



DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Hydrologische Untersuchungen an Hochwässern in der Oberen Enns

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Dieter Gutknecht

Ass.Prof. Dr.techn. Robert Kirnbauer, Dipl.-Ing. Thomas Nester

E222, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Abteilung für Ingenieurhydrologie

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Željko Pjagulović

Matr.-Nr. 0325073

Gabelsberggasse 5/17, 1020 Wien

Wien, im März 2009

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle alle jenen danken, die die Entstehung dieser Arbeit mit ihrer fachlichen und persönlichen Unterstützung ermöglicht haben. Mein besonderer Dank gilt an Herrn Dr. Robert Kirnbauer, der sich vom Anfang an mit der Diplomarbeit kritisch auseinandergesetzt hat. Weiteres bedanke ich mich bei o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Dieter Gutknecht und Dipl.-Ing. Thomas Nester für die tolle Betreuung, und bei Thomas auch für die Einführung in die interessante Welt von \LaTeX , `gnuplot` und anderen Programmen. Einen herzlichen Dank an beide auch für ihr Verständnis für immer wieder aufgetretenen Unterbrechungen der Arbeit. Sie waren die Folge des aufregendsten Abschnittes meines Lebens, der Vergrößerung meiner Familie.

Allen anderen Mitgliedern des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie an der TU Wien möchte ich für die angenehme und freundliche Arbeitsatmosphäre danken.

Ferner bedanke ich mich bei meinen Eltern, Radmila und Dragiša, für die finanzielle und jede andere Unterstützung auf dem Weg meines Studiums. Ein spezieller Dank gilt an meine Frau Maja, die mich immer wieder motivierte und unterstützte.

Diese Diplomarbeit widme ich meiner Tochter Mina.

Zusammenfassung

In vorliegender Diplomarbeit werden im Einzugsgebiet der Oberen Enns, einschließlich bis zum Pegel Liezen (Röthelbrücke), die Parameter eines Niederschlag-Abflussmodells entwickelt und untersucht. Die Modellparameter werden für das Programm HEC-HMS des U.S. Army Corps of Engineers bestimmt. Niederschlags- und Abflussdaten im Zeitraum von Januar 1995 bis Dezember 2004 standen zur Verfügung.

Nach der Einleitung und kurzen Erklärung der Ausgangslage, werden zunächst in Kapitel 2 die Eigenschaften des Einzugsgebiets der oberen Enns beschrieben. Es wird auch ein kurzer Blick auf die Enstalbahn geworfen, da sie in diesem Gebiet hochwassergefährdet ist. Weiteres folgt eine Analyse der ausgewählten Ereignisse für die Modellierung, hinsichtlich Abfluss und Niederschlag (Kapitel 3).

Die Kapitel 4 und 5 beschreiben die Entstehung des Abflusses in einem Einzugsgebiet und die Möglichkeiten und Beschränkungen bei deren Modellierung und Parameterbestimmung. Das HEC-HMS wird anschließend vorgestellt. Kapitel 6 behandelt die verwendeten Methoden für das Niederschlag-Abflussmodell des Oberen Ennstals.

Im Kapitel 7 ist die Modifikation des HEC-HMS hinsichtlich des Drei-Speicher-Ansatzes und die Verwendung von *flow ratios* näher erklärt.

Die Ergebnisse der Modellierung und Kalibrierung und Diskussion über die gerechneten Parameter und deren Anwendung bei Prognosen von zukünftigen Hochwässern ist das Thema der Kapitel 8 und 9.

Im Anhang A befinden sich die Isohyetenkarten der Ereignisse, sowie die Diagramme mit den modellierten und beobachteten Abflussganglinien für die beobachteten Pegel im Anhang B. Die Modelle für eine schnelle Abschätzung der *flow ratios* und Abflussbeiwerte sind im Anhang C graphisch dargestellt.

Abstract

The aim of this diplom thesis is to determine and analyse the parameters of a catchment basin-model. The catchment of the Austrian River Enns till the gage Liezen (Röthelbrücke) acts as study area. The basis of this investigation provides the HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) software package of the U.S. Army Corps of Engineers. Precipitation- and runoff-data is available from January 1995 to December 2004.

Chapter 2 gives an overview about the area of upper Enns and its physical description. It provides also the short history of Ennstalbahnen railway. It follows the analysis of historical events concerning precipitation and runoff (Chapter 3).

The chapters 4 and 5 describe the generating of runoff in a catchment and the possibilities and limitations of its modeling. Then, the HEC-HMS model is described. The chapter 6 deals with the used methods of catchment basin-model in this work.

In chapter 7 is described the modification of HEC-HMS for use in this thesis (three subbasin extension and the use of flow ratios).

The results of modeling, the development of parameters for the watershed-model and a model for a quick estimate of parameters in case of runoff forecasts is the subject of chapters 8 and 9.

The isohyete-maps are graphically processed in appendix A, as well as the results of some simulations in appendix B. Appendix C contains the models for a quick estimate of parameters for some gages of the upper Enns in diagrams.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Danksagung | i |
| Zusammenfassung | ii |
| Abstract | iii |
| | |
| I Einleitung | 1 |
| 1 Einleitung und Aufgabestellung | 2 |
| | |
| II Einzugsgebiet, Daten und Ereignisse | 3 |
| 2 Einzugsgebiet | 4 |
| 2.1 Geologie | 5 |
| 2.2 Klima | 6 |
| 2.3 Vegetation und Landnutzung | 6 |
| 2.4 Wasserwirtschaft | 7 |
| 2.5 Flussregulierungs- und Entwässerungsmaßnahmen | 8 |
| 2.6 Ennstalbahn und Hochwässer | 8 |
| 3 Analyse der ausgewählten historischen Ereignisse | 10 |
| 3.1 Niederschlagsdaten | 10 |
| 3.2 Abflussdaten | 11 |
| 3.3 Betrachtete Ereignisse | 14 |
| | |
| III Niederschlag-Abflussmodell | 20 |
| 4 Allgemein | 21 |
| 4.1 Wasserkreislauf | 21 |
| 4.2 Wasserkreislauf in einem Einzugsgebiet | 21 |
| 4.3 Abfluss | 23 |
| 4.4 Abflussbildung und Abflusskonzentration | 24 |
| 5 Modellierung der Niederschlag-Abfluss Prozesse | 26 |
| 5.1 Modell | 26 |
| 5.2 HEC-HMS | 27 |
| 5.2.1 Basin Model | 28 |
| 5.2.2 Meteorological Model | 32 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2.3 | Control Specifications | 32 |
| IV | Simulation | 33 |
| 6 | Verwendete Modelle | 34 |
| 6.1 | Modellierung der Abflussbildung | 34 |
| 6.2 | Abflusskonzentration | 35 |
| 6.3 | Modellierung des Basisabflusses | 40 |
| 6.4 | Gerinnenstreckenmodell | 41 |
| 7 | Modellierung | 43 |
| 7.1 | Aufbereitung von Niederschlags- und Abflussdaten | 43 |
| 7.2 | Drei Speicher Ansatz und die Bedeutung von <i>flow ratio</i> | 45 |
| 7.2.1 | Gliederung des Einzugsgebiets für die Modellierung | 49 |
| 7.3 | Parameterentwicklung und Kalibrierung | 49 |
| 7.3.1 | Vorgehensweise bei der Kalibrierung | 49 |
| V | Ergebnisse | 54 |
| 8 | Ergebnisse der Kalibrierung | 55 |
| 8.1 | Geeichte Abflussganglinien aller Ereignisse | 55 |
| 8.2 | Beurteilung der Simulationsgüte | 66 |
| 8.3 | Kalibrierte Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten | 68 |
| 8.4 | Kalibrierte flow ratios | 69 |
| 8.5 | Gerechnete Abflussbeiwerte | 72 |
| 8.5.1 | Bestimmung der Wertebereiche für eine schnelle Abschätzung des Abflussbeiwertes | 74 |
| 8.6 | Geeichte Anfangsverluste | 78 |
| 8.7 | Geeichte Laufzeitunterschiede (<i>lags</i>) | 80 |
| VI | Schlussfolgerungen | 81 |
| 9 | Schlussfolgerungen | 82 |
| VII | Anhang | 84 |
| A | Isohyetenkarten der untersuchten Ereignisse | 85 |
| B | Ergebnisse der Modellierung für Pegel: Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau | 91 |
| C | Graphische Interpretation der ermittelten flow ratios und Abflussbeiwerte | 99 |
| | Literaturverzeichnis | 106 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Oberes Ennstal, Punkt: Schladming, Sichthöhe: 2880 m, Blickrichtung: Ost - flussabwärts, Quelle: Google™ Earth | 4 |
| 2.2 | Durchflussganglinie des Pegels Liezen (Röthelbrücke) - In der Nacht wird gestaut, in der Zeit größeren Strombedarfes wird abgearbeitet | 7 |
| 2.3 | Ennstalbahnstrecke zwischen Bischofshofen und Selzthal | 9 |
| 3.1 | Verwendete Niederschlagsmessstellen in Einzugsgebiet Liezen; rot: Stundenbasis, blau: Tagesbasis | 11 |
| 3.2 | Untersuchte Pegel im Einzugsgebiet Liezen | 13 |
| 3.3 | Registrierte Abflussganglinien für das Jahr 2001 | 13 |
| 3.4 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juni 1995 (25.06.-01.07) | 15 |
| 3.5 | Histogramm der maximalen jährlichen Durchflüsse im Zeitraum 1951-2005 für den Pegel Liezen (Röthelbrücke) | 17 |
| 3.6 | Jährlichkeiten der maximalen jährlichen Durchflüsse für die Reihe 1951-2005; Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 18 |
| 3.7 | Jährlichkeiten der maximalen jährlichen Durchflüsse für die Reihe 1951-2005; Pegel: Schladming | 18 |
| 4.1 | Wasserkreislauf in einem Einzugsgebiet (Disse 2004/2005) | 22 |
| 4.2 | Abflussganglinie und Niederschlag (aus DIN 4049) | 25 |
| 5.1 | Graphische Benutzeroberfläche von HEC-HMS, Version 3.1.0 | 28 |
| 5.2 | Das Einheitsganglinienverfahren (Bárdossy 2003/2004) | 30 |
| 6.1 | Abflussbeiwert und Anfangsverlust (Blöschl/Gutknecht 2005) | 35 |
| 6.2 | Abflussbestimmung mittels des Isochronenmodells (Radić 2007) | 36 |
| 6.3 | Clark Verfahren | 38 |
| 6.4 | ZFD in HEC-HMS | 38 |
| 6.5 | Definition der verschiedenen Abflussbereiche am Beispiel des beobachteten Abflusses am Pegel in Schladming | 39 |
| 6.6 | Approximation des Bereichs vom schnellen Speicher | 40 |
| 6.7 | | 40 |
| 6.8 | Laufzeitunterschiedmethode | 41 |
| 7.1 | Beispiel der Thiessen-Polygone für sieben Stationen im Einzugsgebiet oberhalb von Liezen | 44 |
| 7.2 | Das Schema der Einzugsgebietsmodellierung mittels des flow ratio Ansatzes | 47 |
| 7.3 | Das Ergebnis der Modellierung mittels der drei Speicher im Einzugsgebiet des Pegels Schladming | 48 |
| 7.4 | Räumliche Struktur des Einzugsgebietsmodells vom Jahr 1995 bis 1999 | 48 |

| | | |
|------|---|----|
| 7.5 | Räumliche Struktur des Einzugsgebietsmodells vom Jahr 2000 bis 2004 | 49 |
| 7.6 | Anpassung des Basisabflusses, Pegel: Schladming | 51 |
| 7.7 | Anpassung des Zwischenabflusses, Pegel: Schladming | 52 |
| 7.8 | Anpassung des Oberflächenabflusses, Pegel: Schladming | 53 |
| 8.1 | Modellierung Juni 1995, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 56 |
| 8.2 | Modellierung Oktober 1996, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 57 |
| 8.3 | Modellierung Juli 1997, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 58 |
| 8.4 | Modellierung September 1998, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 59 |
| 8.5 | Modellierung Juli 1999, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 60 |
| 8.6 | Modellierung Juli 2001, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 61 |
| 8.7 | Modellierung März 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 62 |
| 8.8 | Modellierung August1 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 63 |
| 8.9 | Modellierung August2 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 63 |
| 8.10 | Modellierung September 2003, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 65 |
| 8.11 | Modellierung Juni 2004, Pegel: Liezen (Röthelbrücke) | 65 |
| 8.12 | Ermittelte Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten | 70 |
| 8.13 | Geeichte flow ratios und Basisabfluss im Einzugsgebiet Liezen | 71 |
| 8.14 | Geeichte flow ratios und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen | 71 |
| 8.15 | Gerechnete Abflussbeiwerte und Basisabfluss im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 73 |
| 8.16 | Gerechnete Abflussbeiwerte und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 73 |
| 8.17 | Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 75 |
| 8.18 | Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F- feucht) | 75 |
| 8.19 | Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 76 |
| 8.20 | Verlauf der Abflussbeiwerte in Einzugsgebieten die Obere Enns entlang | 77 |
| 8.21 | Anfangsverluste und Basisabflüsse im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 79 |
| 8.22 | Anfangsverluste und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht) | 79 |
| A.1 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Oktober 1996 (20.10.-25.10) | 85 |
| A.2 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 1997 (07.07.-10.07) | 86 |
| A.3 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom September 1998 (05.09.-07.09) | 86 |
| A.4 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 1999 (22.07.-26.07) | 87 |
| A.5 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 2001 (19.07.-23.07) | 87 |
| A.6 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom März 2002 (19.03.-27.03) | 88 |
| A.7 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom August1 2002 (06.08.-09.08) | 88 |
| A.8 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom August 2002 (11.08.-17.08) | 89 |
| A.9 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom September 2003 (11.09.-17.09) | 89 |
| A.10 | Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juni 2004 (11.06.-15.06) | 90 |
| B.1 | Modellierung Juni 1995, Pegel: Schladming | 92 |
| C.1 | Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 99 |

| | | |
|------|--|-----|
| C.2 | Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 100 |
| C.3 | Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 100 |
| C.4 | Wertebereiche des flow ratio mittel im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 101 |
| C.5 | Wertebereiche des flow ratio schnell im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 101 |
| C.6 | Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht) | 102 |
| C.7 | Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht) | 102 |
| C.8 | Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht) | 103 |
| C.9 | Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht) | 103 |
| C.10 | Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht) | 104 |
| C.11 | Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht) | 104 |
| C.12 | Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht) | 105 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Landnutzung im Bezirk Liezen 1998, Quelle: Bezirkskammer für Land- und Forstwirtschaft Liezen | 6 |
| 3.1 | Liste aller verfügbaren Niederschlagsmessstellen im Einzugsgebiet Liezen | 12 |
| 3.2 | Datenverfügbarkeit der Niederschlagsstationen mit Stundenauflösung für untersuchte Ereignisse | 14 |
| 3.3 | Liste der verfügbaren Pegel | 14 |
| 7.1 | Verwendete Parametertypen bei der Modellierung | 50 |
| 7.2 | Speicherkonstanten und Rezessionskoeffizienten für hydrologische Speicher (Dyck und Peschke, 1995) | 51 |
| 8.1 | Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Zwischeneinzugsgebiet Liezen | 55 |
| 8.2 | r^2 , $bias$, nme und $nsme$ für alle modellierten Ereignisse in Einzugsgeieten der Pegel Liezen (Röthelbrücke) und Schladming | 68 |
| 8.3 | r^2 , $bias$, nme und $nsme$ für alle modellierten Ereignisse in Einzugsgebieten der Altenamrkt im Pongau und Löbenau am Taurach | 68 |
| 8.4 | Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten für alle untersuchte Einzugsgebiete | 69 |
| 8.5 | Kalibrierte flow ratios für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming) und Bodenzustände zum Ereignisbeginn | 72 |
| 8.6 | Gerechnete Abflussbeiwerte Ψ für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming) | 74 |
| 8.7 | Geeichte Angangsverluste für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming) | 78 |
| 8.8 | Geeichte Laufzeitunterschiede für alle Ereignisse und Einzugsgebiete (Enns=Strecke zw. Schladming und Liezen; Obere Enns=Strecke zw. Altenmarkt im Pongau und Schladming) | 80 |
| B.1 | Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugs- und Teilgebiet Schladming | 91 |
| B.2 | Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau | 92 |
| B.3 | Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugsgebiet Löbenau (an der Taurach) | 92 |

Teil I

Einleitung

1 Einleitung und Aufgabestellung

Im Jahr 2002 kam es in vielen Regionen Mitteleuropas aufgrund ergiebiger Niederschläge zu katastrophalen Hochwasserereignissen. Am schwersten betroffen in Österreich waren Ober- und Niederösterreich, aber auch Steiermark, Tirol und andere Bundesländer. Die Überschreitung der bisher gemessenen Niederschläge und Abflüsse hatten große Überflutungen zur Folge, wobei neun Todesopfer zu beklagen waren. Darüber hinaus führten die Ereignisse zu sehr hohen Sachschäden durch die Zerstörung von Infrastruktureinrichtungen, Industrieanlagen und Siedlungen. Die materiellen Schäden betragen beim Hochwasser in August 2002 in Österreich ca. EUR 3.1 Mrd. Der Gesamtschaden der Infrastruktur betrug EUR 573 Millionen. Allein die Summe der Schäden an Einrichtungen der ÖBB hat EUR 43 Millionen erreicht.

In der Steiermark war besonders stark der Bezirk Liezen im Einzugsgebiet der Enns betroffen. In der Gemeinde Aich-Assach sind durch Überflutungen große Schäden an Wohn- und Gewerbeobjekten entstanden. Die katastrophalen Überschwemmungen in diesem Bezirk haben ebenso die Ennstalbahn betroffen. Die erheblichsten Schäden passierten auf der Strecke zwischen Aich und Haus, im Oberen Ennstal. In der Gemeinde Pichl-Mandling wurde die ÖBB-Strecke auf eine Länge von rund 150 m weggerissen (Habersack und Moser, 2003 [10]). Folgende Bilder zeigen die fatalen Auswirkungen des Hochwassers von August 2002 (aus [7]).



Es ist erforderlich alle Abläufe vor und nach dem Hochwasser detailliert zu analysieren und dort zu reagieren, wo das Gefahren- und Schadenspotential ohne großen finanziellen Aufwand verringert werden kann (Pantucek, 2003 [19]). Um derartige Schäden künftig zu vermeiden, ist auch die Entwicklung von Frühwarnsystemen, die in Kombination mit dem Einsatz von Hilfskräften angewendet würden, notwendig. Die meteorologischen Wettermodelle können Prognosen für Temperaturen und Niederschläge kurzfristig (bis zu 2 Tagen) liefern. Die Reaktion der beobachteten Pegelstände im betrachteten Einzugsgebiet ermöglicht andererseits ein hydrologisches Rechenmodell. In vorliegender Arbeit werden die Parameter eines solches Modell ermittelt und diskutiert.

Teil II

Einzugsgebiet, Daten und Ereignisse

2 Einzugsgebiet

Die Enns entwässert mit einer Länge von 254 km ein Einzugsgebiet von 6080 km² (7 % des Bundesgebietes). Ihre jährliche gesamte Wasserfracht beträgt rund 6860 Millionen m³.

Nach ihrem Ursprung in den Radstädter Tauern im Bundesland Salzburg, am Fuße des Kraukogels, 1735 m ü. A., fließt Enns weiter durch drei Bundesländer, wobei 350 km² des Einzugsgebiets auf das Bundesland Salzburg entfallen, 3950 km² auf die Steiermark und auf Oberösterreich 1780 km². Das Einzugsgebiet der Enns ist das fünftgrößte Österreichs. Zwischen den Städten Enns und Mauthausen mündet die Enns in die Donau ein, beim Fkm 2112, 245 m ü. A. Sie überwindet einen gesamten Höhenunterschied von 1497 m (Nachtnebel, 2001 [17]).

In der Steiermark bildet die Enns die Grenze zwischen den Kalkalpen im Norden und der Grauwackenzone bzw. dem Kristallin der Zentralalpen im Süden, Abbildung 2.1. Nach Admont durchbricht die Enns die Kalkalpenzone und fließt in nördliche Richtung. Der Fluss tritt bei Ternberg in Oberösterreich in die Flyschzone ein. In ihrer letzten Strecke vor der Mündung durchfließt sie ab Steyr das Alpenvorland und bildet die Grenze zwischen Oberösterreich und Niederösterreich, die bei Ramingdorf anfängt (Jungwirthand, 1996 [14]).



Abbildung 2.1: Oberes Ennstal, Punkt: Schladming, Sichthöhe: 2880 m, Blickrichtung: Ost - flussabwärts, Quelle: Googletm Earth

2.1 Geologie

In diesem Kapitel werden die geologischen Bedingungen die ganze Enns entlang beschrieben. Unter diesem Gesichtspunkt kann der Lauf der Enns in drei große Abschnitte unterteilt werden. Die wären:

Mandling-Gesäuseeingang

Wie erwähnt, bildet der Talboden der Enns in der nordöstlichen Steiermark die Grenze zwischen zwei riesigen großtektonischen Einheiten, den Kalkalpen im Norden und dem Kristallin der Tauern im Süden. Ein unterschiedlich breiter Streifen von Gesteinen der Grauwackenzone schaltet sich in dieser Zwischenzone ein und bildet die Ennstalphyllitzone. Sie setzt sich aus schmalen Kalk- und Dolomitlagen, Quarz-, Graphit- und Serizitphylliten mit Grünschieferzügen, Porphyroiden und Diabasen zusammen. Auf der nördliche Seite treten lokal Gesteine der Grauwackenzone (zwischen Aich und Öblarn) auf, als auch die Gesteine der Kalkalpen wie Hauptdolomit, Riff-, Dachstein- und Hallstätterkalk auf der Südseite. Diese geologischen Unterschiede im Längstal beeinflussen wesentlich die Talmorphologie. Linksufrig findet man scharfe Zinnen und Stöcke mit steilen Wänden, ausgedehnten Hochplateaus und riesigen Schutthalde. Karstformen wie Ponore, Karstquellen, Dolinen und unterirdische Wasserläufe sind auch dort zu finden. Am rechten Ufer treten mildere Formen der Zentralalpen auf, und Wälder und Almen bedecken das Gelände sanft bis zu den Gipfeln der Niederen Tauern.

Die Talsohle besteht aus alluvialen und diluvialen Schotterböden. Es handelt sich um mittelgrobe und feine Schotter aus Quarzgesteinen der Grauwackenzone, Sandsteine und feinkörnige Konglomerate. Diese tertiären Ablagerungen, dargestellt durch viele Terrassen, ziehen dem Tal entlang. Die Niederen Tauern, ein Teil der Zentralalpen, bestehen aus Granatglimmer-, Glimmerschiefer sowie Schiefergneisen aus dem Paläozoikum (Jungwirthand, 1996 [14]).

Gesäuseeingang-Hieflau

Ab dem Gesäuseeingang bei Admont fließt die Enns durch die Nördlichen Kalkalpen. Hier findet man eine Schluchtstrecke mit steil aufragenden, zerklüfteten Felswänden. Die Talsohle ist eng und erfüllt mit quartären Schottern und Konglomeraten. Die Schlucht ist bis zu 60 m Tief. Charakteristisch für die Ennstaler Alpen sind Wettersteinkalk, Dachsteinkalk und Ramsaudolomit (Jungwirthand, 1996 [14]).

Hieflau-Altenmarkt

Auf Grund des Auftretens von Querstörungen, wendet sich die Enns bei Hieflau gegen Norden und fließt durch die Nördlichen Kalkalpen. Hier sind alle Gesteine der Untertrias bis zur Oberkreide vertreten, und es dominiert gebirgige Dolomitlandschaft, da es keine Kuppen der Dachsteinkalke gibt. Die Talsohle ist noch immer eng, und besteht aus quartären Schottern und Konglomeraten. Angrenzende Kreideschichten bestimmen Aufweitungen des Talprofils.

Nördlich von Hieflau, nach der Enge der Wandau, beginnt die Enns durch das Gebiet der Kalkvoralpen zu fließen. Ab dieser Stelle kann man stellenweise bis zur Mündung auch eiszeitliche Schotterterassen finden (Jungwirthand, 1996 [14]).

2.2 Klima

Das Klima im Ennstal ist durch die Stauwirkung der in West-Ost-Richtung verlaufenden Gebirge gegen Norden geprägt. Das Obere Ennstal ist etwas niederschlagsärmer als die flussabwärtigen Strecken. Der Grund dafür ist, dass die vorgelagerten Gebirgsmassive der Nordalpen hier als Schutz wirken. Die maximalen Tagesmitteltemperaturen im Talbereich liegen zwischen 24°C und 28°C. Im Winter liegen langjährige Extermwerte zwischen -18°C und -26°C. Es gibt auch große Unterschiede zwischen den minimalen bemessenen Temperaturwerten auf der Stationen innerhalb eines Höhenbereiches. Der Grund dafür sind unterschiedliche Beschattungs- und Besonnungsverhältnisse in den Seitentälern.

Die durchschnittliche Dauer der Schneebedeckung beträgt im Oberen Ennstal etwa 2 Monate bei der Stationen im Tal und über 200 Tage bei den hochgelegenen (zB. Station Obertauern). Regional variieren die Schneehöhen ebenso sehr stark.

Aufgrund variabler Höhen und Temperaturen ergeben sich unterschiedliche Verdunstungshöhen. Bei rund 400 mm liegt die mittlere Verdunstungshöhe im Oberen Ennstal (Nachtnebel, 2001 [17]).

2.3 Vegetation und Landnutzung

In den höheren Regionen ist die Forstwirtschaft entwickelt und besonders wichtig ist die Almwirtschaft (z.B. in den Niederen Tauern). Der niedere, breite Talboden im Oberen Ennstal ist für die Grünlandwirtschaft geeignet. Bis zu den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts ist der Anteil der Waldflächen zurückgegangen, ab dem Zeitpunkt steigt er wieder kontinuierlich an.

Auf anderer Seite geht der Anteil der landwirtschaftlichen Betriebe zurück (Nachtnebel, 2001 [17]).

Von Bedeutung für das Gebiet ist noch der Fremverkehr, wobei der Skitourismus in den Niedern Tauern die wichtigste Rolle spielt (Schladming, Radstadt, Obertauern...).

| Landnutzung | Anteil [%] |
|----------------------|------------|
| Waldfläche | 54 |
| Almen | 12 |
| Äcker und Wiesen | 10 |
| Unproduktive Flächen | 22 |
| Sonstiges | 2 |

Tabelle 2.1: Landnutzung im Bezirk Liezen 1998, Quelle: Bezirkskammer für Land- und Forstwirtschaft Liezen

2.4 Wasserwirtschaft

In vorindustrieller Zeit spielte die Enns große Rolle als Verkehrsweg für den Eisen- und Holztransport und auch als Triftgewässer im Rahmen der Holzbringungen zum Betrieb der Eishämmer. Als Transportmittel dienten Flöße und Schiffe.

In den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts begann der Ausbau der unteren und mittleren Enns zur Wasserkraftnutzung. Heutzutage hat die Wasserkraftnutzung für die Energieerzeugung die größte Bedeutung für die Enns. Im Oberen Ennstal allein befinden sich nur drei größeren Wasserkraftanlagen (KW Mandling, KW Sölk, KW Salza) an den Zubringern der Enns, die Teil der Enns-Kraftwerkskette sind. Unterhalb des Gesäuseeingangs, zwischen Hief-lau und der Mündung in die Donau sind weitere 12 Enns-Kraftwerke (Nachtnebel, 2001 [17]). Die künstlichen Speicher dieser drei Kraftwerke haben einen gewissen Einfluss auf gesamte Speicherwirkung des Einzugsgebiets im Prozess der Abflusskonzentration. Der größte unter ihnen ist der Speicher vom Zubringer Salza, mit einer Oberfläche von 150 km².

Die Kraftwerke der Enns-Kraftwerkskette arbeiten in „Schwellbetrieb“, dh. sie haben die Möglichkeit, dank den Stauseen, Wasser aufzustauen und bei Bedarf wieder abzarbeiten. Auf diese Weise wird die Laufenergie in Spitzenenergie umgewandelt. Um die günstigste Form des Schwellenbetriebs und ähnlichen Belastungsgang zu erreichen, laufen alle Kraftwerke der Kette koordiniert in Durchlaufspeicherung-Modus (Ennskraftwerke A.G., 1956 [5]). Dieser Betrieb der Kraftwerke beeinflusst intensiv die Durchflussganglinien in der unteren und mittleren Enns. Das ist deutlich ersichtlich am Pegel Liezen (Röthelbrücke). Die Abbildung 2.2 stellt eine typische Durchflussganglinie des Pegels Liezen (Röthelbrücke) in Sommermonaten dar, im konkreten Fall unmittelbar vor dem katastrophalen Hochwasserereignis aus dem August 2002.

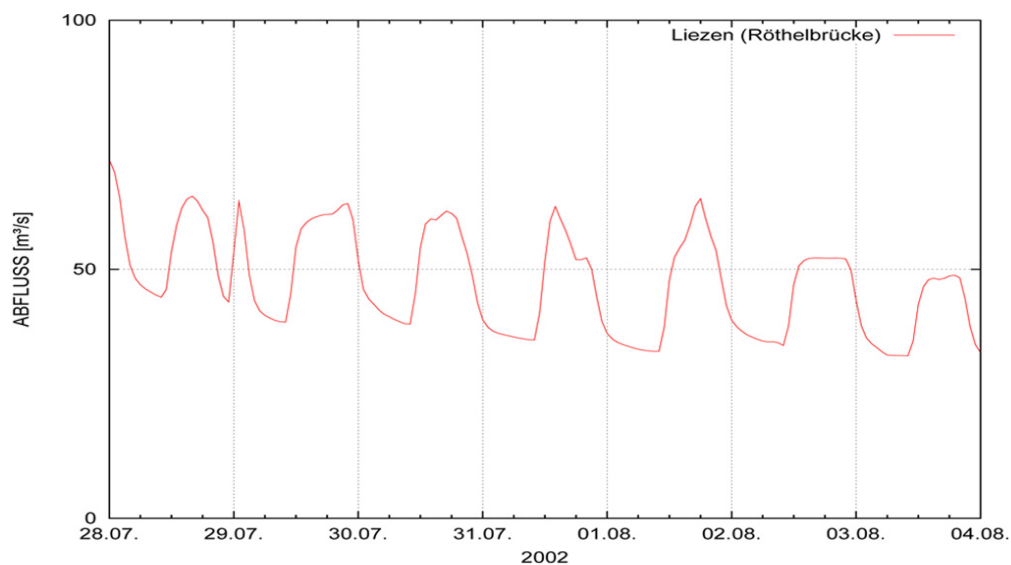


Abbildung 2.2: Durchflussganglinie des Pegels Liezen (Röthelbrücke) - In der Nacht wird gestaut, in der Zeit größeren Strombedarfes wird abgearbeitet

2.5 Flussregulierungs- und Entwässerungsmaßnahmen

Mit den Regulierungsarbeiten im oberen Ennstal fing man in der Mitte des 19. Jahrhunderts an. Vorher charakterisierten das ganze Tal Versumpfungen und breite Überschwemmungsgebiete. Deshalb war es weder für die Landwirtschaft noch für die Errichtung von Siedlungen geeignet. Die zwei in Nord-Süd Richtung verlaufenden Römerstraßen wurden durch häufige Überflutungen in ihrer Benutzung eingeschränkt. Aus diesen Gründen kam es 1859 zu einer kaiserlichen Entschliebung zur Ennsregulierung. Es sollten die enorme Versumpfung des Bodens verhindert werden und ein Schutz vor weiteren Überschwemmungen geschaffen werden.

Als Hauptmaßnahme fungierte Ausführung von Durchstichen in Form einer 19 m breiten Leitrinne. Damit wurden die großen Flussschleifen abgeschnitten und ein größeres Gefälle und gleichzeitig eine höhere Schlepkraft durch Verkürzung des Fließweges erreicht. Insgesamt wurden anfänglich 27 Durchstiche ausgeführt. In Strecken zwischen den Durchstichen wurden die breiten Stellen des Flussbettes mittels Bühnen auf die Normalbreite zurückgesetzt. Die Ufersicherung erfolgte durch verschiedene Bauformen (Faschinenpackwerke, Sinkwalze, Uferdeckwerke aus Steingrund, Böschungspflaster aus Bruchsteinen). Eine der Maßnahmen war auch Sohleneintiefung bis zu 1.5 m. Die Felssprengung schloss man aus, da eine Aussprengung der Felsschwelle negative Effekte zeigte durch extreme Gefällserhöhung und die zerstörende Wirkung der Holztrift auf der Ufer, als Folge (Jungwirthand, 1996 [14]).

Im Laufe der Zeit zeigten sich alle Regulierungsmaßnahmen als nicht ganz effizient. Es kam aufgrund der Geschiebezufuhr der seitlichen Wildbäche zur neuen Hebung der Sohle und wiederum zu Überschwemmungen und Versumpfung des Bodens.

In den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts hat die Enns Studienkommission ein Arbeitsprogramm entworfen, wo Räumungen von Grobgeschiebe an den Wildbachmündungen und Absenkung der Flusssohle der Enns vorgeschrieben wurden. Die Regulierungen wurden vom Mittelwasser auf HQ₂₅ umgebaut.

Durch die Geomorphologie verursachte Versumpfungen und Vernässungen, stellten immer ein gewisses Problem für die Landnutzung und für den Aufbau von Siedlungen im oberen Ennstal. Die ersten Flächendränungen und Trockenlegungen begannen schon Anfang des 20. Jahrhunderts. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden die Meliorationen fortgesetzt. Heutzutage beträgt die Fläche der Moore in Ennstal etwa 50 ha (ursprünglich 1479 ha) und das nur in Form eines Naturschutzgebietes. Alle restlichen wurden durch Entwässerung ausgetrocknet oder abgetorft (Nachtnebel, 2001 [17]).

2.6 Ennstalbahn und Hochwässer

Die Ennstalstrecke ist 83 km lang und sie verbindet die Bahnknoten Selzthal und Bischofshofen. Die Strecke ist eingleisig. Sie wurde im Jahr 1873 im Betrieb genommen als ein Abschnitt der 797 km langen Kronprinz-Rudolf-Bahn. Sie stellt die wichtigste Verkehrsverbindung zwischen Salzburg und der Steiermark dar.

Vom Anfang an ist die Ennstalbahn durch Hochwässer gefährdet. Das erste große Hochwasser, das die Unterbrechung der Bahnverbindung verursachte, passierte im Sommer 1897 nach



Abbildung 2.3: Ennstalbahnstrecke zwischen Bischofshofen und Selzthal

zwei Wochen ergiebiger Regenfälle. Zwei Jahre später passierte wieder ein Hochwasserereignis (Aschauer, 1964 [1]).

Aus der neuen Geschichte sind noch zwei katastrophalen Hochwässer in der Oberen Enns bekannt: aus dem Jahr 1815 und aus dem August 1949. Beim zweiten wurde die alte Überführerbrücke über die Enns in Liezen völlig zerstört¹.

Auch heute noch ist die Ennstalstrecke potenziell hochwassergefährdet (Habersack und Moser, 2003 [10]). Zur Steigerung von deren Betriebssicherheit wäre der Aufbau eines Hochwasservorhersagesystems und die Einbindung des Infrastrukturbetreibers in ein Warnsystem erforderlich.

¹Quelle: www.liezen.at

3 Analyse der ausgewählten historischen Ereignisse

Das in dieser Arbeit untersuchte Gebiet ist rund 2116 km² groß und umfasst die obere Enns, vom Ursprung in den Radstädter Tauern am Fuß des Kraxenkogels einschließlich bis zum Pegel HZB-Nr: 210799 in Liezen (Röthelbrücke) des HD Steiermark. Die Länge dieses Abschnittes beträgt 95 km, Höhenunterschied im Gebiet rund 2400 m. Er streckt sich in zwei Bundesländern: in Salzburg und zum Großteil in der Steiermark. Wie im Geologie-Kapitel beschrieben, die nördliche Wasserscheide liegt in den Kalkalpen (Dachstein, Totes Gebirge) und die südliche in der Grauwackenzone. Östlich streckt es sich über Teile der Zentralalpen. Im steierischen Teil nimmt die Enns stark mäandrierende Form an, besonders die Flussstrecke im Bereich Haus-Aich.

3.1 Niederschlagsdaten

Für den betrachteten Zeitraum von 1995 bis Dezember 2004 standen insgesamt Niederschlagsdaten von 22 Messstellen im Einzugsgebiet Liezen zur Verfügung. Da die Messungen von Schneehöhen und Schneewasserwerten nicht verfügbar sind, ist es für einige Frühjahr- und Herbstereignisse schwer zu schätzen ob es sich um Schneeschmelze oder Niederschlag handelt. Die Verfügbarkeit der Niederschlagsdaten variiert auch, es gibt jedoch für jedes ausgewählten Ereignis genug Daten um eine genaue Darstellung über die räumliche Aufteilung der Niederschlagshöhen zu bekommen und qualitativen Input für die Simulation zu gewährleisten.

Eine Übersicht über die verwendeten Stationen gibt die Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite. Die blauen Messstellen auf dem Bild sind diejenige mit Tagesauflösung, die roten mit der stündlichen Auflösung. Die Niederschlag-Messstationen weisen Unterschiede bezüglich der Meereshöhe auf. Die tiefstgelegene ist die Messstelle Aigen im Ennstal mit 640 m ü. A., und die höchstgelegene Planai mit 1820 m ü. A.

Die Tabelle 3.1 auf Seite 12 ermöglicht einen Überblick in die Liste der verfügbaren NS-Stationen, ihre Auflösung und ab welchem Zeitpunkt die Daten verfügbar sind.

Bei der Stationen mit der Tagesauflösung sind die Daten für alle 11 Ereignisse vorhanden. Mit den Stationen auf stündlicher Basis sieht die Lage anders aus. Die Übersicht über deren Datenverfügbarkeit für jeweiliges Ereignis kann der Tabelle 3.2 auf Seite 14 entnommen werden.

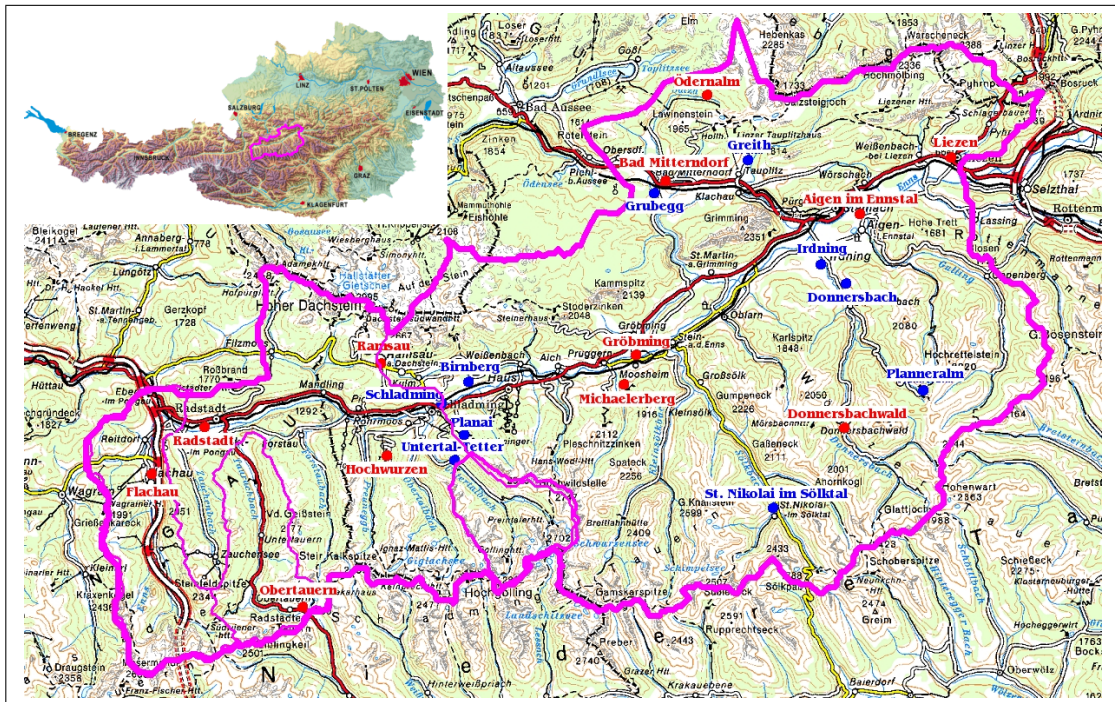


Abbildung 3.1: Verwendete Niederschlagsmessstellen in Einzugsgebiet Liezen; rot: Stundenbasis, blau: Tagesbasis

3.2 Abflussdaten

Für den untersuchten Zeitraum waren Ganglinien der Durchflüsse von insgesamt fünf Pegelmessstellen des Hydrographischen Dienstes Steiermark und Salzburg vorhanden. Die Tabelle 3.3 auf Seite 14 zeigt die Liste aller Pegel von denen die Messungen verfügbar sind.

Für alle elf ausgewählten Ereignisse sind die Messungen von den Pegeln Schladming und Liezen vorhanden. Ab dem Jahr 2000 gibt es zusätzlich noch die Daten von folgenden Pegeln: Altenmarkt im Pongau, Löbenau und Tetter. Das ermöglicht eine weitere Feingliederung des Schladming Einzugsgebiets.

Für das kleine Einzugsgebiet des Pegels Tetter am Untertaler Bach sind die Niederschlagsdaten von nur einer Messstelle (Untertal Tetter) am unteren Rand des Gebiets mit der Tagesauflösung verfügbar. Das reicht nicht für die Ermittlung des gewichteten Gebietsniederschlags auf Stundenbasis. Aus diesem Grund ist das Einzugsgebiet aus der Modellierung ausgeschlossen und es wird als Bestandteil des Einzugsgebiets Schladming betrachtet. Mit einer Fläche von 65.2 km² gehört es zu den kleineren Einzugsgebieten und dessen Ausschluss beeinflusst nicht wesentlich die gewonnenen Modellparameter für Schladming.

Der Pegel Liezen (Röthelbrücke) ist stark durch den Kraftwerkbetrieb der Speicher im Oberlauf der Enns betroffen. Als tiefstgelegener Pegel hat er große Wichtigkeit für die Kalibrierung der Daten und aus diesem Grund wurde der Pegel verwendet.

Die Abbildung 3.2 auf Seite 13 gibt die räumlichen Positionierungen aller Pegelmessstellen.

| ID | Nummer | Name | Stundensummen | Tagessummen |
|----|--------|------------------------|---------------|-------------|
| 1 | 105908 | Flachau | ab 01/2000 | |
| 2 | 105924 | Obertauern | ab 01/2000 | |
| 3 | 11147 | Radstadt | ab 01/1991 | |
| 4 | 11351 | Ramsau | ab 01/1991 | ab 01/1990 |
| 5 | 196204 | Hochwurzen | ab 01/2000 | |
| 6 | 105957 | Untertal-Tetter | | ab 01/1961 |
| 7 | 105973 | Planai | | ab 01/1961 |
| 8 | 105965 | Schladming | ab 01/2006 | ab 01/1961 |
| 9 | 106633 | Birnberg | | ab 01/1994 |
| 10 | 105999 | Michaelerberg | ab 01/2003 | |
| 11 | 106047 | Gröbming | ab 01/1991 | ab 01/1961 |
| 12 | 106005 | St.Nikolai im Sölkatal | | ab 01/1961 |
| 13 | 106500 | Donnersbachwald | ab 01/2002 | |
| 14 | 106567 | Planneralm | | ab 01/1988 |
| 15 | 106062 | Donnersbach | | ab 01/1961 |
| 16 | 106070 | Irdning | | ab 01/1961 |
| 17 | 106021 | Grubegg | | ab 01/1961 |
| 18 | 106039 | Bad Mitterndorf | ab 01/1991 | ab 01/1971 |
| 19 | 196003 | Ödernalm | ab 01/2000 | |
| 20 | 106641 | Greith | | ab 01/1994 |
| 21 | 106104 | Aigen im Ennstal | ab 01/1991 | ab 01/1971 |
| 22 | 106112 | Liezen | ab 06/1985 | |

Tabelle 3.1: Liste aller verfügbaren Niederschlagsmessstellen im Einzugsgebiet Liezen

Die gemessenen Durchflüsse haben 1/4-stündliche Auflösung, wurden aber auf 1-stündliche umgerechnet, damit die Kompatibilität mit den Niederschlagsdaten erreicht werden konnte. Die Umrechnung der Daten ist mit dem Programm Reformat, Version 3.0 von Ulrike Drabek durchgeführt. Das Programm ermöglicht noch sowohl die Mittelwertbildungen für verschiedene Zeitintervalle als auch Interpolation fehlender Werte. Es ist auch möglich die Niederschlagsdaten in gleicher Weise umzurechnen.

In der Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite sind die Verläufe der Ganglinien der beobachteten Pegel für das Jahr 2001 dargestellt. Dies wäre ein typisches Jahr fürs oberen Ennstal. In den Wintermonaten sind charakteristisch sehr niedrige Durchflüsse als Folge der niedrigeren Temperaturen und stabiler Schneedecke. In März beginnt die Schneeschmelze, aber die Niederschläge sind noch immer Seltenheit. Die Schneeschmelze dauert bis zum Sommer und hat zur Folge hohe Bodenfeuchtigkeit, was im Fall eines intensiven Niederschlags zu Hochwasser führen könnte. Die Hochwässer sind jedoch für Sommer- und Herbstmonate typisch. Im Spätherbst ziehen sich die Wasserstände zurück, da die Temperatur wieder fällt und eine neue Schneedecke sich bildet.

Im langjährigen Durchschnitt entfällt 68 % des gesamten Jahresabflusses auf Sommerabfluss (1. April - 30. September) und nur 32 % auf den Winter (Ennskraftwerke AG, 1956 [5]).

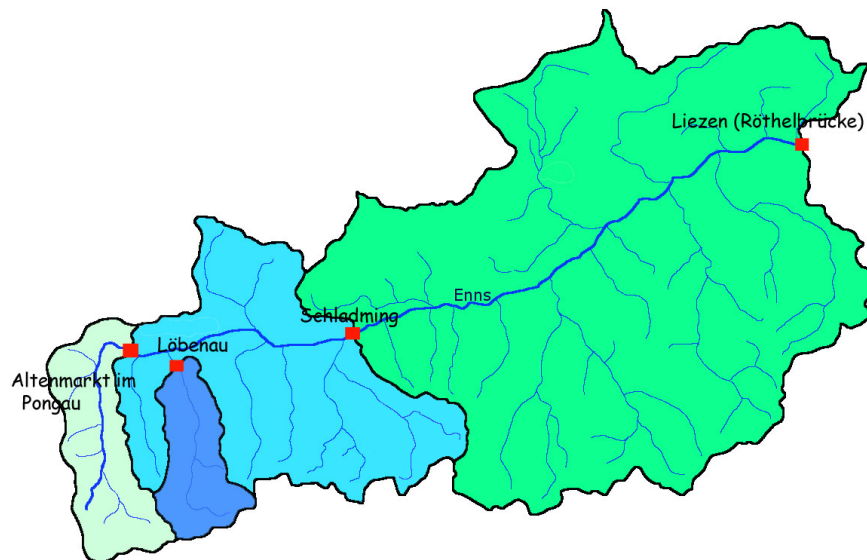


Abbildung 3.2: Untersuchte Pegel im Einzugsgebiet Liezen

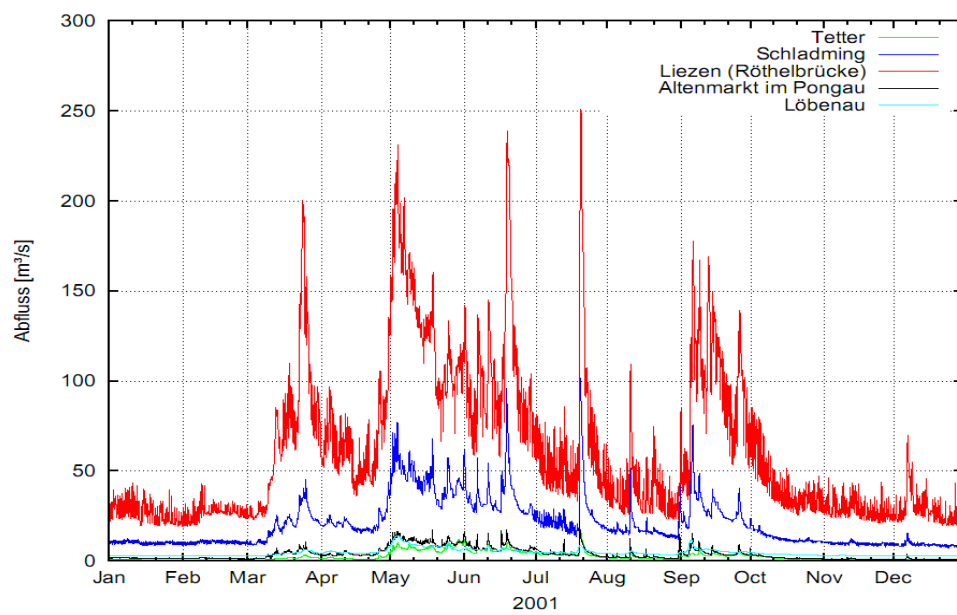


Abbildung 3.3: Registrierte Abflussganglinien für das Jahr 2001

| Ereignisse | Flachau | Obertauern | Radstadt | Ramsau | Hochwurzen | Michaelerberg | Gröbming | Donnersbachwald | Bad Mitterndorf | Ödernalm | Aigen im Ennstal | Liezen |
|-----------------|---------|------------|----------|--------|------------|---------------|----------|-----------------|-----------------|----------|------------------|--------|
| Juni 1995 | | | x | x | | | x | | x | | x | x |
| Oktober 1996 | | | x | x | | | x | | x | | x | x |
| Juli 1997 | | | x | x | | | x | | x | | x | x |
| September 1998 | | | x | x | | | x | | x | | x | x |
| Juli 1999 | | | x | x | | | x | | x | | x | x |
| Juli 2001 | x | x | x | x | x | | x | | x | x | x | x |
| März 2002 | x | x | x | x | x | | | | x | x | x | x |
| August1 2002 | x | x | x | x | x | | | x | x | x | x | x |
| August2 2002 | x | x | x | x | x | | | x | x | x | x | x |
| Septempber 2003 | x | x | x | x | x | x | | x | x | x | x | x |
| Juni 2004 | x | x | x | x | x | x | | x | x | x | x | x |

Tabelle 3.2: Datenverfügbarkeit der Niederschlagsstationen mit Stundenauflösung für untersuchte Ereignisse

| HZB-Nummer | Messstelle | m ü. A. | Fläche [km ²] | Gewässer |
|------------|-----------------------|---------|---------------------------|-----------------|
| 203711 | Altenmarkt im Pongau | 838 | 134.5 | Enns |
| 210641 | Schladming | 724.8 | 648.8 | Enns |
| 210799 | Liezen (Röthelbrücke) | 627 | 2116.2 | Enns |
| 203737 | Löbenau | 835 | 86.5 | Taurach |
| 210625 | Tetter | 1019 | 65.2 | Untertaler Bach |

Tabelle 3.3: Liste der verfügbaren Pegel

3.3 Betrachtete Ereignisse

Es wurden insgesamt 11 Ereignisse aus dem Zeitraum zwischen Januar 1995 und Dezember 2004 untersucht. Ein Kriterium bei der Auswahl war die Höhe der Abflussspitze bzw. das gesamte Abflussvolumen, weiter hat man versucht Ereignisse mit unterschiedlichen Bedingungen bezüglich Feuchte- bzw. Trockenzustandes des Bodens am Beginn des Ereignisses auszuwählen. Dementsprechend decken die Ereignisse alle Jahreszeiten ab, außer Winter. die meisten geschahen aber im Sommer (Juli).

Es folgt ein Überblick und kurze Beschreibung aller untersuchten Ereignisse mit entsprechender Isohyetenkarte. Die Isohyetenkarte ist eine Höhenlinienkarte, welche die räumliche Verteilung der Niederschlagssummen aller vorhandenen Messstellen für ein Ereignis zeigt. Sie sind im Programm 3D Field von Vladimir Galouchko erstellt (<http://field.hypermart.net/>). Die verwendete Methode für die Interpolation zwischen den Stationen ist Kriging.

Kriging ist ein Interpolationsverfahren, das die räumliche Prognose von Werten für Raumeinheiten an Orten wo sie nicht gemessen sind ermöglicht. Das Ziel ist es einen unbekanntem Wert Z_0^* an einem bekannten Ort X_0 zu bestimmen bzw. zu schätzen:

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \alpha_0^i \cdot Z_i$$

- Z_0^* gesuchter Wert am Ort X_0 (Koordinaten bekannt)
- Z_i Messwerte die bekannt sind
- α_0^i Gewichtungen der Messwerte

Die Gewichtungen sind auf den Ort X_0 bezogen und sie dienen zum Erreichen einer optimalen Schätzung. Deren Summe ist gleich 1. Die Methode ist besonders für die Optimierung und die Analyse von Messnetzen geeignet (Rosner, 2008 [21]).

Für das erste Ereignis ist die Karte anschließend dargestellt, für alle andere im Anhang A am Ende dieser Arbeit.

Juni 1995 (25.06.-28.06.): Das Ereignis von 26. Juni 1995 dauerte beinahe 3 Tage. Es folgte einem Vorregen am 23. Juni. Das Niederschlagsmaximum wurde in Ramsau gemessen und betrug 81.6 mm. Die Isohyetenkarte von diesem Ereignis zeigt die Abbildung 3.4. In der nördlichen Seite des Gebiets sind höhere Niederschlagssummen gemessen. Die Gradientenrichtung läuft parallel zur Talrichtung. Am Pegel Liezen (Röthelbrücke) erreichte die Abflussspitze 301.6 m³/s.

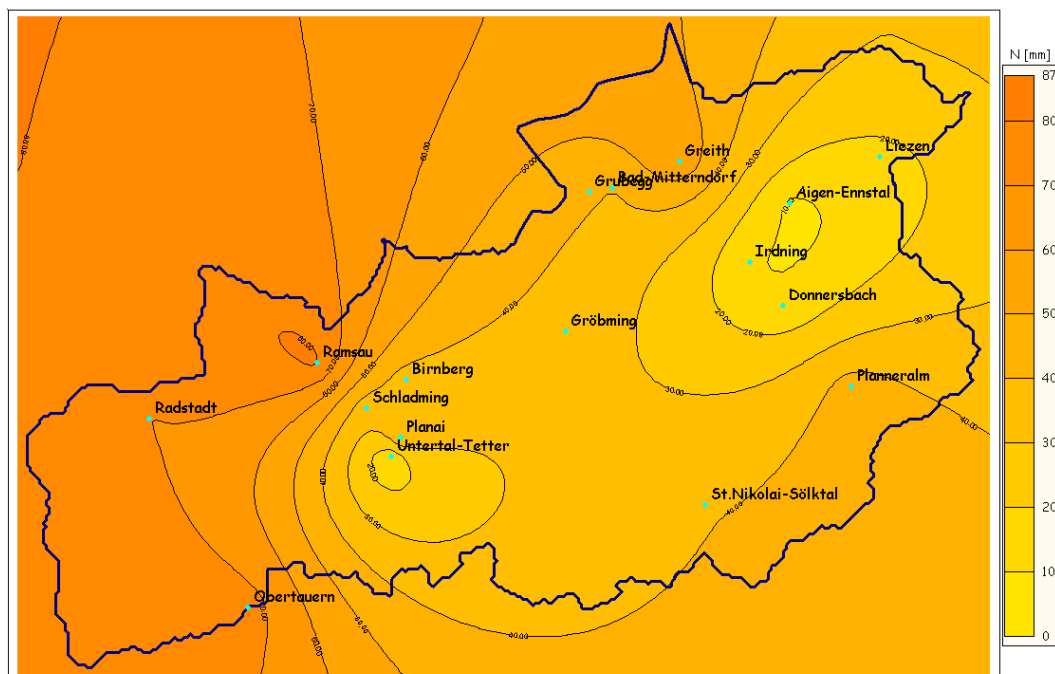


Abbildung 3.4: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juni 1995 (25.06.-01.07)

Oktober 1996 (20.10.-25.10): Am 22. Oktober 1996 erreichte der gemessene Abfluss am Pegel Liezen (Röthelbrücke) $476.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Nach einer längeren Trockenperiode wurde nach drei Tagen mit einer zunehmenden Regenintensität die maximale Niederschlagshöhe an der Station Greith festgestellt (122.8 mm). Wie beim Ereignis von Juni 1995 ist aus der Karte sichtbar, dass die nördliche Talseite die Zone intensiver Niederschläge darstellt, s. Anhang 1. Jedoch ist beim Oktober 1996 Ereignis die Zone des Maximums in Richtung Nordost verschoben. Die Gradientenrichtung folgt wieder der Talrichtung, also sie verläuft in Südwest-Nordost Richtung. In niedrigeren Talgebieten, näher zu der Enns, wurden in beiden Fällen niedrige Niederschlagssummen registriert.

Juli 1997 (07.07.-10.07): Im Juli 1997 dauerte das Ereignis beinahe vier Tage und am 8. Juli erreichte der Durchfluss einen Höchstwert von $379 \text{ m}^3/\text{s}$ am Liezen (Röthelbrücke). Am 6. Juli passierte der erste schwächere Scheitelpunkt. Mitte und Ende Juni gab es auch immer wieder Regen niedriger Intensität und aus diesem Grund war der Basisabfluss am Anfang des Ereignisses relativ hoch ($170 \text{ m}^3/\text{s}$ in Liezen). Am meisten Regen hat das Messgerät von Greith erfasst, und zwar 110 mm. Die Gradienten verfolgen die Talrichtung.

September 1998 (05.09.-07.09): Das Ereignis von 06. September 1998 dauerte etwa zwei Tage und ihm folgte eine längere Periode ohne Niederschläge. Der Abflussspitz am Liezen betrug $356.7 \text{ m}^3/\text{s}$, das Niederschlagsmaximum im Einzugsgebiet 62.5 mm und wurde wieder in Greith gemessen. Diesmal wurden auch auf der südöstlichen Talflanke erhöhte Niederschlagshöhen gemessen, an den St. Nikolai im Sölketal und Planneralm Stationen. Die Niederschlagssummen sind im Allgemein gleichmäßiger über das ganze Einzugsgebiet verteilt.

Juli 1999 (22.07.-26.07): Nach sehr niederschlagsarmen Wochen fand am 23. Juli 1999 ein Hochwasserereignis statt. Ihm folgte ein Vorregen kleiner Intensität am 21. Juli. Der Abflussspitz in Liezen erreichte $405.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Regenfront kam aus dem Süden und die Messstelle Planneralm wies ein NS-Maximum von 89 mm auf.

Juli 2001 (19.07.-23.07.): Ende Juli 2001 dauerte das Ereignis beinahe vier Tage und am 20. Juli erreichte der Pegel Liezen (Röthelbrücke) den Wert von $250.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Die gemessenen Niederschlagshöhen weisen drei Zonen von Starkregen auf: Radstadt, Greith und Planneralm, wobei das Maximum von 89.3 mm der Station am Planneralm zugeordnet ist. Wiederum wurden in niederen Talebenen kleinere Niederschlagssummen gemessen. Die Gradienten verlaufen in Talrichtung.

März 2002 (19.03.-27.03.): Das Ereignis vom Ende März 2002 hat sieben Tage gedauert. Nach ergiebigen mehrtägigen Niederschlägen zeichnete der Pegel in Liezen $375.8 \text{ m}^3/\text{s}$ am 22. März auf. Da die registrierten Temperaturwerte nicht vorhanden sind, ist es schwer, den Anteil der Schneeschmelze zu bestimmen. Es wird angenommen, dass der ganze Niederschlag aus der Atmosphäre stammt. Die Isohyetenkarte zeigt wieder drei Pole höheren Summen: Ramsau, Greith und Planneralm. Das Maximum von 240 mm gehört jedoch wieder der Station in Greith. Am wenigstens hat es im Einzugsgebiet vom Tetter geregnet.

August 2002 - Die erste Welle (06.08.-10.08.): Nach einigen Wochen ohne Niederschlag fing es am 06. August 2002 an zu regnen. Das verursachte die erste Hochwasserwelle des August Ereignisses. Der Pegel registrierte am 07. August um 20 Uhr einen Durchfluss von $176 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Zentren der hohen Niederschlagssummen waren, ähnlich wie im März

2002, Ramsau, Greith und Planneralm (90.5 mm). Der Niederschlag endete am 09. August.

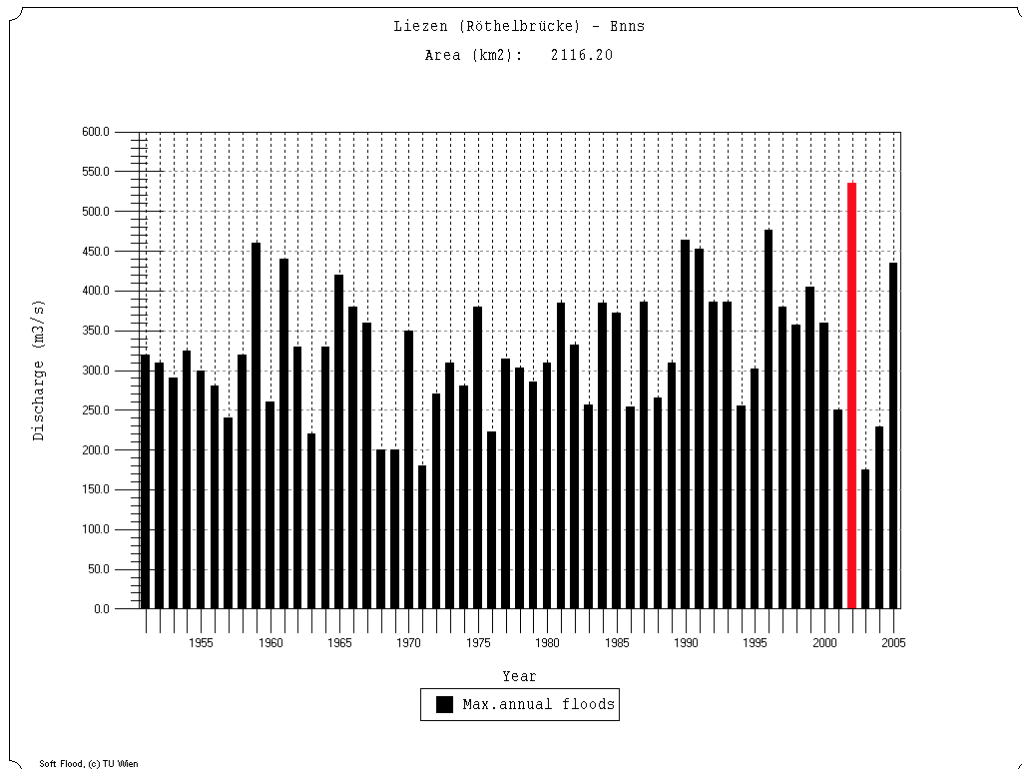


Abbildung 3.5: Histogramm der maximalen jährlichen Durchflüsse im Zeitraum 1951-2005 für den Pegel Liezen (Röthelbrücke)

August 2002 - Die zweite Welle (11.08.-17.08.): Am 13. August 2002 um 15 Uhr hat die Enns am Pegel Liezen den katastrophalen Wert von $535.6 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht. Das Ereignis dauerte etwa sechs Tage und es folgte einem Blockregen vom 06. August (s. oben). Am 11. August fing es nach zwei Tagen Pause wieder an zu regnen und der Regen dauerte die nächsten drei Tage. Durch die Vorbefeuchtung und den dauernden Niederschlag, war die Reaktion des Einzugsgebiets sehr intensiv und rasch, obwohl die gemessene Niederschlagshöhen nicht allzu hoch sind im Vergleich mit ähnlichen Ereignissen. Eine Front des Überregens bildete sich auf der Richtung Planneralm - Ödernalm, das Maximum wurde aber in Irdning gemessen (148 mm).

Die statistische Analyse der maximalen registrierten jährlichen Durchflüsse am Pegel Liezen (Röthelbrücke) haben bestätigt das Ausmaß des Hochwassers vom 13. August 2002. Die Abbildung 3.5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der maximalen jährlichen Durchflüsse für den Zeitraum von 1951-2005 für den Pegel in Liezen. Die Säule vom August 2002 Hochwasser ist mit rot gezeichnet. In der Abbildung 3.6 auf der nächsten Seite sind Jährlichkeiten für verschiedene Verteilungen für denselben Pegel dargestellt. Nach den Pearson III und GEV Verteilungen überschreitet es den HQ_{100} . Ähnlich ist das Ergebnis für das Einzugsgebiet von Schladming (Abbildung 3.7). Die Analyse ist mit dem Programm *Soft Flood*, das von Blöschl und Merz am Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der TU Wien entwickelt wurde, durchgeführt.

3 Analyse der ausgewählten historischen Ereignisse

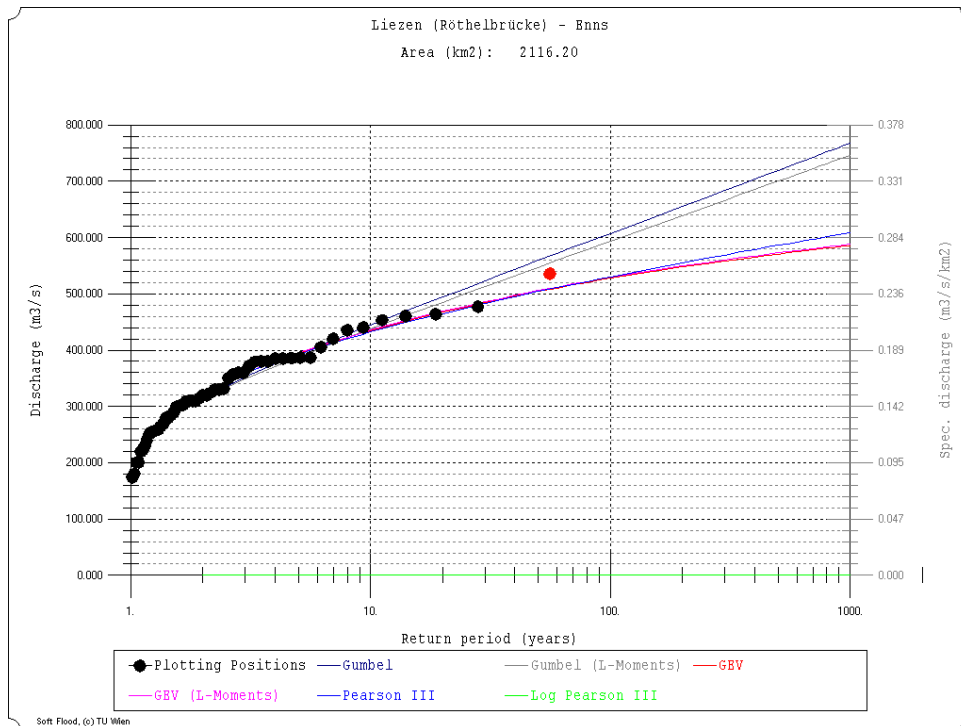


Abbildung 3.6: Jährlichkeiten der maximalen jährlichen Durchflüsse für die Reihe 1951-2005; Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

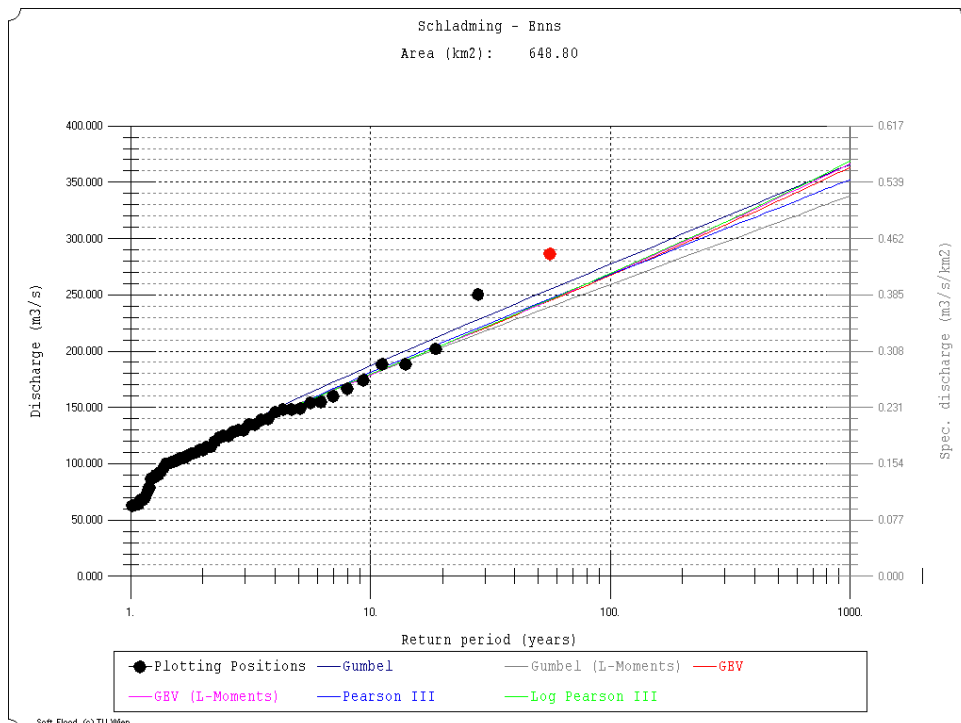


Abbildung 3.7: Jährlichkeiten der maximalen jährlichen Durchflüsse für die Reihe 1951-2005; Pegel: Schladming

September 2003 (11.09.-17.09.): Nach einem Sommer mit häufigen Niederschlägen kurzer Dauer, regnete es endlich ab 9. September 2003 ergiebiger und dieses Ereignis dauerte insgesamt sechs Tage. Weil die Regenintensität ziemlich niedrig war (max 3.5 mm/h), erreichte der Durchfluss in Liezen erst 161.7 m³/s. Die höheren Niederschlagsmengen wurden im Norden des Einzugsgebiets registriert. Diesmal hat es am meisten im Bereich der Station Ramsau geregnet, 80.5 mm insgesamt.

Juni 2004 (11.06.-15.06.): Der Hauptblockregen von Juni 2004 dauerte 24 Stunden. Danach wurden noch drei Tage niedrigere Niederschläge gemessen, was die Steilheit des absteigenden Astes stark beeinflusste. Zum Beginn hatte das Ereignis einen höheren Basisabfluss, der Scheitel erreichte in Liezen dank den niedrigeren Niederschlagssummen nur 229 m³/s. Die Regenfront kam diesmal aus dem Süden und am meistens Niederschlag erfasste das Messgerät von Planneralm, 41.3 mm. Im Osten des Gebiets sind wieder niedrigere Niederschlagssummen registriert.

Teil III

Niederschlag-Abflussmodell

4 Allgemein

4.1 Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf der Erde ist die ständige Bewegung des Wassers zwischen Meer, Atmosphäre und Land, und er ist eng mit dem Klimasystem verbunden. Er bezeichnet auch die ständige Änderung vom Zustand und Ort des Wassers. Als Hauptkomponenten dieses Prozesses gelten Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Grundwasser, wobei die größte Bedeutung für das Klima Verdunstung und Niederschlag haben. Das Wasser ändert seinen Zustand, und steigt nach der Evaporation, Transpiration und Verdunstung der Wasseroberflächen als Gas in die Atmosphäre, wo es unter dem Einfluss verschiedener Faktoren (Wind, Jahreszeit, geographische Lage) transportiert wird. Es gelangt dann als Niederschlag (flüssig oder fest) auf die Erdoberfläche zurück. Der auf den Boden fallende Teil des Niederschlags verdunstet, versickert oder fließt zurück ins Meer. Die treibenden Kräfte für den Kreislauf sind die Sonnenstrahlung und die Gravitation der Erde.

4.2 Wasserkreislauf in einem Einzugsgebiet

Als Teil des globalen Wasserkreislaufes hat der Wasserkreislauf und die Wasserbilanz in einem Einzugsgebiet eigene Besonderheiten, und er ist von gebietspezifischen Faktoren abhängig. In einem Einzugsgebiet kann man zwischen zwei Komponenten des Wasserkreislaufs unterscheiden: vertikale und laterale (Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite).

Der fallende Niederschlag wird in die vertikalen (Interzeption, Verdunstung) und in die laterale (Abfluss) Komponente transformiert. Für ein geschlossenes Flussgebiet gilt:

$$h_N = h_A + h_V + \Delta h_S$$

mit:

| | | |
|--------------|------|-------------------|
| h_N | [mm] | Niederschlagshöhe |
| h_A | [mm] | Abflusshöhe |
| h_V | [mm] | Verdunstungshöhe |
| Δh_S | [mm] | Speicheränderung |

Die Niederschlagshöhe h_N setzt sich aus Regen, Schnee, Tau und Rauheif zusammen, wobei nur Regen und Schnee wesentlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt eines Gebiets haben. Die Abflusshöhe h_A kann man folgendermaßen untergliedern:

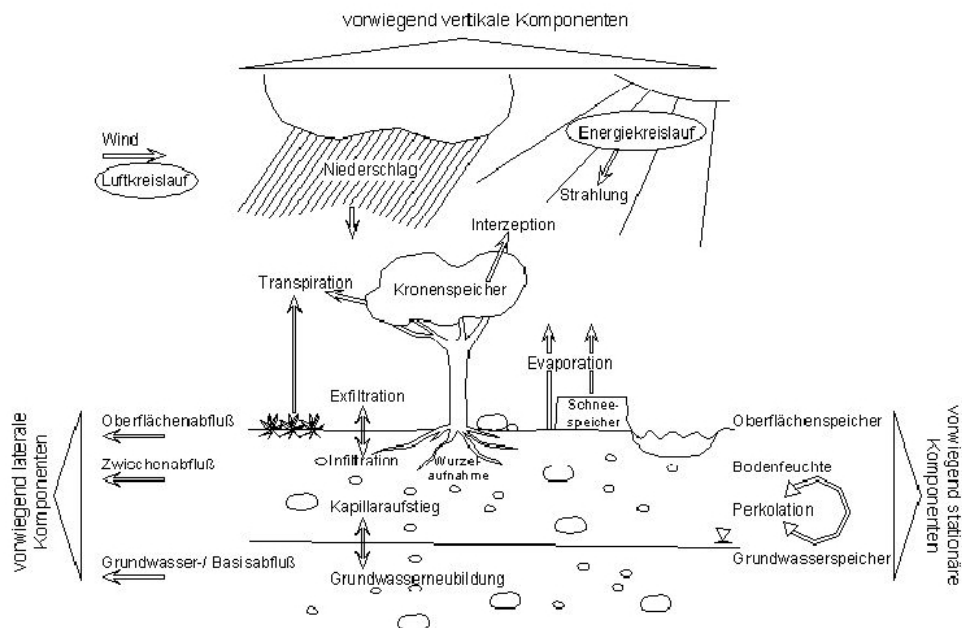


Abbildung 4.1: Wasserkreislauf in einem Einzugsgebiet (Disse 2004/2005)

$$h_A = h_{A,o} + h_{A,u} + h_{A,ue}$$

mit:

- $h_{A,o}$ [mm] oberirdische Abflusshöhe
- $h_{A,u}$ [mm] unterirdische Abflusshöhe
- $h_{A,ue}$ [mm] Wasserüberleitung

Die Verdunstungshöhe h_V besteht aus:

$$h_V = h_{E,i} + h_{E,t} + h_{E,e} + h_{E,w}$$

- $h_{E,i}$ [mm] Interzeptionsverdunstung von Pflanzenoberfläche
- $h_{E,t}$ [mm] Transpiration
- $h_{E,e}$ [mm] Evaporation
- $h_{E,w}$ [mm] Verdunstung von freier Wasseroberfläche

Die Speicherhöhe h_S :

$$h_S = h_{S,o} + h_{S,b} + h_{S,g} + h_{S,s}$$

mit:

- $h_{S,o}$ [mm] Speicherung in Oberflächenwässern
- $h_{S,b}$ [mm] Speicherung als Bodenfeuchte oberhalb des Grundwasserspiegels
- $h_{S,g}$ [mm] Speicherung im Grundwasser
- $h_{S,s}$ [mm] Speicherung als Schnee oder Eis

Alle oben genannten Komponenten können nicht ganz genau gemessen werden. Die Speicheränderung kann sowohl negativ als auch positiv sein. Wenn Δh_S null ist, gilt:

$$h_N = h_A + h_V$$

d.h. der gesamte Niederschlag wird in Abfluss und in Verdunstungskomponenten transformiert, bzw. in laterale und vertikale Komponente (Hinkelmann 2005/2006, [11]).

4.3 Abfluss

„Der Abfluss aus einem Gebiet ist das Ergebnis der Transformationen des Gebietsniederschlags durch das Einzugsgebiet.“ (Dyck/Peschke 1995)

Auf der Fläche des geschlossenen Einzugsgebiets gesammelter Abfluss wird in den Messquerschnitten im Gewässernetz durch Messung des Wasserstandes und anschließende Umrechnung in Durchfluss (Pegelschlüssel) bestimmt. Der Abfluss in einem Einzugsgebiet kann man in drei Hauptkomponenten untergliedern:

- Oberflächen- oder schneller Direktabfluss
- Zwischenabfluss oder verzögerter Direktabfluss
- Basisabfluss

Oberflächenabfluss entsteht in Einzugsgebietteilen wo die Bodenfläche gesättigt ist, sowie in urbanisierten und versiegelten Bereichen. Er kann sich bei hohem Bodenwassergehalt und wenn die Niederschlagsintensität hoch ist, auch auf größeren Teilgebieten bilden.

Den Teil des Niederschlags, der zum direkten Abfluss beiträgt, nennt man Effektivniederschlag oder kurz PEF.

Zwischenabfluss stellt die langsamere Komponente des Direktabflusses dar. Er entsteht in Bodeninneren bei Bodensättigung und in Schichten des Bodens. Er entsteht in größeren Teilen oder im ganzen Gebiet.

Basisabfluss besteht aus kurzfristigem und langfristigem Basisabfluss:

Kurzfristiger Basisabfluss bildet sich in Festgesteinen der Mittelgebirge und in Talgrundwasserleitern. Die Herkunftsräume sind gut entwässerbar und haben ein geringes Retentionsvermögen. Deshalb versiegt er in Trockenperioden.

Langfristiger Basisabfluss ist eine Basisabflusskomponente, die grundwasserbürtig ist. Der Translations- und Retentionsraum für ihn ist das Kluftsystem und die Bodenmatrix. Bei Gesteinen mit grossem Porenvolumen spielt dieses Volumen eine bedeutende Rolle als Speicherraum. Im Tiefland sind Herkunftsräume des Basisabflusses die Lockergesteins-Grundwasserleiter. In Trockenperioden bleibt der langfristige Basisabfluss die einzige fließende Abflusskomponente und ist abhängig vom Grundwasserdargebot.

Bei jedem einzelnen Einzugsgebiet sind geologische und hydrogeologische Bedingungen unterschiedlich. Aus diesem Grund muss man bei jeder Modellierung im Einzugsgebiet die Herkunftsräume der unterirdischen Abflusskomponenten genauer untersuchen und berücksichtigen.

4.4 Abflussbildung und Abflusskonzentration

Bei der Beschreibung der Abflussbildung in einem Einzugsgebiet ist die entscheidende Aufgabestellung den Effektivniederschlag bzw. den direkten Abfluss zu bestimmen. Als Ausgangsgröße dient ein Ereignisniederschlag, in vorliegender Arbeit ist er durch den Gebietsniederschlag bzw. Niederschlagshöhe und räumliche Verteilung definiert. Für Bemessungsaufgaben kann er durch Niederschlagsdauer, Intensitätsverlauf und Wiederkehrzeit festgestellt sein (Dyck und Peschke, 1995 [4]).

Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite aus der DIN 4049 zeigt die Komponenten der Abflussganglinie und Aufteilung des Niederschlags in Verluste und in den Effektivniederschlag. Der Teil A-B ist von den Vorereignissen beeinflusst. Bevor das Wasser zum Oberflächenabfluss gelangt, wird ein Teil an Interzeption und Infiltration verloren. Die Verluste sind am Beginn groß und nehmen dann ab. Der Teil B-C hängt von der Art des Niederschlags und vom Abflussvermögen des Einzugsgebiets ab. Das Maximum C steht andererseits im Zusammenhang mit der maximalen Abflusskonzentration des Einzugsgebiets. Der Ast C-D ist beeinflusst durch den Charakter des Einzugsgebiets. Der obere Teil setzt sich aus Oberflächen- und Zwischenabfluss zusammen. Nach dem Punkt D (das Ende des Hochwassersabflusses) fließt noch der Basisabfluss aus dem Einzugsgebiet. Die Form der Kurve hängt stark von Speichermöglichkeiten des Gebietes ab (Disse, 2005 [3]).

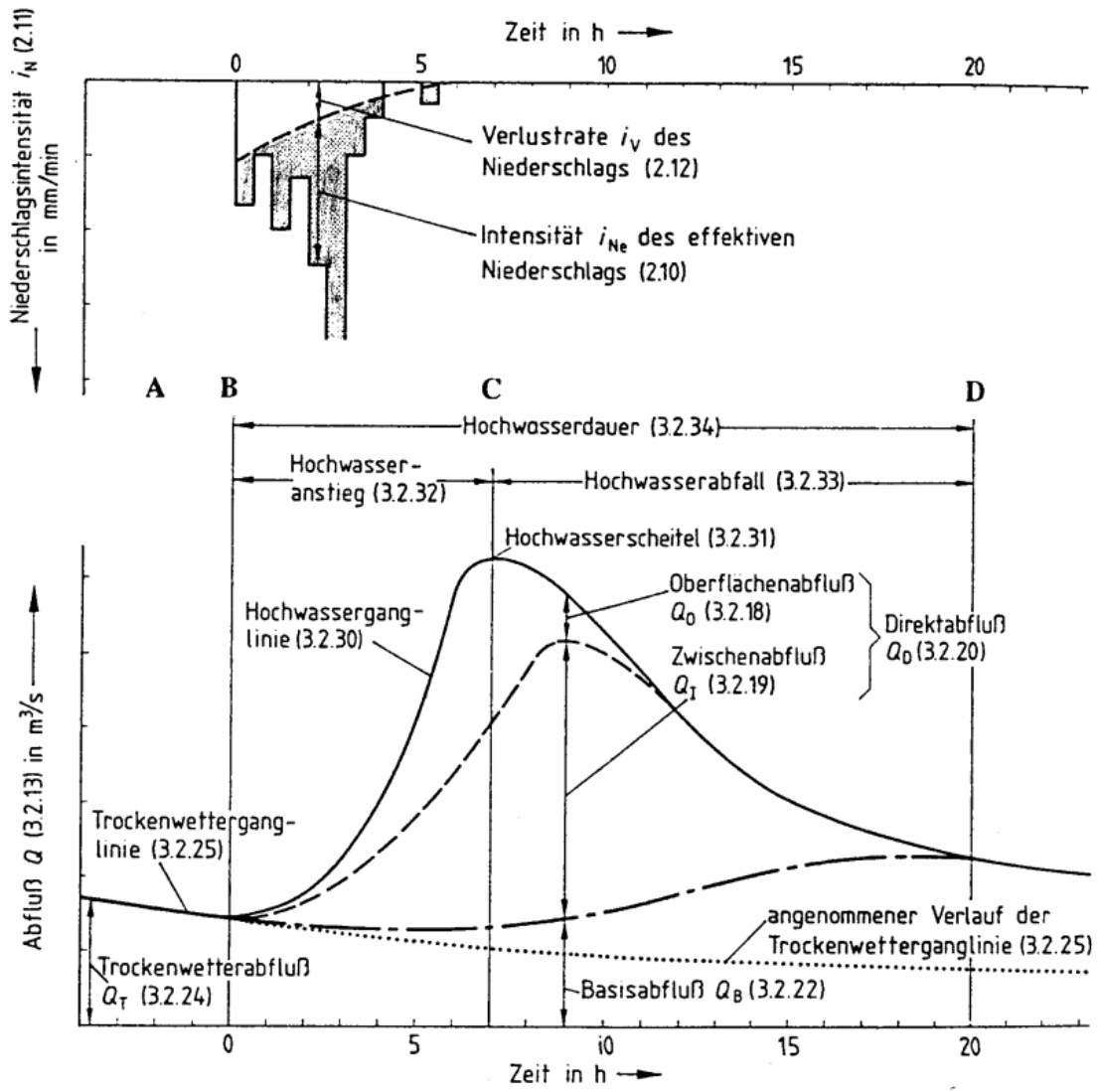


Abbildung 4.2: Abflussganglinie und Niederschlag (aus DIN 4049)

5 Modellierung der Niederschlag-Abfluss Prozesse

5.1 Modell

Die Modellierung kann man als Nachbildung der Realität verstehen. Das Modell ist eine Ansammlung der Gleichungen, die das System und sein Verhalten beschreiben sollen. Die Modellauswahl und -entwicklung steht im Zusammenhang mit den Kenntnissen über das hydrologische System, mit dem verfügbaren Datenmaterial und mit den physikalischen Merkmalen des jeweiligen Einzugsgebiets. Beim Niederschlag-Abflussmodell ist eine genaue Abbildung der realen Prozesse aufgrund ihrer Vielzahl unmöglich. Es werden deshalb nur die „wichtigen“ Prozesse erfasst und die „weniger wichtigen“ vernachlässigt. Das Modell kann also nicht alle Vorgänge der Wirklichkeit umfassen und darstellen.

Im Allgemeinen bindet ein Modell etwas Unbekanntes (Ausgang) mit etwas Bekanntem (Eingang). Bei den Niederschlag-Abflussmodellen ist der Input der Niederschlag oder der Abfluss des oberen Pegels und der Output ist der Abfluss bzw. der Abfluss des unteren Pegels (Feldman, 2000 [6]).

Sie können in drei Hauptgruppen gegliedert werden:

- Modelle auf physikalischer Basis
- Konzeptmodelle
- Black-Box Modelle

Modelle auf physikalischer Basis nutzen als Grundlage die physikalischen Gesetze. Aus diesem Grund sind viele sowohl geometrische als auch hydraulische Messwerte (Fließbeiwert, Gerinnencharakteristiken usw.) dafür notwendig. Sie sind nicht geeignet für die räumliche und komplexe Abflussentwicklungen in Einzugsgebieten, weil viele Inputdaten benötigt sind und der Rechenaufwand riesig ist. Die Anwendung finden sie zB. bei der Berechnung der stationären Gerinneströmung.

Bei der Konzeptmodellen kommen vereinfachte physikalische Konzeptionen zur Anwendung. Das Modell wird durch weniger Parameter als bei den physikalischen Modellen beschrieben. Eine grobe Modellvorstellung bietet keine Übereinstimmung vom realen System mit dem Modell und seinen Parametern, sondern nur Beziehungen. Die Parameter gewinnt man aus den hydraulischen und geometrischen Daten oder mittels der Eichung der beobachteten Abflussdaten. Es hat begrenzte Anwendung bei der Beschreibung von Systemen wo Durchfluss, Transport und Beschaffenheit in Kombination auftreten, sind aber geeignet für Niederschlag-Abflussmodellierung komplexer Einzugsgebieten, was in der vorliegenden Arbeit der Fall ist.

Black-Box Modelle berücksichtigen nicht die physikalischen Grundlagen des Systems. Es werden nur die mathematischen Beschreibungen nach den systemtheoretischen Methoden verwendet. Die beobachteten und Ausgangsgrößen ermöglichen Eichung der Parameter. Das Modell allein wird durch empirische Systemparameter dargestellt (Bárdossy, 2003/2004 [2]).

5.2 HEC-HMS

Das HEC-HMS Programm wurde vom Hydrologic Engineering Center (HEC) des US Army Corps of Engineers entwickelt. Es ist ein Teil des HEC Next Generation Software Development Project. Außer HEC-HMS gibt es eine Reihe von Softwarepaketen, die alle kostenlos auf der Webseite der US Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil/>) zur Verfügung gestellt sind. Unter anderen findet das Paket für hydraulische Berechnungen in offenen Gerinnen (HEC-RAS) oft in der Praxis Anwendung. Zurzeit gibt es zum Download eine Version des HEC-HMS für Windows und Solaris Plattformen, ab dem Jahr 2009 soll auch diejenige für Linux bereit sein. Die Funktionalität und die Vorgehensweise der jeweiligen Versionen sind gleich für alle Plattformen.

Es gibt auch eine umfangreiche Dokumentation für das Software Paket. Sie befindet sich sowohl in Help vom Programm als auch auf der Webseite als Download. Es werden sowohl die Funktionen und Vorgehensweisen des Programms erläutert, als auch mathematische Beziehungen und Methoden die angewendet sind.

Bei dem HEC-HMS handelt es sich um ein Konzeptmodell, d.h. es gibt keine Übereinstimmung zwischen realen System und Modellparameter (nur Beziehungen). Die Niederschlag-Abfluss und Wellenlauf Prozesse werden simuliert, sowohl in bestehenden als auch in generierten Einzugsgebieten. Die Parameter gewinnt man durch Kalibrierung. Es deckt einen breiten Anwendungsbereich, von Simulieren der Wasserversorgung und Hochwasser in großen Flusseinzugsgebieten, bis zum Abfluss aus kleinen natürlichen oder urbanen Einzugsgebieten. Geeignet ist es auch für Modellierung der verzweigten Einzugsgebiete mit vielen Elementen (Scharffenberg und Fleming, 2006 [22]).

Für die Bestimmung und Kalibrierung der Parameter in dieser Arbeit wurde die Version 3.1.0 aus dem November 2006 benutzt. Das Programm besitzt eine graphische Benutzeroberfläche, die einfaches Wechseln zwischen verschiedenen Komponenten ermöglicht (s. Abbildung 5.1 auf der nächsten Seite). Die Elemente des Programms sind: Databasis, Werkzeuge für die Eingabe von Daten, rechnerisches Engine und Werkzeuge für die Darstellung der Ergebnisse.

Die drei Hauptkomponenten des Programms sind:

- Basin Model
- Meteorological Model
- Control Specifications

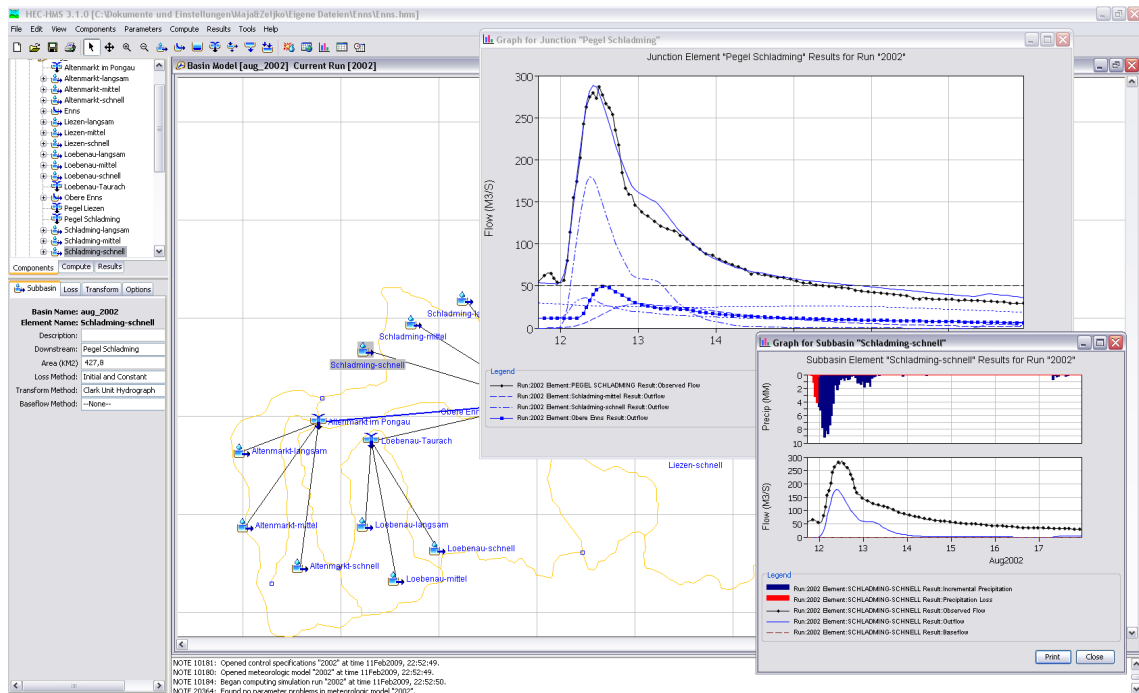


Abbildung 5.1: Graphische Benutzeroberfläche von HEC-HMS, Version 3.1.0

5.2.1 Basin Model

Es dient der Definition der physikalischen Charakteristiken des Einzugsgebiets. Das wird erreicht indem man die verschiedenen hydrologischen Elemente, die ein Einzugsgebiet bilden, verbindet. Diese Elemente sind:

Subbasin (Einzugsgebietmodell): beschreibt das physikalische Einzugsgebiet selber. Aus dem bekannten Niederschlag wird, nach Abzug der Verluste und Addieren von Basisabfluss, der Abfluss am Gebietsauslass gererchnet. Er verfügt über keinen Zufluss.

Junction (Zusammenfluss): berechnet der Abfluss aus einem oder mehreren Zuflüssen der oberhalb liegenden hydrologischen Elemente. Die werden einfach summiert, es gibt keine Speicherung oder Verluste.

Diversion (Ausleitung): im Gegenteil zum Junction, es teilt den Zufluss in zwei Abflüsse auf. Es kann zB. bei der Definition eines Schwellenwertes des Zuflusses für die Ausuferung verwendet werden, d.h. es wird dann aktiviert wenn Zufluss einen bestimmten Wert erreicht.

Reach (Gerinnestrecke): verbindet die Zuflüsse aus den hydrologischen Elementen und transportiert sie weiter ins neue Element des Einzugsgebiets. Der Abfluss ist gleich der Summe der Zuflüssen minus Verluste. Es kann für die Modellierung von Flussstrecken verwendet werden.

Sink (Senke): hat einen oder mehrere Zuflüsse aber keinen Abfluss. Es zeigt derjenige Anteil des gesamten Abfluss, der in einem Einzugsgebiet oder Zwischengebiet verloren geht.

Source (Quelle): ist Gegenteil vom Sink. Er hat nämlich nur Abfluss und keine Zuflüsse. Der Abfluss ist vom Benutzer des Programms zu definieren. Er kann entweder ein konstanter Zufluss oder eine Gangline sein. Der Abfluss kann also außer Source noch mit dem Element Subbasin ins Einzugsgebiet gebracht werden.

Reservoir (Speicherbecken): modelliert Speicher (Teiche, künstliche Speicher usw.) und Seen in einem Gebiet. Über eine Speicher-Abfluss Beziehung kann der Abfluss bestimmt werden. Es kann mehrere Zuflüsse geben.

Es sind für alle wichtigsten Elemente zahlreiche Methoden, die jeweiligen Funktionen beschreiben, im Programm angeboten. Auf sie wird es im Folgenden für Einzugsgebiets- und Gerinnenstreckemodell näher eingegangen.

Subbasin

Das Subbasin (Einzugsgebietmodell) berechnet die Transformation der Niederschläge in Abfluss innerhalb eines Einzugsgebiets. Darunter versteht man sukzessive Modellierung von: *Abflussbildung (Loss)*, *Abflusskonzentration (Transform)* und *Basisabfluss (Baseflow)*.

Das Programm betrachtet den Boden im Einzugsgebiet entweder als ganz undurchlässig oder durchlässig. Im zweiten Fall ist der Anteil des undurchlässigen Bodens in Prozente einzugeben. Beim undurchlässigen Boden gibt es keine Verluste und der gesamte Niederschlag wird in den Abfluss umgewandelt. Beim durchlässigen gibt es verschiedene Verluste (Infiltration, Evaporation u.a.) und für die Abflussbildung bzw. für die Ermittlung vom Effektivniederschlag in diesem Fall stehen im Programm folgende 10 Methoden zur Verfügung:

- Deficit and Constant (Anfangsdefizit und konstante Verlustrate)
- Exponential Loss (exponentielle Verluste)
- Green and Ampt (Green and Ampt Verfahren, 1911)
- Gridded Deficit Constant (konstante Defizit auf Rasterbasis)
- Gridded SCS Curve Number (CN-Kurven Nummer Verfahren auf Rasterbasis)
- Gridded Soil Moisture Accounting (Bodenfeuchtigkeit Verfahren auf Rasterbasis)
- Initial and Constant (Anfangsverlust und konstante Verlustrate)
- SCS Curve Number (CN-Kurven Nummer Verfahren)
- Smith Parlange (Smith Parlange Verfahren)
- Soil Moisture Accounting (Bodenfeuchtigkeit Verfahren)

Für die Modellierung der Abflusskonzentration bietet HEC-HMS zwei Modellierungsvarianten: Empirische- und Konzeptmodelle.

Die empirischen oder System-theoretischen Modelle basieren auf das traditionelle UH (Unit Hydrograph - Einheitsganglinie) Modell. Bei ihnen wird nicht detailliert auf die physische Prozesse im Einzugsgebiet eingegangen, sondern es wird versucht direkten Zusammenhang zwischen dem Effektivniederschlag und dem Abfluss herzustellen, Abbildung 5.2 auf der nächsten Seite:

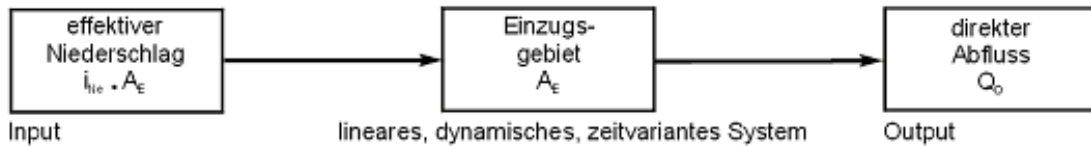


Abbildung 5.2: Das Einheitsganglinienverfahren (Bárdossy 2003/2004)

Das Programm bietet verschiedene Varianten des UH-Verfahrens:

- Snyder Unit Hydrograph
- Clark Unit Hydrograph (Clark Verfahren)
- ModClark (Modifiziertes Clark Verfahren)
- SCS Unit Hydrograph
- User-specified S-Graph (Selbst definierter S-Graph)
- User-specified Unit Hydrograph (Selbst definierter UH)

Als Alternative zu den empirischen Methoden steht das Konzeptmodell der Abflusskonzentration. Im HEC-HMS ist es durch Kinematic Wave (kinematische Welle) vertreten. Das Einzugsgebiet wird als ein großes breites Gerinne betrachtet. Der Zufluss ins Gerinne ist der effektive Niederschlag. Danach beschreiben die Hauptgleichungen der Strömungen in offenen Gerinnen (die Gleichung der Kontinuität und die Gleichung des Moments) Bewegung des Wassers durch das Einzugsgebiet und Abfluss am Gebietsauslass.

Zwei Hauptkomponenten einer Ganglinie sind der direkte Abfluss und der Basisabfluss, Abbildung 4.2 auf Seite 25. Für die Modellierung vom Basisabfluss sind im Programm folgende fünf Modelle angeboten:

- Constant Monthly (konstanter monatlicher Basisabfluss)
- Exponential Recession (exponentielle Rezession)
- Linear Reservoir Model (linearer Speicher)
- Bounded Recession (Rezession)
- Nonlinear Boussinesq (nicht-lineares Boussinesq)

Reach

Das Element Reach (Gerinnestrecke) wird zur Modellierung der Wellenfortpflanzung in offenen Gerinnen verwendet. Es stehen sechs verschiedene Modelle zur Verfügung:

- Kinematic Wave (kinematische Welle)
- Lag (Laufzeitunterschied)
- Modified Puls
- Muskingum
- Muskingum-Cunge
- Straddle Stagger

Jede von diesen Methoden berechnet die Ganglinie des Abflusses flussabwärts, wobei die Ganglinie flussaufwärts die Grenzbedingung ist. Das wird erreicht durch Lösen der zwei St. Venantsche Gleichungen der dynamischen Welle Feldman, 2000 [6]):

Die *Bewegungsgleichung*:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

Mit:

| | |
|---|------------------------------|
| S_f | Energiegefälle |
| S_0 | Gefälle des Gerinnebodens |
| V | Geschwindigkeit |
| y | hydraulische Tiefe |
| x | Abstand in die Fließrichtung |
| t | Zeit |
| g | Gravitationsbeschleunigung |
| $\frac{\partial y}{\partial x}$ | Druckgefälle |
| $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$ | konvektive Beschleunigung |
| $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$ | lokale Beschleunigung |

Und die *Kontinuitätsgleichung*:

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + V B \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q$$

Mit:

| | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| $A \frac{\partial V}{\partial x}$ | prismatische Speicherung |
| $VB \frac{\partial y}{\partial x}$ | Keilspeicherung |
| $B \frac{\partial y}{\partial t}$ | Zunahme des Zuflusses |
| B | Breite des Gerinnes |
| q | seitlicher Zufluss per Längeneinheit |

5.2.2 Meteorological Model

Das meteorologische Modell berechnet den Input von Niederschlägen in ein Einzugsgebiet. Es können sowohl punktuelle als auch Niederschlagsdaten auf Rasterbasis eingegeben werden. In dieser Version ist es möglich flüssige und gefrorene Niederschläge mit begleitender Evapotranspiration in Betracht zu nehmen. Ein Modell, das Schneeschmelze auch bestimmen kann, wird für die künftigen Versionen entwickelt. Für die Modellierung mehrerer Ereignisse über einem längeren Zeitraum wird ein Evapotranspiration Modell benötigt.

Es stehen mehrere Methoden für die Berechnung des Gebietsniederschlages zur Verfügung. In vorliegender Arbeit ist die Gage Weights (Stationengewichtung) Methode verwendet.

5.2.3 Control Specifications

Es dient zur Festlegung der Zeitspanne für entsprechende Simulation. Einzugeben in diese Komponente sind Beginn und Ende der jeweiligen Simulation und auch das Zeitintervall für die Berechnungen.

Teil IV

Simulation

6 Verwendete Modelle

In diesem Kapitel werden näher die ausgewählten und verwendeten Methoden für die Modellierung des Niederschlag-Abflusses im Oberen Ennstal mittels HEC-HMS erläutert. Die Kriterien bei der Auswahl hängen meistens von den zur Verfügung stehenden Messdaten und von Daten über die Gebietseigenschaften ab.

6.1 Modellierung der Abflussbildung

Der erste Schritt bei dem Simulationsvorgang ist die Ermittlung des Effektivniederschlags, bzw. des daraus resultierenden Abflusses. Das Verhältnis zwischen dem Effektivniederschlag und dem gesamten Niederschlag innerhalb eines Zeitintervalls ist der Abflussbeiwert Ψ . Analog ist der Ψ_{ges} der Effektivniederschlag vom gesamten Ereignis dividiert durch den gesamten Niederschlag. Ψ bleibt konstant während des ganzen Ereignisses.

$$\Psi = \frac{pe_t}{p_t} \quad (6.1)$$

Mit:

$$\begin{array}{ll} p_t & \text{Gebietsniederschlag im Zeitintervall von } t \text{ bis } t + \Delta t \\ pe_t & \text{Effektivniederschlag im Zeitintervall von } t \text{ bis } t + \Delta t \end{array}$$

Für die Modellierung der Abflussbildung im Einzugsgebiet der oberen Enns wurde die Methode Initial and Constant (Anfangsverlust und konstante Verlustrate) angewendet.

Das Programm sieht die Oberfläche in einem Einzugsgebiet entweder als direkt-gebundene undurchlässige oder als nur teilweise undurchlässige an. Im ersten Fall wird der ganze Niederschlag in den Abfluss transformiert, ohne Infiltration, Evaporation oder sonstigen Verluste. Im zweiten Fall stellt derjenige Anteil, der im durchlässigen Teil des Einzugsgebiets auf Infiltration und andere Verluste entfällt, Anfangsverlust dar. Die Summe des restlichen Anteils und des jenen aus der undurchlässigen Oberfläche setzt den gesamten Abfluss zusammen. Der Verlust wird für jedes Zeitintervall bestimmt und vom Wert des Gebietsniederschlags für das Intervall subtrahiert.

Das grundlegende Konzept dieser Methode ist, dass die maximale Verlustrate f_c während eines Ereignisses konstant bleibt. Es gilt dann Folgendes:

$$pe_t = \left\{ \begin{array}{ll} p_t - f_c & \text{für } p_t > f_c \\ 0 & \text{sonst} \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

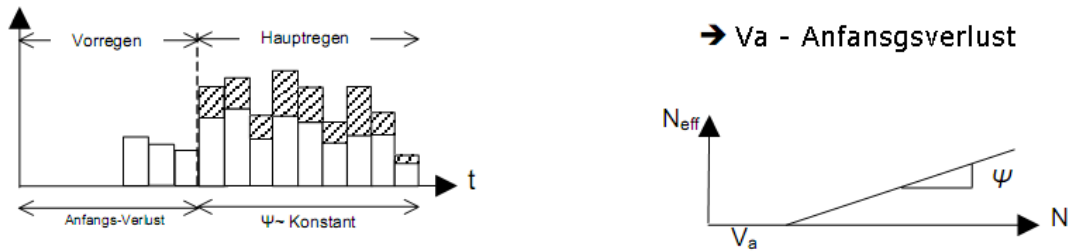


Abbildung 6.1: Abflussbeiwert und Anfangsverlust (Blöschl/Gutknecht 2005)

Damit die Verluste des Niederschlags am Beginn des Regens auch berücksichtigt werden können, ist der Anfangsverlust I_a im Modell vorgesehen. Er stellt die Interzeption und die Muldenspeicherung im Einzugsgebiet dar. Unter der Interzeption versteht man diejenige Niederschlagsmenge, die von der Oberfläche (inklusive Pflanzen und Bäume) absorbiert wird. Der in topographisch bedingten Mulden verbleibende Niederschlag wird dann in den Boden infiltriert oder verdunstet.

Es gibt also keinen oberflächlichen Abfluss solange die Anfangsverluste größer als Gebietsniederschlag ist:

$$pe_t = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{für } \sum p_t < I_a \\ p_t - f_c & \text{für } \sum p_t > I_a \text{ und } p_t > f_c \\ 0 & \text{für } \sum p_t > I_a \text{ und } p_t < f_c \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

Der Anfangsverlust I_a stellt die Anfangsbedingung des Modells dar und die Verlustrate f_c ein Parameter. Beide sind abhängig vom Feuchtezustand des Bodens, von Vegetation, Landnutzung und von der Wetterlage. Bei einem feuchten oder gar gesättigten Boden nähert sich I_a Null. Bei ganz trockenem erreicht es andererseits seinen maximalen Wert. Die maximale Verlustrate f_c zeigt wie groß die Kapazität des Bodens hinsichtlich Infiltration ist. Sie wird in [mm/h] ausgedrückt. Weil die beiden Parameter nicht gemessen werden können, werden sie durch Kalibrierung bestimmt (Feldman, 2000 [6], Blöschl/Gutknecht, 2005 [9]).

6.2 Abflusskonzentration

Für Beschreibung der Abflusskonzentration in einem Einzugsgebiet gibt es zwei grundlegende Konzepte: Isochronenmodell und Einheitsganglinien Verfahren.

Die Isochronen sind Linien gleicher Fließzeit des Wassers bis zum Gebietsauslass in einem Einzugsgebiet. Die Konzentrationszeit t_c ist diejenige Zeit, die ein Wasserteilchen benötigt, um vom entferntesten Punkt im Einzugsgebiet bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Es wird in diesem Verfahren angenommen, dass Regen gleichmäßig über das ganze Einzugsgebiet verteilt ist, und dass es sich um reine Translation des Effektivniederschlags handelt. Die Zeitflächen sind

Flächen zwischen den Isochronen und in einem Zeit-Flächen-Diagramm ZFD sind Zeitflächen über die Zeitachse dargestellt (Radić, 2007 [20]; Lutz, 1984 [15]).

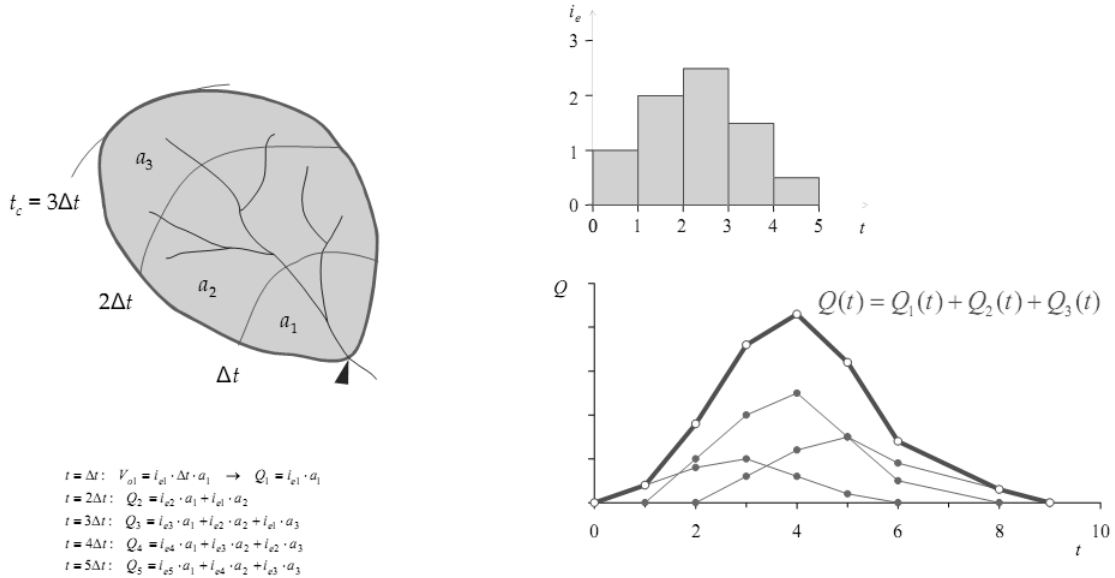


Abbildung 6.2: Abflussbestimmung mittels des Isochronenmodells (Radić 2007)

Das Einheitsganglinienverfahren ist ein der bekanntesten und ältesten Verfahren zur Beschreibung der Abflusskonzentration eines Einzugsgebiets und wurde 1932 von Sherman entwickelt. Die Einheitsganglinie (Unit Hydrograph) stellt den resultierenden Abfluss aus 1 mm Effektivniederschlag im gewählten Zeitintervall dar. Grundlegend ist, dass der Prozess linear ist, sodass der Abfluss aus mehreren Einheiten einfach die Summe einzelner Einheitsganglinien ist (Maniak, 1993 [16]; Jovanović, 1991 [13]).

Der Impuls des Effektivniederschlags ist für jedes Zeitintervall bekannt. Den gesamten Abfluss rechnet dann das Programm als die Lösung des Systems der linearen Gleichungen:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m \cdot U_{n-m+1} \quad (6.4)$$

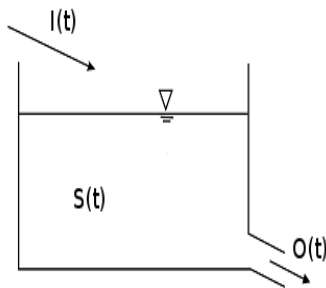
Mit:

$$\begin{aligned}
 Q_n & \text{ Abflussordinate in } n\Delta t \\
 P_m & \text{ Effektivniederschlag im Intervall } m\Delta t \text{ bis } (m+1)\Delta t \\
 M & \text{ gesamte Anzahl der Niederschlagsimpulse} \\
 U_{n-m+1} & \text{ Einheitsganglinienordinate in } (n-m+1)\Delta t
 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Die Gleichung wird unter folgenden Annahmen verwendet:

1. Der Effektivniederschlag ist gleichmäßig über das Einzugsgebiet verteilt und bleibt konstant im Intervall Δt
2. Linearität: doppelter Effektivniederschlag verursacht doppelt so großen Abfluss und umgekehrt
3. die direkte Ganglinie aus einem Impuls ist unabhängig von der Zeit des Impulsenstehens und von früheren Niederschlägen (Feldman, 2000 [6])

Für die Entwicklung der Parameter in Einzugsgebiet der Oberen Enns ist das Clark Verfahren verwendet. Es ist ein spezieller Fall des Einheitganglinienverfahrens, bei dem zwei kritische Prozesse der Abflusskonzentration analysiert werden: Translation (die Wasserbewegung bis zum Gebietsauslass) und Speicherung (Reduktion der Ganglinie durch Speicherung im Einzugsgebiet).



Der kurzfristige Rückhalt des Wassers im Einzugsgebiet (auf der Oberfläche, in Boden oder in Fließwegen) spielt eine große Rolle bei der Umwandlung des Niederschlags in den Abfluss. Üblicherweise wird das durch das Modell eines LinearSpeichers dargestellt. Es beginnt mit der Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (6.6)$$

dS/dt Speicheränderung zum Zeitpunkt t

I_t Zufluss in den Speicher zum Zeitpunkt t

O_t Abfluss aus dem Speicher zum Zeitpunkt t

Bei dem LinearSpeicher ist die Speicherung in t gleich dem Abfluss multipliziert mit dem Speicherkonstante K :

$$S_t = K \cdot O_t \quad (6.7)$$

Aus diesen zwei Gleichungen folgt:

$$O_t = C_A \cdot I_t + C_B \cdot O_{t-1} \quad (6.8)$$

wo C_A und C_B routing Koeffizienten sind. Die werden gerechnet als:

$$C_A = \frac{\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \quad C_B = 1 - C_A \quad (6.9)$$

Der durchschnittliche Abfluss während des Intervalls t wäre dann:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (6.10)$$

Der Linearspeicher im Clark Verfahren stellt alle Rückhaltewirkungen des Einzugsgebiets dar. Man kann annehmen, dass der Speicher unmittelbar vor dem Gebietsauslass sich befindet. Die Strömung des Wassers bis zum Linearspeicher wird aus dem Zeit-Flächen-Diagramm gerechnet. Wenn die Fläche mit entsprechendem Impuls multipliziert und durch den Berechnungsschritt Δt dividiert wird, dann ist das Ergebnis Zufluss I_t in den Speicher.

Für die Anwendung des Clark Verfahrens sind zwei Parameter in HEC-HMS einzugeben: Speicherkoeffizient K und Konzentrationszeit t_c .

Die Ingenieure des Hydraulic Engineering Center haben festgestellt, dass obwohl für jedes Einzugsgebiet ein spezifisches Zeit-Flächen-Diagramm entwickelt werden kann, ein für alle Einzugsgebiete typisches Diagramm mit ausreichender Genauigkeit gültig ist (Feldmann, 2000 [6]). In HEC-HMS ist das das folgende Diagramm (Abbildung 6.4):

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \cdot \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{für } t < \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{für } t > \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (6.11)$$

Mit:

- A_t Teilfläche
- A gesamte Fläche
- t_c Konzentrationszeit

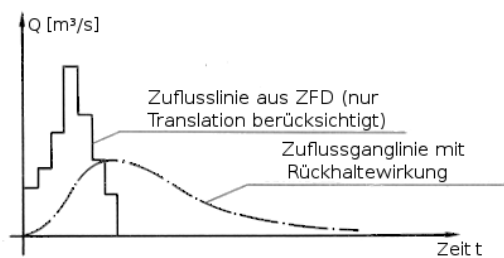


Abbildung 6.3: Clark Verfahren

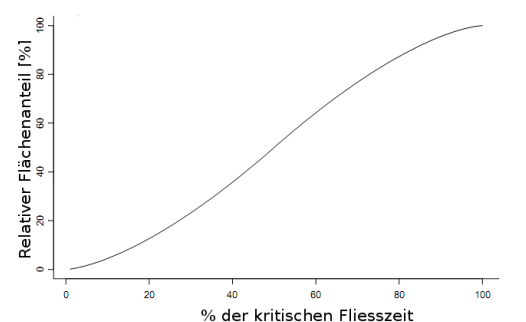


Abbildung 6.4: ZFD in HEC-HMS

Die Konzentrationszeit t_c wird aus der Kalibrierung bestimmt. Der Speicherkoeffizient K wird genauso als t_c in Stunden ins Programm eingegeben. Er ist ein Index, der die vorübergehende Speicherung des Niederschlags auf dem Weg zu den Auslass umfasst. K kann auch aus dem Kalibriervorgang ermittelt werden. Die Anfangswerte können der Literatur entnommen werden (z.B. Dyck und Peschke, 1995 [4]) oder aus der manuellen Analyse der Hochwasserabflussganglinie gerechnet.

Wenn eine Ganglinie logarithmisch dargestellt wird, dann gilt:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (6.12)$$

und

$$\alpha = \frac{1}{K} \quad (6.13)$$

wo Q_t Abfluss zum Zeitpunkt t ist, Q_0 Abfluss zur Zeit $t=0$. Aus dieser Beziehung lässt sich K ermitteln.

Für die Bestimmung des K aus der Ganglinie ist es notwendig zuerst die drei charakteristischen Abflussbereiche festzustellen: Ober- (oder Direkt-), Zwischen- und Basisabflussbereich. Die Bereiche haben unterschiedliche Steilheiten und Knickpunkte und es ist nicht bei jeder Ganglinie einfach sie abzugrenzen und eindeutig zu bestimmen. Aus auf diese Weise definierten Bereichen bekommt man K für jeden Abflussanteil. In der Abbildung 6.5 sind diese Abflussbereiche auf der Ganglinie des Pegels Schladming für das Ereignis aus dem August 2002 dargestellt.

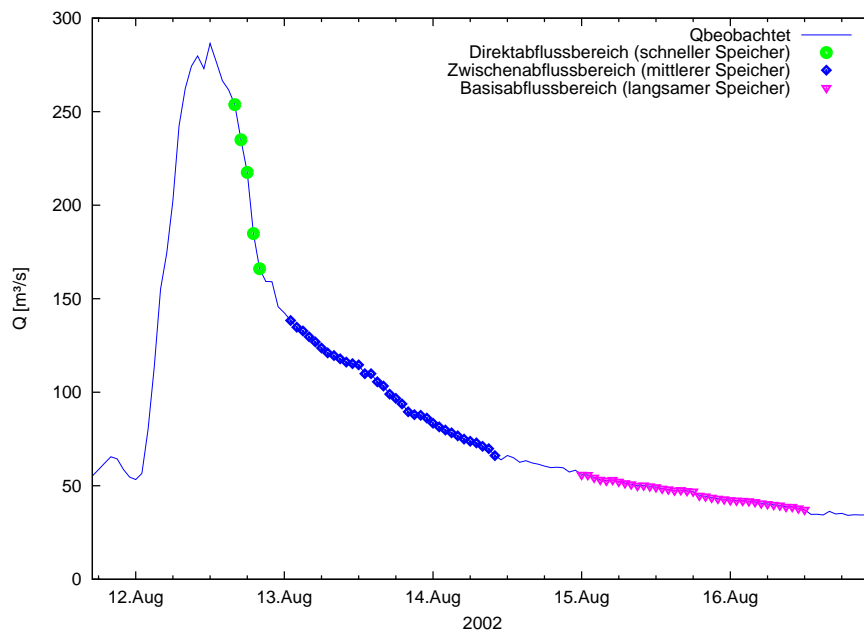


Abbildung 6.5: Definition der verschiedenen Abflussbereiche am Beispiel des beobachteten Abflusses am Pegel in Schladming

Bei der exponentiellen Approximation vom Bereich des schnellen Speichers des oben dargestellten Ereignisses bekommt man folgende Relation:

$$y = 289.56 \cdot e^{-0.1088 \cdot x}$$

Daraus folgt, dass die Speicherkonstante für diesen Speicher gemäß Gleichung (6.13) ist: $K = \frac{1}{0.1088} = 9.2$ Stunden. Das ist in der Abbildung 6.6 auf der nächsten Seite graphisch interpretiert.

Ähnlich sind auf dieser Weise bestimmten Speicherkonstante für den mittleren Speicher 45 und für den langsamen 90.9 Stunden.

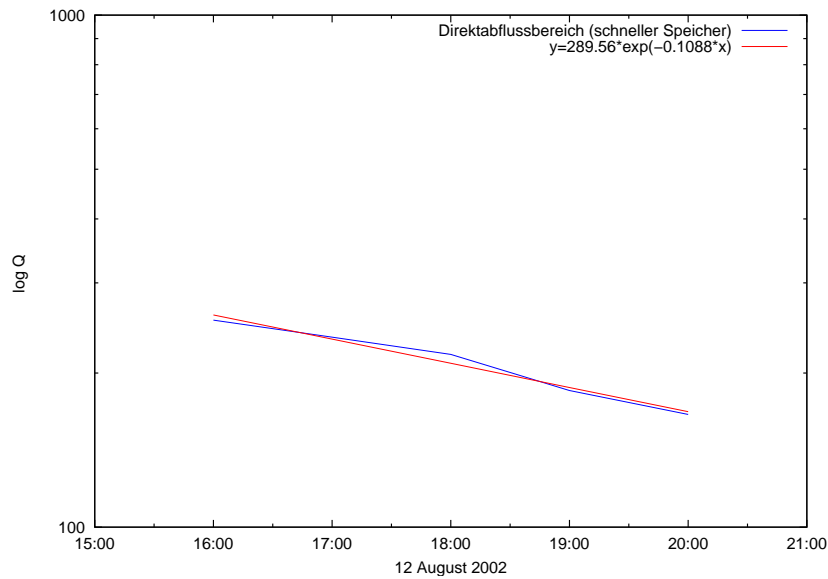


Abbildung 6.6: Approximation des Bereichs vom schnellen Speicher

6.3 Modellierung des Basisabflusses

Der Basisabfluss oder „Schönwetterganglinie“ ist derjenige Teil der Hochwasserwelle, der unbeeinflusst vom Niederschlagsereignis bleibt. Er hat kleine Werte im Vergleich mit dem Direktabfluss. Seiner Verlauf kann sogar näherungsweise mit einer Gerade approximiert werden. Im noch einfacheren Fall bleibt er konstant während des Ereignisses (Bárdossy, 2004 [2]).

Für dessen Modellierung in vorliegender Arbeit wurde die Methode der exponentiellen Rezession ausgewählt, Abbildung 6.5. Dieses Modell wird ebenso oft für die Untersuchungen der Entwässerung aus den natürlichen Speichern in einem Einzugsgebiet benutzt.

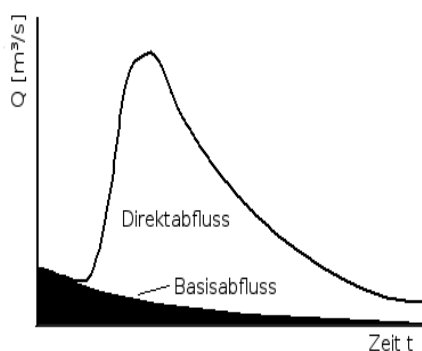


Abbildung 6.7: Die Rezession des Basisabflusses

Der Basisabfluss ist nach dieser Methode gleich:

$$Q_t = Q_0 \cdot k_r^t \quad (6.14)$$

Wo Q_t der Basisabfluss in Zeit t ist, Q_0 der Basisabfluss am Beginn des Ereignisses und k_r exponentielle Rezessionskonstante. Q_0 ist fürs Modell eine Initialbedingung. Es hängt vom jeweiligen Ereignis ab und wird aus der beobachteten Ganglinie geschätzt. k beschreibt den Verlauf der Basisabflussganglinie. Für $k = 1$ ist sie eine Gerade und der Anteil des Basisabflusses im gesamten Abfluss konstant.

Um einen typischen Verlauf zu beschreiben soll k aber kleiner als 1 sein. Im Programm ist k

als Verhältnis zwischen dem Basisabfluss zum Zeitpunkt t und dem Basisabfluss ein Tag vorher definiert (Feldman, 2000 [6]).

Vergleicht man die Gleichung (6.14) mit der Gleichung des Einzellinearspeichers $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$, so lässt sich folgende Beziehung zwischen der Speicherkonstante K des Linearspeichers und der Rezessionskonstante k_r ableiten:

$$K = \frac{24}{\ln \frac{1}{k_r}} \quad (6.15)$$

Die Speicherkonstante K wird aus dieser Beziehung in Stunden gerechnet.

6.4 Gerinnenstreckenmodell

Die Gerinnenstreckenmodelle (auch als routing Modelle bekannt) rechnen die Abflussganglinie flussabwärts, wobei die Abflussganglinie flussaufwärts die Randbedingung ist. Es werden die Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung angewendet (s. Seite 30).

Für die Modellierung der Strömung des Wassers im Flussbett dem Oberen Enns wurde das Lag (Laufzeitunterschied) Modell verwendet. In diesem Modell werden alle Ordinaten der Hochwasserwelle translatorisch verschoben, ohne dass die Ganglinie durch Verluste gedämpft wird, Abbildung 6.8. Es ist eine Vereinfachung anderer Methoden für die Berechnung der Transformation der Hochwasserwelle in offenen Gerinnen.

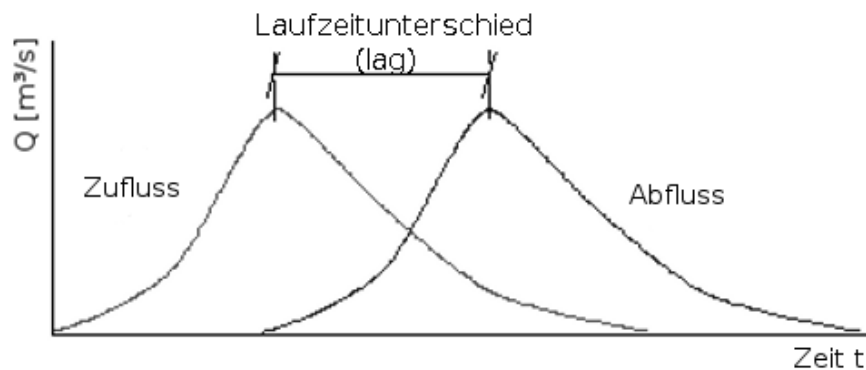


Abbildung 6.8: Laufzeitunterschiedmethode

Mathematisch wird der Abfluss folgendermaßen berechnet:

$$O_t = \begin{cases} I_t & t < lag \\ I_{t-lag} & t \geq lag \end{cases} \quad (6.16)$$

Mit:

- O_t Abflussordinate in t
- I_t Zuflussordinate in t
- lag Laufzeitunterschied für den die Ordinaten transliert werden

Die Laufzeitunterschied ist ins Programm in Minuten einzugeben. Er wird aus den beobachteten Zufluss- und Abflussganglinien geschätzt entweder als zeitlicher Unterschied zwischen den Abflussspitzen oder zwischen den Schwerpunkten der Hochwasserwellen oder eventuell zwischen den Mittelpunkten der absteigenden Äste (Feldman, 2000 [6]).

Diese Methode ist nur dann halbwegs sauber, wenn in der Fließstrecke kein größerer Zubringer mündet. Ein Zubringer kann die Welle so verformen, dass scheinbar negative Laufzeiten entstehen (Wasser nimmt bergauf). Dasselbe kann auch passieren, wenn in der Flussstrecke ein Kraftwerk liegt, dessen Speicher wegen des kommenden Hochwassers vorabgesenkt wird.

7 Modellierung

7.1 Aufbereitung von Niederschlags- und Abflussdaten

Der erste Schritt bei der Vorbereitung der Niederschlagsmessdaten für die Eingabe in HEC-HMS ist die Ermittlung des Gebietsniederschlags. Für die Gewichtung wurde die Methode der *Thiessen-Polygone* verwendet.

Der Gebietsniederschlag kann im Allgemeinen aus den punktuell gemessenen Niederschlägen folgendermaßen bestimmt werden:

$$P_{gew} = \frac{\sum_i (g_i \cdot \sum_t p_i(t))}{\sum_i g_i} \quad (7.1)$$

Wo P_{gew} gewichteter Niederschlag über das ganze Einzugsgebiet ist, g_i das Gewicht und $p_i(t)$ gemessener Niederschlag im Punkt i zur Zeit t . Falls von der Messstelle i keine entsprechende zeitliche Auflösung vorhanden ist, dann wird die Niederschlagssumme vom ganzen Ereignis¹ in die Berechnung einbezogen.

Die Methode der Thiessen-Polygone ist ein flächenbezogenes Verfahren. Zur Konstruktion der Polygone werden zuerst benachbarte Stationen durch Geraden verbunden. Danach errichtet man auf jede Gerade die Mittelsenkrechten. Damit ist das Polygon konstruiert und die Schnittpunkte der Mittelsenkrechten bilden die Ecken des Polygons. In der Abbildung 7.1 auf der nächsten Seite ist ein Beispiel der Polygone von 7 Stationen im Einzugsgebiet oberhalb vom Pegel Liezen dargestellt.

Es wird jetzt angenommen, dass die Niederschlagshöhe in jedem Polygon gleich der Niederschlagshöhe der dazugehörigen Station ist. Das Gewicht g_i ist gleich dem Verhältnis der Flächenanteile A_i zur Fläche A des gesamten Einzugsgebiets:

$$g_i = \frac{A_i}{A} \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^n g_i = 1 \quad (7.2)$$

Die Vorteile dieses Verfahrens sind relative Einfachheit bei der Ermittlung des Gebietsniederschlags und die Tatsache, dass die Polygone unverändert für alle Ereignisse bleiben, falls überall gleiche Stationen vorhanden sind. Als Nachteil ist die Unmöglichkeit von Berücksichtigung der orographischen Einflüssen auf Einzugsgebiet zu erwähnen (Disse, 2005 [3]).

¹in HEC-HMS: Total Storm Precipitation

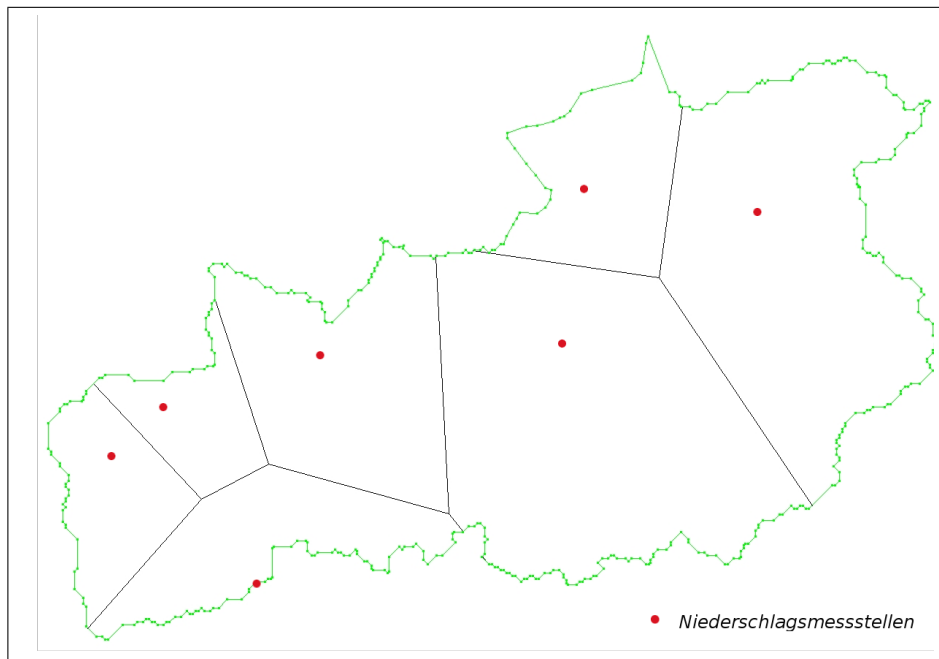


Abbildung 7.1: Beispiel der Thiessen-Polygone für sieben Stationen im Einzugsgebiet oberhalb von Liezen

Die Thiessen-Polygone werden in dieser Arbeit mit dem Programm *RSim3D* ermittelt. Das Programm rechnet aufgrund Koordinaten der jeweiligen Stationen die gewünschten Gewichte. Es wurde von Tritthart am Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft an der TU Wien entwickelt.

Die Daten von den Stationen mit täglicher Auflösung werden ins HEC-HMS als Niederschlags-summe für jeweiliges Ereignis eingegeben. Für die Stationen auf Stundenbasis sind noch die zeitlichen Gewichte notwendig. Sie werden als gleicher Anteil jeder Station gerechnet, falls andere Angaben nicht vorhanden sind. Für z.B. drei Stationen heißt es, dass das zeitliche Gewicht jeder Station 0.333 beträgt. Als Ergebnis bekommt man den Thiessen-Gewichteten Niederschlag mit stündlicher Auflösung für entsprechendes Ereignis. Daraus berechnet HEC-HMS weiter den effektiven Niederschlag.

Die zur Verfügung stehenden Abflussdaten hatten alle 1/4-stündliche Auflösung und sind zuerst auf 1-stündliche umgerechnet (s. Abschnitt 3.2, Seite 11). Danach wurden die Messungen des jeweiligen Pegels für den ganzen Zeitraum aller Ereignisse (1995-2004) direkt in die Datenbank von HEC-HMS importiert. Das Programm nimmt dann für jedes gerechneten Ereignis nur die Daten von Zeiträumen des entsprechenden Ereignisses, laut Definition in Control Specifications.

Sowohl alle ins Programm eingegebene Daten als auch die Ergebnisse der Simulationsvorgänge werden in eine zentrale Datei mit der Extension .DSS gespeichert. Das ist sehr nützlich, weil man diese Datei später in einem anderen Programm der HEC Reihe aufrufen und weiter bearbeiten kann.

Für die vorliegende Arbeit wurde zu diesem Zweck das Programm HEC-DSSVue verwendet. In dem kann man die oben genannte zentrale Datenbank öffnen und dann die einzelnen Ergebnisse

und Messungen visualisieren oder tabellarisch darstellen und bearbeiten. Der Import neuer Messdaten steht auch zur Verfügung. Es bietet sogar die Möglichkeit des Exports einzelner oder Gruppe von Dateien direkt ins Excel Programm zum Zweck weiterer Datenmanipulation.

7.2 Drei Speicher Ansatz und die Bedeutung von flow ratio

Im HEC-HMS ist die Aufteilung des Abflusses in zwei Komponenten, Direkt- und Basisabfluss, vorgesehen. Da die manuelle Analyse der vorhandenen Abflussganglinien die zusätzliche Existenz vom Zwischenabfluss zeigte, es ist sinnvoll diese Komponente in den Simulationvorgang einzuschließen. Damit wird eine qualitative Anpassung zwischen den beobachteten und modellierten Ganglinien ermöglicht. Um das zu erreichen, ist eine Gliederung der Subbasin-Element in drei Teilen notwendig.

Dies kann man als ein Einzugsgebiet, das aus drei parallelen Speichern besteht, betrachten. Jeder Speicher entspricht einer Abflusskomponente. Dabei wird der Oberflächenabfluss als „schnell“, der Zwischenabfluss als „mittel“ und der Basisabfluss als „langsam“ im Weiteren gekennzeichnet. Die drei werden getrennt geeicht und am Gebietsauslass, bzw. im Junction Element werden anschließend die einzelnen Ganglinien in eine gemeinsame Abflussganglinie für das Einzugsgebiet summiert.

Es tritt das Problem der Aufteilung des Niederschlags auf die einzelnen Speicher auf. Das wird mit der Nutzung der Option *flow ratio* aus dem basin model gelöst. Mit der *flow ratio* kann man den gerechneten Abflusshydrograph skalieren. Im Programm ist ursprünglich mit dieser Option die automatische Änderung der Niederschlagshöhen ermöglicht, um die daraus folgende Reaktion der Abflussganglinie auswerten zu können. Die *flow ratio* wird aber in vorliegender Modellierung als Abflussbeiwert Ψ interpretiert.

In der Gleichung (6.1) ist der Abflussbeiwert als Effektivniederschlag dividiert durch den gesamten Niederschlag definiert, in einem Zeitabschnitt oder während des ganzen Ereignisses. Da im HEC-HMS ein lineares Modell verwendet wird, es ist gleichgültig ob der Niederschlag mit dem Abflussbeiwert oder der berechnete Hydrograph mit der *flow ratio* skaliert wird. Die Beziehung gilt in beiden Richtungen. Es kann also die *flow ratio* als Abflussbeiwert verwendet werden.

Laut in dieser Arbeit angewandter Initial and Constant Methode, ist der Niederschlag für die Berechnung des Direkt- und Zwischenabflusses (nach der vorheriger Trennung des Basisabflusses) gleich:

$$\Psi = \frac{Q_D}{N - A_V} \quad (7.3)$$

| | |
|--------|------------------------------|
| Ψ | [-] Abflussbeiwert |
| Q_D | [mm] Direktabflusshöhe |
| N | [mm] Gesamtniederschlagshöhe |
| A_V | [mm] Anfangsverluste |

Der Direktabfluss besteht aus:

$$Q_D = Q_O + Q_Z \quad (7.4)$$

Mit:

$$\begin{aligned} Q_O &= (N - A_{V1}) \cdot f_{R1} && \text{Oberflächneabflusshöhe [mm]} \\ Q_Z &= (N - A_{V2}) \cdot f_{R2} && \text{Zwischenabflusshöhe [mm]} \\ f_{R1} &&& \text{flow ratio für den Oberflächneabfluss [-]} \\ f_{R2} &&& \text{flow ratio für den Zwischenabfluss [-]} \end{aligned}$$

Der Abflussbeiwert kann man dann als die Summe der *flow ratios* von Oberflächen- und Zwischenabfluss verstehen:

$$\Psi = \frac{Q_O}{(N - A_{V1})} + \frac{Q_Z}{(N - A_{V2})} = \frac{(N - A_{V1}) \cdot f_{R1}}{(N - A_{V1})} + \frac{(N - A_{V2}) \cdot f_{R2}}{(N - A_{V2})} = f_{R1} + f_{R2} \quad (7.5)$$

In der Abbildung 7.2 auf der nächsten Seite ist der Vorgang bei der Modellierung mit Nutzung der *flow ratio* dargestellt. Der Pegel am Gebietsauslass ist ein Kontrollpunkt. Hier müssen Messungen vorhanden sein, damit eine Eichung überhaupt möglich wäre.

Nach der Umwandlung vom punktuell gemessenen Niederschlag in Gebietsniederschlag, erfolgt die Aufteilung der Niederschlag mittels *flow ratio* f_R auf drei Speicher (s. Abschnitt 7.3.1 auf Seite 49). Nach dem Abzug der Anfangsverluste gelangt der verbleibende Niederschlag im jeweiligen Speicher in die Clark Abflustransformation. Dort wird die Abflussganglinie durch Konzentrationszeit t_C und Speicherkonstante K parametrisiert. Am Pegel, bzw. im Junction Element im HEC-HMS, werden dann die drei Ordinaten summiert und das stellt nun die Abflussganglinie des gesamten betrachteten Einzugsgebiets dar.

Die Abbildung 7.3 auf Seite 48 zeigt ein Beispiel der Modellierung dieser Art für das Juni 1995 Ereignis. Die finale Abflussganglinie setzt sich aus den Summen einzelner *subbasins* zusammen.

Die Summe aller drei *flow ratios* soll in der Regel kleiner oder gleich eins sein. Bei manchen Ereignissen ist das aber nicht der Fall, sondern es passiert, dass die Summe größer als eins ist. Die Schneesmelze kann z.B. ein Grund dafür sein, da deren Anteil in der Abflussbildung nicht berücksichtigt ist.

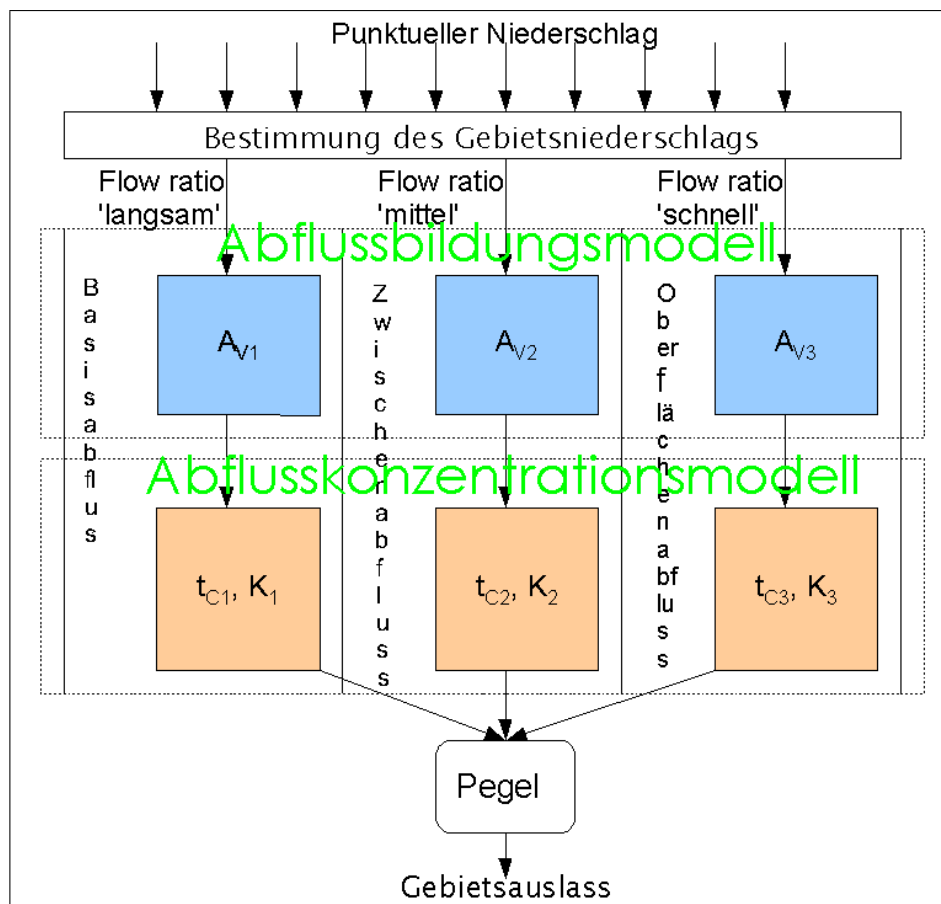


Abbildung 7.2: Das Schema der Einzugsgebietsmodellierung mittels des flow ratio Ansatzes

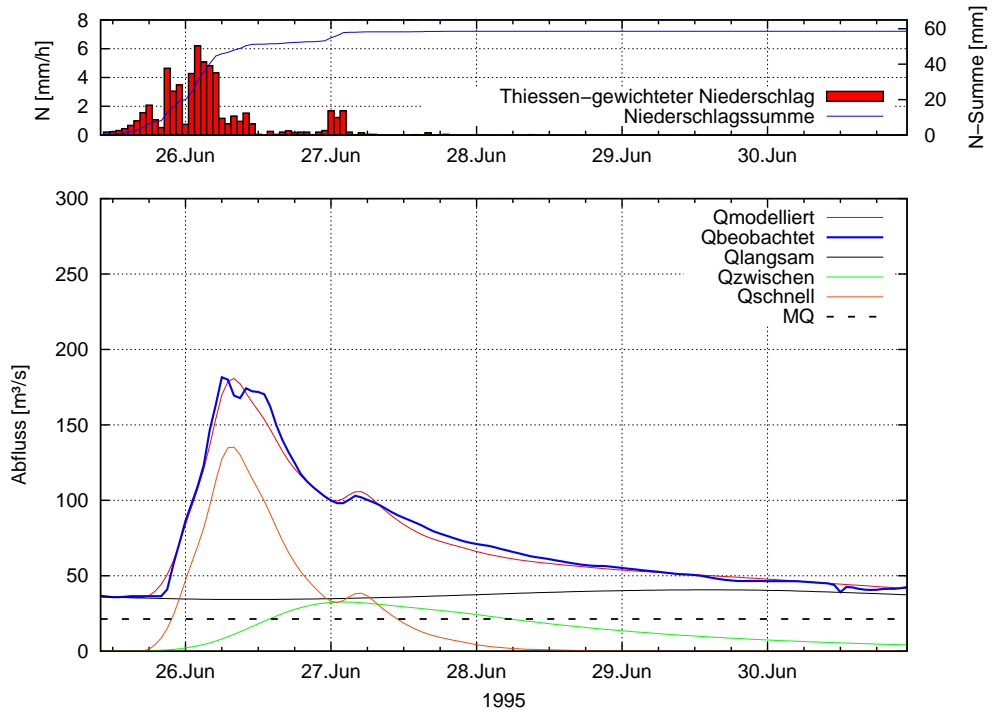


Abbildung 7.3: Das Ergebnis der Modellierung mittels der drei Speicher im Einzugsgebiet des Pegels Schladming

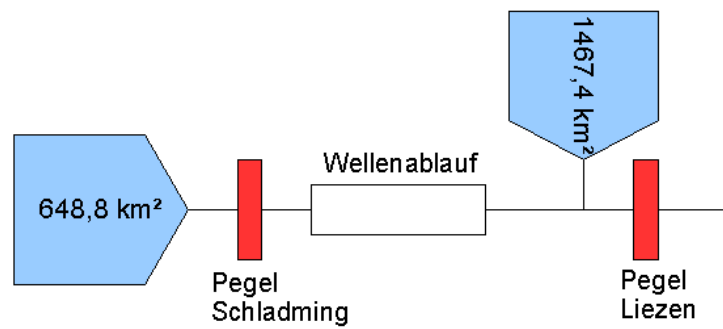


Abbildung 7.4: Räumliche Struktur des Einzugsgebietsmodells vom Jahr 1995 bis 1999

7.2.1 Gliederung des Einzugsgebiets für die Modellierung

Da die registrierten Niederschlags- und Abflussmessungen innerhalb vom untersuchten Zeitraum (s. Kapitel 3) variieren, werden zwei Modelle mit unterschiedlichen Elementen entwickelt. Bei den Ereignissen zwischen 1995 und 1999 ist das Einzugsgebiet in zwei Gebiete untergliedert: das Kopfeinzugsgebiet oberhalb vom Pegel Schladming und Teileinzugsgebiet zwischen den Pegeln Schladming und Liezen (Röthelbrücke), Abbildung 7.4 auf der vorherigen Seite.

Ab dem Jahr 2000 sind zusätzlich Abflussdaten von Pegeln in Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach vorhanden. Das ermöglicht eine weitere Gliederung des Einzugsgebiets vom Pegel Schladming. Dies ist in der Abbildung 7.5 dargestellt.

Ein von Vorteilen des HEC-HMS ist genau die modulare Bauweise vom Modell, was eine spätere Feingliederung oder Separation von Elementen einfacher macht.

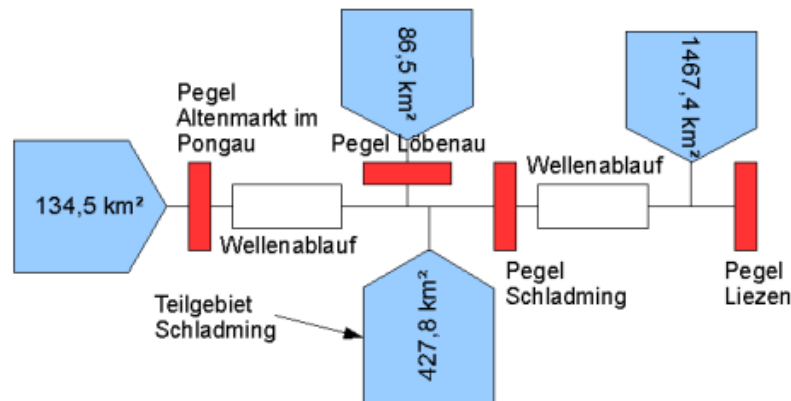


Abbildung 7.5: Räumliche Struktur des Einzugsgebietsmodells vom Jahr 2000 bis 2004

7.3 Parameterentwicklung und Kalibrierung

Alle ermittelten Parameter kann man in zwei Gruppen aufteilen: Gebiets- und Ereignisparameter. Eine Übersicht ist der Tabelle 7.1 auf der nächsten Seite zu entnehmen. Die gebietsbezogenen drei Konzentrationszeiten t_c und die drei Speicherkonstanten K sind nach der Bestimmung durch Kalibrierung unverändert für alle Ereignisse gehalten. Auf anderer Seite sind ereignisbezogene Parameter nur für jeweiliges Ereignis relevant und müssen für jedes weitere Zeitfenster neu bestimmt werden, da sie durch die Kalibrierung nicht festgestellt werden können. Sie dienen der feinen Anpassung der modellierten Abflusskurve.

7.3.1 Vorgehensweise bei der Kalibrierung

Das Ziel des Kalibrierprozesses ist es, die Parameter Konzentrationszeit und Speicherkonstante der Einzelspeicher zu bestimmen und konstant unabhängig vom Ereignis zu halten. Sie sind dann für spätere Prognosen verwendbar. Noch genauere Anpassung der Kurve wird durch die Parameter *flow ratio* und Anfangsverluste erreicht. Diese zwei Parameter haben stärkeren

| Element im Modell | Verwendung | Parameter | Einheit | Typ |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------|
| Speicher „langsam“ | Basisabfluss | Konzentrationszeit t_c | [h] | gebietsbezogen |
| | | Speicherkonstante K | [h] | gebietsbezogen |
| | | Rezessionskoeffizient k_R | [e ^{-1/d}] | gebietsbezogen |
| | | Initialabfluss Q_i | [m ³ /s] | ereignisbezogen |
| | | flow ratio f_R | [-] | ereignisbezogen |
| Speicher „mittel“ | Zwischenabfluss | Konzentrationszeit t_c | [h] | gebietsbezogen |
| | | Speicherkonstante K | [h] | gebietsbezogen |
| | | flow ratio f_R | [-] | ereignisbezogen |
| Speicher „schnell“ | Oberflächenabfluss | Konzentrationszeit t_c | [h] | gebietsbezogen |
| | | Speicherkonstante K | [h] | gebietsbezogen |
| | | Anfangsverlust A_V | [mm] | ereignisbezogen |
| | | flow ratio f_R | [-] | ereignisbezogen |
| Gerinnenstrecke | Wellenablauf | Laufzeitunterschied lag | [h] | gebietsbezogen |

Tabelle 7.1: Verwendete Parametertypen bei der Modellierung

Einfluss auf zeitlichen Verlauf und Form der gerechneten Abflussganglinie als Speicherkonstante und Konzentrationszeit.

Die Kalibrierung wird schrittweise in folgender Reihenfolge durchgeführt: Basisabfluss, Zwischenabfluss und zum Ende Oberflächenabfluss. Das heißt, dass die restlichen zwei Speicher die im entsprechenden Kalibrierungsschritt nicht benötigt sind, deaktiviert werden müssen, um den Effekt der Parameteränderung sichtbar zu machen.

Basisabfluss

Durch die Kalibrierung des Basisabflusses wird der Bereich der Abflussganglinie unmittelbar vor dem Beginn des Ereignisses, bzw. der Initialabfluss, und das Ende der Auslaufinie angepasst. Zuerst wird der Initialabfluss aus der beobachteten Ganglinie abgelesen und skaliert mit der *flow ratio langsam* ins Programm eingetragen.

Bei dem Ereignis aus dem Juni 1995 beträgt der gemessene Basisabfluss am Pegel in Schladming $Q_{igem}=36 \text{ m}^3/\text{s}$ und die *flow ratio langsam* $f_{RI}=0.3$. Das bedeutet, dass der einzutragende Initialabfluss gleich ist:

$$Q_{imod} = \frac{Q_{igem}}{f_{RI}} = \frac{36}{0.3} = 120 \text{ m}^3/\text{s}$$

Der Anfangswert für die Rezessionskonstante wird aus der Speicherkonstante ermittelt: $K_r = e^{-1/K}$. K wird in Tagen gerechnet und aus dem Clark-Verfahren des Basisabflusses übernommen.

Die Orientierungswerte für die Speicherkonstante K für alle drei definierten Speicher in dieser Arbeit sind jedoch der Tabelle 7.2 auf der nächsten Seite entnommen.

| Abflusskomponenten | Rezessionskoeffizient | | Speicherkonstante | |
|--|-----------------------|------|-------------------|------|
| | von | bis | von | bis |
| Landoberflächenabfluss | 0.05 | 0.3 | 8 | 20 |
| unmittelbarer Zwischenabfluss | 0.5 | 0.8 | 35 | 108 |
| verzögerter Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss | 0.85 | 0.97 | 148 | 788 |
| regionaler Grundwasserabfluss | 0.97 | 0.99 | 788 | 2388 |

Tabelle 7.2: Speicherkonstanten und Rezessionskoeffizienten für hydrologische Speicher (Dyck und Peschke, 1995)

Das Programm verlangt noch die Definition des Schwellenwertes *Threshold Q*. Das ist jener Punkt, ab dem der Basisabfluss wieder den gesamten Abfluss wiedergibt. Er hat aber kaum Einfluss auf Abflussganglinie und wird für die Kalibrierung vernachlässigt. Den Anfangsverlust gibt es auch in dieser Phase nicht.

Damit der Zwischen- und Oberflächenabfluss deaktiviert in diesem Schritt des Kalibriervorgangs bleiben, werden ganz hohe Anfangsverluste für diese Speicher ausgewählt. Es gibt somit nur den Basisabfluss im Prozess der Abflussbildung.

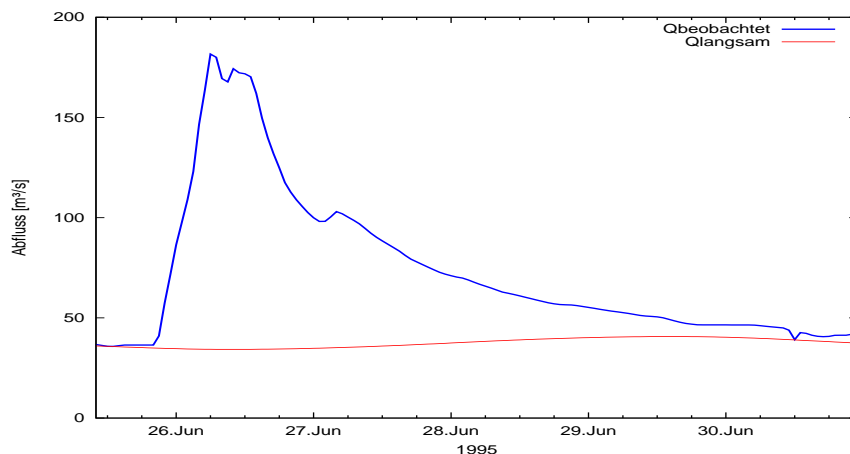


Abbildung 7.6: Anpassung des Basisabflusses, Pegel: Schladming

Die Parameter werden so lange variiert, bis eine plausible, zufriedenstellende Anpassung der modellierten und der beobachteten Basisabflussganglinien erreicht wird. Die Abbildung 7.6 zeigt das Ergebnis der Kalibrierung des Basisabflusses für das Ereignis Juni 1995 im Einzugsgebiet Schladming.

Zwischenabfluss

Die gewonnenen Parameter vom Basisabfluss bleiben während der Eichung des Zwischenabflusses unverändert. Die Anfangsverluste dieses Speichers, der „mittel“ genannt ist, werden jetzt auf Null zurückgesetzt, damit es zur Aktivierung des Abflusses kommt. Es werden dann die Gebietsparameter t_C und K des Clark-Verfahrens kalibriert, ähnlich wie beim Basisabfluss.

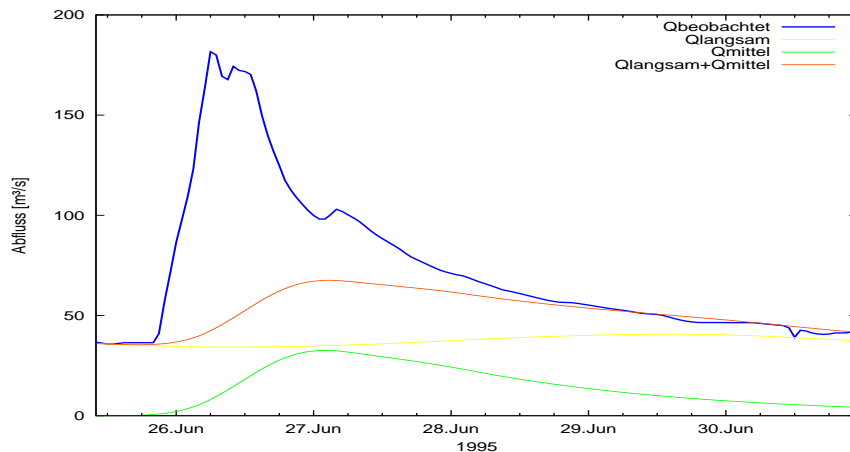


Abbildung 7.7: Anpassung des Zwischenabflusses, Pegel: Schladming

Der Anfangswert der Konzentrationszeit wird aus der manuellen Analyse der Ganglinie geschätzt. Ihr Wert hat Einfluss auf translatorische Bewegungen der Hochwasserwelle in Richtung der Zeitachse. Die Speicherkonstante wird orientierungsweise wieder der Tabelle 7.2 auf der vorherigen Seite entnommen. Sie beeinträchtigt die Anpassung der gerechneten Ganglinie mit dem unteren Teil des auslaufenden Astes der beobachteten Ganglinie und die Höhe der Hochwasserspitze. In der Abbildung 7.7 ist das Ergebnis der weiteren Eichung des Zwischenabflusses in Schladming visualisiert. Die Ordinaten des Basisabflusses werden summiert mit denen vom Zwischenabfluss. Die Anfangsverluste bleiben Null für diesen Speicher. Die gesamten Anfangsverluste werden für den Speicher „schnell“ bestimmt. Sie sind dann für das ganze Einzugsgebiet maßgebend.

Wenn diese zwei Parameter fixiert sind, dann erfolgt Anpassung von weiteren Ereignissen durch Variation der *flow ratio mittel*. Die Anfangsverluste bleiben weiterhin Null.

Oberflächenabfluss

In diesem Schritt werden die Parameter von Basis- und Zwischenabfluss unverändert beibehalten. Außer t_C und K wird noch der Anfangsverlust bestimmt. Es ist jener Teil der gesamten Niederschlagshöhe, der am Beginn des Ereignisses vom jeweiligen Einzugsgebiet aufgenommen wird, ohne Abfluss zu bilden. Er hängt ab vom Feuchtezustand des Einzugsgebiets am Anfang des Niederschlags. Beim trockenen Boden ist sein Wert größer und beim feuchten geringer. Im Extremfall des gesättigten oder sehr feuchten Bodens kann er auch Null sein. Er wird im Kalibrierungsprozess zunächst auf Null gesetzt, damit der Oberflächenabfluss überhaupt aktiviert werden kann. Dann wird mit der Variation dieses Parameters der Punkt des Einsetzens des schnellen Oberflächenabflusses bestimmt.

Die Konzentrationszeit ist in diesem Fall etwa einfacher aus der gemessenen Ganglinie abzulesen, da die Abflussspitze deutlicher definiert ist. Mit der Speicherkonstante passt man die Form der Welle und die Steilheit des ansteigenden und absteigenden Astes an. Wenn diese zwei Parameter plausibel bestimmt sind, dann werden die nächsten Ereignisse mittels Variation von Anfangsverlust und *flow ratio schnell* geeicht.

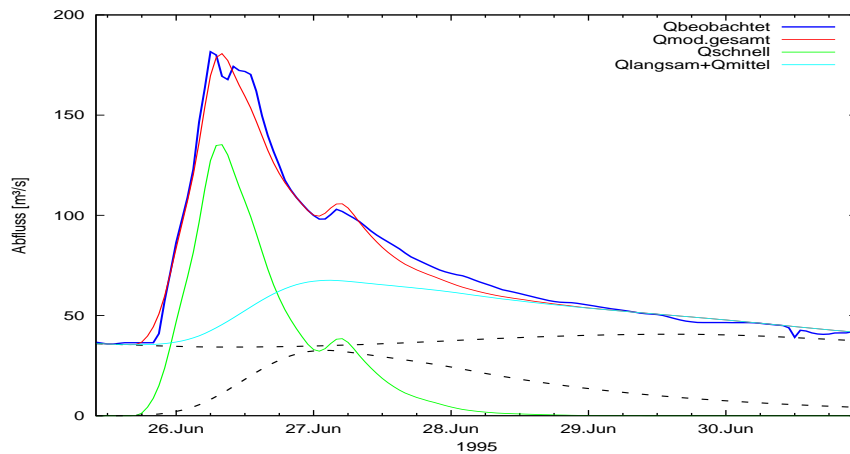


Abbildung 7.8: Anpassung des Oberflächenabflusses, Pegel: Schladming

Die Ordinaten des so kalibrierten Oberflächenabflusses werden im Anschluss mit jenen von Basis- und Zwischenabfluss summiert, Abbildung 7.8. Das rechnet HEC-HMS automatisch im vordefinierten Kontrollpunkt, bzw. am Gebietsauslass. Dies stellt nun die gesamte modellierte Abflussganglinie für das entsprechende Einzugsgebiet dar.

Gerinnenstrecke

Bei diesem Element soll der Parameter *lag*, bzw. Laufzeitunterschied kalibriert werden. Dieses Element hat immer Zufluss- und flussabwärts Abflussganglinie. Seinen Anfangswert kann man aus der Beobachtung der Verschiebung der Hochwasserpeaks auf der Zeitachse dieser zwei Ganglinien abschätzen. Durch die Kalibrierung wird er dann solange variiert, bis die Zuflussganglinie gut in die gesamte Abflussganglinie angepasst wird.

Teil V

Ergebnisse

8 Ergebnisse der Kalibrierung

In diesem Kapitel wird vorerst einen Überblick in die Modellierung einzelner Ereignisse ermöglicht. Danach werden die ermittelten Parameter präsentiert und diskutiert.

In der Tabelle 8.1 sind die Abfluss- und Niederschlagscharakteristiken aller untersuchten Ereignisse für das Zwischeneinzugsgebiet von Liezen aufgelistet. Die Tabellen mit hydrologischen Charakteristiken der Ereignisse für die restlichen Einzugsgebiete befinden sich am Anfang vom Anhang B.

| Ereignis | Ereignisdauer | Initialabfluss [m ³ /s] | Abflussspitze [m ³ /s] | passierte am: | N-Summe [mm] |
|----------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|
| Jun 95 | 25.06.-28.06. | 104 | 301.6 | 26.06. 19:00 | 34 |
| Okt 96 | 20.10.-25.10. | 68 | 476.5 | 22.10. 07:00 | 77 |
| Jul 97 | 07.07.-10.07. | 170 | 379 | 08.07. 12:00 | 46 |
| Sep 98 | 05.09.-07.09. | 74 | 356.7 | 06.09. 03:00 | 56 |
| Jul 99 | 22.07.-26.07. | 103 | 405.6 | 23.07. 04:00 | 57 |
| Jul 01 | 19.07.-23.07. | 39 | 250.8 | 20.07. 23:00 | 66 |
| Mär 02 | 19.03.-27.03. | 53 | 375.8 | 22.03. 06:00 | 150 |
| Aug1 02 | 06.08.-10.08. | 40 | 176 | 07.08. 20:00 | 53 |
| Aug2 02 | 11.08.-17.08. | 135 | 535.6 | 13.08. 15:00 | 111 |
| Sep 03 | 11.09.-17.09. | 35 | 161.7 | 13.09. 21:00 | 45 |
| Jun 04 | 11.06.-15.06. | 136 | 229 | 12.06. 07:00 | 28 |

Tabelle 8.1: Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Zwischeneinzugsgebiet Liezen

8.1 Geeichte Abflussganglinien aller Ereignisse

Fünf Ereignisse im Zeitraum vom 1995 bis 1999 sind in zwei Einzugsgebieten untersucht: im Kopfeinzugsgebiet Schladming und im Zwischeneinzugsgebiet Liezen. Dafür sind registrierte Messungen der Pegel Schladming und Liezen (Röthelbrücke) verwendet, s. Abbildung 3.2 auf Seite 13.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für Liezen detailliert vorgestellt und besprochen. Es wird auch kurz auf die Ergebnisse für andere Pegel eingegangen. Die weiteren Diagramme mit Ergebnissen für Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach befinden sich im Anhang B.

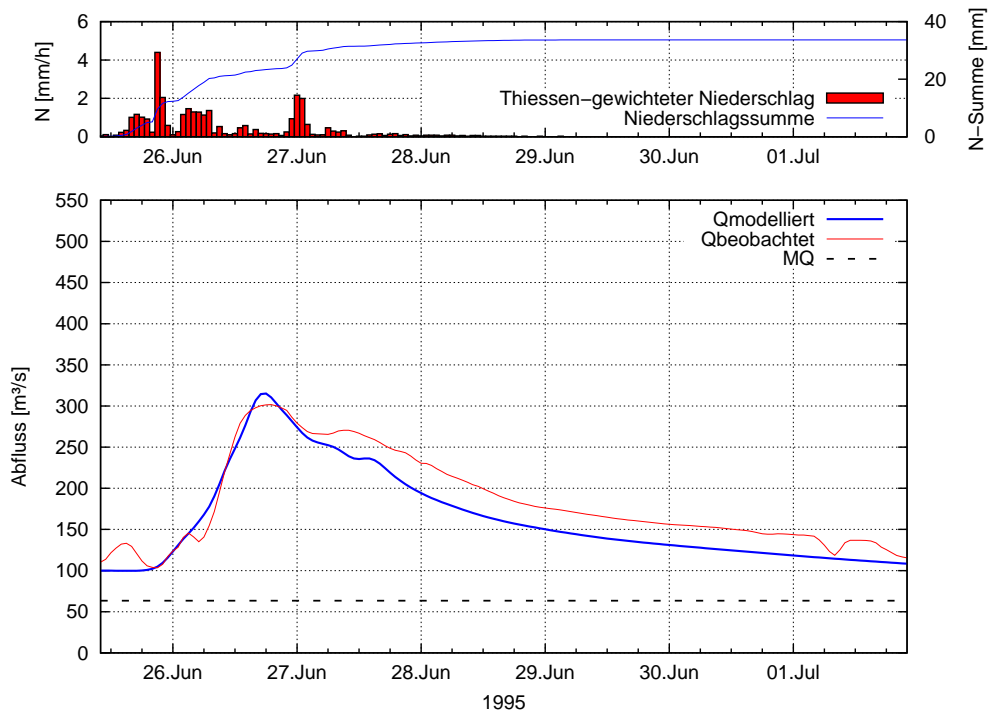


Abbildung 8.1: Modellierung Juni 1995, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

Juni 1995 (Abbildung 8.1)

Modelliert ist die zweite Hochwasserwelle des Ereignisses. Der erste Peak passierte am 22 Juni und erreichte $210 \text{ m}^3/\text{s}$. Aus diesem Grund liegt der Basisabfluss zum Beginn dieses zweiten Teils ziemlich hoch ($110 \text{ m}^3/\text{s}$), ganz oberhalb vom monatlichen Mittelwert für den Pegel, der $63.4 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt.

Die Abflussganglinie ist stark vom Betrieb der Wasserkraftwerken beeinflusst (s. Abschnitt 2.4 auf Seite 7). Aus diesem Einfluss stammende Schwankungen können mit der Modellierung nicht erfasst werden, da so ein Modell HEC-HMS nicht besitzt. Es wurde aber versucht, die Schwankungen der Ganglinie außer dem Bereich der Hochwasserwelle mit einer Linie, die den Mittelwert dieser Schwankungen darstellt, zu modellieren.

Der aufsteigende Ast konnte sehr gut modelliert werden. Beim Peak ist ein Unterschied vom $12 \text{ m}^3/\text{s}$ zwischen den beiden Linien aufgetreten. Das könnte ein Zeichen für die eventuelle Ausuferung oberhalb vom Pegel sein. Dasselbe passierte dann mit dem absteigenden Ast der Abflussganglinie. Dort ist der beobachtete Abfluss um etwa $30 \text{ m}^3/\text{s}$ größer als der modellierte. Im Prinzip könnte die verspätete Schneeschmelze die Ursache für das Phänomen sein. Ohne den Temperaturverlauf ist es schwierig das zu beweisen. Da es schon Ende Juni ist, ist aber Schneeschmelze eher unwahrscheinlich.

Die Modellierung für Schladming (Diagramm siehe Anhang B) liefert bessere Ergebnisse als jene für Liezen (Abbildung 8.1).

Oktober 1996 (Abbildung 8.2)

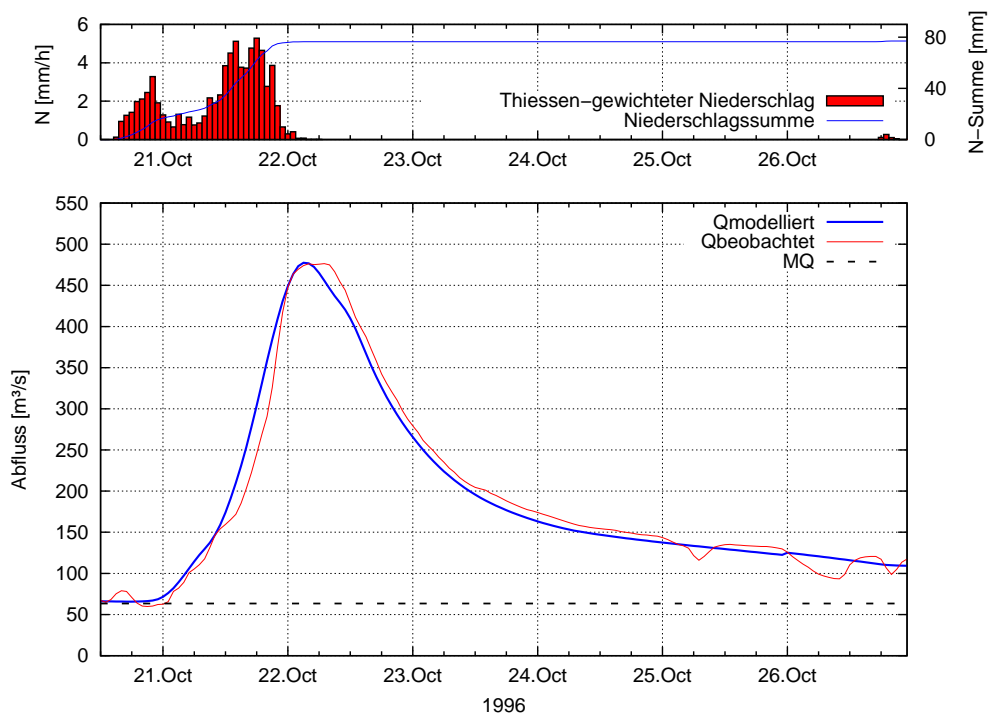


Abbildung 8.2: Modellierung Oktober 1996, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

Das Ereignis vom 22. Oktober 1996 geschah nach einer längeren Trockenperiode. Der Regen besteht aus zwei Blöcken unterschiedlicher Intensität. Weil der Boden trocken ist, liegen die Anfangsverluste ziemlich hoch (13 mm) und die „verschlucken“ fast den ganzen ersten Blockregen. Aus diesem Grund bildete sich nur ein statt zwei Peaks. Das verursacht auch niedrige Steilheit des aufsteigenden Astes und die ganze Abflussganglinie hat eine außergewöhnliche, fast symmetrische Form.

Die Ganglinie konnte ziemlich gut modelliert werden (s. Abbildung 8.2). Es gibt jedoch einen kleineren Unterschied zwischen Beobachtung und Simulation im Bereich des absteigenden Astes. Der beträgt rund $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Initialabfluss ist gleich dem MQ. Die hohe Intensität und lange Dauer des Niederschlags hat zur Folge relativ große Werte von *flow ratios* des schnellen und mittleren Speichers. Somit ist der Abflussbeiwert hoch und beträgt $\Psi=0.49$.

Ähnlich ist die Situation mit der Modellierung der Kurve vom Pegel in Schladming (s. Anhang B). Der Anteil des ersten Blockregens ist in diesem Fall größer und die Kurve hat noch einen zweiten Scheitel, der gering ist. Dementsprechend ist der Anfangsverlust kleiner (8 mm). Er konnte nicht so gut modelliert werden, was mit dem zweiten, größeren nicht der Fall ist. Er ist nämlich sehr gut nachgebildet worden.

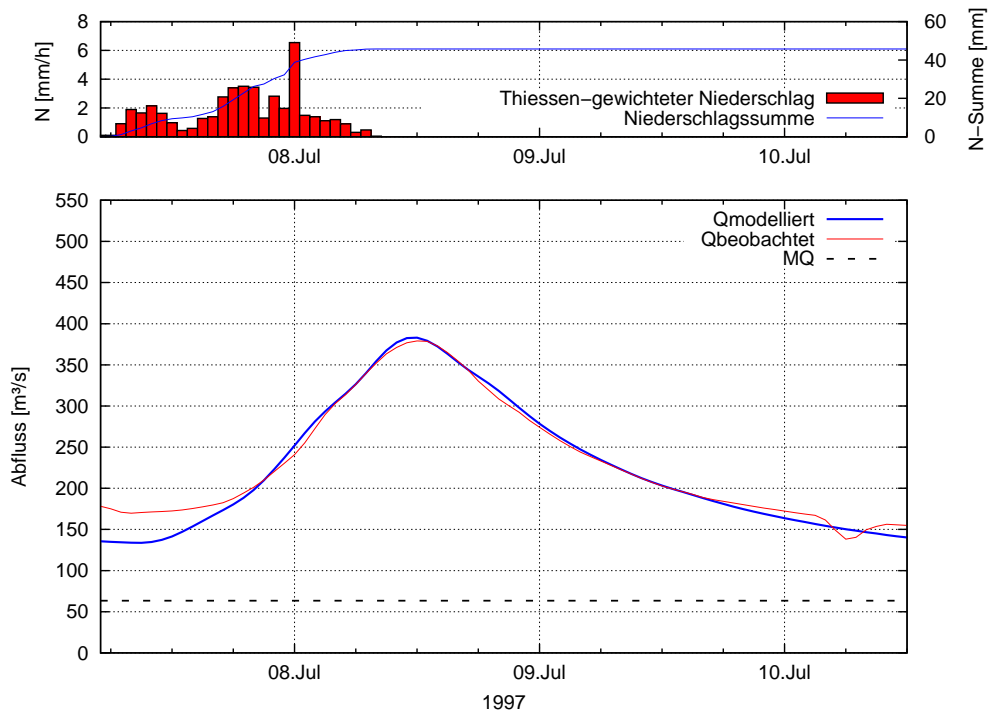


Abbildung 8.3: Modellierung Juli 1997, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

Juli 1997 (Abbildung 8.3)

Hier handelt es sich um den zweiten Peak des Ereignisses aus dem Anfang Juli 1997. Bei der Modellierung über eine lange Periode mit mehreren Scheiteln ist es in HEC-HMS nur möglich die Anfangsverluste für den ersten Scheitel einzutragen. Das erschwert die Modellierung von mehr als einem Ereignis im selben Simulationsvorgang. Aus diesem Grund wurde es entschieden, bei diesem Ereignis nur den zweiten, größeren Peak zu kalibrieren.

Die Niederschlagshöhe ist beim ersten Scheitel wesentlich höher, aber der trockene Boden hat viel von der Wassermenge aufgesaugt. Bei dem modellierten hat der Abflussscheitel $379 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht, obwohl der Niederschlag nun kleiner ist. Der Basisabfluss liegt mit $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ganz hoch und dementsprechend sind die Anfangsverluste klein.

Die Kurve konnte gut modelliert werden mit großem Anteil sowohl des mittleren ($f_{Rm}=0.23$) als auch des schnelleren Speichers ($f_{Rs}=0.21$).

Bei der registrierten Ganglinie des Pegels in Schladming ist eine Störung auffällig, s. Abbildung im Anhang B auf Seite 93. Dies ist das Zeichen eines Fehlers bei der Messung. Die modellierte Kurve weicht in diesem Bereich von der gemessenen leicht ab. Der Scheitel tritt zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf.

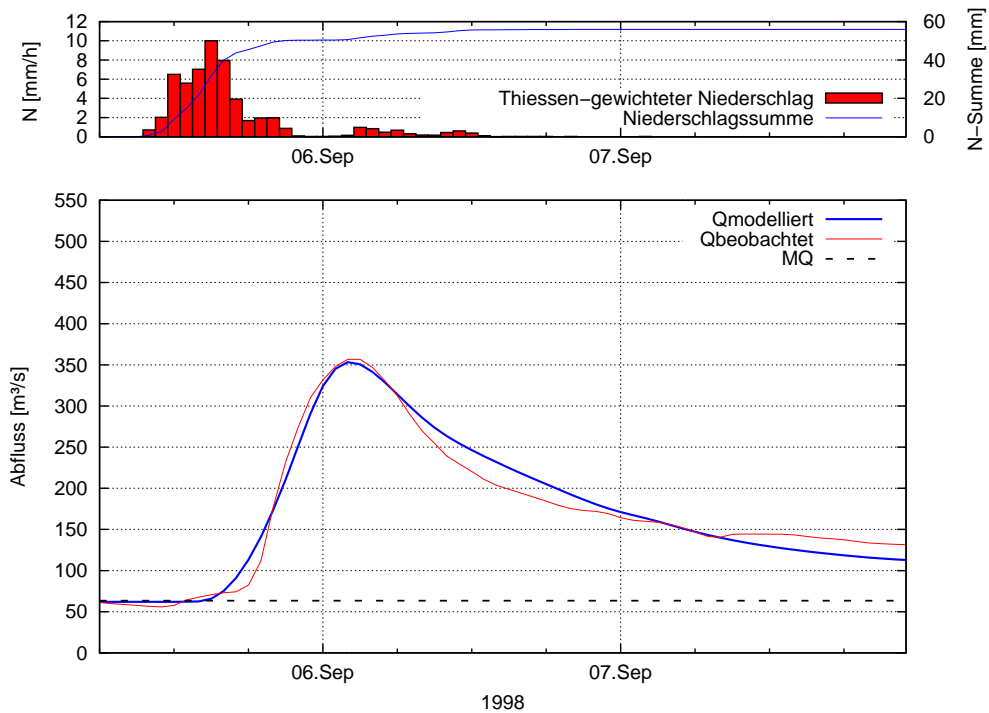


Abbildung 8.4: Modellierung September 1998, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

September 1998 (Abbildung 8.4)

Der Peak dieses Ereignisses konnte erst mit einem Anfangsverlust von 21 mm gut modelliert werden. Das weist auf sehr trockenen Boden hin. Der Basisabfluss befindet sich im Bereich des MQ, die Abbildung 8.4.

Der absteigende Ast ist etwa schwieriger modellierbar. Am 6. September wurde noch ein Niederschlag niedrigerer Höhe registriert. In Wahrheit ist er vom Einzugsgebiet absorbiert worden. Das kann im Modell nicht nachvollzogen werden, da die Anfangsverluste nur einmal, zum Beginn, definiert sind. Der modellierte Abfluss im Bereich des absteigenden Astes des mittleren Speichers ist deswegen um $20 \text{ m}^3/\text{s}$ größer als der beobachtete.

In Schladming ist der beobachtete Peak um zwei Stunden früher passiert als der modellierte. Die absteigende Kurve ist, ähnlich wie in Liezen, schwer modellierbar.

Juli 1999 (Abbildung 8.5)

Das ist ein typisches Sommerereignis für das Einzugsgebiet von Liezen. Der Boden ist feucht aufgrund eines Regens am Tag vor dem Ereignis. Der Anfangsverlust beträgt in Liezen 4 mm.

Die ganze Ganglinie ist gut modelliert, vor allem der Scheitel, der diesmal ganz genau getroffen ist. Der Abflussbeiwert beträgt $\Psi=0.34$, die Niederschlagssumme 65.8 mm.

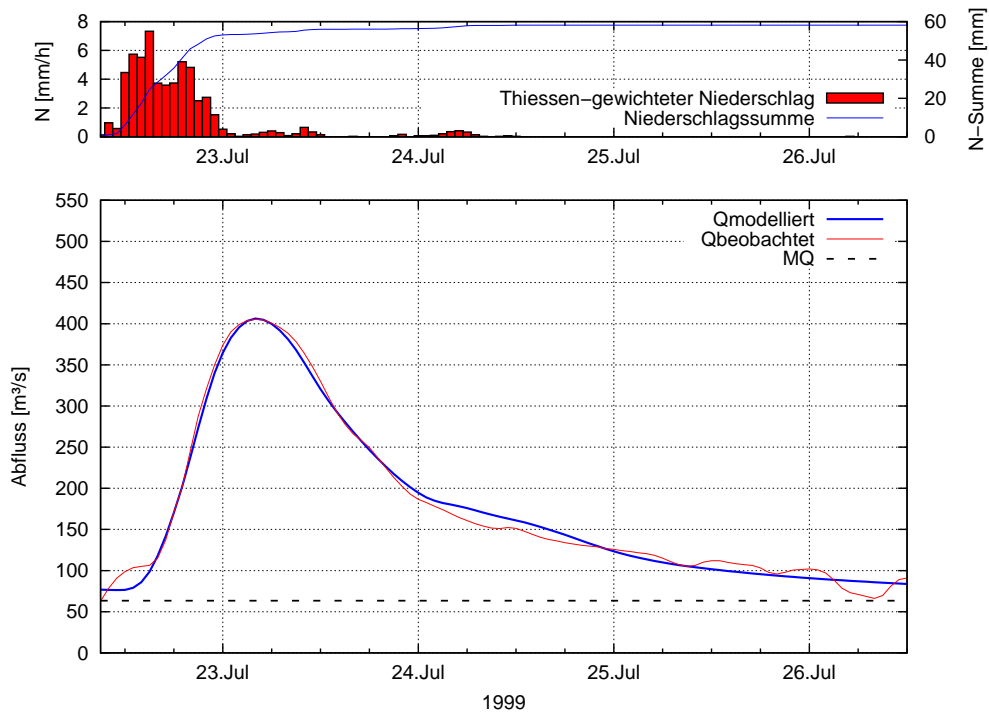


Abbildung 8.5: Modellierung Juli 1999, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

Im Einzugsgebiet von Schladming ist es am 24. September wieder zu einem lokalen Niederschlag gekommen, was die absteigende Kurve beeinflusste. Als Folge gibt es Unterschiede zwischen den Abflussganglinien in diesem Bereich.

Juli 2001 (Abbildung 8.6)

Ab dem Jahr 2000 standen noch Abflussmessungen von zusätzlich zwei Pegeln innerhalb vom Einzugsgebiet des Pegels Schladming zur Verfügung: Altenmarkt im Pongau (Enns) und Löbenau (Taurach). Das Einzugsgebiet ist jetzt in drei kleineren Einzugsgebieten untergliedert. Das Zwischeneinzugsgebiet von Liezen bleibt weiterhin unverändert.

Der Niederschlag beim Ereignis vom Juli 2001 dauerte zwei Tage mit maximaler Intensität von 4.7 mm/h. Diese Dauer bedingte ein geringes Gefälle des absteigenden Astes. In der Modellierung ist das relativ gut erfasst. Der Peak hat eine stumpfe Form. Die konnte nicht ganz so wie in Realität nachgebildet werden.

Der Boden am Anfang des Ereignisses ist trocken. Der gewonnene Anfangsverlust ist für dieses Einzugsgebiet 7 mm.

Die Ergebnisse und der Verlauf der Modellierung im Zwischeneinzugsgebiet Schladming sind ähnlich denen in Liezen. Die Ganglinie im Einzugsgebiet von Altenmarkt im Pongau konnte nicht ganz plausibel modelliert werden. Das gilt auch für den Pegel Löbenau an der Taurach. In dem zweiten Fall weist aber die registrierte Ganglinie einen Fehler auf, s. Graphik auf der Seite

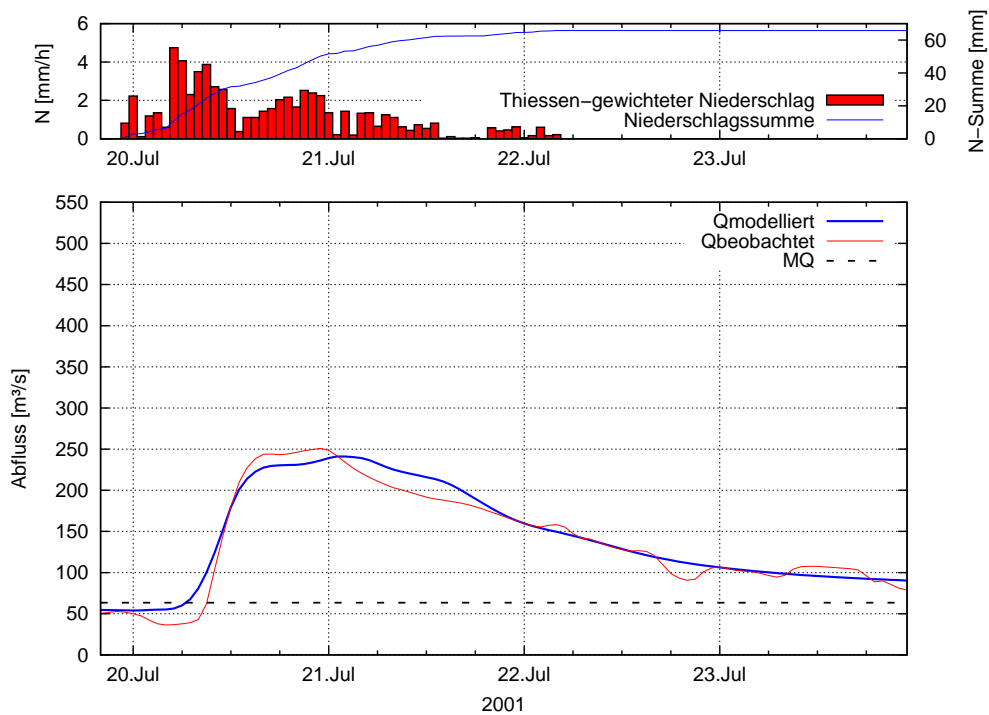


Abbildung 8.6: Modellierung Juli 2001, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

97. Die Ergebnisse in diesem Fall sind daher nicht relevant, da keine entsprechende gemessene Ganglinie existiert.

März 2002 (Abbildung 8.7)

Der Niederschlag dauerte bei diesem Ereignis beinahe sechs Tage. Das hatte zur Folge eine Hochwasserwelle mit breitem Scheitel, der $376 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichte.

Die Ganglinie ist, außer dem aufsteigenden Ast, schwer modellierbar. Da es sich um ein Winterereignis handelt, Schneeschmelze könnte auch ein Grund dafür sein. Sie bringt neue Wassermengen ins System, die mit dem HEC-HMS in verwendeter Version nicht erfasst werden können. Um den Einfluss dieses Faktors zum Teil zu annullieren, sind hohe Anfangsverluste notwendig. Sie übernehmen dann von der Schneeschmelze stammendes Wasser. Für Liezen beträgt der ermittelte Anfangsverlust 27 mm. Auch der Zeitpunkt des Auftretts des Peaks ist nicht genau modelliert. Im Modell passiert er sogar ein Tag früher.

Der Abflussbeiwert in Liezen beträgt $\Psi=0.35$ und liegt im mittleren Bereich unter den ausgewählten Ereignissen.

Der absteigende Ast verläuft im Modell mit höheren Ordinaten als in Wirklichkeit. Das ist schon wieder mit der niedrigeren Niederschlägen zum Ende des Ereignisses zu klären. Deren Verluste sind im Modell nicht berücksichtigt.

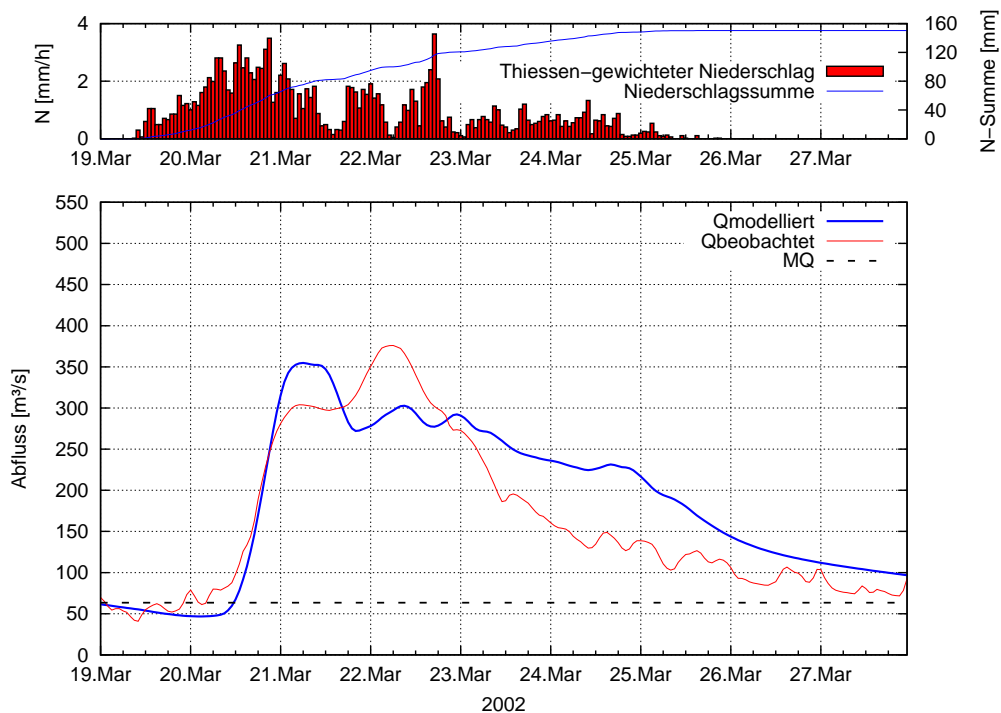


Abbildung 8.7: Modellierung März 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

Die Kalibrierungen restlicher Pegel zeigten auch, dass so ein Winterereignis langer Dauer nicht ganz effizient mit dem Modell beschreibbar ist. Das gilt aber nicht für die Ganglinie und der Peak vom Pegel in Löbenau an der Taurach, die diesmal gut modelliert sind.

Die erste Welle aus dem August 2002 (Abbildung 8.8)

Das Histogramm des Niederschlags der erste Hochwasserwelle aus dem August 2002 weist mehrere hintereinander liegende Ereignisse auf. Das führte zu Ausbeulungen der Abflusskurve. Diese sind nicht ganz effektiv mit dem Modell erfasst, vor allem im aufsteigendem Bereich. Der Scheitel ist hingegen gut getroffen. Es wurde diesmal ein Maximum von $176 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert.

Trockene Vorbedingungen hatten einen niedrigen Basisabfluss zur Folge, der unter dem monatlichen Mittelwert liegt ($45 \text{ m}^3/\text{s}$).

Die Ganglinie der restlichen Pegel konnten auch ziemlich gut modelliert werden. Die Kurve des Pegels Löbenau hat, im Gegensatz zu den anderen, einen Basisabfluss, der oberhalb des MQ liegt. Das ist das Zeichen eines lokalen Regens vor dem untersuchten Ereignis in diesem Einzugsgebiet.

Die zweite Welle aus dem August 2002 (Abbildung 8.9)

Am 7. August geschah der erste Peak vom Ereignis aus dem August 2002. Am 11. August fing es wieder ergiebiger an zu regnen. Der vorbefeuchte Boden, hoher Wert der Basisabfluss

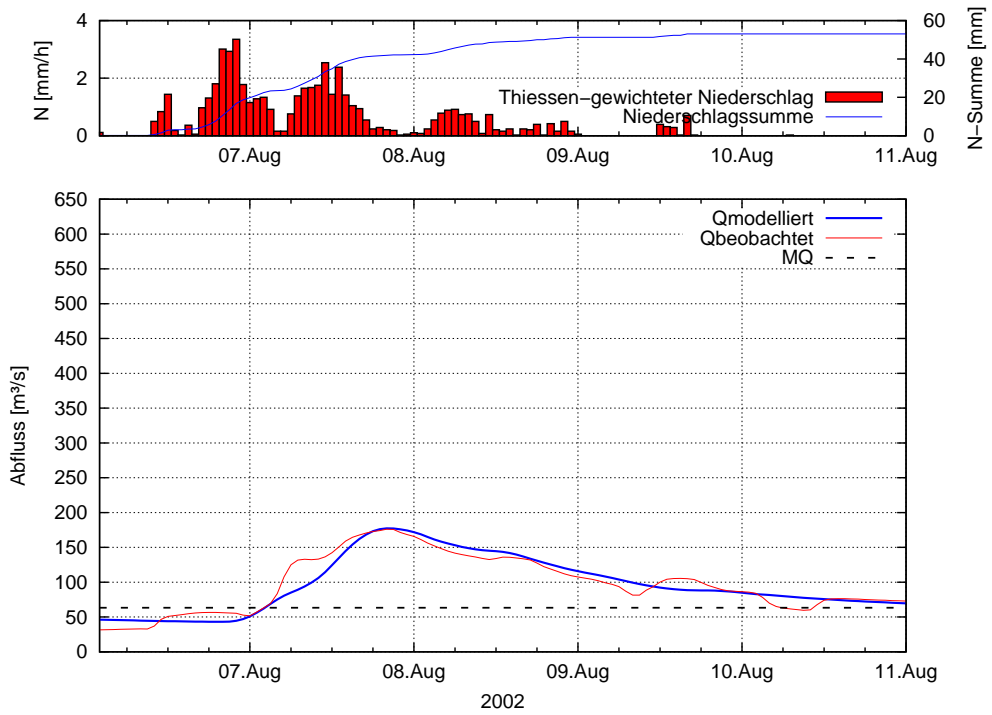


Abbildung 8.8: Modellierung August1 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

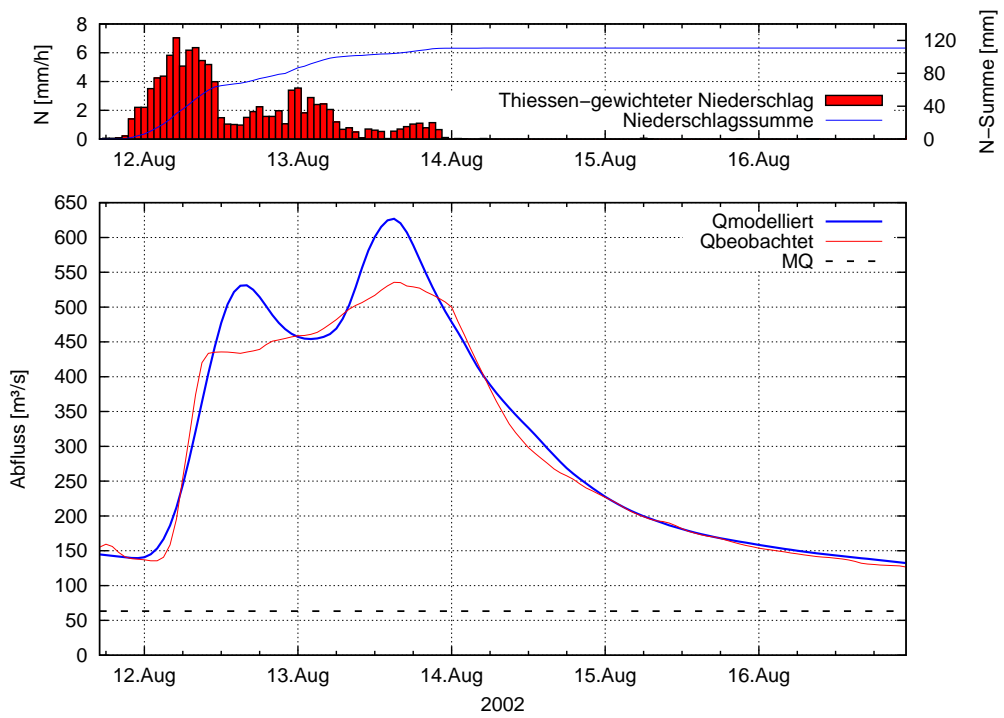


Abbildung 8.9: Modellierung August2 2002, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

(136 m³/s) durch den ersten Regenblock und dreitägige Dauer dieses Niederschlags waren die Ursache für ein katastrophales Hochwasserereignis. Der Pegel in Liezen registrierte am 13. August um 15 Uhr einen Durchfluss von 535.6 m³/s.

Die Form der gemessenen Ganglinie weist deutlich auf eine Ausuferung hin. Das Ergebnis der Modellierung zeigt zwei Peaks, die es in der Realität nicht gibt. Die stellen diejenige Wassermenge dar, die oberhalb vom Pegel ausgeföhrt ist und Überschwemmungen verursacht hat. Der Modellierungsvorgang zeigte auch, dass der erste Peak vom Abfluss des Zwischeneinzugsgebiets Liezen stammt und der zweite die Abflussganglinie des Pegels Schladming ist.

Der aufsteigende und vor allem der absteigende Ast der Ganglinie konnten gut modelliert werden. Das gilt auch für andere drei Pegel. In kleineren Einzugsgebieten von Pegeln Altenmarkt im Pongau und Löbenau haben sich bei diesem Ereignis die ermittelten Parameter als sehr plausibel gezeigt.

September 2003 (Abbildung 8.10)

Dieses Ereignis hatte eine Dauer von drei Tagen, ähnlich wie beim August 2002. Die Intensität des Regens war diesmal wesentlich niedriger und der Boden sehr trocken. Daher liegt der Scheitel, trotz der langen Niederschlagsdauer, tiefer (162 m³/s), weil die gewichtete Niederschlagssumme nur 45.3 mm beträgt.

Die Ganglinie hat eine untypische Form. Der Peak ist gut getroffen. Die Modellierung des Aufstiegs war etwa weniger effizient als die Modellierung des absteigenden Astes.

Bei den anderen Pegeln schaut die Lage umgekehrt aus: der Aufstieg der Kurve ist überall gut nachgebildet, jedoch der Abstieg weniger effizient.

Juni 2004 (Abbildung 8.11)

Es sind keine Niederschläge in Wochen vor dem Ereignis aus dem Juni 2004 registriert worden. Der hohe Initialabfluss (135 m³/s) ist in diesem Fall durch die verspätete Schneeschmelze zu klären. Ein Vergleich mit der Ganglinie vom Ereignis aus dem September 2003 zeigt, dass die Reaktion des Einzugsgebiets im Fall von Juni 2004 stärker ist, trotz niedriger Niederschlagssumme. Das liegt an höherer Intensität des Niederschlags (max $I=3.7$ mm/h versus max $I=2.5$ mm/h).

Die Nachregen niedrigerer Intensität hatten einen absteigenden Ast der Abflussganglinie mit sehr kleiner Steilheit zur Folge. Die Kurve hat sich in allen Bereichen als schwer modellierbar erwiesen.

Die ähnlichen Anfangsbedingungen herrschten auch in anderen untersuchten Einzugsgebieten. Deren Abflussganglinien sind aber plausibler modelliert.

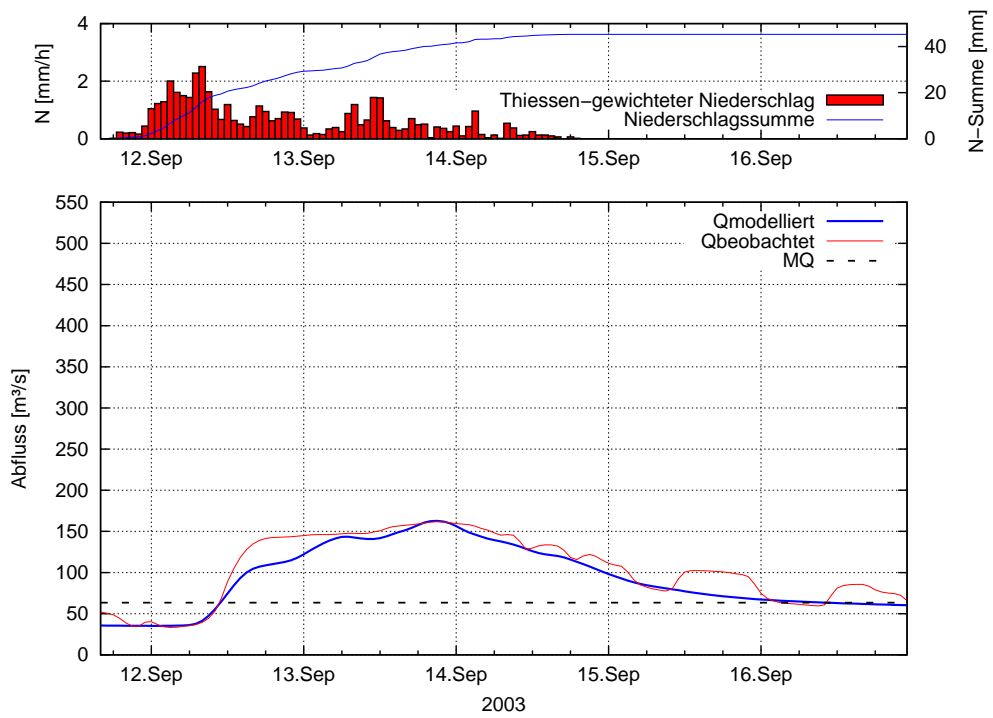


Abbildung 8.10: Modellierung September 2003, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

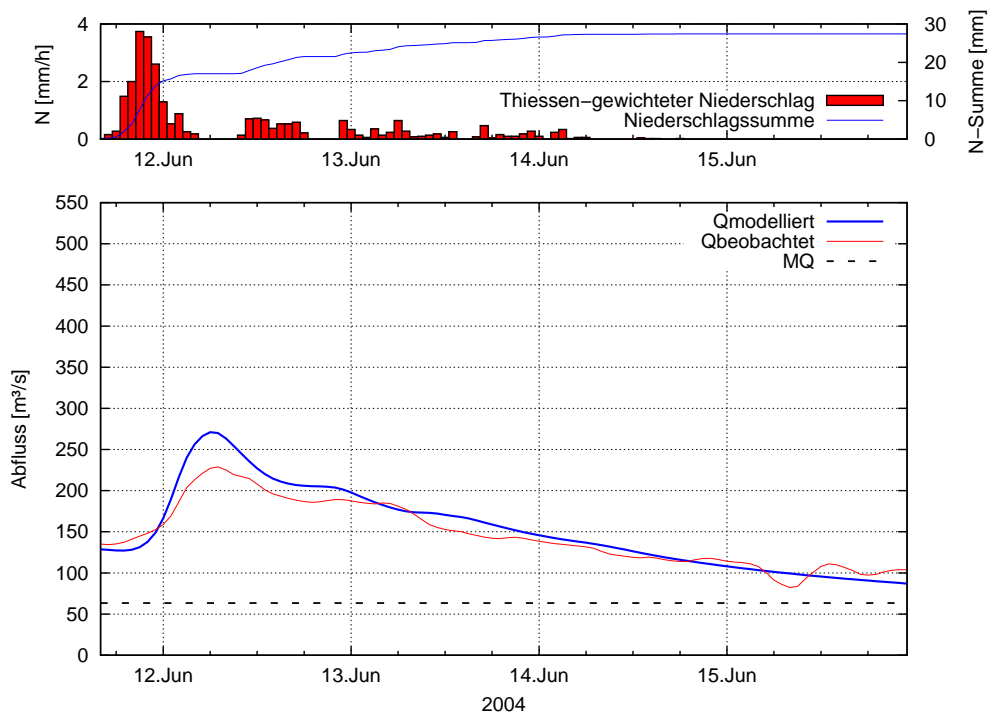


Abbildung 8.11: Modellierung Juni 2004, Pegel: Liezen (Röthelbrücke)

8.2 Beurteilung der Simulationsgüte

Mit Hilfe der statistischen Gütezahlen kann die Güte der Modellierung beurteilt werden. Es werden die folgenden herangezogen:

- **Der lineare Korrelationskoeffizient** r^2 stellt ein Maß für die Anpassung des Modells dar. Wenn dessen Wert gegen 1 geht, dann kann man von einem sehr starkem Zusammenhang reden. Für die Werte kleiner als 0.5 liegt ein schwacher oder gar kein Zusammenhang vor. Er ist gleich:

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^* - \overline{Q}^*) \cdot (Q_i - \overline{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \overline{Q})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i^* - \overline{Q}^*)^2} \quad (8.1)$$

| | |
|------------------|---|
| r^2 | linearer Korrelationskoeffizient |
| n | Anzahl der Wertepaare |
| Q_i | Beobachteter Wert zum Zeitpunkt i |
| Q_i^* | modellierter oder vorhergesagter Wert zum Zeitpunkt i |
| \overline{Q} | Mittelwert der Beobachtungen |
| \overline{Q}^* | Mittelwert der modellierten oder vorhergesagten Werte |

- **Systematischer Fehler** (*bias*) zeigt die Abweichung der Ergebnisse vom realen Wert und somit die durchschnittliche Richtigkeit einer Analyse. Diese Abweichungen werden durch Störungen (fehlerhafte Messungen aufgrund falscher Methoden oder defektes Gerätes, unerwartete Komponente oder durch ein unpassendes Modell) verursacht. Wenn man der Mittelwert für die Darstellung des Erwartungswertes eines Testergebnisses nimmt, dann wird der *bias* folgendermaßen interpretiert:

$$bias = \overline{Q}^* - \overline{Q} \quad (8.2)$$

| | |
|------------------|---|
| \overline{Q}^* | Mittelwert der modellierten oder vorhergesagten Werte |
| \overline{Q} | Mittelwert der gemessenen Werte |

- **Normierter mittlerer Fehler (normalized mean error)** nme ist ein Maß für den *bias*. Er kann positiv oder negativ sein. Wenn $nme=0$, dann ist das Modell vollständig angepasst. Er ist gleich:

$$nme = \frac{me}{\overline{Q}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^* - Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (8.3)$$

| | |
|-----------|---|
| me | mittlerer Fehler - mean error |
| nme | normierter mittlerer Fehler - normalized mean error |
| n | Anzahl der vergleichenden Wertepaare |
| Q_i | gemessener Wert zum Zeitpunkt i |
| Q_i^* | modellierter oder vorhergesagter Wert zum Zeitpunkt i |
| \bar{Q} | Mittelwert der gemessenen Werte |

- **Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient** nsm_e stellt ein kombiniertes Maß für systematische und zufällige Fehler dar (Nash-Sutcliffe, 1970 [18]). Der Wert $nsm_e=1$ bedeutet ein perfektes Modell. Der nsm_e kann auch negativ sein.

$$nsm_e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^* - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (8.4)$$

| | |
|-----------|---|
| nsm_e | Nash-Sutcliffe model efficiency |
| n | Anzahl der Wertepaare |
| Q_i | gemessener Wert zum Zeitpunkt i |
| Q_i^* | modellierter oder vorhergesagter Wert zum Zeitpunkt i |
| \bar{Q} | Mittelwert der gemessenen Werte |

In der Tabelle 8.2 auf der nächsten Seite befinden sich die gerechneten Gütezahlen für alle untersuchten Ereignis in Einzugsgebieten von Pegeln Liezen und Schladming. Es ist ersichtlich, dass alle Ereignisse sehr zufriedenstellend angepasst sind. Die Ausnahme ist nur das Ereignis aus dem März 2002. Der nsm_e für den Schladming Pegel beträgt nur 0.49 und für den Liezen 0.74. Grund dafür ist sowohl vermutete Schneeschmelze als auch die Dauer dieses Ereignisses. Bei der Abflussganglinie hat die lange Dauer und ständige Schwankungen der Niederschlagsintensität vor Allem große Probleme bei der Eichung des absteigenden Astes verursacht.

Die Auswertung der Ergebnisse für die Einzugsgebiete von Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach hatte gezeigt, dass die Effizienz in diesem Fall nicht so hoch ist wie bei den anderen Pegeln, s. Tabelle 8.3 auf der nächsten Seite. Sehr gute Ergebnisse gibt jedoch für die zweite Welle des August 2002 Hochwassers.

Günstigere Gütezahlen sind in größeren Einzugsgebieten erreicht. Das zeigt, dass die Modellierung mit den gewonnenen Methoden besser in solchen Einzugsgebieten funktioniert. Andererseits weisen die zwei Pegel der kleineren Einzugsgebiete (Altenmarkt im Pongau und Löbenau) oft Fehler bei Messungen auf, wie Pegel Altenmarkt bei dem Ereignis aus dem Juli 2001 (s. Anhang B, Seite 95).

| Pegel | Liezen (Röthelbrücke) | | | | Schladming | | | | |
|---------|-----------------------|-------|---------|--------|------------|-------|--------|--------|--------|
| | Gütezahl | r^2 | $bias$ | nme | $nsme$ | r^2 | $bias$ | nme | $nsme$ |
| Jun 95 | | 0.943 | -19.748 | -0.108 | 0.813 | 0.988 | -3.106 | -0.046 | 0.978 |
| Okt 96 | | 0.977 | -0.546 | -0.003 | 0.977 | 0.980 | 1.915 | 0.043 | 0.968 |
| Jul 97 | | 0.980 | -4.675 | -0.020 | 0.963 | 0.942 | 1.483 | 0.020 | 0.923 |
| Sep 98 | | 0.968 | 1.638 | 0.010 | 0.966 | 0.935 | 5.656 | 0.101 | 0.898 |
| Jul 99 | | 0.991 | -0.218 | -0.001 | 0.991 | 0.967 | 7.125 | 0.122 | 0.905 |
| Jul 01 | | 0.958 | 4.214 | 0.030 | 0.954 | 0.957 | -1.339 | -0.027 | 0.952 |
| Mär 02 | | 0.801 | 22.793 | 0.140 | 0.742 | 0.774 | 12.279 | 0.274 | 0.494 |
| Aug1 02 | | 0.906 | -0.172 | -0.002 | 0.903 | 0.967 | -0.882 | -0.023 | 0.964 |
| Aug2 02 | | 0.977 | 12.364 | 0.047 | 0.961 | 0.985 | 2.003 | 0.024 | 0.983 |
| Sep 03 | | 0.930 | -8.879 | -0.092 | 0.882 | 0.970 | -2.262 | -0.069 | 0.933 |
| Jun 04 | | 0.955 | 6.453 | 0.044 | 0.828 | 0.963 | -0.811 | -0.014 | 0.962 |

Tabelle 8.2: r^2 , $bias$, nme und $nsme$ für alle modellierten Ereignisse in Einzugsgeieten der Pegel Liezen (Röthelbrücke) und Schladming

| Pegel | ALtenmarkt im Pongau | | | | Löbenau (am Taurach) | | | | |
|---------|----------------------|-------|--------|--------|----------------------|-------|--------|--------|--------|
| | Gütezahl | r^2 | $bias$ | nme | $nsme$ | r^2 | $bias$ | nme | $nsme$ |
| Jul 01 | | 0.889 | 0.320 | 0.037 | 0.624 | 0.674 | -0.416 | -0.058 | 0.525 |
| Mär 02 | | 0.569 | 0.100 | 0.011 | 0.550 | 0.929 | 0.426 | 0.057 | 0.912 |
| Aug1 02 | | 0.848 | -0.005 | -0.001 | 0.815 | 0.973 | -0.103 | -0.016 | 0.970 |
| Aug2 02 | | 0.983 | 0.066 | 0.004 | 0.980 | 0.991 | -0.142 | -0.010 | 0.988 |
| Sep 03 | | 0.926 | -0.039 | -0.007 | 0.874 | 0.889 | 0.186 | 0.035 | 0.764 |
| Jun 04 | | 0.901 | 0.653 | 0.052 | 0.747 | 0.969 | -0.031 | -0.003 | 0.955 |

Tabelle 8.3: r^2 , $bias$, nme und $nsme$ für alle modellierten Ereignisse in Einzugsgebieten der Altenamrkt im Pongau und Löbenau am Taurach

8.3 Kalibrierte Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten

Die Gebietsparameter Konzentrationszeit t_c und Speicherkonstante K sind einmal durch Kalibrierung bestimmt und für weitere Ereignisse fix gehalten. Das unterscheidet sie grundlegend von ereignisbezogenen Parametern, die an jedes weiteren Ereignis wieder angepasst wurden.

Im Prozess der Kalibrierung beeinflusst die Konzentrationszeit den Scheitel der Abflussganglinie. Je größer die t_c , desto größer ist der Abstand zwischen den Peaks von der Abflussganglinie und vom Niederschlagshyetogram. Dementsprechend ist mit zunehmender t_c auch die Ordinate des Peaks niedriger und die Form der ganzen Ganglinie wird breiter.

Die Werte der geeichten Konzentrationszeiten lieferten für fast alle betrachteten Ereignisse zufriedenstellende Ergebnisse. Eine Übersicht der Werte ist der Tabelle 8.4 auf der nächsten Seite und der Abbildung 8.12 auf Seite 70 zu entnehmen. Generell sind Ereignisse mit kurzem und intensivem Niederschlag besser modelliert als Ereignisse wo Niederschläge länger dauern und die Intensität nicht so hoch ist. Die lang dauernden Niederschläge haben zur Folge mehrere Peaks und Ausbeulungen der Ganglinie. Diese Phänomene brauchen dann eigene Konzentrationszeiten, was in diesem Modell unausführbar ist. Die einzige Möglichkeit wäre eine zusätzliche

| Modellparameter | | Liezen | Schladming-ganz | Schladming-Teilgebiet | Altenmarkt im Pongau | Löbenau (Taurach) |
|------------------------------|--------------------|--------|-----------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| | | | | | | |
| Konzentrationszeit t_c [h] | langsamer Speicher | 120 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | mittlerer Speicher | 30 | 25 | 20 | 20 | 17 |
| | schneller Speicher | 9 | 5 | 4 | 2 | 2 |
| Speicherkonstante K [h] | langsamer Speicher | 200 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| | mittlerer Speicher | 40 | 40 | 35 | 30 | 30 |
| | schneller Speicher | 10 | 8 | 8 | 6 | 5 |

Tabelle 8.4: Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten für alle untersuchte Einzugsgebiete

Aufteilung des Ereignisses auf mehrere einzelne. Da erscheint dann das Problem der richtigen Aufteilung des dazugehörigen effektiven Niederschlags.

Die Speicherkonstante K stellt die Verzögerung durch die Speicherung im Einzugsgebiet dar. Die Wert der K bestimmt vor Allem die Steilheit und Form der Rückgangskurve, aber auch die Lage und Größe des Scheitels. Ein höheres K bewirkt eine Rückgangskurve mit kleinerem Gefälle und niedrigem Peak. Physisch bedeutet das eine größere Speicherung und somit zunehmender Anteil des Zwischen- und Basisabflusses.

Bei der Modellierung sind wieder bessere Ergebnisse von Ereignissen mit Niederschlägen, die aus nur einem Regenblock bestehen, erreicht. Bei länger dauernden Ereignissen mit mehreren Regenblöcken tritt das Problem der ausgebeulten und nicht einheitlich verlaufender Rückgangskurve auf.

Alle diese Erscheinungen sind typisch für Winterereignisse, wo zusätzlich noch Schneeschmelze als Störfaktor ins Spiel eintritt. Im Allgemeinen sind Sommerereignisse mit kurzen, starken Niederschlägen besser mit den ermittelten Werten für die Parameter t_c und K modelliert.

8.4 Kalibrierte flow ratios

Die *flow ratios* sind ein Maß für die Aufteilung des effektiven Niederschlags auf drei Speicher, die ein Einzugsgebiet im Modell bilden. Sie werden durch die Kalibrierung der Abflussganglinie für jedes Ereignis neu geeicht (s. Seite 49).

Die *flow ratios* der schnellen Speicher sind überall größer als diejenige der mittleren. Das weist auf größer Anteil des Oberflächen- als Zwischenabfluss im gesamten Abfluss. Die *flow ratio* des langsamen Anteils hat wenig Einfluss auf die Form und Höhe der Ganglinie. Sie ist maßgebend nur für die Modellierung der Basisabflusslinie.

Die Tabelle 8.5 auf Seite 72 zeigt die ermittelten *flow ratios* für alle untersuchten Ereignisse und Einzugsgebiete. Der größte ist der Anteil von der *flow ratio* des langsamen Speichers. Der hat

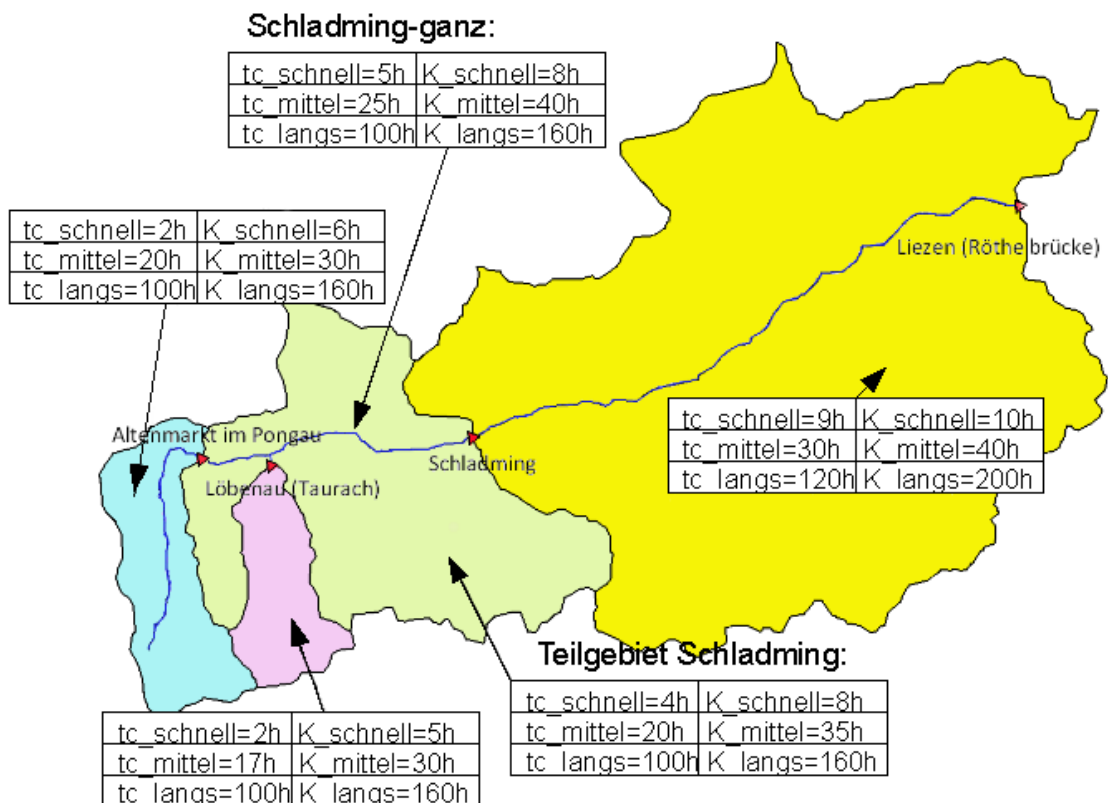


Abbildung 8.12: Ermittelte Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten

allerdings keinen Einfluss auf den Direktabfluss und ist für die Modellierung vom Basisabfluss maßgebend. Die restlichen zwei *flow ratios* deuten darauf hin, dass der schnelle Speicher am meisten zu der Entstehung vom Direktabfluss beiträgt.

Auf den Diagrammen 8.13 und 8.14 sind die *flow ratios* in Funktion vom Basisabfluss bzw. von Niederschlagssummen für das Einzugsgebiet von Liezen dargestellt. Die *flow ratios* schnell und mittel zeigen eine steigende Tendenz mit der Zunahme des Basisabflusses. Die *flow ratio* des langsamen Abflussanteils hat nicht so viele Schwankungen und bleibt fast konstant. Der hohe Initialabfluss ist ein Zeichen der Vorbefeuchtung oder des Einflusses der Schneeschmelze. Die Reaktion des Einzugsgebiets ist in diesem Fall rasanter und die Wahrscheinlichkeit eines Hochwassers höher. Auf anderen Seite, die Relation zu den Niederschlagssummen zeigen steigende Tendenz aller drei *flow ratios*, mit der Ausnahme von *flow ratio mittel* bei den Ereignissen März und August 2002.

Mit der zunehmenden Niederschlagssumme eines Ereignisses gewinnt der schnelle Speicher an Bedeutung und der Peak liegt höher.

Die bestimmten Werte der *flow ratios* des langsamen Speichers haben nicht so große Schwankungen. Sie beeinflussen auch ganz unwesentlich die Ganglinie des Direktabflusses. Aus ermittelten Werten kann man eine generelle und für alle Einzugsgebiete geltende *flow ratio* langsam von 0.30 feststellen.

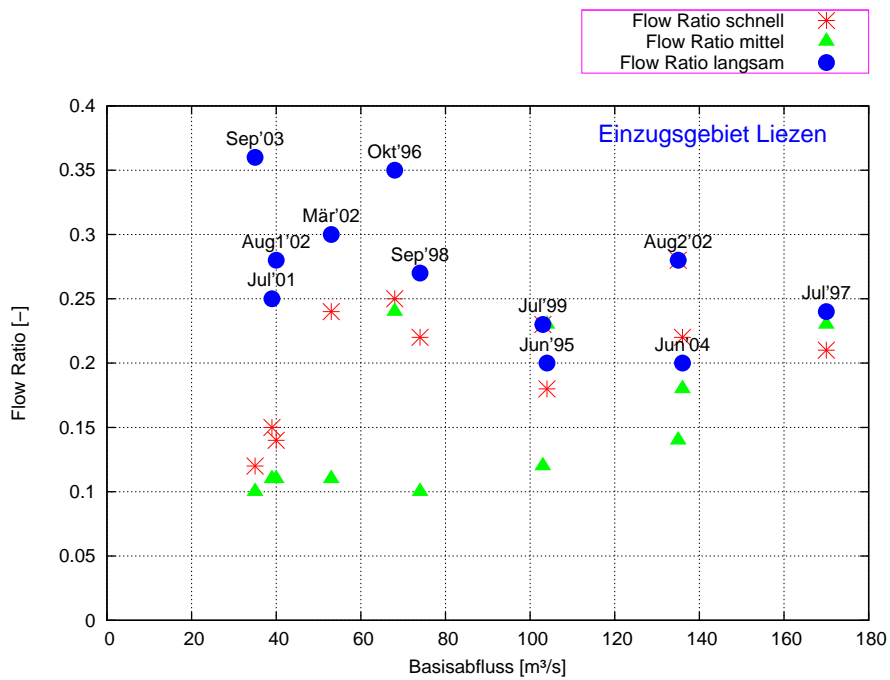


Abbildung 8.13: Geeichte flow ratios und Basisabfluss im Einzugsgebiet Liezen

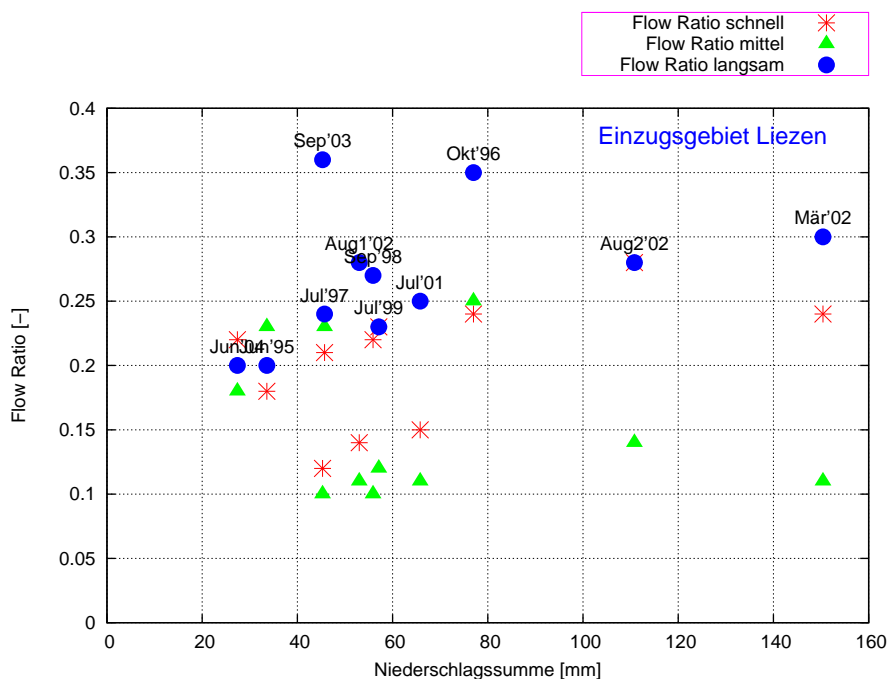


Abbildung 8.14: Geeichte flow ratios und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen

| Einzugsgebiet | flow ratio [-] | Jun 95 | Okt 96 | Jul 97 | Sep 98 | Jul 99 | Jul 01 | Mär 02 | Aug1 02 | Aug2 02 | Sep 03 | Jun 04 |
|---------------------|----------------|--------|----------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| | | Liezen | f_{Rs} | 0.18 | 0.25 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.15 | 0.24 | 0.14 | 0.28 |
| | f_{Rm} | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.10 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.14 | 0.10 | 0.18 |
| | f_{Rl} | 0.20 | 0.35 | 0.24 | 0.27 | 0.23 | 0.25 | 0.30 | 0.28 | 0.28 | 0.36 | 0.20 |
| Schladming-1 | f_{Rs} | 0.27 | 0.21 | 0.34 | 0.25 | 0.22 | - | - | - | - | - | - |
| | f_{Rm} | 0.17 | 0.13 | 0.22 | 0.11 | 0.13 | - | - | - | - | - | - |
| | f_{Rl} | 0.30 | 0.33 | 0.24 | 0.30 | 0.25 | - | - | - | - | - | - |
| Schladming-2 | f_{Rs} | - | - | - | - | - | 0.18 | 0.25 | 0.21 | 0.32 | 0.18 | 0.24 |
| | f_{Rm} | - | - | - | - | - | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.17 | 0.07 | 0.12 |
| | f_{Rl} | - | - | - | - | - | 0.25 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.24 |
| Altenmarkt | f_{Rs} | - | - | - | - | - | 0.25 | 0.23 | 0.11 | 0.28 | 0.18 | 0.18 |
| | f_{Rm} | - | - | - | - | - | 0.14 | 0.10 | 0.23 | 0.24 | 0.09 | 0.28 |
| | f_{Rl} | - | - | - | - | - | 0.21 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Löbenau | f_{Rs} | - | - | - | - | - | 0.05 | 0.34 | 0.17 | 0.49 | 0.17 | 0.13 |
| | f_{Rm} | - | - | - | - | - | 0.09 | 0.15 | 0.12 | 0.17 | 0.13 | 0.12 |
| | f_{Rl} | - | - | - | - | - | 0.23 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.24 |
| Bodenzustand | | feucht | trocken | feucht | trocken | feucht | trocken | feucht | trocken | feucht | trocken | feucht |

Tabelle 8.5: Kalibrierte flow ratios für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming) und Bodenzustände zum Ereignisbeginn

8.5 Gerechnete Abflussbeiwerte

Der Abflussbeiwert Ψ stellt das Verhältnis zwischen dem effektiven und gesamten Niederschlag dar. Im verwendeten Modell wird er als Summe der *flow ratios* des schnellen und mittleren Speichers interpretiert, s. Gleichung (7.5).

Die Tabelle 8.6 auf Seite 74 ermöglicht eine Übersicht in alle gerechneten Abflussbeiwerte. Den größten Wert von 0.49 in Liezen hat er für das Ereignis Oktober 96 erreicht. Charakteristisch für dieses Ereignis ist eine hohe Niederschlagsintensität, die trotz trockenem Boden zu einem Hochwasser führte.

Die Abbildungen 8.15 und 8.16 zeigen die gewonnenen Abflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Basisabfluss und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet von Liezen. Dargestellt sind auch die Feuchtezustände zum Ereignisbeginn einzelner Ereignisse. Ähnlich wie bei der graphischen Darstellung von *flow ratios*, ist die Zuordnung und die steigende Tendenz der Abflussbeiwerte besser ersichtlich als Funktion des Basisabflusses, als von der Niederschlagssumme. Die beiden Größen sind messbar, jedoch ist der Basisabfluss schon vor dem Ereignisende bekannt, was nützlich für eine Hochwasserprognose sein kann. Aus diesen zwei Gründen werden weiter die Abflussbeiwerte und *flow ratios* in Abhängigkeit vom Initialabfluss analysiert.

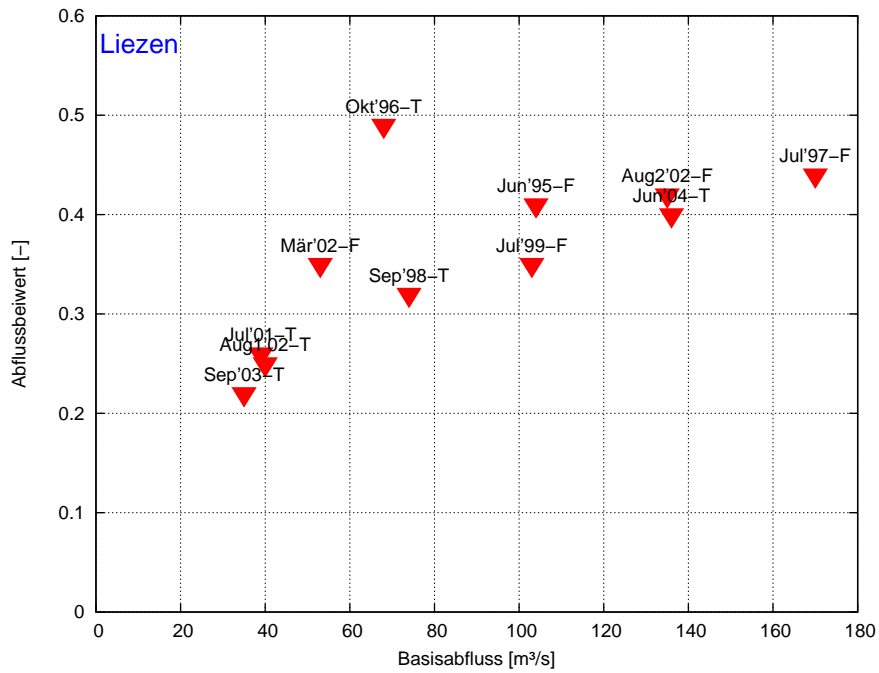


Abbildung 8.15: Gerechnete Abflussbeiwerte und Basisabfluss im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

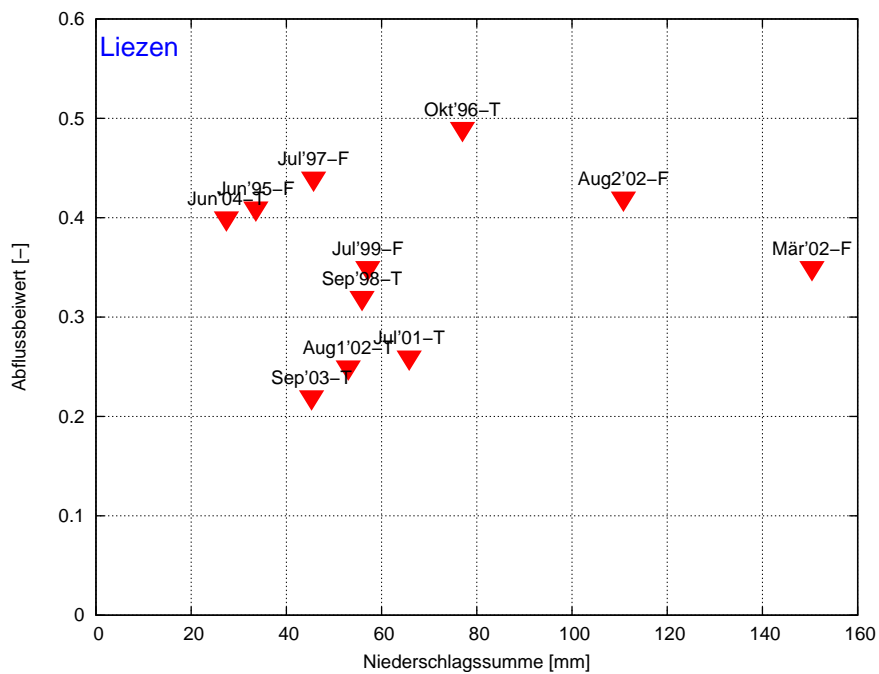


Abbildung 8.16: Gerechnete Abflussbeiwerte und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

| Ereignisse | Jun 95 | Okt 96 | Jul 97 | Sep 98 | Jul 99 | Jul 01 | Mär 02 | Aug1 02 | Aug2 02 | Sep 03 | Jun 04 |
|----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
| Einzugsgebiet | Abflussbeiwert [-] | | | | | | | | | | |
| Liezen | 0.41 | 0.49 | 0.44 | 0.32 | 0.35 | 0.26 | 0.35 | 0.25 | 0.42 | 0.22 | 0.40 |
| Schladming-1 | 0.44 | 0.34 | 0.56 | 0.36 | 0.35 | - | - | - | - | - | - |
| Schladming-2 | - | - | - | - | - | 0.30 | 0.37 | 0.34 | 0.49 | 0.25 | 0.36 |
| Altenmarkt | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.33 | 0.35 | 0.51 | 0.27 | 0.46 |
| Löbenau | - | - | - | - | - | 0.14 | 0.49 | 0.29 | 0.66 | 0.30 | 0.25 |

Tabelle 8.6: Gerechnete Abflussbeiwerte Ψ für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming)

8.5.1 Bestimmung der Wertebereiche für eine schnelle Abschätzung des Abflussbeiwertes

Mit dem zunehmenden Basisabfluss, steigt auch der Abflussbeiwert. Es ist auch ersichtlich, dass die Ereignisse mit feuchten Anfangsbedingungen einen höheren Abflussbeiwert aufweisen. Diese Tatsache erlaubt Bildung von Bereichen auf der Ordinate mit verschiedenen Feuchtezuständen zum Ereignisbeginn. Das ermöglicht eine effiziente Zuordnung eines neuen Ereignisses, wenn die Feuchtigkeit des Bodens bekannt ist, und gibt erste Information über den erwarteten Abflussbeiwert, und über den erwarteten Hochwasserpeak. Das stellt die Grundlage für eine künftige Hochwasserprognose dar.

Zwischeneinzugsgebiet Liezen

Die Abbildung 8.17 zeigt die Wertebereiche von der *flow ratio* mittel für das Einzugsgebiet von Liezen zusammen mit der Mittellinie dieser Bereiche. Die Grenzen sind eindeutig bestimmbar. Die Ausnahme ist das Ereignis Oktober '96. Nach der Höhe vom Basisabfluss gehört es eher zum Bereich der trockener Anfangsbedingungen. Trotzdem konnte es nur mit einer hohen *flow ratio* für den mittleren Speicher modelliert werden. Die Ursache liegt in der untypisch lange Dauer und in der hohen Intensität dieses Regens.

Bei der Bestimmung der Bereiche für den *flow ratio* schnell liegt wieder das Ereignis Oktober '96 diesmal gemeinsam mit dem Ereignis September '98 außer erwartetem Wertebereich. Das September '98 Ereignis hat eine hohe Niederschlagintensität, die ähnlich wie beim Oktober '96 trotz dem trockenem Boden eine Welle mit hohem Peak verursachte. Die restlichen Ereignisse mit dem Vorzeichen „trocken“ zeigen Tendenz einer Clusterbildung in einer Spanne zwischen den Werten der *flow ratio* von 0.1 und 0.15 (Abbildung 8.18 auf der nächsten Seite).

Bei den Abflussbeiwerten ist das Oktober '96 mit einem Ψ von 0.49 wieder außer dem Bereich der „trockenen“ Ereignisse. Die anderen Ereignisse mit trockenen Anfangsbedingungen gehören einem relativ breiten Bereich, der sich anfänglich zwischen 0.15 und 0.33 spannt.

Die Definitionen dieser Wertebereiche sind ein Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Hochwasserprognose. Die Grenzen der Bereichen können mit zusätzlichen Ereignissen weiter genauer definiert werden.

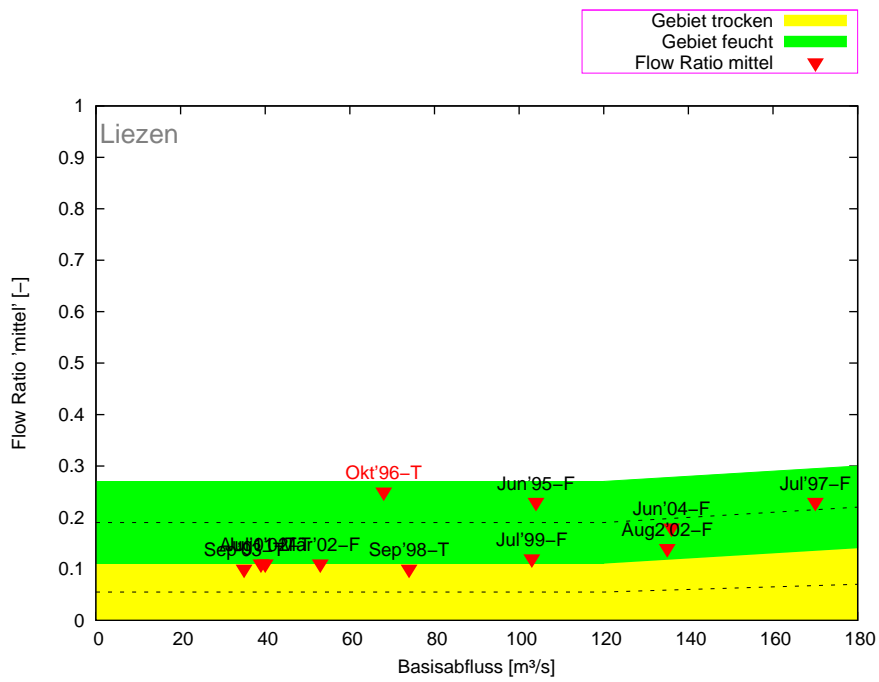


Abbildung 8.17: Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

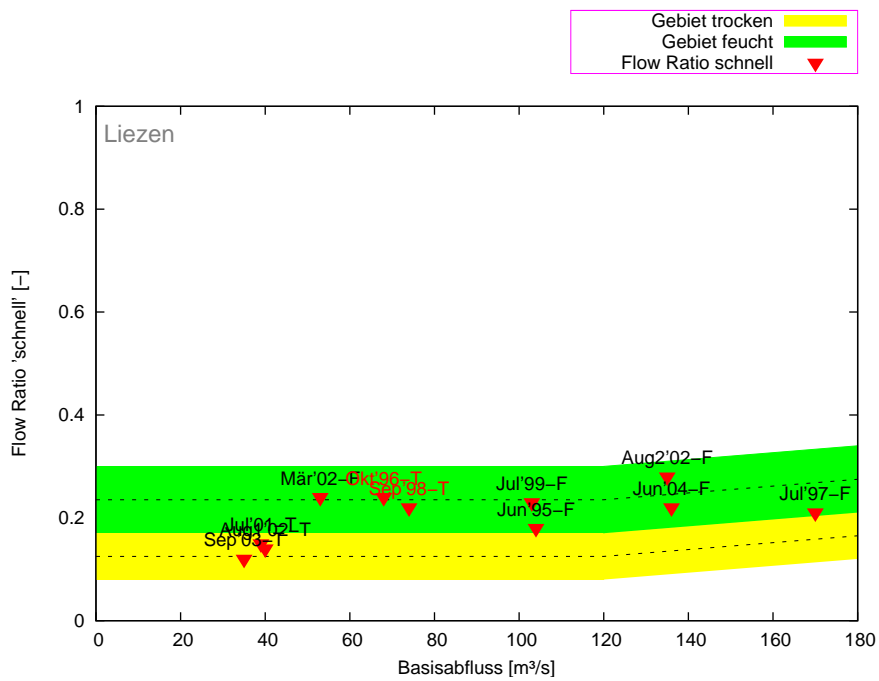


Abbildung 8.18: Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

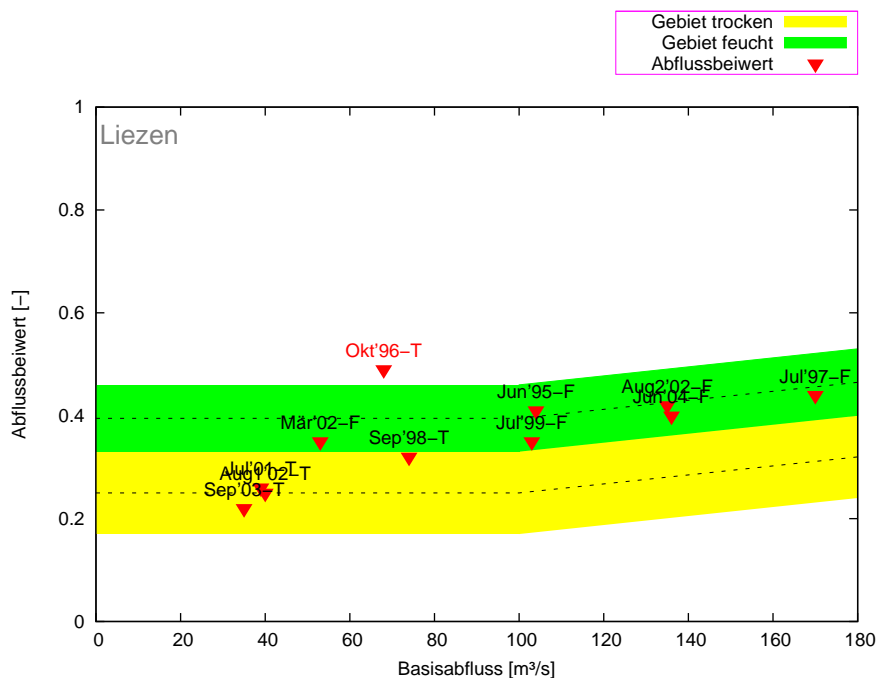


Abbildung 8.19: Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

Es folgen die Beschreibungen der Ergebnisse von restlichen untersuchten Einzugsgebieten. Die entsprechenden Diagramme befinden sich im Anhang C.

Einzugsgebiet Schladming

Die Zuordnung dieser fünf Ereignisse stellte ein Gesamtbereich größer Bandbreite (0.2-0.6) fest. Das Ereignis Juli '99 mit einer Vorbefeuchtung hat in diesem Fall die Werte der *flow ratios* und somit des Abflussbeiwertes, die innerhalb Zone des 'trockenen' Ereignisse liegen.

Für das Einzugsgebiet sind generell große Abflussbeiwerte charakteristisch. So liegen die Abflussbeiwerte aller Ereignisse oberhalb 0.3.

Teilgebiet Schladming

Bei den *flow ratios* mittel musste eine Übergangszone zwischen den zwei Ereignistypen definiert werden, weil die Grenzen nicht eindeutig bestimmbar sind (Abbildung C.1 auf Seite 99).

Die Abflussbeiwerte und *flow ratios* schnell konnten gut zugeordnet werden. Die Werte liegen allgemein auch relativ hoch (> 0.25). Das ist in Verbindung mit der Topographie und Landnutzung in diesem Einzugsgebiet zu bringen.

Altenmarkt im Pongau

Das Ereignis März '02 ist dank der Schneeschmelze als „feucht“ bezeichnet. Der registrierte Basisabfluss ist aber klein und gehört eher zu den Ereignissen mit trockenen Anfangsbedingungen. Deshalb erschwert es die Bestimmung der Wertebereichen für dieses Einzugsgebiet.

Beim *flow ratio* schnell ist ein breiter Übergangsgurt ersichtlich. Die Abflussbeiwerte lassen sich etwa einfacher zuordnen. Auffällig ist ein $\Psi=0.51$ für die zweite Welle des August '02 Ereignisses.

Löbenau (Taurach)

Die verspätete Schneeschmelze beeinflusste auch das Ereignis Juni '04. Für dieses Einzugsgebiet fällt es außer dem Bereich der „feuchten“ Ereignisse. Den größten Abflussbeiwert hat wieder das katastrophale Ereignis aus August 2002 ($\Psi=0.66$). Das ist gleichzeitig der größte gerechnete Abflussbeiwert von allen untersuchten Ereignissen.

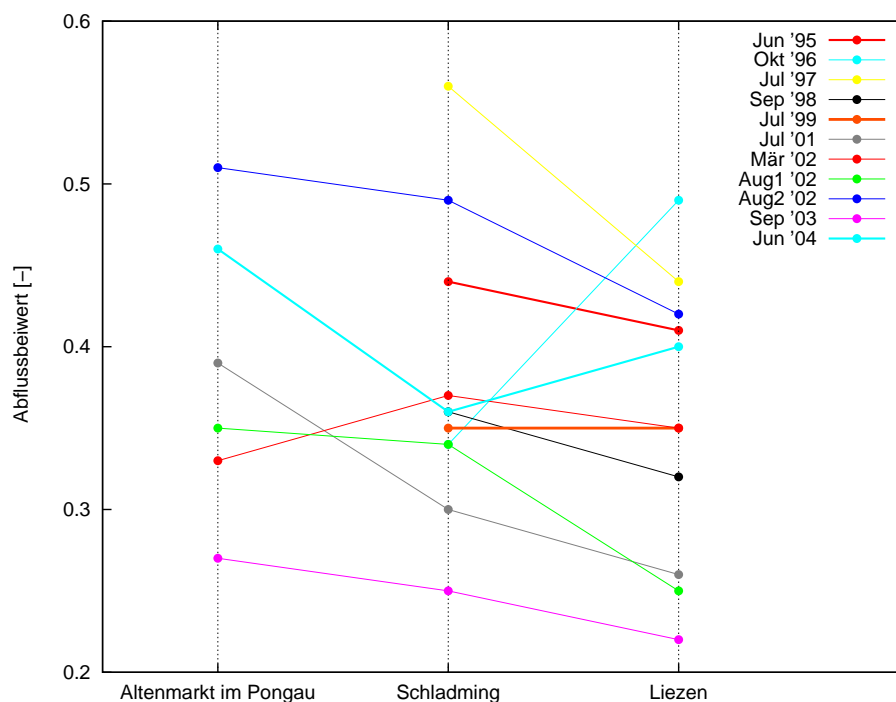


Abbildung 8.20: Verlauf der Abflussbeiwerte in Einzugsgebieten die Obere Enns entlang

In der Abbildung 8.20 sind die Verläufe der Abflussbeiwerte in drei Einzugsgebieten, die sich die Enns entlang in die Fließrichtung strecken, dargestellt. Die Abflussbeiwerte werden in den meisten Fällen kleiner in diese Richtung. Die bestimmten Abflussbeiwerte kleiner Einzugsgebiete sind also größer als diejenigen von größeren.

Die Abflussbeiwerte verlaufen ziemlich einheitlich und ohne größere „Knicke“. Ein gewisses Gegenbeispiel ist das Oktober '96 Ereignis, wo Ψ in Schladming 0.34 und in Liezen 0.49

beträgt. Die Isohyetenkarte dieses Ereignisses zeigt, dass der Hauptregen in Liezen passierte. Damit können diese Abflussbeiwerte als plausibel angenommen werden.

8.6 Geeichte Anfangsverluste

In der Tabelle 8.7 sind die durch die Kalibrierung bestimmten Anfangsverluste für die verschiedenen Hochwasserereignisse und Einzugsgebiete aufgelistet. Die Verluste sind nur im schnellen Speicher, bzw. beim Oberflächenabfluss bestimmt. In anderen zwei Speichern sind sie gleich Null, da sie keinen wesentlichen Einfluss auf die Form der Abflussganglinie haben. Die Verluste, die in diesen Speichern eventuell vorhanden sind, sind alle in den Anfangsverlusten vom schnellen Speicher enthalten.

| Ereignis | Jun 95 | Okt 96 | Jul 97 | Sep 98 | Jul 99 | Jul 01 | Mär 02 | Aug1 02 | Aug2 02 | Sep 03 | Jun 04 |
|----------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
| Einzugsgebiet | Anfangsverluste [mm] | | | | | | | | | | |
| Liezen | 3 | 13 | 3 | 21 | 4 | 7 | 27 | 12 | 2 | 6 | 5 |
| Schladming 1 | 4 | 8 | 4 | 8 | 2 | - | - | - | - | - | - |
| Schladming 2 | - | - | - | - | - | 9 | 30 | 18 | 5 | 3 | 9 |
| Altenmarkt im Pongau | - | - | - | - | - | 12 | 26 | 10 | 5 | 4 | 3 |
| Löbenau (Taurach) | - | - | - | - | - | 0 | 35 | 9 | 8 | 5 | 8 |

Tabelle 8.7: Geeichte Anfangsverluste für alle Einzugsgebiete (Schladming-1=das ganze Einzugsgebiet; Schladming-2=Teilgebiet Schladming)

Die Anfangsverluste bewegen sich im Bereich von 0 bis 35 mm. Dabei ist der gewonnene Wert von Null beim Juli '01 Ereignis im Einzugsgebiet von Löbenau nicht ganz relevant, weil die Messung vom Durchfluss eindeutig fehlerhaft ist (s. Anhang B). Die hohen Werte beim Winterereignis März '02 waren notwendig, damit eine plausible Anpassung überhaupt erreicht werden konnte. Die sind in diesem Fall nicht als echte Verluste zu verstehen, sondern als Folge der Störung im System durch die Schneeschmelze.

Die Abbildungen 8.21 und 8.22 auf der nächsten Seite geben einen Überblick in die Anfangsverluste in der Funktion von Basisabflüsse zum jeweiligen Ereignisbeginn und von gesamter Niederschlagssumme. Im ersten Fall ist eine absteigende Tendenz der Anfangsverluste mit der gleichzeitiger Abnahme des Basisabflusses ersichtlich. Niedrige Anfangsverluste sind vor Allem für die „feuchten“ Ereignisse mit einer Vorwelle typisch, wo der Basisabfluss erhöht ist. Auf der anderen Seite steigen die Anfangsverluste mit der Zunahme der Niederschlagssumme. Die Ereignisse, die nach einer sehr langen Periode ohne irgendwelchen Niederschlag passieren, weisen einen hohen Anfangsverlust auf. Aus diesem Rahmen fällt das Ereignis März '02 (Abbildung 8.22), aus schon erwähnten Gründen.

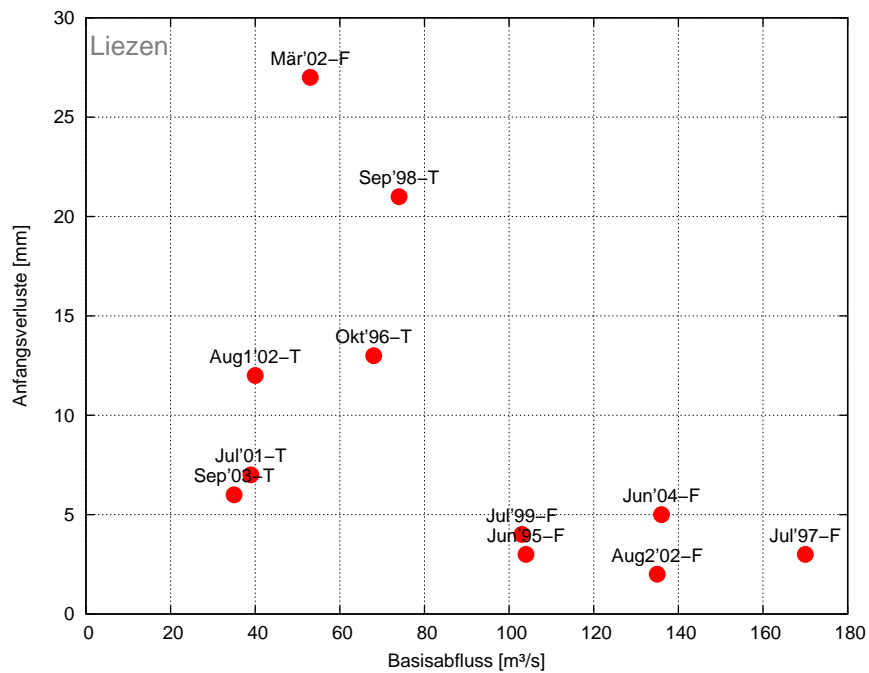


Abbildung 8.21: Anfangsverluste und Basisabflüsse im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

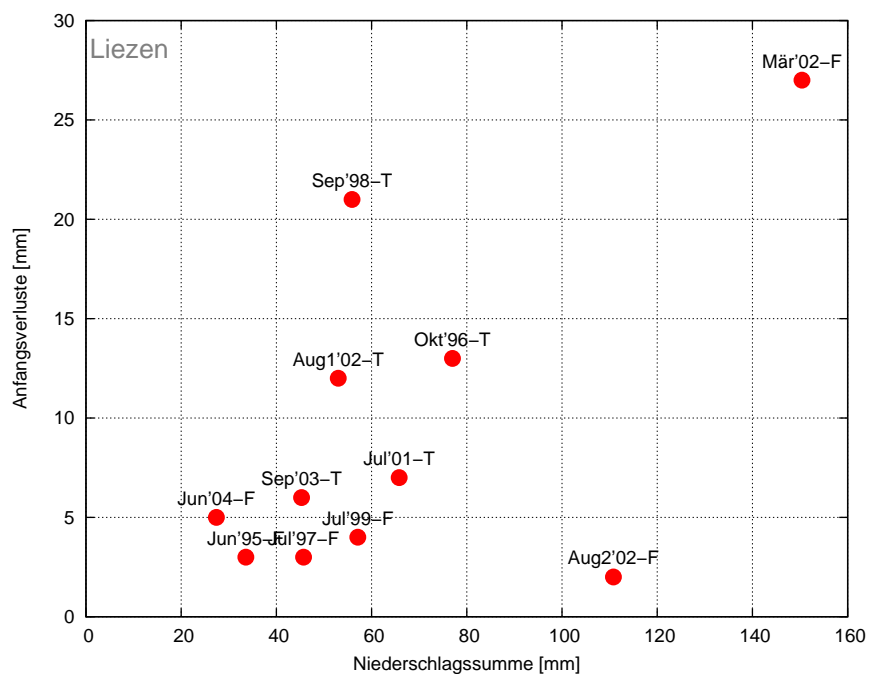


Abbildung 8.22: Anfangsverluste und Niederschlagssummen im Einzugsgebiet Liezen (T-trocken; F-feucht)

8.7 Geeichte Laufzeitunterschiede (*lags*)

Bei der Kalibrierung der Laufzeitunterschiede war die zeitliche Verschiebung der Peaks an zwei hintereinander liegenden Pegeln der Ausgangspunkt. Mit dem weiteren Variieren dieses Laufzeitunterschieds konnte die Abflussganglinie des Unterliegerpegels geeicht werden. Die Ergebnisse können der Tabelle 8.8 entnommen werden.

| Ereignis | Jun 95 | Okt 96 | Jul 97 | Sep 98 | Jul 99 | Jul 01 | Mär 02 | Aug1 02 | Aug2 02 | Sep 03 | Jun 04 |
|--------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|
| Flussstrecke | <i>lag</i> [min] | | | | | | | | | | |
| Enns | 600 | 760 | 700 | 400 | 500 | 200 | 600 | 700 | 1820 | 1200 | 200 |
| Obere Enns | - | - | - | - | - | 180 | 100 | 400 | 320 | 1000 | 200 |

Tabelle 8.8: Geeichte Laufzeitunterschiede für alle Ereignisse und Einzugsgebiete (Enns=Strecke zw. Schladming und Liezen; Obere Enns=Strecke zw. Altenmarkt im Pongau und Schladming)

Bei der zweiten Welle des August '02 Ereignisses ist eine enorme Verzögerung auf beiden Strecken ersichtlich. Das ist noch ein zusätzliches Zeichen der Ausuferung. Die Ereignisse Juli '01 und Juni '04 haben sehr kleine Laufzeitunterschiede von 200 min. auf die Strecke Schladming-Liezen, die unplausibel scheinen. Bei der Länge dieser Strecke von rund 52 km, kommt man auf eine Fließgeschwindigkeit von 4.3 m/s. Bei der anderen bewegt sich dieser wert gegen 1.5 m/s. Die Werte für das Ereignis September '03 sind hingegen zu groß, obwohl dieses Ereignis keine ersichtliche Ausuferung verursachte.

Teil VI

Schlussfolgerungen

9 Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung und Analyse der Parameter eines Niederschlag-Abflussmodells im Einzugsgebiet der Oberen Enns, bis zum Pegel Liezen (Röthelbrücke). Die Parameter wurden mit dem hydrologischen Programm HEC-HMS ermittelt. Dafür wurde eine Erweiterung der im Programm vorgesehene Berechnungsweise des Abflusses mit ursprünglich zwei Abflusskomponenten (Direkt- und Basisabfluss) vorgenommen. Der Abfluss wurde stattdessen mit drei Komponenten (Basis-, Zwischen- und Oberflächenabfluss) bestimmt. Das ermöglichte einerseits bessere Anpassung der gemessenen und gerechneten Abflussganglinien, andererseits war es somit möglich, den Abflussbeiwert eines Einzugsgebiets als Summe der *flow ratios* des schnellen (Oberflächenabfluss) und des mittleren (Zwischenabfluss) Speichers zu definieren. Sowohl die auf- und absteigenden Äste als auch die Scheitel der Abflusskurven konnten auf dieser Weise sehr zufriedenstellend angepasst werden.

Die Ausuferungen konnten nicht direkt mit dem Modell simuliert werden. Dafür benötigte man noch zusätzliche Daten über natürliche und künstliche Retentionsräume sowie über die Topographie in der Nähe des Flusses. Aus den vorhandenen Ereignissen ist es aber möglich die Ausuferungen zu erkennen. Das ist ersichtlich bei der Eichung der Abflussganglinien und aus der Verzögerungen in den Wellenabläufen. Aus dem Unterschied zwischen dem beobachteten und modellierten Scheitel ist es auch eine grobe Schätzung des ausufernden Wasservolumens möglich. Ein typisches Beispiel dafür ist das katastrophale Ereignis August '02 (s. Seite 62).

Es gab grundsätzlich zwei Arten von Parametern: gebiets- und ereignisbezogene. Die gebietsbezogenen Konzentrationszeiten und Speicherkonstanten wurden einmal bestimmt und für alle untersuchte Ereignisse unverändert gehalten. Die bestimmten Werte zeigten sich als akzeptabel und durchaus plausibel für die untersuchten Einzugsgebiete.

Die ereignisbezogenen Parameter sind für jedes Ereignis neu kalibriert worden. Als wichtigste unter ihnen erwiesen sich *flow ratio* schnell und *flow ratio* mittel, bzw. deren Summe. Die haben den größten Einfluss auf den Direktabfluss und auf die Höhe des Hochwasserscheitels.

Das gewonnene Modell zeigte sehr gute Anpassungsfähigkeit in der Rückrechnung der Abflusslinie. Hinsichtlich der Prognose von Hochwässern ergeben sich aber relativ große Unsicherheiten, da die absoluten Werte der einzelnen *flow ratios* schnell und mittel stark variieren.

Um ein Modell zur schnellen Vorabschätzung dieser zwei *flow ratios* und Abflussbeiwerte zu schaffen, wurden die Gültigkeitswertebereiche in den Diagrammen der *flow ratio*-Basisabfluss Beziehungen definiert. Das Kriterium für das Kategorisieren der Ereignisse war der Feuchtezustand des Einzugsgebiets unmittelbar vor dem Ereignisbeginn. Diese Wertebereiche und Kategorien können durch Nachrechnung weiterer Ereignisse genauer und präziser definiert werden.

Für jedes Ereignis gibt es zumindest zwei Werte für jede *flow ratio*. Das sind die untere und obere Wertebegrenzung. Daraus folgen die erwartenden obere und untere Grenzen der *flow*

ratios schnell und mittel, bzw. der Abflussbeiwerte für die jeweilige Abflussganglinie. Bei einigen Diagrammen überlappen diese Grenzen. In diesen Fällen wurden die Übergangszonen definiert, die mit Hilfe weiterer Ereignisse verfeinert werden sollen.

Das Modell kann als Basis zur Erstellung eines Katalogsystems benutzt werden. Dieser Katalog basiert auf Ereignistyp hinsichtlich des Feuchtezustands im Einzugsgebiet.

Für einen operationellen Einsatz als Vorhersagemodell wäre eine Nachführung auf Basis der weiteren beobachteten Durchflüsse erforderlich.

Teil VII
Anhang

A Isohyetenkarten der untersuchten Ereignisse

In diesem Anhang befinden sich die Isohyetenkarten der betrachteten Ereignisse im Zeitraum von 1996 bis 2004. Die Anzahl der verfügbaren Stationen variiert leicht für verschiedene Ereignisse. Mindestens gibt es 17 Stationen. Für das Juni 2004 Ereignis ist ein Maximum von 22 Stationen vorhanden. Für die Interpolation ist die Kriging Methode verwendet.

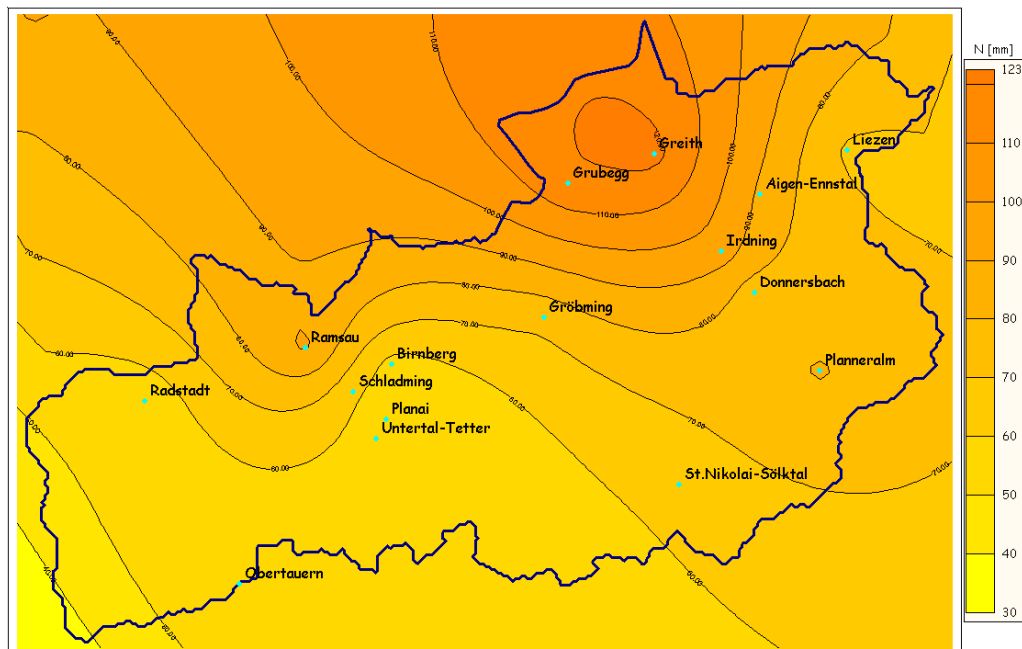


Abbildung A.1: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Oktober 1996 (20.10.-25.10)

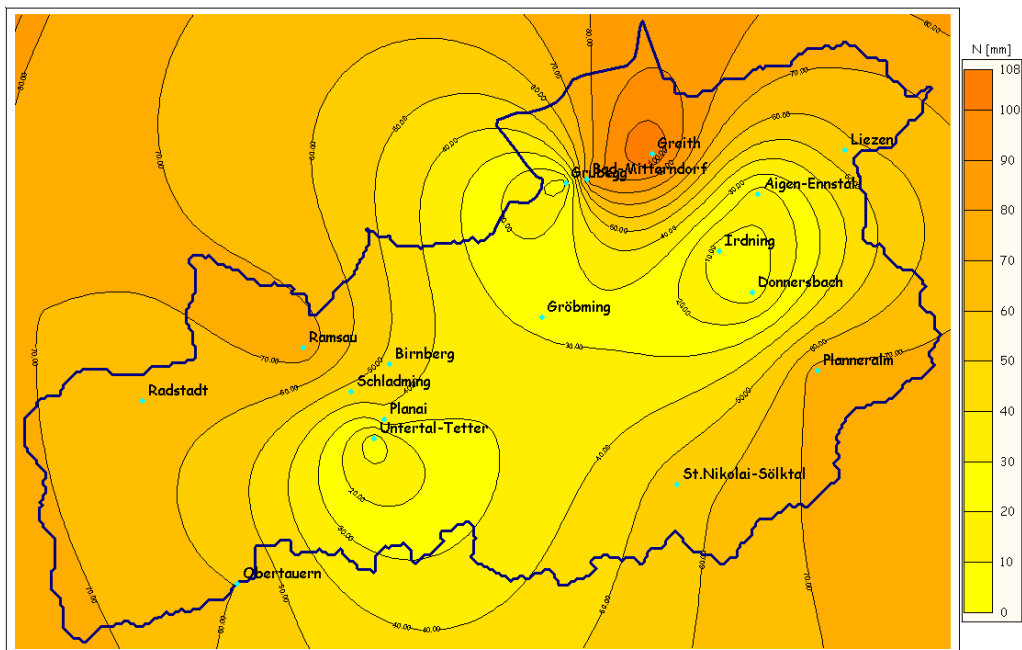


Abbildung A.2: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 1997 (07.07.-10.07)

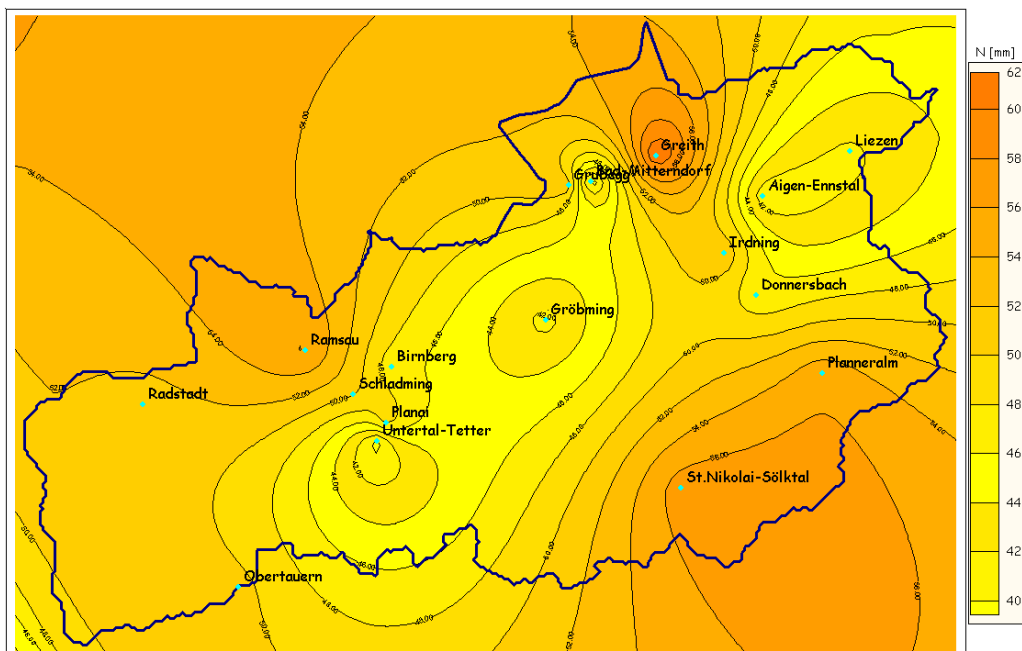


Abbildung A.3: Isohyetenkarte des Ereignisses vom September 1998 (05.09.-07.09)

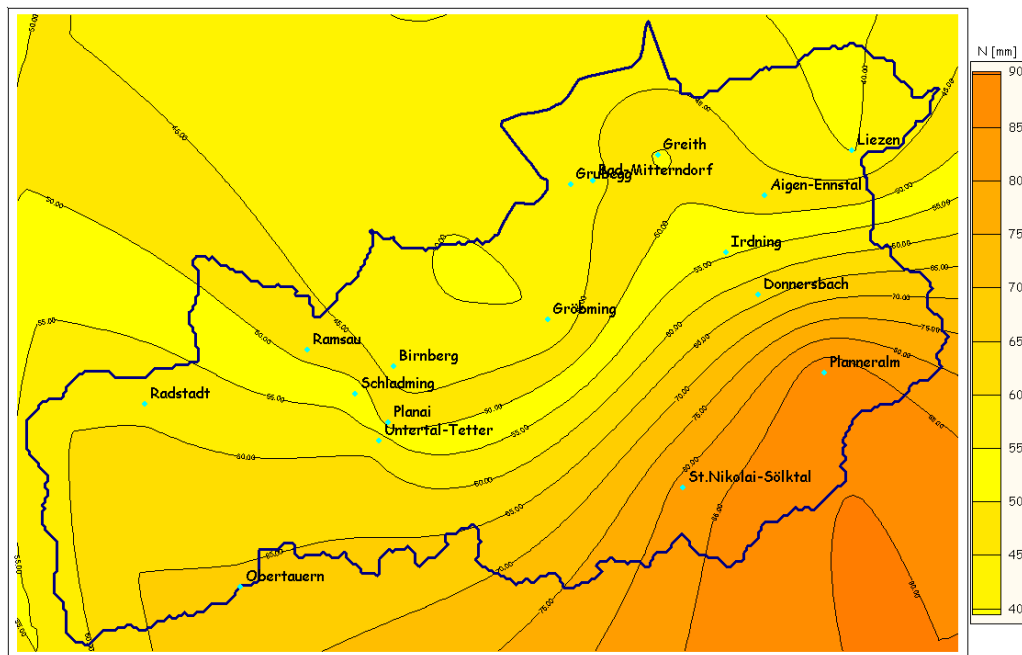


Abbildung A.4: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 1999 (22.07.-26.07)

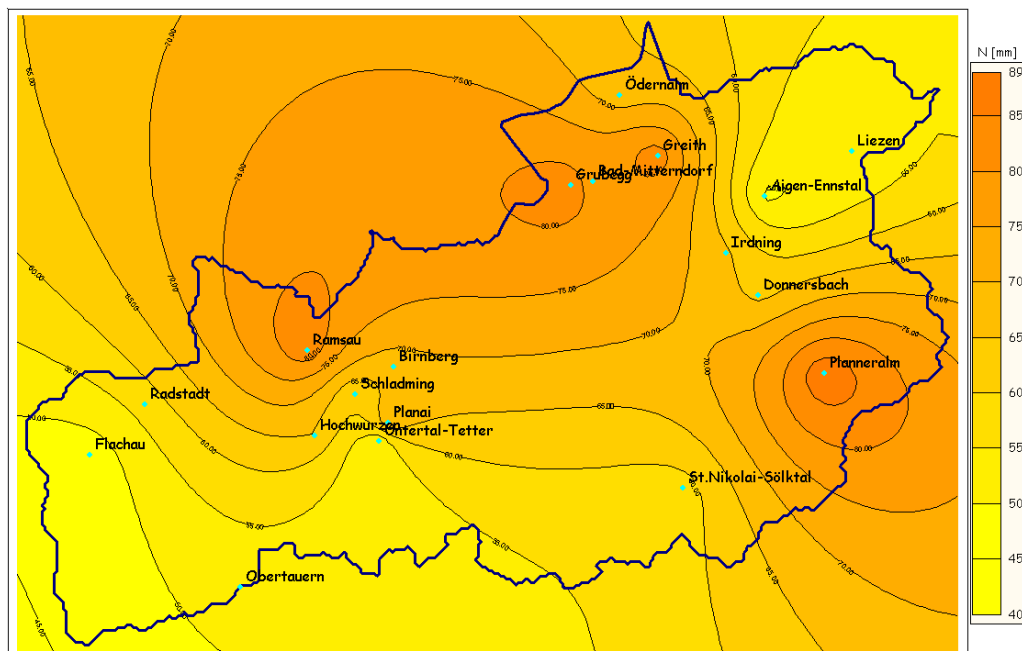


Abbildung A.5: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juli 2001 (19.07.-23.07)

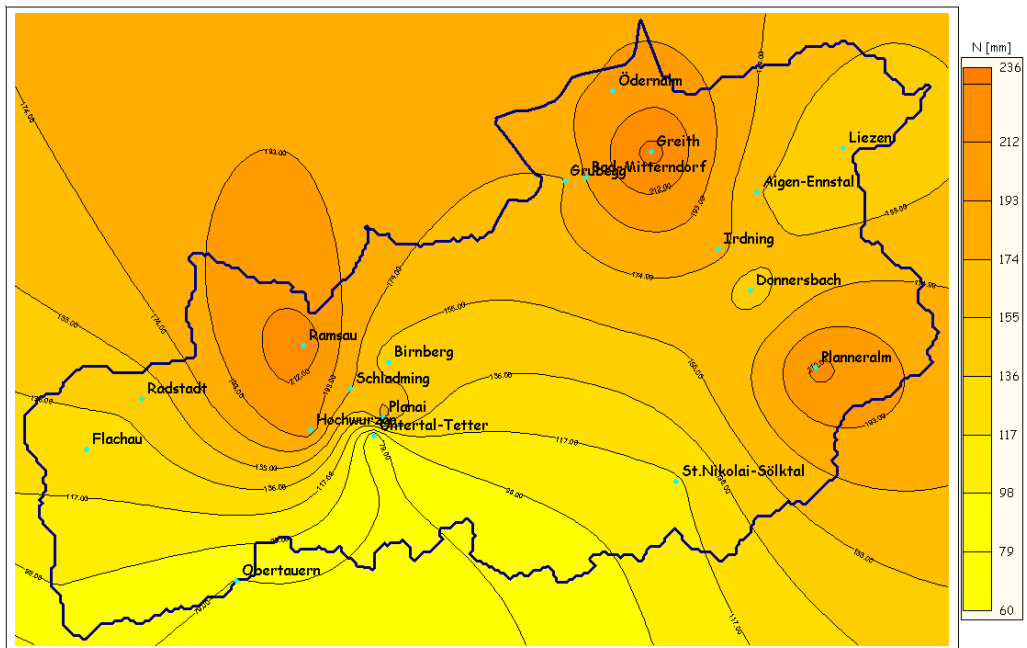


Abbildung A.6: Isohyetenkarte des Ereignisses vom März 2002 (19.03.-27.03)

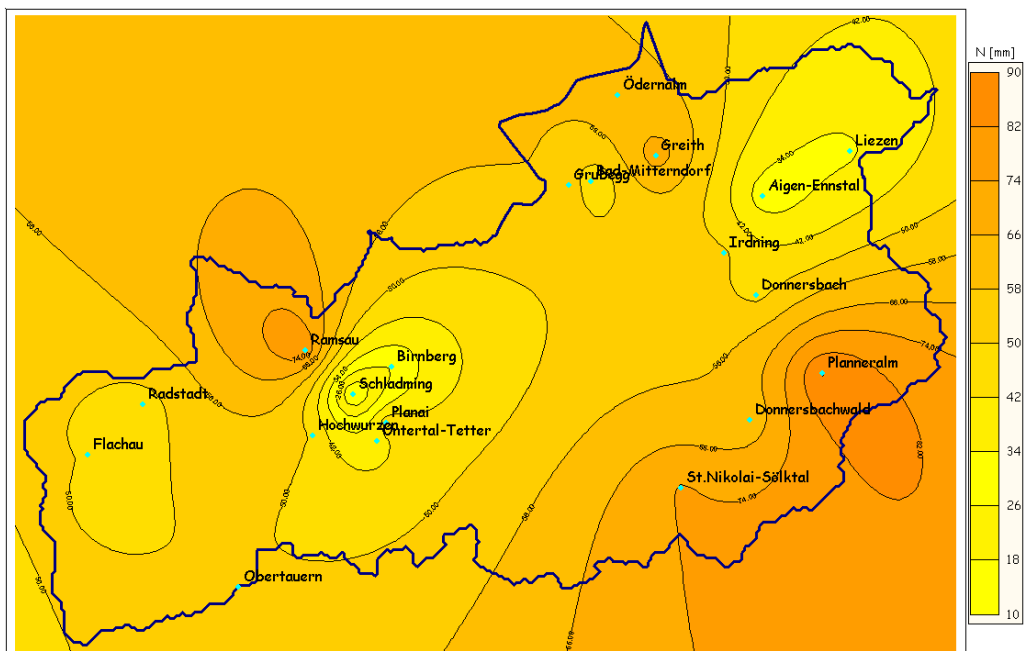


Abbildung A.7: Isohyetenkarte des Ereignisses vom August 1 2002 (06.08.-09.08)

A Isohyetenkarten der untersuchten Ereignisse

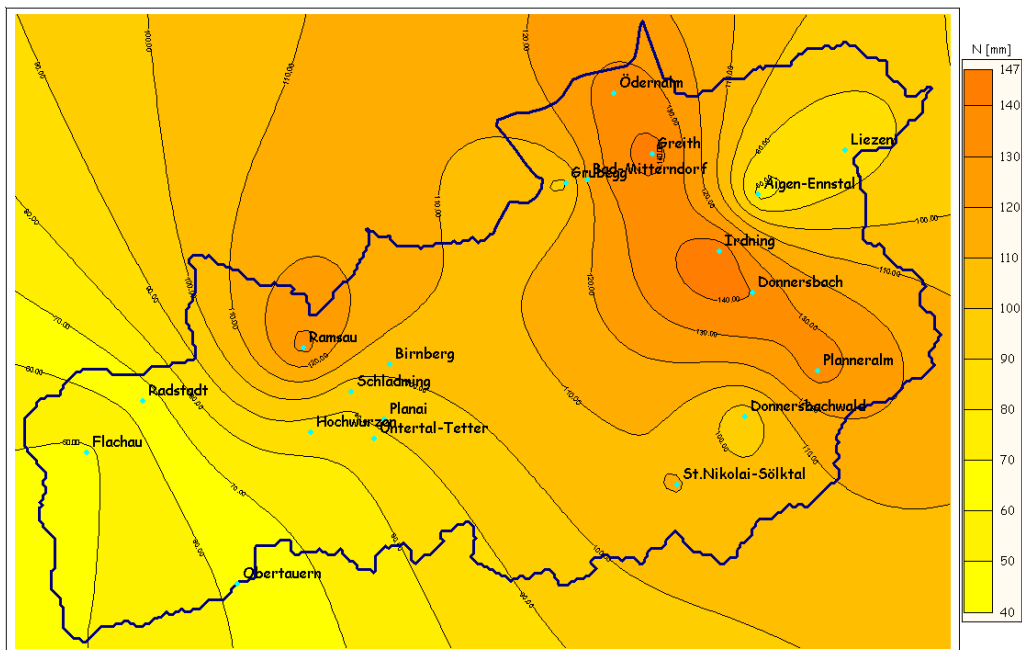


Abbildung A.8: Isohyetenkarte des Ereignisses vom August 2002 (11.08.-17.08)

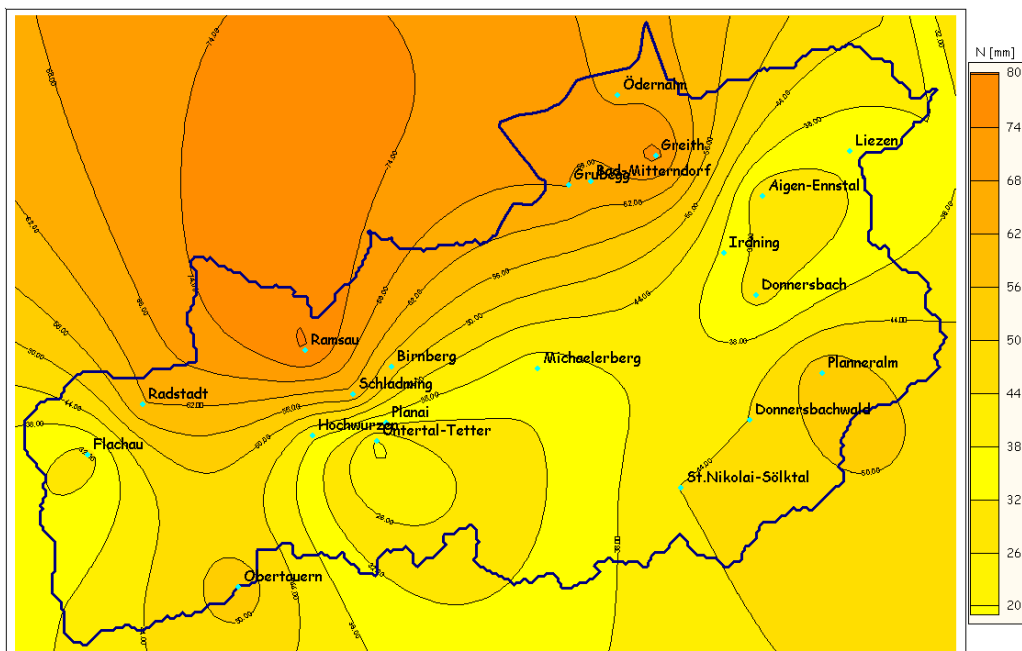


Abbildung A.9: Isohyetenkarte des Ereignisses vom September 2003 (11.09.-17.09)

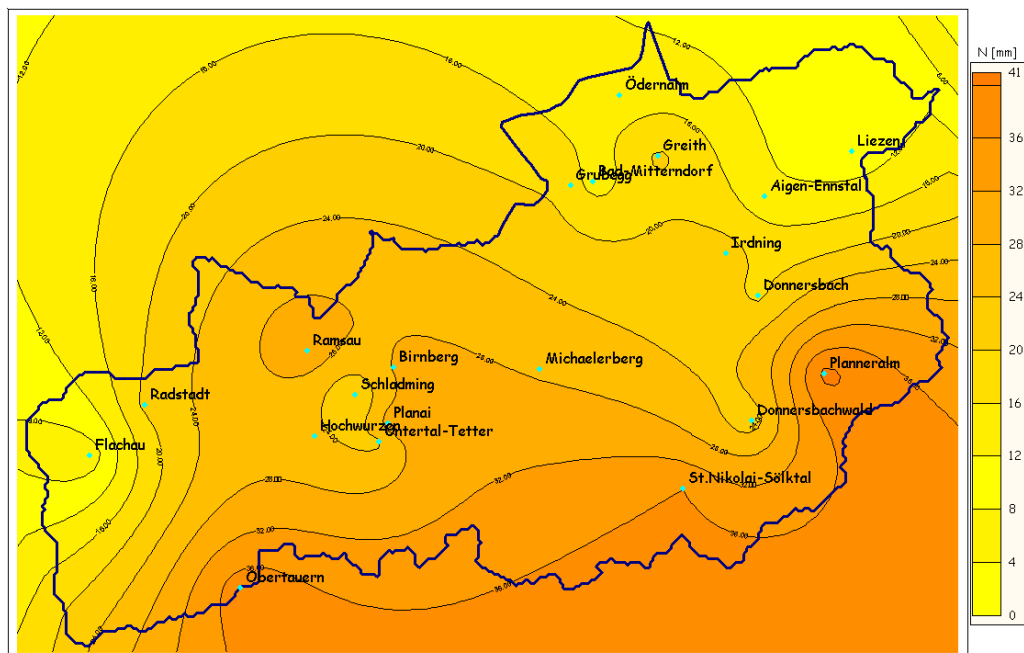


Abbildung A.10: Isohyetenkarte des Ereignisses vom Juni 2004 (11.06.-15.06)

B Ergebnisse der Modellierung für Pegel: Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau

Es werden in diesem Anhang zuerst die Tabellen mit der Charakteristiken der untersuchten Ereignisse in Einzugsgebieten von Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach dargestellt.

Im Anschluss befinden sich dann die Ergebnisse der Modellierung der Abflussganglinie der Pegel in Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach. Das sind die untersuchten Ereignisse im Zeitraum 1995-2004. Der Niederschlag ist mittels der Thiessen-Polygone Methode gewichtet. Der im Diagramm auch dargestellte langjährige monatliche Mittelwert des Durchflusses auf dem Pegel in Schladming beträgt $MQ=21.3 \text{ m}^3/\text{s}$, in Altenmarkt im Pongau ist $MQ=5 \text{ m}^3/\text{s}$ und in Löbenau $MQ= 2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vom Jahr 1995 bis 1999 sind Ergebnisse vom ganzen Einzugsgebiet von Schladming dargestellt. Ab dem Jahr 2000 gibt es auch Ergebnisse von Pegeln Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach. Die Fläche des Einzugsgebiets von Schladming ist ab diesem Zeitpunkt um die Größe dieser zwei Einzugsgebiete kleiner und es wird nicht mehr als Kopf- sondern als Zwischeneinzugsgebiet betrachtet.

| Ereignis | Ereignisdauer | Initialabfluss | Abflussspitze | passierte am: | N-Summe |
|----------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---------|
| | | [m^3/s] | [m^3/s] | | [mm] |
| Jun 95 | 25.06.-28.06. | 36 | 181.6 | 26.06. 06:00 | 59 |
| Okt 96 | 20.10.-25.10. | 25 | 129.1 | 21.10. 22:00 | 60 |
| Jul 97 | 07.07.-10.07. | 50 | 143.7 | 08.07. 07:00 | 31 |
| Sep 98 | 05.09.-07.09. | 23 | 153.9 | 05.09. 18:00 | 47 |
| Jul 99 | 22.07.-26.07. | 40 | 148.8 | 22.07. 22:00 | 59 |
| Jul 01 | 19.07.-23.07. | 18 | 101.9 | 20.07. 15:00 | 63 |
| Mär 02 | 19.03.-27.03. | 16 | 113.7 | 22.03. 01:00 | 156 |
| Aug1 02 | 06.08.-10.08. | 17 | 69.7 | 07.08. 14:00 | 49 |
| Aug2 02 | 11.08.-17.08. | 55 | 286.4 | 12.08. 12:00 | 88 |
| Sep 03 | 11.09.-17.09. | 16 | 59 | 13.09. 06:00 | 48 |
| Jun 04 | 11.06.-15.06. | 49 | 103 | 12.06. 02:00 | 28 |

Tabelle B.1: Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugs- und Teilgebiet Schladming

| Ereignis | Ereignisdauer | Initialabfluss | Abflussspitze | passierte am: | N-Summe |
|----------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|---------|
| | | [m ³ /s] | [m ³ /s] | | [mm] |
| Jul 01 | 19.07.-23.07. | 2.75 | 22.1 | 20.07. 09:00 | 47 |
| Mär 02 | 19.03.-27.03. | 2.4 | 25.3 | 21.03. 02:00 | 129 |
| Aug1 02 | 06.08.-10.08. | 2.5 | 12.4 | 07.08. 07:00 | 40 |
| Aug2 02 | 11.08.-17.08. | 11.9 | 49.2 | 12.08. 08:00 | 54 |
| Sep 03 | 11.09.-17.09. | 2.6 | 13.7 | 12.09. 10:00 | 42 |
| Jun 04 | 11.06.-15.06. | 10.9 | 24.5 | 12.06. 01:00 | 27 |

Tabelle B.2: Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau

| Ereignis | Ereignisdauer | Initialabfluss | Abflussspitze | passierte am: | N-Summe |
|----------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|---------|
| | | [m ³ /s] | [m ³ /s] | | [mm] |
| Jul 01 | 19.07.-23.07. | 4.8 | 8.9 | 20.07. 08:00 | 52 |
| Mär 02 | 19.03.-27.03. | 4.5 | 18.2 | 22.03. 00:00 | 78 |
| Aug1 02 | 06.08.-10.08. | 4.4 | 12.2 | 07.08. 07:00 | 42 |
| Aug2 02 | 11.08.-17.08. | 12 | 60.7 | 12.08. 09:00 | 61 |
| Sep 03 | 11.09.-17.09. | 3.3 | 10.8 | 13.09. 01:00 | 54 |
| Jun 04 | 11.06.-15.06. | 7 | 16.2 | 12.06. 04:00 | 38 |

Tabelle B.3: Charakteristiken der beobachteten Ereignisse für das Einzugsgebiet Löbenau (an der Taurach)

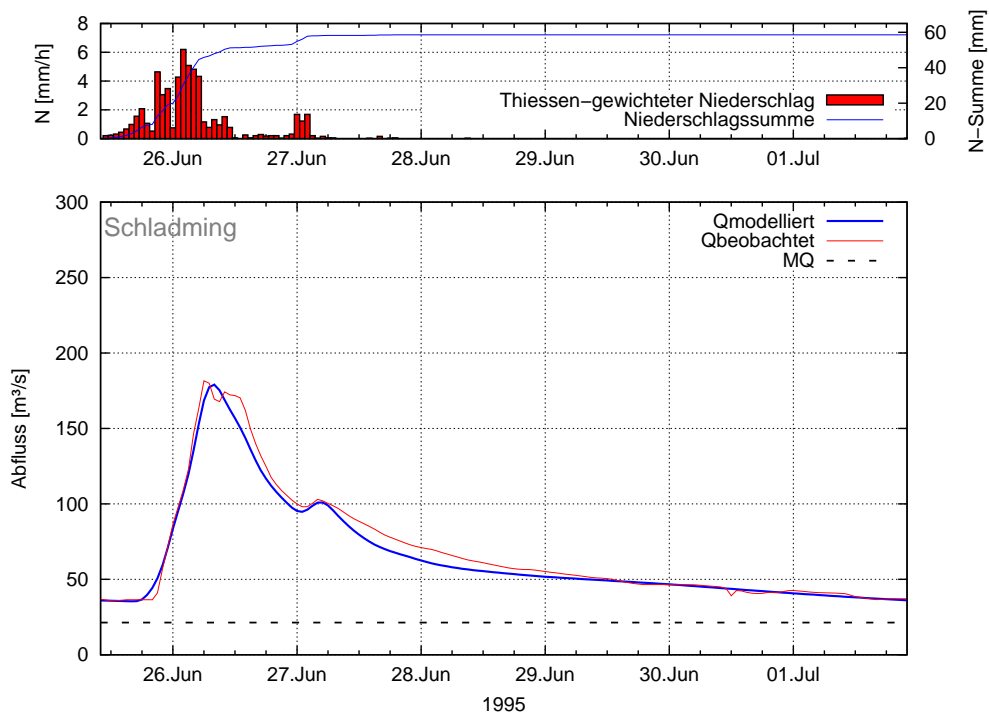
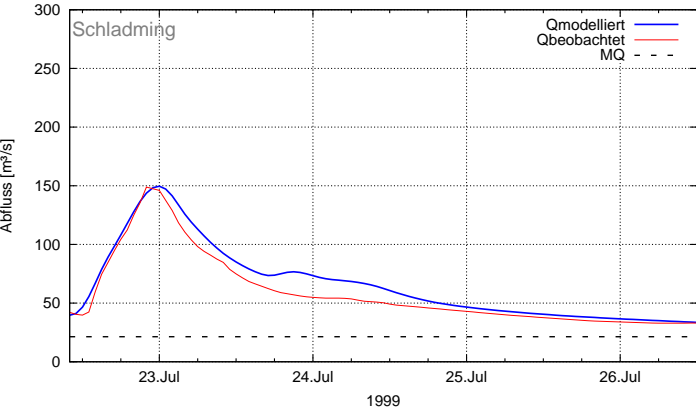
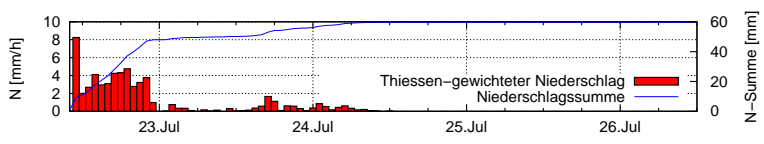
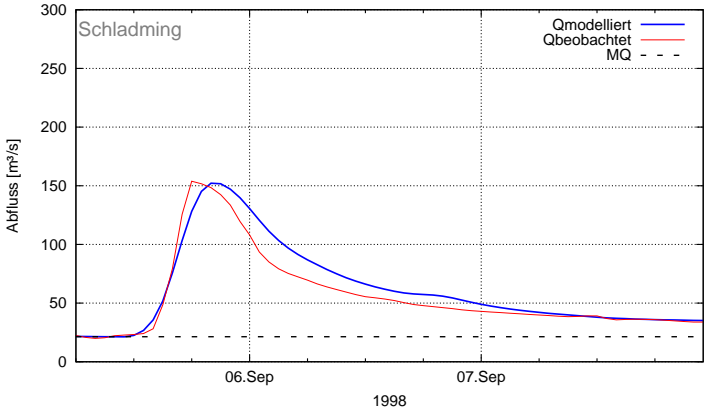
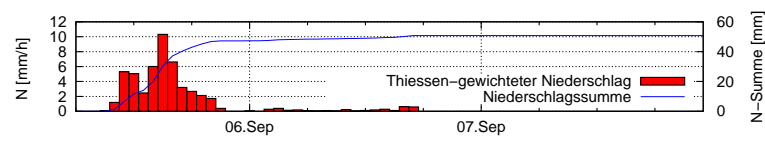
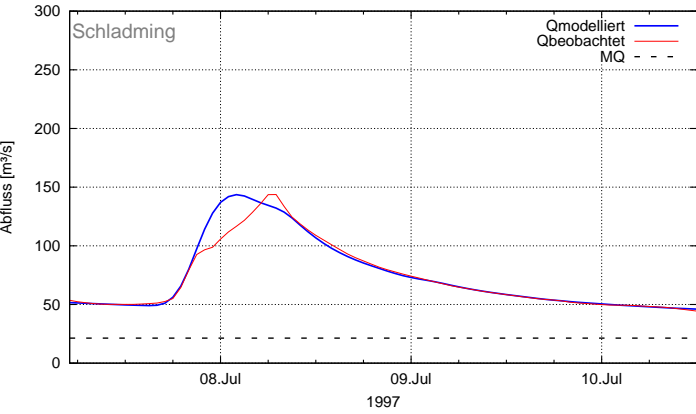
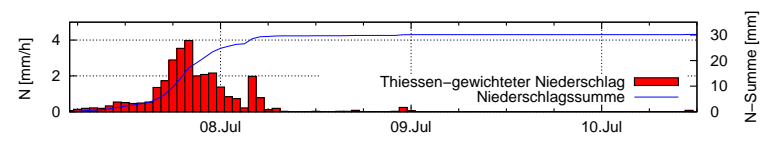
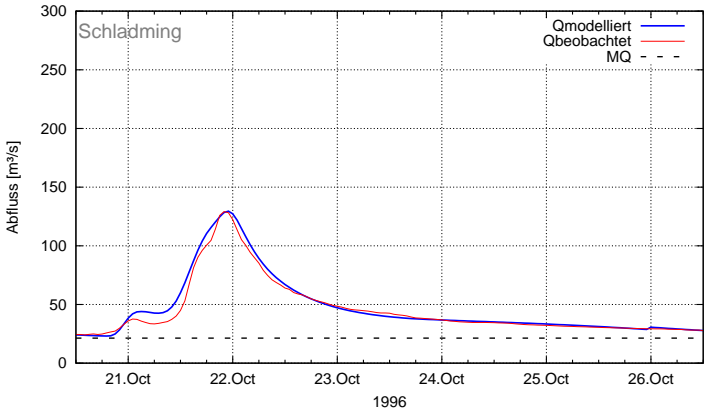
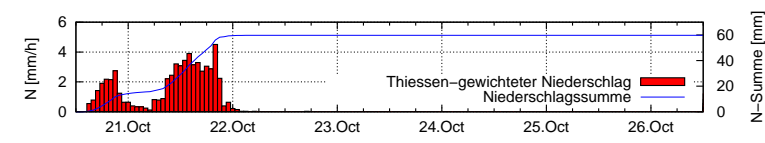
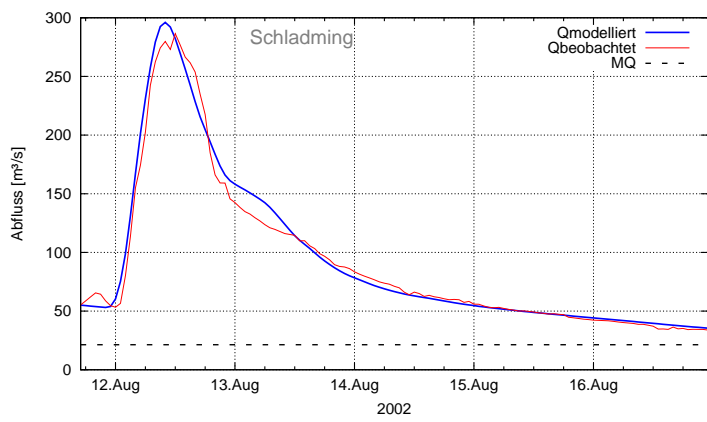
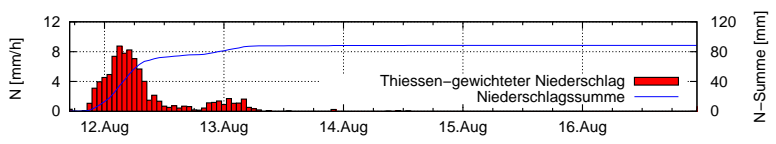
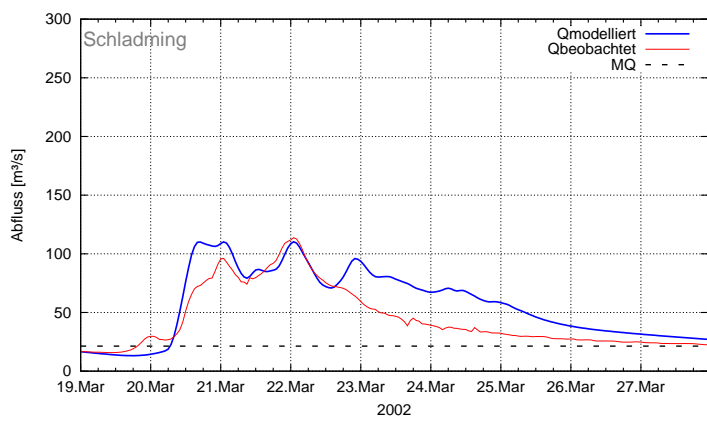
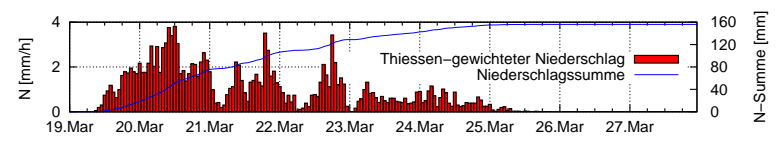
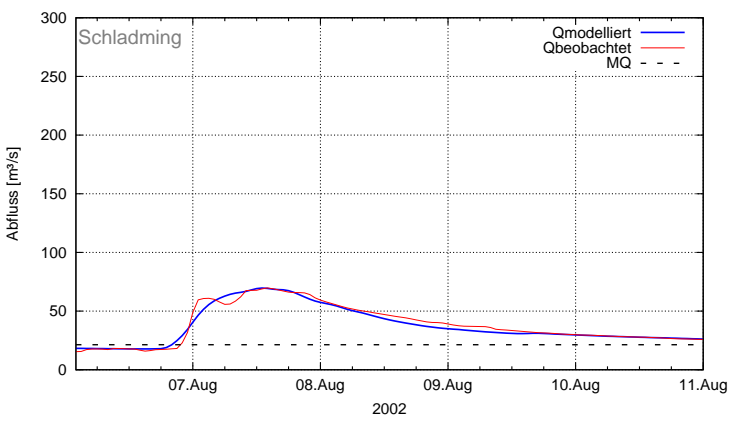
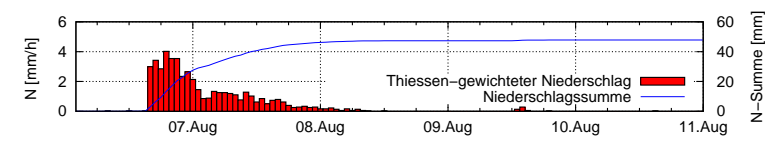
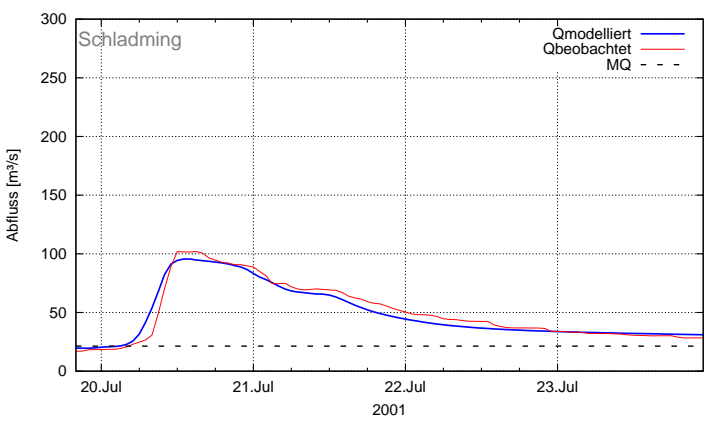
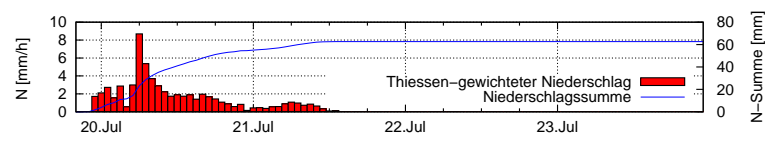
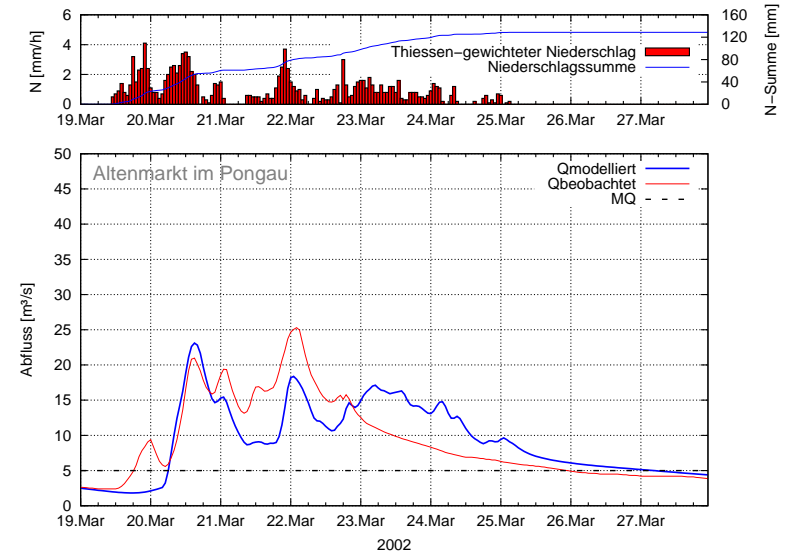
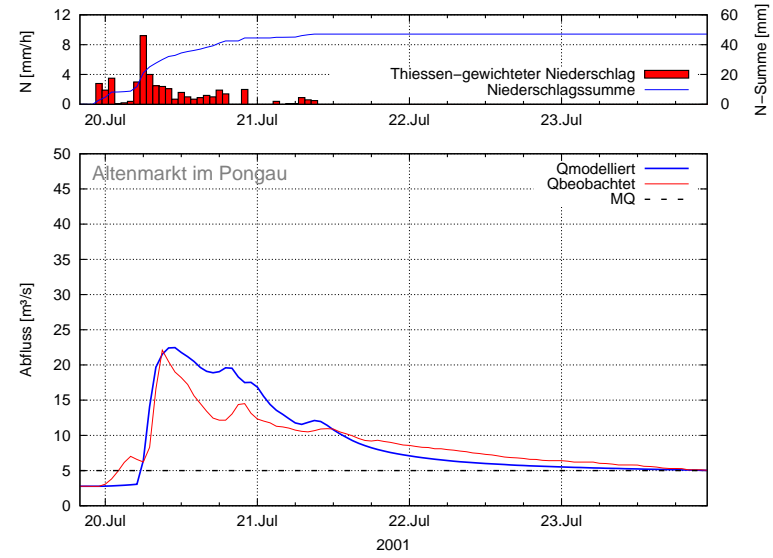
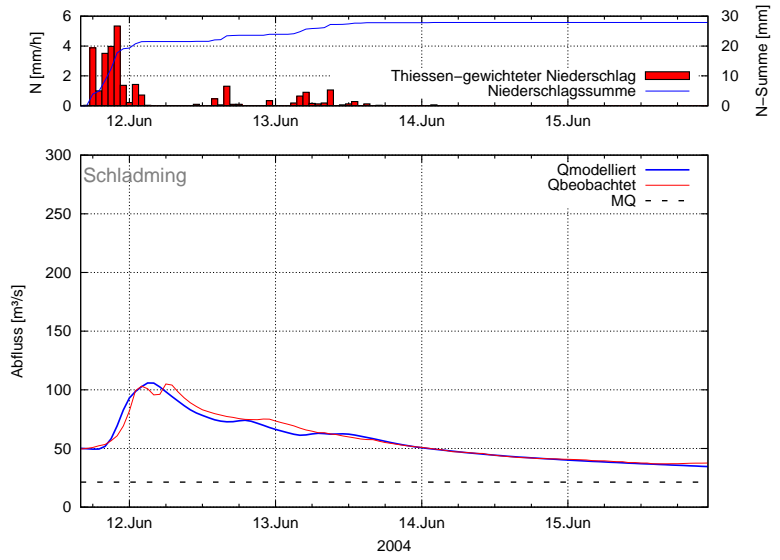
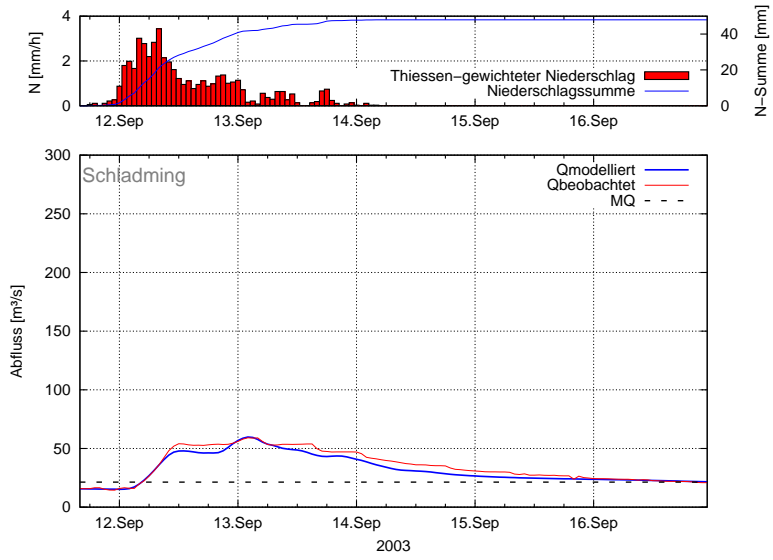
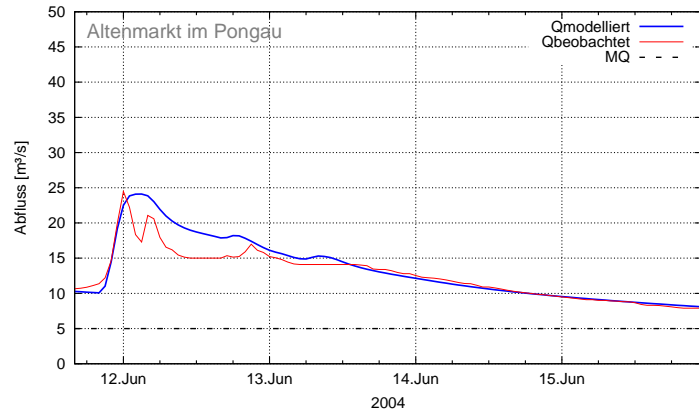
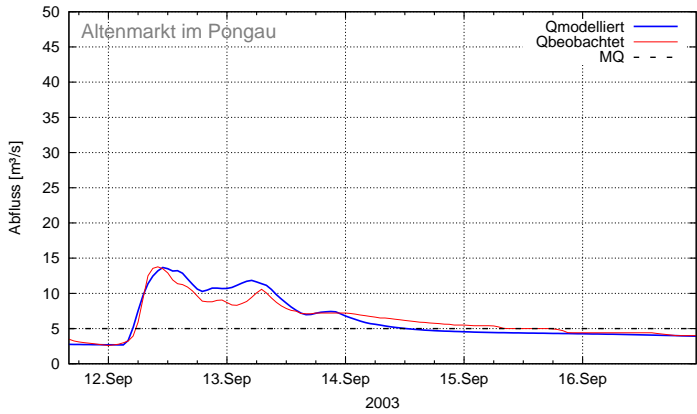
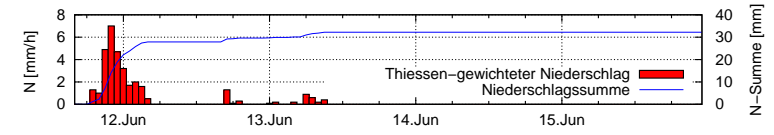
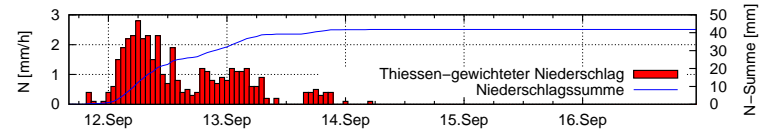
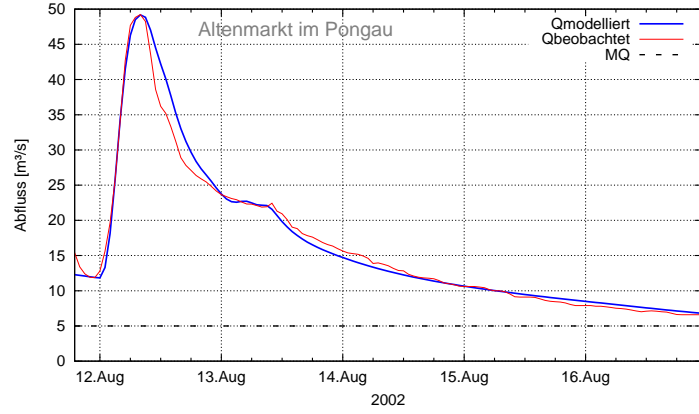
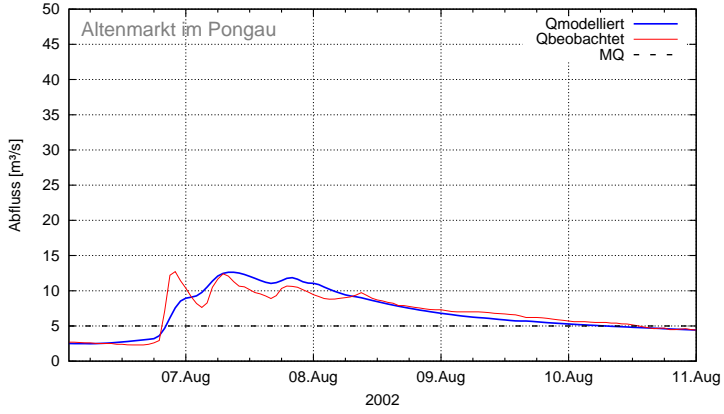
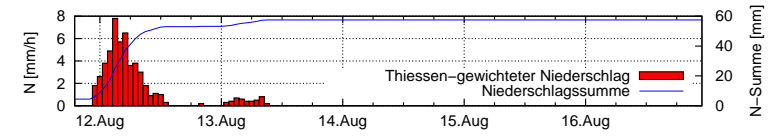
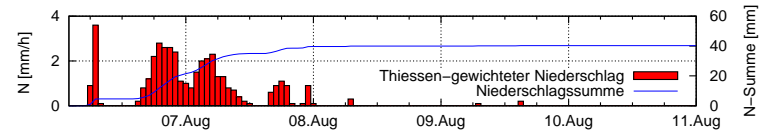


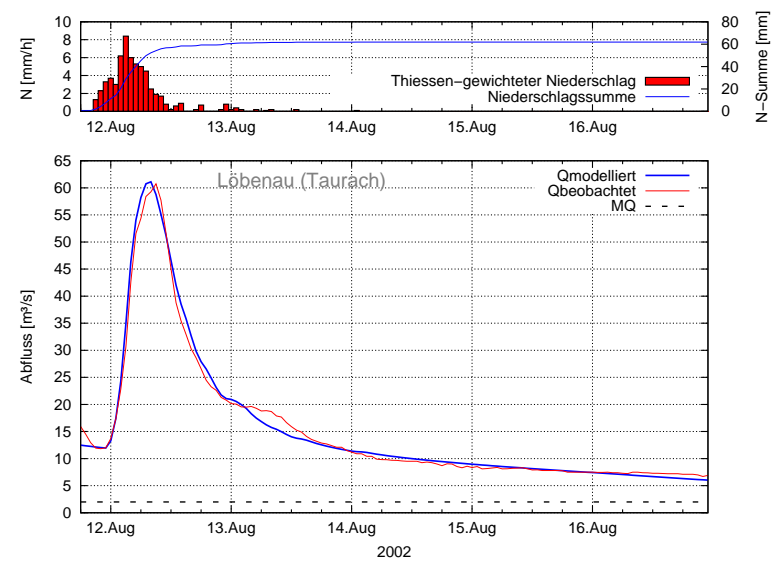
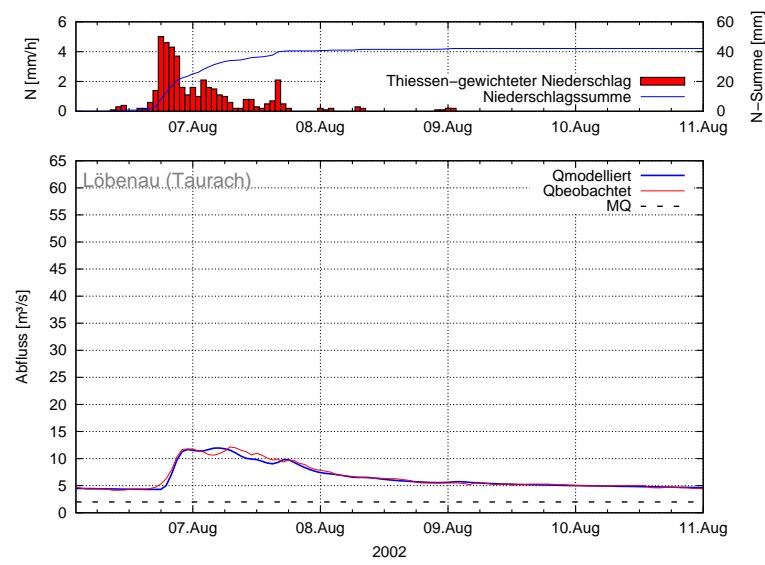
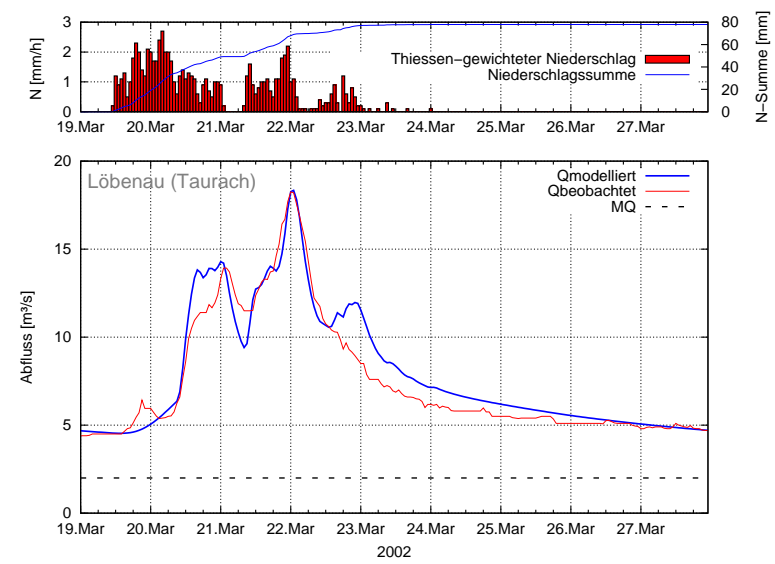
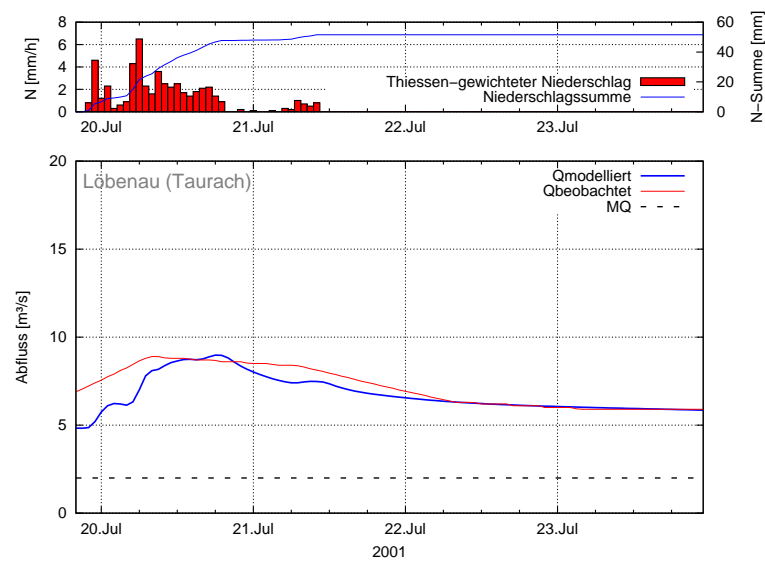
Abbildung B.1: Modellierung Juni 1995, Pegel: Schladming



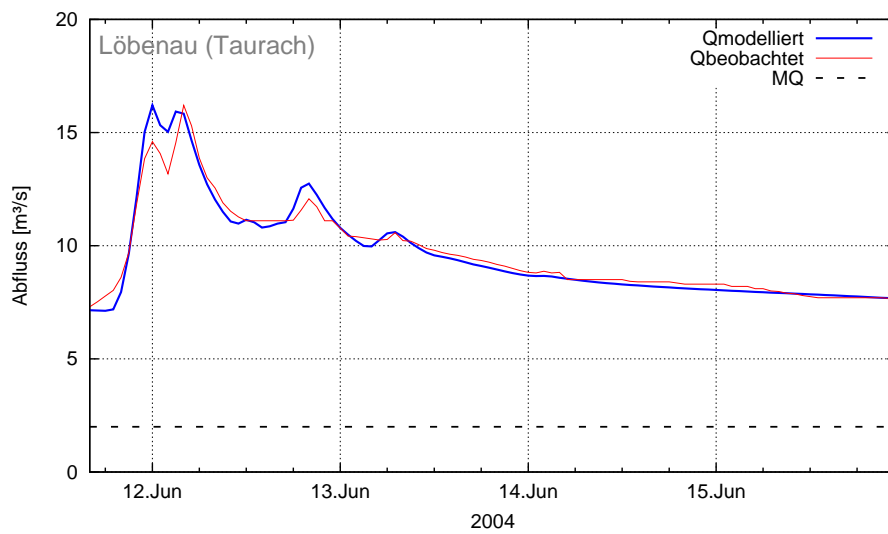
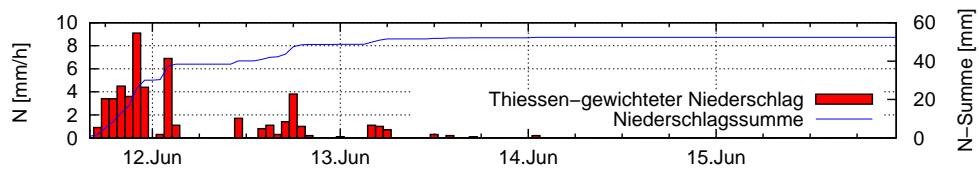
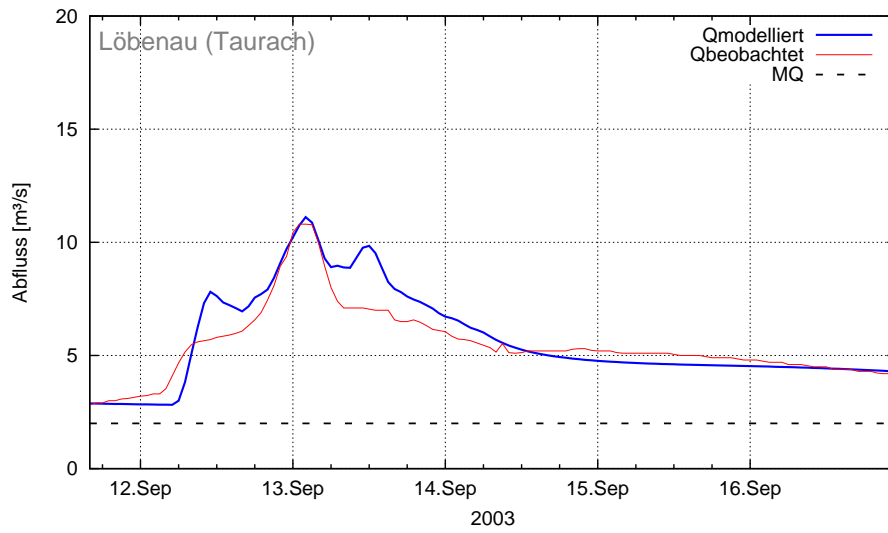
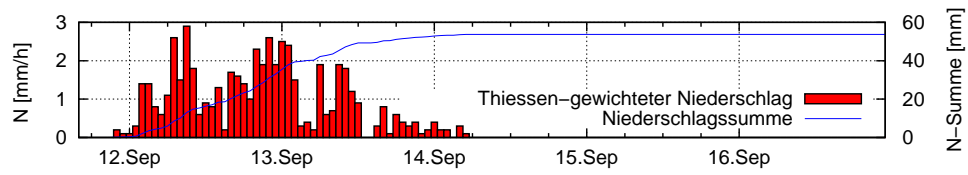








B Ergebnisse der Modellierung für Pegel: Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau



C Graphische Interpretation der ermittelten flow ratios und Abflussbeiwerte

In diesem Anhang befinden sich die Diagramme der gerechneten *flow ratios* mittel und schnell, und Abflussbeiwerte für die Einzugsgebiete Schladming, Altenmarkt im Pongau und Löbenau an der Taurach. Dargestellt sind auch die Wertebereiche nach dem Feuchtezustand des Bodens zum Ereignisbeginn.

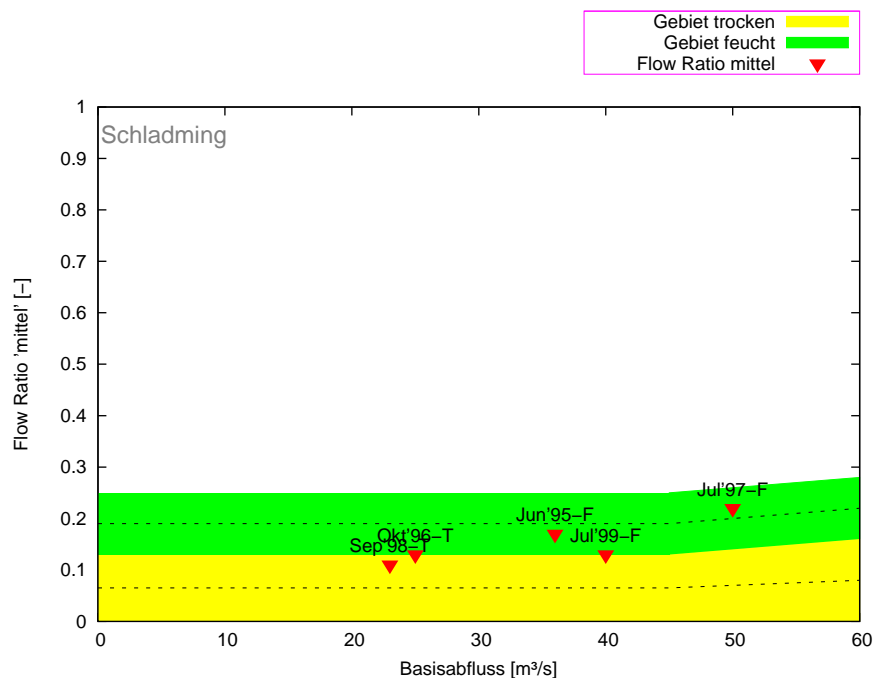


Abbildung C.1: Wertebereiche des *flow ratio* mittel im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

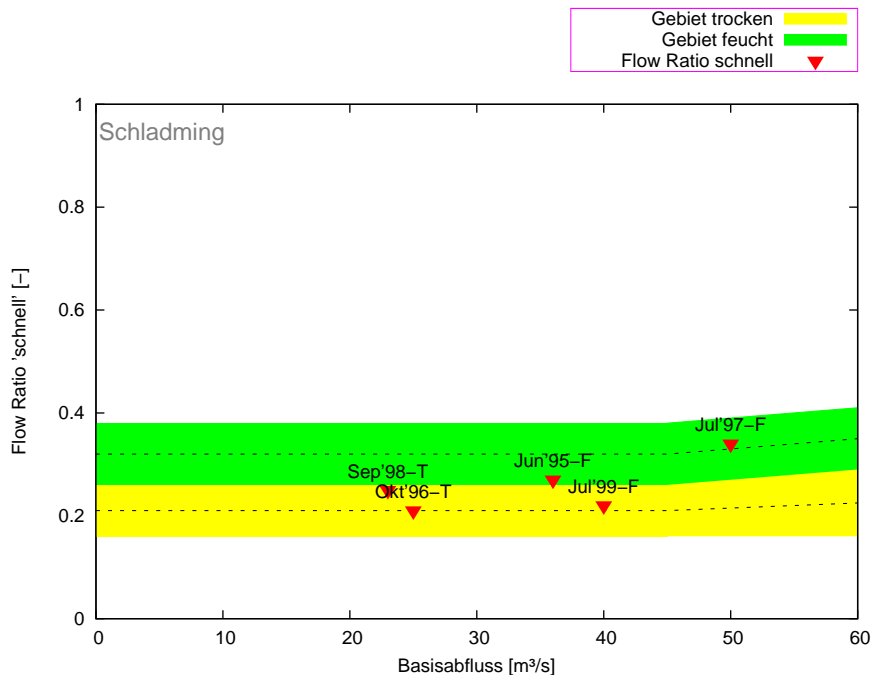


Abbildung C.2: Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

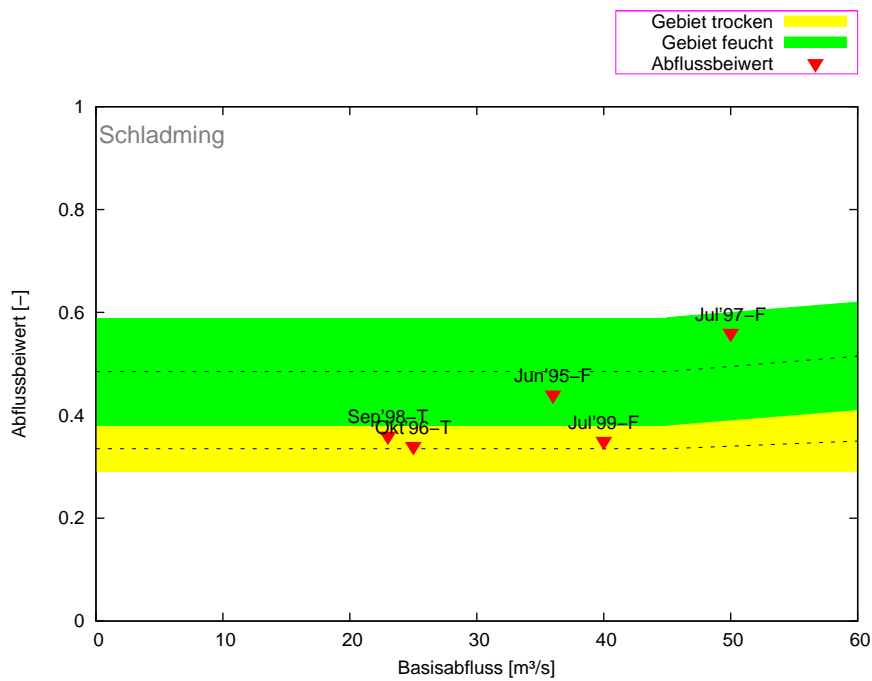


Abbildung C.3: Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

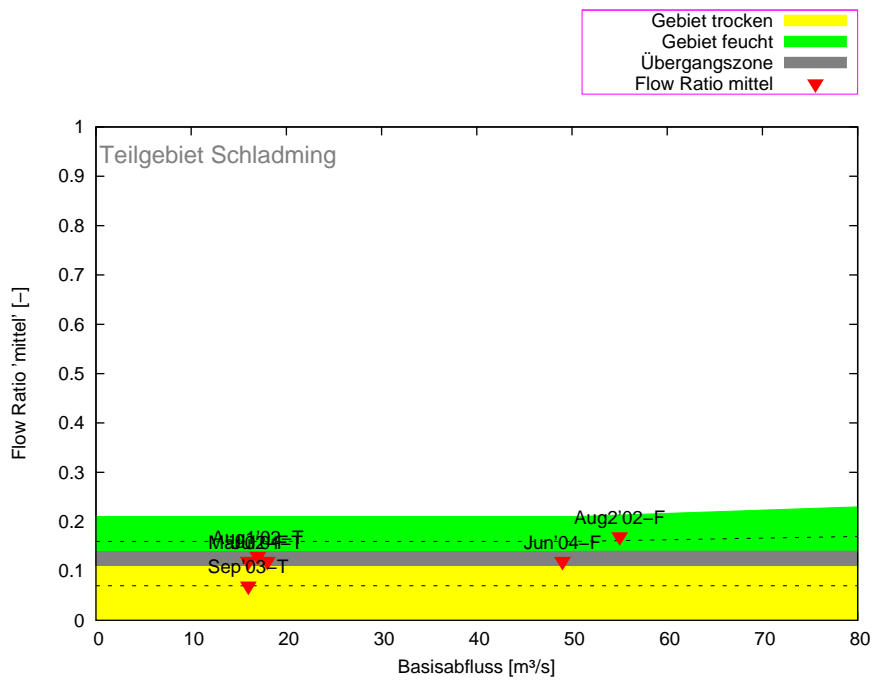


Abbildung C.4: Wertebereiche des flow ratio mittel im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

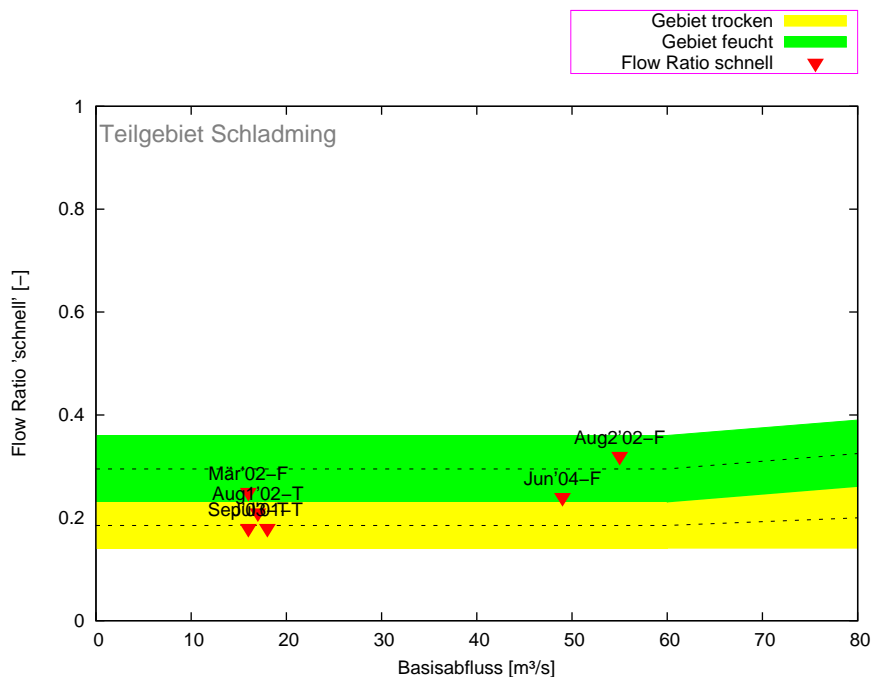


Abbildung C.5: Wertebereiche des flow ratio schnell im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

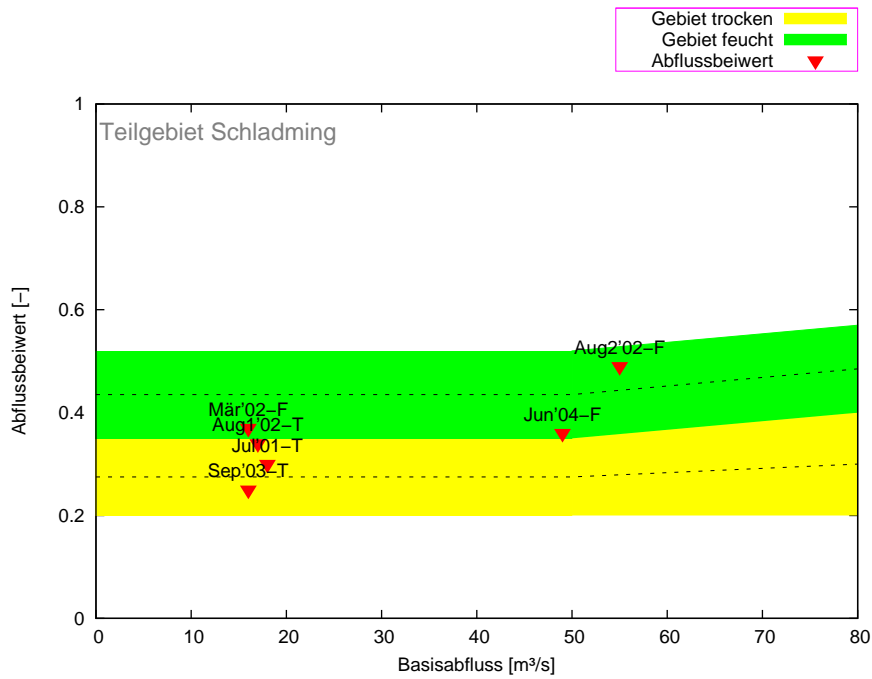


Abbildung C.6: Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Teilgebiet Schladming (T-trocken; F-feucht)

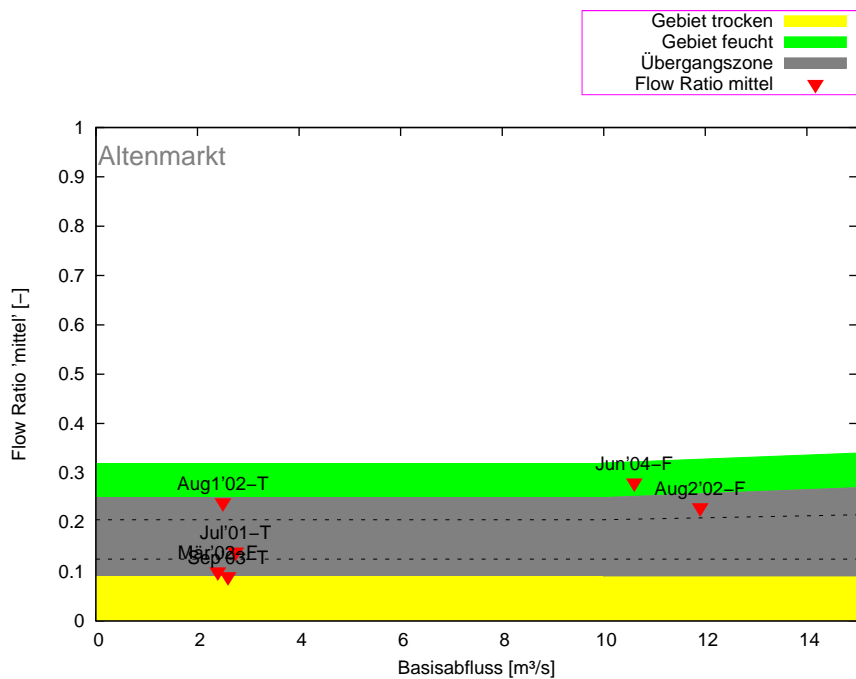


Abbildung C.7: Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht)

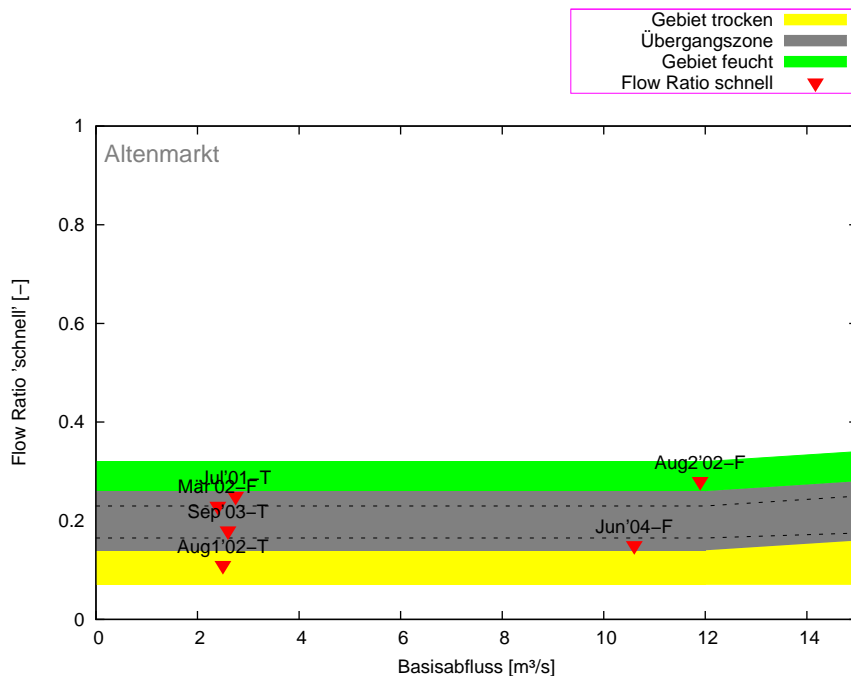


Abbildung C.8: Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht)

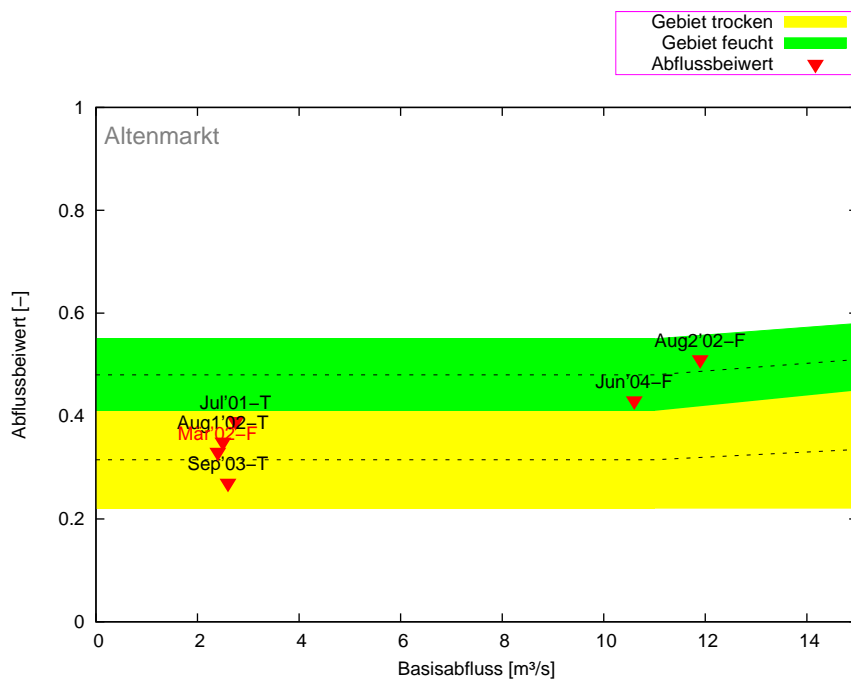


Abbildung C.9: Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Altenmarkt im Pongau (T-trocken; F-feucht)

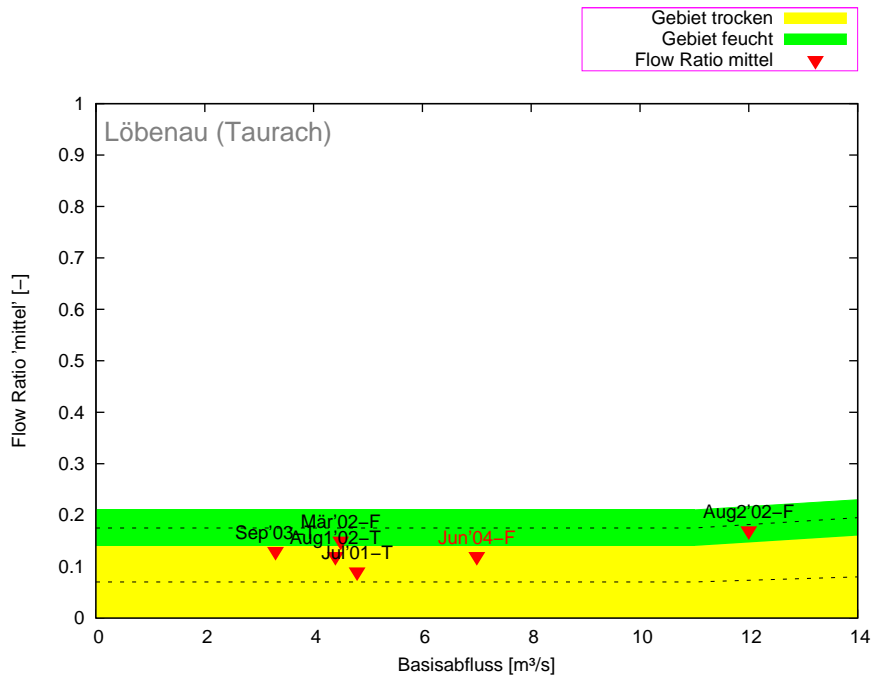


Abbildung C.10: Wertebereiche des flow ratio mittel im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht)

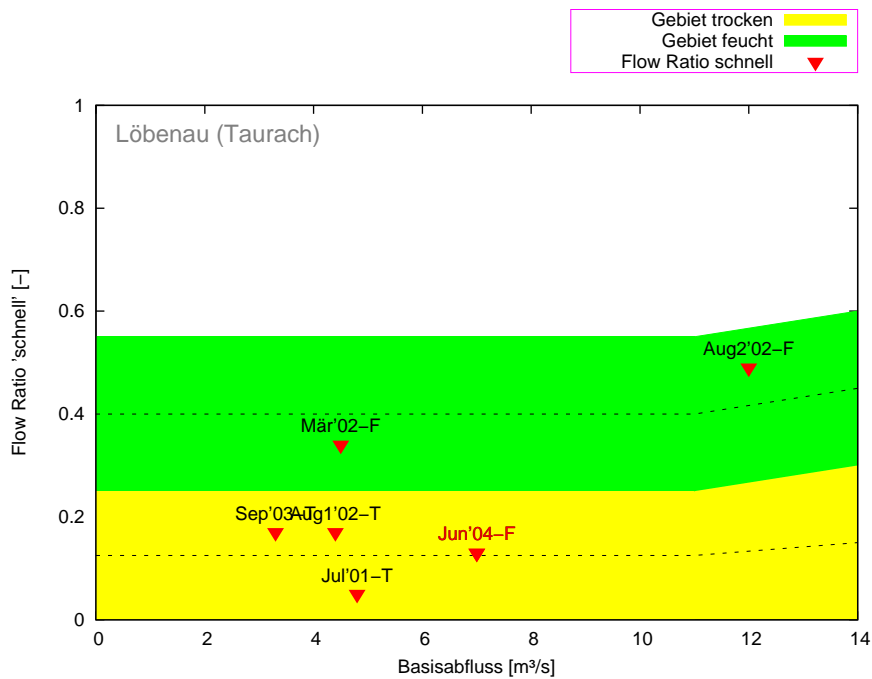


Abbildung C.11: Wertebereiche des flow ratio schnell im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht)

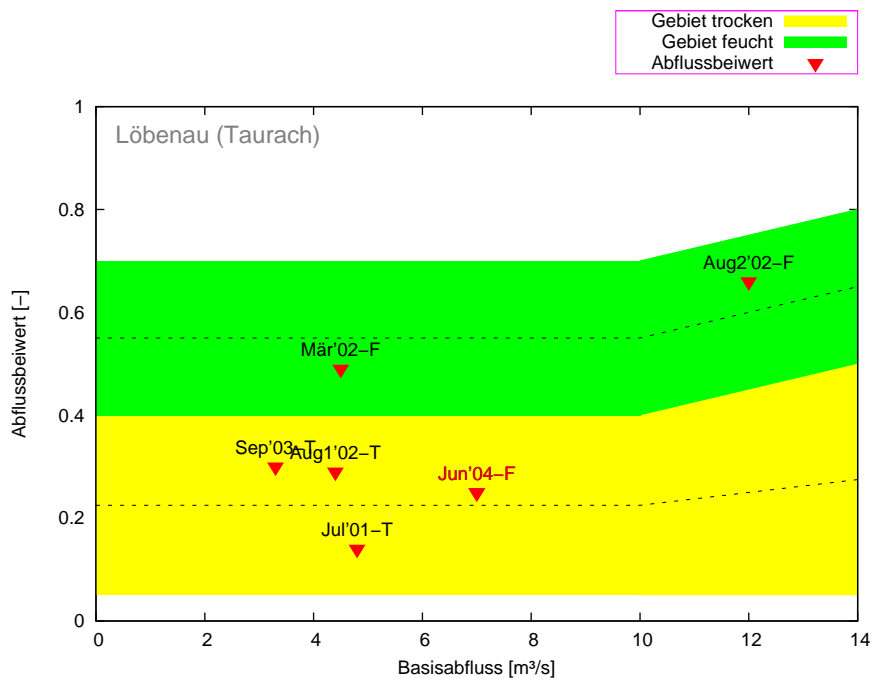


Abbildung C.12: Wertebereiche der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet Löbenau (T-trocken; F-feucht)

Literaturverzeichnis

- [1] ASCHAUER, F.: *Oberösterreichisches Eisenbahnen*. Amt der OÖ Landesregierung, 1. Aufl., 1964.
- [2] BÁRDOSSY, A.: *Manuskript zur Vorlesung: Hydrologie III - Modellierung; Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau*. unveröffentlicht, 2003/2004.
- [3] DISSE, M.: *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Vorlesungskript; Universität der Bundeswehr München*. unveröffentlicht, 2. Aufl., 2005.
- [4] DYCK, S. und G. PESCHKE: *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen - Berlin, 3. Aufl., 1995.
- [5] ENNSKRAFTWERKE: *Ennskraftwerke Steyr : Krafwerke und Kraftwerksprojekte der Ennskraftwerke Aktiengesellschaft*. Linz : Wimmer, 1956.
- [6] FELDMAN, A.: *Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, March 2000.
- [7] GRIESSER, H.: *Raumplanung Steiermark - Programm zur hochwassersicheren Entwicklung der Siedlungsräume; LGBl. Nr. 117/2005*. Amt der Steiermarkischen Landesregierung, Abteilung 16, 2005.
- [8] GUTKNECHT, D.: *Niederschlag-Abfluss Modellierung, Simulation und Prognose*. Wiener Mitteilungen, Band 164, 1. Aufl., 2002.
- [9] GUTKNECHT, D. und G. BLÖSCHL: *Studienblätter zur Vorlesung Ingenieurhydrologie*. unveröffentlicht, 2005.
- [10] HABERSACK, H. und A. MOSER: *Plattform Hochwasser - Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002*. ZENAR, Universität für Bodenkultur Wien in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2003.
- [11] HINKELMANN, R.: *Manuscript zur Vorlesung Hydrologie und Wasserwirtschaft - Hydrologische Grundlagen; TU Berlin*. unveröffentlicht, 2005/2006.
- [12] JOVANOVIĆ, S., O. BONACCI und M. ANDJELIĆ: *Hidrometrija*. Gradjevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1. Aufl., 1986.
- [13] JOVANOVIĆ, S. und Z. RADIĆ: *Zadaci iz hidrologije*. Gradjevinski Fakultet, Beograd; Naučna Knjiga, Beograd, 3. Aufl., 1991.
- [14] JUNGWIRTHAND, M., S. MUHARA, G. ZAUNER, J. KLEEBERGER und T. KUCHER: *Die steierische Enns - Fischfauna und Gewässermorphologie*. Universität für Bodenkultur, Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, 1. Aufl., 1996.

- [15] LUTZ, W.: *Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen*. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft; Universität Karlsruhe; Mitteilung Heft 24, 1. Aufl., 1984.
- [16] MANIAK, U.: *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*. Springer-Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [17] NACHTNEBEL, H.: *Die Hydrologie Österreichs unter dem Einfluss von Szenarien einer möglichen Klimaänderung; Endbericht - Teil I: Darstellung des Istzustandes und Analyse historischer Daten*. Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr; Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, 2001.
- [18] NASH, J. und J. SUTCLIFFE: *River Flow Forecasting through Conceptual Models - Part I: A Discussion of Principles*. Journal of Hydrology, 10, S. 282-290, 1970.
- [19] PANTUCEK, G. und P. PANTUCEK: *Hochwasser 2002 - Eine Text- und Bildchronik: Grafenworth-Kirchberg-Königsbrunn*. Sozaktiv Verlag, St. Pölten, 1. Aufl., 2003.
- [20] RADIĆ, Z. und J. PLAVŠIĆ: *Hidrologija - Vorlesungsunterlagen; Universität in Belgrad, Fakultät für Bauingenieurwesen*. unveröffentlicht, 2007.
- [21] ROSNER, H.-J.: *Verarbeitung geografischer Daten - Seminarunterlagen; Universität Tübingen*. unveröffentlicht, <http://www.geographie.uni-tuebingen.de/>, 2008.
- [22] SCHARFFENBERG, W. und M. FLEMING: *HEC-HMS User's Manual, Version 3.1.0, November 2006*. U.S. Army Corps of Engineers - Hydraulic Engineering Center, 2006.