht werden. Ist der Abstand klein, hängt der Zeitschritt von diesem Abstand ab. Da der Querprofilabstand eins zu eins von den GEWISS Daten übernommen wurde, liegen einige Querprofile vor allem bei Brücken sehr nahe beieinander. Zum Teil wurde einen Abstand von nur sieben Metern gemessen.

Während einer Simulation wird in der Console von BASEMENT angezeigt, bei welchem Querprofil im Sub-Domain der kleinste Zeitschritt vorkommt. Falls der Abstand von diesem Querprofil zum nächsten sehr klein ist – also kleiner als 50 Meter – wurde dieses Querprofil entfernt. Und die Simulation wurde neu gestartet. Dieser iterative Vorgang wurde wiederholt bis der gewünschte Zeitschritt vorhanden war. In der Anwendung werden die Querprofile nicht aus der Querprofilsdatei gelöscht sondern nur aus dem „Command-File“ gestrichen.

Insgesamt wurden von den am Anfang 881 verwendeten Querprofilen 74 entfernt. Das Modell besteht immer noch aus 807 Querprofilen inklusive den interpolierten beim Sub-Domain Neuenburgersee.

6.4 Simulationsdatei

Die Simulationsdatei von BASEMENT wird als „Command-File“ bezeichnet. Jedes der acht Sub-Domains benötigt ein „Command-File“. Weil die Sub-Domains gekoppelt sind, werden alle „Command-Files“ in einer einzigen Simulationsdatei zusammengetragen. Abbildung 13 zeigt die Gliederung des „Command-File“. Jedes Sub-domain ist klar erkennbar und identisch wie im Modellkonzept bezeichnet. MUR_BRY bezeichnet das Sub-Domain Murtensee & Broyekanal, NE bezeichnet das Sub-Domain vom Neuenburgersee und ZI_BI jenes vom Zihlkanal und Bielersee. Die orange gefärbten Sub-Domains, wie zum Beispiel Aare1, bedeuten eine Warnungsmeldung. Falls es rot gefärbt wäre, wäre es eine Fehlermeldung.

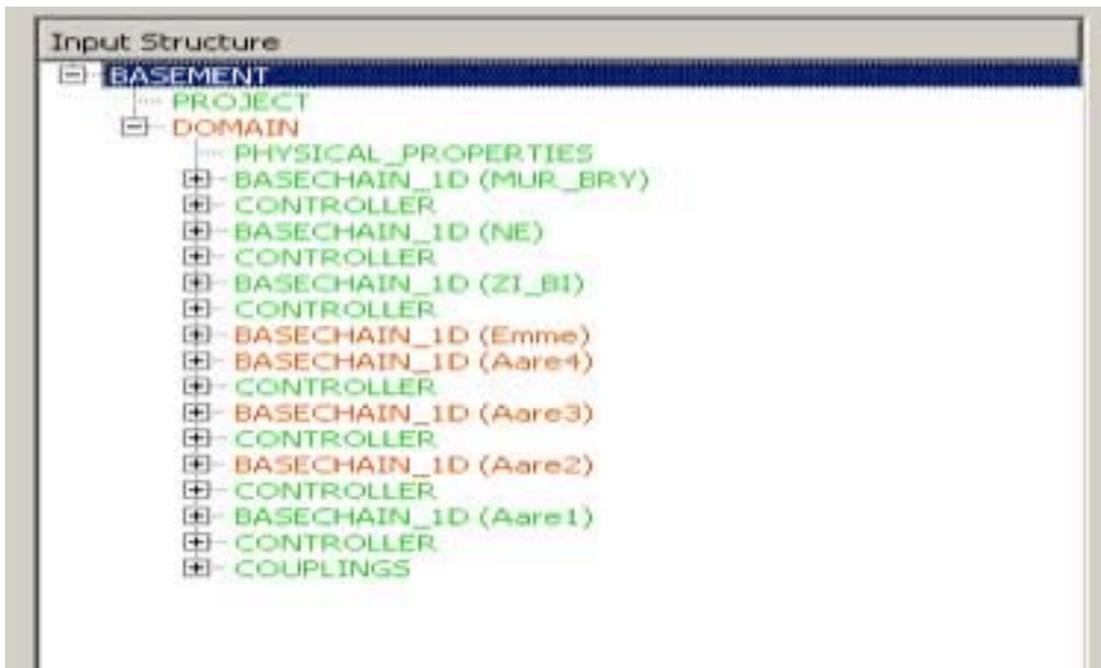


Abbildung 13: „Command-file“ von Testmodell

Abbildung 14 zeigt als Beispiel die Hauptgliederung des Sub-Domains Aare1. „GEOMETRY“ verlinkt sich auf das „Topography-file“ das im letzten Kapitel behandelt wurde. „HYDRAULICS“ werden alle hydraulischen Parameter, die Randbedingungen, die Anfangsbedingungen und die Quellterme behandelt. Unter „OUTPUT“ wird der Zeitintervall für die Ausgabedateien und die zusätzlichen Messpunkte definiert.

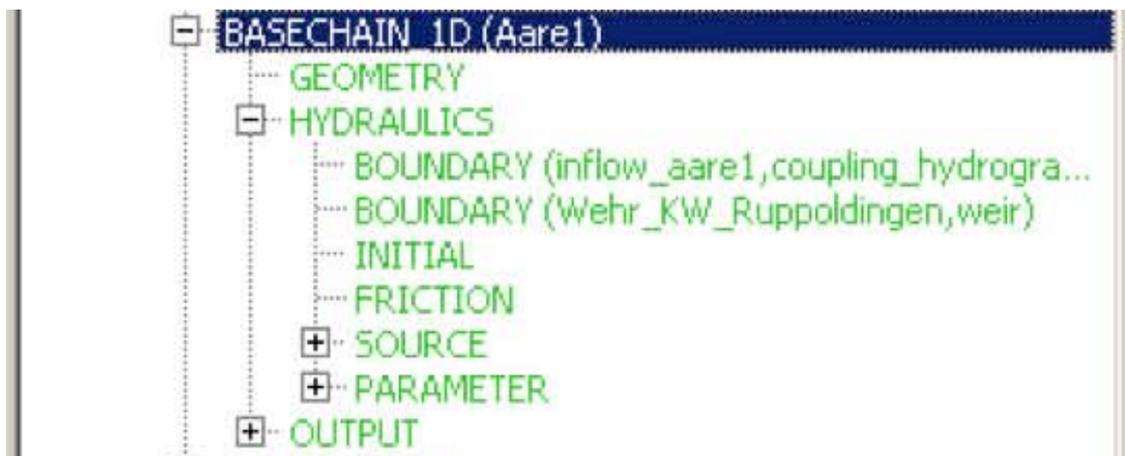


Abbildung 14: Sub-domain Aare1 und die drei Hauptgliederung

7 Simulationen/Szenarien

Im Folgenden werden die Simulationen und Szenarien aus dem BAFU-Pflichtenheft präsentiert.

7.1 Modell Kalibrierung

Das Modell wurde mit dem Datensatz des Hochwassers 2005 kalibriert. Das Vorgehen wird in fünf Schritten beschrieben und in den folgenden Teilkapiteln näher behandelt:

1. Kalibrierung des Reibungsbeiwertes
2. Anfangsbedingungen setzen
3. Nicht messbare Zuflüsse bestimmen
4. Simulationszeit analysieren
5. Resultate der Kalibrierung

7.1.1 Kalibrierung des Reibungsbeiwertes

Im Modell wurden die vom BAFU vorgeschlagenen Werte übernommen. Es wurde keine zusätzliche Kalibrierung der Reibungsbeiwerte durchgeführt. Dabei wurde auch kein Reibungsunterschied zwischen Hauptgerinne und Vorländer gemacht.

7.1.2 Optimale Anfangsbedingungen setzen

Optimale Anfangsbedingungen setzen bedeutet – bevor die Simulation startet – dass sich der Flussabschnitt in einem stationären Fließzustand befindet. Jedes Querprofil verfügt über den gleich grossen Abfluss.

Aus folgenden zwei Gründen ergeht, weshalb für die Durchführung einer Simulation die Anfangsbedingungen optimal eingestellt werden müssen. Der erste Grund ist, den geforderten Zeitschritt zu erhalten. Sind die Anfangsbedingungen nicht gut eingestellt, rechnet das Modell am Anfang mit kleineren Zeitschritten bis es sich bei einem gewünschten Zeitschritt eingependelt hat. Vor allem bei den Wehren ist es wichtig, den optimalen Startwert der Wehrhöhe einzustellen. Das sollte derselbe Wert sein, der sich während dem stationären Zustand eingestellt hat. Falls die Anfangsbedingungen nicht gut eingestellt worden sind, hat das eine grosse Auswirkung auf den Zeitschritt. Der zweite Grund ist, dass bei einer Simulation sy-

stematische Fehler auftreten können, wenn der stationäre Durchfluss der Anfangsbedingung nicht mit dem ersten Wert des gemessenen Durchflusses übereinstimmt. Falls dies der Fall ist, gibt es schon am Anfang der Simulation eine Differenz zwischen gemessenen und simulierten Werten.

Zusätzliche Herausforderung gab es bei der Seeanfangsbedingung. Bei den Anfangsbedingungen für die Seen muss nicht nur der Durchfluss sondern vor allem auch die Seespiegellage mit dem ersten Wert der gemessenen Seespiegelverläufe übereinstimmen. Stationärer Durchfluss und idealer Wasserspiegel sind nicht einfach in BASEMENT zu generieren. Wenn man von trockenen Querprofilen ausgeht, dauert es eine extrem lange, bis sie zum entsprechenden Wasserpegel aufgefüllt sind. Deshalb wurde in einem ersten Versuch mit dem Befehl „backwater“ der See anhand einer Staukurveniteration gefüllt. Das führte aber dazu, dass der Seespiegel anfangs zu schwanken und es eine Zeit dauerte bis er sich ausgependelt hat. Schlussendlich wurden gute Anfangsbedingungen mit Hilfe der geregelten Pumpen erzeugt. Die regelten den Durchfluss so, dass der vorgegebene Seespiegel eingehalten werden konnte.

Ein Tool um bei Seen schnell ideale Anfangsbedingungen zu erstellen, wäre in BASEMENT von Vorteil.

7.1.3 Nicht messbare Zuflüsse

Nicht messbare Zuflüsse sind die unbekanntes Zuflüsse des Flusseinzugsgebietes. Im Modell müssen sie berücksichtigt werden, da sich ansonsten Unstimmigkeiten in der Wasserbilanz ergeben. Die nicht messbaren Zuflüsse sind von grosser hydrologischer Bedeutung, um verstehen zu können, welchen Einfluss das Einzugsgebiet während eines Hochwassers hat.

Für das Hochwasser 2005 sind im Modell nur die nicht messbaren Zuflüsse vom Einzugsgebiet der Seen bestimmt worden. Die nicht messbaren Zuflüsse vom Zwischeneinzugsgebiet wurden vernachlässigt.

Folgendermassen wurde vorgegangen, um die nicht messbaren Zuflüsse bestimmen zu können. Beim Murtensee, Neuenburgersee und Bielersee wurde je ein Quellterm, kombiniert mit einem PID-Regler, implementiert. Der geregelte Quellterm wurde so eingestellt, dass er

eine fehlende Menge an Wasser in den See pumpt oder absaugt, damit der simulierte genau dem gemessenen Seepegel entspricht. Die Wassermenge, die vom geregelten Quellterm hinzugefügt wurde, bildet somit quasi den unbekanntem Zufluss.

Beim Hochwasser 2005 wurde dabei ein Fehler in den Daten vom Hydrographen Hagneckkanal festgestellt. In einer Simulation ohne Korrektur der nicht messbaren Zuflüsse, wurde, wie Abbildung 15 zeigt, eine auffällig grosse Differenz zwischen dem gemessenen und dem simulierten Seepegel nachgewiesen. Es wurde vermutet, dass der Zufluss vom Hagneckkanal in den Bielersee zu klein ist. Diese Vermutung wurde später vom BAFU bestätigt.

Folglich korrigierten die drei implementierten geregelten Quellterme bei der Kalibrierung den fehlenden Zufluss vom Hagneckkanal plus die nicht messbaren Zuflüsse. Aufgrund dieser Problematik konnten die nicht messbaren Zuflüsse vom Einzugsgebiet der Jurarandseen nicht klar quantifiziert werden.

Abbildung 16 zeigt nach der Implementierung der Korrektur der Seepegel den Zufluss des geregelten Quellterms vom Bielersee. Beim genaueren Betrachten der Ganglinie fällt auf, dass der Verlauf nach der Zuflussspitze in den negativen Bereich fällt. Dieser Verlauf ist für die Korrektur der unbekanntem Zuflüsse nicht repräsentativ. Theoretisch sollte nur der Zufluss in den See, jedoch nicht der Abfluss aus dem See korrigiert werden.

Da eine schnellere Lösung für die Seepegelkorrektur gefunden werden musste, damit wenigstens im Unterlauf der Aare im Modell keine systematischen Fehler auftreten würden, wurde ein Vorgehen gewählt, bei der die Quellen Wasser aus dem See saugen konnten. In einer zukünftigen Betrachtung der Seen bezüglich der Retentionsvolumen empfiehlt es sich, die Seepegel so zu korrigieren, dass der Quellterm nur Wasser in den See pumpen kann.

Die Abbildung 17 zeigt den Vergleich des korrigierten simulieren mit dem gemessenen Pegel vom Bielersee auf.

Im Anhang 0 sind weitere Graphen vom Murtensee und Neuenburgersee ersichtlich.

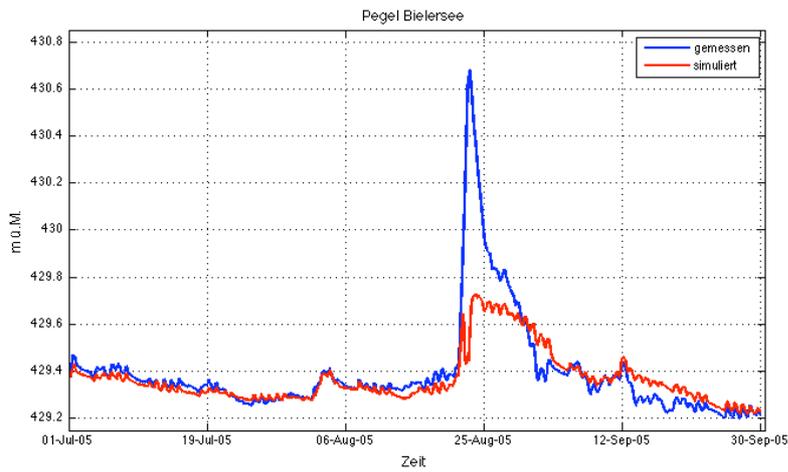


Abbildung 15: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels vom Bielersees ohne Korrektur

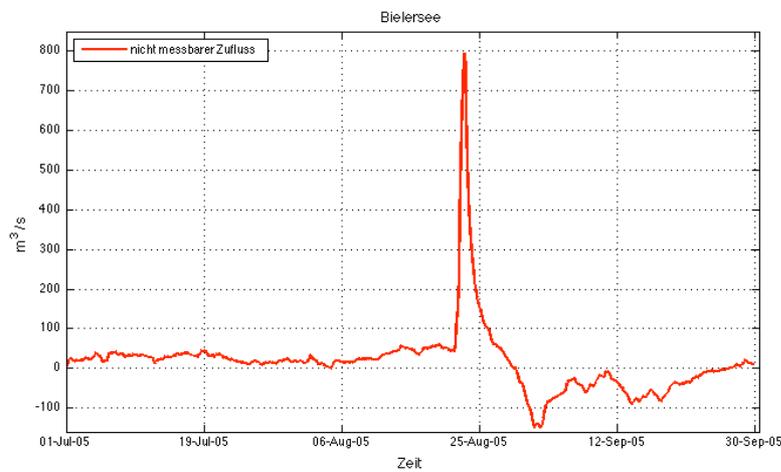


Abbildung 16: Zu- und Abfluss der geregelten Pumpe (Quellterm) des Bielersees

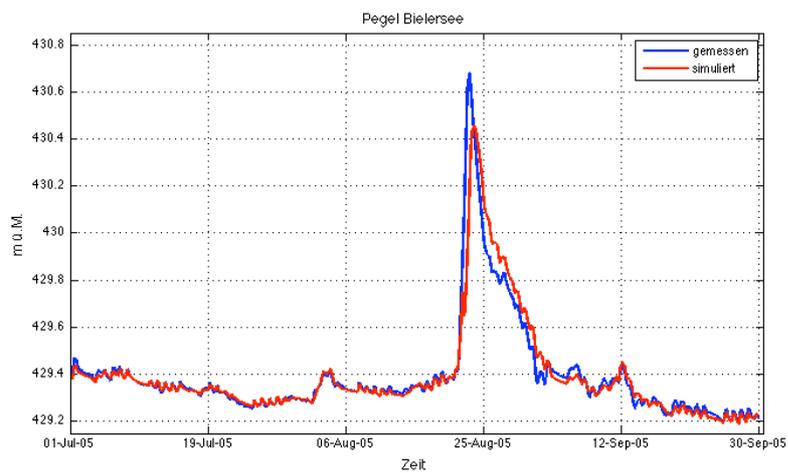


Abbildung 17: Vergleich des simulierten und gemessenen Pegels des Bielersees mit Korrektur

7.1.4 Simulationszeit

Die Echtzeit, respektive die Simulationsdauer des Hochwassers 2005, umfasst drei Monate. Sie beginnt am 1. Juli 2005 und endet am 30. September 2005. Die Simulationszeit ist die

Modellzeit, also die Zeit, welche die Software benötigt, um die Simulation ablaufen zu lassen.

Da im expliziten Modus gerechnet wird, hat der Zeitschritt einen grossen Einfluss auf die Simulationszeit. Der in der Simulation verwendete Zeitschritt beträgt durchschnittlich 10 Sekunden. Die Simulation wurde auf einem langsamen und einem schnellen Rechner durchgeführt. In der Tabelle 4 sind die Rechner und die entsprechenden Simulationszeiten für die drei Monate aufgelistet.

Tabelle 4: Vergleich der Simulationszeit mit schnellen und langsamen Rechnern

	Rechner	
	langsam	schnell
Rechenleistung	Pentium(R) CPU 4 3.20 GHz	Intel X _{16n} CPU 8x2.66 GHz
Paralleles Rechnen	nein	ja
Simulationszeit	1h30min50s	18min33s
RTS	1458	7147

Der langsame Rechner benötigt für die drei Monate eine Stunde und 30 Minuten. Das entspricht einem RTS 1458. RTS ist das Verhältnis von Echtzeit durch Modellzeit. Die Simulation verläuft also 1458 Mal schneller als in Echtzeit.

Der schnelle Rechner benötigt 18 Minuten und 33. Zusätzlich wurde mit dem schnellen Rechner parallel gerechnet. Alleine das parallele Rechnen verdoppelt die Rechengeschwindigkeit. Insgesamt rechnet der parallel rechnende, schnelle Rechner fünf mal schneller als der langsame Rechner, welcher nicht parallel rechnet.

Es kommt also sehr darauf an, mit welchem Computer die Simulation durchgeführt wird. Es muss aber betont werden, dass BASMENT schon mit einem langsamen Rechner hervorragende Simulationszeiten hervorbringt.

7.1.5 Kalibrierungsergebnisse

Um eine qualitative Aussage über die Kalibrierung machen zu können, sind im Modell genau an diesen Orten Kontrollpunkte implementiert worden, wo Messstellen mit komplett gemessenen Datenreihen vorhanden sind. Die Kontrollpunkte sind Messpunkte im Modell, die den gewünschten Parameter messen. Somit ist es möglich, visuelle Vergleiche zwischen simulierten und gemessenen Hydrographen zu machen. Es werden die Hydrographen der Messstellen Zihlkanal, Aare Brügg und Aare Murgenthal vorgestellt. Diese Messstellen sind für die besseren Orientierung der Lage in Abbildung 4 im Kapitel 5.1.3 als gelbe Punkte ersichtlich. Weitere Abbildungen mit Vergleichen sind im Anhang 10.1 zu sehen.

Abbildung 18 zeigt im oberen Graphen den Pegel und im unteren Graphen den Durchfluss des Zihlkanals. Beim unteren Graphen fließt das Wasser, wo die Kurve unterhalb von null geht, in die entgegengesetzte Richtung und zwar bis zu $400\text{m}^3/\text{s}$. Durch eine visuelle Beurteilung kann gesagt werden, dass im Gesamten die simulierten gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Es muss dabei beachtet werden, dass die Seepiegel mit geregelten Quelltermen korrigiert wurden.

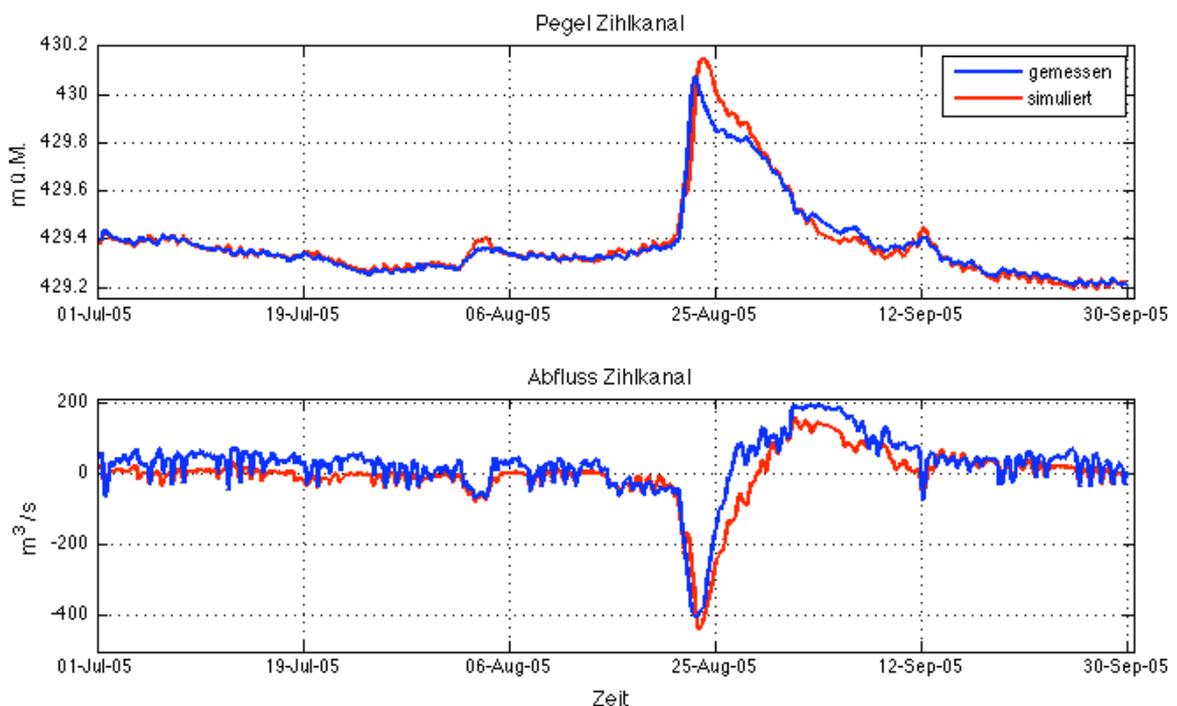


Abbildung 18: HW 05:(oben) Vergleich des simulierten und gemessenen Pegels des Zihlkanals; (unten) dasselbe mit Durchfluss

Abbildung 19 zeigt den Vergleich des simulierten und des gemessenen Hydrographen der Messstelle Aare bei Brügg. Die Messstation befindet sich gleich unterhalb vom Ausfluss des Bielersees. Bis anfangs August ist der Verlauf der gemessenen und simulierten Kurve identisch. Bei der Hochwasserspitze gehen sie auseinander und die simulierte Kurve verläuft mit einem scheinbar konstanten Abstand parallel zur gemessenen. Dasselbe ist bei der Messstelle an der Aare bei Murgenthal in Abbildung 20 festzustellen. Murgenthal ist die Messstelle, die sich ist beim Ausfluss des Modells befindet.

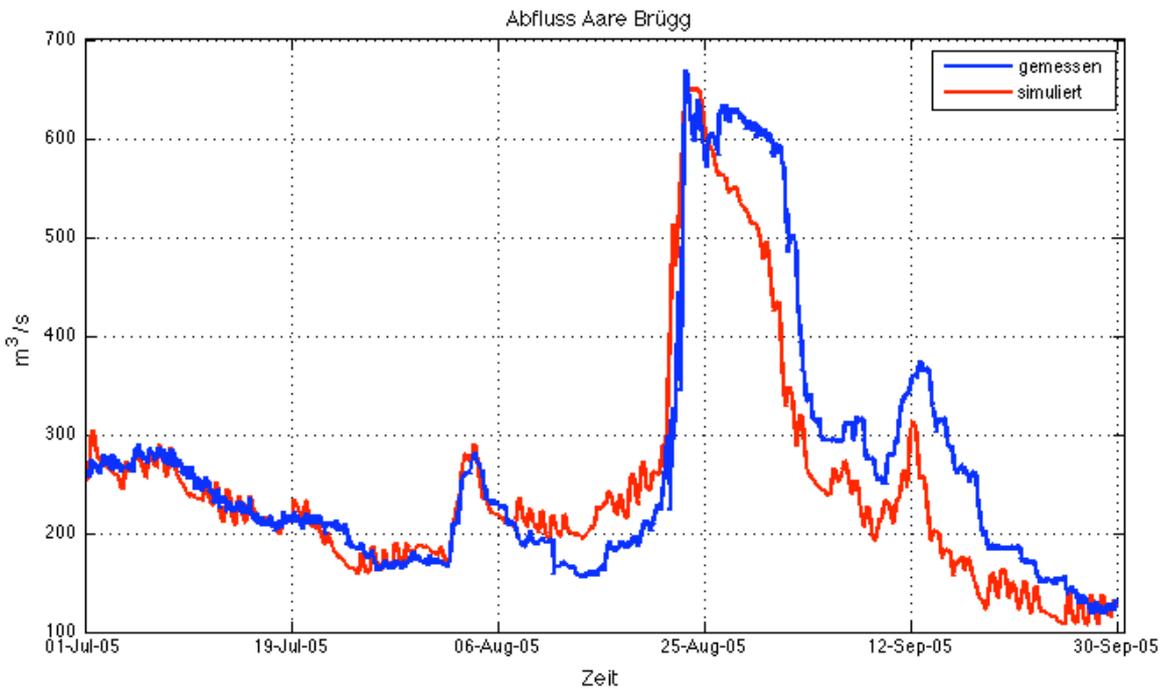


Abbildung 19: Vergleich des simulierten und des gemessenen Durchflusse bei der Messstelle Aare Brügg (HW 05)

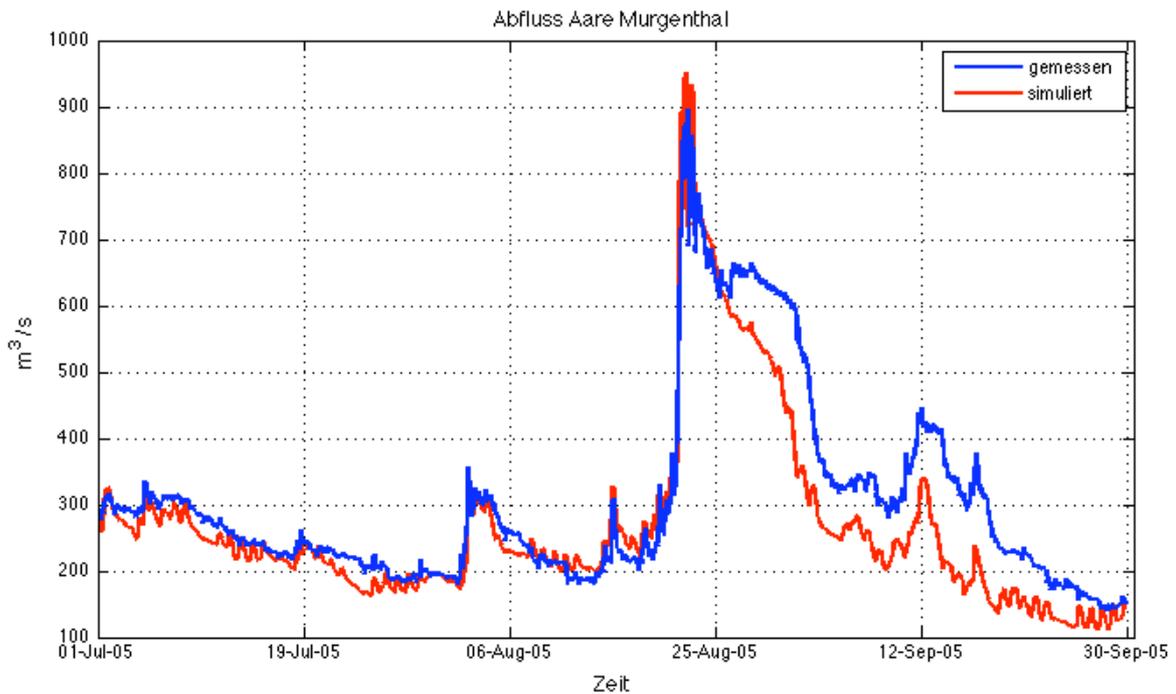


Abbildung 20: Vergleich des simulierten und des gemessenen Durchflusses bei der Messstelle Aare Murgenthal (HW 05)

Zwei Annahmen könnten diese Differenz im Abfluss erklären. Die erste Annahme erklärt die Differenz aufgrund der Abflussregulierung vom Wehr Port, das sich gleich beim Ausfluss des Bielersees befindet. Für diese Simulation wurde nur eine H-Q Beziehung verwendet. In Tat und Wahrheit werden in dieser Jahreszeit drei verschiedene H-Q Beziehungen verwendet.

Die zweite Annahme ist das Fehlen des nicht messbaren Zuflusses im Zwischeneinzugsgebiet. Dieser wurde in der Simulation nicht berücksichtigt. Genau bei Hochwasserspitzen, wo die Kurven divergieren, gewinnt der unbekannte Zufluss an Bedeutung.

Von diesen beiden Annahmen ist die letztere für den Autor die plausiblere, da die H-Q Beziehung sich in dieser Jahreszeit nur minimal unterscheiden lässt.

7.1.5.1 Konzessionspegel

Als zusätzliche Resultate der Kalibrierung mit dem Hochwasser 2005 wird der Vergleich der gemessenen mit den simulierten Wasserspiegeln bei den Konzessionspegeln gezeigt. Damit soll die qualitative Funktion der Flussregelung aufgezeigt werden.

An der Aare gibt es in jedem Stauraum der einzelnen Kraftwerke Konzessionspegel, die aufgrund der Reguliervorschriften eingehalten werden müssen. Das heisst die Regulierung der Flusskraftwerke muss so eingestellt werden, dass diese Pegel nie überschritten werden.

Abbildung 21 zeigt den Konzessionspegel vom Kraftwerk Flumenthal, der konstant bei 426 m.ü. Meer gehalten werden soll. Er befindet sich in Solothurn an der Rötibrücke 4.4 km flussaufwärts vom Kraftwerk. Wie Abbildung 21 zeigt, wird der Pegel in der Simulation vom Hochwasser 2005 eingehalten.

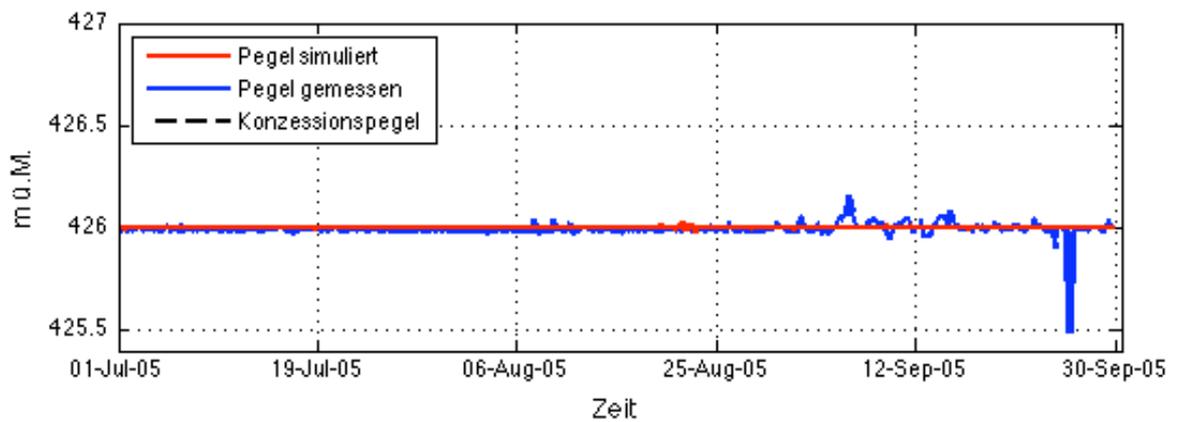


Abbildung 21: KW Flumenthal: Gemessener und simulierter Pegel im Vergleich mit dem Konzessionspegel bei der Rötibrücke in Solothurn

Abbildung 22 zeigt den Konzessionspegel vom Kraftwerk Bannwil, der bei 417.30 m ü. M. liegen muss, und bei Lastfällen kurzfristig bis zur Kote von 417.50 m ü. M. reichen darf. In den Grundlagendaten gab es keine gemessenen Werte des Wasserspiegels beim Konzessionspegel, deshalb wurde nur der Verlauf des simulierten Pegels aufgeführt. Wie Abbildung 22 zeigt, kann auch hier die Konzessionsbedingungen während dem Hochwasser 2005 eingehalten werden.

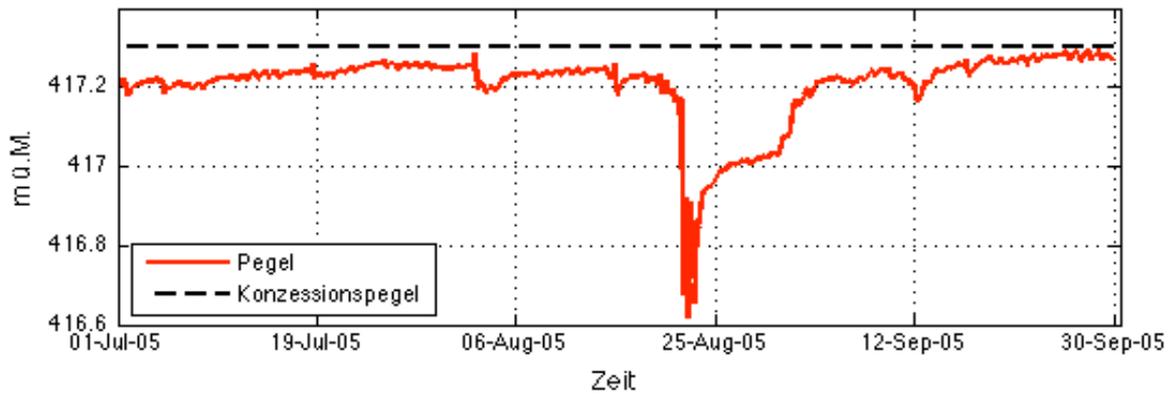


Abbildung 22: KW Bannwil: Simulierter Pegel (rot) im Vergleich mit dem Konzessionspegel bei der Holzbrücke Wangen an der Aare

Abbildung 23 zeigt den Stauwehrpegel vom Kraftwerk Wynau, der bei 408.08 m ü. M. liegen soll. Der Pegel kann hier sogar besser als der gemessene Pegel eingehalten werden.

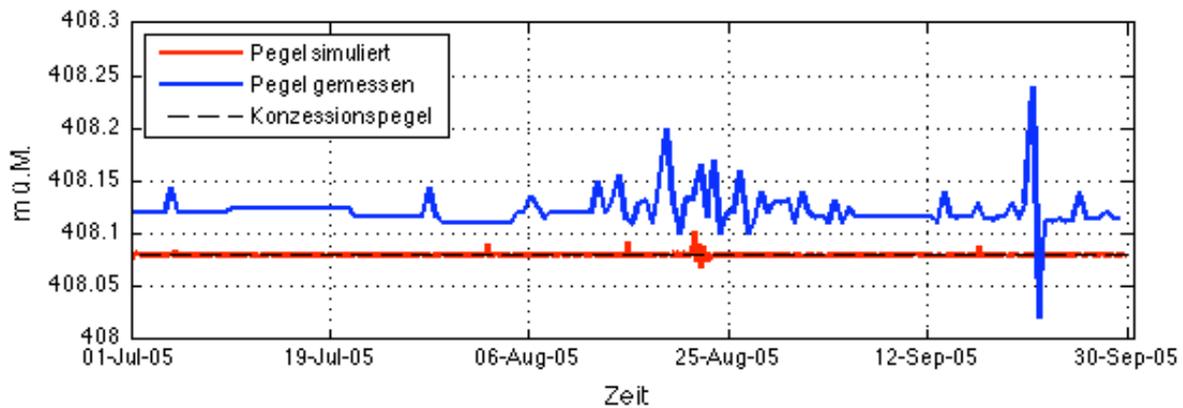


Abbildung 23: KW Wynau: Gemessener und simulierter Pegel im Vergleich mit dem Konzessionspegel

Abbildung 24 zeigt den Stauwehrpegel (Konzessionspegel) vom Kraftwerke Ruppoldingen, der bei einer maximalen Kote von 398.4 m ü. M. gehalten werden soll. Der Vergleich des gemessenen und des simulierten Wasserspiegelverlaufs ist ähnlich und zeigt, dass der Konzessionspegel eingehalten werden kann. Nur kurz überschreitet der simulierte Wasserpegel den Konzessionspegel. Das könnte aber durch eine verfeinerte Einstellung der Regulierungsparameter vermieden werden.

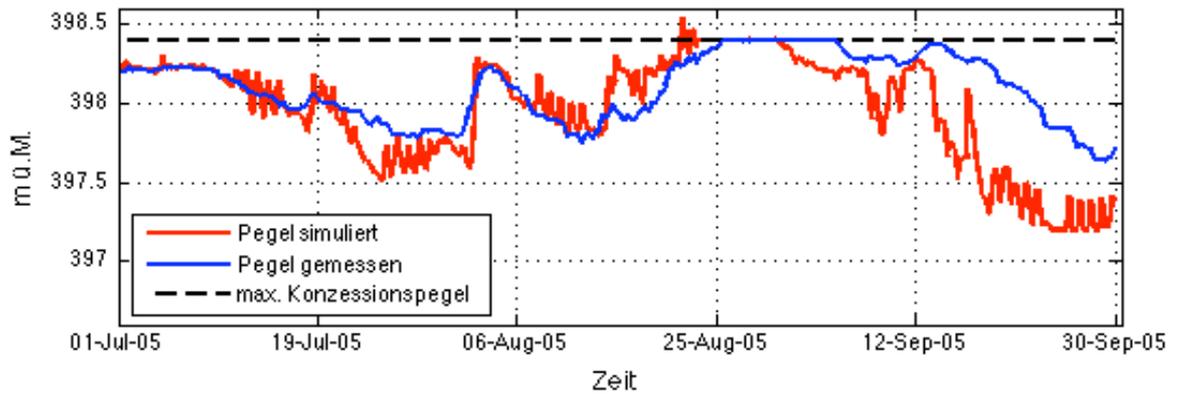


Abbildung 24: KW Ruppoldingen gemessener und simulierter Pegel im Vergleich mit dem Konzessionspegel

7.2 Validierung

Das Modell wurde mit dem Hochwasser 2007 validiert. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

1. Die Zuflusshydrographen vom HW 2007 wurden für die Station Aare Hagneck, Emme Emmenmatt sowie die Seepiegel aus Excel in Textdateien exportiert.
2. Die Zuflussdateien mussten in der Simulationsdatei respektive dem „Command-File“ unter „Boundary“ verlinkt werden. Ebenfalls mussten die Seespiegelhydrographen vom HW 2007 bei den Seequellterme verlinkt werden.
3. Der Zufluss des Zwischeneinzugs als Quelle bei der Murg musste definiert werden.
4. Anfangsbedingung der Aare, Emme und der Seen mussten aufbereitet werden, danach war die Simulation zu starten.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Hydrographen derselben Messstationen wie bei der Kalibrierung.

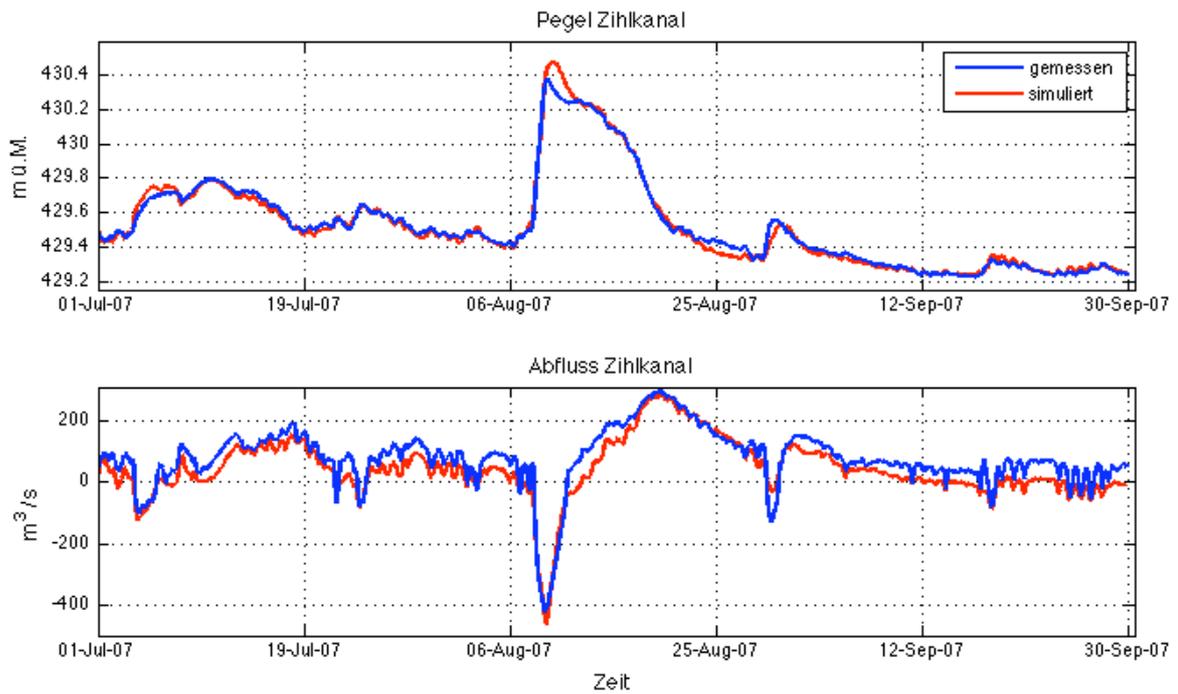


Abbildung 25: (oben) Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Zihlkanals; (unten) dasselbe mit Durchfluss

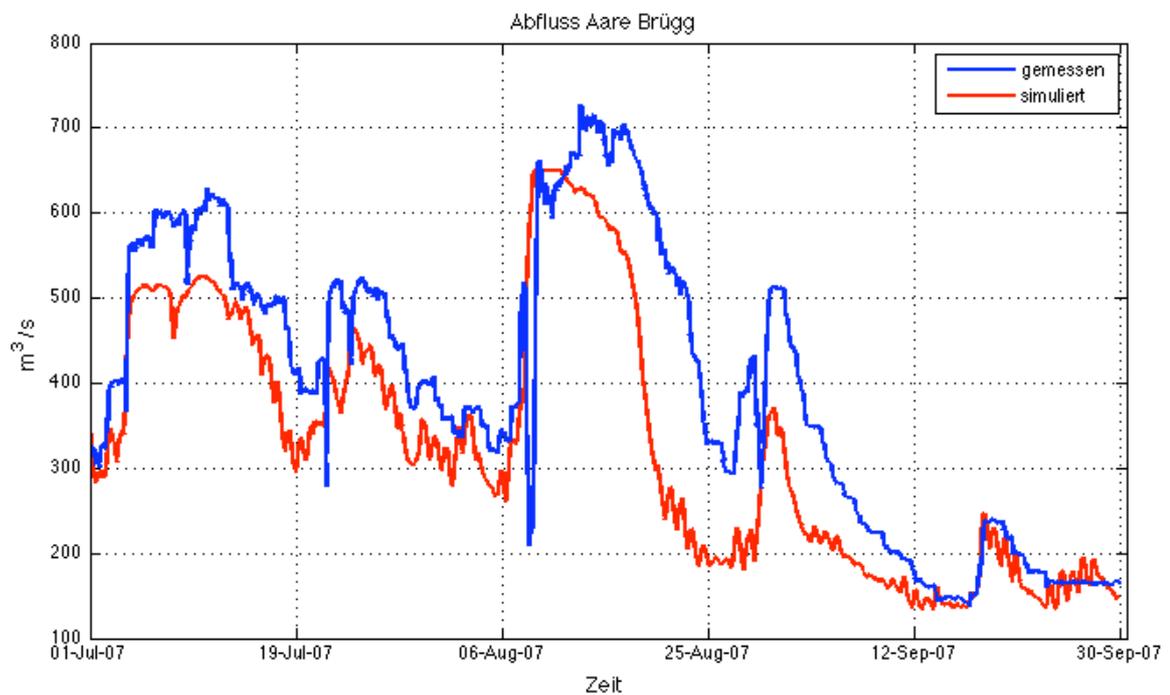


Abbildung 26: Vergleich des simulierten und gemessenen Durchflusses bei der Messstelle Aare Brügg (HW 07)

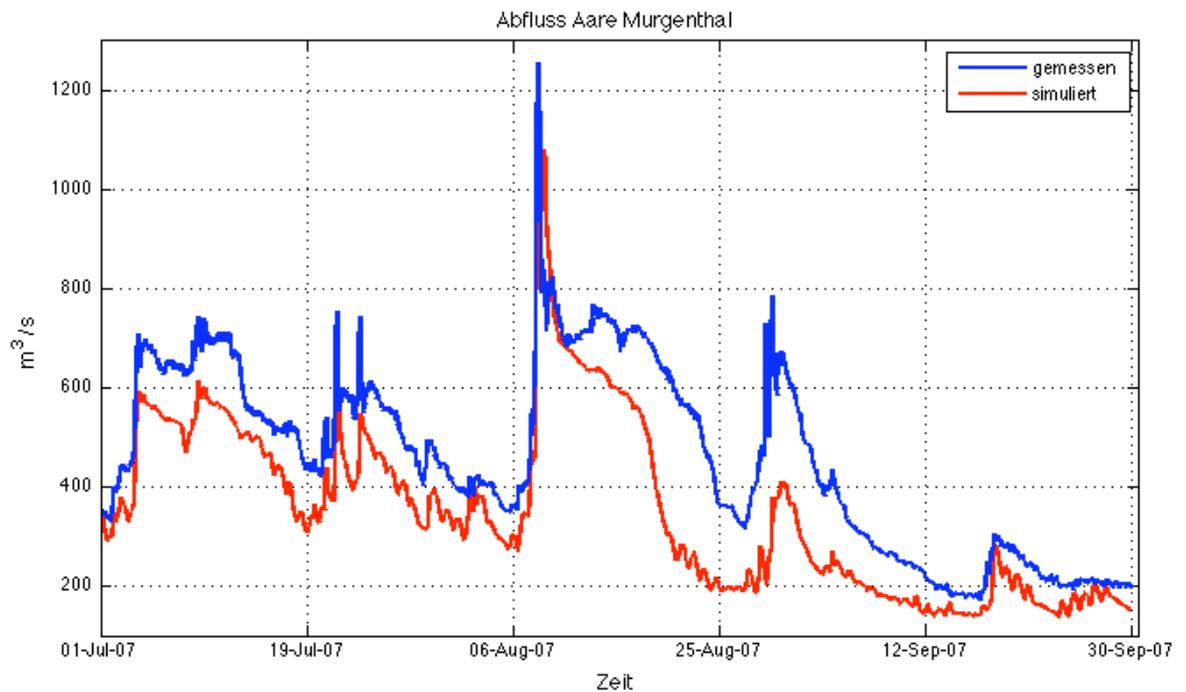


Abbildung 27: Vergleich des simulierten und des gemessenen Durchflusses bei der Messstelle Aare Murgenthal (HW 07)

Bei Abbildung 26 und Abbildung 27 fällt auf, dass die simulierten Kurven den ähnlichen Verlauf wie die gemessenen haben, aber systematisch immer kleiner als die gemessenen Werte sind. Das Modell besitzt im Vergleich zur Realität zu wenig Wasser, obwohl dieses Mal das Zwischeneinzugsgebiet berücksichtigt wurde.

7.3 Stationäre Berechnungen für verschiedene Abflüsse

Für die vorgegebenen Flussabschnitte müssen quasistationäre Simulationen durchgeführt werden. Dazu sollte der berechnete Abfluss, der Wasserspiegel und die Energielinie dargestellt werden. Als weiteres wird an einem Beispiel des Sub-domains Emme gezeigt, wie die Daten ins EXCEL exportiert werden und wie die unterschiedlichen Randbedingungen und Resultate verwaltet werden.

7.3.1 Emme

Hier wird der Flussabschnitt der Emme betrachtet. Bevor eine Simulation durchgeführt werden kann, muss BASEMENT gestartet und der betrachtete modellierte Flussabschnitt geöffnet werden.

Um die stationäre Simulation durchführen zu können muss einzig die obere Randbedingung angepasst werden. Die Eingabedaten für Randbedingung müssen dazu zuerst aufgearbeitet

werden. Das heisst, der Hydrograph, hier konstante $700\text{m}^3/\text{s}$ über 86400s (=1Tag), muss zuerst in einer Textdatei abgespeichert werden, wie Abbildung 28 zeigt. Im BASEMENT GUI muss nur noch bei den Randbedingungen (Boundary) der Name der neuen Textdatei, also Q700in.txt, eingetragen werden.

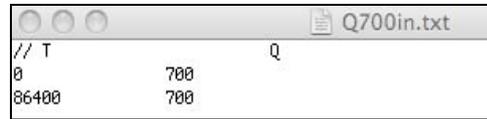


Abbildung 28: Textfeil als Eingabedatei für die obere Randbedingung

section distance	zbed	leftdam	rightdam	bottomlev.	z	eline	A	Q	QNum	u	Fr	
CS40582	7	642.565	646.18	646.78	642.5785	645.8673	646.9188	154.109	700	781.063	4.54223	0.966
CS40354	235	638.399	641.4	644.12	638.97659	641.9372	643.8815	114.915	709.758	693.562	6.17637	1.29
CS39800	739	633.489	639.08	639.85	634.24685	637.2857	638.9637	119.877	687.834	696.407	5.73785	1.14
CS39814	775	634.275	640.35	639.83	634.2875	637.1412	639.3796	105.774	700.966	700.33	6.62702	1.36
CS39600	989	630.694	637.76	638.1	630.8421	634.106	635.7963	121.662	700.623	700.413	5.75878	1.08
CS39102	1487	628.653	634.92	633.96	628.83717	632.9621	634.0452	151.883	700.154	699.971	4.60982	0.786
CS38857	1732	627.809	633.15	635.08	628.07564	631.8813	632.9164	155.323	699.945	699.968	4.50639	0.796
CS38809	1780	628.089	632.91	632.98	628.14841	631.0801	633.102	111.142	700.004	700.002	6.29829	1.33
CS38604	1985	624.387	631.73	630.34	624.4689	627.455	629.612	107.602	700.006	700.004	6.50552	1.27
CS38352	2237	623.138	629.71	630.21	623.50258	627.3311	628.4417	149.96	700.001	701.014	4.66791	0.81
CS38098	2491	622.238	628.01	627.66	622.5168	626.3646	627.4003	155.29	700	690.804	4.50771	0.802
CS37847	2742	621.924	626.64	626.1	621.947	625.1229	626.5573	131.952	700	700	5.30495	1.08
CS37644	2945	619.083	627.4	627.35	619.34976	622.3838	624.1554	118.731	700	714.346	5.89568	1.16
CS37596	2993	618.981	623.13	625.02	619.17548	623.2466	624.2125	160.795	700	690.434	4.35337	0.737
CS37346	3243	617.83	622.93	623.96	617.94844	622.1323	623.2048	152.596	700	698.571	4.58726	0.862
CS37098	3491	616.653	621.64	620.63	616.79987	620.9306	622.0617	148.59	700	700	4.71096	1.01
CS36920	3669	616.857	620.79	619.96	616.86678	619.6833	620.864	145.436	700	700	4.81311	1.21
CS36845	3744	615.372	620.32	619.29	615.53541	618.9303	619.911	159.578	700	700	4.38658	1.01
CS36621	3968	615.009	618.56	618.23	615.09816	618.2855	619.2355	162.144	700	700	4.31716	0.999
CS36598	3991	613.986	618.42	618.05	614.03959	617.2234	618.5722	136.075	700	700	5.14421	1.19
CS36345	4244	610.518	616.44	616.49	611.00632	614.8268	616.4935	122.41	700	700	5.71851	1.07
CS36192	4397	610.709	616.26	616.27	610.90662	613.7481	615.7234	112.443	700	700	6.22539	1.24
CS36093	4496	608.358	614.75	614.98	608.94828	612.5884	613.9625	134.818	700	710.633	5.19219	0.941
CS35849	4740	608.038	615.89	613.4	608.27047	612.851	613.5993	182.697	700	700	3.83149	0.771
CS35820	4769	608.604	614.29	613.08	608.604	611.5455	613.5435	111.802	700	700	6.26109	1.29
CS35697	4892	606.235	613.71	612.29	606.50005	609.4364	611.624	106.848	700	707.844	6.55136	1.28
CS35599	4990	605.994	612.79	611.73	606.13576	610.3998	611.2342	173.008	700	676.062	4.04606	0.705
CS35542	5047	605.673	611.28	611.25	605.8719	610.0748	611.116	154.87	700	692.709	4.51992	0.77
CS35473	5116	605.23	610.84	610.76	605.49943	609.5685	610.6945	148.933	700	700.22	4.70009	0.821
CS35414	5175	605.27	610.41	610.4	605.35126	609.4259	610.4996	152.511	700	697.297	4.58984	0.866

Abbildung 29: Ausgabedatei

Nach der Simulation generiert die Software ein Ausgabedatei in Textformat, wie Abbildung 29 zeigt, bei dem alle Resultate wie Wasserspiegellage, Energiehöhe und Abfluss zusammengetragen sind. Dieses Ausgabedatei ist im „.txt“ Format und kann standartgemäss ins EXCEL oder Matlab importiert werden. Die folgenden Graphen wurden mit Matlab ausgeführt.

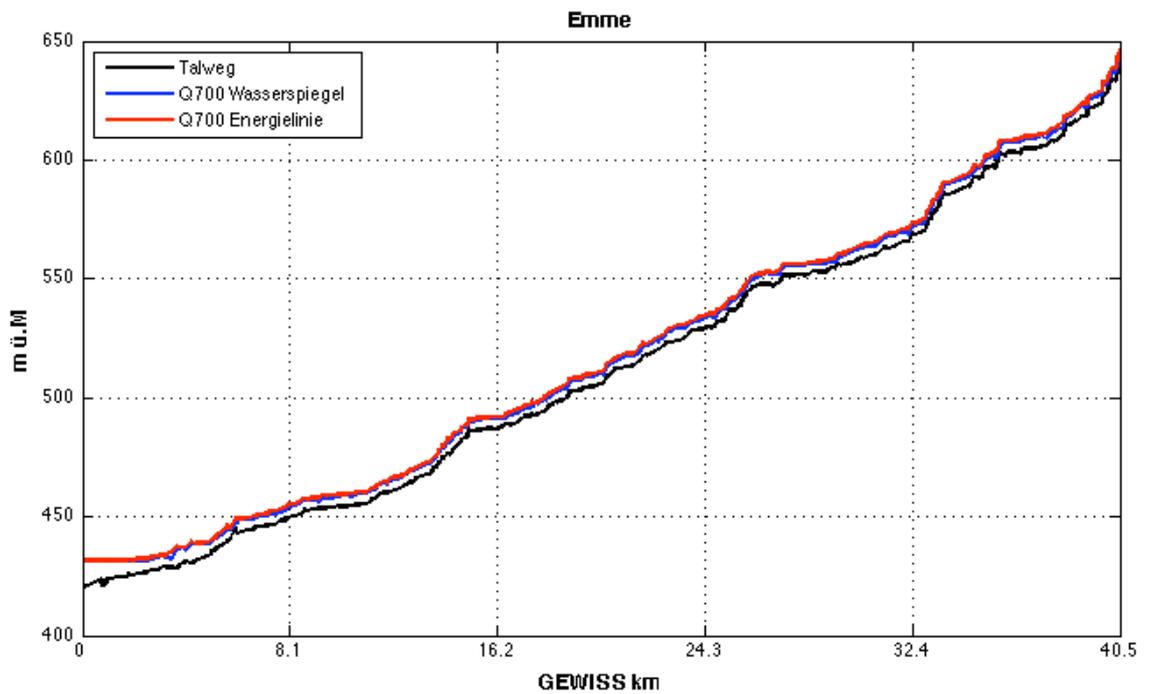


Abbildung 30: Längenprofil der Emme; die Energielinie ist rot; der Wasserspiegel ist blau; der Talweg ist schwarz

In Abbildung 30 ist das Längenprofil der ganzen Emme ersichtlich, mit einem stationären Durchfluss von $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei Kilometer 0 mündet die Emme in die Aare, bei Kilometer 40.5 befindet sich die Messstation Emme Emmenmatt. Da dieser Plot den Verlauf der Energielinie und Wasserlinie nicht gut zeigt, ist ein Teil des Flusses in Abbildung 31 vergrößert worden.

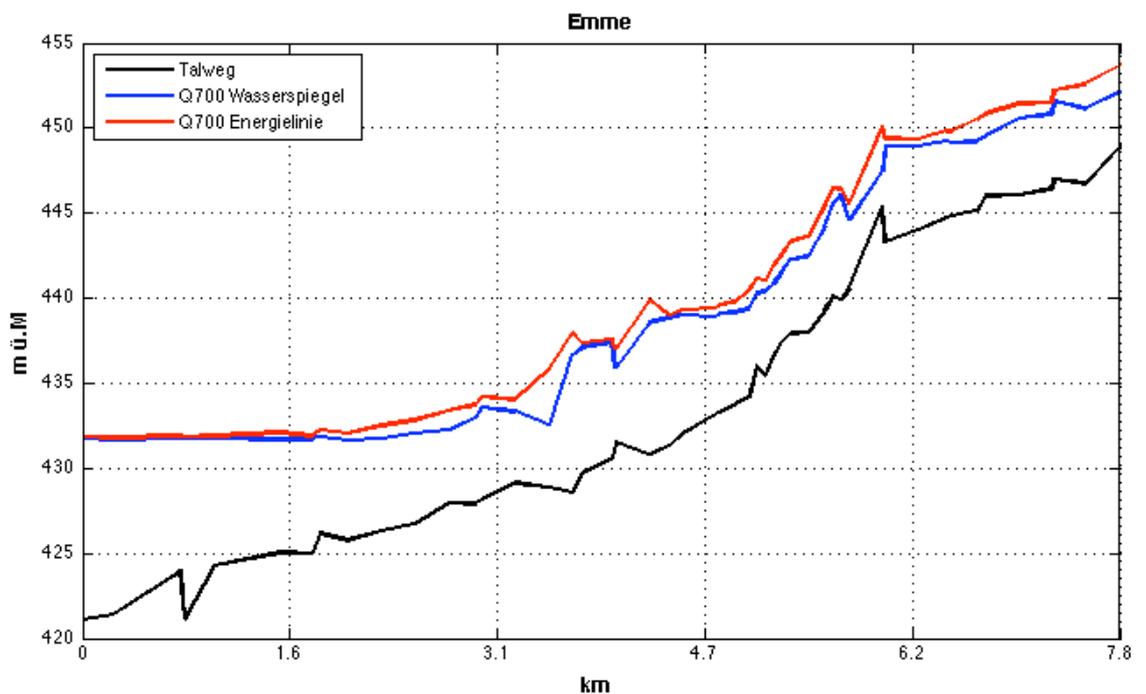


Abbildung 31: Emme vom GWISS Kilometer 0 bis 7.8

Abbildung 31 zeigt den unteren Flussabschnitt der Emme zwischen Mündung und GEWISS Kilometer 7.8. Die Energielinie rot in Abbildung 31 eingezeichnet und steigt an gewissen Stellen an, was nicht passieren darf. Aufgrund des Verlaufes des Talweges und des Wasserspiegel wird angenommen, dass an diesen Stellen, wo die Energielinie steigt, ein unvollkommener Überfall vorkommt, mit dem das Programm Mühe hat. Es könnte dem entgegengewirkt werden, indem an diesen Stellen ein Wehr mit vollkommenen Überfall implementiert werden würde. Es muss noch erwähnt werden, dass die vom BAFU vorgeschlagenen Schwellen in der Emme nicht implementiert wurden.

Weitere Plots von der Emme sind im Anhang 10.4 ersichtlich.

7.3.2 Aare

Die Aare besteht im Modell aus vier Sub-Domains, die gekoppelt sind. Das heisst nach einer Simulation gibt es vier Ausgabedateien, nämlich von jedem Sub-Domain eine. Das ist auch der einzige Unterschied zwischen Aare und Emme, der berücksichtigt werden muss.

Abbildung 32 zeigt das Längenprofil der Aare vom Bielerseeausfluss bis zum Kraftwerk Ruppoldingen. Es wurde ein stationärer Durchfluss von $900\text{m}^3/\text{s}$ gewählt und die Emme wurde weggelassen.

Wenn man einen Graphen wie in Abbildung 32 erhalten möchte, müssen alle Ausgabedateien der Aare in einer EXCEL-Mappe gespeichert werden.

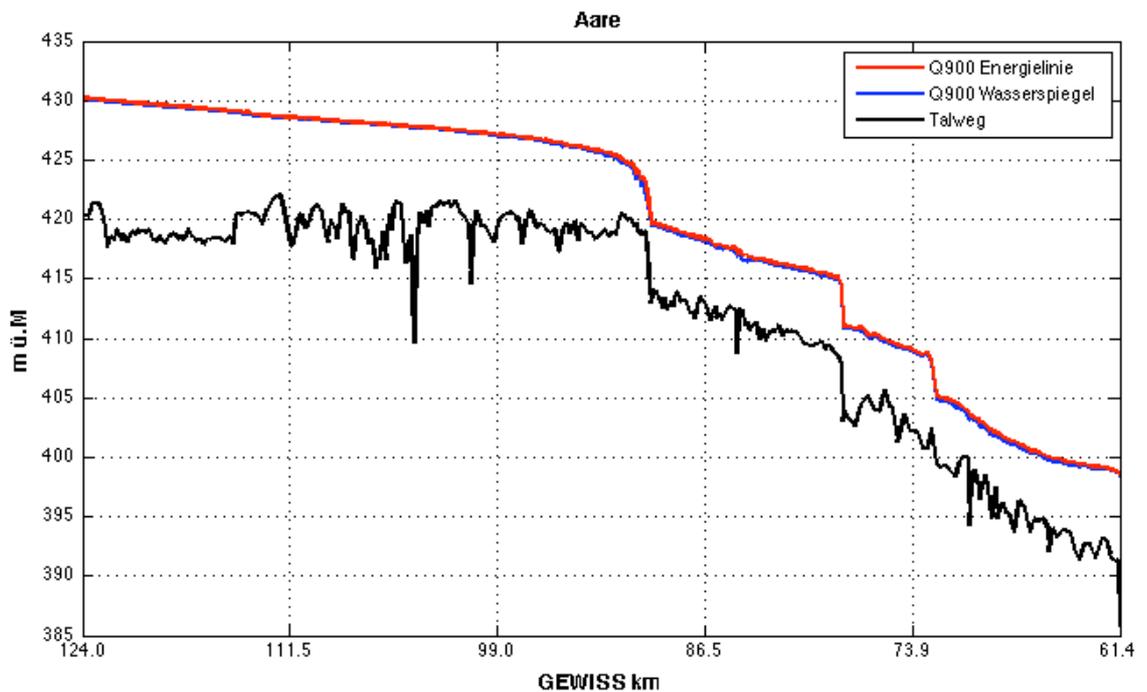


Abbildung 32: Längsprofil der Aare

7.4 Wehr Port

Gemäss dem BAFU-Pflichtenheft ist der Ausfluss vom Bielersee mit komplett geöffneten Schütz des Wehrs Port (Szenario n) simuliert worden. Das Wehr besteht aus fünf Schützen (n=5). In einer zweiten Simulation ist dasselbe mit einem geschlossenen Schütz (Szenario n-1) durchgeführt worden. Für beide Szenarien wurde eine P-Q Beziehung erstellt und in Abbildung 33 verglichen. Die grüne Kurve aus Szenario n-1i ist quasi parallel zur schwarzen Kurve mit Szenario n nach oben verschoben. Da beim Szenario n-1 die Durchflussbreite um einen Fünftel kürzer ist als beim Szenario n, ergibt sich bei gleichem Abfluss ein höherer Wasserspiegel.

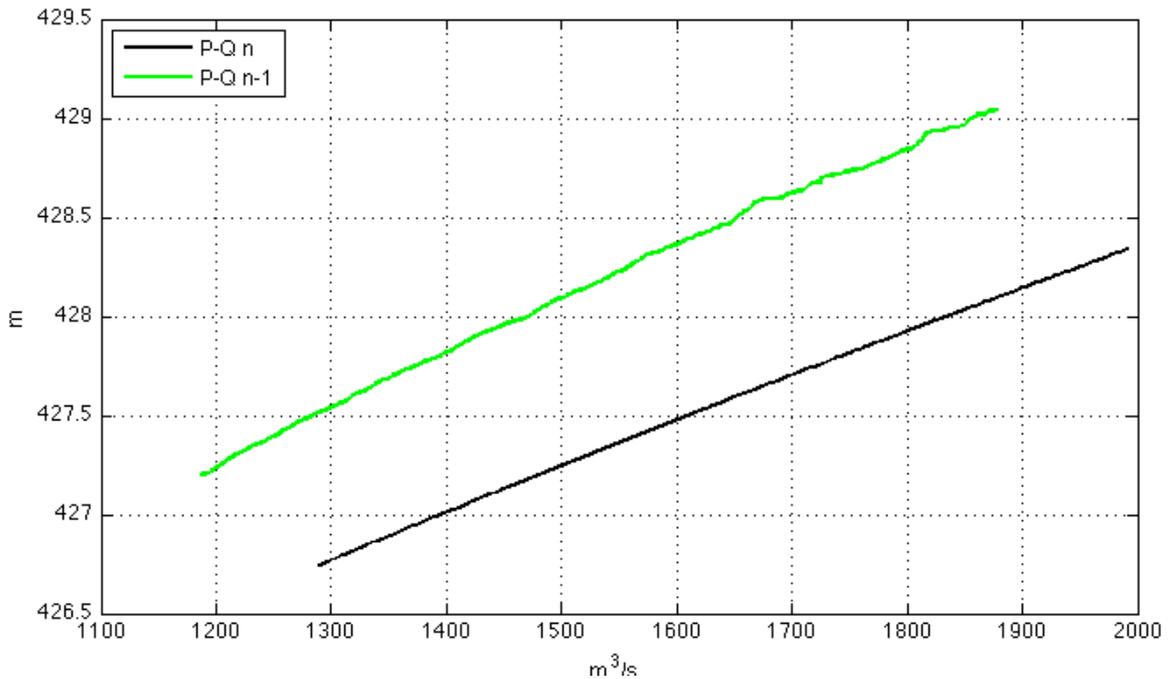


Abbildung 33: Wehr Port mit Szenario n (schwarz) und Szenario n-1 (grün)

7.5 Kraftwerk Flumenthal

Beim Kraftwerk Flumenthal wurde einerseits eine Simulation mit komplett geöffneten Schütz (Szenario n) und eine mit einem geschlossenen Schütz (Szenario n-1) durchgeführt und andererseits wurde geprüft, bei welchem maximalen Abfluss der Konzessionspegel noch eingehalten werden kann.

Das Wehr Flumenthal hat drei Schütze ($n=3$). Für die zwei Szenarios n und n-1 wurden wiederum Q-P Beziehungen erstellt und in Abbildung 34 verglichen. Dabei ist das selbe Phänomen, wie beim Wehr Port, zu sehen. Die Kurve aus Szenario n-1 ist parallel zur Kurve aus Szenario n nach oben verschoben.

Der Zielpegel der Rötibrücke von 426 m ü. M. kann bei offenem Schütz (Szenario n) bei einem Durchfluss von 800 m^3/s immer noch eingehalten werden.

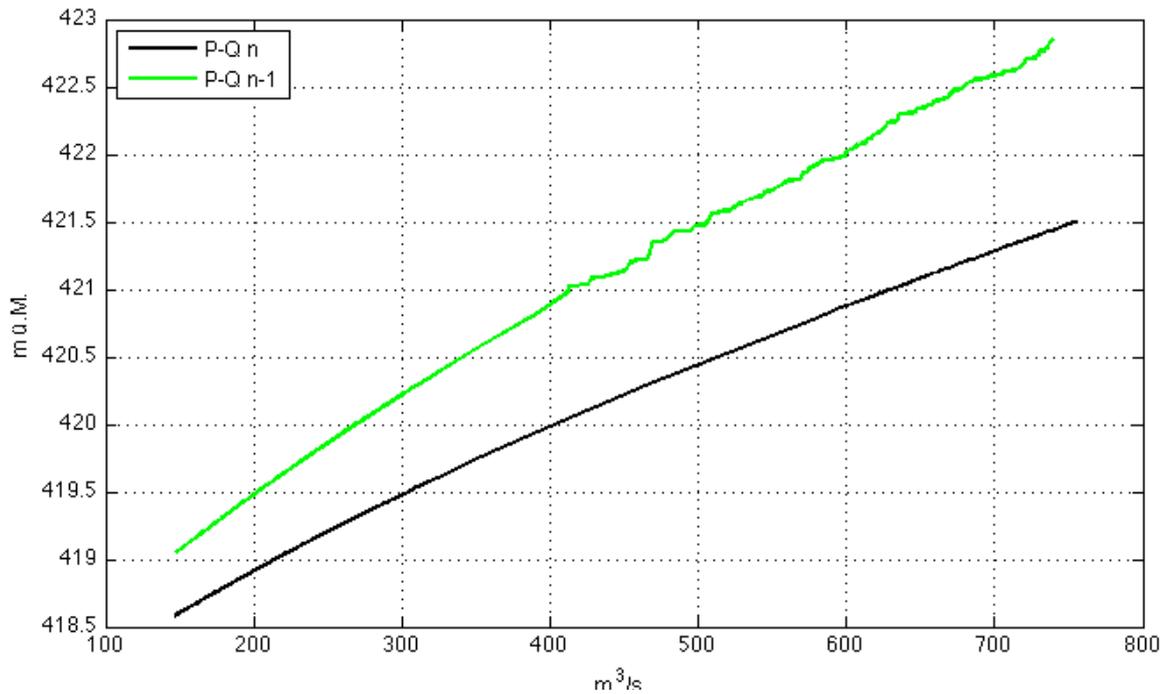


Abbildung 34: Wehr Flumenthal mit Szenario n (schwarz) und Szenario n-1 (grün)

7.6 Brücken

In BASEchain gibt es noch keine hydraulischen Strukturen wie Brückenpfeiler. Auch kann kein Abfluss unter Druck der berechnet werden.

7.7 Messstation Murgenthal

Abbildung 35 zeigt den Vergleich der gemessen und simulierten P-Q Beziehung bei der Messstation Murgenthal an der Aare auf. Die Messstation befindet sich im Stauraum vom Kraftwerk Ruppoldingen. Anhand Abbildung 35 kann gezeigt werden, dass die Regulierung beim Kraftwerk Ruppoldingen, genau dort wo die rote Kurve einen knick macht, ab einem Durchfluss von $750m^3/s$ einen Einfluss auf die Messstation hat.

In BASEview wurden je ein Querprofil vom linken Strom und rechten Strom zu einem neuen zusammengesetzt. Abbildung 37 zeigt zwei zusammengesetzte Querprofile. Der rechte Flussarm wurde als Hauptgerinne angenommen der linke als Nebengerinne. In Abbildung 37 ist diese Unterscheidung als blaue Linie mit dem Befehl „Main Channel Range“ eingezeichnet.

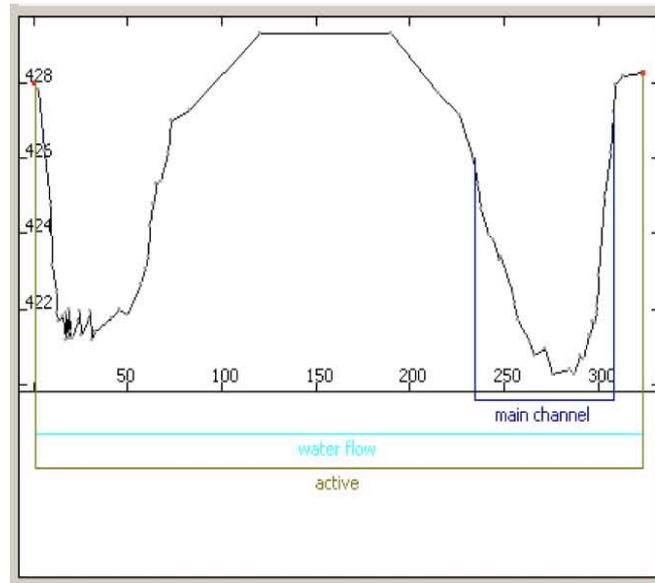


Abbildung 37: Zusammengesetzte Querprofile der Insel mit Hauptgerinne(rechts) und Nebengerinne (links)

8 Diskussion

Das Hauptziel dieser Arbeit – im Sinne einer Softwareevaluation – war, das Testmodell gemäss BAFU-Pflichtenheft mit der Software BASEMENT erstellen zu können. Darum werden in der Diskussion nicht die konkreten Resultate der Szenarien und Simulationen diskutiert, sondern die Probleme und Lösungen, die sich während dem Modellieren ergaben. Des Weiteren werden noch ein Vorschläge angebracht für die mögliche Verbesserung der Software BASEMENT.

Grundsätzlich konnte mit dieser Arbeit gezeigt werden, dass mit der Software BASEMENT zum ersten Mal ein eindimensionales Modell mit diesem grossen Umfang kombiniert mit speziellen, nicht standardmässigen Strukturelementen modelliert werden konnte. Zusätzlich zeigen die Kalibrierung und die Validierung, dass die generierten Resultate plausibel sind.

Es muss klar erwähnt werden, dass BASEMENT an den grossen Anforderungen des Testgebietes gewachsen ist und sich dabei entwickelt hat.

So wurde für den Fließrichtungswechsel in den Verbindungskanälen, der während eines Hochwassers auftreten kann, eine spezifische Kopplung programmiert, mit der sich das Problem lösen lässt. Eine weitere Neuentwicklung ist der Quellterm, der mit einem PID-Regler kombiniert ist. Dieses Element wurde entwickelt, um die Unstimmigkeiten der Wasserbilanz in den Seen korrigieren zu können.

Im Laufe der Modellierung kam es vor, dass erwartete Probleme nicht und unerwartete eintrafen. Ein erwartetes Problem, das nicht eintrat, waren Stabilitätsprobleme bei der Emme aufgrund der dort herrschenden diskontinuierlichen Fließzustände. Das zeugt auch davon, dass BASEMENT über gute Lösungsalgorithmen verfügt. Mit der Software konnte ohne Probleme mit einer CFL-Zahl von 0.9 Simulationen am Flussabschnitt der Emme durchgeführt.

Ein unerwartetes Stabilitätsproblem trat beim Neuenburgersee auf, der ein Sub-Domain bildet. Der Grund war, dass beim Seeausfluss der Grössenunterschied vom zweitletzten zu

letzten Profil zu gross war. Zusätzlich besitzt der Sub-Domain zwei untere Randbedingungen mit der neuen „Connection“ Kopplung. Durch Interpolationen von Querprofilen konnte dem entgegengewirkt werden.

Ein weiteres Problem, das bei den Seen auftrat, ergab sich bei der Generierung der Seeanfangsbedingungen. Um die Anfangsbedingungen bei Seen bestimmen zu können wurde die, Staukurveniteration verwendet, die bei Flüssen gut funktioniert, bei grossen Querprofilen wie bei Seen optimiert aber werden musste. Zusätzlich fing der Seespiegel, sobald die gewünschte Kote erreicht war, zu schwanken an. Gute Anfangsbedingungen der Seen konnten mit Hilfe der geregelten Quellterme erreicht werden, indem der Regler so eingestellt wird, dass das Stauziel dem gewünschten Seespiegelkote entspricht. Schlussendlich wäre es aber von grossem Vorteil, wenn BASEMENT eine Funktion besitzen würde, welche die Anfangsbedingungen für Seen schnell erzeugen könnte.

Nach dem nun schon ein Verbesserungsvorschlag für die Software BASEMENT angebracht wurde folgen noch zwei weitere. Der nächste Verbesserungsvorschlag betrifft die Querprofilbearbeitung bezüglich Conveyance. Die einzelnen Querprofile müssen, aufgrund der numerischen Probleme, die mit der Conveyance auftreten können, in unterschiedliche Fliesszonen aufgeteilt werden. Es wäre sehr nützlich, wenn dieses Problem mit einer Funktion automatisiert werden könnte. Die Erfahrung, die in dieser Arbeit gesammelt wurde zeigt, dass die Fliesszone von diesen über 800 verwendeten Querprofilen bei ca. 600 betreffend der Conveyance manuell korrigiert werden mussten. Um zukünftig solche umfangreiche Querprofildateien schneller aufbereiten zu können, wäre ein entsprechendes Tool sehr nützlich.

Der letzte Vorschlag ist eher ein Wunsch. Es wäre sehr attraktiv wenn in BASEMENT 1D Animationen abgespielt werden können, die zum Beispiel den Wasserspiegelverlauf animieren.

Zum Schluss kann gesagt werden, dass mit BASEMENT die aufgetretenen Probleme während dem Modellieren gemeistert werden konnten. Somit ist BASEMENT eine taugliche Software für 1D Modellierungen und für Projekte mit der dieser Arbeit ähnlicher Aufgabenstellung zu empfehlen.

9 Quellennachweis

Manual der Software BASEMENT, zu finden unter <http://www.basement.ethz.ch/docs>

Reference der Software BASEMENT, zu finden unter <http://www.basement.ethz.ch/docs>

10 Anhang

Nicht messbare Zuflüsse

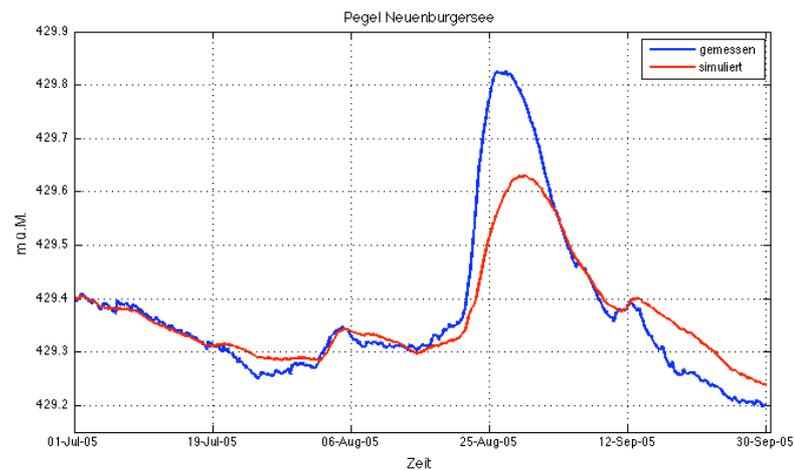


Abbildung 38: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Neuenburgersees ohne Korrektur

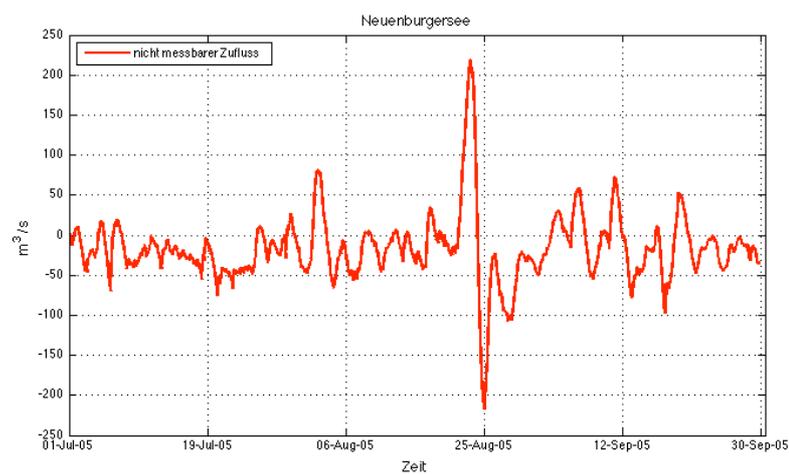


Abbildung 39: Zu- und Abfluss der geregelten Pumpe (Quellterm) beim Neuenburgersee

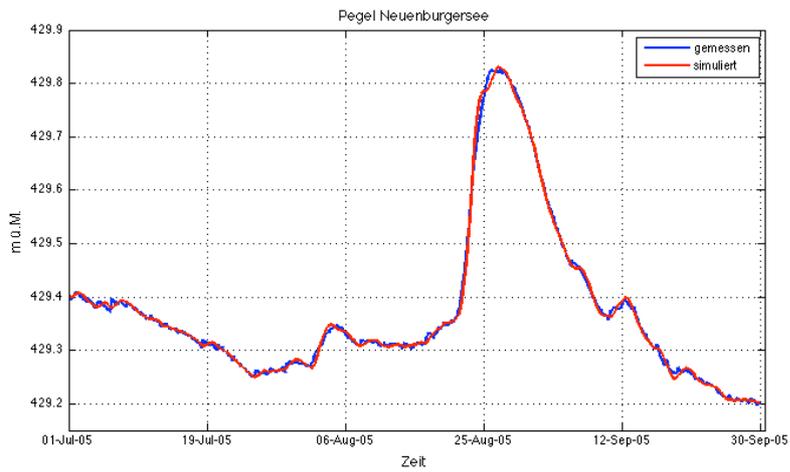


Abbildung 40: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Neuenburgersees mit Korrektur

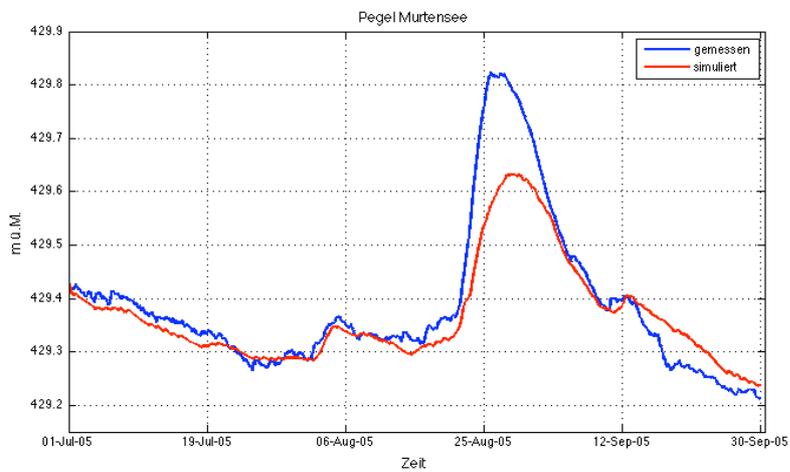


Abbildung 41: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Murtensees ohne Korrektur

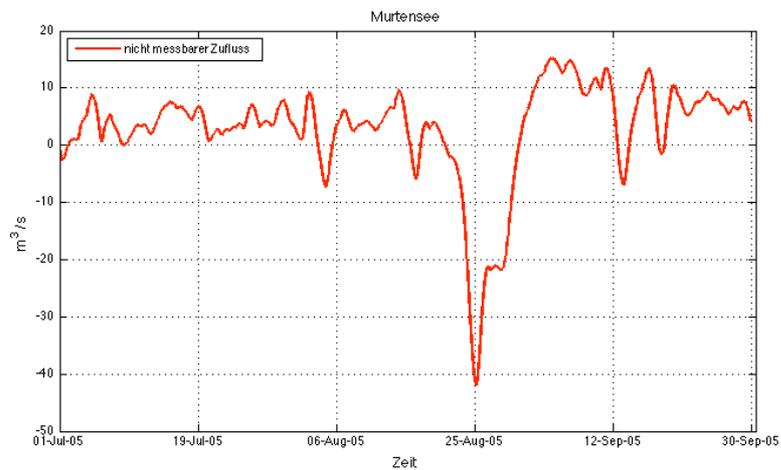


Abbildung 42: Zu- und Abfluss der geregelten Pumpe (Quellterm)

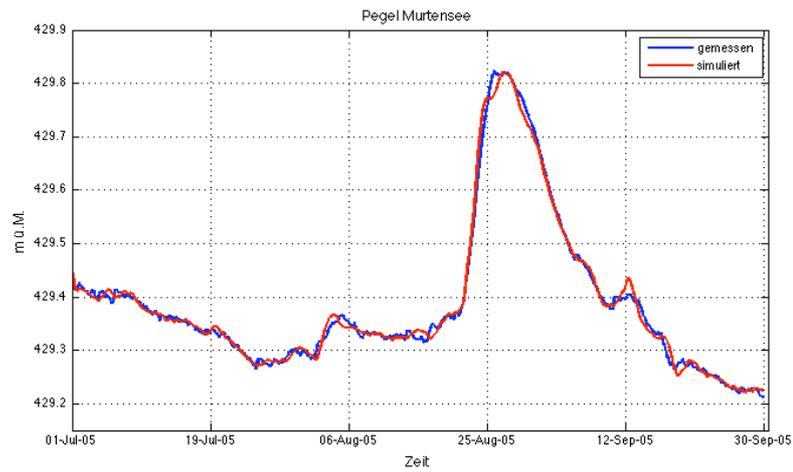


Abbildung 43: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Murtensees mit Korrektur

10.1 Kalibrierung

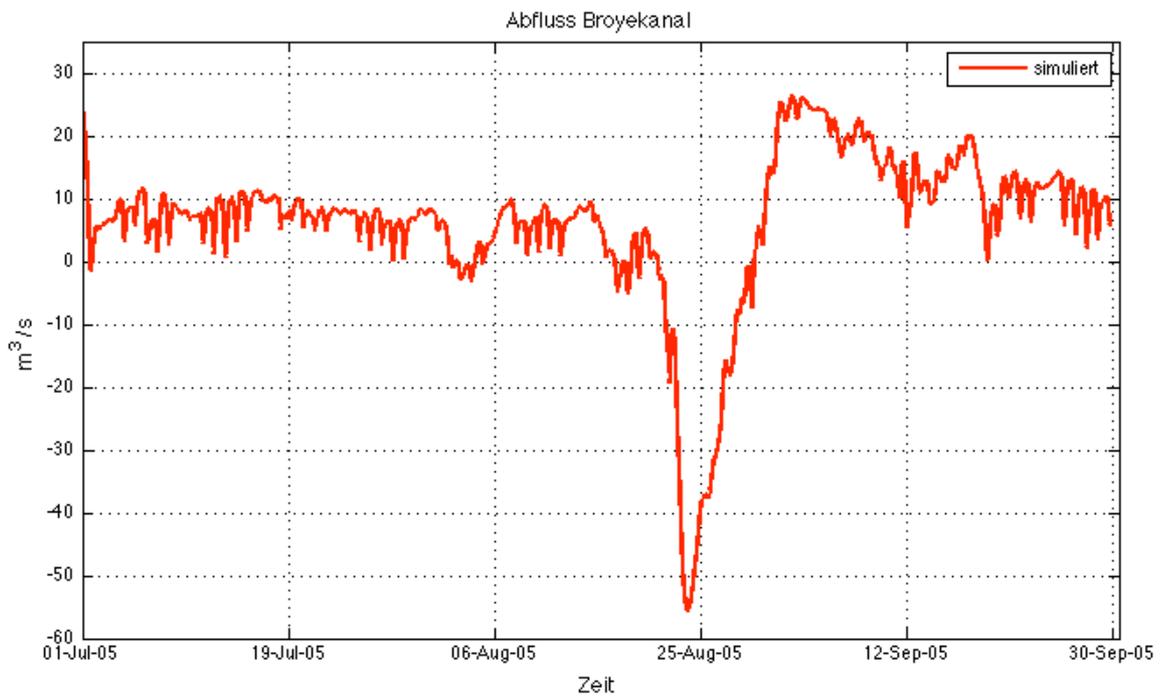


Abbildung 44: Simulierte Pegel vom Broyekanal während dem Hochwasser 2005

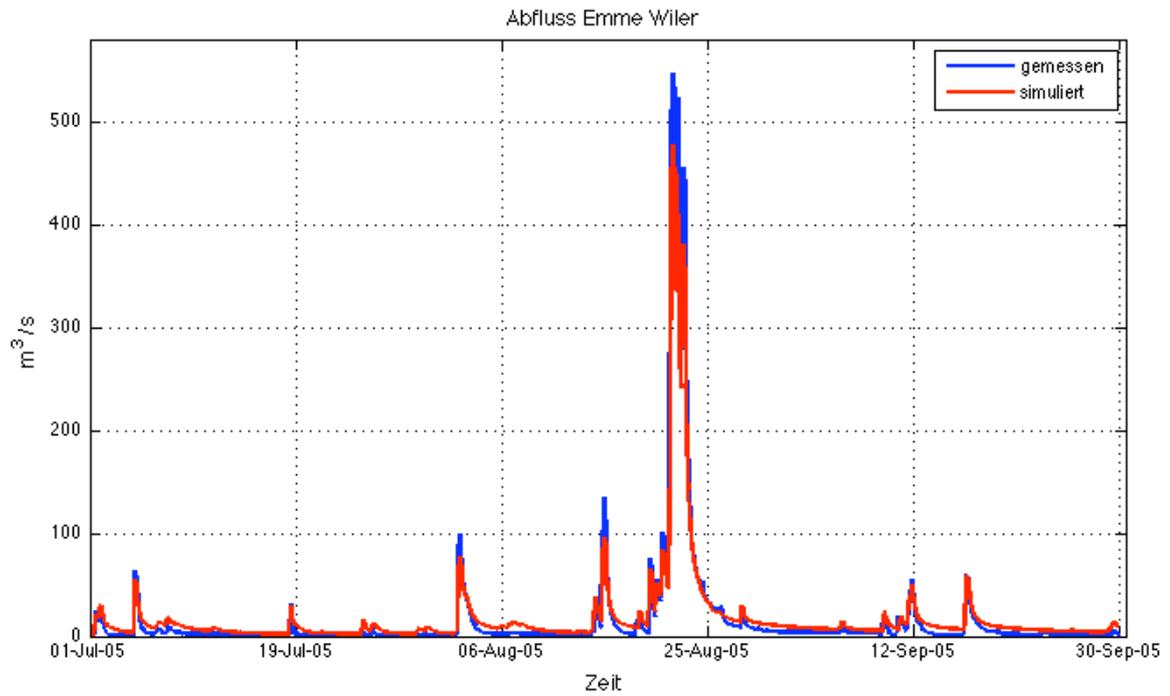


Abbildung 45: Vergleich des simulierten und des gemessenen Durchflusses bei der Messstelle Emme Wiler

10.2 Kraftwerke

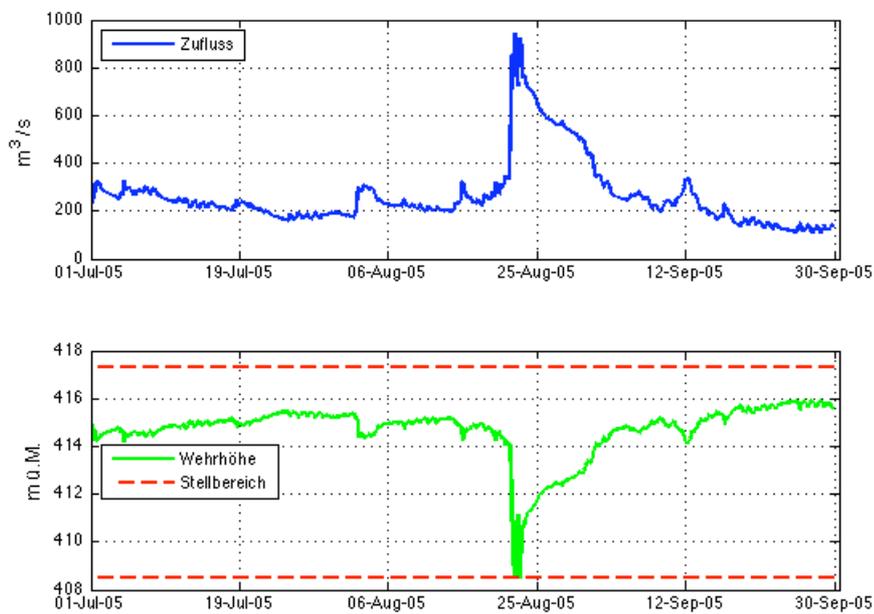


Abbildung 46: Kraftwerk Bannwil: (oben) Zufluss in den Stauraum, (mitte) Wehrhöhe, (unten) Konzessionspegel und simulierter Pegel

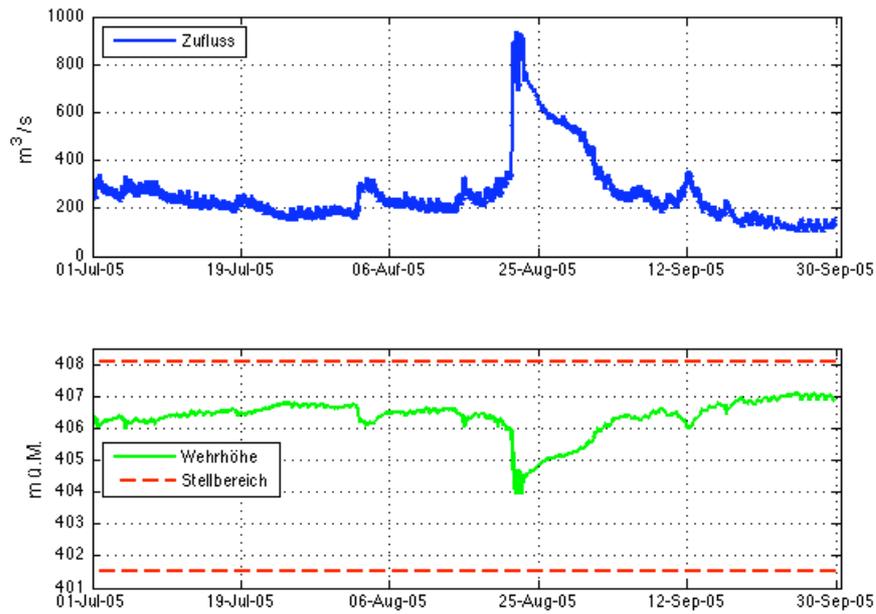


Abbildung 47: Kraftwerk Wynau: (oben) Zufluss in den Stauraum, (mitte) Wehrhöhe, (unten) Konzessionspegel und simulierter Pegel

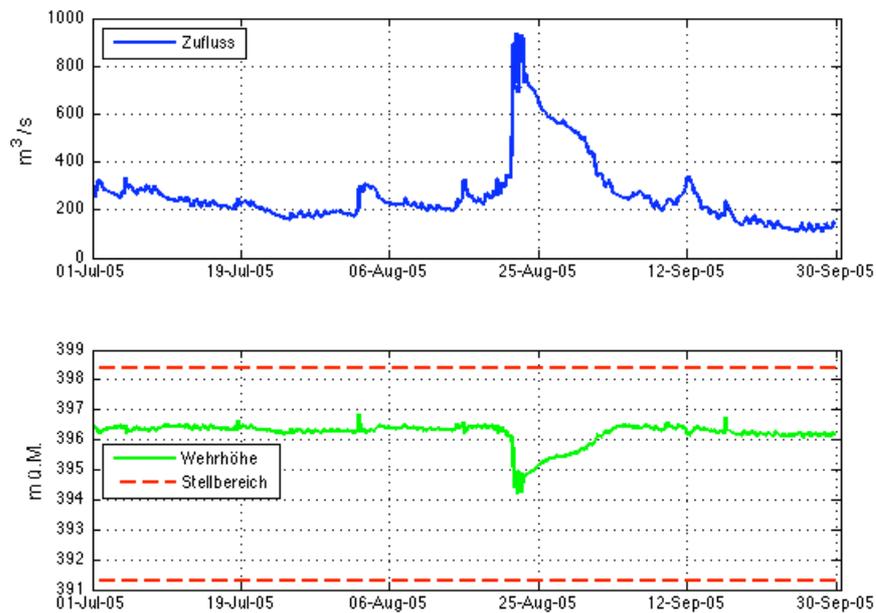


Abbildung 48: Kraftwerk Ruppoldingen:(oben) Zufluss in den Stauraum, (mitte) Wehrhöhe,(unten) Konzessionspegel und simulierter Pegel

10.3 Validierung

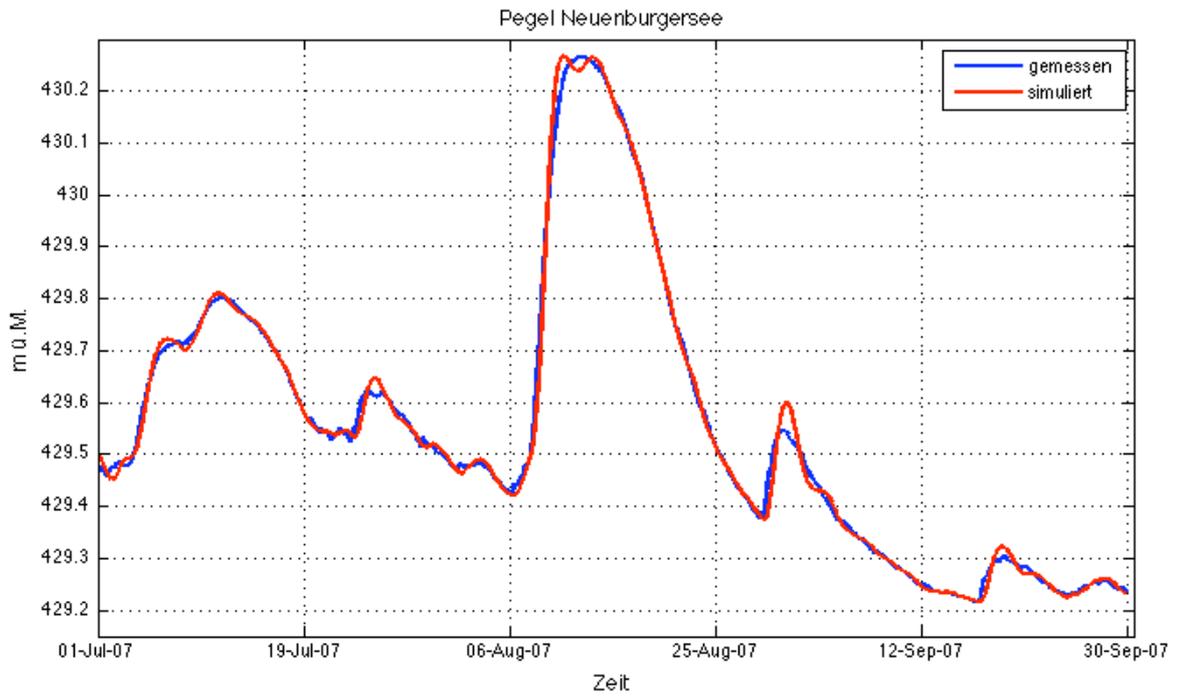


Abbildung 49: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Neuneburgersees mit Korrektur

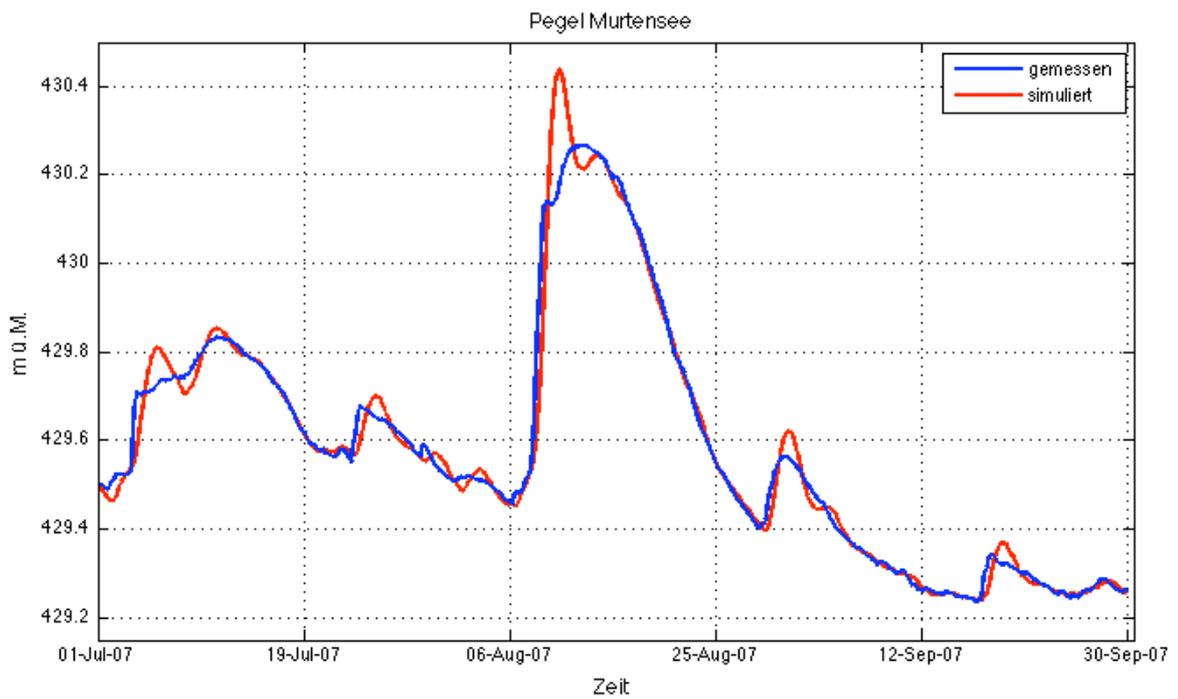


Abbildung 50: Vergleich des simulierten und des gemessenen Pegels des Murtensees mit Korrektur

10.4 Emme

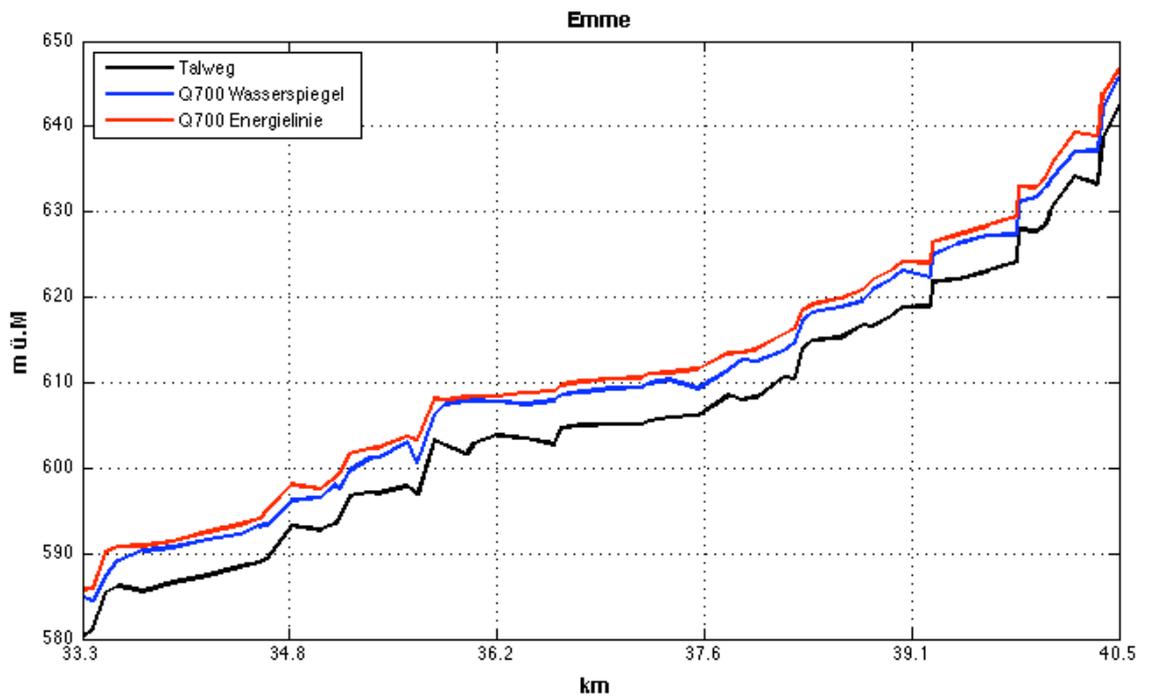


Abbildung 51: Längsprofil der Emme zwischen GEWISS Kilometer 33.3 und 40.5

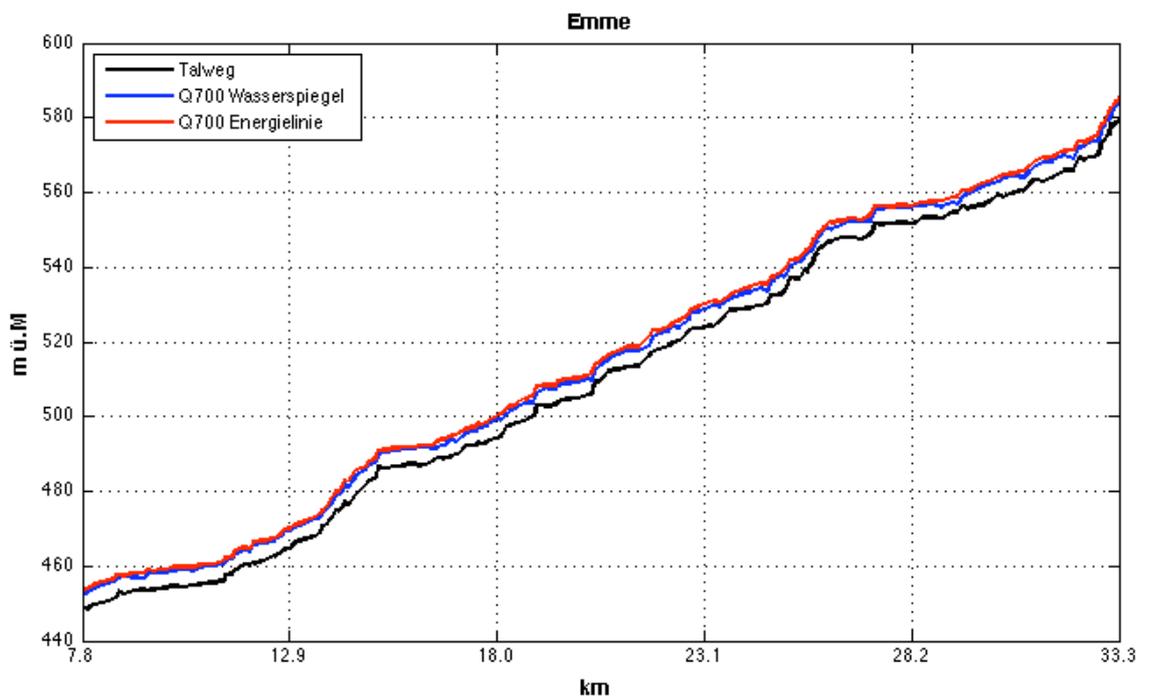


Abbildung 52: Längenprofil der Emme zwischen GEWISS Kilometer 33.3 und 40.5