

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Departement für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und
konstruktiven Wasserbau (IWHW)



Masterarbeit

„Analyse des hydrologischen Systems Mondsee mit Schwerpunkt
Management des Seewasserspiegels“

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Eingereicht von

David Berger, BSc

(01125453)

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Hubert Holzmann

Danksagung

Zu allererst möchte ich meinem Betreuer, Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Hubert Holzmann, für die Ermöglichung dieser wirklich interessanten und spannenden Masterarbeit danken. Sie standen mir stets mit gutem Rat verlässlich zur Seite.

Weiters bedanke ich mich bei allen Studienkollegen, besonders jenen am IWHW, die mir gute Tipps und Hinweise fachlicher oder organisatorischer Natur gegeben haben.

Ein großer Dank gilt auch Dianne und Waltraud für das Korrekturlesen der Arbeit.

Zu besonders großem Dank verpflichtet bin ich meinen Eltern, die mich all die Jahre stets unterstützt und somit das Studium überhaupt erst ermöglicht haben – Danke!

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Desiree, die mich die gesamte Studienzeit begleitet und unterstützt hat. Du bist immer an meiner Seite gestanden, egal ob in Erfolgsmomenten oder in besonders stressigen Zeiten – Vielen Dank!

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am

Datum

Unterschrift

Abstract

The Mondsee lake is located in the Salzkammergut in Upper Austria. It has a water area of 13.8 km² and a catchment area of 247 km². The catchment area extends over areas of Upper Austria and Salzburg. In the last couple of years heavy periods of rainfall caused the lake's water level to increase which also led to flooding of the surrounding areas. Thus, a better understanding of the hydrological system and the basin of the Mondsee lake was required. Analysing the hydrological system and the demand of reducing the lake's water level in the case of flood events were motivations for this thesis.

To find out more, a rainfall-runoff-model (R-R-model) of the basin was created by using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) software package. The created model is applicable for three different scenarios: the simulation of the current state of the basin by means of observed flood events, the application of precipitation forecasts to predict the water level and the simulation of pre-releases of the lake in case of heavy precipitation and the risk of flooding. The last scenario raises the question if it is possible to execute pre-releases without any worsening of the flood situation downstream.

The created R-R-model uses different hydrological models and functions, for example for the transformation, the baseflow or the effective precipitation, to calculate an output (flow respectively water level) from the input data (precipitation). The model can only simulate single flood events lasting several days to few weeks. Accumulating or melting snow also cannot be considered.

The data basis for the model are precipitation datasets of gauging data and nowcasting data from the meteorological INCA-model. There are also flow and water level gauging data available for the most important inflows of the Mondsee lake, the outflow, the lake itself and the two other lakes in the basin. 12 flood events were selected to calibrate and validate the R-R-model.

The results of the thesis are, that a qualitatively good modelling of the Mondsee lake catchment area, especially the water level of the lake, is possible by using the HEC-HMS model. The simulations show, that a pre-release of the lake, in case of approaching heavy rainfall, is possible without negative impacts downstream. However, a limitation is, that the pre-release and the peak of the flood wave cannot occur at the same time. Additionally, constant and good quality precipitation forecasts should be provided to get reliable water level predictions from the R-R-model. These forecasts are crucial for estimating when and to what extent pre-releases should be carried out. However, it has to be scrutinized, if this kind of forecast data is available.

Kurzfassung

Der Mondsee ist ein See im oberösterreichischen Salzkammergut mit einer Wasserfläche von 13,8 km² und einem Einzugsgebiet mit 247 km² Größe, welches sich über die Bundesländer Oberösterreich und Salzburg erstreckt. Durch immer wieder auftretende hohe Seewasserstände in Folge von starken Niederschlägen und dadurch auftretenden Überflutungen entstand der Bedarf nach einem genaueren Systemverständnis des Einzugsgebietes bzw. des hydrologischen Systems Mondsee. Die Analyse dieses Systems und die Frage nach einer möglichen Abminderung des Wasserstandes im Fall von Hochwässern waren die Gründe für die Durchführung dieser Arbeit.

Zur Bearbeitung des Themas wurde ein Niederschlags-Abfluss-Modell (N-A-Modell) mit dem Softwarepaket HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) für das Einzugsgebiet erstellt. Es soll drei Anwendungsfälle simulieren können: den Ist-Zustand des Einzugsgebietes anhand von beobachteten Hochwasserereignissen, die Anwendung von Niederschlagsprognosedaten zur Vorhersage des Seewasserstandes und Vorabsenkungen des Sees im Falle von nahenden Starkniederschlägen. Weiters soll die damit in Verbindung stehende Fragestellung nach einer Durchführbarkeit von Vorabsenkungen des Sees, ohne dabei die Situation für die Unterlieger zu verschlechtern, beantwortet werden.

Das erstellte N-A-Modell verwendet verschiedene hydrologische Modelle und Funktionen, unter anderem für die Transformation, den Basisabfluss oder den effektiven Niederschlag, um aus den Inputdaten (Niederschlag) einen Output (Abfluss bzw. Wasserstand) zu berechnen. Mit dem Modell können nur einzelne Hochwasserereignisse mit einer Dauer von mehreren Tagen bis wenigen Wochen und ohne Einfluss von Schneeakkumulation, bzw. -schmelze simuliert werden.

Als Datengrundlage für das N-A-Modell stehen Niederschlagsdaten in Form von Stationsmessdaten und Nowcastingdaten aus dem meteorologischen INCA-Modell zur Verfügung. Außerdem sind Durchfluss- und Wasserstandsdaten an den wichtigsten Zubringern des Mondsees, am Auslass, am Mondsee selbst und an den Oberliegerseen verfügbar. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden 12 Hochwasserereignisse aus den Messreihen ausgewählt.

Die Ergebnisse der Arbeit sind, dass eine Modellierung des Einzugsgebietes des Mondsees, vor allem in Hinblick auf den Wasserstand, in hinreichender Qualität mit dem HEC-HMS-Modell möglich ist. Außerdem haben die Simulationen ergeben, dass eine Vorabsenkung des Sees im Fall von nahenden Starkniederschlägen ohne zusätzliche Beeinträchtigung der Unterlieger durchgeführt werden kann. Es besteht jedoch die Einschränkung, dass sich die Vorabsenkung und der Scheitel der eigentlichen Hochwasserwelle dabei nicht zeitlich überschneiden dürfen. Zusätzlich muss eine gleichbleibende und gute Qualität von Niederschlagsprognosedaten gegeben sein, um verlässliche Wasserstandsprognosen aus dem N-A-Modell zu erhalten. Diese sind entscheidend für eine Abschätzung, wann und in welchem Ausmaß Vorabsenkungsmaßnahmen getroffen werden sollen. Es gilt jedoch zu hinterfragen, ob Prognosedaten dieser Art für die Anwendung im N-A-Modell zur Verfügung stünden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Eidesstattliche Erklärung	ii
Abstract	iii
Kurzfassung	iv
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Datengrundlage	3
2.1 Einzugsgebietsbeschreibung	3
2.2 Wasserbilanz und Meteorologie des Einzugsgebietes	6
2.3 Hydrologisches System	6
2.4 Niederschlagsdaten	8
2.4.1 Daten von Niederschlagsmessstationen	8
2.4.2 INCA-Nowcastingdaten	8
2.4.3 INCA-Prognosedaten	9
2.5 Durchfluss- und Wasserstandsdaten	9
3 Methodik	12
3.1 Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle)	12
3.1.1 Empirische Modelle (black box)	12
3.1.2 Konzeptionelle Modelle (grey box)	12
3.1.3 Physikalisch basierte Modelle (white box)	12
3.2 HEC-HMS Modell	13
3.2.1 Physische Beschreibung des Einzugsgebietes im Modell	15
3.2.2 Regionalisierung des Niederschlages	16
3.2.3 Ermittlung des effektiven Niederschlages	17
3.2.4 Transformationsfunktion	18
3.2.5 Basisabflussfunktion	19
3.2.6 Speicherfunktion der Seespeicher	20
3.2.7 Zeitliche Dimension des N-A-Modells	21
3.2.8 im Modell nicht berücksichtigte Faktoren	21
3.3 Parameteroptimierungsverfahren	21
3.3.1 Optimierungsverfahren, Zielfunktionen und Gütemaße in HEC-HMS	22
4 Anwendung und Ergebnisse	25
4.1 Simulation des Ist-Zustandes	25

4.1.1	Simulationsergebnisse	25
4.1.2	Kalibrierung des Modells	26
4.1.3	Validierung des Modells	34
4.2	Simulation mit Niederschlagsprognosedaten.....	38
4.3	Simulation von Vorabsenkungen bei Hochwasserereignissen.....	39
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	43
6	Literatur- und Quellenverzeichnis	46
7	Abbildungsverzeichnis.....	48
8	Tabellenverzeichnis.....	50
9	Anhang.....	51
9.1	Ergebnisse Kalibrierung nach Abflusspegel	51
9.2	Validierung Wasserstandspegel Mondsee – Ganglinien und Residuen	55

1 Einleitung

Problembeschreibung

Am Mondsee kommt es durch starke Niederschläge immer wieder zu Hochwässern in den Zubringern und daraus resultierenden hohen Seewasserständen. Als Beispiel sei hier das Hochwasserereignis im Jahr 2013 erwähnt, bei dem der Mondsee einen 30-jährlichen Wasserstand (BMLFUW, 2013) erreichte und großräumige Überflutungen in den angrenzenden Bereichen die Folge waren. Im Einzugsgebiet dienen der Mondsee selbst und die beiden Oberlieger-Seen Fuschlsee und Irrsee als Retentionsspeicher für große Niederschlagsmengen und Abflüsse in den flussab gelegenen Attersee.

Der Wasserstand des Mondsees wird über ein Wehr reguliert, dessen Steuerung einer Wehrbetriebsordnung unterliegt. Diese gibt über eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung vor, wieviel Wasser bei welchem Wasserstand aus dem See abgelassen wird. Die Betriebsordnung soll dazu dienen, einen möglichst gleichmäßigen Seewasserstand herzustellen und im Hochwasserfall genügend Wasser abzuführen, um Überschwemmungen zu verhindern.

Die strikte Einhaltung der Wehrbetriebsordnung führt jedoch dazu, dass das Retentionspotential des Sees im Hochwasserfall nicht zur Gänze ausgeschöpft werden kann. Im Fall von prognostizierten starken Niederschlägen mit Hochwasserrisiko könnte das Retentionspotential des Mondsees durch eine flexiblere und angepasste Wehrbetriebsordnung besser genutzt werden, wobei eine Verschlechterung der Hochwassersituation für die Unterlieger vermieden werden muss.

Zielsetzungen und Fragestellungen

Aus den beschriebenen Problemen entstand der Bedarf nach einer Untersuchung der hydraulischen und hydrologischen Eigenschaften des Wehrs, der Wehrbetriebsordnung und deren Auswirkungen auf den Seewasserstand des Mondsees, sowie nach einem generellen Systemverständnis der hydrologischen Bedingungen des Mondsees und seiner Zubringer.

Die hier vorliegende Masterarbeit wurde ergänzend zum derzeit in Bearbeitung befindlichen Projekt „Machbarkeitsstudie Wehrordnung Mondseeklause“ des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) an der Universität für Bodenkultur im Auftrag des Wasserverbandes Mondseeklause durchgeführt. Im Rahmen dieses Projektes werden neben hydraulischen und technischen Fragestellungen, die vor allem auf die Optimierung und Adaptierung der Wehranlage und der Wehrbetriebsordnung abzielen, auch die dazugehörigen hydrologischen Aspekte für das Management des Seewasserstandes untersucht.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Erstellung eines Niederschlags-Abfluss-Modells (N-A-Modell) für das Einzugsgebiet des Mondsees und dessen Anwendungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Simulation des Seewasserstandes und des Retentionspotentials. Das N-A-Modell soll hierfür an drei Szenarien angewendet werden können:

Einleitung

1. Aufsetzen bzw. Kalibrierung und Validierung eines N-A-Modells mit der Software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) zur Simulation des Ist-Systemzustandes anhand beobachteter Hochwasserereignisse
2. Anwendung von Prognose-Niederschlagsinputdaten im N-A-Modell und Abschätzung von Vorhersagemöglichkeiten bezüglich des Wasserstandes
3. Simulation von Vorabsenkungen des Mondsees an vergangenen Hochwasserereignissen und Analyse der damit verbundenen Auswirkungen auf das Retentionspotential des Sees

Die damit verbundenen Fragestellungen lauten:

- Können Hochwasserereignisse am Mondsee hinreichend mit einem Niederschlags-Abfluss-Modell simuliert werden?
- Ist es möglich, Vorabsenkungen des Wasserstandes des Mondsee im Fall von nahenden Starkniederschlägen durchzuführen, ohne dabei die Hochwassersituation für die Unterlieger bedeutend zu verschlechtern?

2 Datengrundlage

2.1 Einzugsgebietsbeschreibung

Der Mondsee ist ein See in Oberösterreich und gehört zu den Seen des Salzkammergutes. Er liegt auf einer Seehöhe von 481 m.ü.A., seine Wasserfläche beträgt 13,80 km², die maximale Wassertiefe beträgt 68 m und die mittlere Wassertiefe 36 m. (Beiwl & Mühlmann, 2008)

Wie in der Österreich-Karte in Abbildung 1 und dem topographischen Überblick über das Einzugsgebiet in Abbildung 2 ersichtlich ist, erstreckt sich sein Einzugsgebiet über die beiden Bundesländer Oberösterreich und Salzburg mit einer Größe von 247 km². Die politischen Gemeinden, die zum größten Teil im Einzugsgebiet liegen, sind:

Salzburg: Fuschl am See, Thalgau, Hof bei Salzburg, Plainfeld

Oberösterreich: Mondsee, Oberwang, Innerschwand am Mondsee, Zell am Moos, Tiefgraben, St. Lorenz, Oberhofen am Irrsee

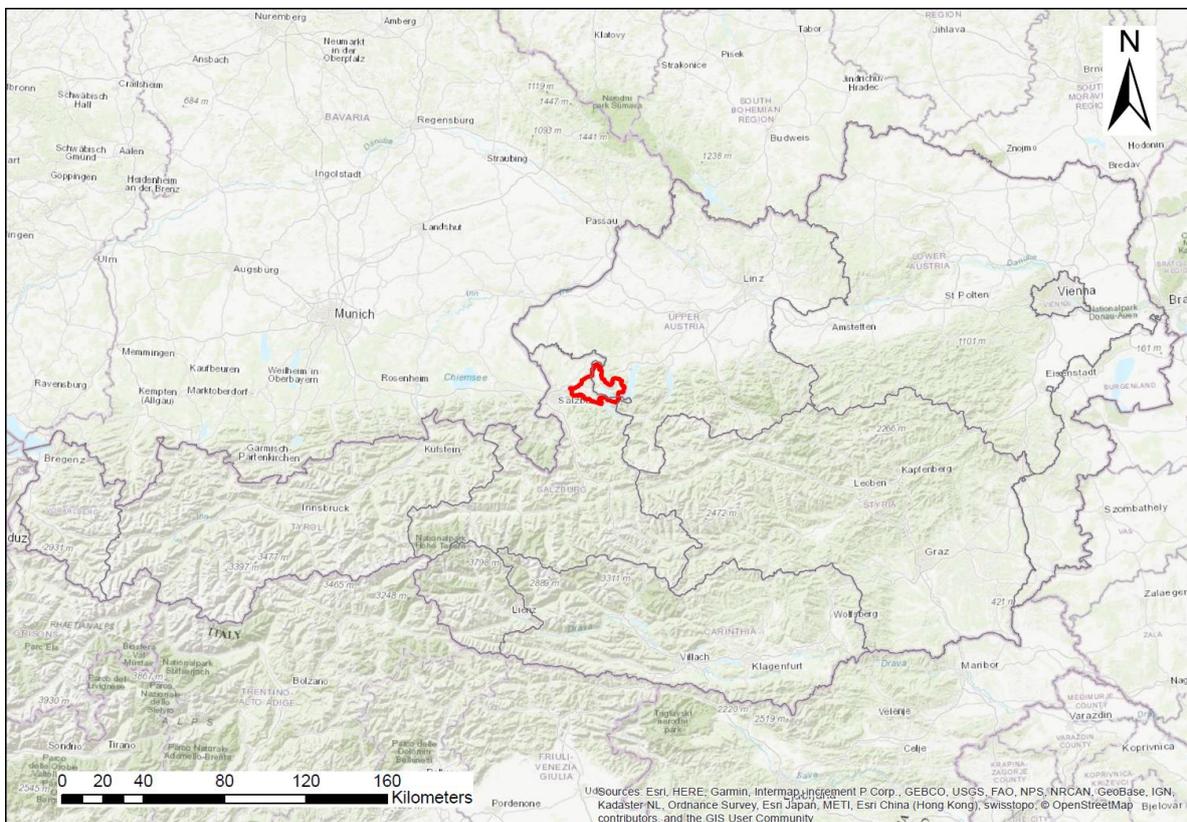


Abbildung 1: Lage des Mondsee-Einzugsgebietes in Österreich

Datengrundlage

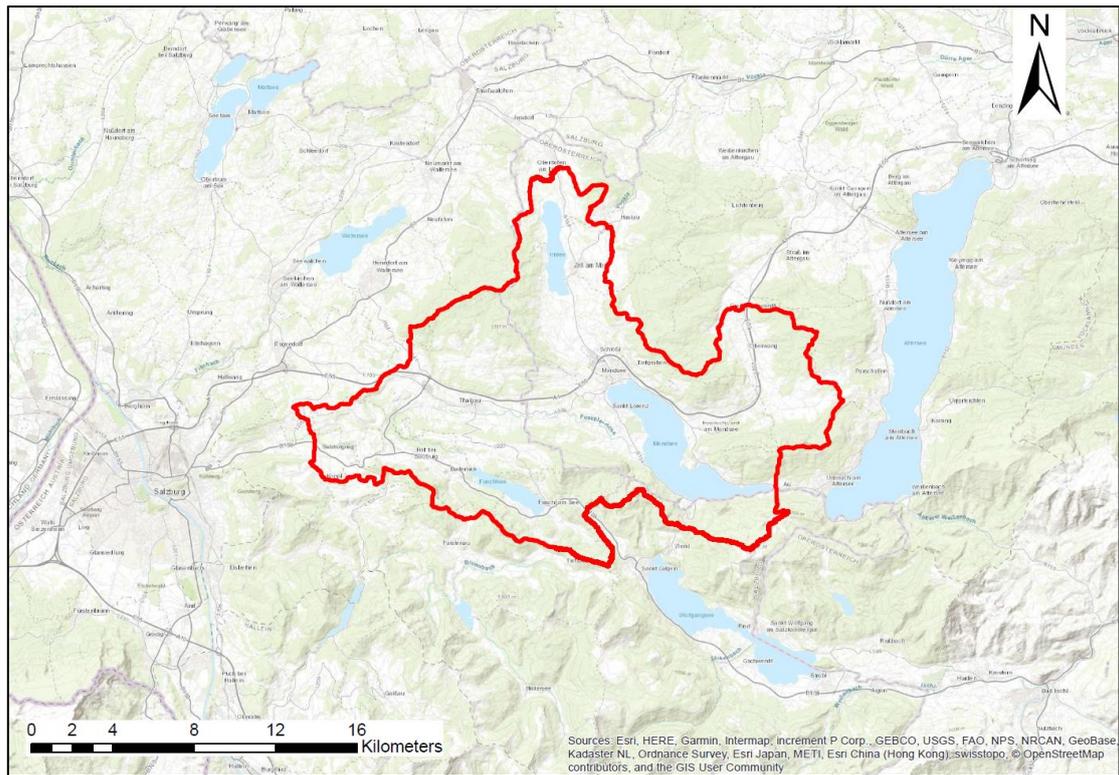


Abbildung 2: topographischer Überblick des Mondsee Einzugsgebietes

Der höchste Punkt des Einzugsgebietes ist der Schafberg, welcher eine Höhe von 1782 m.ü.A. aufweist. Der Gebietsauslass liegt auf 480 m.ü.A. In der Karte in Abbildung 3 sind die Höhenverhältnisse im Einzugsgebiet ersichtlich.

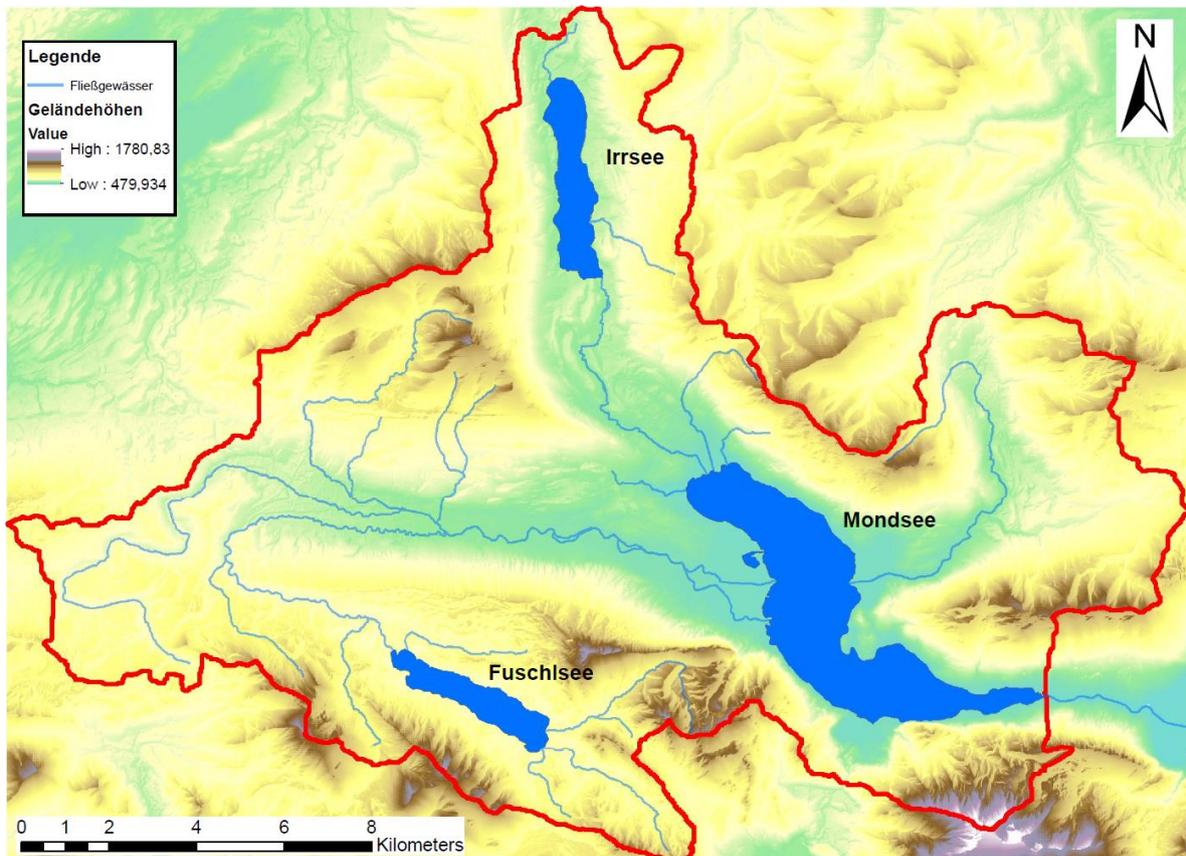


Abbildung 3: Höhenkarte des Mondsee-Einzugsgebietes (eigene Abb. – Höhendaten von: Geoland.at, 2017)

Datengrundlage

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, besteht die Landbedeckung im Einzugsgebiet hauptsächlich aus Wald- und Wiesenflächen, rund 6,5 % der Fläche weisen lockere Verbauung auf. Die genaue Aufschlüsselung der Landbedeckungsklassen ist dem Diagramm in Abbildung 5 zu entnehmen.

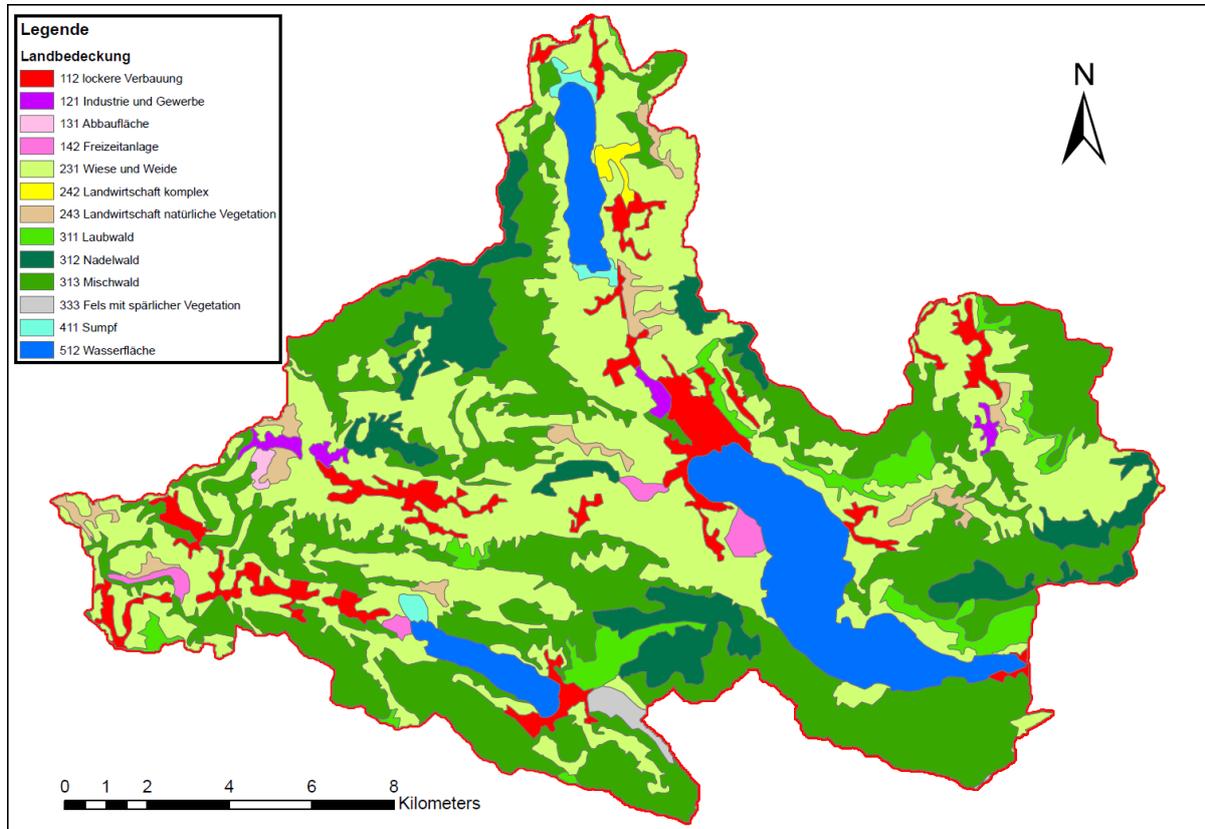


Abbildung 4: Landbedeckungsklassen im Einzugsgebiet (eigene Abb. – Landbedeckungsdaten von: Umweltbundesamt GmbH, 2016)

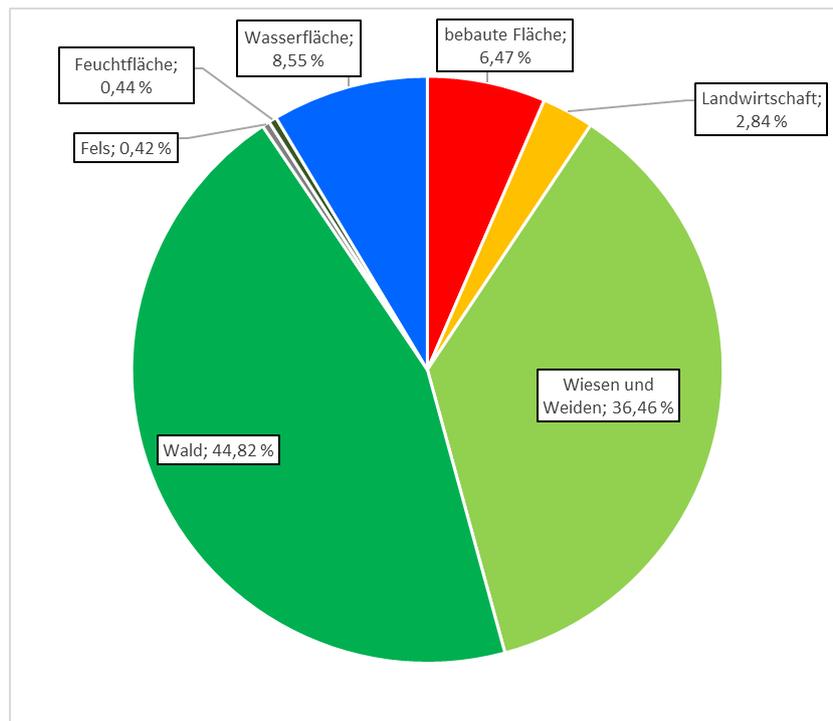


Abbildung 5: relative Anteile der Landbedeckungsklassen im Einzugsgebiet

2.2 Wasserbilanz und Meteorologie des Einzugsgebietes

Für die Kennwerte der Wasserbilanz im Einzugsgebiet wurden die Daten des digitalen hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO) herangezogen. Der Ermittlungszeitraum für die Wasserbilanz sind die Jahre 1961–1990 (BMLFUW, 2007).

Vom jährlichen Gebietsniederschlag in Höhe von 1.768 mm gelangen 66 % zum Gebietsabfluss und 34 % sind der aktuellen Gebietsverdunstung zuzurechnen.

Tabelle 1: Wasserbilanz für das Einzugsgebiet des Mondsees aus BMLFUW, 2007

Parameter	gew. Mittelwert [mm/J]	Min [mm/J]	Max [mm/J]
Gebietsniederschlag	1 768	1 672	1 812
aktuelle Gebietsverdunstung	609	603	619
potentielle Gebietsverdunstung	619	617	622
mittlere Abflusshöhe	1 159	1 069	1 209

Eine charakteristische meteorologische Eigenschaft des Einzugsgebietes sind große Niederschlagsmengen in Folge von Staulagen entlang der Alpennordseite. Mit Hilfe der Web-GIS-Anwendung CLAIRISA (Climate-Air-Information-System for Upper Austria) können die gebietsspezifischen Charakteristika ermittelt werden.

Durchschnittlich gibt es im Einzugsgebiet 7 bis 12 Tage im Jahr, an denen eine Niederschlagsmenge von mehr als 30 mm pro Tag auftritt. Saisonal betrachtet gibt es die größten Niederschlagsmengen im Sommer – hier liegt das Mittel (Betrachtungszeitraum 1981–2010) zwischen 420 mm und 660 mm für das Einzugsgebiet. Die niederschlagsärmste Jahreszeit ist der Winter, wo durchschnittlich zwischen 300 und 360 mm an Niederschlägen fallen. Der 3-Tagesniederschlag mit einer Wiederkehrdauer von 50 Jahren beträgt im Gebiet zwischen 181 mm und 210 mm. (Amt der Oö. Landesregierung, 2016)

2.3 Hydrologisches System

Das hydrologische Einzugsgebiet des Mondsees bildet ein Kaskadensystem mit mehreren Seen. Oberhalb des Mondsees liegen der Fuschlsee (663 m.ü.A.) und der Irrsee (553 m.ü.A.). Die Hauptzuflüsse zum Mondsee bilden die Flüsse Griesler Ache, Zeller Ache, Fuschler Ache (Oberlauf der Griesler Ache) und die Wangauer Ache. Die Entwässerung des Sees erfolgt über die Seeache in den Attersee, weiter über die Ager in die Traun und die Donau.

In Abbildung 6 sind die vier Teileinzugsgebiete der Hauptzuflüsse zu erkennen. An allen Hauptzuflüssen, ausgenommen der Wangauer Ache, gibt es Abflussbeobachtungen (siehe dazu Abbildung 9 auf Seite 11). Die mittleren Durchflüsse an den Messstationen sind:

Tabelle 2: mittlere Durchflüsse der Hauptzuflüsse des Mondsees

HZB-Nummer	Stationsname	Gewässer	MQ [m³/s]
203661	Hof bei Salzburg	Fuschler (Griesler) Ache	1,12
205278	Mondsee (Armaturenwerk)	Zeller Ache	1,29
205294	St. Lorenz	Griesler Ache	3,82

Datengrundlage

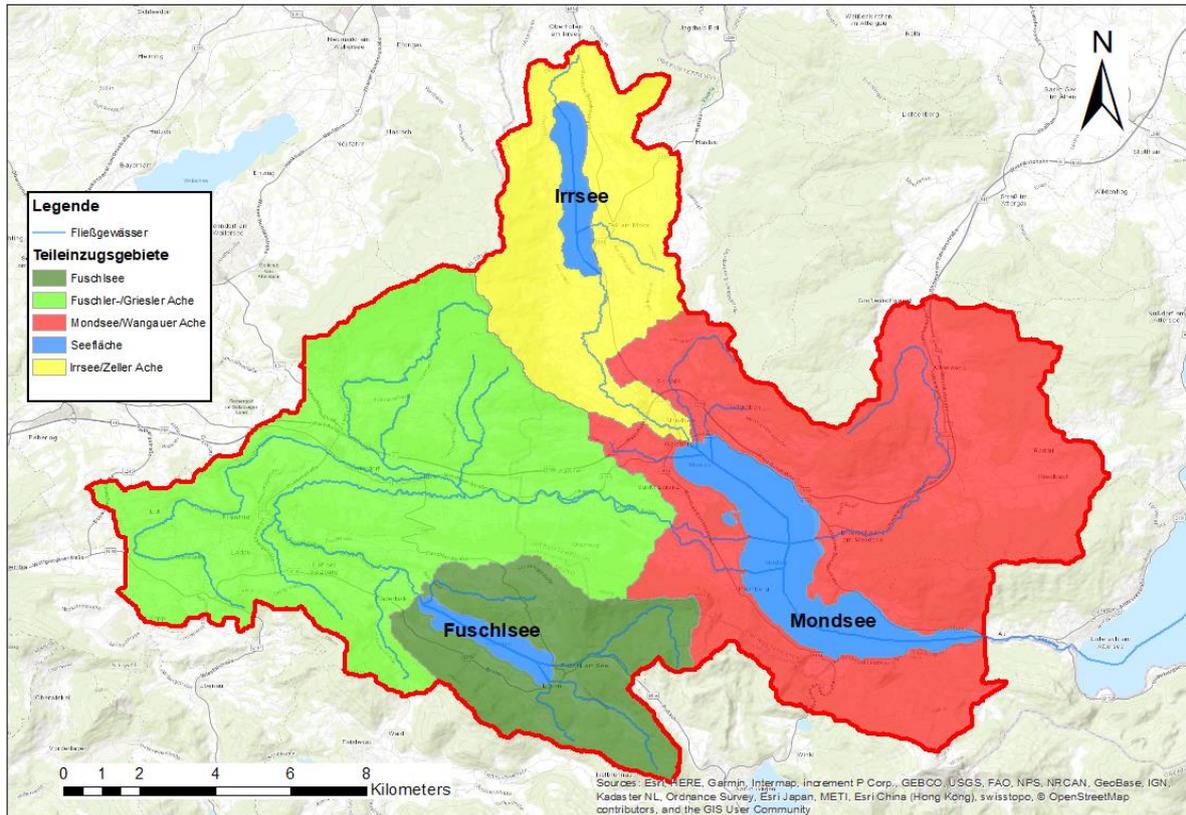


Abbildung 6: Gliederung des Mondsee-Einzugsgebietes in Teileinzugsgebiete (eigene Abb. - Geodaten von: Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft, 2015b, 2015c; Land Salzburg - Referat Geodateninfrastruktur, 2017)

Das Abflussschema und der Aufbau des Mondsee-Einzugsgebietes sind in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt.

Die Teil-Einzugsgebiete der Wangauer Ache und der kleineren Zubringer, die direkt in den Mondsee münden, sind nicht durch Durchflusspegel erfasst und somit unbeobachtet.

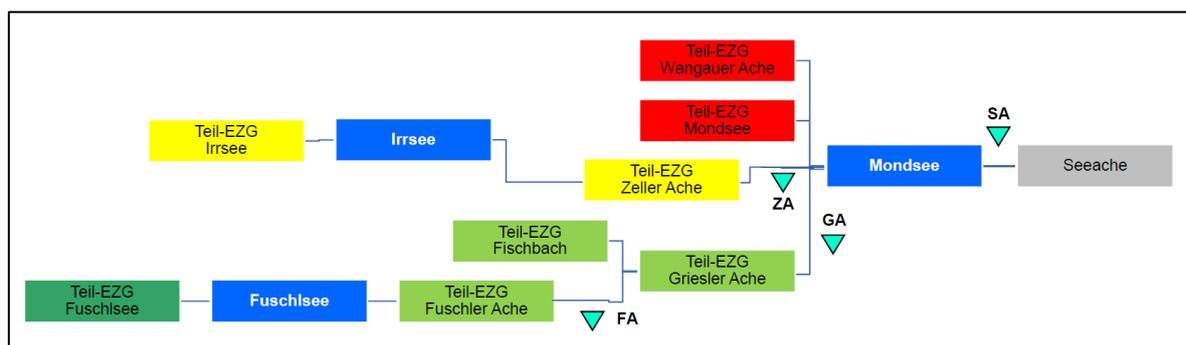


Abbildung 7: Abflussschema des Mondsee-Einzugsgebietes

Der mittlere Abfluss aus dem Mondsee in die Seeache und weiter in den darunter gelegenen Attersee beträgt $9,18 \text{ m}^3/\text{s}$.

In der folgenden Tabelle 3 werden die Charakteristika der im Einzugsgebiet gelegenen Seen angeführt.

Tabelle 3: Charakteristika der Seen im Mondsee-Einzugsgebiet (Quelle: Beiwl & Mühlmann, 2008)

See	Fläche [ha]	max. Tiefe [m]	mittlere Tiefe [m]	Volumen [Mio. m ³]	Einzugsgebiet [km ²]
Mondsee	1 380	68	36	496,8	247,0
Irrsee	360	32	15	53,1	27,5
Fuschlsee	265	67	37	97,9	29,5

2.4 Niederschlagsdaten

Für die Betrachtung und Modellierung des Einzugsgebietes sind Niederschlagsdaten aus dem Untersuchungsgebiet unabdingbar. Diese liegen in zwei verschiedenen Formen vor – einerseits als Stationsdaten von Messstellen und andererseits als bereits räumlich verteilte Nowcastingdaten aus dem meteorologischen INCA-Modell (siehe dazu Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Daten von Niederschlagsmessstationen

Es wurden die Niederschlagsdaten von sechs Niederschlagsmessstationen, betrieben durch die hydrographischen Dienste der Bundesländer Salzburg und Oberösterreich, verwendet.

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Niederschlagsmessstationen

HZB-Nummer	Name	Station liegt im EZG	zeitliche Auflösung
104356	Straßwalchen	nein	täglich
105353	Fuschl	ja	stündlich
105379	Schärfling	ja	täglich
105387	Weißbach am Attersee	nein	stündlich
105700	Oberwang	ja	täglich
115022	Thalgau	ja	stündlich

Vier der sechs Stationen liegen direkt im Einzugsgebiet des Mondsees und zwei außerhalb. Die Lage der Messstationen wird in der Übersichtskarte (Abbildung 9, Seite 11) dargestellt. Von allen Stationen ist eine Mess-Zeitreihe von rund 40 Jahren verfügbar. Die Zeitreihen aller Datensätze enden im Dezember 2013.

Zudem erwähnenswert ist, dass im Teil-Einzugsgebiet des Irrsees keine eigene Messstation vorhanden ist, die nächstgelegene ist die Station Straßwalchen. Außerdem gibt es bei den stündlichen Niederschlagsdaten oft erhebliche Datenlücken. Tagessummen der Niederschläge sind von allen Stationen lückenlos vorhanden.

2.4.2 INCA-Nowcastingdaten

Für den Zeitraum von 2003–2015 sind als Niederschlagsdaten auch räumlich verteilte Nowcastingdaten aus dem INCA-Modell (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) verfügbar. Dieses Modell wurde von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) entwickelt. Nowcasting umfasst die detaillierte Beschreibung des aktuellen Wetters gemeinsam mit Prognosen durch Extrapolation für eine Zeitspanne von 0 bis 6 Stunden voraus (World Meteorological Organization, 2017).

Im INCA-System werden Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Niederschlagsmenge, Niederschlagstyp, Bewölkung und globale Strahlung erfasst. Es kombiniert Stationsdaten mit Fernerkundungsdaten, um damit die Beobachtungen an den Stationen zu reproduzieren. Die Fernerkundungsdaten bieten die räumliche Struktur zur Interpolation der Messwerte (Haiden et al., 2011).

Für die Modellierung werden Niederschlagsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 60 Minuten herangezogen. Diese liegen in ursprünglicher Form als Rasterdaten mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km vor und wurden auf die Flächen der Teileinzugsgebiete bezogen. Die Implementierung der INCA-Nowcastingdaten in das HEC-HMS Modell wird im Kapitel 3.2.2 genauer behandelt.

Andere Nowcastingdaten aus dem INCA-System, wie z.B. Temperatur oder Strahlung, werden für die Modellierung nicht verwendet.

2.4.3 INCA-Prognosedaten

Für die Simulation der Hochwasserwellen mit Niederschlagsprognosen stehen für das Ereignis im Jahr 2013 Niederschlagsprognosedaten, ebenfalls aus dem INCA-Modell, zur Verfügung.

Diese bieten einen Prognosehorizont von 91 Stunden mit einer zeitlichen Auflösung von 60 Minuten. Auch hier waren die Rohdaten als Rasterdaten vorhanden, welche auf die Flächen der Teileinzugsgebiete umgelegt wurden. Der Datensatz besteht aus zwei Prognosen pro Tag, jeweils um 09:00 Uhr und um 19:00 Uhr, für die Tage vom 29.05.2013 bis zum 06.06.2013.

Die Implementierung der INCA-Prognosedaten in das HEC-HMS Modell wird im Kapitel 3.2.2 genauer behandelt.

2.5 Durchfluss- und Wasserstandsdaten

Ebenso unverzichtbar für das Aufsetzen des Niederschlags-Abfluss-Modells sind Durchfluss- und Wasserstandsdaten der Gewässer im beobachteten Einzugsgebiet.

An allen drei Seen und an den Zuflüssen Fuschler bzw. Griesler Ache und Zeller Ache, sowie am Ausfluss des Sees, an der Seeache, sind Pegelstationen vorhanden. In Summe gibt es somit vier Wasserstandspegel an den Seen (zwei am Mondsee) und vier Durchflusspegel (siehe dazu auch Abbildung 9). Die genauen Bezeichnungen und HZB-Nummern (Hydrographisches Zentralbüro) der Messstationen sind in Tabelle 5 angeführt.

Für das Projekt steht eine Zeitreihe von 1976–2013 mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde für alle Messstellen zur Verfügung. Alle Daten stammen von den hydrographischen Diensten der Bundesländer Oberösterreich und Salzburg.

Datengrundlage

Tabelle 5: verwendete Messstellen Oberflächengewässer

HZB-Nummer	Name	Gewässer
203653	Fuschl	Fuschlsee
203661	Hof bei Salzburg	Fuschler (Griesler) Ache
205260	Zell am Moos	Irrsee
205278	Mondsee (Armaturenwerk)	Zeller Ache
205286	Mondsee (Limnolog. Institut)	Mondsee
205294	St. Lorenz	Griesler Ache
205302	See am Mondsee	Mondsee
206185	See am Mondsee (Au)	Seeache

Erwähnenswert ist, dass die beiden Wasserstandsmessstellen am Mondsee (Limnolog. Institut und See am Mondsee) teilweise relativ stark voneinander abweichende Daten aufweisen. Bei der Plausibilitätskontrolle des Pegels „Limnolog. Institut“ sind Sprünge in der Ganglinie auffällig, welche am Pegel „See am Mondsee“ nicht auftauchen (siehe dazu Abbildung 8). Aufgrund dieser Auffälligkeiten wurden für die Modellierung nur die Daten des Pegels „See am Mondsee“ herangezogen.

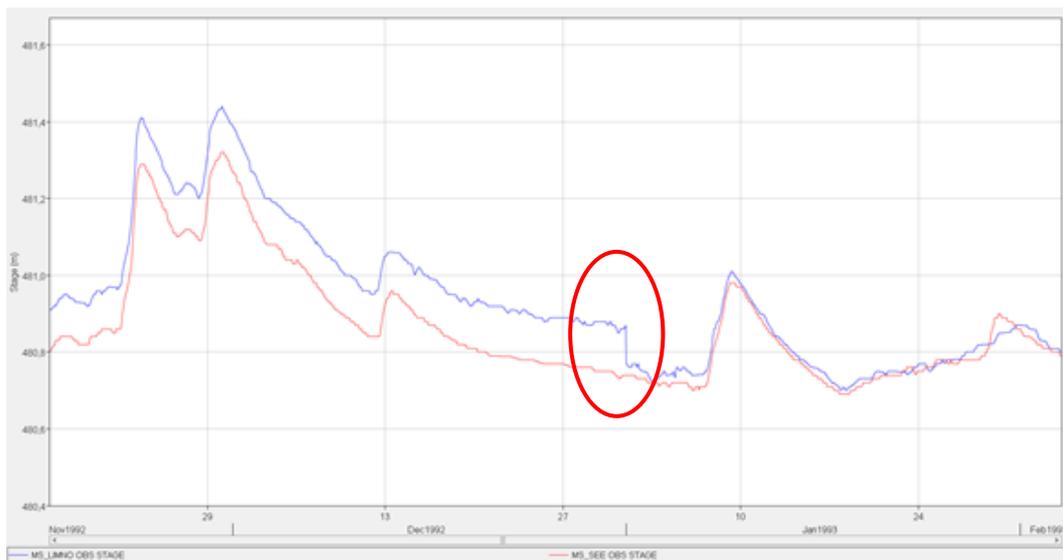


Abbildung 8: Vergleich und Plausibilitätskontrolle der Wasserstandspegel des Mondsees "Limnolog. Institut" (**blau**) und "See am Mondsee" (**rot**)

Da weder der Ausfluss des Fuschlsees, noch der des Irrsees über ein Wehr gesteuert werden und auch keine Wasserkraftwerke an den Zuflüssen des Mondsees vorhanden sind, gibt es dahingehend keine Beeinflussung der Messdaten. Lediglich der Pegel „See am Mondsee (Au)“ an der Seeache ist durch die Betriebsweise des Auslasswehres des Mondsees beeinflusst.

Datengrundlage

Die geographische Lage aller Messstationen im betrachteten Gebiet wird in der folgenden Übersichtskarte dargestellt:

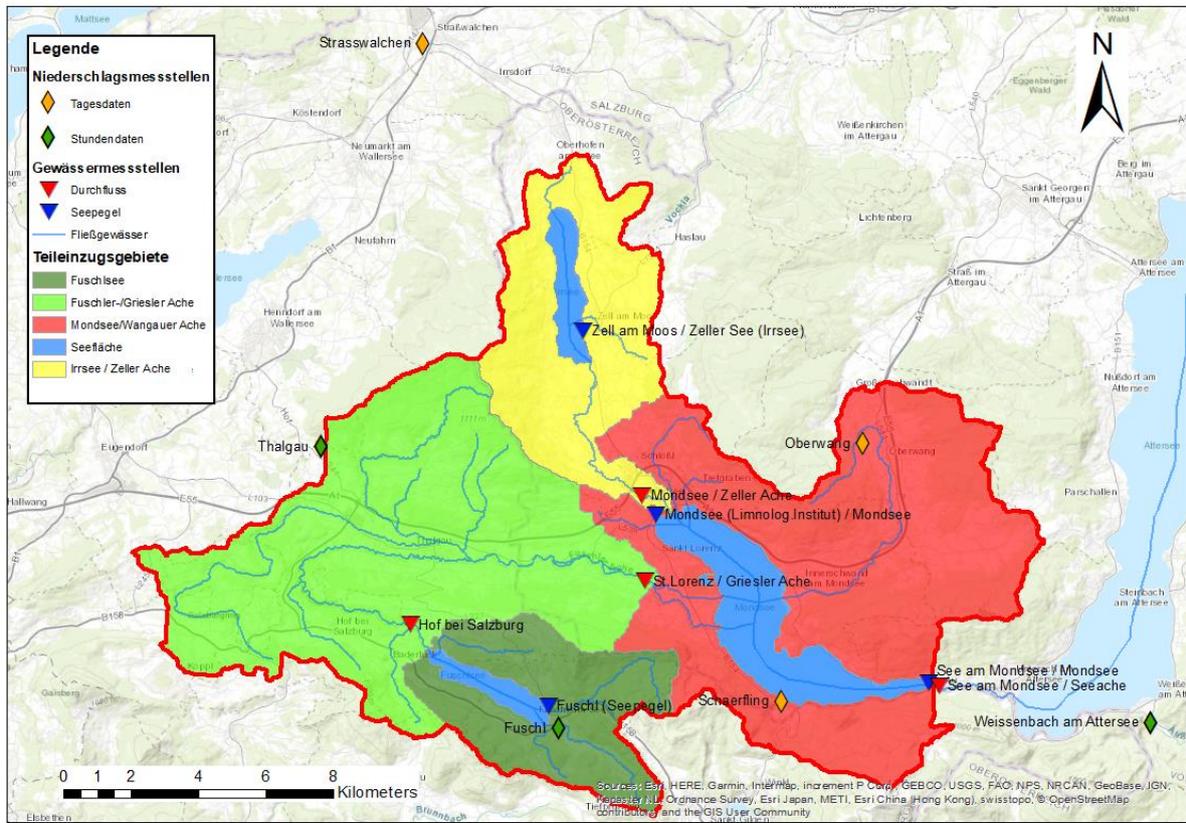


Abbildung 9: Übersichtskarte der verwendeten Niederschlags- und Gewässermessstellen (eigene Abb. – Geodaten von: Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft, 2015a, 2015b, 2015c; Land Salzburg - Referat Geodateninfrastruktur, 2017)

3 Methodik

3.1 Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle)

Grundsätzlich kann bei N-A-Modellen zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterschieden werden. Deterministische Modelle sollen den meteorologischen Input auf das Einzugsgebiet in eine Abflussganglinie an einem Gewässerpunkt transformieren. Stochastische Modelle hingegen haben Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Variablen zum Ergebnis (Maniak, 2016). In dieser Arbeit werden nur deterministische Modelle verwendet und daher wird auf die stochastischen nicht weiter eingegangen.

N-A-Modelle können außerdem anhand der räumlichen Diskretisierung unterschieden werden. Es gibt einerseits Rastermodelle, bei denen ein gleichförmiges Raster mit einer festzulegenden räumlichen Auflösung über das Einzugsgebiet gelegt wird und jede Zelle berechnet wird. Andererseits existieren Vektormodelle, in denen Flächen mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst werden – daher kommt auch die englische Bezeichnung „lumped models“ (Fohrer et al., 2016).

Refsgaard & Knudsen (1996) unterscheiden die deterministischen Modelle weiter in empirische, konzeptionelle und physikalisch basierte Modelle. Diese Einteilung basiert auf dem Ausmaß der im Modell angewandten physikalischen Grundlagen (Devia & Ganasri, 2015). Die exakte Zuteilung von N-A-Modellen zu einem Modelltyp ist meist schwierig, da die Übergänge zwischen den Modelltypen oft fließend sind (Maniak, 2016).

3.1.1 Empirische Modelle (black box)

Empirische Modelle stützen sich rein auf Beobachtungen im System und berücksichtigen keine hydrologischen Prozesse im betrachteten Gebiet. Dabei wird ein aus empirischen Beobachtungen abgeleiteter Zusammenhang zwischen Input und Output hergestellt. Diese Art von Modellen ist nur für das betrachtete Gebiet gültig und kann nicht auf andere Fragestellungen übertragen werden. Auch für die Vorhersagen von Extremereignissen sind rein empirische Modelle nur bedingt geeignet. Beispiele sind das Einheitsganglinienverfahren nach Sherman (1932) oder neuere Ansätze wie neuronale Netze.

3.1.2 Konzeptionelle Modelle (grey box)

Diese Art von Modellen besteht aus einer Kombination von empirischen und vereinfachten physikalisch basierten Berechnungsmethoden. Häufig beinhalten diese Modelle mehrere aneinandergereihte Speicher mit unterschiedlichen Eigenschaften, welche die verschiedenen physikalischen Elemente im betrachteten Einzugsgebiet simulieren sollen (z.B. Schneespeicher, Bodenspeicher, etc.). Für die Modellparameter werden meist Mittelwerte herangezogen, welche stellvertretend für das ganze untersuchte Gebiet stehen, was dem Prinzip eines „lumped model“ entspricht. Vertreter der konzeptionellen Modelle sind unter anderem das HBV-Modell (Bergström, 1992) oder das an der Universität für Bodenkultur entwickelte COSERO-Modell (Nachtnebel, 1993), welches an das HBV-Modell angelehnt ist.

3.1.3 Physikalisch basierte Modelle (white box)

White Box Modelle setzen bei Berechnung der Output-Größe auf physikalisch basierte Ansätze und gehen so weit wie möglich auf die physikalischen Grundgleichungen (z.B. St. Venant-Gleichung für Abfluss) zurück (Fohrer et al., 2016). Damit sollen die hydrologischen Prozesse im betrachteten Gebiet bestmöglich beschrieben werden. Diese Art von Modellen

benötigt eine große Zahl an Daten, wie Bodenkennwerte, Topographie, Ausdehnung des Fließgewässernetzes und viele mehr, um das Einzugsgebiet mathematisch idealisiert nachzubilden zu können (Devia & Ganasri, 2015). Zu den bekanntesten Modellen dieser Art gehört das SHE-Modell (Systeme Hydrologique Européen) nach Abbott et al. (1986).

Wie bereits erwähnt, ist eine eindeutige Zuordnung eines Modells in die drei soeben beschriebenen Kategorien oft schwierig. Das in dieser Arbeit verwendete Modell kann als Hybrid aus empirischem und konzeptionellem Modell bezeichnet werden. Einerseits kommen Unit Hydrograph-Modelle zur Anwendung, welche jedoch durch ihre gebietsbezogenen Parameter und der räumlichen Differenzierung keinem klassischen Black-Box-Modell entsprechen. Andererseits kommen keine vereinfachten physikalischen Funktionen zum Einsatz, was wiederum gegen eine Zuteilung zur Gruppe der konzeptionellen Modelle spricht.

3.2 HEC-HMS Modell

Die Software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) ist ein Programm zur Simulation von Niederschlags-Abfluss-Prozessen in dendritischen hydrologischen Einzugsgebieten. Durch den vergleichsweise einfachen Aufbau der Software und der verschiedenen auswählbaren mathematischen Modelle im Programm, ist HEC-HMS für die meisten geographischen Gegebenheiten geeignet, um dort hydrologische Vorgänge zu simulieren. (Scharffenberg, 2016)

HEC-HMS ist eine Software des U.S. Army Corps of Engineers und steht im Internet (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>) frei zum Download zur Verfügung. Das Programm besitzt eine graphische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 10) und eine komplette Arbeitsumgebung mit Datenbanken-, Dateneingabe- und Ergebnisberichts-Tools, sowie eine Berechnungs-Engine. Die Ursprünge der Software liegen in den Vorgänger-Versionen HEC-1F aus 1989 und HEC-1 aus 1998, die kontinuierlich verbessert und erweitert wurden, bis schließlich die Version 1.0 von HEC-HMS verfügbar war. Die aktuellste Version (4.2.1) ist für die Betriebssysteme Windows und Linux erhältlich. Zur Steigerung der Bedienfreundlichkeit gibt es umfangreiche User Manuals, welche einerseits die Bedienung des Programms erläutern und andererseits die implementierten mathematischen Modelle beschreiben. Die für die Erstellung des Modells und die Simulationen verwendete Programmversion ist 4.2.1.

Alle im Programm verfügbaren mathematischen Modelle sind deterministischer Art. Die Randbedingungen, Anfangsbedingungen und Modellparameter müssen daher bekannt sein. Die verwendeten Modellparameter werden als konstant betrachtet, da die mathematischen Modelle als zeitlich stationär angenommen werden (Scharffenberg, 2016). Die räumliche Diskretisierung in HEC-HMS ist mit der eines „lumped models“ – also der eines räumlich aggregierten Modells – vergleichbar. Das betrachtete Einzugsgebiet kann dabei in beliebig viele Teil-Einzugsgebiete gegliedert werden und für jedes können eigene mathematische Modelle mit eigenen Parametern definiert werden. Generell können alle im Programm vorhanden Modelle miteinander kombiniert werden, sodass eine möglichst gute Anpassung des Modells an die Realität möglich ist.

Methodik

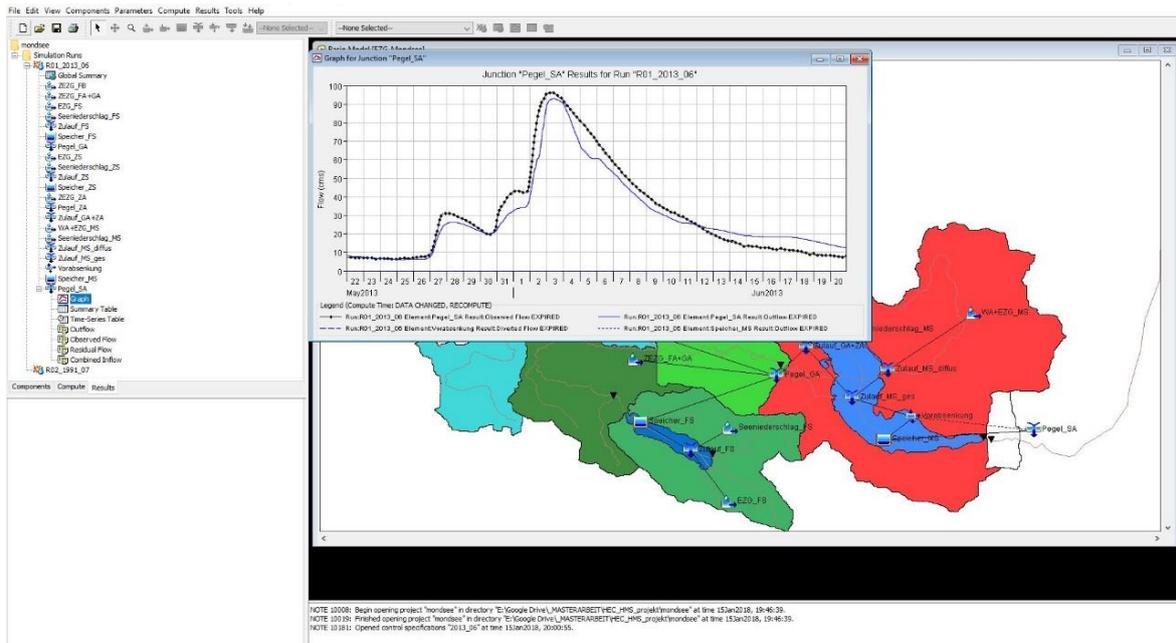


Abbildung 10: Graphische Benutzeroberfläche von HEC-HMS

In einem HEC-HMS Modell können folgende Eigenschaften eines betrachteten Einzugsgebietes definiert werden:

- physische Beschreibung des Einzugsgebietes
 - Gliederung in Teileinzugsgebiete
 - Fläche
 - Bodenspeicher bzw. Infiltrationsverluste
 - Landbedeckung bzw. undurchlässige Fläche
 - Beschirmung des Geländes bzw. Interzeptionsspeicher
- meteorologische Verhältnisse im Einzugsgebiet
 - kurzweilige Strahlung
 - langweilige Strahlung
 - Niederschlag
 - Evapotranspiration
 - Schneeschmelze
- Hydrologische Eigenschaften des Einzugsgebietes
 - Transformationsfunktion
 - Basisabflussfunktion
 - Speicherfunktion von Seen, Retentionsbecken u. Ä.
 - Fließende Retention

Nicht alle Modelleigenschaften sind zwingend zu definieren um ein funktionierendes Modell zu erstellen. Zum Beispiel wäre es nur bedingt sinnvoll, für ein rein für Hochwasserereignisse erstelltes Modell, bei dem die Simulationszeiträume nur wenige Tage oder Wochen andauern, mathematische Modelle für die Strahlung und Evapotranspiration aufzusetzen, da diese nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis hätten. Des Weiteren gibt es für die verschiedenen, zu definierenden Modell-Eigenschaften meist mehrere mathematische Modelle zur Auswahl, die unabhängig voneinander kombiniert werden können.

Mit HEC-HMS bietet sich die Möglichkeit, sowohl langfristige, als auch kurzfristige Modelle zu erstellen. Das heißt, es können Modellzeiträume über mehrere Jahre, sowie kurze Zeiträume (z.B. für einzelne Hochwasserereignisse) simuliert werden.

In den folgenden Kapiteln wird erläutert, welche mathematischen Modelle für die Erstellung des N-A-Modells für das Mondsee-Einzugsgebiet verwendet wurden.

3.2.1 Physische Beschreibung des Einzugsgebietes im Modell

Für die physische Beschreibung des Einzugsgebietes Mondsee wurden im Programm hydrologische Elemente angelegt. Dies sind neun Teileinzugsgebiete (subbasin) mit definierten Flächen, neun Zusammenflüsse (junction), drei Speicher (reservoir) und eine Abzweigung (diversion).

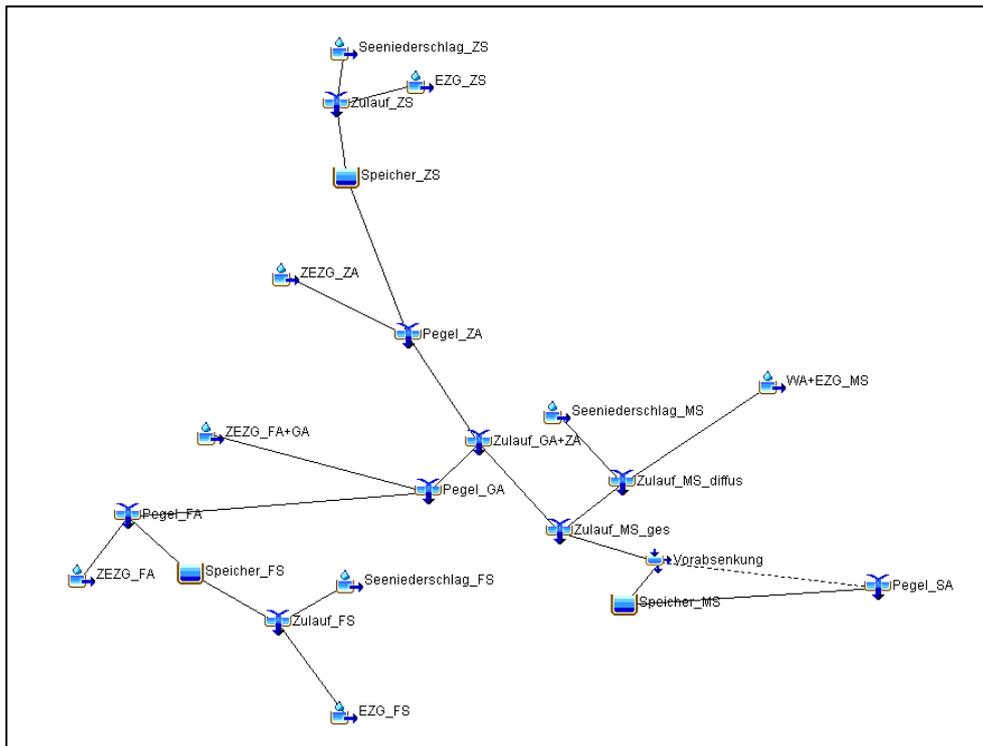


Abbildung 11: Modellaufbau in HEC-HMS für das Mondsee-Einzugsgebiet mit den einzelnen hydrologischen Elementen und Verbindungen

Die **subbasin**-Elemente repräsentieren jeweils einen Teil der Fläche des gesamten Einzugsgebietes. Je Element können die Fläche, die geographischen Koordinaten eines Punktes im Teil-Einzugsgebiet (hier: Schwerpunkt) und Methoden für Interzeptionsspeicher, Landbedeckung, Niederschlagsverluste, Transformation und Basisabfluss ausgewählt werden. Außerdem muss für die korrekte Berechnung das Unterlieger-Element im Modell ausgewählt werden.

Tabelle 6: für das Mondsee-Einzugsgebiet erstellte subbasin-Elemente im HEC-HMS-Modell

Teil-Einzugsgebiet	Bezeichnung	Fläche [km ²]
Einzugsgebiet Fuschlsee	EZG_FS	26,2
Seeniederschlag Fuschlsee	Seeniederschlag_FS	2,6
Zwischeneinzugsgebiet Fuschler Ache	ZEZG_FA	5,6
Zwischeneinzugsgebiet Fuschler u. Griesler Ache	ZEZG_FA+GA	77,0
Einzugsgebiet Irrsee	EZG_ZS	23,9
Seeniederschlag Irrsee	Seeniederschlag_ZS	3,6
Zwischeneinzugsgebiet Zeller Ache	ZEZG_ZA	10,5
Einzugsgebiet Mondsee u. Wangauer Ache	WA+EZG_MS	82,9
Seeniederschlag Mondsee	Seeniederschlag_MS	13,9

Mit den **junction**-Elementen wird der Zusammenfluss mindestens zweier Fließgewässer bzw. Oberlieger-Elemente simuliert. An ihnen können Pegelmesswerte in Form von Durchflussdaten bzw. Wasserstandsdaten in Kombination mit einem Pegelschlüssel definiert werden.

Die drei Seen im Einzugsgebiet wurden mit **reservoir**-Elementen modelliert. Für diese werden eine Abfluss- und Speichermethode sowie der Wasserstand bei Simulationsbeginn als Randbedingung gewählt.

Ein zusätzlicher Abfluss im Falle einer Vorabsenkung des Mondsees wird über das **diversion**-Element in das Modell implementiert. Dieses simuliert einen Bypass, der das reservoir-Element umgeht und direkt mit dem Unterlieger-Pegel (Seeache) verbunden ist. Für das Element kann eine fiktive Ganglinie eingestellt werden, die den zusätzlichen Durchfluss bei einer Vorabsenkung repräsentiert. Problematisch bei dieser Modellstruktur ist, dass nur maximal so viel Wasser durch den Bypass geleitet werden kann, wie auch gerade in den Seespeicher zufließt, was in der Realität so nicht der Fall wäre.

3.2.2 Regionalisierung des Niederschlages

Wie in Kapitel 2.4 erwähnt, sind die Niederschlagsdaten als Input für das Modell in zwei Formen vorhanden. Einerseits die punktuellen Messdaten der Niederschlagsmessstellen und andererseits die auf Teilflächen umgelegten räumlichen INCA-Nowcastingdaten. Um diese Input-Daten für das Modell verwendbar zu machen, müssen sie auf die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Modellstruktur umgelegt werden. Die Vorgehensweise dafür wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.2.1 Inverse Distanzgewichtung (IDW) für Stationsdaten

Bei der Interpolationsmethode der inversen Distanzgewichtung wird davon ausgegangen, dass Werte mit kleinem räumlichen Abstand ähnlicher zueinander sind als Werte mit großem räumlichen Abstand. Jeder Messpunkt in einem Gebiet stellt dabei einen Stützpunkt für die Interpolation des gesuchten Wertes dar, wobei die Gewichtung über den Kehrwert der Distanz vom gesuchten Punkt zu den Stützpunkten in die Berechnung eingeht (Fohrer et al., 2016).

$$\hat{z}(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{z(x_i, y_i)}{d_{i,0}^\beta}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{i,0}^\beta}} \quad (1)$$

mit

$\hat{z}(x_0, y_0)$	interpolierter Wert an der Stelle (x_0, y_0)
N	Anzahl der Stützstellen
$d_{i,0}$	Distanz zwischen (x_0, y_0) und Stützpunkt i
β	Glättungsparameter
$z(x_i, y_i)$	beobachteter Wert an den Punkten (x_i, y_i)

Um die Distanzen zwischen den Messstellen und den gesuchten Punkten im Programm berechnen zu können, müssen die geographischen Koordinaten der Messstellen und der Flächenschwerpunkte der Teil-Einzugsgebiete (subbasin-Elemente im Modell) eingegeben werden.

Anhand der ins Modell eingespielten Messreihen der Niederschlagsmessstationen kann das Programm nun für jeden Wert in der Zeitreihe einen Wert für die gesuchten Punkte berechnen. Da nur an drei der sechs Niederschlagsmessstellen stündliche Daten vorhanden sind, muss das Programm zuerst die Stundendaten für die Stationen mit Tagesdaten aus den stündlichen Daten der anderen Stationen interpolieren.

3.2.2.2 Flächengewichtete Mittelwerte für INCA-Daten

Die in Rasterform vorhandenen INCA-Daten wurden mit einem Hilfsprogramm auf die Teil-Einzugsgebiete (Abbildung 12, links) umgelegt. Das heißt, dass es für jede der links dargestellten Teilflächen eine eigene Zeitreihe mit Niederschlagsdaten gibt. Da die Teileinzugsgebiete jedoch eine andere Gliederung als die subbasin-Elemente im HEC-HMS-Modell (Abbildung 12, rechts) besitzen, wurden die Daten durch flächengewichtete Mittelung auf die Teilflächen im Modell umgelegt.

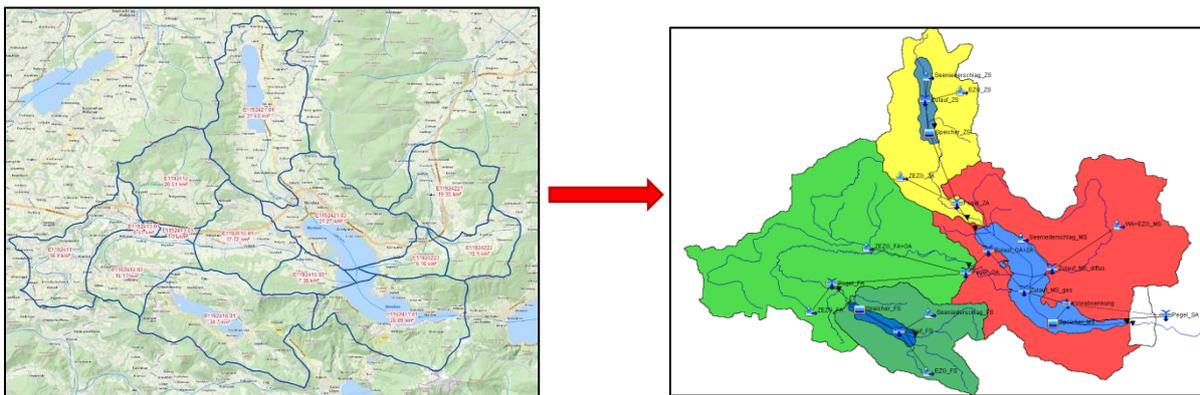


Abbildung 12: Umlegung der INCA-Daten auf die N-A-Modell-Struktur (links: Gliederung der Teil-Einzugsgebiete aus Hilfsprogramm; rechts: Gliederung Teil-Einzugsgebiete im N-A-Modell)

3.2.3 Ermittlung des effektiven Niederschlages

Der effektive Niederschlag ist jener Teil des Niederschlages, der unmittelbar zum Abfluss beiträgt und nicht durch z.B. Interzeption zurückgehalten wird. In HEC-HMS besteht die Möglichkeit Vegetationsklassen im Einzugsgebiet und somit den Interzeptionsspeicher zu simulieren.

Darauf wurde bei der Erstellung dieses Modells verzichtet (siehe Kapitel 3.2.8). Um die Interzeption jedoch trotzdem zu berücksichtigen, wurde für jedes subbasin-Element die Verlust-Methode „Deficit and Constant Loss“ ausgewählt. Dabei sind der Anfangsverlust in mm und eine konstante Verlustrate in mm/h zu definieren. Durch die Höhe des Anfangsverlustes wird der Interzeptionsspeicher und durch die konstante Verlustrate der weitere Verlust von Niederschlag, z.B. durch Versickerung im Gebiet, simuliert.

3.2.4 Transformationsfunktion

Für die Transformationsfunktion von Input (Niederschlag) zu Output (Abfluss) wurde für alle Teil-Einzugsgebiete (subbasin-Elemente), außer den drei „Seeniederschlag“-Gebieten, das Clark Unit Hydrograph Modell (Clark UH) gewählt. Das Clark UH Modell ist eine Weiterentwicklung des Einheitsganglinien-Verfahrens nach Sherman (1932). Es wurde von C. O. Clark (1945) entwickelt, gehört zu den empirischen und aggregierten (lumped) Modellen (siehe Kapitel 3.1.1) und ist für ereignisbezogenes Modellieren geeignet. Das Clark UH Verfahren simuliert die beiden hydrologischen Prozesse Translation und Dämpfung auf empirischer Basis (Feldman, 2000). Dabei wird das Einheitsganglinienverfahren mit einem linearen Speicher kombiniert, wodurch die beiden Prozesse repräsentiert werden sollen.

Die Translation im Clark UH Modell wird über ein Zeit-Flächen Diagramm bestimmt. Die Grundlage dafür bildet die kritische Fließzeit oder Konzentrationszeit t_c des Einzugsgebietes. Dies ist jene Zeit, die ein Wasserteilchen benötigt, um vom am weitest entfernten Punkt im Einzugsgebiet zum Gebietsauslass zu kommen. Betrachtet man die Fließzeiten eines Wasserteilchens von jedem Punkt im Einzugsgebiet zum Gebietsauslass, lässt sich ein Isochronenplan (Abbildung 13, links) erstellen. Als nächster Schritt kann man die Flächenanteile des Gebietes der Fließzeit gegenüberstellen und erhält somit das Zeit-Flächen-Diagramm (Abbildung 13, rechts) des Einzugsgebietes. Jedes Einzugsgebiet erhält dadurch eine charakteristische Zeit-Abfluss-Beziehung, welche auch als Funktion formuliert werden kann.

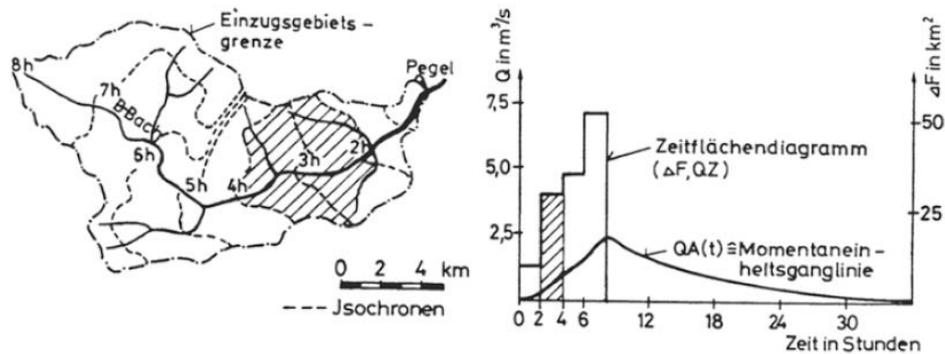


Abbildung 13: Isochronenplan (li.) und Zeit-Flächen-Diagramm (re.) eines Einzugsgebietes (Quelle: Maniak, 2016)

HEC-HMS verwendet eine vordefinierte Zeit-Flächen-Beziehung für das Clark UH Modell, welche durch folgende Funktion bestimmt ist:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{for } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{for } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (2)$$

mit

A_t	kumulierte, betrachtete Teilfläche zum Zeitpunkt t
A	Gesamtfläche des Einzugsgebietes
t_c	kritische Fließzeit

(Quelle: Feldman, 2000)

Diese Funktion stellt ein Einzugsgebiet mit einer Diamant-Form dar, bei dem sich gezeigt hat, dass es für die meisten typischen Einzugsgebiete gute Ergebnisse liefert (Scharffenberg, 2016). Alternativ dazu kann auch eine benutzerdefinierte Zeit-Flächen-Beziehung in das Programm eingegeben werden, um z.B. Einzugsgebiete mit besonders langgestreckten oder anderen unüblichen Formen zu simulieren. Für die Berechnung mit HEC-HMS ist nur die Eingabe der (Teil-)Flächen und kritischen Fließzeiten nötig, um eine Ganglinie zu berechnen.

Die Dämpfung der Abfluss-Welle wird im Clark UH Modell mit einem linearen Speicher simuliert, welcher am Gebietsauslass des Einzugsgebietes angeordnet ist. Bei linearen Speichern ist der Ausfluss proportional zum Speicherinhalt und kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$S = k * Q_a \quad (3)$$

Hierbei ist S der Speicherinhalt, k die Speicherkonstante und Q_a der Ausfluss aus dem Speicher (Wittenberg, 2011). Mit diesem Speicher wird die Gebietsretention simuliert. In HEC-HMS muss dafür die Speicherkonstante k definiert werden.

Für die „Seeniederschlag“-subbasin-Elemente wurde keine Transformationsfunktion gewählt, wodurch der Niederschlag, wie in der Realität, eins zu eins in den See übergeht.

3.2.5 Basisabflussfunktion

Für die Modellierung des Basisabflusses der Teileinzugsgebiete wurde die im Programm enthaltene „Recession Model“ Funktion ausgewählt. Diese eignet sich speziell für die ereignisbezogene Modellierung, wenn der Durchfluss im Gewässer nach einer Hochwasserwelle exponentiell abnimmt (Scharffenberg, 2016). Die für diese Methode zu definierenden Parameter sind der anfängliche Durchfluss, eine Rezessionskonstante und eine Reset-Bedingung in Form des Verhältnisses von Durchfluss im abfallenden Ast der Abflusswelle zum Spitzendurchfluss. Mit der Reset-Bedingung wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt der Basisabfluss aufgrund der Hochwasserspitze wieder steigen soll. Dies tritt ein, wenn der abfallende Ast der Welle das definierte Verhältnis von Durchfluss zu Abflussspitze erreicht hat. Somit wird ermöglicht, dass auch mehrere Abflussspitzen simuliert werden können und dabei der Basisabfluss nicht zu klein wird (siehe dazu auch Abbildung 14). Durch diese Vorgehensweise wird bei

diesem Modell die Massenerhaltung im Einzugsgebiet nicht eingehalten (Scharffenberg, 2016). Die Rezessionskonstante ist definiert als Verhältnis des aktuellen Basisabflusses zum Basisabfluss von vor einem Tag. Als Funktion lässt sich das Recession Model wie folgt definieren:

$$Q_t = Q_0 * k^t \quad (4)$$

mit

Q_0 anfänglicher Durchfluss zum Zeitpunkt $t=0$

k exponentielle Rezessionskonstante

(Quelle: Feldman, 2000)

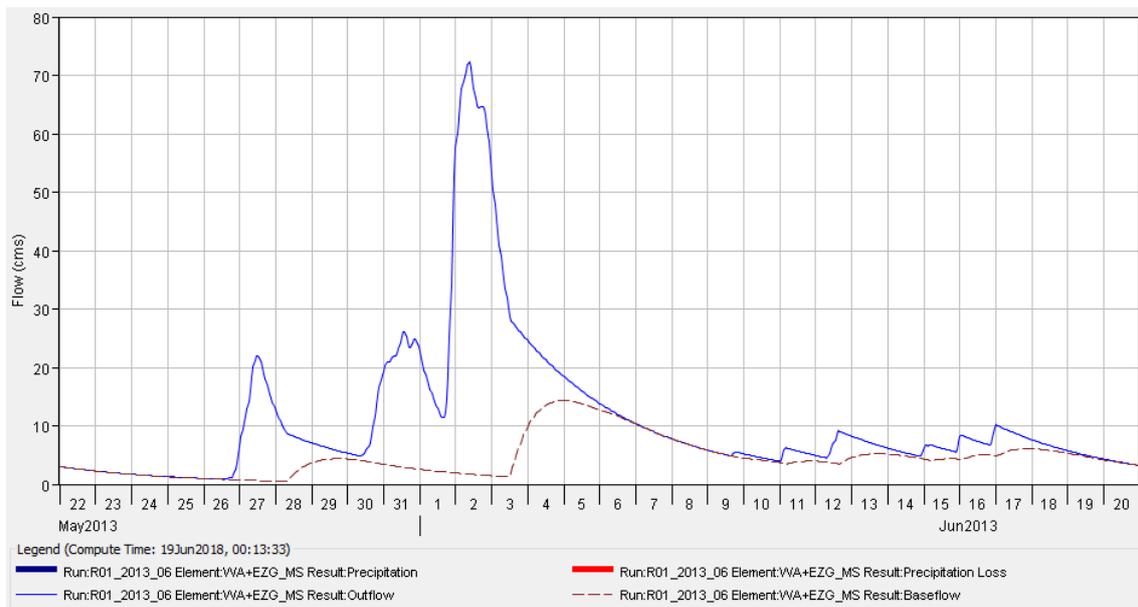


Abbildung 14: Veranschaulichung der Reset-Bedingung des Basisabflusses im Verhältnis zur Abflussspitze anhand eines Simulations-Runs mit dem Recession-Basisabflussmodell in HEC-HMS

3.2.6 Speicherfunktion der Seespeicher

Im Einzugsgebiet befinden sich mit dem Irrsee, Fuschlsee und Mondsee drei Seen, die eine Speicherfunktion im hydrologischen System ausüben. Um die Speicher zu modellieren, wurde je See eine Wasserstands-Oberflächen-Abfluss Beziehung definiert, wobei der Wasserstand als Anfangsbedingung dient. Der Wasserstand in den Speichern wird dabei immer als horizontal angenommen. Daraus lässt sich eine Speicher-Abfluss-Funktion ableiten, mit der HEC-HMS den Abfluss aus dem Speicher berechnet.

In Abbildung 15 sind die Schritte zur Berechnung der Speicheränderung und der Abflusskurve der Speicher dargestellt. Dafür müssen eine Wasserstands-Oberflächen-Funktion und eine Wasserstands-Abfluss-Funktion definiert werden. Daraus kann wiederum eine Wasserstands-Speicher-Funktion abgeleitet werden und als letzter Schritt die benötigte Speicher-Abfluss-Funktion. Als Randbedingung muss der Seewasserstand zu Beginn der Simulation angegeben werden.

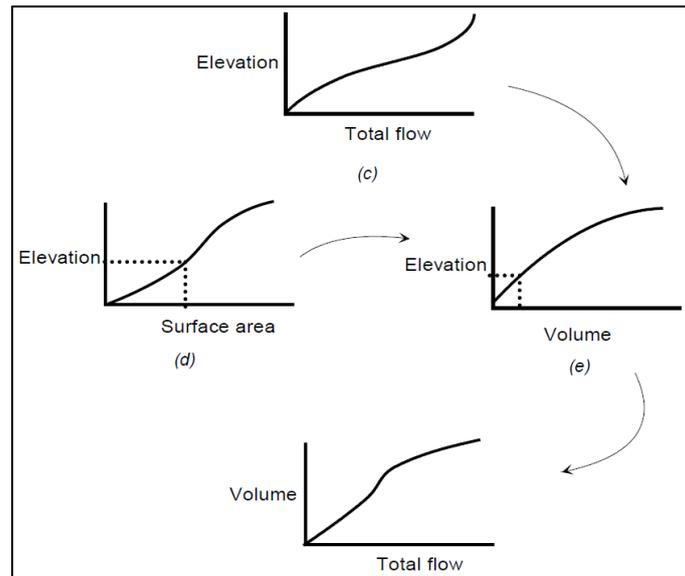


Abbildung 15: Illustration der Berechnungsschritte für die Speicher-Abfluss-Funktion in HEC-HMS (Quelle: Feldman, 2000)

3.2.7 Zeitliche Dimension des N-A-Modells

Das vorliegende N-A-Modell wird für einzelne Hochwasserereignisse mit einer Dauer von mehreren Tagen bis wenigen Wochen erstellt. Es kann somit als event-basiertes Modell kategorisiert werden. Eine kontinuierliche Simulation über längere Zeiträume wäre mit dem HEC-HMS-Modell zwar theoretisch möglich, jedoch würde die Genauigkeit des Modells in den gefragten Zeiträumen mit Hochwässern darunter leiden, da die Modellparameter in diesem Fall auch durch trockene Perioden beeinflusst wären.

3.2.8 im Modell nicht berücksichtigte Faktoren

Aufgrund der Absicht, ein möglichst einfaches N-A-Modell für das Einzugsgebiet zu erstellen und der relativ geringen Auswirkungen mancher Faktoren auf die Ergebnisse, wurde darauf verzichtet, alle Faktoren zu definieren und in das Modell mit aufzunehmen. In der folgenden Aufzählung sind die betroffenen Teil-Modelle aufgelistet.

- Da nur einzelne Hochwasserereignisse mit kurzen Zeitspannen von mehreren Tagen bis wenigen Wochen betrachtet werden, wurden Strahlung und Evapotranspiration im Modell nicht berücksichtigt.
- Aufgrund der kurzen durchgehenden Fließstrecken im Einzugsgebiet und der allgemeinen Betrachtung der Gebietsretention im linearen Speichermodell des Clark UH Verfahrens, wurde kein Modell für die fließende Retention festgelegt.
- Der Interzeptionsspeicher des Einzugsgebietes, welcher größtenteils durch die Vegetation gebildet wird, wird nicht über das verfügbare Überdeckungs-Modul von HEC-HMS berücksichtigt, sondern über die Anfangsverluste bei der Ermittlung des effektiven Niederschlages.
- Schneespeicher bzw. -schmelze müssen im Modell nicht berücksichtigt werden, da nur Hochwasserereignisse zwischen Mai und Oktober (siehe Kapitel 4.1.1) für Kalibrierung, Validierung und Simulation verwendet werden.

3.3 Parameteroptimierungsverfahren

Alle im N-A-Modell verwendeten Berechnungsmethoden haben Parameter, die die Simulationsergebnisse beeinflussen. Das Ziel bei der Erstellung eines Modells ist, dass die Parameter

der einzelnen Berechnungsmethoden möglichst so eingestellt werden, dass die simulierten Werte bestmöglich mit den beobachteten Werten übereinstimmen.

Viele Parameter, wie z.B. die Konzentrationszeit t_c beim Clark-UH-Verfahren (siehe Kapitel 3.2.4), können zu Beginn bereits über verschiedene Eigenschaften des Einzugsgebietes abgeschätzt werden. Andere Parameter hingegen, wie z.B. die Rezessionskonstante k bei der Berechnung des Basisabflusses (siehe Kapitel 3.2.5), können nicht so einfach bestimmt werden. Sowohl die vorab abschätzbaren, aber vor allem auch die nicht abschätzbaren Parameter müssen daher mittels einer Parameteroptimierung oder auch Kalibrierung eingestellt werden.

Um die gesuchten Parameter optimieren zu können, muss das Modell zuerst mit einem vorab gewählten Set an Parametern einen Simulations-Run durchführen. Anhand dieser ersten Berechnung können nun die simulierten mit den beobachteten Ergebnissen verglichen werden (z.B. simulierte und beobachtete Ganglinien). Mit Hilfe von Zielfunktionen kann festgestellt werden, wie gut die gewählten Parameter den Ist-Systemzustand abbilden. Wenn die Anpassung des Modells an die beobachteten Werte nicht zufriedenstellend ist, werden die Parameter verändert und die Simulation ein weiteres Mal durchgeführt, bis die simulierten und beobachteten Ergebnisse bestmöglich übereinstimmen. Diesen iterativen Prozess manuell durchzuführen, wäre extrem zeitaufwändig und aus diesem Grund wird dabei auf die im Programm HEC-HMS implementierte automatische Parameteroptimierung zurückgegriffen, welche in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben wird. (Feldman, 2000)

3.3.1 Optimierungsverfahren, Zielfunktionen und Gütemaße in HEC-HMS

Um die Anpassungsgüte einer Simulation an den beobachteten Werten zu bestimmen, können verschiedene Zielfunktionen verwendet werden. Auch bei der automatischen Parameteroptimierung werden diese Zielfunktionen verwendet, welche im Laufe des iterativen Prozesses der Parameteranpassung optimiert werden sollen. HEC-HMS kennt für die automatische Parameteroptimierung mehrere Zielfunktionen, auf die man zurückgreifen kann, wobei immer nur jeweils eine davon verwendet werden soll. Für die Kalibrierung der Parameter in dieser Arbeit wurde als Zielfunktion die Peak-weighted root mean square error objective function (Peak-RMS) verwendet. Hierbei werden alle Abweichungen quadriert und nach ihrer Magnitude gewichtet, wobei der größte Wert die größte Gewichtung bekommt. Zusammengefasst bedeutet das, dass Abweichungen im hohen Abflussbereich stärker als im niedrigen Abflussbereich gewichtet werden (Feldman, 2000).

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \left(\frac{q_o(i) + q_o(mean)}{2q_o(mean)} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

mit

Z	Zielfunktion
NQ	Anzahl berechneter Ganglinien-Werte
q_o	beobachteter Abfluss
q_s	berechneter Abfluss

(Quelle: Feldman, 2000)

Im Falle der Peak-RMS-Zielfunktion soll der Betrag der Funktion minimiert werden. Die Minimierung der Zielfunktion mit den Iterationsschritten ist in folgender Abbildung sichtbar:

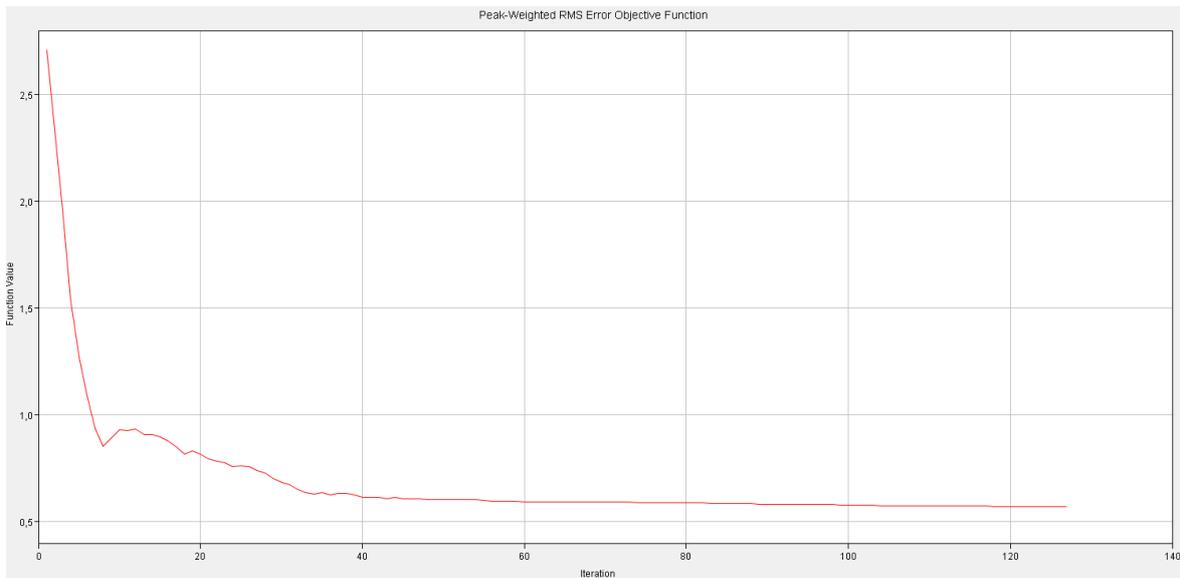


Abbildung 16: Darstellung des Betrages der Zielfunktion Peak-RMS gegenüber den Iterationsschritten in der automatischen Parameteroptimierung anhand des Hochwasserereignisses vom Juni 2013 am Pegel Fuschler Ache

Für die Optimierung der Zielfunktion müssen Abbruchkriterien definiert werden. Dies sind die maximale Anzahl der Iterationen und ein Minimum der Änderung der Ergebnisse zwischen zwei aufeinanderfolgenden Berechnungsschritten (Toleranz). Am Beispiel in Abbildung 16 wurde das Toleranz-Abbruchkriterium nach ca. 125 Iterationen erreicht.

Außerdem muss bei der automatischen Kalibrierung der Zeitraum eingestellt werden, in welchem die Zielfunktion angewendet werden soll, wie in folgender Abbildung zu sehen ist:

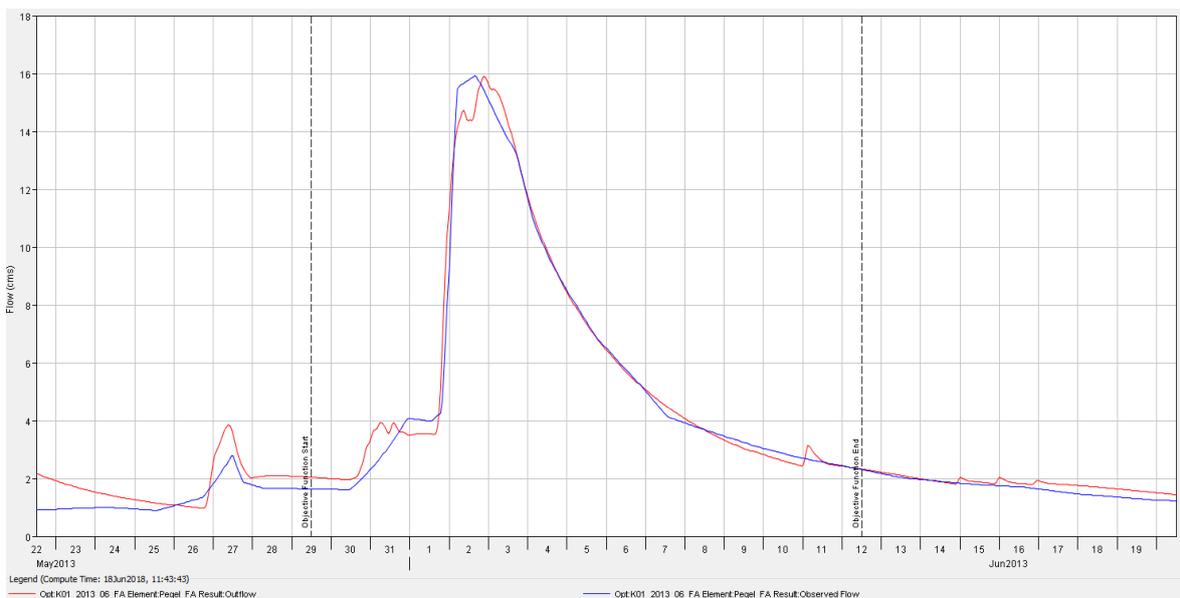


Abbildung 17: beobachtete (rot) und mit optimierten Parametern berechnete (blau) Ganglinie am Pegel Fuschler Ache im Juni 2013 innerhalb des Optimierungszeitraumes

Durch die Wahl des Peak-RMS als Zielfunktion sollen die Abflussspitzen der Hochwasserwellen möglichst gut simuliert werden. Deshalb wurde der Optimierungszeitraum vornehmlich auf die Hochwasserwellen beschränkt.

3.3.1.1 Nelder-Mead-Algorithmus

Während des Iterationsprozesses zur Bestimmung der optimalen Parameter werden die Werte automatisch verändert. Diese Änderung soll bewirken, dass beim nächsten Iterationsschritt bessere Ergebnisse als beim vorherigen erzielt werden können. Für die Suche nach den Parametern für den nächsten Iterationsschritt wird im vorliegenden Modell der Nelder and Mead Such-Algorithmus (Nelder & Mead, 1965) verwendet. Mit diesem Verfahren können mehrere Parameter zur gleichen Zeit optimiert werden, wobei bei der Suche nach den optimalen Parameterwerten nicht auf abgeleitete Größen aus der Zielfunktion zurückgegriffen wird. Der Algorithmus wählt die geschätzten Parameter anhand von Ergebnissen von vorherigen Iterationsschritten und identifiziert dabei gute, sowie schlechte Schätzungen und generiert bessere Schätzungen aus dem Muster der guten Ergebnisse (Feldman, 2000).

Wie bereits erwähnt müssen für die Parameteroptimierung mit dem Nelder-Mead-Verfahren Abbruchkriterien für die Iteration angegeben werden. Dies ist einerseits der Betrag der Änderung der Ergebnisse von einem Iterationsschritt zum nächsten und andererseits die maximale Anzahl der Iterationen. Außerdem können für jeden Parameter separat ein Startwert für den Suchalgorithmus und eine obere und untere Grenze für den gesuchten Wert angegeben werden.

3.3.1.2 Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE)

Für die Validierung der Simulationsergebnisse wurde als Gütemaß die Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) herangezogen. Diese wurde von Nash & Sutcliffe (1970) entwickelt und dient zur Bestimmung der Modellgüte von hydrologischen Modellen. Die NSE setzt die Varianz der Residuen zwischen beobachteten und berechneten Werten in das Verhältnis mit der Varianz der beobachteten Daten.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} \quad (6)$$

wobei

$$-\infty \leq NSE \leq 1$$

mit

obs_i beobachteter Wert i

sim_i berechneter Wert i

\overline{obs} arithmetischer Mittelwert der beobachteten Werte

Ein Ergebnis von $NSE = 1$ beschreibt eine perfekte Übereinstimmung des Modells mit den beobachteten Daten. $NSE = 0$ heißt, dass das Modell so gut ist, wie der Mittelwert der Beobachtungen. Ein Modell, dessen Ergebnisse schlechter sind als der Mittelwert der beobachteten Daten hat eine $NSE < 0$.

In Bezug auf die Fragestellung nach einer hinreichenden Qualität der Simulation des Seewasserstandes des Mondsees wird eine $NSE > 0,7$ als hinreichend gutes Ergebnis festgelegt. Die NSE-Ergebnisse des vorliegenden N-A-Modells werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

4 Anwendung und Ergebnisse

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, wird das N-A-Modell in dieser Arbeit für drei Anwendungsfälle genutzt. In den folgenden Kapiteln 4.1–4.3 werden diese genauer erläutert und deren Resultate festgehalten.

4.1 Simulation des Ist-Zustandes

Das erste Ziel der Arbeit ist es, den derzeitigen Systemzustand des Einzugsgebiets des Mondsees mit einem N-A-Modell simulieren zu können. Dafür muss dem Modell anhand von beobachteten Hochwasserereignissen beigebracht werden, wie es die Inputdaten in brauchbare Ergebnisse umwandeln soll – dies geschieht bei der Kalibrierung des Modells. In einem weiteren Schritt wird die Modellgüte an weiteren, unabhängigen Hochwasserereignissen im Rahmen der Validierung festgestellt.

Welche Hochwasserereignisse für die Kalibrierung und Validierung verwendet wurden und deren Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

4.1.1 Simulationsereignisse

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells werden beobachtete Hochwasserwellen benötigt, um die Parameter der hydrologischen Modelle anpassen und verifizieren zu können. Hierfür wurden aus der Zeitreihe des Wasserstandes des Mondsees die größten Hochwasserereignisse entnommen, die jedoch auch bestimmte Kriterien erfüllen mussten.

Da das erstellte Modell keinen Schneespeicher bzw. Schneeschmelze berücksichtigt, dürfen diese Faktoren die Simulationsereignisse nicht beeinflussen. Um dies auszuschließen, wurden nur Hochwasserereignisse im Zeitraum von Ende Mai bis Ende September ausgewählt.

Außerdem sollen alle Wasserstands-, Durchfluss- und Niederschlagsmessstationen im Zeitraum des Ereignisses keine Messlücken oder -fehler aufweisen. Vor allem die stündlich aufzeichnenden Niederschlagsmessstellen spielen eine wichtige Rolle für die Qualität der Regionalisierung des Niederschlags mit der inversen Distanzgewichtungsmethode (siehe Kapitel 3.2.2.1).

Insgesamt wurden 12 Hochwasserereignisse ausgewählt, wovon 6 für die Kalibrierung und 5 für die Validierung des Modells verwendet wurden, ein Ereignis ist aufgrund der lückenhaften Niederschlagsstationsdaten nicht für die Kalibrierung bzw. Validierung geeignet (Nowcasting-Niederschlagsdaten sind vorhanden; siehe Tabelle 7 und Abbildung 18).

Das größte beobachtete Hochwasserereignis ist jenes im Jahr 2013. Der Wasserstand des Fuschlsees erreichte eine Jährlichkeit von >100 Jahren und der des Mondsees eine Jährlichkeit von 30 Jahren. Am Durchflusspegel der Seeache wurde ein neuer Spitzenwert aufgezeichnet mit einer Jährlichkeit von 25 Jahren (Aufzeichnungen seit 1977) (BMLFUW, 2013).

Anwendung und Ergebnisse

Tabelle 7: für die Kalibrierung und Validierung des N-A-Modells gewählte Hochwasserereignisse (nach Größe geordnet)

Simulations-Run	Datum von	Datum bis	Kalibrierung / Validierung	max. Seewasserstand – Pegel See am Mondsee [m.ü.A.]
R01_2013_06	22.05.2013	20.06.2013	Kalibrierung	482,23
R02_1991_07	15.07.1991	20.08.1991	Kalibrierung	482,02
R03_2002_08	05.08.2002	21.08.2002	Validierung	481,73
R04_1981_07	16.07.1981	09.08.1981	Validierung	481,63
R05_1985_08	04.08.1985	16.08.1985	Kalibrierung	481,62
R08_2009_06*	18.06.2009	06.07.2009	–	481,51
R09_2007_09	03.09.2007	18.09.2007	Validierung	481,48
R10_2010_06	30.05.2010	12.06.2010	Kalibrierung	481,45
R11_1995_09	27.08.1995	13.09.1995	Kalibrierung	481,38
R13_1997_07	04.07.1997	14.07.1997	Validierung	481,35
R14_1977_08	30.07.1977	11.08.1977	Kalibrierung	481,28
R15_1979_06	16.06.1979	27.06.1979	Validierung	481,27

*...nur INCA-Niederschlagsdaten verfügbar

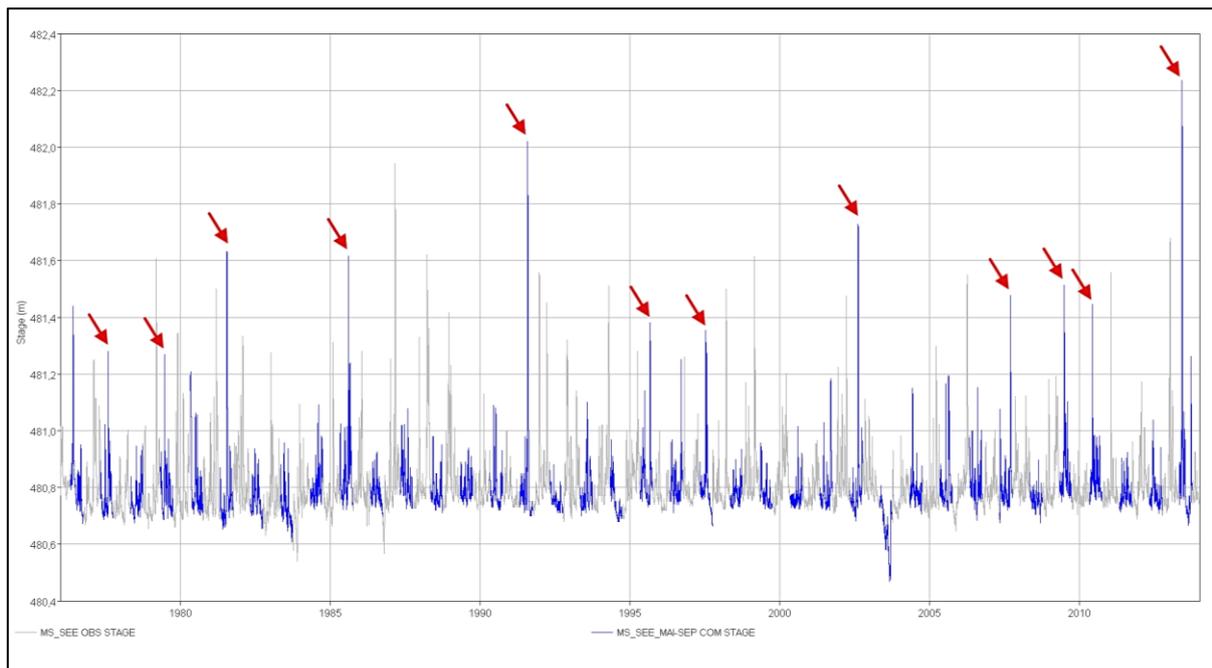


Abbildung 18: gewählte Simulationsereignisse in der Zeitreihe des Wasserstandspegels "See am Mondsee"; bedingt durch Modellaufbau mögliche Zeiträume Mai-September in **Blau**

4.1.2 Kalibrierung des Modells

Die Parameteroptimierung bzw. Kalibrierung des Modells wurde in erster Linie mit Hilfe von in der Software implementierten, automatischen Optimierungsläufen durchgeführt. Weiters wurden die Parameter einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und teilweise manuell nachadjustiert.

Für die Kalibrierung wurden ausschließlich die Niederschlagsdaten der Messstationen mit der Inversen Distanzgewichtung als Regionalisierungsmethode verwendet. Aufgrund der zu kurzen Zeitreihe der INCA-Nowcastingdaten als Niederschlagsinput, werden diese hierfür nicht

Anwendung und Ergebnisse

Aufgrund der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei der Kalibrierung des Teileinzugsgebietes Wangauer Ache über den Pegel SA wurden auch hier die oberhalb des Pegels SA liegenden Elemente für die Kalibrierung deaktiviert und die beobachteten Abflusswerte an den Pegeln GA und ZA verwendet.

An jedem Pegel werden zwei Durchläufe der automatischen Optimierung durchgeführt. Der Grund dafür ist die teilweise große Anzahl an Parametern, welche in einem Lauf optimiert werden soll. Zum Beispiel werden am Pegel ZA im ersten Durchlauf 14 Parameter optimiert. Um stabilere Ergebnisse zu erhalten, werden die Parameter, an denen bereits nach dem ersten Durchlauf eine gute Übereinstimmung an den jeweiligen Ereignissen gegeben ist, im zweiten Durchlauf fixiert (rot markierte Werte in Abbildung 20). Diese Übereinstimmung wird über den Variationskoeffizienten der Ergebnisse aller Ereignisse je Parameter bestimmt. Mit dieser Vorgehensweise werden im zweiten Durchlauf der Optimierung am Pegel ZA (Abbildung 20) 7 der 14 Parameter fixiert (d.h. sie werden im aktuellen Optimierungslauf nicht verändert) und die verbleibenden 7 Parameter optimiert.

Kalibrierung - Pegel Zeller Ache													
	Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.			
1. Durchlauf													
ZEZG_ZS	HR	13,00	13,32	13,16	14,54	11,30	13,74	12,71	13,13	13,24	0,08		
ZEZG_ZS	HR	5,41	6,02	5,49	5,67	5,07	6,97	5,45	5,78	5,58	0,10		
ZEZG_ZS	MMHR	1,32	1,30	1,86	3,00	2,36	1,34	2,04	2,04	2,12	0,30		
ZEZG_ZS	MM	11,00	11,02	12,53	12,87	11,23	16,59	10,76	12,50	11,88	0,16		
ZEZG_ZA	HR	19,00	16,33	18,48	16,25	18,16	10,02	19,10	16,39	17,24	0,19		
ZEZG_ZA	HR	1,00	1,32	1,04	1,04	1,38	1,00	1,62	1,23	1,18	0,18		
ZEZG_ZA	MMHR	1,19	1,01	1,36	1,96	1,18	1,04	1,01	1,26	1,11	0,27		
ZEZG_ZA	MM	12,98	12,88	13,44	11,39	13,60	12,99	12,88	12,86	12,93	0,06		
ZEZG_ZS	M3/S	0,50	0,29	0,12	0,12	2,00	1,86	0,73	0,85	0,51	0,92		
ZEZG_ZS	Recession - Initial Discharge	0,80	0,89	0,90	0,68	0,83	0,64	0,73	0,78	0,78	0,13		
ZEZG_ZS	Recession - Recession Constant	0,50	0,29	0,63	0,80	0,19	0,22	0,45	0,43	0,37	0,52		
ZEZG_ZA	M3/S	1,00	1,13	2,00	1,47	2,20	1,41	0,50	1,45	1,44	0,38		
ZEZG_ZA	Recession - Ratio to Peak	0,80	0,75	0,80	0,20	0,30	0,81	0,78	0,61	0,77	0,42		
ZEZG_ZA	Recession - Recession Constant	0,50	0,10	0,22	0,86	0,89	0,72	0,11	0,48	0,47	0,72		
	Zielfunktion:		2,12	1,08	0,87	1,20	0,87	0,80	1,16				
2. Durchlauf													
ZEZG_ZS	HR	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	0,00		
ZEZG_ZS	HR	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	0,00		
ZEZG_ZS	MMHR	2,04	1,95	1,48	2,37	2,37	1,74	1,98	1,98	1,96	0,16		
ZEZG_ZS	MM	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	0,00		
ZEZG_ZA	HR	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	0,00		
ZEZG_ZA	HR	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	0,00		
ZEZG_ZA	MMHR	1,26	1,00	1,41	2,00	1,18	1,00	1,01	1,27	1,09	0,28		
ZEZG_ZA	MM	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	0,00		
ZEZG_ZS	M3/S	0,85	0,83	0,75	0,42	1,03	2,00	1,09	1,02	0,93	0,48		
ZEZG_ZS	Recession - Ratio to Peak	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,00		
ZEZG_ZS	Recession - Recession Constant	0,43	0,14	0,59	0,41	0,40	0,59	0,75	0,48	0,50	0,40		
ZEZG_ZA	M3/S	1,45	1,24	0,86	1,69	2,17	1,62	0,74	1,39	1,43	0,36		
ZEZG_ZA	Recession - Ratio to Peak	0,61	0,29	0,29	0,29	0,21	0,45	0,39	0,31	0,29	0,27		
ZEZG_ZA	Recession - Recession Constant	0,48	0,90	0,41	0,81	0,90	0,90	0,10	0,67	0,85	0,46		
	Zielfunktion:		1,85	1,10	0,90	1,16	0,95	0,85	1,14				

Abbildung 20: Ergebnisse Optimierungsläufe Pegel Zeller Ache

Anwendung und Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibrierung an allen Pegeln sind im Anhang (Kapitel 9.1, Seite 51) gesammelt.

Die Werte, die nun für das N-A-Modell gewählt werden, sind die Mittelwerte je Parameter aus allen Hochwasserereignissen. Damit soll eine Anwendbarkeit für Hochwässer verschiedener Größe gewährleistet sein. In den folgenden Tabellen sind die gesammelten Ergebnisse aufgelistet.

Tabelle 9: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels FA

Pegel FA – optimierte Parameterwerte			
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	5,69
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	21,68
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	6,49
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	1,76
ZEZG_FA	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,13
ZEZG_FA	Recession - Ratio to Peak		0,30
ZEZG_FA	Recession - Recession Constant		0,52
EZG_FS	Recession - Initial Discharge	M3/S	0,32
EZG_FS	Recession - Ratio to Peak		0,46
EZG_FS	Recession - Recession Constant		0,48

Tabelle 10: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels GA

Pegel GA – optimierte Parameterwerte			
ZEZG_FA+GA	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	7,83
ZEZG_FA+GA	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	10,15
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,16
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Initial Loss	MM	11,94
ZEZG_FA+GA	Recession - Initial Discharge	M3/S	8,23
ZEZG_FA+GA	Recession - Ratio to Peak		0,08
ZEZG_FA+GA	Recession - Recession Constant		0,95

Ergebnisse von 1. Durchlauf gewählt, da durchwegs bessere Ergebnisse.

Anwendung und Ergebnisse

Tabella 11: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels ZA

Pegel ZA – optimierte Parameterwerte			
EZG_ZS	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	13,13
EZG_ZS	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	5,78
EZG_ZS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,98
EZG_ZS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,50
ZEZG_ZA	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	16,39
ZEZG_ZA	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	1,23
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,27
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,86
EZG_ZS	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,02
EZG_ZS	Recession - Ratio to Peak		0,78
EZG_ZS	Recession - Recession Constant		0,48
ZEZG_ZA	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,39
ZEZG_ZA	Recession - Ratio to Peak		0,31
ZEZG_ZA	Recession - Recession Constant		0,67

Tabella 12: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels SA

Pegel SA – optimierte Parameterwerte			
WA+EZG_MS	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	19,04
WA+EZG_MS	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	2,59
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	0,80
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,35
WA+EZG_MS	Recession - Initial Discharge	M3/S	3,00
WA+EZG_MS	Recession - Ratio to Peak		0,39
WA+EZG_MS	Recession - Recession Constant		0,75

4.1.2.2 Optimierung Seespeicher

Die Optimierung der Wasserstands-Oberflächen-Abfluss-Beziehung der drei Seespeicher im Modell gestaltet sich aufgrund der fehlenden Möglichkeit einer automatisierten Anpassung mit HEC-HMS schwierig bzw. zeitaufwändig.

Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung (h-Q-Beziehung) des Mondsees ist durch die Wehrbetriebsordnung relativ genau vorgegeben und kann auch durch den in geringer Distanz flussabwärts gelegenen Pegel Seeache (SA) überprüft werden. Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, wird der durch die Wehrbetriebsordnung vorgegebene Abfluss am Auslasswehr sehr gut eingehalten. Die Korrelation zwischen der Wehrbetriebsordnung und den gemessenen Werten an den Pegeln See am Mondsee (Wasserstand Mondsee) und See am Mondsee (Durchfluss Seeache) beträgt 0,98 für die Wasserstände zwischen 480,5 und 482,0.

Anwendung und Ergebnisse

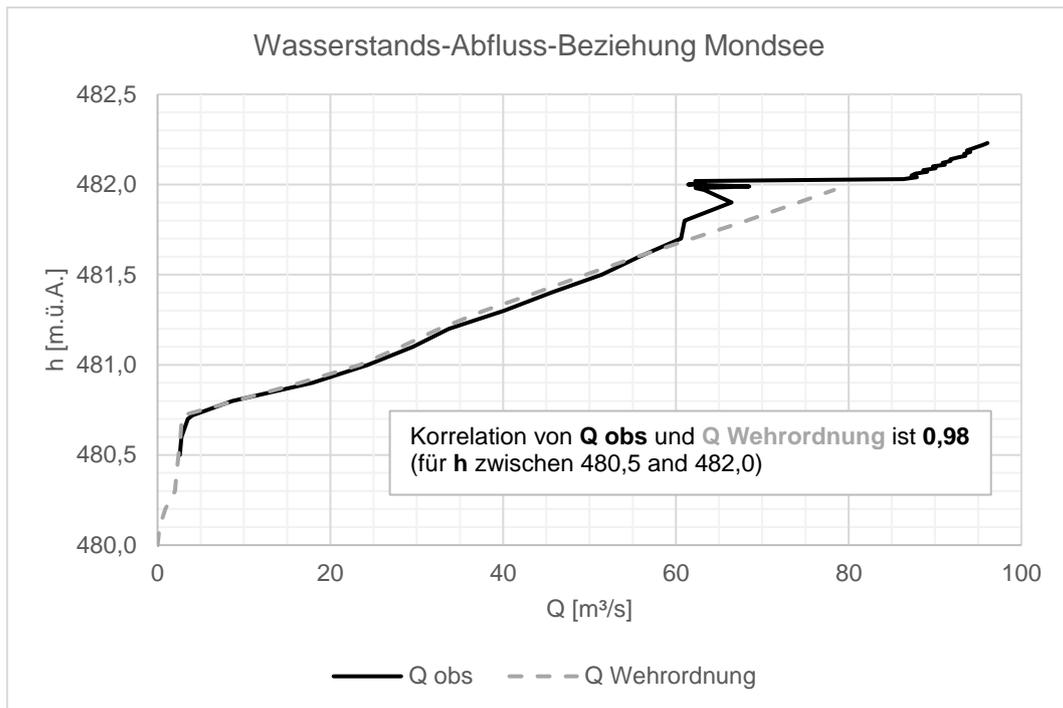


Abbildung 21: Wasserstand-Abfluss-Beziehung Mondsee – Vergleich Wehrordnung und beobachtete Werte

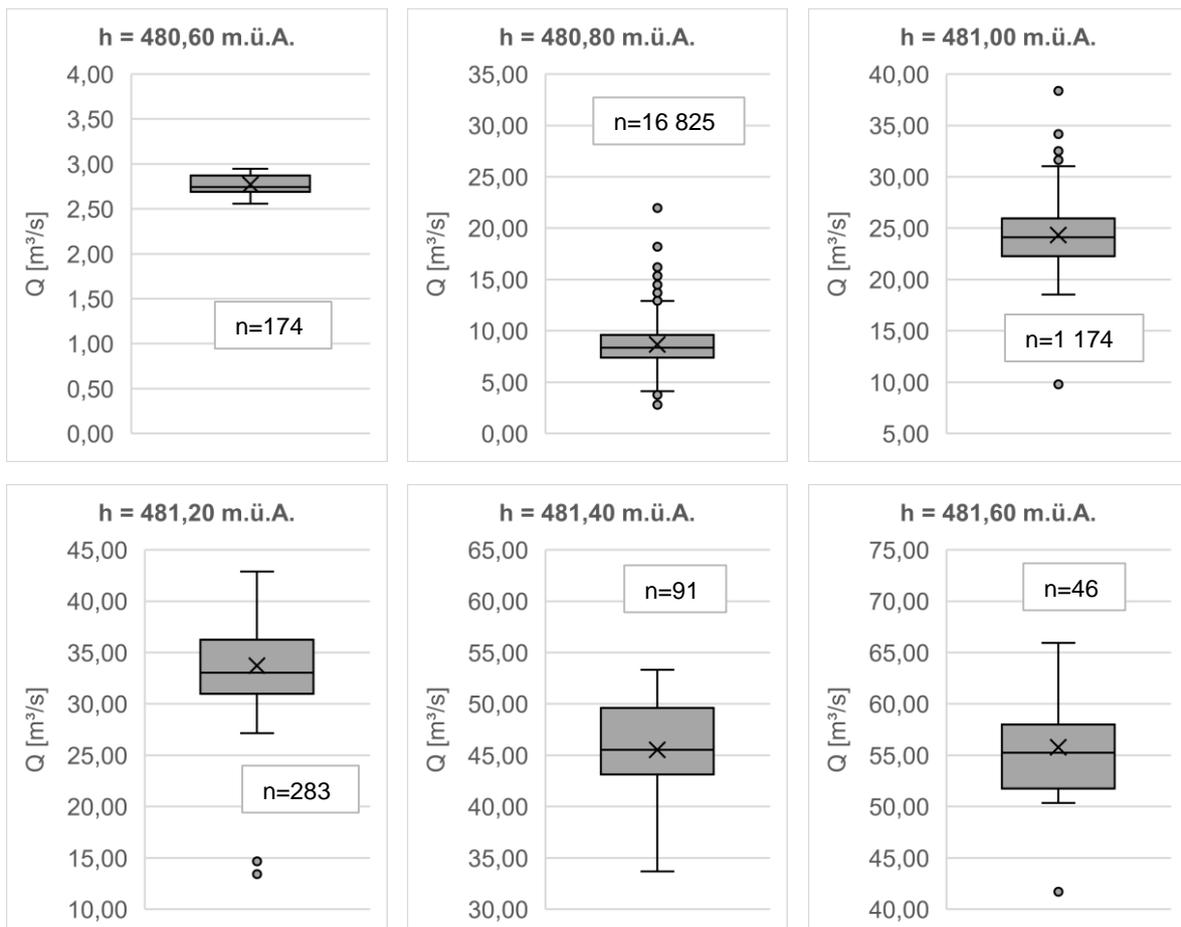


Abbildung 22: Boxplots der gemittelten Abflusswerte am Abflusspegel Seeache für sechs ausgewählte Wasserstände am Wasserstandspegel "See am Mondsee" (man beachte die unterschiedliche Skalierung der Q-Achse)

Anwendung und Ergebnisse

Für die Ermittlung der beobachteten Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Mondsees wurden aus den Zeitreihendaten des Wasserstandspegels „See am Mondsee“ und des Abflusspegels der Seeache die jeweiligen Abflusswerte den zeitlich zugehörigen Wasserstandswerten zugeordnet. Die in Abbildung 21 dargestellten Qobs-Werte sind die Mittelwerte der Abflüsse beim jeweiligen Wasserstand. Die Mittelwerte wurden für die Wasserstände von 480,50 bis 482,00 m.ü.A. in 0,01 m-Schritten berechnet. Hierbei ist anzumerken, dass ab einem Wasserstand von ca. 481,65 m.ü.A. nur wenige Dateneinträge pro 0,01 m-Schritt ($n < 15$) vorhanden sind, was eine verlässliche Aussage zur Wasserstands-Abfluss-Beziehung im hohen Abflussbereich deutlich erschwert. Dies wird auch im oberen Bereich der Qobs-Funktion, welcher Ausreißer und relativ starke Schwankungen aufweist, ersichtlich.

Um die Genauigkeit der soeben beschriebenen Mittelung der Abflüsse einschätzen zu können, sind in Abbildung 22 Boxplots von Durchflussdaten am Pegel Seeache bei sechs beispielhaften Wasserständen am Wasserstandspegel „See am Mondsee“ dargestellt.

Für die h-Q-Funktion des Mondsees, welche im N-A-Modell zur Anwendung kommt, wurden die durch die oben beschriebene Mittelung gewonnen Werte von den Ausreißern bereinigt und manuell nachjustiert. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung ersichtlich:

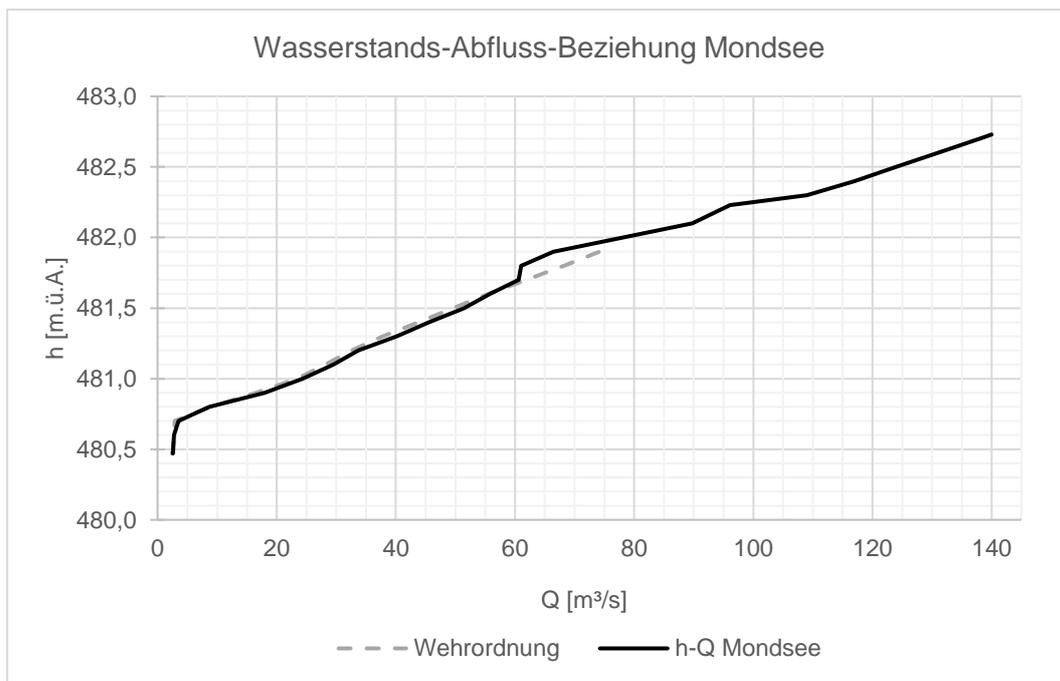


Abbildung 23: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Mondsee

Die Ausflüsse aus dem Irrsee und dem Fuschlsee werden nicht durch ein Wehr beeinflusst, was eine vergleichbare Bestimmung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung, wie beim Mondsee, verhindert. Zur Optimierung der Beziehungen dienen als Anhaltspunkte die Durchflusspegel an der Fuschler Ache und Zeller Ache in Kombination mit den Seewasserständen.

Anwendung und Ergebnisse

Die h-Q-Funktion des Fuschlsees wurde in ähnlicher Art und Weise wie jene des Mondsees ermittelt. Die Durchflusswerte am Pegel Fuschler Ache wurden den zeitlich zugehörigen Wasserstandswerten des Pegels am Fuschlsee zugeordnet und für 0,01 m-Schritte des Wasserstandes gemittelt. Dies ergab eine Beziehung, welche durch eine logarithmische Funktion ausgedrückt wurde und durch die Zwischenergebnisse der Kalibrierung mittels Trial-and-Error-Vorgangsweise weiter angepasst wurde. Die verwendete Funktion ist in Abbildung 24 dargestellt.

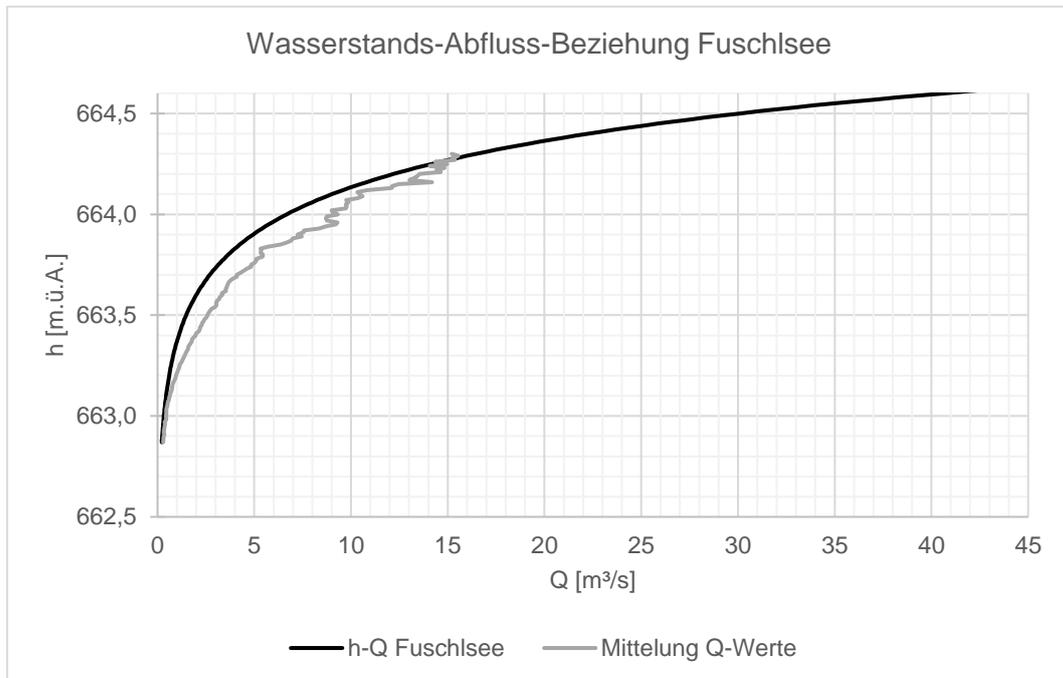


Abbildung 24: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Fuschlsee

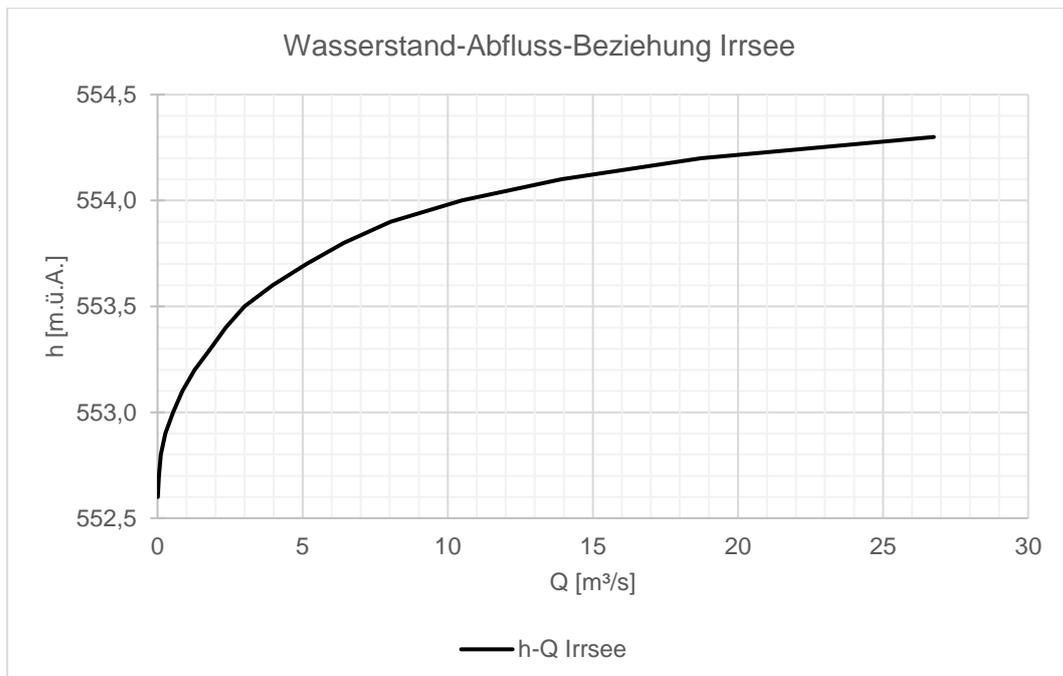


Abbildung 25: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Irrsee

Für die Ermittlung der h-Q-Funktion des Irrsees wurde ebenso eine logarithmische Funktion gewählt, die jedoch nicht auf den Messungen am Durchflusspegel Zeller Ache beruht, da dieser bereits relativ weit flussabwärts des Seeauslasses liegt. Aufgrund dieser Tatsache ist eine zeitliche Zuordnung der Wasserstands- und Durchflussdaten nicht möglich (Fließzeiten vom Auslass zum Pegel unbekannt). Außerdem ist der Durchflusspegel durch das Zwischeneinzugsgebiet vom Seeauslass bis zum Pegel beeinflusst. Die Ermittlung der Funktion erfolgte somit aus einem iterativen Prozess, bei dem eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messdaten am Durchflusspegel Zeller Ache das Ziel war.

Für die Wasserstands-Oberflächen-Beziehung wird konstant die mittlere Wasserfläche der Seen angenommen (siehe dazu Tabelle 3, Seite 8).

4.1.3 Validierung des Modells

Die Überprüfung der Güte der Simulationsergebnisse, also die Validierung, wird einerseits anhand der Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) an den beobachteten Abfluss- bzw. Wasserstandspegeln durchgeführt und andererseits am absoluten Höhenunterschied des simulierten und beobachteten Wasserstandes des Mondsees.

Für die Ermittlung der NSE werden die in Tabelle 7 angeführten Hochwasserereignisse mit den in der Kalibrierung ermittelten Parameterwerten und den Stations- bzw. Nowcasting-Niederschlagsdaten mit dem N-A-Modell durchgerechnet. In den folgenden Tabellen sind die NSEs der Simulationsergebnisse an den Abflusspegeln und am Wasserstandspegel Mondsee aufgelistet.

Tabelle 13: Ergebnisse Validierung Abflusspegel mit Stationsdaten als Input (HW-Ereignisse nach Größe geordnet; für Kalibrierung verwendete HW-Ereignisse in grau)

Validierung Q-Pegel – NSE					
Ereignis / Pegel	FA	GA	ZA	SA	Mittel
2013_06 (Kalibrierung)	0,95	0,85	0,61	0,91	0,83
1991_07 (Kalibrierung)	0,82	0,68	0,80	0,76	0,76
2002_08	0,55	0,81	0,84	0,75	0,74
1981_07	0,64	0,89	0,29	0,96	0,70
1985_08 (Kalibrierung)	0,73	0,84	0,68	0,88	0,78
2007_09	-0,30	0,78	0,23	0,83	0,38
2010_06 (Kalibrierung)	0,35	0,65	0,22	0,76	0,49
1995_09 (Kalibrierung)	-0,64	0,87	-0,07	0,92	0,27
1997_07	-0,49	0,51	0,75	0,86	0,41
1977_08 (Kalibrierung)	0,13	0,67	0,55	0,92	0,57
1979_06	-0,07	0,73	0,68	0,67	0,50
Mittel Validierung (exkl. Kalibrierung)	0,06	0,74	0,56	0,81	0,54

Anwendung und Ergebnisse

Tabelle 14: Ergebnisse Validierung Abflusspegel mit INCA-Nowcastingdaten als Input (HW-Ereignisse nach Größe geordnet)

Validierung Q-Pegel (INCA-Input) – NSE					
Ereignis / Pegel	FA	GA	ZA	SA	Mittel
2013_06_INCA (Kalibrierung)	0,65	0,77	0,64	0,88	0,74
2009_06_INCA	0,33	0,69	0,69	0,90	0,65
2007_09_INCA	0,25	0,83	0,30	0,86	0,56
2010_06_INCA (Kalibrierung)	0,72	0,71	0,71	0,85	0,75
Mittel (Vali. + Kali)	0,49	0,75	0,59	0,87	0,67

INCA Nowcastingdaten als Input

In den obigen Tabellen lässt sich die Modellgüte der jeweiligen Teileinzugsgebiete (Spalten) und der Hochwasserereignisse (Zeilen) ablesen. Hierbei zeigt sich, dass die Pegel Seeache (SA) und Griesler Ache (GA) am besten vom Modell dargestellt werden können, der Pegel Zeller Ache (ZA) etwas schlechter und der Pegel Fuschler Ache (FA) nur knapp besser als der Mittelwert der Beobachtungen simuliert wird, wobei sich all diese Aussagen auf den Mittelwert über alle simulierten Hochwasserereignisse beziehen.

Anhand der NSE-Ergebnisse an den einzelnen Hochwasserereignissen lässt sich feststellen, dass die größeren Ereignisse an den Q-Pegeln besser getroffen werden, als die kleineren Ereignisse.

In Tabelle 14 wird ersichtlich, dass mit den INCA-Nowcastingdaten als Input bessere Ergebnisse erzielt werden konnten als mit den Niederschlags-Stationsdaten. Hierzu muss angemerkt werden, dass nur zwei der vier Hochwasserereignisse (2009_06_INCA; 2007_09_INCA) für die Validierung herangezogen werden können, da diese keinen Einfluss auf die Kalibrierung des Modells hatten.

In den folgenden Tabellen werden die Validierungsergebnisse am Wasserstandspegel Mondsee angeführt. Hier wird einerseits die Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) und andererseits die absolute Abweichung zwischen simuliertem und beobachtetem Wasserstand als Gütemaß herangezogen.

Anwendung und Ergebnisse

Tabelle 15: Validierung Wasserstandspegel Mondsee (MS) mit Stationsdaten als Input – Residuen Wasserstand; NSE (HW-Ereignisse nach Größe geordnet; für Kalibrierung verwendete HW-Ereignisse in grau)

Validierung W-Pegel Mondsee – ΔW ; NSE				
Ereignis	max. Abweichung positiv [m]	max. Abweichung negativ [m]	Abweichung Peak [m]	NSE
2013_06 (Kalibrierung)	0,09	-0,26	-0,19	0,97
1991_07 (Kalibrierung)	0,19	-0,33	-0,23	0,79
2002_08	0,30	0,00	0,20	0,38
1981_07	0,11	-0,09	-0,02	0,97
1985_08 (Kalibrierung)	0,09	-0,09	0,04	0,93
2007_09	0,06	-0,09	-0,06	0,96
2010_06 (Kalibrierung)	0,04	-0,28	-0,19	0,83
1995_09 (Kalibrierung)	0,06	-0,03	0,03	0,99
1997_07	0,12	-0,20	-0,14	0,84
1977_08 (Kalibrierung)	0,17	0,00	0,15	0,73
1979_06	0,08	0,00	0,04	0,92
Mittel Validierung (exkl. Kalibrierung)	0,13	-0,08	0,00	0,81

Tabelle 16: Validierung Wasserstandspegel Mondsee (MS) mit INCA-Nowcastingdaten als Input – Residuen Wasserstand; NSE (HW-Ereignisse nach Größe geordnet)

Validierung W-Pegel Mondsee (INCA-Input) – ΔW ; NSE				
Ereignis	max. Abweichung positiv [m]	max. Abweichung negativ [m]	Abweichung Peak [m]	NSE
2013_06_INCA (Kali.)	0,31	0,00	0,15	0,86
2009_06_INCA	0,20	-0,06	0,06	0,87
2007_09_INCA	0,07	-0,09	-0,02	0,97
2010_06_INCA (Kali.)	0,09	-0,13	-0,10	0,93
Mittel (Vali. + Kali.)	0,17	-0,07	0,02	0,91

Bis auf einen Ausreißer beim Hochwasserereignis 08/2002 werden für den Wasserstandspegel Mondsee (MS) durchwegs gute Ergebnisse für die NSE erzielt, welche über 0,80 liegen. Außerdem ist der Unterschied zwischen den mit Nowcasting- und Stationsdaten simulierten Ereignissen nicht so groß wie bei den Abflusspegeln, wobei die Nowcastingdaten bessere Ergebnisse liefern.

Anwendung und Ergebnisse

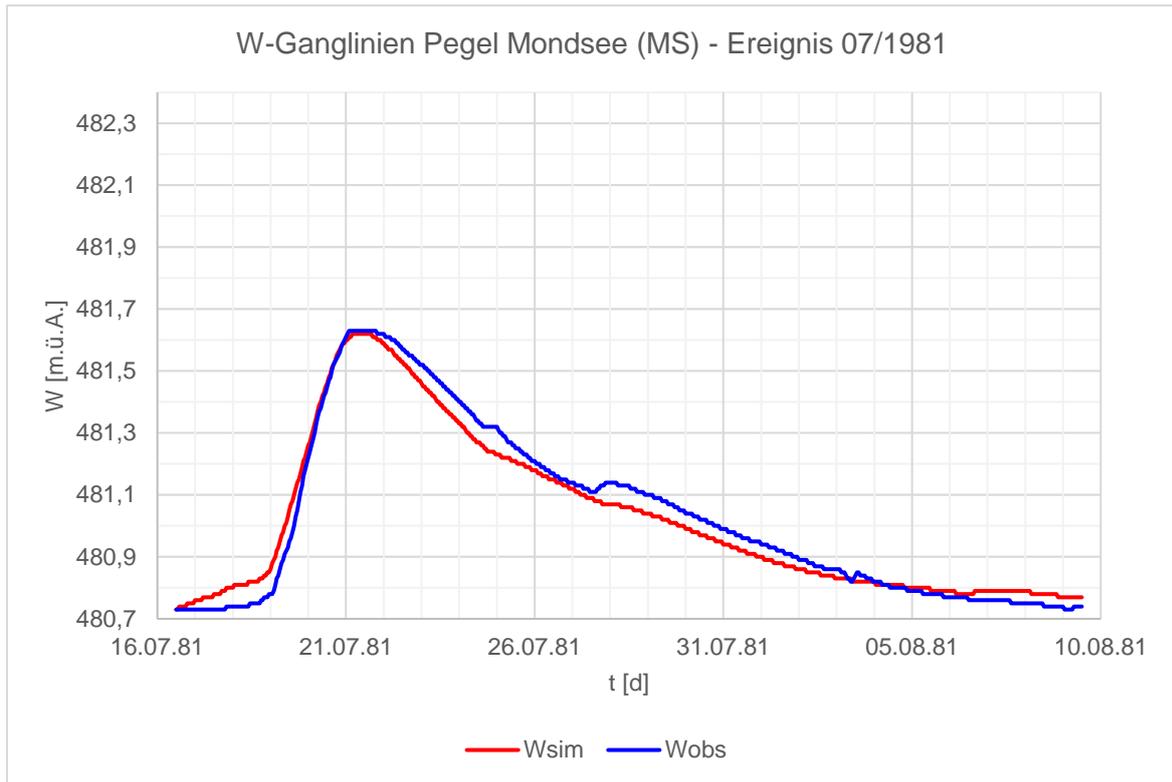


Abbildung 26: Validierung Wasserstands-Ganglinien Pegel Mondsee (MS) am Hochwasserereignis 07/1981

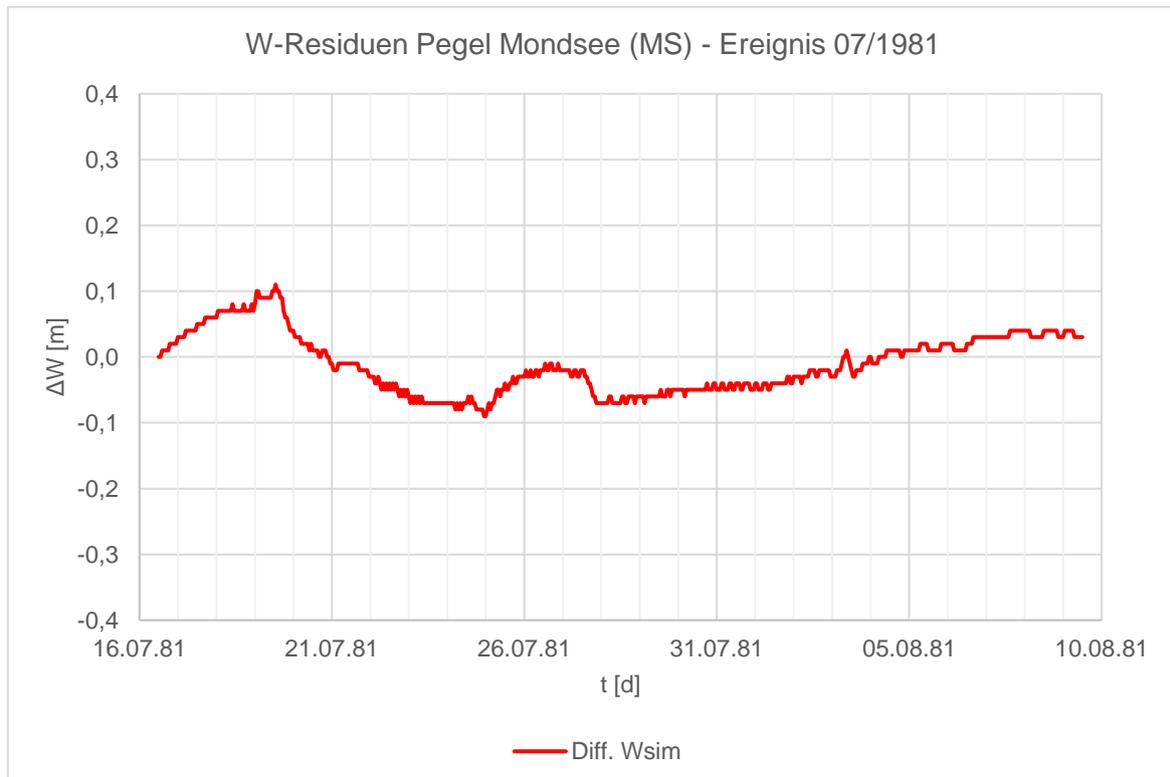


Abbildung 27: Validierung Wasserstands-Residuen Pegel Mondsee (MS) am Hochwasserereignis 07/1981

Eine weitere Prüfung der Modellgüte für den Wasserstand des Mondsees erfolgt über den Vergleich der Wasserstands-Ganglinien und Wasserstands-Residuen. Exemplarisch wird in den obigen Abbildungen das Hochwasserereignis 07/1981 herangezogen, welches eine Abweichung der Simulation zur Beobachtung von + 0,10 m bis – 0,09 m aufweist (siehe Abbildung 27 und Tabelle 15). Die Abbildungen zu allen Hochwasserereignissen sind im Anhang zu finden.

4.2 Simulation mit Niederschlagsprognosedaten

Mit der Implementierung von Niederschlagsprognosedaten in das N-A-Modell soll die Vorhersagemöglichkeit bezüglich des Wasserstandes abgeschätzt werden. Das ist nötig, um die weitere Fragestellung nach einer Etablierung von Vorabsenkungen im Falle von nahenden Starkniederschlägen beantworten zu können. Wie sich zeigen wird, sind die zeitliche Anordnung und das Ausmaß von Vorabsenk-Maßnahmen einerseits von verlässlichen Niederschlagsprognosen und andererseits von der Vorhersagekraft für den Seewasserstand durch das N-A-Modell abhängig.

Hierfür wurde das Hochwasserereignis 06/2013 (das größte in den vorhandenen Zeitreihen) mit Prognosedaten als Input simuliert. Es gibt täglich um 9:00 Uhr und 19:00 Uhr einen Prognosedatensatz mit einer Zeitspanne von 91 Stunden, welcher in das Modell eingespielt wurde (die genaue Struktur der Prognosedaten wird in Kapitel 2.4.3 auf Seite 9 erläutert). In Abbildung 28 steht jede grüne Ganglinie für einen der Prognosedatensätze, wobei das Vierecksymbol den Beginn des jeweiligen Prognosehorizontes darstellt. Für die Zeiträume vor Beginn der jeweiligen Prognose werden die Nowcasting-Niederschlagsdaten als Input herangezogen.

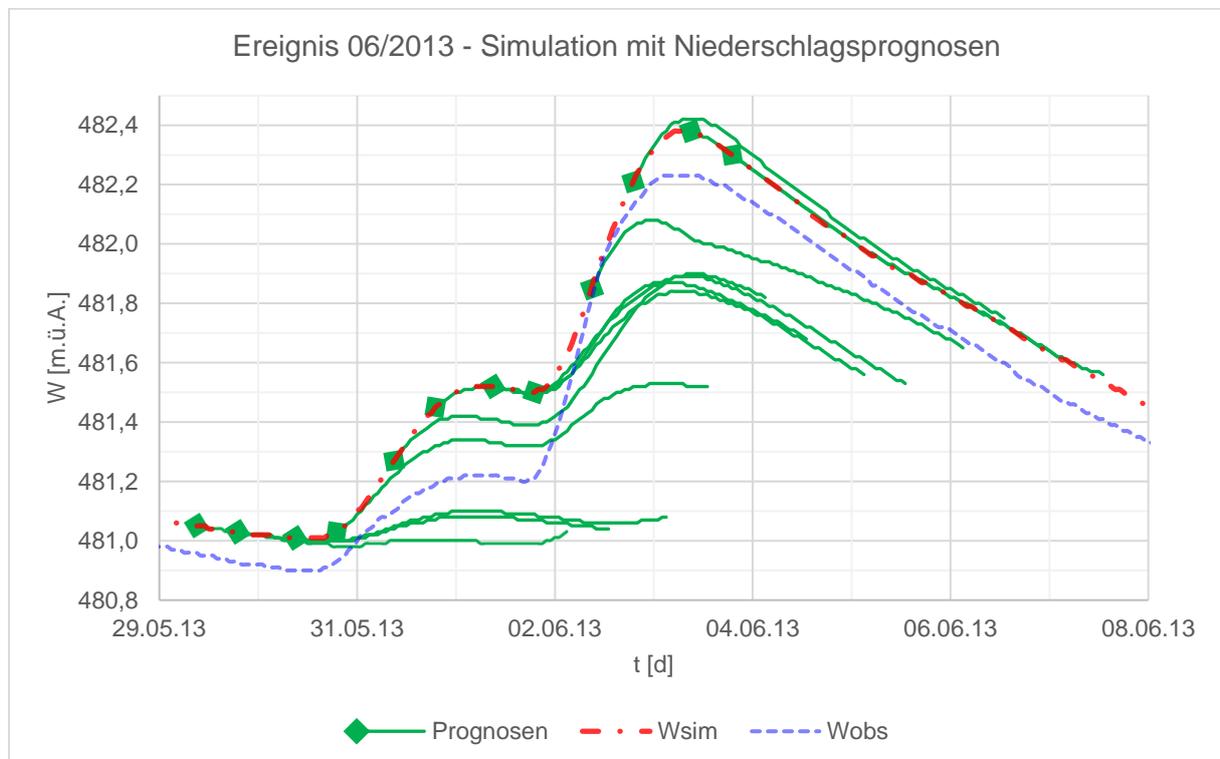


Abbildung 28: Simulation des Hochwasserereignisses 06/2013 mit Niederschlagsprognosen; grüne Ganglinien stellen jeweils einen Prognosehorizont dar mit dem Vierecksymbol als zeitlichem Beginn

Eine Simulation, wie die vorliegende, ist natürlich vorrangig von der Qualität der Niederschlagsprognosen abhängig. In diesem Fall unterschätzen die Prognosen den gemessenen

Niederschlag deutlich, wodurch die prognostizierten Ganglinien erst dann den tatsächlichen Hochwasserscheitel darstellen, nachdem dieser schon beinahe erreicht ist.

4.3 Simulation von Vorabsenkungen bei Hochwasserereignissen

Um die Frage nach den Auswirkungen einer vorzeitigen, zusätzlichen Absenkung des Mondsees im Fall von anstehenden Starkniederschlägen und Hochwasserereignissen beantworten zu können, wurde das größte beobachtete Ereignis, nämlich jenes im Juni 2013, dahingehend untersucht.

Für eine ungefähre Abschätzung der Wasserstandsänderung in Folge einer Vorabsenkung wurde eine überschlagsmäßige Berechnung durchgeführt. Für diese Berechnung gilt die Annahme, dass Zufluss und Abfluss in bzw. aus dem See immer gleich groß sind. Das Ergebnis dieser vereinfachten Berechnung ist in Abbildung 29 dargestellt.

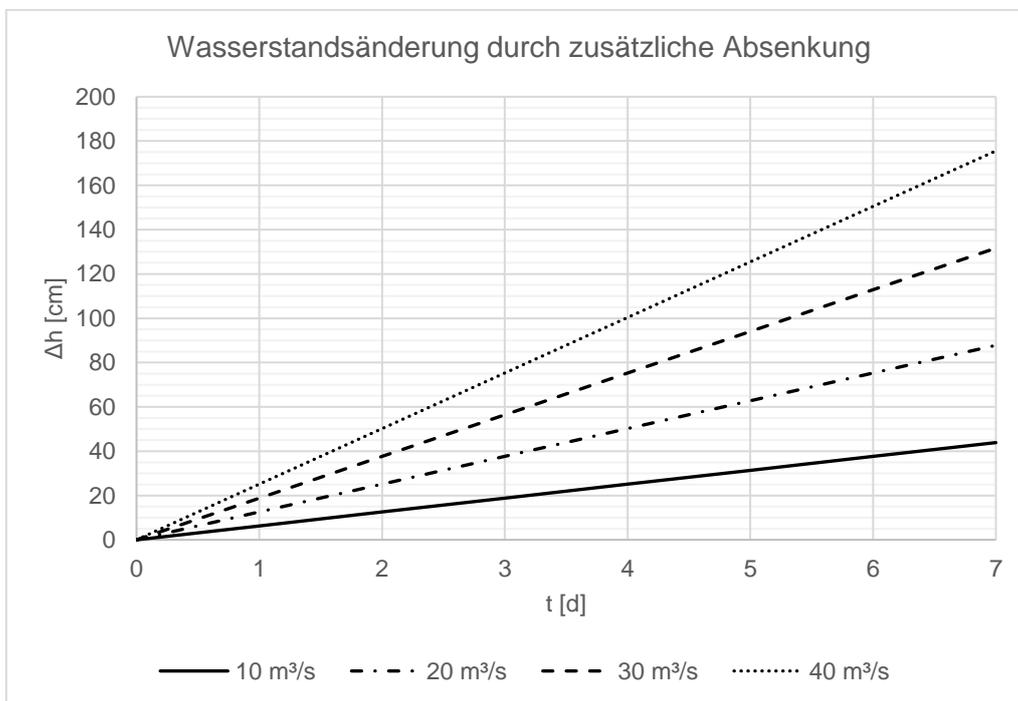


Abbildung 29: Überschlagsberechnung – Wasserstandsänderung durch zusätzliche Absenkung unter der Annahme, dass Zu- und Abfluss immer gleich groß sind

Da die realen Bedingungen mit der überschlägigen Berechnung natürlich nicht genau nachgestellt werden können, wurden mehrere Vorabsenkungsszenarien im N-A-Modell simuliert. Im Modell wird hierfür ein diversion-Element „Vorabsenkung“ verwendet, an welchem der Fluss des Wassers aufgeteilt werden kann. Bei den Simulationen ohne Vorabsenkung geht das gesamte Wasser vom diversion-Element direkt in das reservoir-Element „Speicher_MS“, wohingegen bei einer Vorabsenkung ein definierter Durchfluss am Speicher vorbeigeleitet und direkt zum nächsten Modellpunkt, dem *Durchflusspegel SA*, geleitet wird (siehe dazu auch Abbildung 30).

Anwendung und Ergebnisse

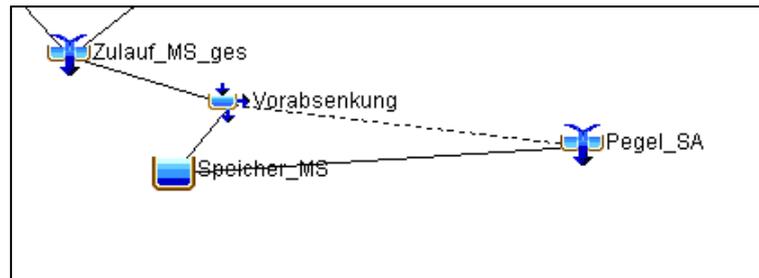


Abbildung 30: Realisierung der Vorabsenkung im N-A-Modell

In Anbetracht einer realistischen und in Bezug auf Schutz der Unterlieger vertretbaren Größe der zusätzlichen Absenkung werden 30 m³/s als zusätzlicher Ausfluss aus dem See als maximale Größe für die Absenkszenarien verwendet. Das Ende der Vorabsenkung wird zeitlich, um Vergleiche zu ermöglichen, jeweils am höchsten, ohne Vorabsenkung simulierten Wasserstand angesetzt. Die maximale Zeitspanne für Vorabsenkungen wird mit drei Tagen, vom Hochwasserscheitel zurück, angesetzt. Die Verlässlichkeit von Niederschlagsprognosen und deren Auswirkung auf die N-A-Simulationen wären für einen längeren Zeitraum nicht zielbringend.

Mit dem N-A-Modell wurden sechs Absenkszenarien simuliert, mit den Differenzen des Wasserstandes am Mondsee (MS) und des Durchflusses am Pegel Seeache (SA) als gesuchte Größen. Ein Absenkszenario wird dann als gut betrachtet, wenn die Absenkung des Wasserstandes möglichst groß und die Erhöhung des Spitzendurchflusses am Pegel SA möglichst klein ist. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse aller Absenkszenarien aufgelistet. Die Spalten mit den Änderungen des Wasserstandes (ΔW) und des Durchflusses (ΔQ) sind bei einer günstigen Veränderung grün und bei einer ungünstigen Veränderung gegenüber dem Ist-Zustand rot eingefärbt.

Tabelle 17: Ergebnisse aus der Simulation von Vorabsenkungs-Szenarien am Hochwasserereignis 06/2013

Ereignis 06/2013 – Vorabsenkung					
Absenkszenario	Absenkvolumen [Mio. m ³]	Peak Wsim (MS) [m.ü.A.]	ΔW [m]	Peak Qsim (SA) [m ³ /s]	ΔQ [m ³ /s]
1 Tag / 30 m ³ /s	2,59	481,93	-0,13	99,6	14,7
2 Tage / 20 m ³ /s	3,46	481,90	-0,16	86,1	1,2
2 Tage / 30 m ³ /s	5,18	481,82	-0,24	91,3	6,4
3 Tage / 10 m ³ /s	2,59	481,96	-0,10	82,7	-2,2
3 Tage / 20 m ³ /s	5,18	481,85	-0,21	82,9	-2,0
3 Tage / 30 m ³ /s	7,78	481,72	-0,34	90,6	5,7
Peak Wsim (MS) [m.ü.A.] – ohne Vorabsenkung			482,06		
Peak Qsim (SA) [m ³ /s] – ohne Vorabsenkung			84,90		

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Absenkung des Wasserstandes nicht jene Größe erreicht, wie in der überschlägigen Berechnung. Das ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der zeitlichen Positionierung der Absenkung der Zufluss größer als der Abfluss ist und dadurch der Wasserstand weniger stark sinkt als in der Überschlagsrechnung.

Erwartungsgemäß bringen jene Szenarien mit dem größten Absenkvolumen auch die größte Absenkung des Wasserstandes. Die größte Absenkung wird beim Szenario *3 Tage / 30 m³/s* erzielt, die kleinste bei *3 Tage / 10 m³/s*.

Bei Betrachtung des Durchflusspegels Seeache bringt das kurzfristige Absenkszenario mit der Dauer von 1 Tag die größte Erhöhung des Durchflusses und die Szenarien *3 Tage / 10 m³/s* und *3 Tage / 20 m³/s* sogar eine Verringerung des Durchfluss-Peaks. Ein erwähnenswertes Detail ist, dass das Szenario *2 Tage / 30 m³/s* eine Erhöhung des Durchfluss-Peaks bringt, wohingegen das Szenario *3 Tage / 20 m³/s* eine Reduktion des Peaks ergibt – das Absenkvolumen ist bei beiden Szenarien gleich.

Exemplarisch sind in den folgenden Abbildungen die Wasserstands- und die Durchflussganglinien von Mondsee und Seeache am Hochwasserereignis 06/2013 mit dem Absenkszenario *3 Tage / 20 m³/s* dargestellt.

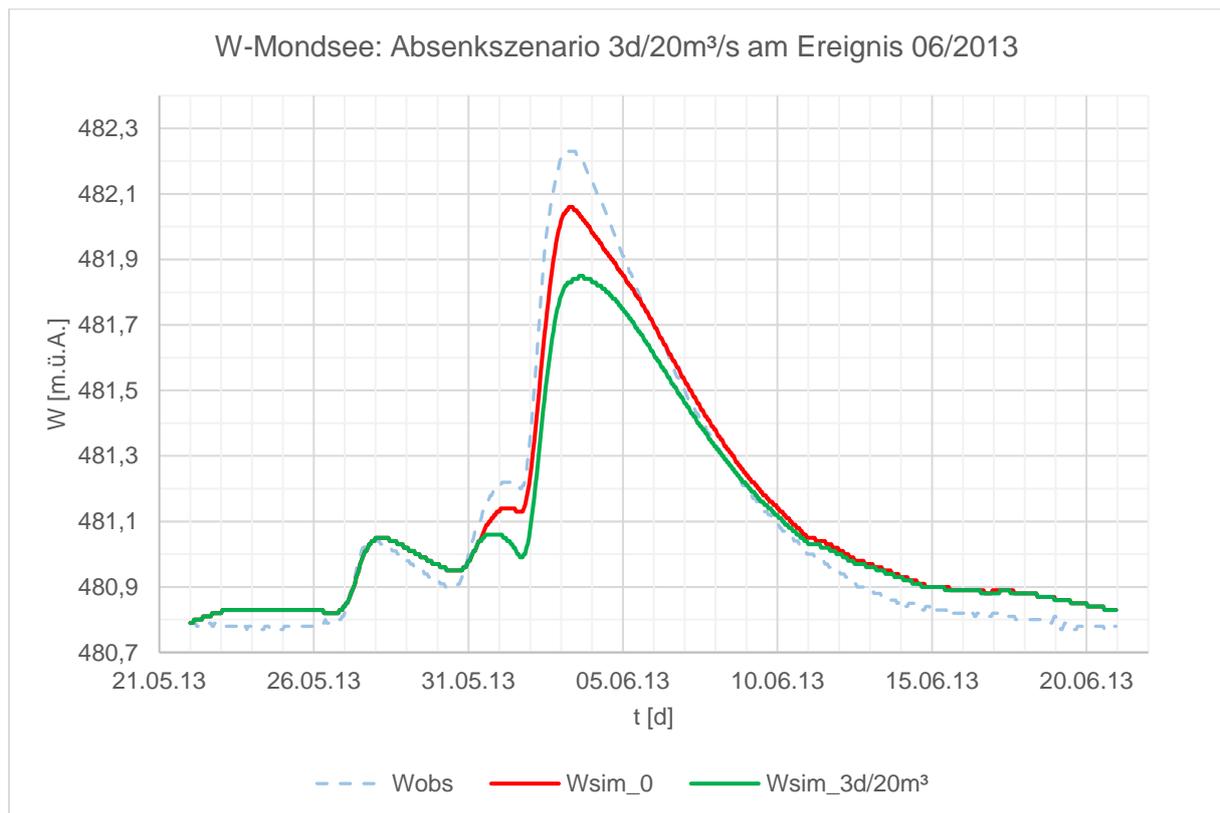


Abbildung 31: Wasserstandsganglinie Mondsee mit Absenkszenario 3d/20m³/s am Hochwasserereignis 06/2013

Anwendung und Ergebnisse

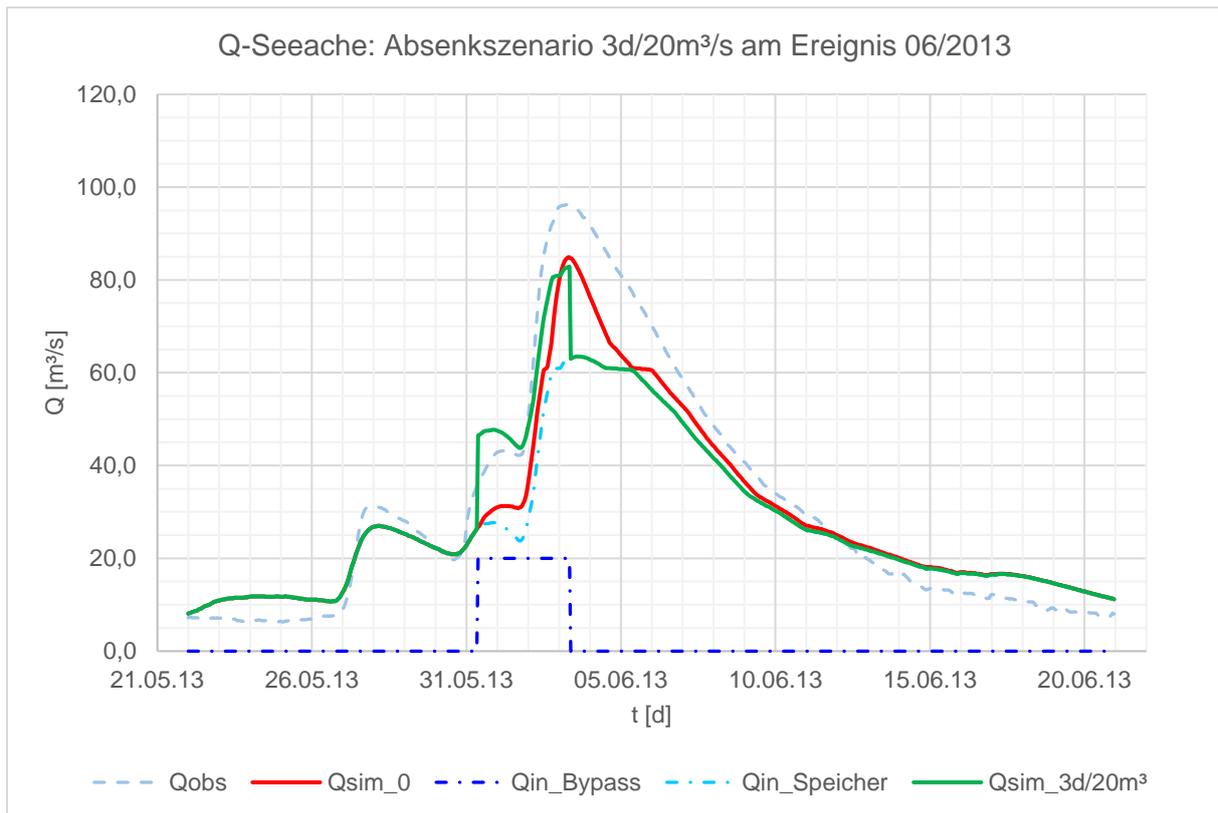


Abbildung 32: Durchflussganglinie Seeache mit Absenkszenario 3d/20m³/s am Hochwasserereignis 06/2013

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die drei zu Beginn der Arbeit festgelegten Zielsetzungen für die Anwendung des Niederschlag-Abfluss-Modells des Mondsee-Einzugsgebiets konnten durchgeführt werden. Die Schlussfolgerungen aus den erzielten Ergebnissen werden im Folgenden behandelt.

Simulation des Ist-Zustandes

Der Ist-Zustand des hydrologischen Systems, insbesondere des Mondsees an sich, wurde mit dem HEC-HMS-Modell zufriedenstellend abgebildet. Die Modellgüte, die anhand der Simulationsergebnisse berechnet wurde, bringt größtenteils gute Ergebnisse für den Wasserstand des Sees mit einer NSE $> 0,80$ für alle Ereignisse, mit Ausnahme von einem. Die Güte der Simulation mancher Teileinzugsgebiete, insbesondere Fuschler Ache, aber auch Griesler Ache, ist jedoch teilweise unzureichend. Ein wahrscheinlicher Grund hierfür ist die Regionalisierung des Niederschlages aus den Stationsdaten bzw. die Verlässlichkeit dieser Daten an sich. Ein Indiz dafür ist, dass bei den Hochwasserereignissen, welche Nowcasting- und Stationsdaten als Input verfügbar haben, die Simulationen mit Nowcasting-Input durchwegs bessere Ergebnisse aufweisen.

Die Anwendbarkeit des vorliegenden N-A-Modells ist auf bestimmte Kriterien beschränkt. Es wurde dahingehend kalibriert, um einzelne Hochwasserereignisse zu simulieren und nicht um eine kontinuierliche Simulation über längere Zeiträume durchzuführen. Außerdem werden viele Einflussfaktoren auf das Abflussverhalten stark vereinfacht oder ganz vernachlässigt (Black Box Model). So berücksichtigt das erstellte Modell keinen Schneespeicher oder -schmelze, weshalb nur davon unbeeinflusste Hochwasserereignisse simuliert werden können.

Eine weitere Verbesserung des Modells mit der Integration von derzeit unberücksichtigten Faktoren ist mit der Software HEC-HMS möglich. Ob eine dahingehende Anpassung des Modells zielführend wäre oder ob der dafür benötigte Aufwand und die erzielten Verbesserungen in einer unverhältnismäßigen Beziehung zueinander stehen würden, müsste der Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Simulation mit Niederschlagsprognosedaten

Der zweite Anwendungsfall für das N-A-Modell, die Implementierung von Niederschlagsprognosen als Input, konnte ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden. Da Prognosedaten nur für ein Hochwasserereignis vorhanden waren, können keine konkreten Aussagen über die Qualität der Vorhersagefähigkeit des N-A-Modells getroffen werden. Außerdem ist die Qualität der Wasserstandsprognosen für den See direkt von der Qualität der Niederschlagsprognosen abhängig. Die Implementierung der Prognosen in das vorliegende N-A-Modell war eine äußerst zeitaufwändige Aufgabe. Eventuell gibt es hier noch Verbesserungspotential in der Verwendung der Software bzw. der Programmierung von Hilfsprogrammen, die das Einspielen der zahlreichen Prognosen erleichtern.

Für zukünftige Betrachtungen von Prognosen mit dem Modell stellt sich die Frage nach Kriterien, wie diese zum Hochwasserschutz bzw. zur Retentionsoptimierung des Seespeichers herangezogen werden können. Möglichkeiten hierfür wären unter anderem ein Schwellen-Wasserstand (z.B. 10-jährlicher Wasserstand), welcher im Prognosehorizont erreicht wird. Bei Erreichen dieses Schwellenwertes könnte mit Vorabsenkungsmaßnahmen begonnen werden, um die Hochwasserspitzen zu vermindern.

Ein mit der Verwendung von Prognosedaten einhergehendes Problem sind falsche Vorhersagen den Niederschlag betreffend. Dies kann einerseits zur Folge haben, dass die Niederschläge unterschätzt werden und daher keine Vorabsenkung veranlasst wird. Andererseits können durch prognostizierte Niederschläge, die dann nicht eintreten, Vorabsenkungen ausgelöst werden, welche niedrige Seewasserstände nach sich ziehen.

Simulation von Vorabsenkungen bei Hochwasserereignissen

Durch die Implementierung des diversion-Elements im N-A-Modell wird eine Simulation von Vorabsenkungen am Auslass des Mondsees möglich. Aufgrund dieser Modellstruktur kann es jedoch in einem Fall zu Problemen bei der Simulation kommen. Dieser tritt ein, wenn der Gesamtzufluss zum See kleiner ist, als die eingestellte Vorabsenkung. Der derzeitige Gesamtzufluss stellt modelltechnisch auch das Maximum dar, das am Seespeicher vorbeigeleitet werden kann.

Eine Aussage, welche Dauer und welches Ausmaß eine etwaige Vorabsenkung haben sollte, kann nur bedingt gemacht werden. Allgemein festzustellen ist, dass mit größerem Absenkvolumen auch die Absenkung des Wasserstandes zunimmt. In Bezug auf die Dauer bringen längere Absenkzeiträume einen geringeren Spitzendurchfluss des Unterliegerpegels Seeache mit sich, als Absenkungen über kürzere Zeiträume und gleichem Absenkvolumen. Entscheidend ist dabei auch der zeitliche Beginn bzw. das Ende der Absenkung. So sollte der zusätzliche Abfluss nicht gleichzeitig mit der eigentlichen Hochwasserwelle abgeführt werden, damit der Spitzenabfluss nicht weiter erhöht wird.

Die Simulationen zeigen, dass zusätzliche Absenkungen des Mondsees ohne große Belastung des Unterliegerpegels möglich sind. Dies lässt den Schluss zu, dass Vorabsenkungen, und somit Abweichungen von der Wehrbetriebsordnung des Auslasswehres, eine bessere Nutzung des Retentionspotentials des Mondsees zulassen und gleichzeitig eine Verschlechterung flussabwärts vermieden werden kann. Jedoch ist der Umfang diesbezüglicher Versuche in dieser Arbeit zu gering, um eine allgemein gültige Aussage dazu treffen zu können. Weitere Simulationen und Versuche müssten durchgeführt werden, um eindeutige Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Ausblick

Die sich aus dieser Arbeit ergebenden zukünftigen Fragestellungen sind vielseitig. Sie betreffen die Weiterentwicklung des Niederschlags-Abfluss-Modells, die Konkretisierung von Regeln für die Vorabsenkungen und deren technische Umsetzbarkeit, sowie die Eruierung von Interessenskonflikten in Bezug auf den Seewasserstand.

Das N-A-Modell kann für eine künftige Verwendung als Hochwasserprognose-Tool für das Mondseeinzugsgebiet weiterentwickelt werden. Dafür müsste die Implementierung der Niederschlagsprognosen einfacher und schneller funktionieren und eine gleichbleibende und gute Qualität der Prognosedaten gegeben sein. Hierbei ist jedoch fraglich, ob Daten dieser Qualität überhaupt zur Verfügung stünden. Anhand der prognostizierten Wasserstände könnte dann entschieden werden, ob und in welchem Ausmaß der Wasserstand des Mondsees im Falle von nahenden Starkniederschlägen vorabgesenkt werden soll.

Voraussetzung für etwaige Vorabsenkungen ist die technische Umrüstung des Auslasses. Möglichkeiten hierfür sind die Ertüchtigung der Wehranlage, um zusätzlichen Abfluss abführen zu können, die Errichtung einer Bypass-Anlage oder Ähnliches. Diese Maßnahmen sollten

Schlussfolgerungen und Ausblick

Gegenstand weiterer Untersuchungen bzw. hydraulischer Modellierungen sein und werden zum Teil auch im Projekt „Machbarkeitsstudie Wehrordnung Mondseeklause“ des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) untersucht.

Eine in dieser Arbeit nicht behandelte Fragestellung ist jene der potentiellen Konfliktfelder mit Betroffenen bzw. Interessenten rund um den Mondsee. Dies sind die Anrainergemeinden und deren Bewohner, die Fischerei, die Schifffahrt oder der Tourismus. Die Auswirkungen von Vorabsenkungen und der Eingriff in die bestehende Wehrbetriebsordnung sollten mit den Betroffenen abgestimmt bzw. kommuniziert werden.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986). Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE', 2: Structure of a Physically-based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87 (1–2), 61–77.
- Amt der Oö. Landesregierung (Hrsg.). (2016). CLAIRISA (Climate-Air-Information-System for Upper Austria). Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umwelt. Verfügbar unter: [http://www.doris.eu/viewer/\(S\(xzdoeckqpvtgjdehagvb1nhn\)\)/init.aspx?karte=clairisa&layout=atlas_doris_legende](http://www.doris.eu/viewer/(S(xzdoeckqpvtgjdehagvb1nhn))/init.aspx?karte=clairisa&layout=atlas_doris_legende)
- Beiwil, C. & Mühlmann, H. (2008). *Atlas der natürlichen Seen Österreichs mit einer Fläche ≥ 50 ha. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft.* (Band 29).
- Bergström, S. (1992). The HBV Model - its structure and applications. *SMHI Reports Hydrology*, 4.
- BMLFUW (Hrsg.). (2007). digHAO - Digitaler Hydrologischer Atlas Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- BMLFUW (Hrsg.). (2013). *Hochwasser im Juni 2013 - Die hydrographische Analyse.*
- Clark, C. O. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 110 (1), 1419–1446. ASCE.
- Devia, G. K. & Ganasri, B. P. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. Elsevier. doi:10.1016/J.AQPRO.2015.02.126
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual.* Verfügbar unter: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>
- Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A. et al. (2016). *Hydrologie (utb basics)*. (N. Fohrer, H. Bormann, K. Miegel, M. Casper, A. Bronstert, A. Schumann et al., Hrsg.) *Hydrologie*. Bern: Haupt. Verfügbar unter: <https://www-1utb-2studi-2e-2book-1de-10016288g0ab6.pisces.boku.ac.at/hydrologie.html>
- Geoland.at (Hrsg.). (2017). Digitales Geländemodell (DGM) Österreich - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 19.7.2018. Verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/d88a1246-9684-480b-a480-ff63286b35b7>
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B. & Gruber, C. (2011). The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting*, 26 (2), 166–183. doi:10.1175/2010WAF2222451.1
- Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft (Hrsg.). (2015a). Messstellen - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 23.7.2018. Verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/cd0449ee-8527-45f3-a13e-ef968c9f712f>
- Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft (Hrsg.). (2015b). Berichtsgewässernetz - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 23.7.2018. Verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/3e0d07f0-f989-4bb0-a3bc-398b41c85028>
- Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft (Hrsg.). (2015c). Routenteileinzugsgebiete - Berichtsgewässernetz - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 23.7.2018. Verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/548bf9dd-e9e5-4fea-a7c6-42db95ee5d8b>
- Land Salzburg - Referat Geodateninfrastruktur (Hrsg.). (2017). Abfluss- und Seepiegel Land Salzburg - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 23.7.2018. Verfügbar unter:

<https://www.data.gv.at/katalog/dataset/943b7dda-5c3d-40d3-80de-f29a491a59fa>

- Maniak, U. (2016). *Hydrologie und Wasserwirtschaft* (7., neu be.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-49087-7
- Nachtnebel, H.-P., Baumung, S. & Lettl, W. (1993). *Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr (Handbuch)*. Wien: Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW) - Universität für Bodenkultur Wien.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290. Elsevier. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Nelder, J. A. & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7 (4), 308–313. Oxford University Press. doi:10.1093/comjnl/7.4.308
- Refsgaard, J. C. & Knudsen, J. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. *Water Resources Research*, 32 (7), 2189–2202. Wiley-Blackwell. doi:10.1029/96WR00896
- Scharffenberg, W. (2016). *Hydrologic Modelling System HEC-HMS, User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. doi:CDP-74A
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method. *News Record*, 108, 501–505.
- Umweltbundesamt GmbH (Hrsg.). (2016). CORINE-Landbedeckung 2012 Vektordatensatz - Datensätze - data.gv.at. Zugriff am 19.7.2018. Verfügbar unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/0a55085f-e942-4dfa-909b-f568780d008f>
- Wittenberg, H. (2011). *Praktische Hydrologie*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. doi:10.1007/978-3-8348-9889-0
- World Meteorological Organization. (2017). Nowcasting. Zugriff am 26.7.2018. Verfügbar unter: <http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/Nowcasting.htm>

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Mondsee-Einzugsgebietes in Österreich.....	3
Abbildung 2: topographischer Überblick des Mondsee Einzugsgebietes	4
Abbildung 3: Höhenkarte des Mondsee-Einzugsgebietes (eigene Abb. – Höhendaten von Geoland.at, 2017).....	4
Abbildung 4: Landbedeckungsklassen im Einzugsgebiet (eigene Abb. – Landbedeckungsdaten von Umweltbundesamt GmbH, 2016)	5
Abbildung 5: relative Anteile der Landbedeckungsklassen im Einzugsgebiet	5
Abbildung 6: Gliederung des Mondsee-Einzugsgebietes in Teileinzugsgebiete (eigene Abb. - Geodaten von Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft, 2015b, 2015c; Land Salzburg - Referat Geodateninfrastruktur, 2017).....	7
Abbildung 7: Abflussschema des Mondsee-Einzugsgebietes.....	7
Abbildung 8: Vergleich und Plausibilitätskontrolle der Wasserstandspegel des Mondsees "Limnolog. Institut" (blau) und "See am Mondsee" (rot).....	10
Abbildung 9: Übersichtskarte der verwendeten Niederschlags- und Gewässermessstellen (eigene Abb. – Geodaten von Land Oberösterreich - Abteilung Wasserwirtschaft, 2015a, 2015b, 2015c; Land Salzburg - Referat Geodateninfrastruktur, 2017)	11
Abbildung 10: Graphische Benutzeroberfläche von HEC-HMS	14
Abbildung 11: Modellaufbau in HEC-HMS für das Mondsee-Einzugsgebiet mit den einzelnen hydrologischen Elementen und Verbindungen.....	15
Abbildung 12: Umlegung der INCA-Daten auf die N-A-Modell-Struktur (links: Gliederung der Teil-Einzugsgebiete aus Hilfsprogramm; rechts: Gliederung Teil-Einzugsgebiete im N-A-Modell)	17
Abbildung 13: Isochronenplan (li.) und Zeit-Flächen-Diagramm (re.) eines Einzugsgebietes (Quelle: Maniak, 2016).....	18
Abbildung 14: Veranschaulichung der Reset-Bedingung des Basisabflusses im Verhältnis zur Abflussspitze anhand eines Simulations-Runs mit dem Recession-Basisabflussmodell in HEC-HMS	20
Abbildung 15: Illustration der Berechnungsschritte für die Speicher-Abfluss-Funktion in HEC-HMS (Quelle: Feldman, 2000).....	21
Abbildung 16: Darstellung des Betrages der Zielfunktion Peak-RMS gegenüber den Iterationsschritten in der automatischen Parameteroptimierung anhand des Hochwasserereignisses vom Juni 2013 am Pegel Fuschler Ache	23
Abbildung 17: beobachtete (rot) und mit optimierten Parametern berechnete (blau) Ganglinie am Pegel Fuschler Ache im Juni 2013 innerhalb des Optimierungszeitraumes	23
Abbildung 18: gewählte Simulationsereignisse in der Zeitreihe des Wasserstandspegels "See am Mondsee"; bedingt durch Modellaufbau mögliche Zeiträume Mai-September in Blau	26
Abbildung 19: Schema des hydrologischen Systems Mondsee mit Durchflusspegeln.....	27
Abbildung 20: Ergebnisse Optimierungsläufe Pegel Zeller Ache.....	28
Abbildung 21: Wasserstand-Abfluss-Beziehung Mondsee – Vergleich Wehrordnung und beobachtete Werte	31
Abbildung 22: Boxplots der gemittelten Abflusswerte am Abflusspegel Seeache für sechs ausgewählte Wasserstände am Wasserstandspegel "See am Mondsee" (man beachte die unterschiedliche Skalierung der Q-Achse)	31
Abbildung 23: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Mondsee	32
Abbildung 24: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Fuschlsee.....	33
Abbildung 25: für das N-A-Modell optimierte Wasserstands-Abfluss-Beziehung Irrsee.....	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 26: Validierung Wasserstands-Ganglinien Pegel Mondsee (MS) am Hochwasserereignis 07/1981	37
Abbildung 27: Validierung Wasserstands-Residuen Pegel Mondsee (MS) am Hochwasserereignis 07/1981	37
Abbildung 28: Simulation des Hochwasserereignisses 06/2013 mit Niederschlagsprognosen; grüne Ganglinien stellen jeweils einen Prognosehorizont dar mit dem Vierecksymbol als zeitlichem Beginn	38
Abbildung 29: Überschlagsberechnung – Wasserstandsänderung durch zusätzliche Absenkung unter der Annahme, dass Zu- und Abfluss immer gleich groß sind	39
Abbildung 30: Realisierung der Vorabsenkung im N-A-Modell	40
Abbildung 31: Wasserstandsganglinie Mondsee mit Absenkszenario 3d/20m ³ /s am Hochwasserereignis 06/2013	41
Abbildung 32: Durchflussganglinie Seeache mit Absenkszenario 3d/20m ³ /s am Hochwasserereignis 06/2013	42

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wasserbilanz für das Einzugsgebiet des Mondsees aus BMLFUW, 2007	6
Tabelle 2: mittlere Durchflüsse der Hauptzuflüsse des Mondsees	6
Tabelle 3: Charakteristika der Seen im Mondsee-Einzugsgebiet (Quelle: Beiwl & Mühlmann, 2008) ...	8
Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Niederschlagsmessstationen	8
Tabelle 5: verwendete Messstellen Oberflächengewässer.....	10
Tabelle 6: für das Mondsee-Einzugsgebiet erstellte subbasin-Elemente im HEC-HMS-Modell.....	16
Tabelle 7: für die Kalibrierung und Validierung des N-A-Modells gewählte Hochwasserereignisse (nach Größe geordnet)	26
Tabelle 8: für die Kalibrierung des N-A-Modells verwendete Abflusspegel	27
Tabelle 9: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels FA	29
Tabelle 10: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels GA.....	29
Tabelle 11: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels ZA	30
Tabelle 12: Parameterwerte aus der Optimierung für die Elemente oberhalb des Pegels SA	30
Tabelle 13: Ergebnisse Validierung Abflusspegel mit Stationsdaten als Input (HW-Ereignisse nach Größe geordnet; für Kalibrierung verwendete HW-Ereignisse in grau)	34
Tabelle 14: Ergebnisse Validierung Abflusspegel mit INCA-Nowcastingdaten als Input (HW-Ereignisse nach Größe geordnet)	35
Tabelle 15: Validierung Wasserstandspegel Mondsee (MS) mit Stationsdaten als Input – Residuen Wasserstand; NSE (HW-Ereignisse nach Größe geordnet; für Kalibrierung verwendete HW-Ereignisse in grau).....	36
Tabelle 16: Validierung Wasserstandspegel Mondsee (MS) mit INCA-Nowcastingdaten als Input – Residuen Wasserstand; NSE (HW-Ereignisse nach Größe geordnet)	36
Tabelle 17: Ergebnisse aus der Simulation von Vorabsenkungs-Szenarien am Hochwasserereignis 06/2013.....	40

9 Anhang

9.1 Ergebnisse Kalibrierung nach Abflusspegel

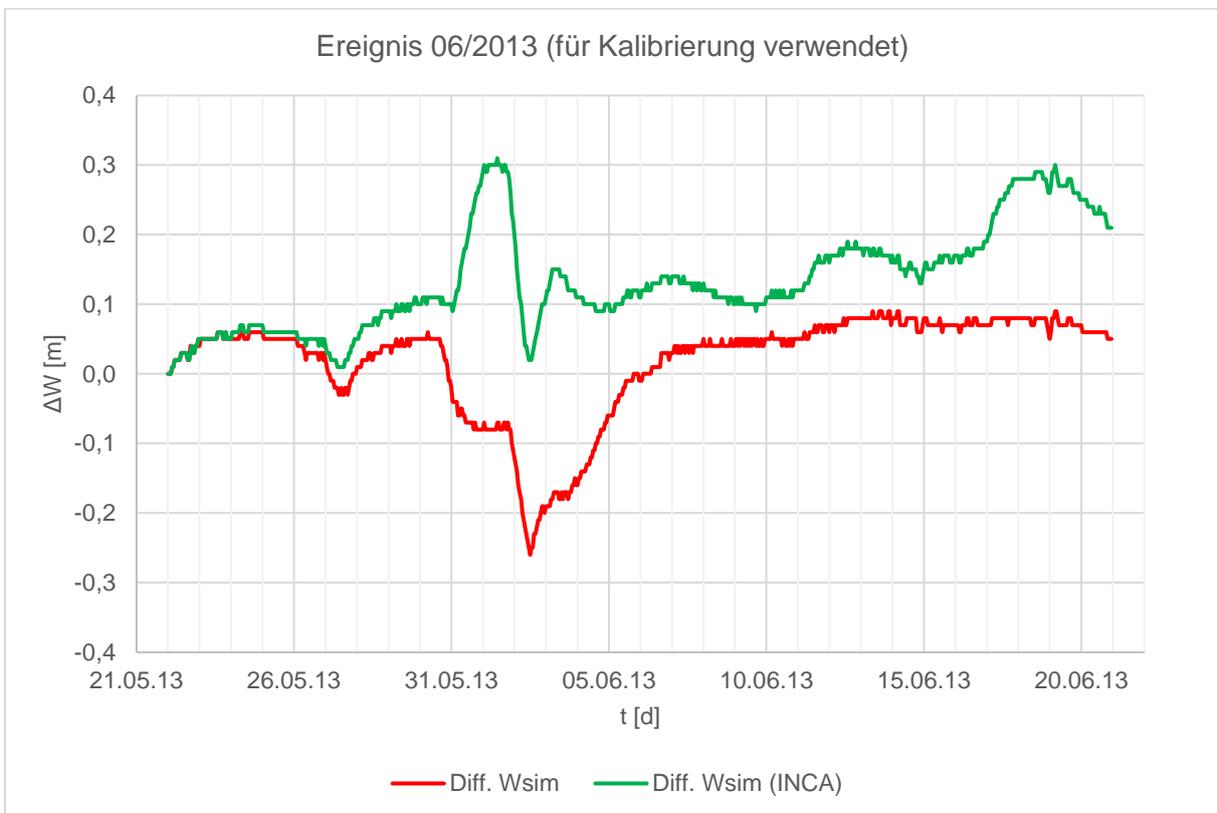
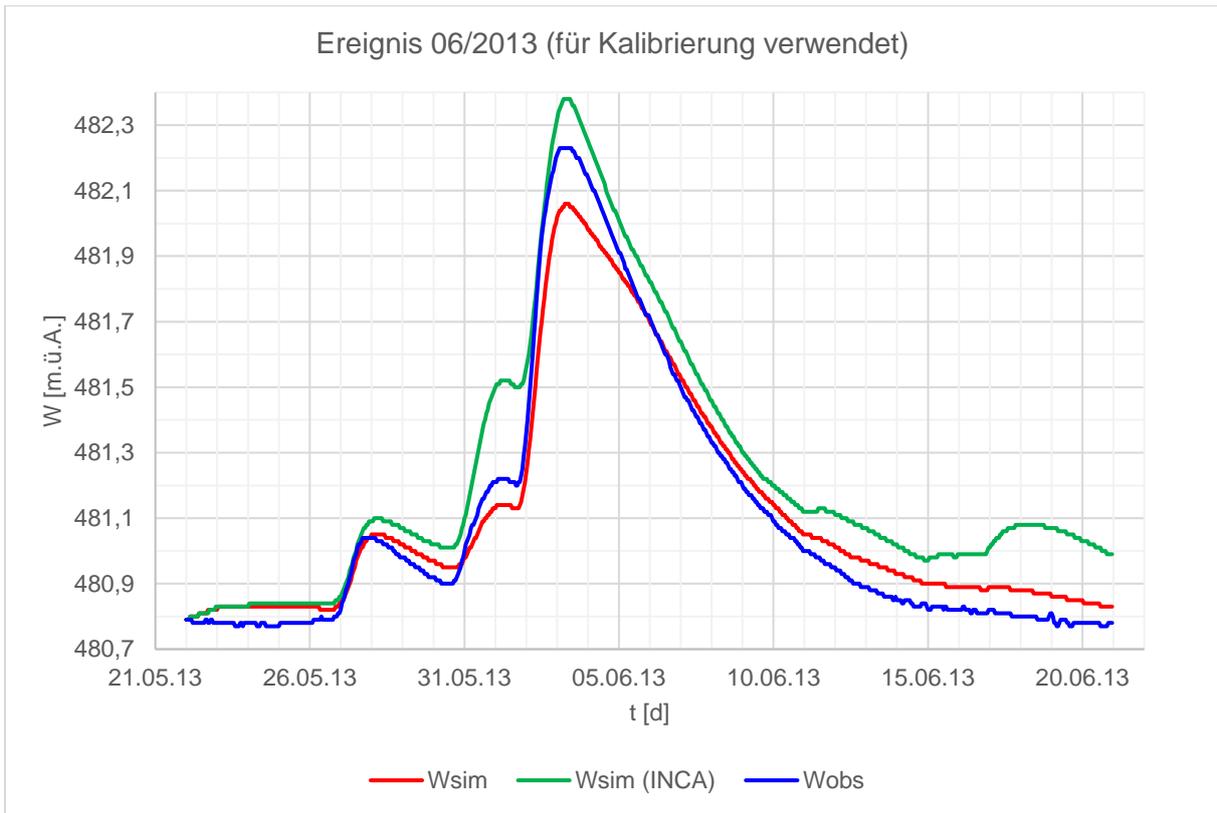
Kalibrierung - Pegel Fuschler Ache												
1. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.		
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	5,00	3,08	4,62	5,28	7,06	4,42	4,89	4,62	0,27		
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	21,00	21,06	21,21	21,77	22,72	21,62	21,68	21,62	0,03		
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	7,55	5,53	7,54	7,48	4,08	8,93	6,71	7,48	0,25		
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	1,58	5,97	1,55	1,03	1,51	1,03	2,22	1,51	0,85		
ZEZG_FA	Recession - Initial Discharge	1,46	1,02	1,64	1,01	1,00	1,00	1,13	1,01	0,22		
ZEZG_FA	Recession - Ratio to Peak	0,25	0,20	0,28	0,20	0,41	0,37	0,29	0,28	0,29		
ZEZG_FA	Recession - Recession Constant	0,79	0,86	0,89	0,63	0,75	0,10	0,65	0,75	0,45		
EZG_FS	Recession - Initial Discharge	0,80	0,29	0,11	0,56	1,82	0,18	0,59	0,29	1,07		
EZG_FS	Recession - Ratio to Peak	0,50	0,16	0,28	0,22	0,88	0,68	0,44	0,28	0,64		
EZG_FS	Recession - Recession Constant	0,75	0,75	0,46	0,86	0,52	0,12	0,65	0,52	0,40		
	Zielfunktion:	peakRMS	0,48	1,09	0,47	0,17	1,01	0,64				
2. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.		
	rot gefärbte Parameter fixiert											
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	4,89	5,01	5,02	8,33	4,78	5,30	5,69	5,02	0,23		
EZG_FS	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	21,68	0,00		
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	6,71	6,84	7,05	7,10	4,36	7,12	6,49	7,05	0,17		
ZEZG_FA	Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	2,22	2,56	2,32	1,06	1,17	1,71	1,76	1,71	0,34		
ZEZG_FA	Recession - Initial Discharge	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	0,00		
ZEZG_FA	Recession - Ratio to Peak	0,29	0,20	0,30	0,36	0,44	0,20	0,30	0,30	0,31		
ZEZG_FA	Recession - Recession Constant	0,65	0,66	0,90	0,10	0,83	0,10	0,52	0,66	0,67		
EZG_FS	Recession - Initial Discharge	0,59	0,11	0,36	0,70	0,11	0,31	0,32	0,31	0,68		
EZG_FS	Recession - Ratio to Peak	0,44	0,31	0,26	0,35	0,75	0,62	0,46	0,35	0,42		
EZG_FS	Recession - Recession Constant	0,65	0,73	0,39	0,80	0,35	0,10	0,48	0,39	0,54		
	Zielfunktion:	peakRMS	0,57	1,09	0,31	0,17	0,97	0,62				

Kalibrierung - Pegel Griesler Ache												
1. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.	
ZEZG_FA+GA	Clark UH - Storage Coefficient	8,12	13,43	8,81	8,12	1,02	8,30	7,31	7,83	8,21	0,46	
ZEZG_FA+GA	Clark UH - Time of Concentration	10,30	10,01	10,00	10,01	10,84	10,02	10,00	10,15	10,01	0,03	
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Constant Rate	1,17	1,01	1,02	1,34	1,00	1,19	1,38	1,16	1,10	0,14	
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Initial Loss	12,00	11,76	12,27	12,05	11,50	11,85	12,24	11,94	11,95	0,02	
ZEZG_FA+GA	Recession - Initial Discharge	7,43	9,93	7,29	7,73	9,30	7,90	7,21	8,23	7,81	0,12	
ZEZG_FA+GA	Recession - Ratio to Peak	0,12	0,22	0,01	0,05	0,16	0,00	0,04	0,08	0,05	1,01	
ZEZG_FA+GA	Recession - Recession Constant	0,86	0,94	0,99	0,95	0,93	0,95	0,91	0,95	0,95	0,02	
Zielfunktion:			12,44	12,36	10,65	8,83	3,09	4,55	8,65			
		peakRMS										
2. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.	
	rot gefärbte Parameter fixiert											
ZEZG_FA+GA	Clark UH - Storage Coefficient	7,83	10,53	8,01	7,97	1,11	8,39	7,03	7,17	7,99	0,41	
ZEZG_FA+GA	Clark UH - Time of Concentration	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	0,00	
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Constant Rate	1,16	1,00	1,00	1,35	1,12	1,17	1,45	1,18	1,14	0,14	
ZEZG_FA+GA	Initial and Constant - Initial Loss	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	0,00	
ZEZG_FA+GA	Recession - Initial Discharge	8,23	10,00	8,39	8,26	6,51	7,97	6,93	8,01	8,11	0,14	
ZEZG_FA+GA	Recession - Ratio to Peak	0,08	0,10	0,00	0,03	0,02	0,02	0,07	0,04	0,03	0,90	
ZEZG_FA+GA	Recession - Recession Constant	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,00	
Zielfunktion:			12,69	12,81	10,73	11,45	3,14	4,60	9,24			
		peakRMS										

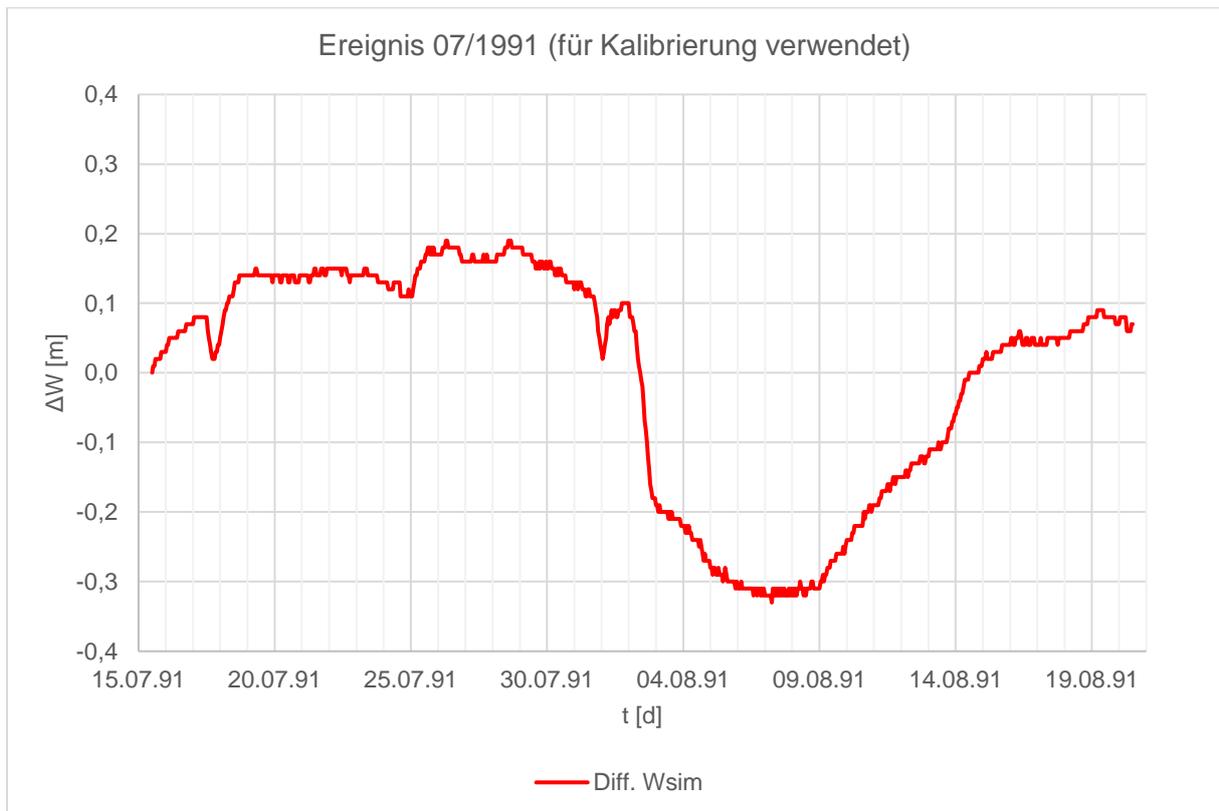
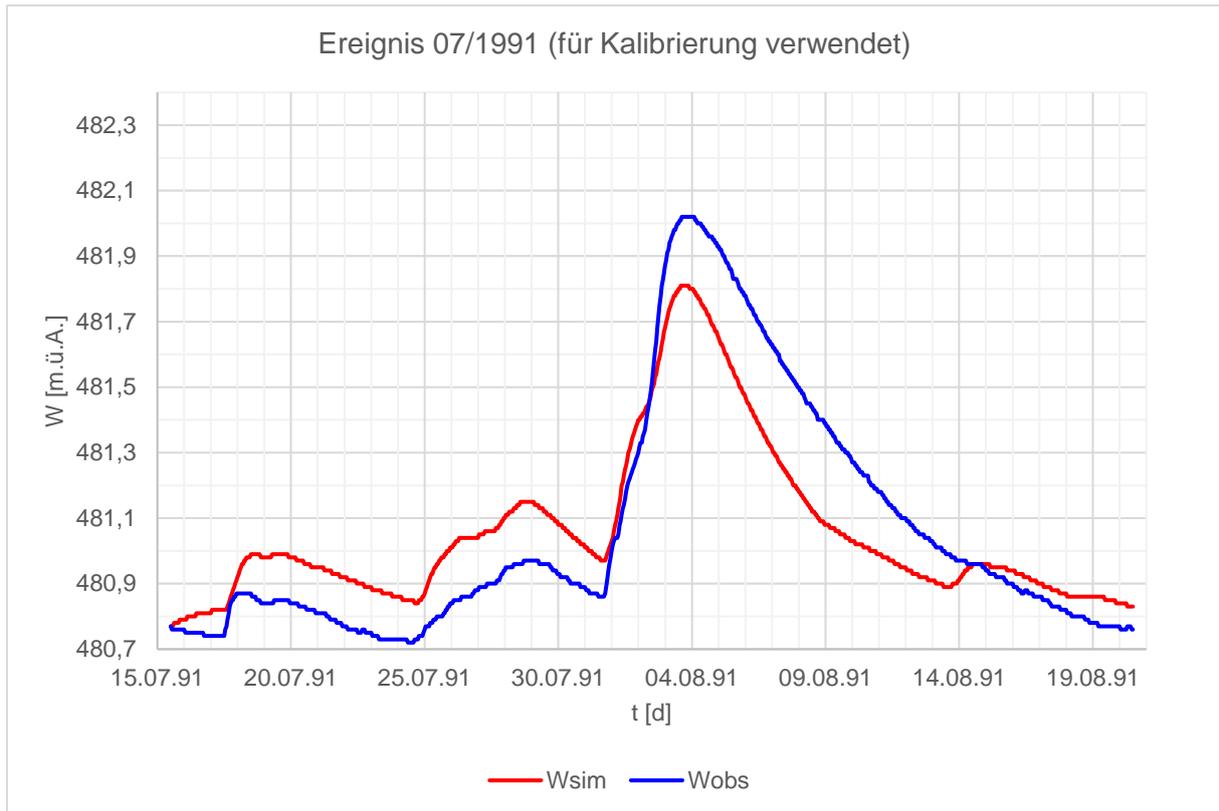
Kalibrierung - Pegel Zeller Ache													
1. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.		
EZG_ZS	Clark UH - Storage Coefficient	HR	13,00	13,32	13,16	14,54	11,30	13,74	12,71	13,13	13,24	0,08	
EZG_ZS	Clark UH - Time of Concentration	HR	5,41	6,02	5,49	5,67	5,07	6,97	5,45	5,78	5,58	0,10	
EZG_ZS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,32	1,30	1,86	3,00	2,38	2,38	1,34	2,04	2,12	0,30	
EZG_ZS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	11,00	11,02	12,53	12,87	11,23	16,59	10,76	12,50	11,88	0,16	
ZEZG_ZA	Clark UH - Storage Coefficient	HR	19,00	16,33	18,48	16,25	18,16	10,02	19,10	16,39	17,24	0,19	
ZEZG_ZA	Clark UH - Time of Concentration	HR	1,00	1,32	1,04	1,04	1,38	1,00	1,62	1,23	1,18	0,18	
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,19	1,01	1,36	1,96	1,18	1,04	1,01	1,26	1,11	0,27	
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,98	12,88	13,44	11,39	13,60	12,99	12,88	12,86	12,93	0,06	
EZG_ZS	Recession - Initial Discharge	M3/S	0,50	0,29	0,12	0,12	2,00	1,85	0,73	0,85	0,51	0,92	
EZG_ZS	Recession - Ratio to Peak		0,80	0,89	0,90	0,68	0,83	0,64	0,73	0,78	0,78	0,13	
EZG_ZS	Recession - Recession Constant		0,50	0,29	0,63	0,80	0,19	0,22	0,45	0,43	0,37	0,52	
ZEZG_ZA	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,00	1,13	2,00	1,47	2,20	1,41	0,50	1,45	1,44	0,38	
ZEZG_ZA	Recession - Ratio to Peak		0,80	0,75	0,80	0,20	0,30	0,81	0,78	0,61	0,77	0,42	
ZEZG_ZA	Recession - Recession Constant		0,50	0,10	0,22	0,86	0,89	0,72	0,11	0,48	0,47	0,72	
	Zielfunktion:	peakRMS	2,12	1,08	0,87	1,20	0,87	0,80	0,80	1,16			
2. Durchlauf	rot gefärbte Parameter fixiert	Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.		
EZG_ZS	Clark UH - Storage Coefficient	HR	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	0,00		
EZG_ZS	Clark UH - Time of Concentration	HR	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	0,00		
EZG_ZS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	2,04	1,95	1,48	2,37	2,37	1,74	1,98	1,98	0,16		
EZG_ZS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50	0,00		
ZEZG_ZA	Clark UH - Storage Coefficient	HR	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	16,39	0,00		
ZEZG_ZA	Clark UH - Time of Concentration	HR	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	0,00		
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,26	1,00	1,41	2,00	1,18	1,00	1,01	1,27	1,09	0,28	
ZEZG_ZA	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	12,86	0,00		
EZG_ZS	Recession - Initial Discharge	M3/S	0,85	0,83	0,75	0,42	1,03	2,00	1,09	1,02	0,93	0,48	
EZG_ZS	Recession - Ratio to Peak		0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,00		
EZG_ZS	Recession - Recession Constant		0,43	0,14	0,59	0,41	0,40	0,59	0,75	0,48	0,50	0,40	
ZEZG_ZA	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,45	1,24	0,86	1,69	2,17	1,62	0,74	1,39	1,43	0,36	
ZEZG_ZA	Recession - Ratio to Peak		0,61	0,29	0,29	0,23	0,21	0,45	0,39	0,31	0,29	0,27	
ZEZG_ZA	Recession - Recession Constant		0,48	0,90	0,41	0,81	0,90	0,90	0,10	0,67	0,85	0,46	
	Zielfunktion:	peakRMS	1,85	1,10	0,90	1,16	0,95	0,85	0,85	1,14			

Kalibrierung - Pegel Seeache												
1. Durchlauf		Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.	
WA+EZG_MS	Clark UH - Storage Coefficient	HR	19,99	20,36	19,13	19,02	15,87	20,05	19,79	19,04	19,46	0,08
WA+EZG_MS	Clark UH - Time of Concentration	HR	4,24	4,43	0,98	1,52	0,85	5,21	4,53	2,92	2,97	0,63
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,27	0,30	3,99	0,79	0,35	0,85	0,43	1,12	0,61	1,16
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	13,26	13,64	13,61	14,11	6,00	13,47	13,31	12,35	13,54	0,23
WA+EZG_MS	Recession - Initial Discharge	M3/S	1,76	2,30	2,58	0,51	2,67	2,87	1,41	2,06	2,44	0,41
WA+EZG_MS	Recession - Ratio to Peak		0,67	0,56	0,93	0,13	0,98	0,37	0,24	0,53	0,46	0,61
WA+EZG_MS	Recession - Recession Constant		0,79	0,72	0,92	0,77	0,50	0,71	0,86	0,75	0,75	0,18
Zielfunktion:		peakRMS	4,71	2,63	2,11	1,94	0,72	0,52	2,11			
2. Durchlauf	rot gefärbte Parameter fixiert	Startwert	2013_06	1991_07	1985_08	2010_06	1995_09	1977_08	Mittel	Median	Var.koeff.	
WA+EZG_MS	Clark UH - Storage Coefficient	HR	19,04	19,04	19,04	19,04	19,04	19,04	19,04	19,04	0,00	0,00
WA+EZG_MS	Clark UH - Time of Concentration	HR	2,92	3,90	3,17	1,03	0,90	2,79	3,76	2,59	2,98	0,47
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Constant Rate	MM/HR	1,12	0,30	1,78	1,08	0,30	0,85	0,49	0,80	0,67	0,65
WA+EZG_MS	Initial and Constant - Initial Loss	MM	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	12,35	0,00	0,00
WA+EZG_MS	Recession - Initial Discharge	M3/S	2,06	3,54	2,13	4,92	4,99	1,93	0,51	3,00	2,84	0,54
WA+EZG_MS	Recession - Ratio to Peak		0,53	0,49	0,66	0,18	0,33	0,29	0,40	0,39	0,36	0,39
WA+EZG_MS	Recession - Recession Constant		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,00
Zielfunktion:		peakRMS	4,49	3,10	1,82	2,90	0,76	0,87	2,32			

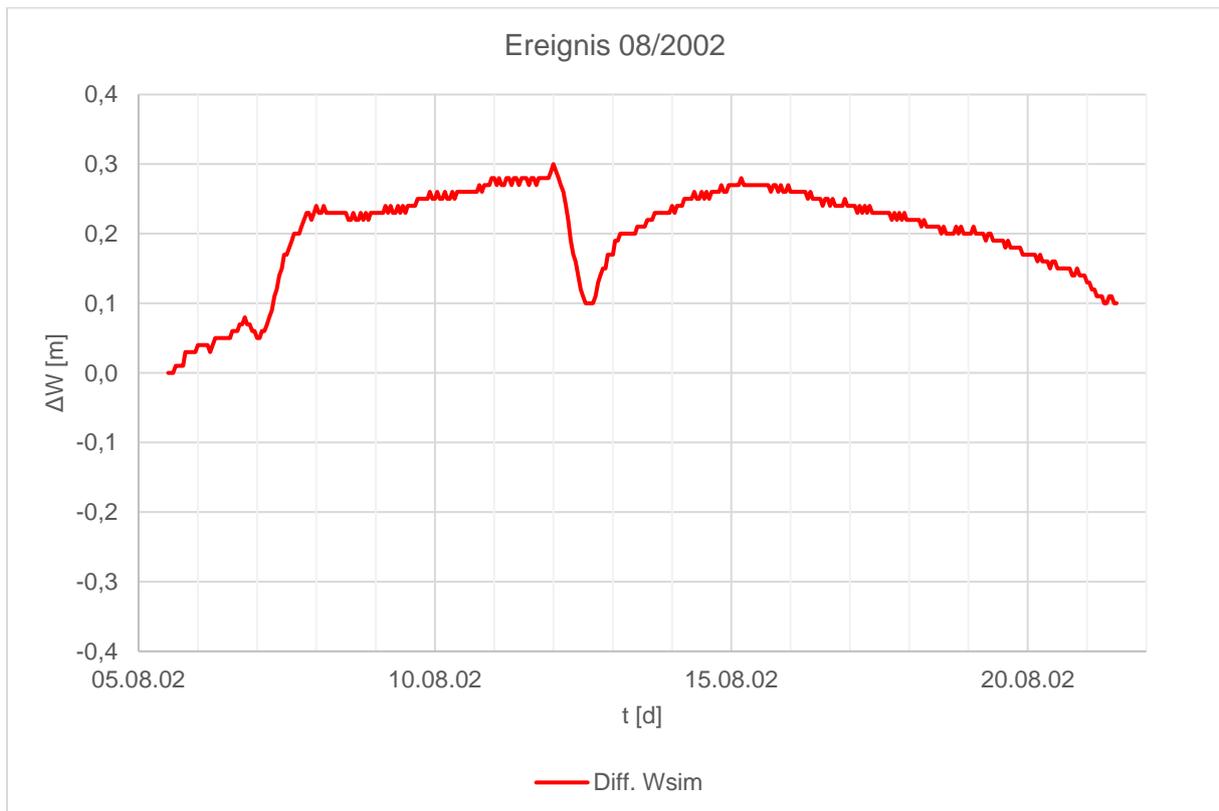
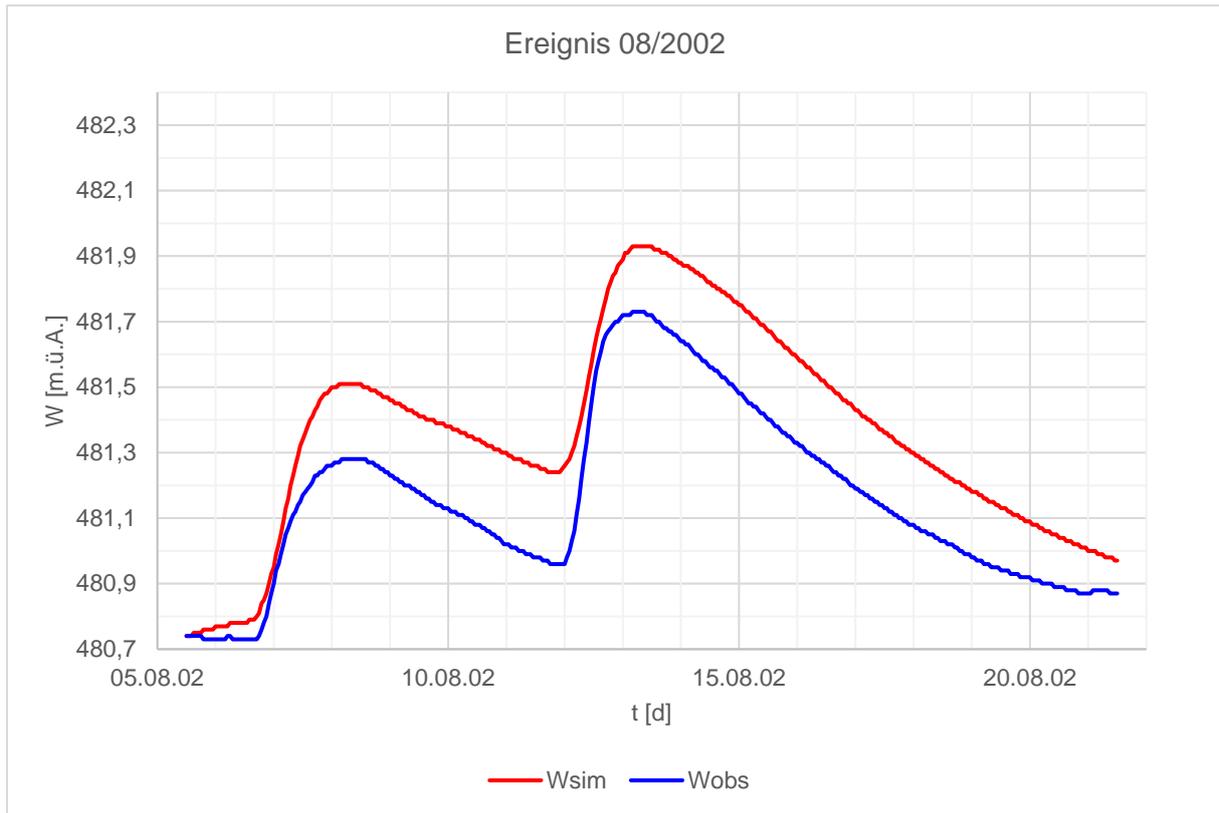
9.2 Validierung Wasserstandspegel Mondsee – Ganglinien und Residuen



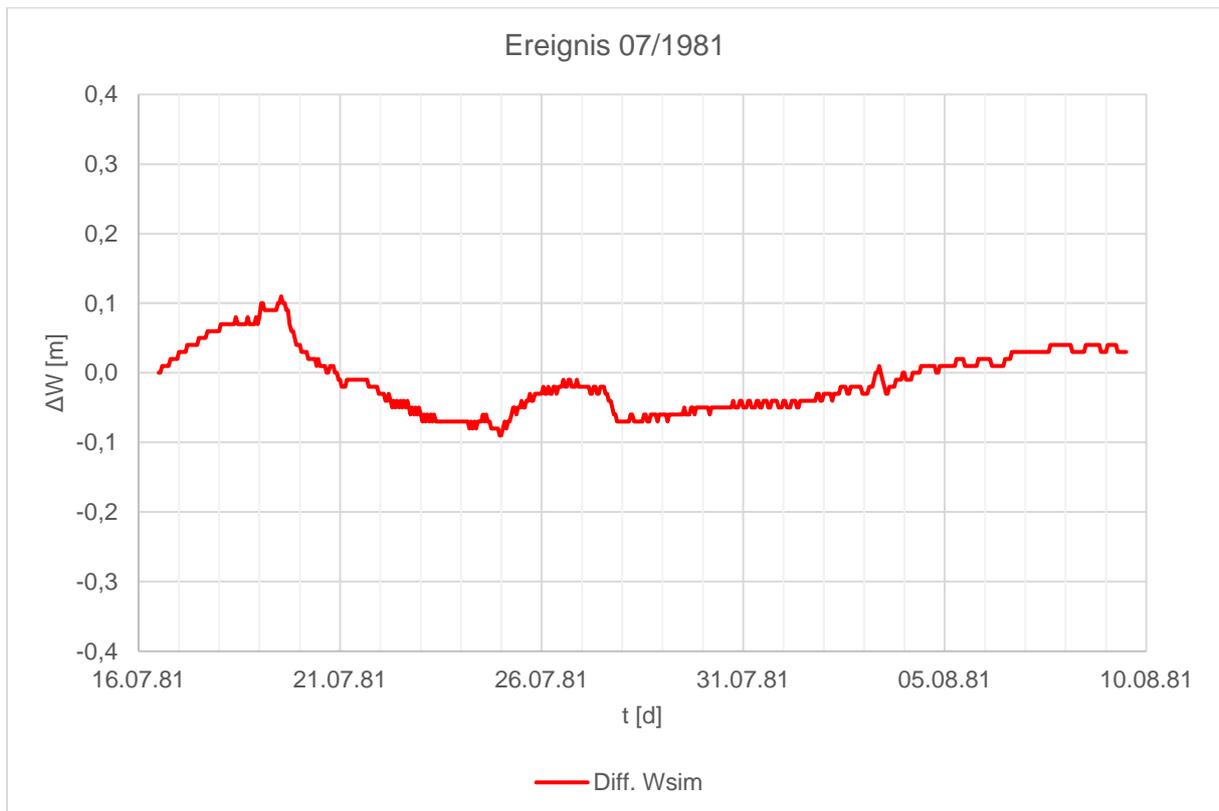
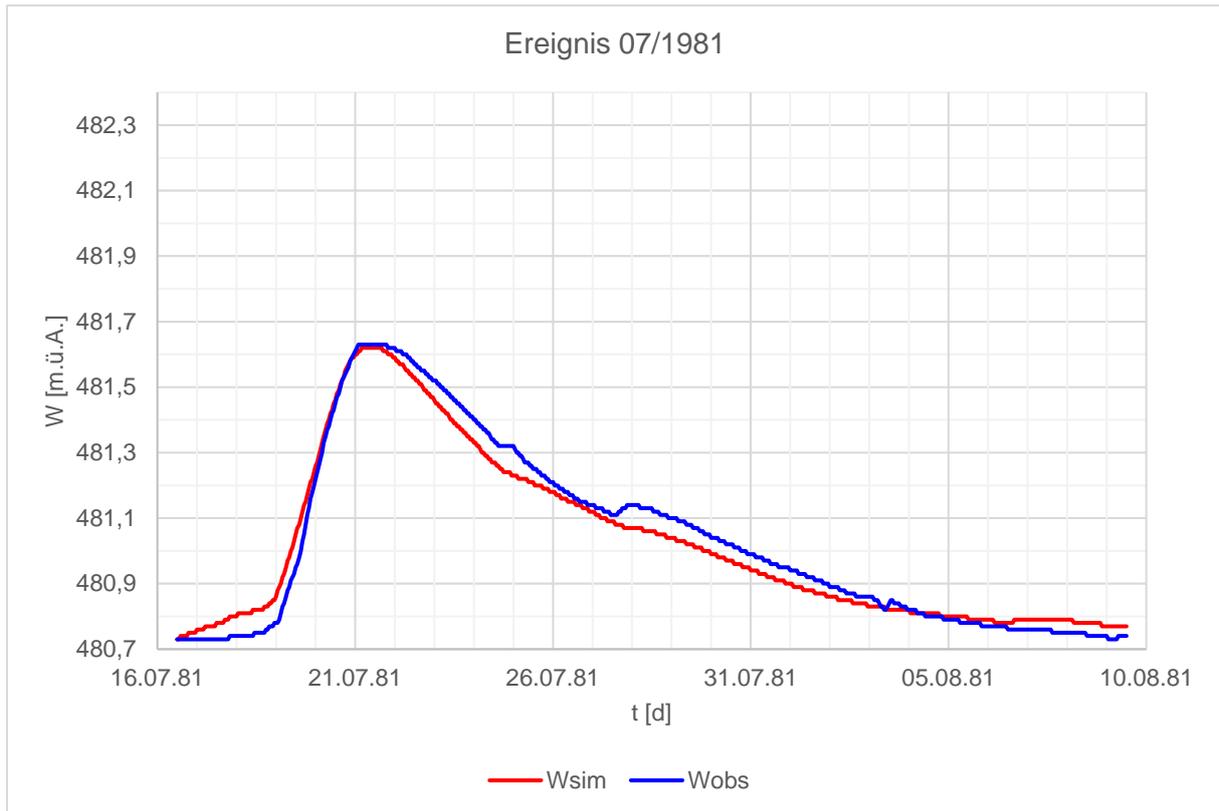
Anhang



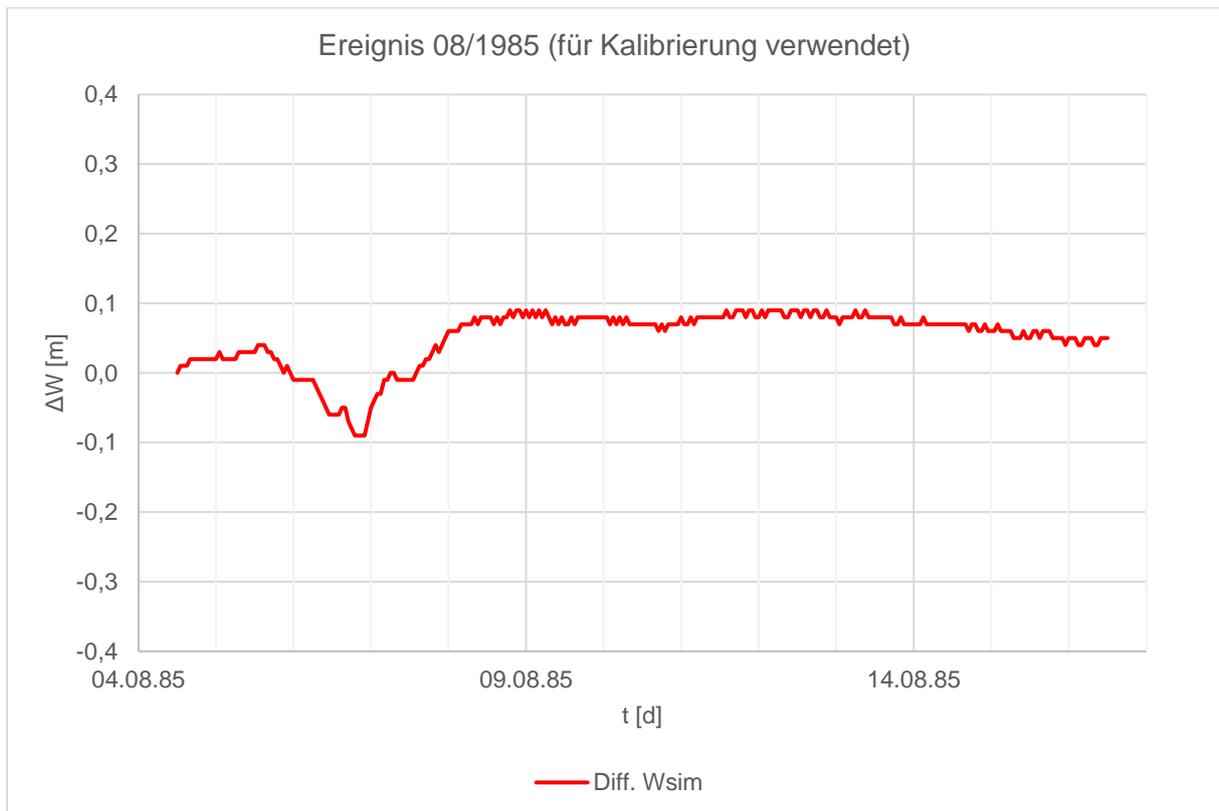
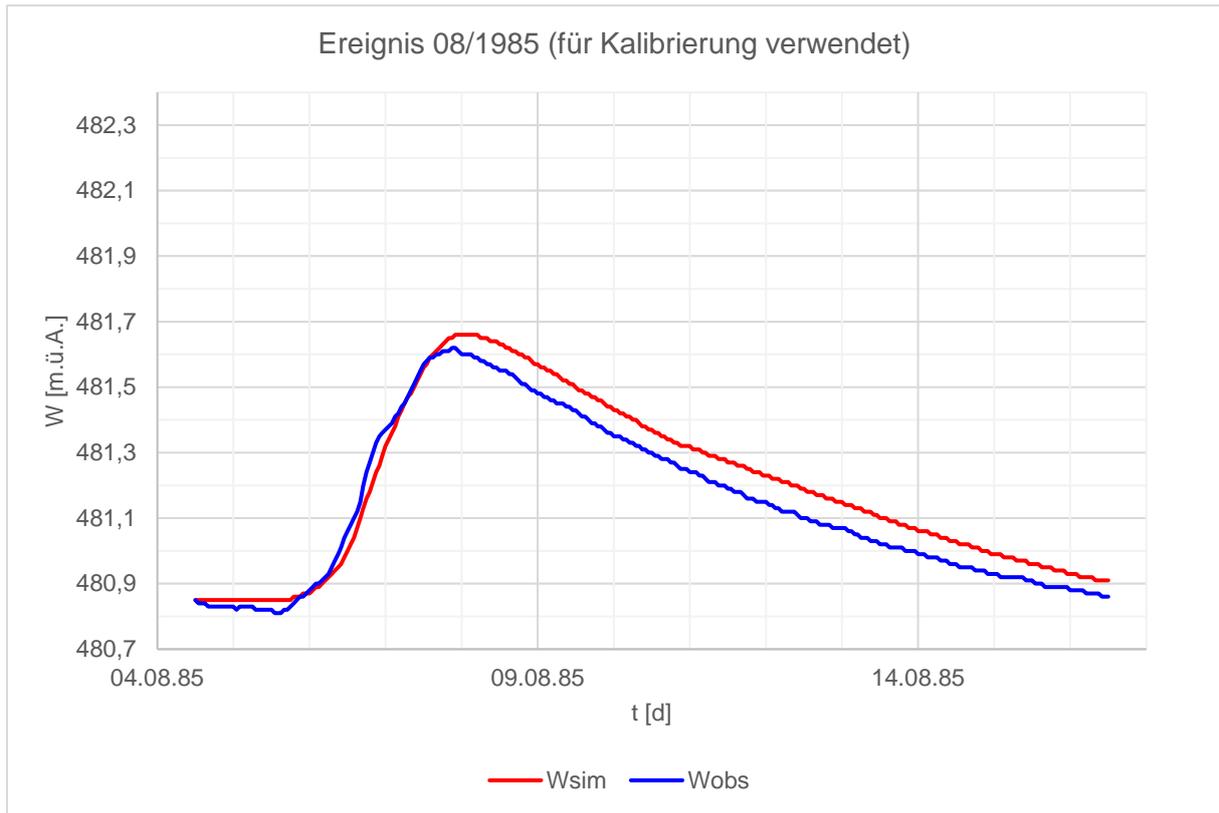
Anhang



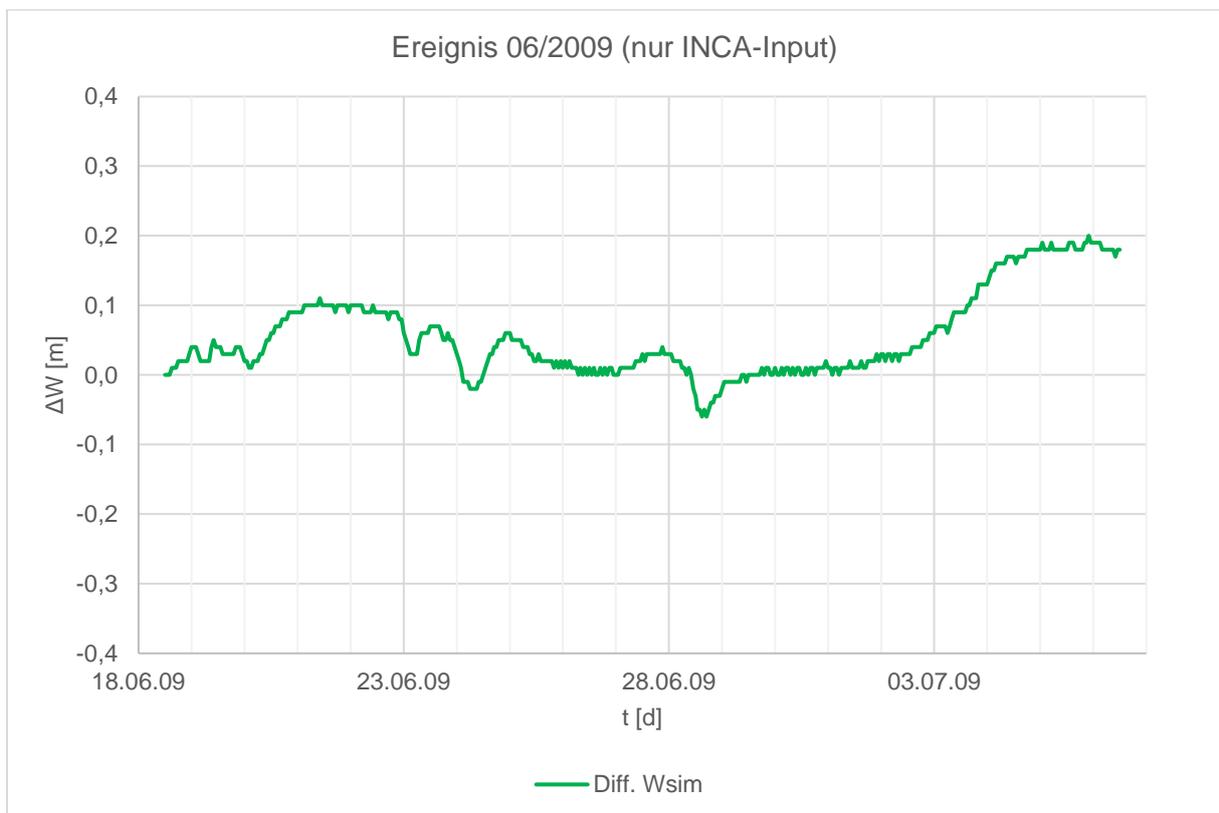
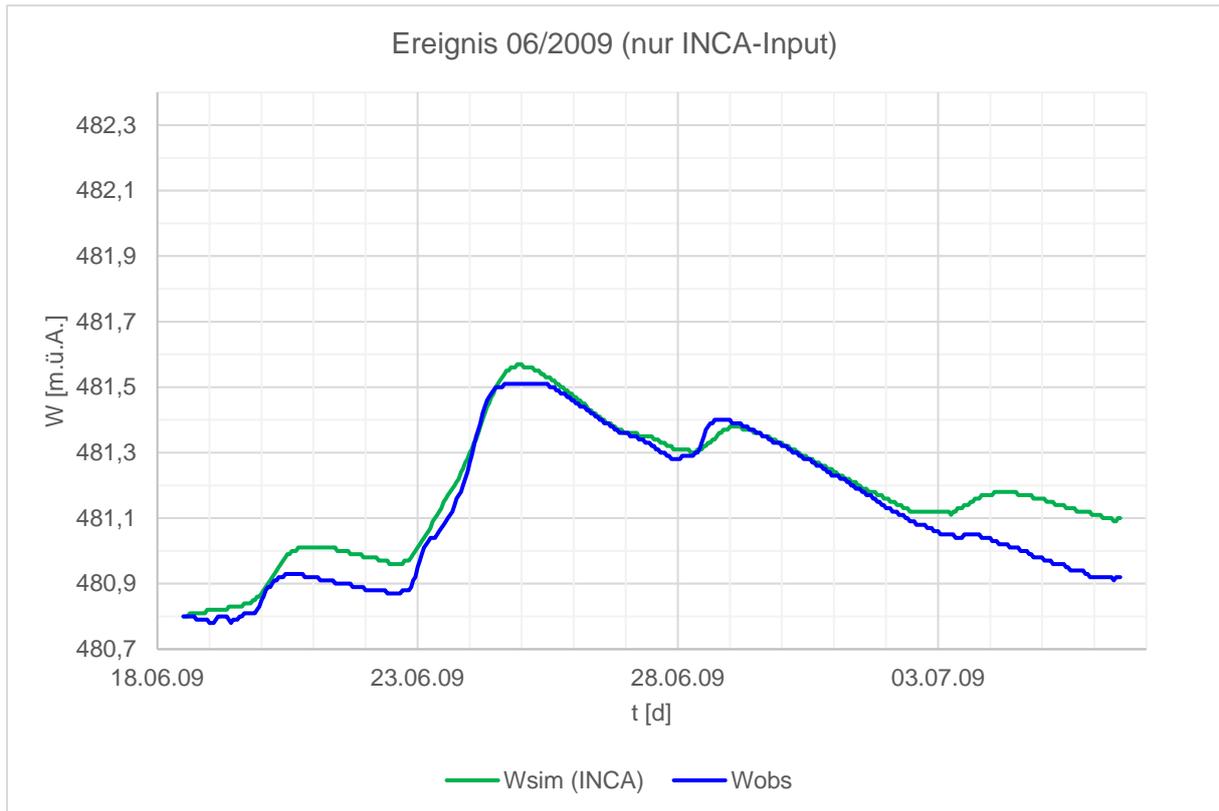
Anhang



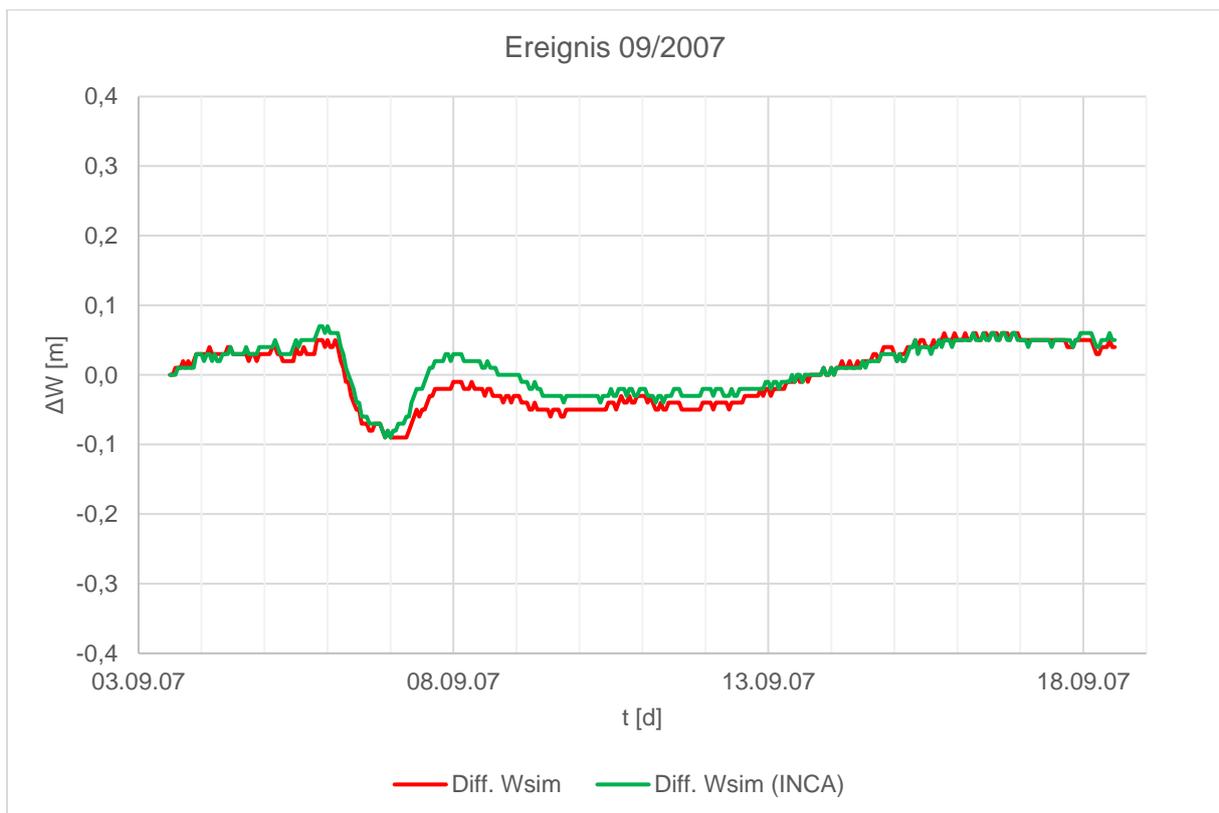
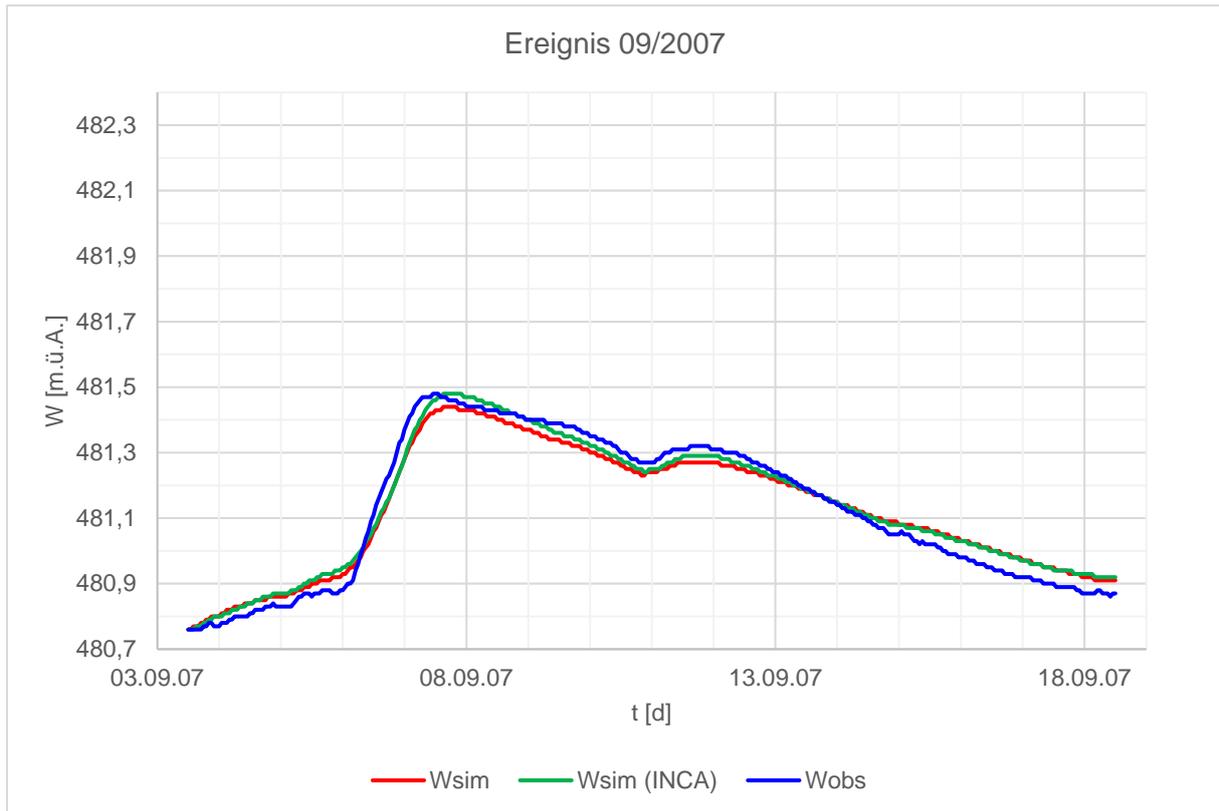
Anhang



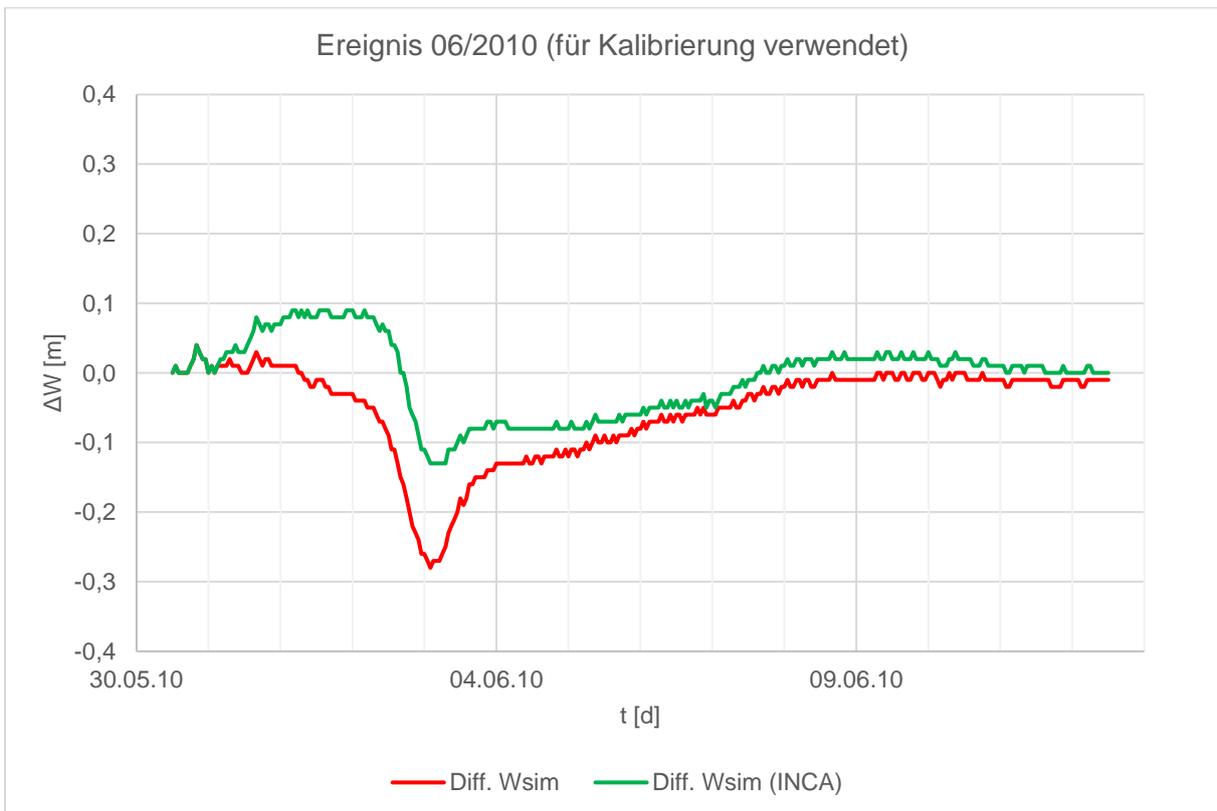
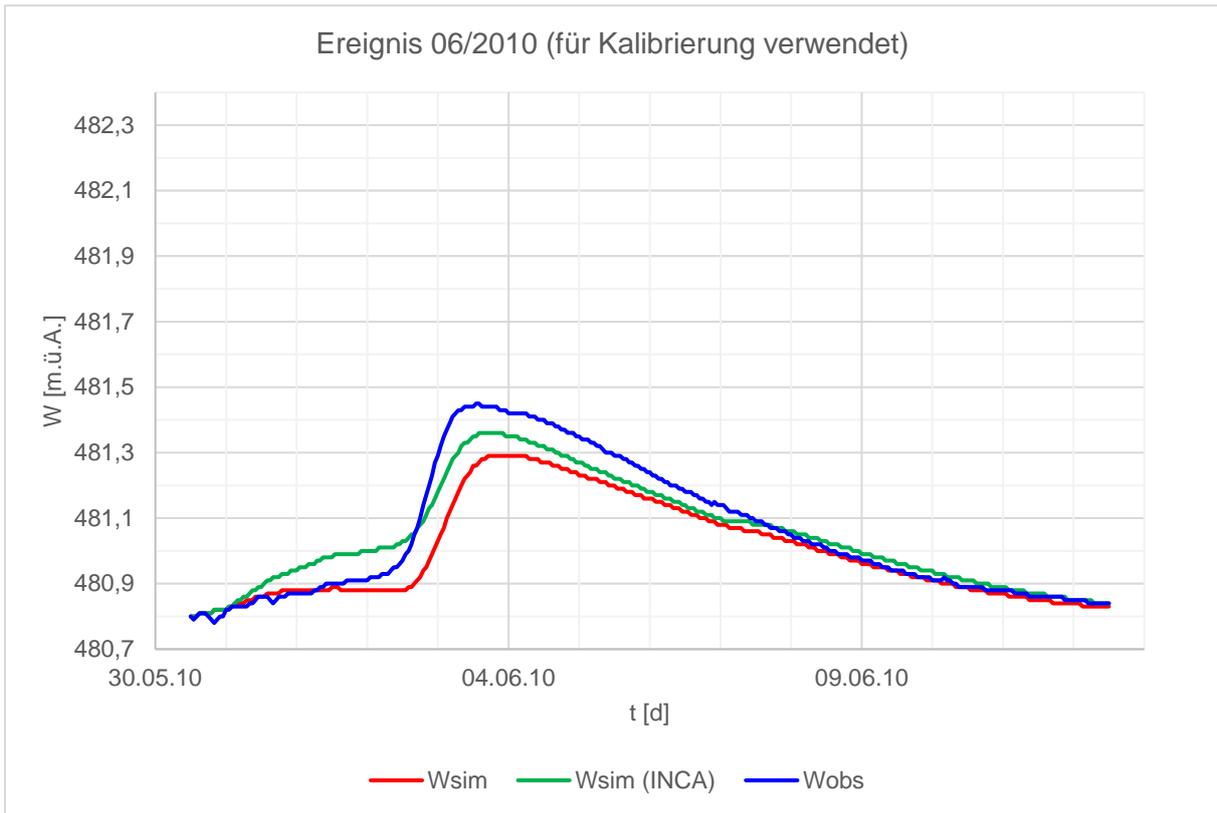
Anhang



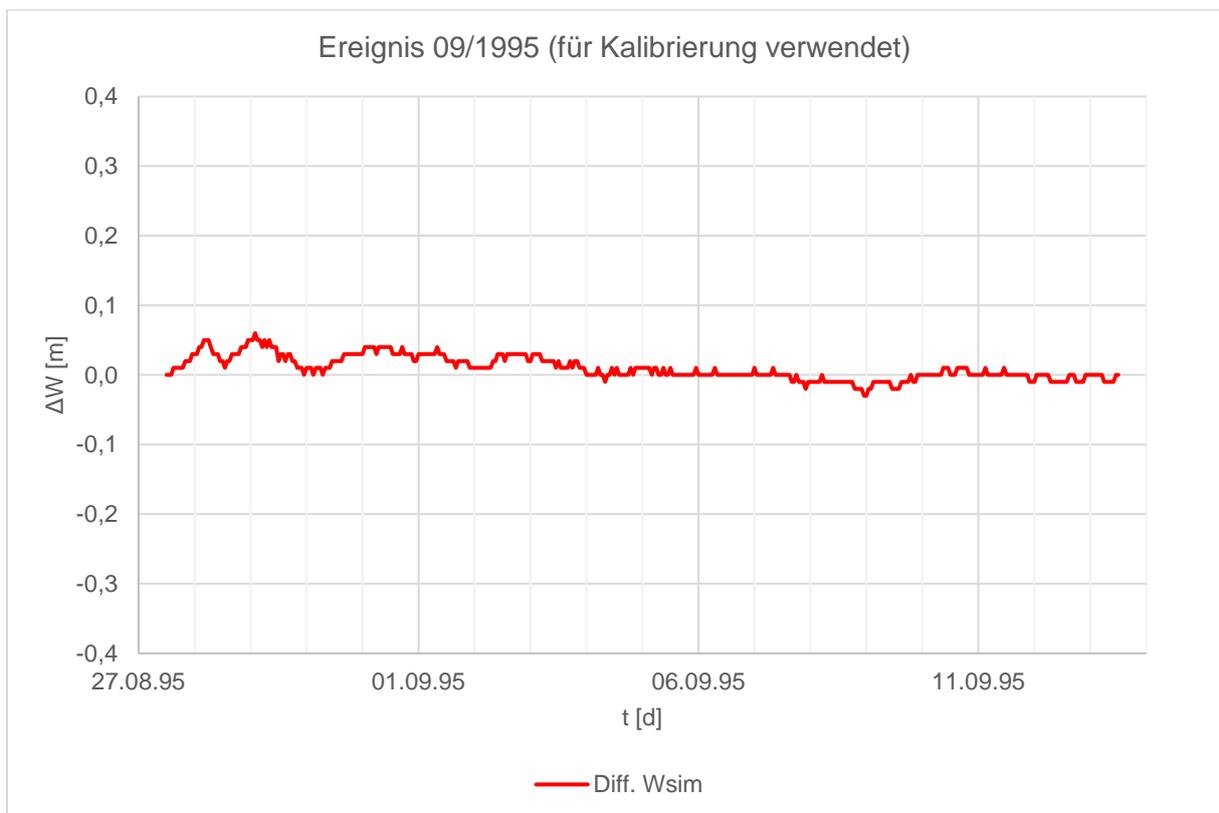
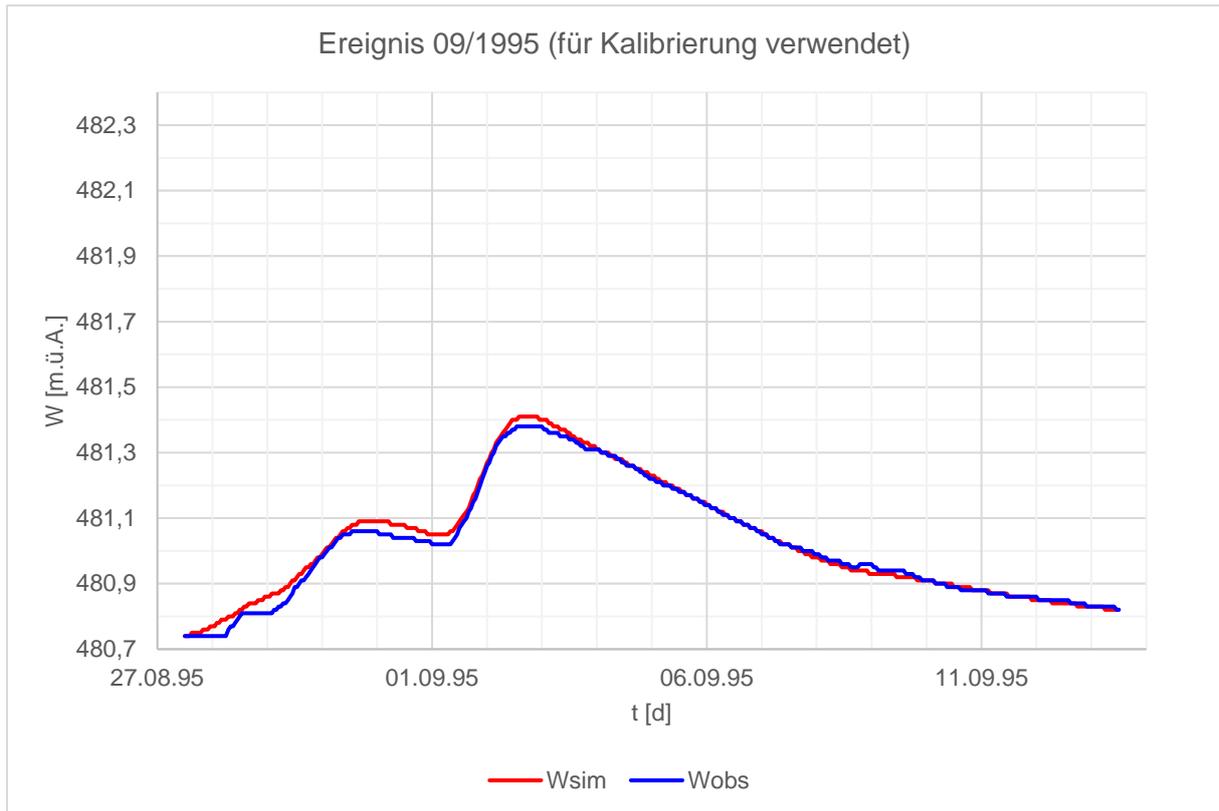
Anhang



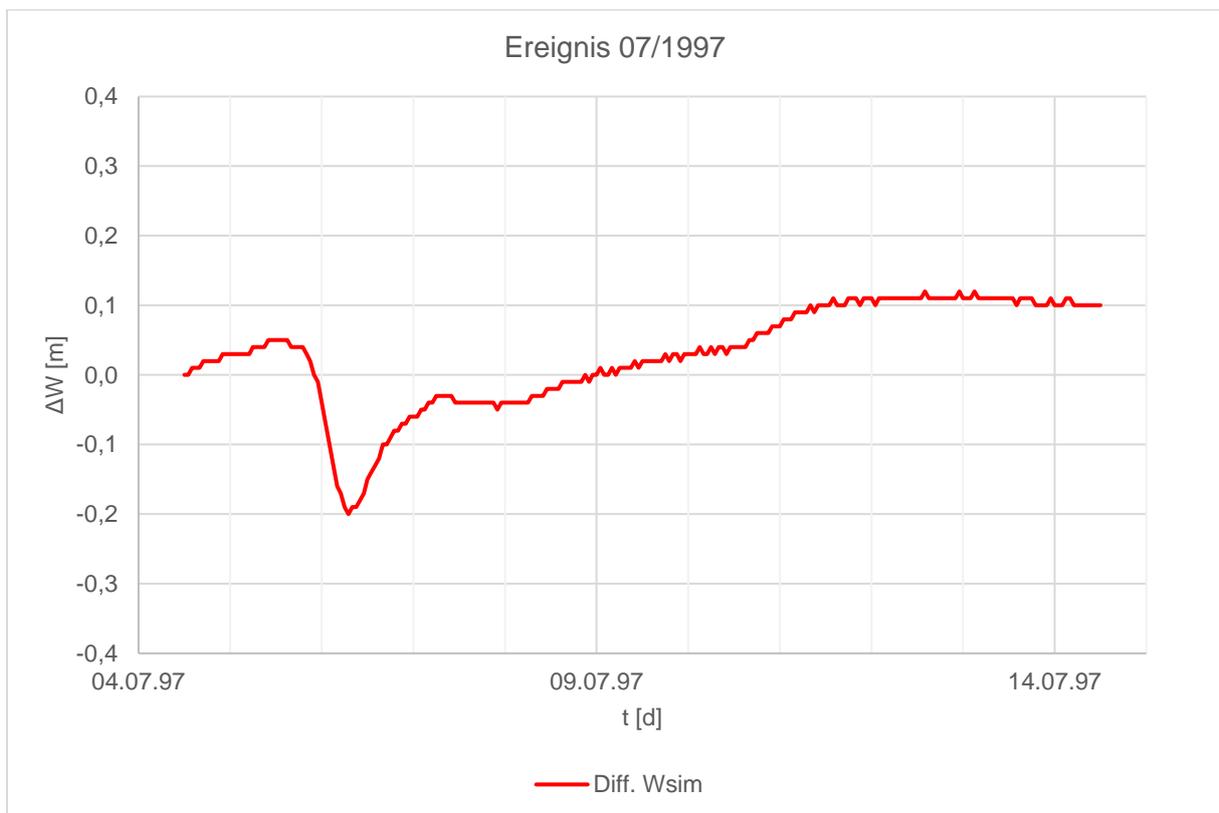
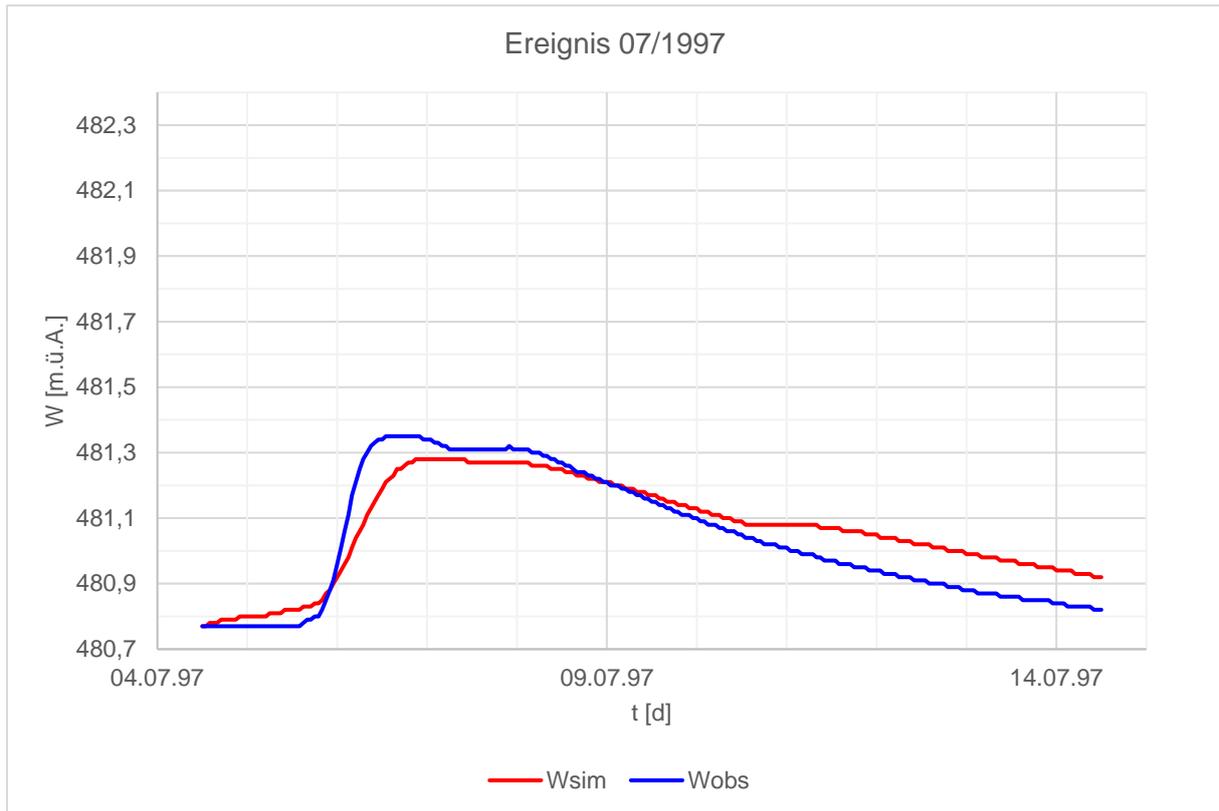
Anhang



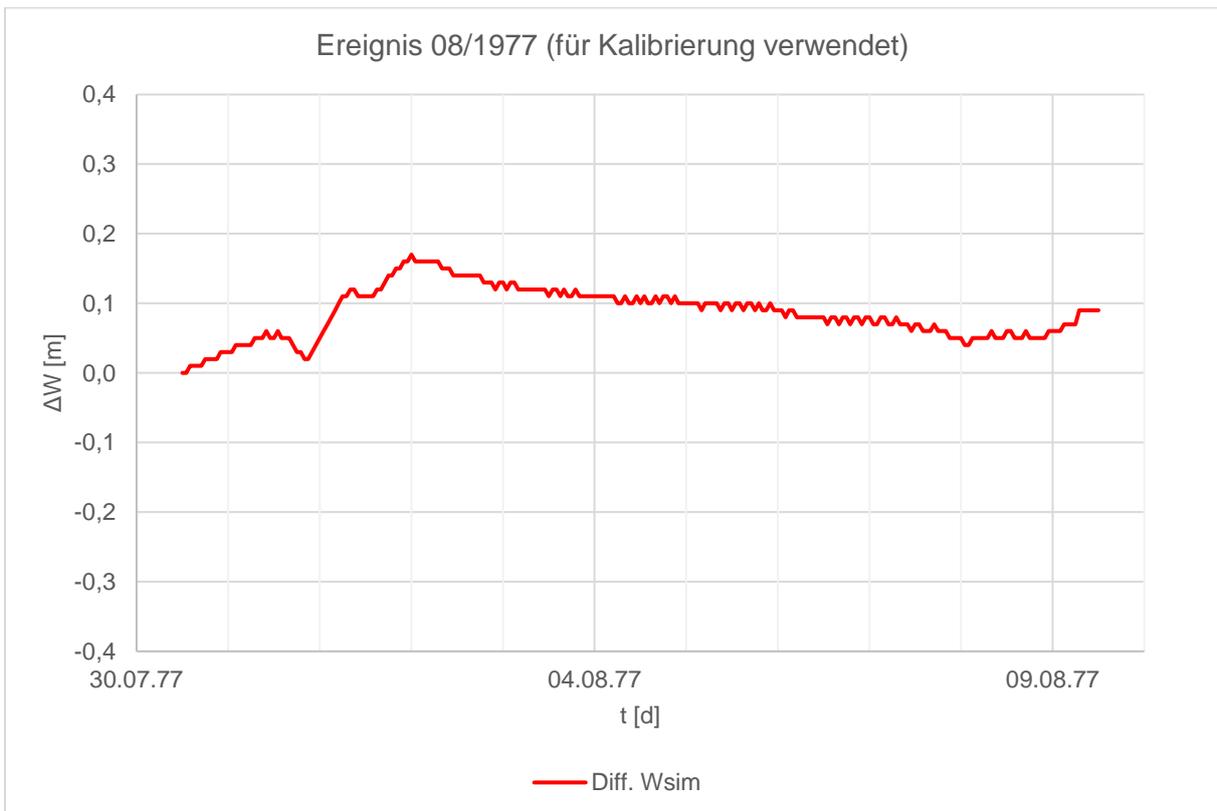
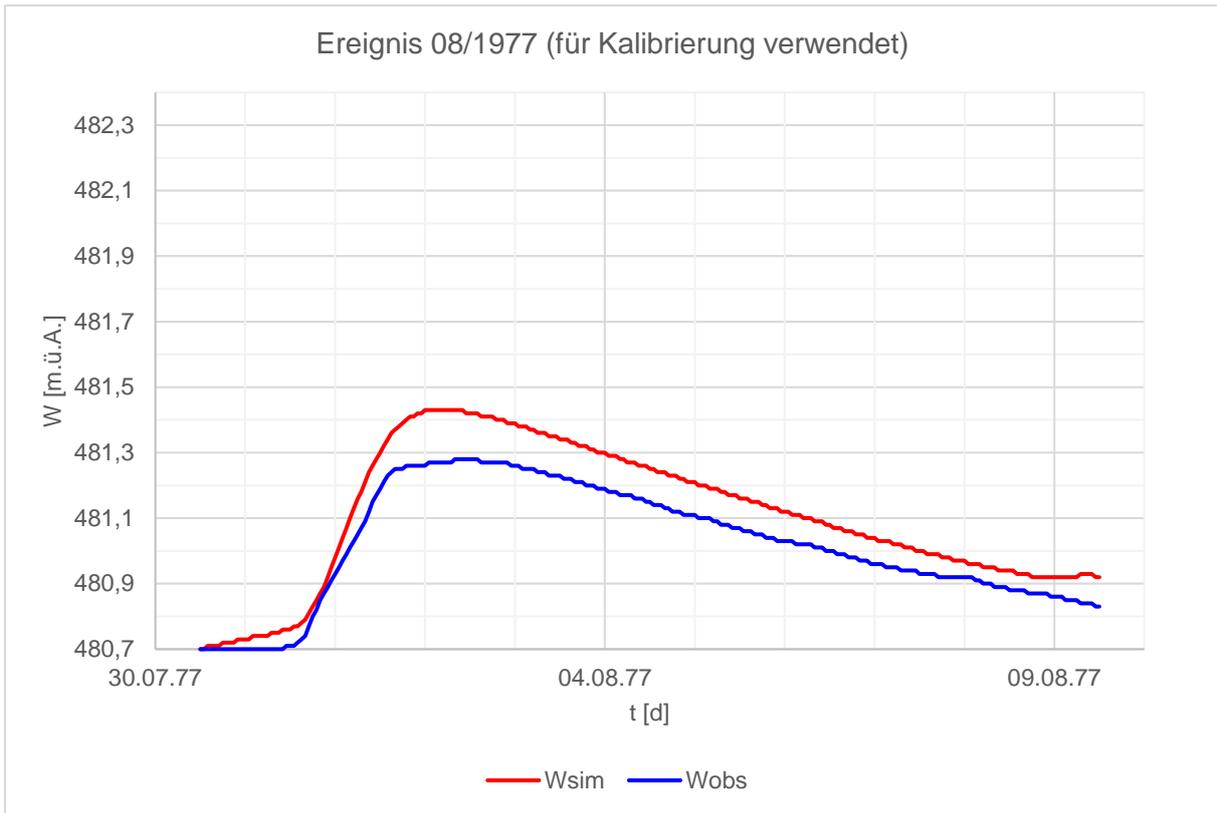
Anhang



Anhang



Anhang



Anhang

