

H87100 Institut für Alpine Naturgefahren

Vorstand: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

Betreuer/Betreuerin/BetreuerInnen:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

ERSTELLUNG EINES NIEDERSCHLAG-ABFLUSS MODELLS FÜR DEN
KEERBACH IN ST. AEGYD, NÖ

Masterarbeit zur Erlangung des Titels Diplom-Ingenieur
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von

Richhard Wansch, BSc

Wintersemester 2019/20

Danksagung

Bedingt durch meine lange Studiendauer hatte ich lange Zeit darüber nachzudenken wem ich an dieser Stelle danken will und in welcher Form. Ich schulde viel Dank und ich schulde ihn vielen Menschen, weshalb ich diese Schulden nur persönlich begleichen werde können.

Die Dankesworte an dieser Stelle widme ich den beiden Personen, denen ich nicht mehr persönlich danken kann:

Meiner Großmutter Herta Posch und meinem Großvater Harald Posch

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wird ein Niederschlag-Abfluss-Modell für den Keerbach in St. Aegyd, NÖ erstellt. Der Keerbach eignet sich für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit, da er über ein Messgerinne verfügt, das seit 2014 vom Institut für Angewandte Naturgefahren (IAN) der BOKU betreut wird. Es liegen Niederschlags- und Abflussdaten in hoher zeitlicher Auflösung (5-Minuten Intervalle) vor, sodass eine Kalibrierung von Modellen und ein Vergleich der Güte von unterschiedlichen Berechnungsansätzen möglich ist.

Die Berechnungen werden in der vorliegenden Arbeit mit HEC-HMS durchgeführt, um zu ermitteln wie gut das Abflussgeschehen des untersuchten und ähnlicher Einzugsgebiete mit der frei zugängliche Software nachgebildet werden können.

Die Modellierung der Abflussbildung erfolgte mithilfe des SCS CN-Verfahrens, wobei die herkömmliche Annahme einer Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,20$ und die neue Empfehlung eines Wertes von $\lambda = 0,05$ verglichen wurden. Hinsichtlich der Rückrechnung der CN-Werte aus beobachteten Daten waren die Ergebnisse bei der Verwendung von $\lambda = 0,20$ geringfügig besser, die Anfangsverluste konnten allerdings mit der Annahme von $\lambda = 0,05$ deutlich exakter vorhergesagt werden.

Für die Modellierung der Abflusskonzentration wurden die in HEC-HMS implementierten Einheitsganglinien Snyder-UH, SCS-UH und Clark-UH verglichen. Hierbei wurden die besten Ergebnisse mit dem Clark-UH-Verfahren erzielt.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1.	Problemstellung	1
1.2.	Zielsetzung	2
2.	Einzugsgebiet	4
2.1.	Topographie.....	6
2.2.	Landnutzung	8
2.3.	Boden	8
2.4.	Geologie	12
3.	Datengrundlage	14
3.1.	Niederschlag.....	14
3.1.1.	Niederschlagsmessung allgemein	14
3.1.2.	Qualitätsprüfung von Niederschlagsdaten	15
3.1.3.	Niederschlagsdaten für das Einzugsgebiet.....	16
3.2.	Abfluss.....	18
3.2.1.	Abflussmessung allgemein.....	18
3.2.2.	Qualitätsprüfung von Abflussdaten.....	20
3.2.3.	Abflussdaten für das Einzugsgebiet	22
4.	NA-Modelle.....	28
4.1.	Allgemein	28
4.2.	Ereignisbezogene Modelle	31
4.3.	HEC-HMS	33
4.4.	Ereignismodelle für die Abflussbildung in HEC-HMS	36
4.4.1.	Verlustatenverfahren.....	36
4.4.2.	SCS-CN Verfahren.....	37
4.5.	Ereignismodelle für die Abflusskonzentration in HEC-HMS.....	49
4.5.1.	User Specified UH.....	49
4.5.2.	Snyder UH.....	49
4.5.3.	SCS UH	52
4.5.4.	Clark UH	59
5.	Modellanwendung.....	65
5.1.	Kalibrierung	65
5.2.	Auswahl Ereignisse.....	68

5.3.	Modellierung der Abflussbildung	74
5.3.1.	Verlustartenverfahren.....	74
5.3.2.	CN-Verfahren.....	74
5.4.	Modellierung der Abflusskonzentration	87
5.4.1.	Snyder UH	88
5.4.2.	SCS UH	92
5.4.3.	Clark UH	98
5.4.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	101
6.	Literaturverzeichnis.....	103
7.	Abbildungsverzeichnis	105

1. Einleitung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung eines Niederschlag-Abfluss-Modells für den Schindlergraben, einen Quellbach des Keerbaches, wobei ausschließlich der Reinwasserabfluss betrachtet wird.

In den späten 1970er Jahren entstanden erste Pläne, in Teilen des Keerbacheinzugsgebietes hydrologische Untereinzugsgebiete einzurichten. Unter anderem wurde hierfür ein Messgerinne mit Pegelschreiber am Ahornboden beim Auslass des Schindlergrabens errichtet, das im Jahr 2014 vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich (HD NÖ) an das Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der BOKU übergeben wurde. Anlässlich der Übernahme durch das IAN wurden die Messeinrichtungen des Gerinnes umgebaut und erweitert, sodass ab 2015 für folgende hydrologischen und meteorologischen Größen Messreihen in fünfminütiger Auflösung vorliegen:

- Wasserstand
- Niederschlag
- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit

1.1. Problemstellung

Die Planung von Bauwerken der Wildbach- und Lawinenverbauung setzt die Festlegung eines Bemessungsereignisses für die Dimensionierung voraus, wobei in der Regel ein Ereignis mit einem Wiederkehrintervall von mindestens 100 Jahren gewählt wird, dem das geplante Bauwerk standhalten soll.

Der Ermittlung des Bemessungsereignisses kommt eine hohe Bedeutung zu, hierbei wird zwischen rückwärts- bzw. vorwärtsgerichteter Indikation unterschieden.

Rückwärtsgerichtete Indikation

- Historische Methode: Auswertung von Berichten, Zeugenaussagen und Chroniken

- Morphologische Methode: Interpretation der Geländemorphologie, insbesondere von Ablagerungen in Form von „Stummen Zeugen“
- Empirisch-statistische Methode: Auswertung von gemessenen oder rückgerechneten Daten

Vorwärtsgerichtete Indikation

- Numerisch-mathematische Methode: Vereinfachung der hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet und Darstellung als mathematisches Modell
- Physikalische Methode: Durchführung von hydraulischen Modellversuchen

Grundsätzlich empfiehlt sich je nach Datenlage eine Kombination von mehreren Methoden, wobei die vorwärtsgerichtete Indikation in der Wildbachverbauung selten zum Einsatz kommt, da die physikalische Methode sehr aufwändig und nur auf die Nachbildung von bestimmten Gerinneabschnitten oder Schutzbauwerken beschränkt ist und für die numerisch-mathematische Methode aufgrund fehlender Niederschlags- und Abflussmessungen meist die Datengrundlage zur Kontrolle der Modellparameter fehlt (Bergmeister et al., 2009).

Diese Datengrundlage ist für das Einzugsgebiet des Keerbaches allerdings durch die Messungen am Messgerinne Ahornboden gegeben, weshalb sich die Möglichkeit bietet ein NA-Modell zu erstellen und mit den beobachteten Abflusswerten zu kalibrieren. Dadurch können auch wertvolle Informationen darüber gewonnen werden, welche der gängigen Modellansätze sich am besten eignen, um Bemessungshochwässer für hydrologisch ähnliche Einzugsgebiete zu ermitteln, für die keine Beobachtungsdaten vorliegen.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es unter Ausschöpfung der gegebenen Datenlage ein mathematisches NA-Modell zu erstellen, welches das hydrologische Verhalten des Einzugsgebietes beim Ablauf von Hochwasserwellen bestmöglich darstellt.

Die Berechnungen erfolgen mithilfe der Software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling Software), die aufgrund der freien Verfügbarkeit und des beachtlichen Funktionsumfangs weite Verbreitung in der Praxis findet.

Die in HEC-HMS enthaltenen Modelle für Abflussbildung und -konzentration werden hinsichtlich der theoretischen Grundlagen und der Umsetzung in HEC-HMS untersucht und vergleichsweise auf das Einzugsgebiet angewendet.

2. Einzugsgebiet

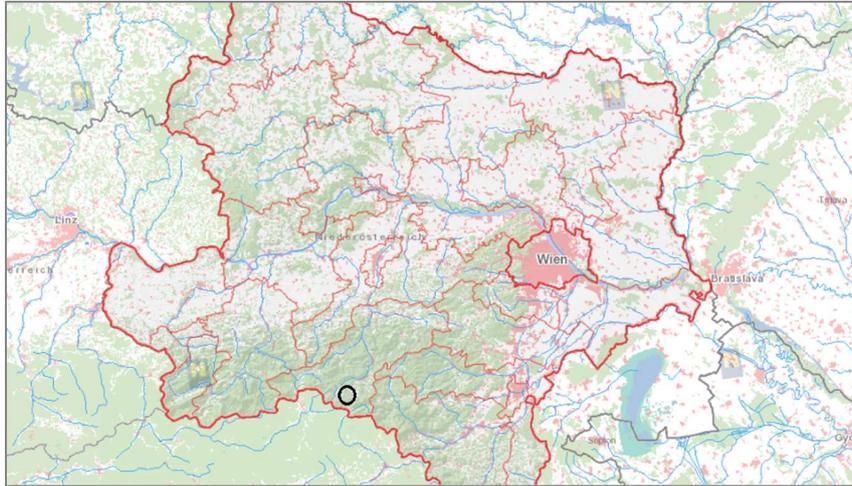


Abbildung 1: Übersichtskarte mit markierter Lage des Untersuchungsgebietes (Quelle: atlas.noe.gv.at, bearbeitet)

Der Keerbach ist ein Gebirgsbach in St. Aegyd in Niederösterreich (Bezirk Lilienfeld), der sich an seinem Ursprung aus zehn Quellbächen zusammensetzt. Einer dieser Quellbäche ist der Schindlergraben (oder Großer Göllersbach), auf der Nordseite des Göllers. Im Ort St. Aegyd am Neuwalde mündet der Keerbach in die Unrecht Traisen, die wiederum bei Lehenrotte in die Traisen mündet.

Aus den Quellgräben des Keerbaches wird eine große Menge an Geschiebe in Form von Jungschutt antransportiert wodurch in den Mündungsbereichen die Gefahr von Anlandungen und Bachaustritten entsteht. Um diesen Gefahren zu begegnen wurde im Jahr 1924 begonnen die Quellgräben mit Schutzbauwerken zu verbauen. (Forstliche Bundesversuchsanstalt)

Der Gebietsauslass für das Einzugsgebiet, das in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, liegt am sogenannten Ahornboden, am oberen Teil des Schwemmkegels des Schindlergrabens.



Abbildung 2: Lage des Einzugsgebietes in der ÖK 250 (Quelle: www.amap.at)

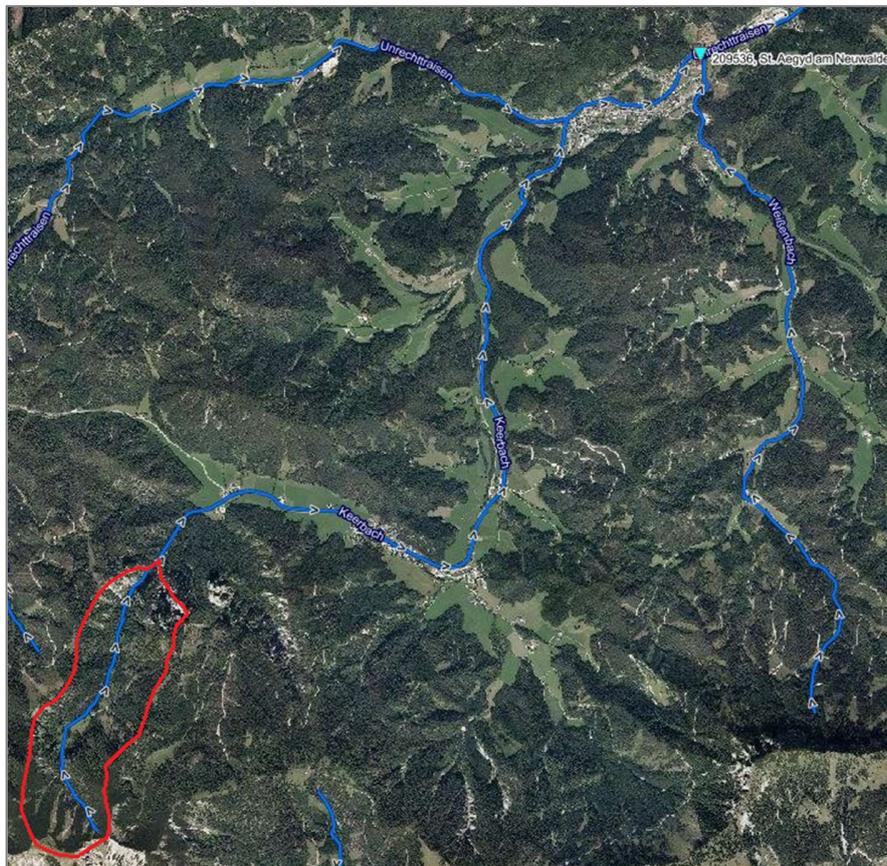


Abbildung 3: Orthofoto mit eingezeichnetem Einzugsgebiet und Flusslauf (Quelle: ehyd.gv.at, bearbeitet)

2.1. Topographie

Der Schindlergraben stellt, wie die anderen Quellgräben des Keerbaches, ein steiles Hochtal dar, das durch die tektonische Störung des Keertales gekappt ist.

Im oberen Teil des Einzugsgebietes bilden der markante Gipfelgrat des Göllers (1.766 m) im Süden, dem Gsenger (1.442 m) im Westen und dem oberen Bereich des Hochwaldriegels im Osten einen Kessel, der durch die Einhänge im Bereich des Hochwaldriegels eine gebogene Form erhält. Auf den Ablagerungen am Boden dieses Kessels, auf einer Seehöhe von ca. 1.211 m, befindet sich die Schindleralm mit einer Ausdehnung von ca. 0,13 km². Im Bereich der Schindleralm ist kein Gerinne ausgebildet, der Abfluss erfolgt hier unterirdisch.

Unterhalb der Schindleralm schließt der Schindlergraben an, der einen langgestreckten Verlauf in nahezu nord-südlicher Richtung aufweist und durch den Hochwaldriegel im Osten und den parallel dazu verlaufenden Breiten Boden im Westen begrenzt wird.

Der Talausgang im Norden stellt eine steile Klammstrecke dar, die sich aus der Einengung durch die Feuersteinmauer im Westen und die Felsentürme des Hochortgrabens im Osten bildet.

Der Hochortgraben ist ein enger, steiler Felsenkessel, der über den gleichnamigen Wildbach entwässert wird. Dieser mündet knapp vor dem Messegerinne am Ahornboden in den Schindlergraben, sodass sein Abfluss vom Messgerinne am Ahornboden noch erfasst wird.

Im Ganzen gesehen ergibt sich somit ein langgestrecktes, orographisch klar abgegrenztes Einzugsgebiet, wobei der Gerinneursprung sehr weit oben, im Bereich des Gipfelgrates des Göllers, liegt. Eine weitere Verästelung des Gewässernetzes im Einzugsgebiet ergibt sich in Form von Rinnsalen, die die Nordflanke des Göllers und die Westflanke des Hochwaldriegels entwässern.

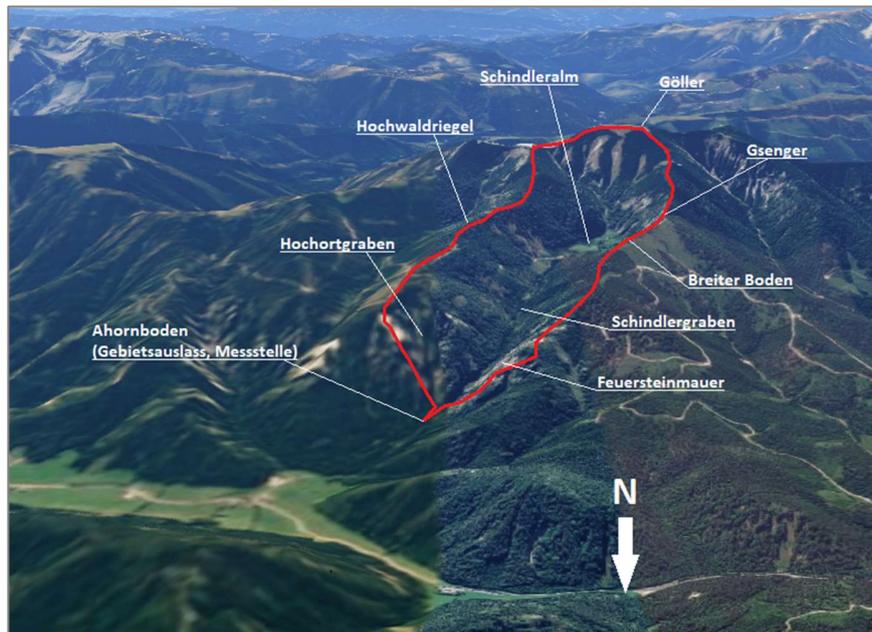


Abbildung 4: 3D-Ansicht des Einzugsgebietes (Quelle: maps.google.at, bearbeitet)

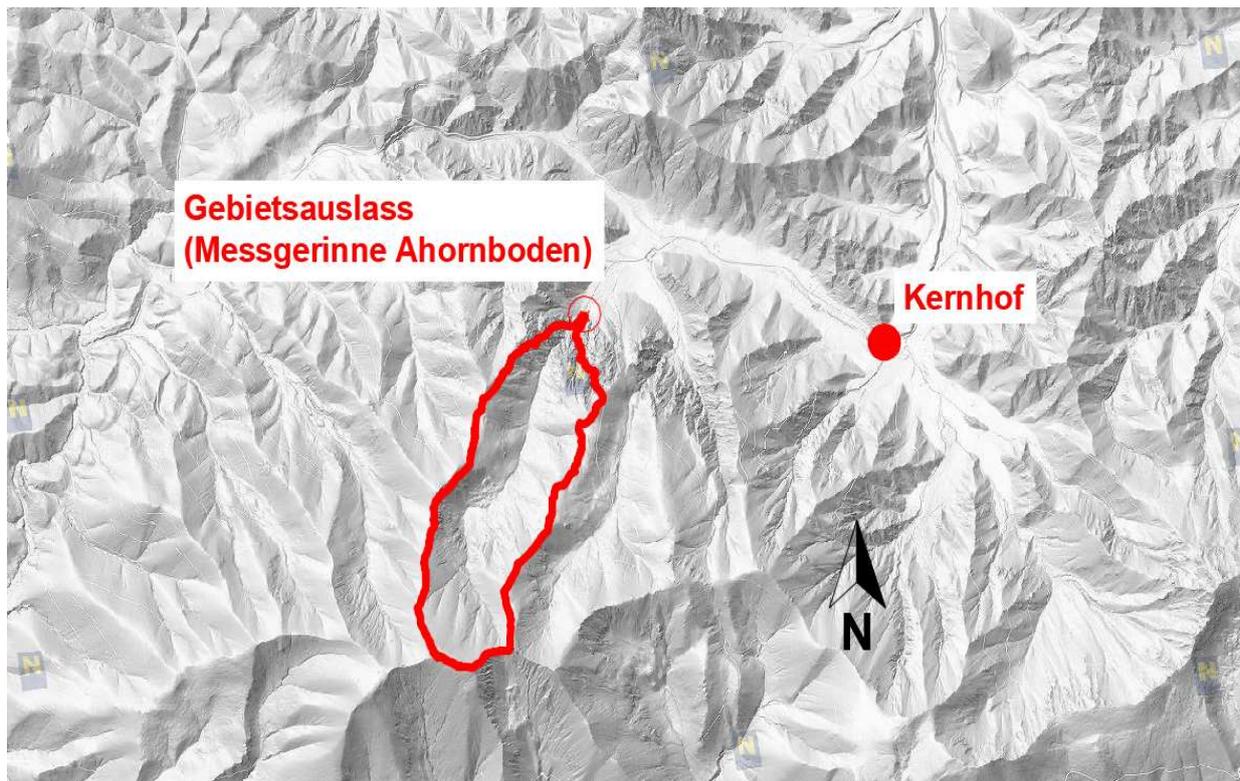


Abbildung 5: Reliefkarte des Einzugsgebietes aus Laserscandaten, Jahr der Befliegung: 2008 (Quelle: atlas.noe.gv.at)

2.2. Landnutzung

Der Großteil des Einzugsgebietes ist bewaldet und wird forstwirtschaftlich genutzt, lediglich im Bereich der Schindleralm befindet sich eine Mähwiese. Die Waldflächen bestehen aus Mischwäldern unterschiedlicher Stammzahl, wobei Lärchen und Fichten den Großteil des Bestandes ausmachen.

Die Abgrenzung der Nutzungsflächen erfolgte auf Basis des Orthofotos und wurde im Zuge mehrerer Feldbegehungen verifiziert. Für eine detaillierte Darstellung der Landnutzungsflächen im Einzugsgebiet wird auf Abbildung 30 in Kapitel 5.3.2 verwiesen.

2.3. Boden

Für die gegenständliche Aufgabenstellung ist in Bezug auf die Bodeneigenschaften hauptsächlich das hydrologische Verhalten des Bodens relevant, wobei vorrangig die hydraulische Durchlässigkeit von Bedeutung ist.

Da für das Einzugsgebiet keine anderen Daten vorhanden sind wurde für die Einschätzung der Bodenverhältnisse auf das Gutachten der Forstlichen Bundesversuchsanstalt von Dipl.-Ing. Ruf und die Eindrücke aus den Feldbegehungen zurückgegriffen.

Dipl.-Ing. Ruf beschreibt die Böden des Keerbachgebietes wie folgt: „Die Böden im Einzugsgebiet der Quellbäche des Keerbaches sind ausschließlich Rendsinen und infolge des Dolomituntergrundes und der Steilheit (Mittl. Neigung 55%) seichtgründig mit maximalen Mächtigkeiten von 30 - 50 cm.“ (Forstliche Bundesversuchsanstalt)

In Abb. 6 ist ein Ausschnitt der vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) frei zur Verfügung gestellten Bodenkarte für den Bereich des Einzugsgebietes dargestellt. Obwohl das Einzugsgebiet außerhalb des Erhebungsbereiches der Bodenkartierung liegt, kann in Zusammenschau mit der charakteristischen Reliefsequenz von Böden aus Kalkstein in Abb. 7 (Blum) und der oben angeführten Beschreibung von Ruf davon ausgegangen werden, dass der

maßgebliche Boden im Einzugsgebiet ein AC-Boden in Form eines flachgründigen Rendsina ist.

Diese Annahme ist auch konsistent mit den Eindrücken, die bei den Feldbegehungen am 15.09.2019 und am 03.12.2019 gewonnen wurden. Bei den Begehungen wurden an mehreren zugänglichen Standorten im Einzugsgebiet natürliche Bodenaufschlüsse in Form von Böschungsabbrüchen oder Uferkanten mit einem Spaten aufgearbeitet und das Bodenprofil optisch untersucht.

Drei charakteristische Profile sind in den Abbildungen 8 – 10 dargestellt. Die Profile zeigen einen skelettreichen A-Horizont mit einer Stärke von durchschnittlich ca. 20 - 30 cm, der auf einem mineralischen C-Horizont aus Festgestein (Profil in Abb. 8) oder Lockergestein aus Gerinneablagerungen (Profile in Abb. 9 und 10) aufliegt.

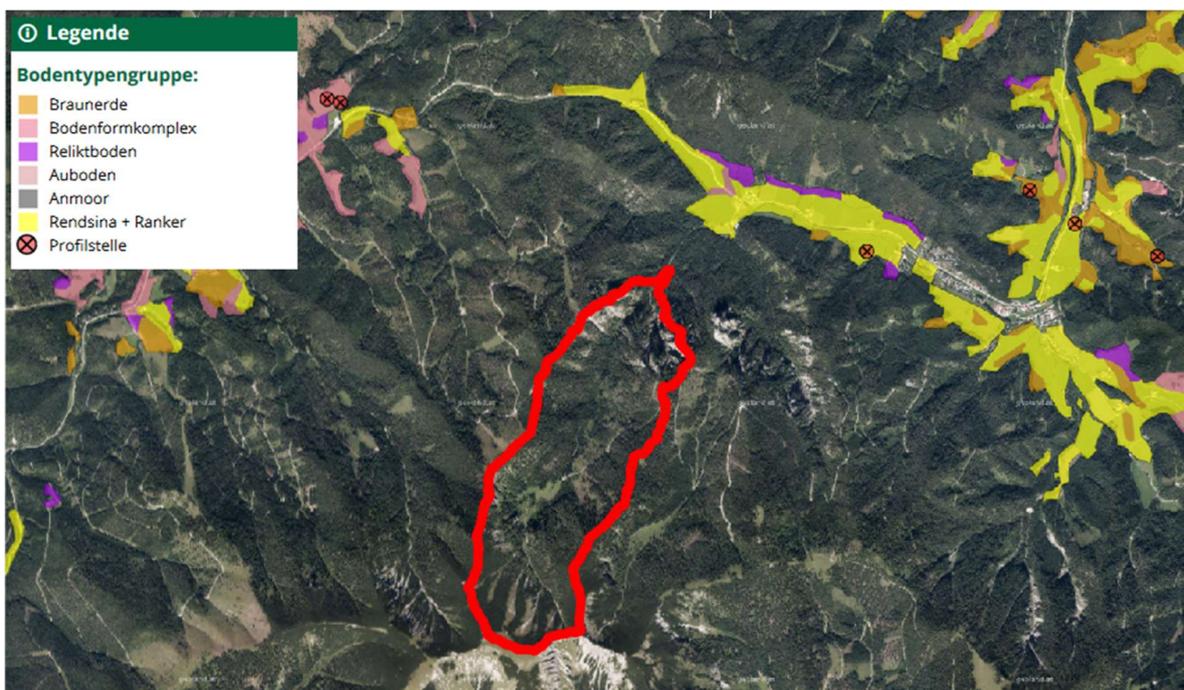


Abbildung 6: Ausschnitt der digitalen Bodenkarte (QUELLE: www.bodenkarte.at)

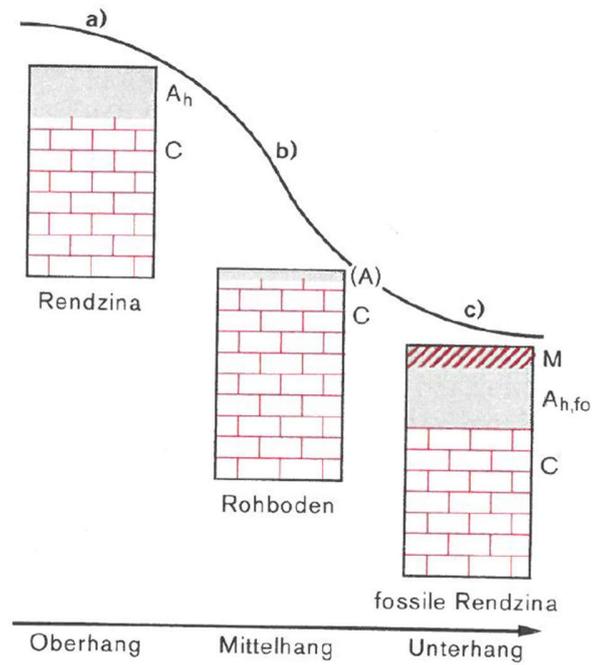


Abbildung 7: Reliefsequenz Kalkhaltiger Böden (QUELLE: BLUM, Bodenkunde in Stichworten)



Abbildung 8: Natürlicher Bodenaufschluss an der Uferkante des Schindlergrabens (15.09.2019)



Abbildung 9: Natürlicher Bodenaufschluss an der Uferkante eines Seitengrabens des Schindlergrabens im Bereich der Schindleralm (15.09.2019)



Abbildung 10: Bodenaufschluss am Böschungsabbruch neben einer Forststraße (15.09.2019)

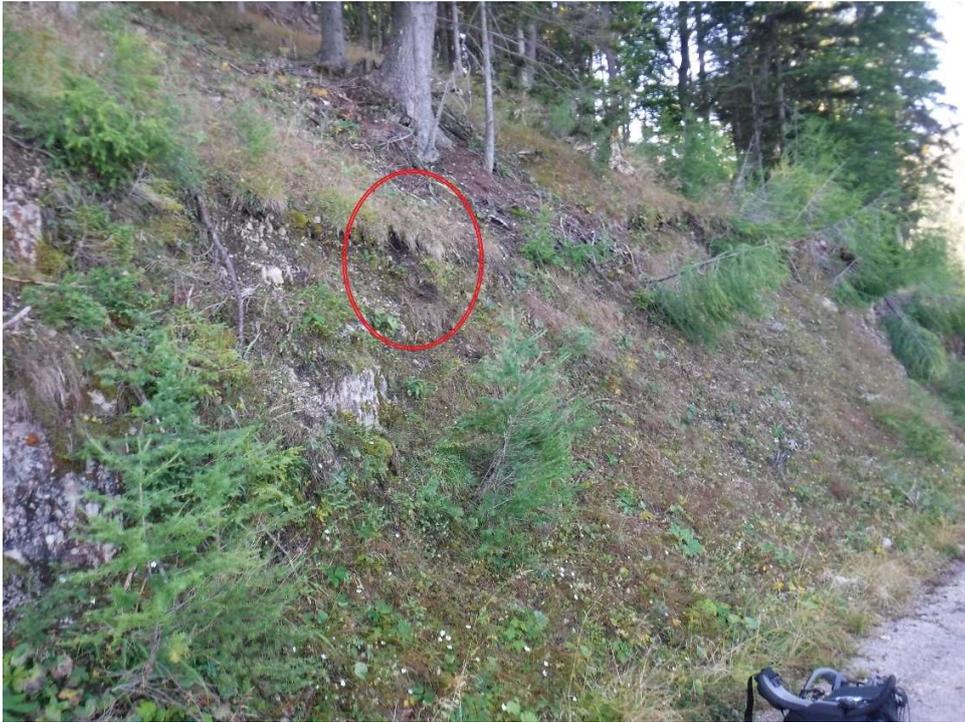


Abbildung 11: Lage des Bodenaufschlusses im Böschungsabbruch aus Abbildung 10 (15.09.2019)

2.4. Geologie

Die Geologie des Einzugsgebietes wird durch den Gebirgsstock von Gippel und Göller bestimmt, welcher gemäß der Einzugsgebietsbeschreibung von Ruf zum größten Teil aus Hauptdolomit und Ramsaudolomit besteht. (Forstliche Bundesversuchsanstalt)

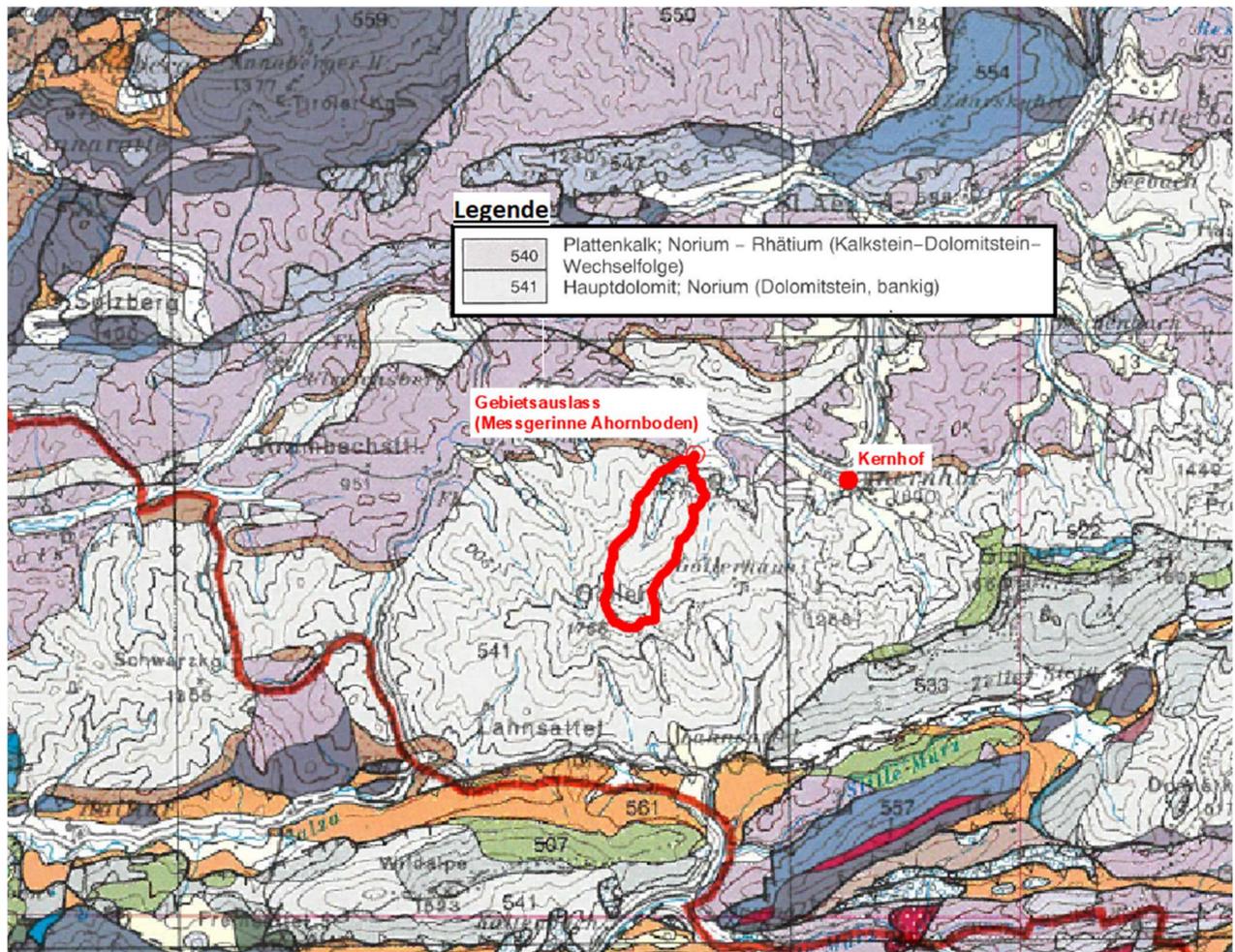


Abbildung 12: Ausschnitt aus der Geologischen Karte Niederösterreichs, 1:200.000 (QUELLE: Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000, Geologische Bundesanstalt, bearbeitet)

3. Datengrundlage

3.1. Niederschlag

Als Niederschlag werden alle Kondensationsprodukte des in der Atmosphäre gelösten Wasserdampfes bezeichnet, die die Erdoberfläche erreichen. (Maniak, 2010)

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell soll der Berechnung von Hochwasserabflussganglinien aus Regenereignissen dienen, weshalb die weiteren Ausführungen sich stets auf flüssigen Niederschlag in Form von Regen beziehen.

3.1.1. Niederschlagsmessung allgemein

Aufgrund der großen Bedeutung für die Landwirtschaft gehen die Anfänge der Regenbeobachtungen weit zurück, in Indien sind sie zum Beispiel seit 400 v.Chr. bekannt. In China werden seit 1247 nachweislich Auffangbehälter verwendet, die im Wesentlichen den heutigen entsprechen.

Die Methodik der systematischen Niederschlagsbeobachtung hat sich im Wesentlichen nicht verändert: An einer geeigneten Stelle wird ein Sammelbehälter mit genormter Auffangfläche aufgestellt, in dem der auftreffende Niederschlag gesammelt wird.

Beim sogenannten Ombrometer erfolgt die Ablesung des Behälterfüllstandes zu bestimmten Zeitpunkten, wobei beim Ombrographen oder Regenschreiber eine laufende Aufzeichnung erfolgt, wodurch die Regendauer und -intensität ermittelt werden kann.

Diese Aufzeichnung kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- Nach dem Schwimmerprinzip auf einer Schreibtrommel,
- nach dem Prinzip einer Kippwaage mittels eines digitalen oder analogen Zählwerkes,
- oder durch das Zählen von genormten Tropfen mithilfe eines Lichtschrankens.

Die Regenmessung mithilfe von Auffangbehältern weist den großen Nachteil auf, dass die Auffangfläche im Vergleich zur Niederschlagsfläche so gering ist, dass die Messungen im wesentlichen Punktwerte am Aufstellungsort der Behälter darstellen, aus

denen auf die flächenhafte Niederschlagsverteilung geschlossen werden muss. Die Umrechnung der Punktwerte auf Gebietsniederschläge kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- Durch die Multiplikation mit Reduktionsfaktoren,
- durch räumliche Interpolation, wobei je nach Datenlage und Aufgabenstellung eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung steht,
- oder durch Übernahme der Punktwerte als Flächenwerte ohne Korrektur.

In der vorliegenden Arbeit kommt die letztere Methode zur Anwendung, da im Untersuchungsgebiet nur von einer Messstation Daten mit ausreichender zeitlicher Auflösung und einem mehrjährigen Beobachtungszeitraum vorhanden sind. Aufgrund der geringen Größe des Einzugsgebietes kann davon ausgegangen werden, dass die Fehler, die durch diese Vereinfachung entstehen vernachlässigbar sind.

Es ist unvermeidlich, dass es bei der Niederschlagsmessung zum Auftreten von systematischen Messfehlern kommt. Zu diesen zählen:

- Windeinfluss,
- Haftwasser an der Auffangfläche,
- Verdunstung aus der Sammelkanne und
- Aufstellungsfehler.

Die Messfehler können im Monatsmittel 10 bis 40 % betragen, wobei die höheren Abweichungswerte in Monaten auftreten, in denen ein hoher Anteil des Niederschlages in Form von Schnee fällt. (Maniak, 2010)

Aufgrund der größeren Anzahl an Bauteilen sind Regenschreiber generell störungsanfälliger, weshalb in der Regel eine parallele Beobachtung mittels Regenmesser erfolgt, um die Werte des Regenschreibers an die des Regenmessers anpassen zu können. (Maniak, 2010)

3.1.2. Qualitätsprüfung von Niederschlagsdaten

Generell ist eine Prüfung der Messwerte unerlässlich. Bei Daten, die nicht aus eigenen Messungen stammten, ist zu eruieren ob die Prüfung bereits von Seiten des Datenlieferanten erfolgte.

So kann zum Beispiel bei Tages- und Monatssummen die vom Hydrographischen Dienst Österreich zur Verfügung gestellt werden davon ausgegangen werden, dass diese gut geprüft wurden. Bei höher auflösenden Daten erfolgte meist nur eine Prüfung auf Ausreißer. (ÖWAV-Arbeitsausschuss, 2018)

Grundsätzlich sollte die Prüfung zumindest folgende Schritte umfassen:

- Prüfung auf Ausreißer und Fehlwerte: Hierfür werden offensichtliche Ausreißer und Datenlücken anhand einer grafischen Darstellung der Niederschlagsdaten durch visuelle Prüfung gesucht. Die Prüfung auf Ausreißer, die vor allem bei zeitlich hochauflösenden Niederschlagsdaten von großer Bedeutung ist, kann zudem auch numerisch erfolgen.
- Vergleich zu Nachbarstationen: Wenn Niederschlagsdaten einer vergleichbaren Station in räumlicher Nähe vorliegen, kann mithilfe einer Doppelsummenlinie eine Überprüfung auf systematische Messfehler erfolgen. Hierfür wird ein Graph erstellt, indem die kumulierten Niederschlagssummen der einen Station auf der Abszisse, die der anderen auf der Ordinate aufgetragen werden. Wenn keine Fehler vorliegen sollte der Graph eine Gerade bilden, anderenfalls müssen Störungen im Geradenverlauf näher untersucht werden. Mögliche Ursachen für einen Knick in der Doppelsummenlinie sind zum Beispiel Stationsverlegungen, Änderungen des Messgerätes oder Änderungen in den Aufstellungsbedingungen. (ÖWAV-Arbeitsausschuss, 2018):

3.1.3. Niederschlagsdaten für das Einzugsgebiet

Eine grundlegende Anforderung an die Eingangsdaten eines Niederschlag-Abfluss-Modells ist, dass die zeitliche Auflösung der Daten jener des Modells entspricht. Diese ist wiederum von der Dynamik der darzustellenden Prozesse abhängig, wobei grundsätzlich die Berechnungszeitschritte so zu wählen sind, dass sie kürzer als die Reaktionszeit des Einzugsgebietes sind. Für kleine Wildbacheinzugsgebiete, wie das des Schindlergrabens, ergibt sich hieraus eine erforderliche zeitliche Auflösung im ein- bis fünfminütigen Bereich.

Messstelle Ahornboden

Beim Messgerinne am Gebietsauslass werden seit 2015 fortlaufend Messungen mehrerer hydrologischer und meteorologischer Größen mit fünfminütiger Auflösung durchgeführt, zu diesen zählt auch die Niederschlagsmessung mithilfe eines Ombrographen. Für die Erstellung dieser Arbeit standen die Messdaten für den Zeitraum vom 27.01.2015 um 13:05 Uhr bis zum 09.04.2018 um 13:15 Uhr zur Verfügung.

Die Daten vom Messgerinne lagen in Form einer tabellarisch formatierten Textdatei vor, wobei die Spalten die einzelnen Messgrößen und den jeweilige Messzeitpunkt enthielten und für jede Messung eine Zeile angelegt war. Die Spaltentrennung erfolgte in der Textdatei mithilfe von Beistrichen, sodass ein Datenimport in Microsoft Excel möglich war.

Messstelle Kernhof

Zudem befindet sich ca. 700 m vom Messgerinne entfernt, an der Talsohle des Keertales, die Messstelle Kernhof des Hydrographischen Dienstes Niederösterreich, bei der seit 1992 die Tageswerte für Niederschlag und Schneehöhe gemessen werden und seit 2005 zusätzlich Temperaturmessungen und fünfminütige Niederschlagsmessungen mithilfe eines Ombrographen durchgeführt werden. Die Datenreihen des Ombrographen wurden für den Zeitraum vom 22.06.2005 um 07:00 Uhr bis zum 24.04.2018 um 11:00 Uhr vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich zur Verfügung gestellt, die sonstigen Messwerte sind auf der Internetseite www.ehyd.gv.at frei erhältlich.

Die Datensätze des Hydrographischen Dienstes lagen ebenfalls als tabellarische Textdateien vor, wobei die ersten Zeilen jeder Datei die Stammdaten der jeweiligen Messstation, wie zum Beispiel Stationsnummer und Koordinaten, enthielten.



Abbildung 13: Lage der Messstellen

3.2. Abfluss

3.2.1. Abflussmessung allgemein

Die gängigste Methode zur dauerhaften Abflussmessung ist die Messung mithilfe von Pegeln unterschiedlichster Bauart, mit denen der Wasserstand im Messprofil erfasst wird. Hierbei handelt es sich um eine indirekte Messmethode, bei der der Abfluss aus dem gemessenen Wasserstand über eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung hergeleitet werden muss.

Diese Beziehung liegt für jeden Pegel in Form des sogenannten Pegelschlüssels vor und hat die Form einer mathematischen Gleichung, welche den Abfluss als Funktion des Wasserstandes darstellt.

Da die Wasserstands-Durchfluss-Beziehung von einer großen Anzahl an Einflussfaktoren abhängt, die für jeden Messpegel in seiner jeweiligen Situierung im Naturraum unterschiedlich ausgeprägt sind, muss der Pegelschlüssel für jeden Messpegel individuell ermittelt werden. Hierbei werden bei bestimmten Wasserständen Durchflussmessungen, zum Beispiel durch das Erstellen von Geschwindigkeitsprofilen,

vorgenommen, die durch Extra- bzw. Interpolation vervollständigt werden. Dies kann rein rechnerisch durch anpassen eines Polynoms an die Kontrollmessungen erfolgen, oder durch hydraulische Berechnungen oder Modellversuche unterstützt werden.

Im Folgenden werden die gängigsten Methoden zur Wasserstandsmessung vorgestellt.

Lattenpegel

Der Lattenpegel ist eine fest eingebaute Messlatte mit 1 cm- oder 2 cm-Einteilung nach Art einer Nievellierlatte. Er ist der wichtigste Bestandteil einer Messstelle und gleichzeitig das einfachste Messgerät, wobei die Ablesung und Dokumentation händisch durch einen Beobachter erfolgt. (Lecher, 2001)

Schwimmerschreibpegel

„Beim mechanischen Schwimmerschreibpegel wird die Höhe des Wasserstandes durch einen Schwimmer erfasst und über ein dünnes Seil mit Gegengewicht auf eine Seilrolle übertragen. Die Seilrolle setzt eine Spindel (evtl. mit Umkehr) in Bewegung. Diese Bewegung wird auf eine Schreibfeder übertragen, die auf Diagrammpapier, das auf einer durch ein Uhrwerk angetriebenen Trommel aufgespannt ist, die Wasserstandsganglinie, das *Limnigramm*, aufzeichnet.“ (Lecher, 2001)

Der Schwimmerschreibpegel misst den Wasserstand nicht direkt im Gerinne, sondern in einem sogenannten Schwimmerschacht, der über eine Verbindungsleitung mit dem Gerinne verbunden ist. Dies bewirkt, dass kurzfristige Wasserstandsänderungen im Gerinne, die zum Beispiel aufgrund von Wellengang auftreten, gedämpft werden, allerdings besteht die Gefahr der Verlandung des Zuflussrohres. (Lecher, 2001)

Pneumatikpegel

Beim Pneumatikpegel wird über ein Dosierventil an der Gerinnesohle ein Gas (z.B. gereinigter Stickstoff) in das Gerinne eingepert. Der Druck, der hierfür in der Druckübertragungsleitung aufgebracht werden muss dem hydrostatischen Druck über dem Dosierventil, der wiederum vom Wasserstand abhängig ist. Die Druck- bzw. Wasserspiegelschwankungen werden laufend auf einer Schreibertrommel erfasst. (Lecher, 2001)

Elektrooptische Distanzmessung

Die elektrooptische Distanzmessung ermöglicht eine direkte Messung des Wasserstandes, wobei es durch die berührungsfreie Methode zu keiner Beeinflussung des Wasserstandes kommt.

Hierbei wird an einem festen Punkt in ausreichendem Abstand über dem Gerinne (zum Beispiel an einer Brücke) ein elektrooptisches Distanzmessgerät angebracht, das in regelmäßigen Abständen eine Distanzmessung durchführt und die Messdaten auf einem digitalen Datenträger speichert. Wenn die Höhe des Befestigungspunktes des Distanzmessgerätes bekannt ist, kann die Wasserspiegellage aus der Distanzmessung einfach durch Differenzbildung ermittelt werden.

3.2.2. Qualitätsprüfung von Abflussdaten

In Österreich erfolgt die systematische Erhebung von Abflussdaten in der Regel durch Pegelmessungen des Hydrografischen Dienstes oder von privaten Messstellenbetreibern. (ÖWAV-Arbeitsausschuss, 2018)

Wie bei der Niederschlagsmessung besteht auch bei der Abflussmessung eine große Bandbreite an möglichen Fehlerquellen, die eine sorgfältige Prüfung von Pegeldata vor deren Weiterverarbeitung erforderlich machen.

Zunächst ist darauf zu achten, ob Beeinflussungen der Messungen, wie zum Beispiel durch Eis oder Verkrautung vorliegen und ob es im Messzeitraum zu Besonderheiten wie baulichen Änderungen oder einer Verlegung der Messstelle kam. Im hydrografischen Jahrbuch von Österreich werden hierzu Anmerkungen in Form von Fußnoten angelegt. (ÖWAV-Arbeitsausschuss, 2018)

Für die Qualitätsprüfung der Abflussdaten nennt das ÖWAV-Regelblatt 220 Niederschlag-Abfluss-Modellierung mehrere Schritte die nachfolgend beschrieben werden.

Prüfung auf Fehlwerte und fehlerhafte Werte:

Fehlwerte bzw. fehlerhafte Werte können zum Beispiel durch fehlerhafte Ablesungen, Ausfallen eines Sensors, Hängenbleiben eines Schwimmers, etc. auftreten.

Die Prüfung erfolgt durch die grafische Darstellung der Messwerte als Ganglinie, Vergleich mit Kontrollmessungen und Plausibilisierung anhand anderer Messgrößen wie Niederschlag oder Lufttemperatur.

Die Füllung von Datenlücken kann mithilfe von Kontrollmessungen, redundanten Wasserstandsaufzeichnungen oder Rekonstruktion von Ersatz-Datenreihen aus Regressionsbeziehungen zu anderen Messstellen erfolgen.

Prüfung auf systematische Fehler:

Eine Möglichkeit für die Prüfung auf systematische Fehler ist der Vergleich der Abflussdaten mit denen von benachbarten Pegelmessstellen. Hierbei werden im Zuge einer Bilanzierung die Abflussspenden der Ober- und Unterliegerpegel sowie der Zwischeneinzugsgebiete errechnet und verglichen. Unterschiede sollten dem regionalen Trend entsprechen bzw. aus den Gebietseigenschaften erklärbar sein.

Eine weitere Möglichkeit stellt eine Plausibilitätsprüfung dar, bei der die Abflusswerte eines Jahres mit jenen einer Vergleichsreihe oder des gesamten Beobachtungszeitraums unter Berücksichtigung von möglichst ähnlichen Niederschlagsverhältnissen verglichen werden.

Prüfung auf fehlerhafte Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen:

Zur Ermittlung des Pegelschlüssels sind Durchflussmessungen bei verschiedenen Wasserständen, oder, bei geometrisch einfachen Profilen, hydraulische Berechnungen nötig, um den Wasserständen im Profil die jeweiligen Durchflusswerte zuordnen zu können.

Da Durchflussmessungen bei extremen Abflussverhältnissen ungenau oder gar unmöglich sind, und Durchflussmessungen nur bei Ereignissen durchgeführt werden können, die im Beobachtungszeitraum tatsächlich vorgekommen sind, muss die Wasserstand-Durchfluss-Beziehung für extrem hohe bzw. niedrige Wasserstände extrapoliert werden, wodurch sich eine gewisse Unsicherheit für diese Bereiche ergibt. Zudem kann es durch Veränderungen des Durchflussprofils aufgrund von Anlandungen oder Eintiefungen zu einer Veränderung der Wasserstand-Durchfluss-Beziehung kommen.

Prüfung von Metainformationen:

Für die Beurteilung und Interpretation von Daten einer Messstelle bilden die Stammdaten eine entscheidende Grundlage. Die Stammdaten können beim Messstellenbetreiber eingeholt werden und enthalten unter Anderem Informationen über die Messmethodik, die Messgeräte, die Arte der Datengewinnung, die Historie der Messstelle und Besonderheiten des Einzugsgebietes.

Prüfung auf anthropogene Beeinflussungen:

Wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet können das Abflussregime stark beeinflussen und müssen daher besondere Berücksichtigung finden, wobei zu beachten ist, dass es sich nicht um Messfehler handelt, sondern um reale Teilprozesse der Einzugsgebietshydrologie, die bei der NA-Modellierung auf folgende Arten behandelt werden können:

- Bei Kenntnis der Größenordnungen können die Einflüsse rechnerisch bereinigt werden.
- Die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen können als Bestandteil des Modells dargestellt werden (z.B. Speicherrückhalt durch Stauseen).
- Vor allem Abflussminima und -maxima werden durch anthropogene Maßnahmen stark beeinflusst und müssen daher speziell beachtet werden.

Wenn die anthropogenen Beeinflussungen sehr groß sind und keine der oben genannten Möglichkeiten zur Verfügung stehen, dann können die betroffenen Abflussdaten nicht für die Modellierung verwendet werden. (ÖWAV-Arbeitsausschuss, 2018)

3.2.3. Abflussdaten für das Einzugsgebiet

Die Abflussdaten, die für die Erstellung der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, entstammen dem Messgerinne am Ahornboden und müssen aufgrund des Umbaus im Jahr 2014 in zwei getrennte Messzeiträume aufgeteilt werden.

Messzeitraum 1 (31.12.2003 – 10.10.2013)

Im ersten Zeitraum, der sich vom 31.12.2003 bis 10.10.2013 erstreckte, wurde die Messstelle vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich betrieben. In diesem

Zeitraum wurde der Wasserstand mithilfe eines Schwimmerschreibpegels gemessen und in Form eines Limnigrammes aufgezeichnet.

Die baulichen Grundstruktur der Messeinrichtung besteht auch heute noch und setzt sich aus dem Messgerinne und dem Schwimmerschacht zusammen. Das Messgerinne besteht im Wesentlichen aus einem 6,5 m langen befestigten Gerinneabschnitt mit Trapezprofil, der in einen ca. 1 m hohen Überfall übergeht. Der Schwimmerschacht liegt auf der orographisch rechten Seite unmittelbar neben dem Gerinne und ist von diesem nur durch eine gelochte Edelstahlplatte getrennt. Diese ist in regelmäßigen Höhenabständen gelocht, um eine hydraulische Verbindung zum Gerinne herzustellen. Die laufende Aufzeichnung der Wasserstände erfolgte auf Limnigrammen, die mithilfe eines Schreibwerkes wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben aufgezeichnet wurden.

Die Limnigramme wurden vom Hydrographischen Dienst digitalisiert und in Form von zwei Textdateien zur Verfügung gestellt. Die Dateien weisen einen ähnlichen Aufbau wie die Niederschlagsdatensätze auf, wobei die Stammdaten der Station in einem Schriftkopf festgehalten sind und daran anschließend eine tabellarische Auflistung der Messwerte in zwei Spalten folgt. Die erste Spalte enthält den Messzeitpunkt, während in der zweiten die Messwerte des Wasserstandes in cm eingetragen sind.

In der ersten Datei sind die einzelnen Wasserstände enthalten, die in unregelmäßigen zeitlichen Abständen aus den Limnigrammen digitalisiert wurden. Die zweite Datei enthält eine auf eine fünfminütige Auflösung verdichtete Zeitreihe, die aus der ersten Datei durch lineare Interpolierung der gemessenen Wasserstände abgeleitet wurde.

Im Zuge der Qualitätsprüfung wurden die Daten zunächst als Ganglinie dargestellt und auf Fehlwerte und fehlerhafte Werte analysiert. Hierbei wurde festgestellt, dass die Ganglinie, vor Allem im Falle von Hochwasserereignissen, einen Verlauf aufweist, der nicht dem üblichen Verlauf von Hochwasserganglinien entspricht.

Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung des abfallenden Astes der Ganglinie nach der Erreichung des maximalen Abflusses eines Ereignisses. Dieser spiegelt normalerweise das Leerlaufen des Gebietsspeichers wider, wenn nach einem Regenereignis keine weiteren Niederschläge erfolgen, und weist in der Regel einen streng monoton fallenden Verlauf auf, wobei die Steigung vom zunächst stark negativen

Bereich gegen Null tendiert während sich die Ganglinie dem Basisabfluss asymptotisch annähert.

In Abb. 7 ist ein Ausschnitt der untersuchten Ganglinie aus dem Jahr 2010 dargestellt. Wie deutlich zu erkennen ist, folgt die Ganglinie nicht dem oben beschriebenen Verlauf, sondern es erfolgt an mehreren Stellen ein „Hängenbleiben“ bei einem bestimmten Wasserstand bzw. ein plötzliches Anspringen oder Abfallen.

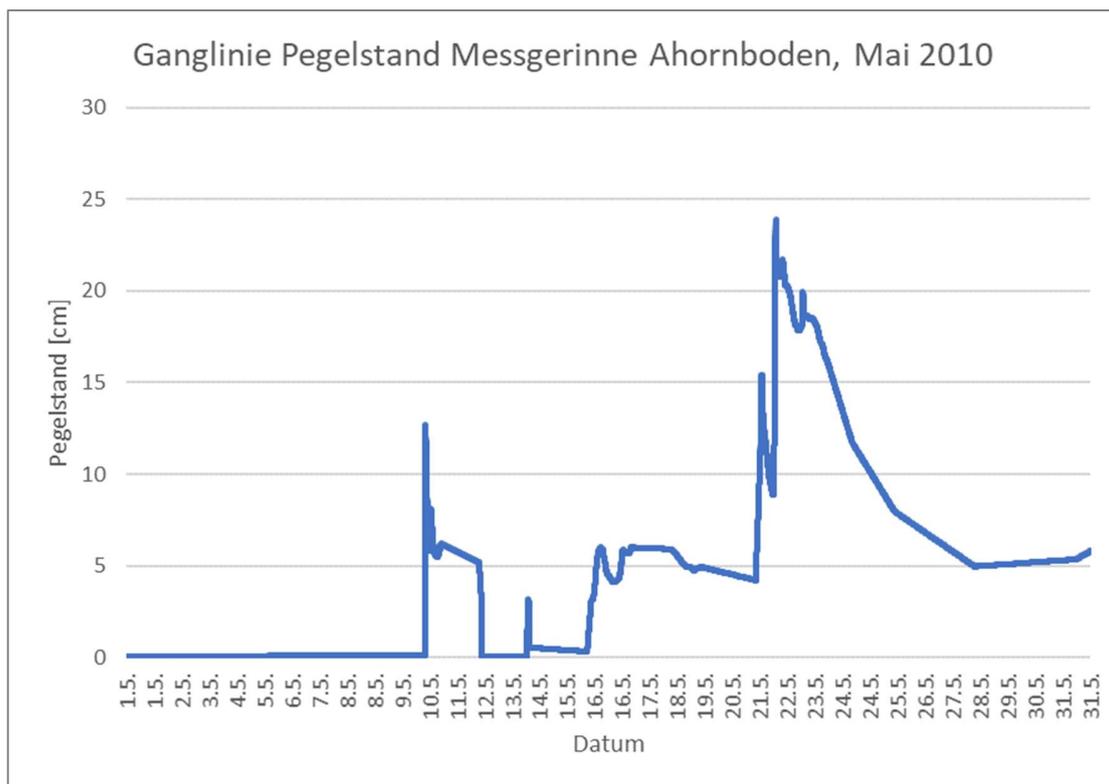


Abbildung 14: Ganglinie des Pegelstandes im Messgerinne Ahornboden, Mai 2010

Dieser Verlauf der Ganglinie deutet auf eine Verlandung der Schwimmerkammer hin, was durch das Foto in Abb. 15, welches im Zuge von Instandsetzungsarbeiten im Jahr 2014 aufgenommen wurde, bestätigt wird.



Abbildung 15: Instandsetzungsarbeiten am Messgerinne

Da dieses Problem über den gesamten ersten Messzeitraum von 2003 bis 2013 auftritt und zudem die Daten im eigentlichen Sinne keine zeitliche Auflösung von fünf Minuten aufweisen, wie es für das vorliegende Einzugsgebiet mit seiner kurzen Reaktionszeit erforderlich wäre, sondern lediglich eine rechnerische Verdichtung einer Zeitreihe mit einer wesentlich geringeren zeitlichen Auflösung darstellen, können die Daten des ersten Messzeitraumes nicht für die Erstellung des Niederschlag-Abfluss-Modells verwendet werden.

Messzeitraum 2 (27.01.2015 – 09.02.2018)

Im Zuge des Umbaus im Jahr 2014 wurde das Messgerinne um eine Messeinrichtung zur Wasserstandsaufzeichnung mittels elektrooptischer Distanzmessung erweitert. Die Einrichtung besteht aus einer Brücke aus Aluminium-Fachwerkträgern auf der der elektrooptische Distanzmesser auf einem Kragarm über der Mitte des Gerinnes angebracht ist.



Abbildung 16: Messgerinne mit Trägerkonstruktion für die Messgeräte bei der Begehung am 04.12.2018

Die Distanzmessungen werden in fünfminütigen Intervallen vorgenommen und direkt digital gespeichert, wobei der Wasserstand gemeinsam mit der Lufttemperatur und der fünfminütigen Niederschlagssumme, sowie einem Zeitstempel und dem Batterieladestand, in eine tabellarische Textdatei eingetragen werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden die Messdaten für den Zeitraum vom 27.01.2015 bis 09.02.2018 vom Institut für Angewandte Naturgefahren in Form von drei Textdateien zur Verfügung gestellt.

Zunächst erfolgte wieder eine grafische Darstellung der Ganglinien zur Untersuchung auf Fehlwerte bzw. fehlerhafte Werte. Als besonders auffällig erwies sich hierbei, dass die Ganglinie im Grunde einen plausiblen Verlauf aufweist, wobei sich allerdings bei der Betrachtung in einer Größenordnung, in der die Einzelmessungen erkennbar sind, ein Oszillieren der Ganglinie von Messung zu Messung offenbart. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Durchgang von einzelnen Wellentälern bzw. -bergen zum Zeitpunkt der Messung oder Schwingungen des Traggerüsts der Messeinrichtung.

Da sich die kurzfristigen Auf- und Ab-Bewegungen der Ganglinie in einer geringen Größenordnung bewegen und sich bei einer Gesamtbetrachtung hinsichtlich der Abflussvolumina gegenseitig aufheben, konnten die Messwerte ohne Korrektur verwendet werden.

4. NA-Modelle

4.1. Allgemein

Im Allgemeinen dienen Modelle dazu die Realität, beziehungsweise real existierende Prozesse, nachzubilden, um bestimmte Szenarien untersuchen zu können, ohne dass diese in der Natur beobachtet werden müssen.

In der Ingenieurhydrologie ist die Aufgabe der Modellierung die Nachbildung der verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufs, um quantifizierbare Aussagen als Planungsgrundlage für wasserwirtschaftliche oder wasserbauliche Maßnahmen zu erhalten. Dies wird in der Regel durch die Anwendung von mathematischen Modellen erreicht.

Mathematische Modelle stellen im Wesentlichen Gleichungssysteme dar, die, unter der Berücksichtigung von etwaigen Einflussfaktoren, einen Bezug zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen herstellen.

Im Fall der Niederschlag-Abfluss-Modelle ist die interessierende Ausgangsgröße der Abfluss, beziehungsweise dessen zeitliche Entwicklung, an einem bestimmten Punkt in einem Fließgewässer. Das Einzugsgebiet des untersuchten Punktes wird in der Niederschlag-Abfluss Modellierung als hydrologisches System mit klar definierten Grenzen dargestellt. An den Grenzen kommt es zum einen zur Zuführung von Wasser in das System, zum Beispiel in Form von Niederschlag oder Schneeschmelzevorgängen, zum anderen wird Wasser aus dem System entfernt, zum Beispiel durch Abfluss oder Verdunstung.

Mathematische Niederschlag-Abfluss-Modelle werden nach der Art- und Weise und dem Detailgrad, in dem die Eigenschaften des Einzugsgebietes bei den Berechnungen berücksichtigt werden, eingeteilt. Nach Maniak lassen sich grundsätzlich drei unterschiedliche Modelltypen unterscheiden, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Black-Box-Modelle

Black-Box-Modelle stellen einen direkten Bezug zwischen Eingang und Ausgang her, ohne die Eigenschaften des dazwischenliegenden Systems zu berücksichtigen.

Die Umwandlung der Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen wird durch algebraische Gleichungen dargestellt, deren Koeffizienten auf empirischen Analysen basieren und nicht als hydrologische oder physikalische Kenngrößen (z.B. Konzentrationszeit) interpretierbar sind.

Konzeptionelle Modelle

Bei den konzeptionellen Modellen werden ausgewählte Systemeigenschaften als Einflussfaktoren in das Gleichungssystem des Modells aufgenommen.

Die mathematische Umsetzung erfolgt mithilfe von Differentialgleichungen, in denen Parameter enthalten sind, die auf bestimmten Eigenschaften des Einzugsgebietes basieren. Die Parametrisierung erfolgt anhand von Vergleichsrechnungen mit beobachteten Daten („Kalibrierung“).

Physikalische Modelle

Physikalische Modelle stellen den Versuch dar physikalische Prozesse im Einzugsgebiet möglichst detailliert nachzubilden.

Sie basieren unter anderem auf den Grundgleichungen der Wasserbewegung. Die Parameter können unter anderem durch physikalische Messungen gewonnen werden.

Zusätzlich zu der grundlegenden Zuordnung zu einem bestimmten Modelltyp können Niederschlag-Abfluss-Modelle nach einer Vielzahl von Kriterien gegliedert werden. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Kriterien für die Wahl des geeigneten Modells herangezogen. Die gängigsten Unterscheidungsmerkmale werden im Folgenden vorgestellt.

Ereignisbezogene/ Kontinuierliche Modelle

Die Hauptaufgabe von ereignisbezogenen Niederschlag-Abfluss-Modellen ist die Simulierung von Hochwasserwellen, die durch Niederschlagsereignisse ausgelöst werden. Das Niederschlagsereignis und die davon ausgelöste Hochwasserwelle werden dabei als ein zusammenhängendes Ereignis betrachtet. Dieses reicht vom Beginn des Niederschlags bis zum vollständigen Rückgang des Hochwasserabflusses, meistens gekennzeichnet durch das Erreichen eines bestimmten Basisabflusses.

Kontinuierliche Modelle haben die dauerhafte Simulierung der hydrologischen Vorgänge in einem Einzugsgebiet zur Aufgabe. Eine übliche Vorgehensweise ist hierbei die Darstellung der einzelnen Komponenten der Wasserbewegung als Speicher, die miteinander in Verbindung stehen. Das Modell stellt die Wasserbewegung zwischen den idealisierten Speichern nach, an den Gebietsgrenzen kommt es zu einer Bilanzierung zwischen Wasseraufnahme und Wasserabgabe des hydrologischen Systems.

Deterministisch / Stochastisch

Deterministische Modelle stellen einen festen Bezug zwischen Ursache und Wirkung her, sodass eine bestimmte Konstellation von Eingangsgrößen und Einflussfaktoren immer zu einem einzigen bestimmten Ergebnis führt.

Stochastische Modelle stellen dagegen einen statistischen Zusammenhang her, sodass das Ergebnis eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Bandbreite von möglichen Ausgängen ist.

Räumliche Variabilität

Niederschlag-Abfluss-Modelle, die die Darstellung des Einzugsgebietes mit räumlich unterschiedlich ausgeprägten Eigenschaften zulassen, werden „flächendifferenziert“ oder „distributed“ genannt. Demgegenüber stehen die sogenannten „lumped“-Modelle, bei denen das Einzugsgebiet als ein räumlich einheitlicher Block behandelt wird.

Zeitliche Variabilität

Analog zur räumlichen Variabilität kann auch nach der Möglichkeit zur zeitlich differenzierten Darstellung der Änderung von Einzugsgebietseigenschaften unterschieden werden.

Linearität

In Bezug auf NA-Modelle bedeutet Linearität, dass eine Kombination von mehreren Einwirkungen die Überlagerung der Auswirkungen jeder Einzeleinwirkung zur Folge hat. Maniak beschreibt Linearität wie folgt: „Ein lineares System, dessen Ausgänge infolge $x_1(t)$ und $x_2(t)$ gleich $y_1(t)$ und $y_2(t)$ sind, erhält unter Einwirkung von $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ einen Ausgang $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$.“ (Maniak, 2010)

4.2. Ereignisbezogene Modelle

Niederschlag-Abfluss-Modelle werden in der Wildbach- und Lawinenverbauung vorrangig eingesetzt, um für unbeobachtete Einzugsgebiete Bemessungshochwässer mit bestimmten Jährlichkeiten zu ermitteln. Hierfür werden ereignisbezogene Modelle (auch: „Ereignismodelle“) verwendet, weshalb die folgenden Kapitel sich ausschließlich mit dieser Art von Modellen beschäftigen.

Basis- und Direktabfluss

Der Abfluss, der während eines Hochwasserereignisses an einem Pegel beobachtet wird, setzt sich im Wesentlichen aus zwei Abflusskomponenten zusammen, dem Basisabfluss und dem Direktabfluss.

Der Basisabfluss stellt jenen Anteil des Abflusses dar, der nicht auf ein bestimmtes Niederschlagsereignis zurückgeführt werden kann. Dies ist jener Abfluss, der auch in niederschlagsfreien Perioden auftritt und kann als das kontinuierliche Leerlaufen des Gebietsspeichers des Einzugsgebietes verstanden werden.

Der Direktabfluss stellt jenen Teil des Abflusses dar, der zusätzlich zum Basisabfluss auftritt, als Folge des Abfließens des Niederschlagswassers eines bestimmten Niederschlagsereignisses, das über dem Einzugsgebiet niedergegangen ist. Er wird vorwiegend durch den Oberflächenabfluss und den oberflächennahen Abfluss gespeist.

Als oberflächennaher Abfluss wird jener Prozess bezeichnet, bei dem das Wasser in der ungesättigten Bodenzone parallel zur Geländeoberfläche abfließt. Der Abfluss erfolgt hierbei entlang von Fließwegen mit geringen Widerständen, wie zum Beispiel Wurzelkanälen, oder entlang der Pflugsohle. Beim oberflächennahen Abfluss kommt es im Vergleich zum Oberflächenabfluss zu einer Verzögerung aufgrund der größeren Fließwiderstände, allerdings ist er schnell genug, um zum Direktabfluss zu zählen.

Bei den Ereignismodellen steht die Modellierung des Direktabflusses im Vordergrund, während der Basisabfluss meist als konstant angenommen wird oder als Funktion der Zeit mit einem bestimmten Anfangswert dargestellt wird.

Abflussbildung

Da Ereignismodelle sich auf die Modellierung des Direktabflusses konzentrieren werden jene Anteile des Niederschlages, die nicht zum Direktabfluss beitragen pauschal als Verluste betrachtet.

Verluste werden durch jene Vorgänge im Einzugsgebiet verursacht, die zur Verdunstung oder einem stark verzögerten Abfluss des Niederschlagswassers führen. Diese Prozesse setzen sich im Wesentlichen aus Interzeption, Muldenrückhalt und Infiltration zusammen. (Chow et al., 2008)

Interzeption

Jener Prozess, bei dem der Niederschlag von der Pflanzendecke aufgefangen wird, bevor er den Boden erreicht, wird als Interzeption bezeichnet. Der Großteil des aufgefangenen Niederschlages verdunstet entweder direkt von der Pflanzenoberfläche oder wird von der Pflanze aufgenommen und geht in weiterer Folge in die Transpiration über. Die Größe der Interzeption ist abhängig von der Pflanzendecke und der Vegetationsperiode sowie den Wind- und Temperaturverhältnissen. (Maniak, 2010)

Muldenrückhalt

Als Muldenrückhalt wird jener Anteil des Niederschlages bezeichnet, der sich in den Unebenheiten der Geländoberfläche sammelt und verdunstet oder erst stark zeitverzögert in den Boden infiltriert. Der Muldenrückhalt ist von der Bodenfeuchte und der Oberflächenstruktur abhängig, wobei er in flachen Einzugsgebieten wirksamer ist als in steilen. (Maniak, 2010)

Infiltration

Infiltration bezeichnet die Abwärtsbewegung des Niederschlagswassers in den Boden. Das Maß für die Geschwindigkeit des Infiltrationsprozesses ist die Infiltrationsrate. Diese hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, wie zum Beispiel dem Sättigungsgrad oder der Korngrößenverteilung des Bodens.

Aufgrund der räumlichen Verteilung und der räumlichen und zeitlichen Veränderung dieser Einflussfaktoren stellt die Infiltration ein äußerst komplexes Phänomen dar, das mathematisch nur näherungsweise beschrieben werden kann. (Chow et al., 2008)

Abflusskonzentration

Die Bewegung des Effektivniederschlages zum Gebietsauslass entspricht der Transformation des Gebietsniederschlages in die Abflussganglinie. Dieser Vorgang wird als Abflusskonzentration bezeichnet.

Im Falle der zeitinvarianten Block-Modelle erfolgt die mathematische Beschreibung der Abflusskonzentration mithilfe einer sogenannten Übertragungsfunktion. Da die Übertragungsfunktion eine Antwort des hydrologischen Systems auf einen Niederschlagsimpuls darstellt wird sie auch als „Impulsantwortfunktion“ bezeichnet. (Lecher, 2001)

Die Systemantwort auf einen Impuls der Größe „1“ bildet die sogenannte Einheitsganglinie. Ausgehend von der Annahme der Zeitinvarianz und der Linearität kann bei Kenntnis der Einheitsganglinie die Abflussganglinie errechnet werden. Hierzu werden die Ordinaten der Einheitsganglinie mit den Niederschlagshöhen des Gebietsniederschlages multipliziert, und, entsprechend dem zeitlichen Auftreten des jeweiligen Niederschlagsimpulses, einander überlagert. Diese Vorgehensweise wird als Einheitsganglinienverfahren bezeichnet.

Im Grunde stellen alle zeitinvarianten Block-Modelle Einheitsganglinienverfahren dar, die sich im Wesentlichen darin unterscheiden auf welche Art und Weise die Einheitsganglinie erstellt wird und welche Einflussfaktoren herangezogen werden.

4.3. HEC-HMS

HEC-HMS („Hydrologic Modeling System“) ist ein Computergrogramm zur hydrologischen Modellierung von Niederschlag-Abfluss Prozessen. Es ist so konzipiert, dass es auf eine möglichst große Vielfalt von Einzugsgebieten anwendbar ist und eine breite Bandbreite von Anwendungsfällen bedienen kann.

Das Programm bietet alle Funktionalitäten, die für die hydrologische Modellierung erforderlich sind, wie Dateneingabe, Datenverwaltung, Berechnungsmodule und Datenausgabemöglichkeiten.

Es besteht des Weiteren die Möglichkeit Geodaten in der Form von Rasterdatensätzen zu importieren. Dies kann dazu verwendet werden, um raumbezogene Einzugsgebietsdaten, wie zum Beispiel Digitale Geländemodelle, als Randbedingungen für die Modellierung einzuspielen, oder Wetterraddardaten als Eingangsdaten zu verwenden.

Geschichte

HEC-HMS wurde vom „US Army Corps of Engineers“ (USACE) entwickelt und stellt im Grunde eine Weiterentwicklung der HEC-1 Programfamilie dar, die in den späten 1980er und in den 1990er Jahren entwickelt wurden. Es werden laufend neue Programmversionen entwickelt, die auf der Internetseite des Hydrologic Engineering Center (HEC) unentgeltlich heruntergeladen werden können. Die aktuellste Version, die auch für die Modellierungen im Zuge der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, trägt die Versionsnummer 4.3 und wurde im September 2018 veröffentlicht.

Funktionsumfang

Die große Flexibilität des Programms ergibt sich unter anderem aus der Möglichkeit das Einzugsgebiet als eine Zusammensetzung von physischen Einzugsgebietselementen darzustellen. Hierdurch entsteht ein modularer Aufbau des Gesamtmodells, der es erlaubt für die unterschiedlichen Prozesse, die zum Abflussgeschehen beitragen, jeweils das passende Teilmodell zu wählen. Dies ermöglicht sowohl die Darstellung von natürlichen Ablaufprozessen, zum Beispiel für die Berechnung von Bemessungshochwässern, als auch die Untersuchung der Auswirkung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen. Folgende Einzugsgebietselemente stehen zur Auswahl, um das reale Einzugsgebiet darzustellen (Hydrologic Engineering Center, 2000):

- Teileinzugsgebiet („subbasin“):

Das Teileinzugsgebiet repräsentiert das Einzugsgebiet im herkömmlichen Sinne: Ein Ausschnitt der Erdoberfläche, der den Niederschlag, der über dem Gebiet niedergeht, einem bestimmten Punkt, dem Gebietsauslass, zuleitet. Der Abfluss am Gebietsauslass wird aus dem Gebietsniederschlag errechnet, indem

Teilmodelle für die Prozesse Abflussentstehung, Abflusskonzentration und Basisabfluss kombiniert werden.

- Flussstrecke („reach“):
Ein Gerinneabschnitt wird in HEC-HMS als Flussstrecke dargestellt. Der Zufluss wird unter Berücksichtigung von Translations- und Retentionsprozessen in den Abfluss umgerechnet. Hierfür stehen in HEC-HMS fünf Methoden für die Berechnung des Gerinneroutings zur Auswahl.
- Zusammenfluss („junction“):
Dieses Element dient dazu, die Abflüsse von mehreren Einzugsgebietselementen zu kombinieren.
- Quelle („source“)
Mithilfe einer Quelle können benutzerdefinierte Abflussmengen punktuell in das Modell eingebracht werden.
- Senke („sink“)
Umgekehrt zur Quelle können dem Modell an einer Senke benutzerdefinierte Abflussmengen entzogen werden.
- Speicher („reservoir“)
Mit diesem Element können Speicherobjekt wie Retentionsbecken oder Seen dargestellt werden. Für die Berechnung des Speicherabflusses stehen drei Speichermodelle zur Auswahl.
- Überlauf („diversion“)
Dieses Element dient dazu, Abflussmengen aus dem Hauptkanal zu entnehmen. Im Unterschied zur Senke, verbleiben diese im Modell und können als Zufluss zu nachgeschalteten Elementen verwendet werden.

Das Einzugsgebiet des Göllersbaches ist ein kleines, weitgehend natürliches Einzugsgebiet ohne wasserwirtschaftliche Bauwerke. Dadurch ergibt sich ein hydrologisches System, das mit den Elementen „Teileinzugsgebiet“ und „Zusammenfluss“ dargestellt werden.

4.4. Ereignismodelle für die Abflussbildung in HEC-HMS

4.4.1. Verlustratenverfahren

4.4.1.1. Theorie

Dieses Verfahren stellt die einfachste Methode zur Ermittlung des Effektivniederschlags dar. Der Effektivniederschlag wird berechnet, indem in jedem Zeitintervall unabhängig vom Intensitätsverlauf des Niederschlags eine konstante Verlustrate in mm von der Niederschlagshöhe abgezogen wird.

Zur Berücksichtigung von Interzeption, Bodenhaftwasser und Muldenrückhalt wird eine Anfangsverlustrate eingeführt. Erst wenn die kumulierte Niederschlagssumme die Anfangsverlustrate übersteigt kommt es zur Bildung von Direktabfluss. Der davor gefallene Niederschlag wird als Verlust gewertet.

Wenn Niederschlag- und Abflussdaten vorhanden sind, können die Anfangsverluste und die konstante Verlustrate aus der Empirie geschätzt werden. Die Schätzung der Anfangsverluste kann anhand von Niederschlägen erfolgen, auf die keine Reaktion der Abflussganglinie folgt. Für die Berechnung der konstanten Infiltrationsrate wird sodann wie folgt vorgegangen:

Zunächst wird die Direktabflusshöhe N_D ermittelt, indem der Quotient aus dem Volumen des Direktabflusses A_D und der Einzugsgebietsfläche F gebildet wird:

$$N_D = \frac{A_D}{F} \quad (4.1)$$

Die Summe der Effektivniederschläge entspricht der kumulierten Direktabflusshöhe, sodass sich ergibt:

$$N_D = \sum_{j=j^*}^k (I_j - I_{vo}) * \Delta t \quad (4.2)$$

j^* Zeitintervall, in dem die kumulierte Niederschlagssumme die Anfangsverluste erreicht oder übersteigt

I_j Niederschlagintensität in Intervall j [mm/s]

I_{vo} konstante Verlustrate [mm/s]

k Anzahl der Zeitintervalle für die Ereignisdauer

Durch umformen von Formel 4.2 kann die konstante Verlustrate wie folgt ausgedrückt werden:

$$I_{vo} = \frac{1}{(k - j^*) * \Delta t} \left[\sum_{j=j^*}^k \Delta t * I_j - N_D \right] \quad (\text{Formel 4.3})$$

Für den Fall, dass keine Abflussdaten vorhanden sind kann die konstante Verlustrate anhand der Bodenverhältnisse im Einzugsgebiet wie in Tabelle 1 dargestellt geschätzt werden. Die Anfangsverluste können in bewaldeten Einzugsgebieten mit 10-20% der Niederschlagssumme und in urbanen Einzugsgebieten mit 2,5–5,0 mm angesetzt werden (USDA-NRCS, 2017a).

Tabelle 1: Verlustraten für unterschiedliche Bodengruppen in Zoll/h (Quelle: NRCS)

Soil Group	Description	Range of Loss Rates (in/hr)
A	Deep sand, deep loess, aggregated silts	0.30-0.45
B	Shallow loess, sandy loam	0.15-0.30
C	Clay loams, shallow sandy loam, soils low in organic content, and soils usually high in clay	0.05-0.15
D	Soils that swell significantly when wet, heavy plastic clays, and certain saline soils	0.00-0.05

4.4.1.2. Umsetzung in HEC-HMS

Bei der Anwendung des Verlustratenverfahrens in HEC-HMS werden die Werte für die Anfangsverluste und die konstante Verlustrate direkt eingegeben.

Bis die kumulierte Niederschlagssumme den festgelegten Wert für die Anfangsverluste erreicht beträgt der direkte Abfluss 0. Danach wird in jedem Berechnungszeitschritt die konstante Verlustrate vom gefallenem Niederschlag abgezogen.

4.4.2. SCS-CN Verfahren

Die Ursprünge des SCS-CN Verfahrens lassen sich auf das Jahr 1954 zurückführen. Anlässlich einer Novelle im amerikanischen Gesetz, dem "Watershed Protection and Flood Prevention Act" von August 1954, entwickelten die Hydrologen Mockus, Sherman

und Andrews eine Methode zur Ermittlung des abflusswirksamen Anteils des Niederschlages, um die Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf das Abflussverhalten beurteilen zu können. (Hübl)

Da das Verfahren auf die Anwendung durch Mitarbeiter des Natural Resources Conservation Service (NRCS), welcher zur Entstehungszeit des SCS-CN Verfahrens noch Soil Conservation Service (SCS) hieß, ausgerichtet war, erfolgte die erstmalige Veröffentlichung im National Engineering Handbook Section 4 (NEH-4) des SCS im August 1957 (Victor M. Ponce und Richard H. Hawkins, 1996). Der SCS war damals vorwiegend in kleinen, landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen tätig, sodass das Verfahren ursprünglich auf derartige Einzugsgebiete ausgelegt war. Zudem wurden nur Parameter aufgenommen, für die aus der Arbeit des SCS bereits Messungen vorlagen, bzw. die leicht erhoben werden konnten. (USDA-NRCS, 2017a)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war es gängige Praxis in der Hydrologie das Niederschlag-Abflussverhalten eines Einzugsgebietes mithilfe von Scatterplots darzustellen, in denen die Niederschlags- und Abflusssummen beobachteter Ereignisse einander gegenübergestellt wurden. Für Zeiträume in einer jährlichen Größenordnung ließen sich so brauchbare Aussagen treffen, bei der Betrachtung von kürzeren Zeiträumen wie Jahreszeiten oder Monaten wurde die Streuung allerdings zu groß. Sherman (1942) begann daher zusätzliche Informationen einzubinden, indem er getrennte Kurven für die einzelnen Monate verwendete und eine tabellarische Anpassung in Abhängigkeit vom Vorregen einführte. (USDA-NRCS, 2017a)

Aufbauend auf den Arbeiten von Sherman entwickelte Mockus (1949) ein Verfahren, das die Möglichkeit bot Eigenschaften des Einzugsgebietes in die Abflussermittlung einzubeziehen. Folgende Gebietsparameter wurden dabei berücksichtigt:

- Bodentyp
- Landnutzung
- Vorausgehender Niederschlag
- Dauer und Höhe des Niederschlages
- Mittlere jährliche Temperatur und Datum des Niederschlages

Andrews entwickelte ein grafisches Verfahren, in dem Bodeneigenschaften, Landnutzung und Bewirtschaftungspraxis zu einem „Boden-Oberflächen-Komplex“ (soil-coverage-complex) zusammengefasst wurden.

Die Ansätze von Mockus und Andrews stellten die Grundbausteine des CN-Verfahrens dar. Als Datengrundlage dienten die Auswertungen von Niederschlag-Abfluss-Messungen und tausenden Infiltrometersversuchen in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Da die mittleren Gefälle der untersuchten Einzugsgebiete weniger als fünf Prozent betragen und nur Tagessummen für den Niederschlag zur Verfügung standen sind Faktoren wie Gefälle und zeitabhängige Parameter nicht im Verfahren berücksichtigt. (Hübl)

4.4.2.1. Theorie

Ausgangspunkt des Verfahrens ist die Analyse des Verlaufes des kumulierten Abflusses in Abhängigkeit vom kumulierten Niederschlag. Zu Beginn kommt es zu keiner Bildung von Abfluss, bis ein bestimmter Wert des kumulierten Niederschlages erreicht wird. Dieser Schwellenwert stellt die Anfangsverluste aufgrund von Interzeption, Muldenrückhalt und Haftwasser dar. Die Anfangsverluste werden im CN-Verfahren durch den Parameter I_a („Initial abstraction“) bzw. $h_{N,Av}$ berücksichtigt.

Nach dem Überschreiten der Anfangsverluste beginnt der kumulierte Abfluss zu steigen und geht nach einem zunächst kurvilinearem, nach oben offenen Verlauf allmählich in eine Gerade mit einer Steigung von 45° über. Ein linearer Verlauf in einem Winkel von 45° bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Gebietsspeicher gefüllt sind und jeder weitere Niederschlag direkt zum Abfluss gelangt. Die Differenz zwischen dem kumulierten Abfluss und der gefallenem Niederschlagsmenge repräsentiert den maximalen Gebietsspeicher, der im Verfahren durch den Parameter S dargestellt wird. Dieser Parameter fasst die hydrologischen Bodeneigenschaften (Bodenart, Bodenfeuchte, Bodennutzung, Jahreszeit) zusammen und wird mithilfe von Formel 4.4 die Kurvennummer CN („Curve Number“), um leichter handzuhabende Zahlenwerte für zu erhalten. Bei der Anwendung des Verfahrens werden die Werte für CN aus empirisch ermittelten Tabellen abgelesen, wobei Bodenart, Bodennutzung und Vorregen als Eingangswerte dienen.

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (4.4)$$

Das SCS-CN-Verfahren geht von der Grundannahme aus, dass das Verhältnis von der tatsächlichen Verlusthöhe h_V zur maximal möglichen Verlusthöhe, die durch den maximalen Gebietspeicher S dargestellt wird, dem Verhältnis der tatsächlichen Abflusshöhe h_A zur maximal möglichen Abflusshöhe, die dem Effektivniederschlag $h_{N,e}$ gleichzusetzen ist, entspricht. Hieraus ergibt sich mit Formel 4.5 die Grundhypothese des Verfahrens.

$$\frac{h_V}{S} = \frac{h_A}{h_{N,e}} \quad (4.5)$$

Abgeleitet aus dem Kontinuitätsgesetz, welches besagt, dass sich der Niederschlag in Anfangsverluste, kontinuierliche Verluste und direkten Abfluss aufteilt, kann der Abfluss auch als Differenz aus dem Gesamtniederschlag h_N und den Anfangsverlusten $h_{N,Av}$ und kontinuierlichen Verlusten h_V ausgedrückt werden.

Um mit nur einem einzigen Parameter im Verfahren auszukommen werden die Anfangsverluste in Abhängigkeit vom maximalen Speicher durch folgendes Verhältnis ausgedrückt:

$$h_{N,Av} = \lambda * S \quad (4.6)$$

Der Faktor λ ist eine empirische Konstante, die bei der Veröffentlichung des Verfahrens auf 0,2 festgesetzt wurde.

Aus der Kontinuitätsbedingung und Formel 4.6 ergibt sich bei Einsetzen in Formel 4.5 und Umformen die Grundformel des SCS-CN-Verfahrens:

$$h_A = \frac{(h_N - h_{N,Av})^2}{h_N + S - h_{N,Av}} \quad (4.7)$$

Beziehungsweise:

$$h_A = \frac{\left(\frac{h_N}{25,4} - \frac{200}{CN} + 2\right)^2}{\frac{h_N}{25,4} + \frac{800}{CN} - 8} * 25,4 \quad (4.8)$$

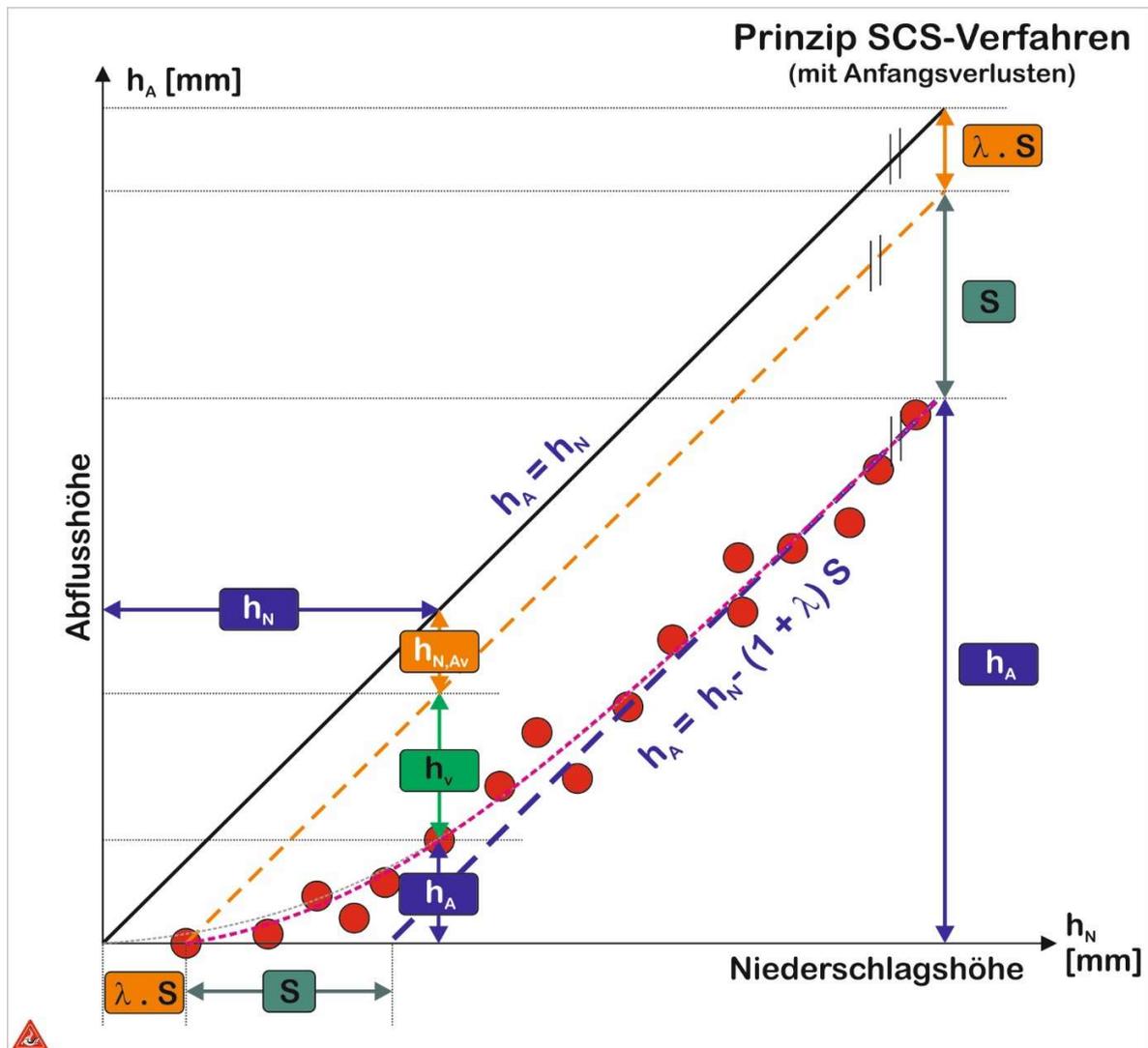


Abbildung 17: Prinzip SCS-CN-Verfahren (Quelle: Hübl)

4.4.2.2. Kritik/ Weiterentwicklung des Verfahrens

Die Möglichkeit, aus leicht zu erhebenden Gebietsparametern Aussagen über das Niederschlags-Abfluss-Verhalten eines Einzugsgebietes abzuleiten, ohne die Notwendigkeit von aufwendigen und langfristigen Abflussmessungen füllte eine klaffende Lücke in der damaligen hydrologischen Praxis. Das Verfahren fand schnell Verbreitung und wurde auch in zahlreichen Bereichen eingesetzt, die nicht dem Einsatzgebiet entsprechen, für welches es entwickelt wurde.

Mittlerweile gilt das SCS-CN-Verfahren als Standard in der Ingenieurhydrologie, wobei die reichhaltigen empirischen Erfahrungen, die in den letzten Jahrzehnten mit dem

Verfahren gesammelt wurden bestimmte Einschränkungen in der Anwendbarkeit und auch Möglichkeiten zur Weiterentwicklung aufzeigen. Hierzu zählen die Punkte

- Schätzung der Anfangsverluste,
- Berücksichtigung des Vorregens
- und Einschränkungen im Abflussverhalten des Einzugsgebietes.

Das NRCS arbeitet daher zurzeit an einer überarbeiteten Version des National Engineering Handbook, in welcher Anpassungen des Verfahrens in den oben genannten Punkten erfolgen soll. Ein Vorabzug der überarbeiteten Kapitel stand für die Erstellung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung und die die wesentlichen Änderungen werden im Folgenden erläutert.

Schätzung der Anfangsverluste

Die Festlegung von λ auf 0,2 wird im NEH-4 mit der in Abb. 11 dargestellten Grafik erklärt, da 50 % der Werte zwischen 0,095 und 0,38 liegen. Die große Streuung der Daten, die in der Grafik deutlich zu erkennen ist, sowie die fehlende Angabe der Herkunft des Datensatzes durch den SCS führte bald zu Skepsis an dem vorgegebenen Wert von $\lambda = 0,2$. (Jiang, 2001)

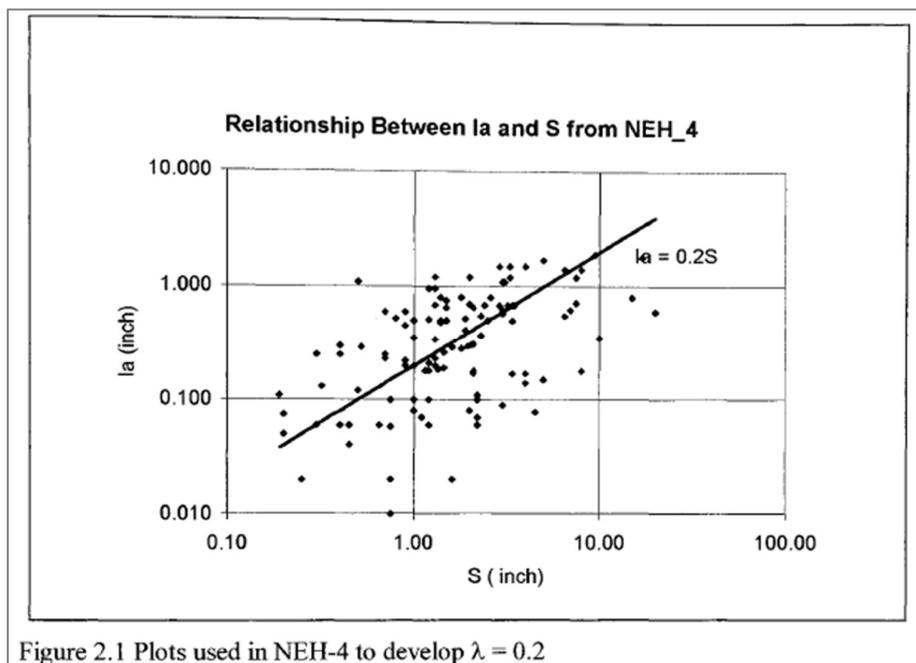


Abbildung 18: Scatterplot zur Entwicklung von $\lambda = 0,2$ (Quelle: Jiang)

Mockus selbst gab an, dass er ursprünglich die Anfangsverluste nicht im Verfahren berücksichtigen wollte, da ihre Ermittlung in der Praxis zu aufwendig ist. Seine Vorgesetzten beim SCS bestanden allerdings darauf, dass die Anfangsverluste in das Verfahren aufgenommen werden sollten. (Victor M. Ponce und Luis Magallon)

Neben dem Vorschlag eines variablen λ , den Smith äußerte, wurden zahlreiche Untersuchungen für die Anpassung des fixen Lambda-Wertes durchgeführt, deren Ergebnisse in jüngster Zeit auch vom NRCS aufgegriffen wurden. Eine groß angelegte Studie von Hawkins mit Niederschlags- und Abflussdaten aus 307 Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Landnutzungen und aus verschiedenen geographischen Regionen der USA ergab, dass der bisherige Wert von $\lambda = 0,2$ zu hoch angesetzt ist und ein Wert von $\lambda = 0,05$ treffender wäre. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Werte unterschiedlicher Ereignisse auch innerhalb eines Einzugsgebietes eine große Streuung aufweisen. Die Berechnung der Anfangsverluste als fester Anteil des maximalen Gebietsspeicher ist daher als grobe Vereinfachung zu betrachten, die durch empirische Untersuchungen nicht bestätigt werden kann. Diese Methode bietet allerdings den Vorteil, dass keine zusätzlichen Eingangsparameter für die Ermittlung der Anfangsverluste notwendig sind, weshalb die erforderliche Datengrundlage geringgehalten wird. Hieraus ergibt sich die große Attraktivität des Verfahrens für eine Vielzahl von Anwendungen, da es ohne aufwendige Messungen von Gebietsparametern anwendbar ist.

Es ist daher auch noch zu keiner Änderung der grundsätzlichen Methodik des Verfahrens hinsichtlich der Anfangsverluste gekommen, allerdings arbeitet das NRCS derzeit an einer Korrektur des Wertes für λ von 0,20 auf 0,05. Hierbei ist zu beachten, dass eine Änderung des Wertes, und damit auch der Anfangsverluste, eine Anpassung der CN-Werte erforderlich macht.

Es erfolgte bislang noch keine Veröffentlichung von angepassten Kurvennummern-Tabellen für einen Wert von $\lambda = 0,05$, wobei das NRCS folgende Formeln zur Umrechnung vorschlägt, im Index von S bzw. CN ist hierbei der Wert von λ angegeben, für den der Parameter jeweils zu verwenden ist:

$$S_{05} = 1,42 * S_{20} \quad (4.8)$$

Beziehungsweise:

$$CN_{05} = \frac{CN_{20}}{1,42 - 0,0042 * CN_{20}} \quad (4.9)$$

Alternativ dazu wird auch folgende Formel von Jiang und Hawkins et al. genannt:

$$S_{05} = 1,33 * S_{20}^{1,15} \quad (4.10)$$

Im Bereich von CN = 65 bis CN = 85 liefern beide Formeln dasselbe Ergebnis (DRAFT)

Es ist allerdings darauf zu achten, dass die ermittelten Abflusswerte für $\lambda = 0,05$ und CN_{05} bzw. $\lambda = 0,20$ und CN_{20} aufgrund des asymptotischen Verlauf der CN-Kurven bei geringeren CN-Werten stärker divergieren als bei hohen.

Berücksichtigung von Vorregen

In Kapitel 10 des National Engineering Handbook 630 (NEH 630) sind die CN-Werte für eine Vielzahl von Boden-Landnutzungs-Komplexen tabellarisch aufgelistet. Die Werte wurden ermittelt, indem aus den kumulierten Abfluss- und Niederschlagshöhen einer Vielzahl von Niederschlagsereignissen unterschiedlicher Größe der Median der CN-Werte, die sich aus den Datenpaaren ergaben, als Standard-CN für den untersuchten Boden-Landnutzungs-Komplex herangezogen wurde.

Wenn man die Datenpaare grafisch in einem Scatterplot mit den kumulierten Abflüssen auf der Abszisse und den Niederschlagshöhen auf der Ordinate darstellt, dann ergibt der Graph der Formel 4.7, bei eingesetztem Median-CN, eine Linie die die obere Hälfte der Datenpaare von der unteren trennt. Bei Betrachtung der Scatterplots fällt auf, dass die Datenpaare eine weite Streuung um diese Linie aufweisen, was bedeutet, dass sich teilweise erhebliche Abweichungen zwischen dem errechneten und dem beobachteten Niederschlags-Abfluss-Verhältnisses ergeben. Auch bei der Beobachtung von Ereignissen mit gleicher oder ähnlicher Niederschlagshöhe aus demselben Einzugsgebiet ergeben sich teilweise große Unterschiede beim Abfluss. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Direktabfluss eines Niederschlagsereignisses nicht nur von gleichbleibenden Eigenschaften des Einzugsgebietes wie Geologie oder Bodenbeschaffenheit abhängt, sondern auch veränderliche Einflussgrößen, wie der Vegetationsperiode oder der Vorfeuchte des Bodens, sowie Eigenschaften des Niederschlagsereignisses selbst, wie räumliche Verteilung und Intensität, abhängen.

Die Entwickler des CN-Verfahrens sind diesem Problem begegnet, indem drei Zustandsklassen eingeführt wurden, sodass für jeden Boden-Landnutzungs-Komplex drei CN-Werte veröffentlichte wurden. Die Zustandsklassen wurden zunächst als „Antecedent Moisture Condition“ (AMC) bezeichnet, mit der Unterteilung in AMC I, AMC II, und AMC III, wobei die Klassen folgende Bedeutung hatten:

- AMC I: trockene Verhältnisse, Gebietsspeicher weitgehend geleert → niedrige CN
- AMC II: mittlere Verhältnisse → Standard CN
- AMC III: feuchter Verhältnisse, Einzugsgebietsspeicher annähernd gefüllt → hohe CN

Der Name „Antecedent Moisture Condition“ deutet darauf hin, dass bei der Klassenzuordnung die Gebietsfeuchte, bzw. der Vorregen, maßgebend sind. In früheren Versionen des NEH-4 wurde daher noch empfohlen, für die Wahl der AMC-Klasse den kumulierte Niederschlagshöhe der letzten 5 Tage vor dem untersuchten Ereignis als Kriterium heranzuziehen.

Es wurde mittlerweile nachgewiesen, dass keine eindeutige Korrelation zwischen Vorregen und Niederschlag-Abfluss-Verhalten des Einzugsgebietes besteht, weshalb heute ausdrücklich davon abgeraten wird den 5-Tage-Vorregen als Kriterium für die Wahl der AMC-Klasse zu verwenden. Der Begriff „Antecedent Moisture Condition“ wurde durch „Antecedent Runoff Condition“ (ARC) ersetzt, um zu verdeutlichen, dass die Streuung des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens nicht allein auf die Gebietsfeuchte zurückgeführt werden kann. (USDA-NRCS, 2017a)

Hjemfelt et al. (1982) und Grabau et al. (2009) führten Studien durch, in denen den ARC-Klassen Unterschreitungshäufigkeiten in Bezug auf die kumulierten Abflusshöhen zugeordnet wurden. Wie in Tabelle 2 ersichtlich ist ähneln sich die Ergebnisse stark.

Tabelle 2: Unterschreitungshäufigkeiten für die einzelnen ARC-Klassen (Quelle: NRCS)

Table 10- 3. Exceedance percentages for ARC

Source	ARCI	ARCII	ARCIII	N
Hjelmfelt et al. (1982)	10	50	90	12
Grabau et al. (2009)	12	50	88	134

The table entry is the percent of events with lesser runoff, including events with no runoff. N is the number of watersheds studied. Pertains to $Ia/S=0.20$.

Grundsätzlich obliegt die Wahl der ARC-Klasse dem Anwender, wobei in vielen Anwendungsleitfäden eine Wahl in Abhängigkeit vom Wiederkehrintervall des untersuchten Ereignisses vorgeschlagen wird. So empfiehlt zum Beispiel das Hydrology Manual of Orange County, California (1985) ARC I für 1- bis 5-jährliche Ereignisse, ARC II für 10- bis 50-jährliche Ereignisse und ARC III für 100-jährlicher Ereignisse (Victor M. Ponce und Richard H. Hawkins, 1996).

Einschränkungen im Abflussverhalten der Einzugsgebiete

Die Grundgleichung der SCS-CN-Methode, bzw. ihre grafische Darstellung (siehe Abb. 10), prägten für lange Zeit die grundsätzliche Vorstellung über das Niederschlags-Abfluss-Verhalten von kleinen Einzugsgebieten, die wie folgt lautet:

Mit zunehmendem Niederschlag kommt es nach dem Überschreiten eines Schwellenwertes zur Entstehung von Abfluss. Die kumulierten Abflussmengen folgen bei weiterer Zunahme der kumulierten Niederschlagshöhen einem stetig steigenden, nach oben offenen kurvilinearen Verlauf, der in eine Gerade mit einer Steigung von 45° übergeht. Dieser Verlauf repräsentiert das allmähliche Einstellen einer konstanten Verlustrate.

Dieses Niederschlag-Abfluss-Verhalten, welches auch durch die Infiltrationsgleichung von Horton beschrieben wird, wird als Standard-Form bezeichnet und trifft auf einen Großteil aller Einzugsgebiete zu. (Richard H. Hawkins et al., 2015)

Hawkins stellte basierend auf der Untersuchung einer Vielzahl von Datensätzen, die über einen Zeitraum von 30 Jahren in unterschiedlichen Einzugsgebieten erhoben wurden, zwei zusätzliche Formen des Niederschlags-Abfluss Verhalten vor: Die „Complacent Form“ und die „Violent Form“. Da die „Complacent Form“ ab einer

gewissen Niederschlagshöhe in die „Violent Form“ übergeht, werden sie auch unter dem Begriff „Complacent-Violent-Form“ zusammengefasst.

Im Grunde bezeichnet die „Complacent Form“ einen linearen, schwach steigenden Verlauf der kumulierten Abflussmenge in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe. Dieser geht ab einer gewissen Niederschlagshöhe in die „Violent Form“ über, die ebenfalls einen linearen Verlauf aufweist, allerdings mit einer wesentlich größeren Steigung.

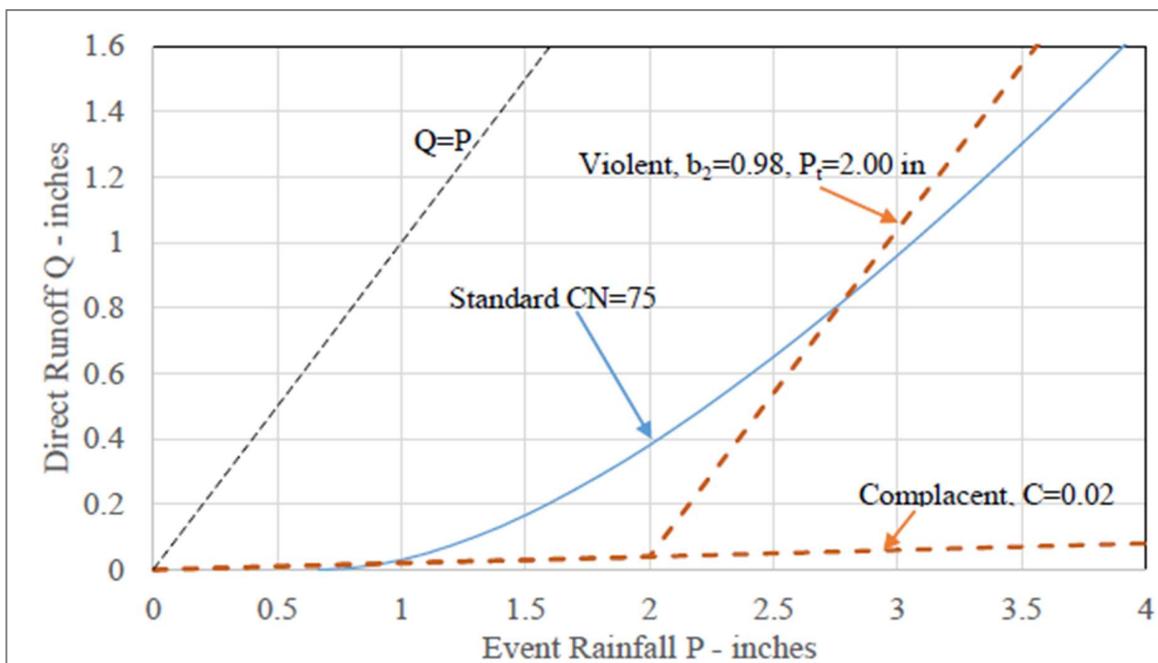


Abbildung 19: Beispiel für ein Einzugsgebiet mit Complacent-Violent Abflussverhalten im Vergleich zur Berechnung mit $CN = 75$ (Quelle: Hawkins)

Die CN-Methode ist lediglich in der Lage das Niederschlag-Abfluss-Verhalten der Standard-Form darzustellen, weshalb bei der Anwendung darauf geachtet werden muss, ob das untersuchte Einzugsgebiet diesem entspricht. Zu den Einzugsgebietseigenschaften, die auf ein Complacent-Violent Abflussverhalten hindeuten zählen (USDA-NRCS, 2017a):

- Fehlen von Anzeichen oberflächlichen Abflusses,
- Dichte Bewaldung mit tiefgründigem Waldboden,
- Dichte Vegetationsdecke, Fehlen von freien Bodenflächen

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Eigenschaften des in dieser Arbeit untersuchten Einzugsgebietes eher darauf hindeuten, dass das Niederschlag-Abfluss-Verhalten nicht der „Standard-Form“ entspricht. Da HEC-HMS keine Möglichkeiten bietet ein Niederschlag-Abfluss Verhalten der „Complacent-Violent-Form“ zu simulieren wird allerdings dennoch die CN-Methode angewendet und untersucht inwiefern die berechneten Abflüsse mit den gemessenen übereinstimmen.

4.4.2.3. Umsetzung im HEC-HMS

Die Parameter CN und Initial Abstraction können manuell festgelegt werden, die restlichen Berechnungen werden automatisch von HEC-HMS vorgenommen.

Das CN-Verfahren ist in HEC-HMS in der Form implementiert, dass für jeden Zeitschritt mit Hilfe der Grundgleichung des CN-Verfahrens (siehe Formel 4.6) der kumulierte Effektivniederschlag errechnet wird. Die Differenz zum kumulierten Effektivniederschlag des vorangegangenen Zeitschrittes ergibt sodann den Effektivniederschlag, der für den aktuellen Zeitschritt angesetzt wird. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

Diese Vorgehensweise unterstellt, dass das CN-Verfahrens in der Lage ist den Verlauf der Infiltration innerhalb eines Ereignisses darzustellen. Es wird dabei allerdings außer Acht gelassen, dass das CN-Verfahren von seiner grundsätzlichen Konzeption her nur die kumulierten Niederschlags- und Abflussmengen von gesamten Ereignissen betrachtet und der Faktor Zeit keine Rolle spielt.

Insofern ist diese Methode nur konsistent mit dem CN-Verfahren, wenn von einem konstanten Intensitätsverlauf des Niederschlagsereignisses ausgegangen wird. Ist dies nicht der Fall, dann folgt der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate zwangsgedrungen dem Verlauf des Niederschlages, wohingegen er in der Natur vom Zustand bzw. von der Sättigung des Bodens abhängt (R. E. Smith, 1978).

Es muss daher bei der Anwendung des CN-Verfahrens in HEC-HMS mit viel Sorgfalt vorgegangen werden und die Plausibilität der Ergebnisse stets überprüft werden.

4.5. Ereignismodelle für die Abflusskonzentration in HEC-HMS

Im Folgenden werden die empirischen Verfahren zur Abflusstransformation bzw. Berechnung der Abflusskonzentration erläutert, die in HEC-HMS implementiert sind. Im Funktionsumfang von HEC-HMS ist alternativ auch ein konzeptuelles Modell in Form des „Kinematic Wave Model“ enthalten. Auf dieses wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht näher eingegangen, da das Modell umfangreiche Eingangsdaten erfordert, die im gegebenen Anwendungsfall nicht vorhanden waren.

4.5.1. User Specified UH

Im Grunde stellen alle Modelle, die HEC-HMS für die Abflusstransformation bietet, außer das Kinematic Wave Model, Einheitsganglinienverfahren dar.

Bei der benutzerdefinierten Einheitsganglinie („User Specified UH“) können die einzelnen Ordinatenwerte manuell eingegeben werden, im Gegensatz zu den parametrischen Einheitsganglinien, bei denen das Programm die Ordinaten der Einheitsganglinie aus eingegebenen Parametern berechnet.

Auf diese Art und Weise können zum Beispiel Einheitsganglinien, die aus historischen Niederschlag-Abfluss Daten hergeleitet wurden, für die Modellierung verwendet werden. Für den in der Praxis häufiger auftretenden Fall, dass keine Abflussdaten zur Verfügung stehen, sind allerdings die parametrischen Einheitsganglinien von größerer Bedeutung.

4.5.2. Snyder UH

4.5.2.1. Theorie

Snyder war unter den ersten Forschern, die einen empirischen Zusammenhang zwischen Eigenschaften des Einzugsgebietes und der Form der zugehörigen Einheitsganglinie formulierten.

Die Einzugsgebietseigenschaften, die er verwendete waren:

- Die Einzugsgebietsfläche A_w ,
- die Länge des Hauptgerinnes L ,

- und die Länge L_c des Gerinneabschnittes von dem Punkt im Hauptgerinne, der am nächsten zum geometrischen Flächenschwerpunkt des Einzugsgebietes liegt, bis zum Gebietsauslass.

Zur Beschreibung der Form der Einheitsganglinie dienen ihm folgende Parameter:

- Der Zeitabstand zwischen dem Schwerpunkt des Regenereignisses und der Abflussspitze t_p ,
- der Spitzenabfluss Q_p ,
- und die Gesamtdauer der Einheitsganglinie t_b .

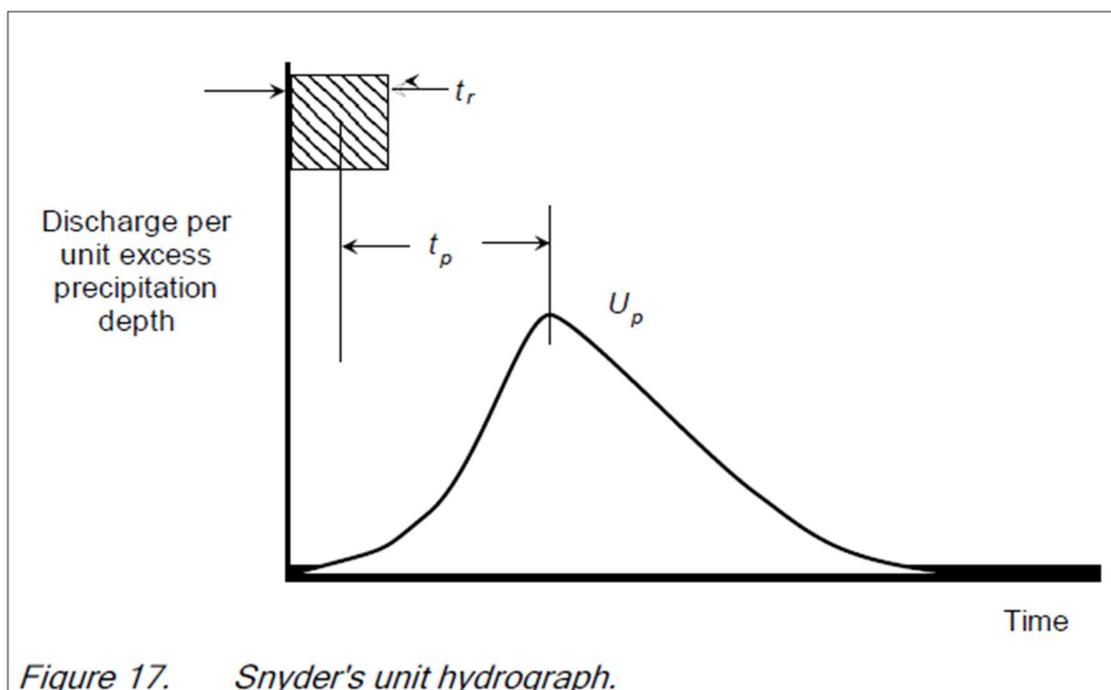


Abbildung 20: Parameter des Snyder-UH, t_r steht hierbei für die Niederschlagsdauer, U_p für den Spitzenabfluss Q_p (Quelle: HEC)

Nach Snyder ergeben sich die Zusammenhänge zwischen den Einzugsgebietseigenschaften und den Kennwerten der Einheitsganglinie wie folgt:

$$t_p = C * C_t * (L * L_c)^{0,3} \quad (4.11)$$

t_pZeitabstand zwischen dem Schwerpunkt des Regenereignisses und der Abflussspitze [h]

CEinheitenumrechnungsfaktor; $C = 0,75$ im SI-Einheitensystem [-]

C_tEmpirische Konstante, Ermittlung im Regelfall durch Kalibrierung [-]

C_pEmpirische Konstante, Ermittlung im Regelfall durch Kalibrierung [-]

L_cLänge des Gerinneabschnittes von dem Punkt im Hauptgerinne, der am nächsten zum geometrischen Flächenschwerpunkt des Einzugsgebietes liegt, bis zum Gebietsauslass [m]

$$Q_p = 2,78 * \frac{A_w * C_p}{t_p} \quad (4.12)$$

$$t_b = 3 + 3 * \frac{t_p}{24} \quad (4.13)$$

C_t und C_p sind hierbei empirische Konstanten, die im Regelfall durch Kalibrierung ermittelt werden.

Bedient und Huber fanden, dass die Werte für C_t typischerweise zwischen 1,8 und 2,2 liegen, allerdings in sehr steilen Einzugsgebieten auch Werte von bis zu 0,4, beziehungsweise in sehr flachen Einzugsgebieten Werte von 8,0 auftreten können (Bedient, P. B., & Huber, W. C., 1992). Für C_p nennen Bedient und Huber einen Wertebereich von 0,4 bis 0,8, wobei höhere Werte für C_p meist gepaart mit niedrigen Werten für C_t auftreten. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

Als Grundannahme für das Verfahren gilt das ein bestimmtes Verhältnis zwischen t_p und der Effektivniederschlagsdauer t_R , welches wie folgt lautet:

$$t_R = \frac{t_p}{5,5} \quad (4.14)$$

Für den Fall, dass Gleichung 4.14 nicht erfüllt ist wird die „modified lag time“ t_{mp} verwendet:

$$t_{mp} = t_p + \frac{t_{R1} - t_R}{4} \quad (4.15)$$

t_R berechnet sich hierbei wie oben beschrieben und t_{R1} stellt die tatsächliche Effektivniederschlagsdauer dar. (P. K. Singh et al., 2014).

4.5.2.2. Umsetzung in HEC-HMS

HEC-HMS bietet neben der Standard Variante auch zwei Varianten, die aus regionalen Untersuchungen in den USA stammen. Da sich diese Varianten nur für Einzugsgebiete eignen, die denen der regionalen Untersuchungen ähneln, wird nur auf die Standard Variante näher eingegangen.

In HEC-HMS können die Parameter t_{mp} und C_p eingegeben werden. Das Programm berechnet sodann t_p durch Lösung der Formel 4.15.

In weiterer Folge errechnet HEC-HMS den Spitzenabfluss Q_p mithilfe von Gleichung 4.12.

Mit der Methode von Snyder können außer dem Spitzenabfluss Q_p keine anderen Ordinaten der Einheitsganglinie berechnet werden. Um trotzdem eine vollständige Ganglinie errechnen zu können, sucht HEC-HMS mit dem Verfahren von Clark (siehe Kapitel 4.5.4) nach einer Einheitsganglinie, die die mit dem Verfahren von Snyder vorgegebenen Kennwerte erfüllt. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

4.5.3. SCS UH

4.5.3.1. Theorie

Beim SCS Unit Hydrograph handelt es sich um eine dimensionslose Einheitsganglinie, also um eine parametrische Einheitsganglinie mit einer vorgegebenen Form. Die Ordinaten- und Abszissenwerte sind bei dimensionslosen Einheitsganglinien nicht als absolute Werte angegeben, sondern im Verhältnis zum Spitzenabfluss Q_p bzw. zum Zeitpunkt des Spitzenabflusses t_p (siehe Abb. 21).

Daraus ergibt sich, dass die Ordinatenwerte der dimensionslosen Einheitsganglinie mit Q_p und die Abszissenwerte mit t_p multipliziert werden müssen, um die Einheitsganglinie eines Einzugsgebietes zu erhalten. (P. K. Singh et al., 2014)

Aus Niederschlags-Abfluss Untersuchungen in einer Vielzahl von Einzugsgebieten entwickelte der SCS den SCS Unit Hydrograph, der das durchschnittliche Reaktionsverhalten der untersuchten Einzugsgebiete nachbildet (Hydrologic Engineering Center, 2000).

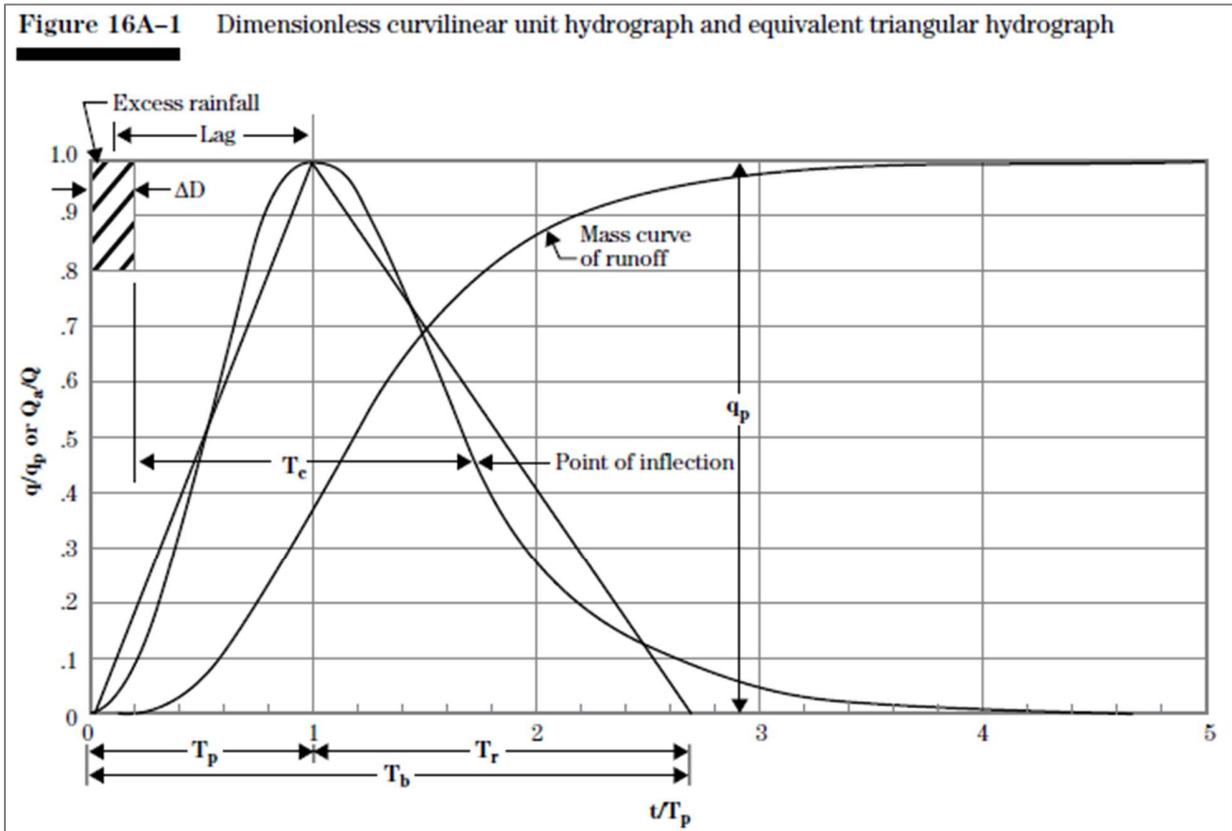


Abbildung 21: Schematische Darstellung des dimensionslosen SCS-UH. Es gilt: $q_p \triangleq Q_p$, $T_c \triangleq t_c$, $T_c \triangleq t_c$, usw. (Quelle: NRCS)

Die Fläche unter einer Einheitsganglinie entspricht generell dem Volumen des effektiven Niederschlages im Einzugsgebiet. Beim Standard-SCS-UH liegen 37,5 % der Fläche unter dem aufsteigenden Ast, also vor dem Zeitpunkt des Spitzenabflusses t_p . Aus dieser Angabe lässt sich, wenn der kurvilineare SCS-UH als Dreieck idealisiert wird (siehe Abb. 21), die Formel für den Spitzenabfluss Q_p aus der Geometrie der rechtwinkligen Dreiecke herleiten (siehe Formel 4.16). (USDA-NRCS, 2010)

$$Q_p = \frac{PRF * A * Q}{\frac{\Delta D}{2} + 0,6 * t_c} \quad (4.16)$$

Q_pSpitzenabfluss [m^3/s]

PRFPeak Rate Faktor (für den Standard-SCS-UH 484 im imperialen Einheitensystem und 2,08 im SI-System)

A Einzugsgebietsfläche [km^2]

Q Abflusshöhe [mm/m^2]

ΔDDauer des Effektivniederschlags [h]

t_cKonzentrationszeit [h]

Der Term $A * Q$ repräsentiert hierbei das Gesamtvolumen des Effektivniederschlags. Der Peak Rate Faktor dient zur Festlegung der Fläche unter dem aufsteigenden Ast der Einheitsganglinie. Diese entspricht jenem Anteil des Effektivniederschlags, der vor der Abflussspitze zum Abfluss gelangt. Beim Standard-SCS-UH mit einem Flächenanteil von 37,5% unter dem aufsteigenden Ast beträgt der Peak Rate Faktor 484 für das imperial Einheitensystem bzw. 2,08 für das SI-System. Die Werte des Peak Rate Faktors können von 100 bis 600 reichen, wobei für steilere Einzugsgebiete eher hohe und für flache eher niedrige Werte anzusetzen sind.

Der Term $\frac{\Delta D}{2} + 0,6 * t_c$ stellt die Zeit t_p vom Beginn des Niederschlags bis zur Abflussspitze dar. Hierbei wird die Verzögerungszeit oder „Lag-Time“ t_{Lag} , also die Zeit vom Schwerpunkt des Niederschlagsereignisses bis zum Spitzenabfluss, mit $t_{Lag} = 0,6 * t_c$ angenommen. Diese Annahme beruht auf Untersuchungen von Mockus (1957) und Simas (1996) und gilt für Einzugsgebiete mit homogenen Eigenschaften und gleichmäßig verteilte Niederschläge.

Der maßgebende Parameter, der bei der Anwendung des SCS-UH Verfahrens geschätzt werden muss, ist die Konzentrationszeit t_c . Die anderen Parameter ergeben sich aus Eigenschaften des Einzugsgebietes und des Niederschlags, die im Anwendungsfall bekannt sind, oder, wie zum Beispiel der Effektivniederschlag, in vorhergehenden Modellierungsschritten errechnet werden.

Die Konzentrationszeit t_c kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten ausgelegt werden (USDA-NRCS, 2007):

- Als die Zeit, die jenes Wasserteilchen, das die größte hydraulische Entfernung zurücklegen muss, braucht, um zum Gebietsauslass zu gelangen. Die hydraulische Entfernung bezieht sich hierbei nicht auf den Fließweg, sondern sie ergibt sich aus der Zeit, die eine Wasserteilchen benötigt, um vom Punkt des Auftreffens auf die Oberfläche bis zum Gebietsauslass zu gelangen,
- oder als der Zeitraum zwischen dem Ende des Niederschlagsereignisses und dem Wendepunkt auf dem fallenden Ast der beobachteten Abflussganglinie.

Im Grunde laufen beide Auslegungen auf dieselbe Bedeutung hinaus, allerdings hat die erste mehr Relevanz in der Modellierungspraxis, da sie sich auch auf unbeobachtete Einzugsgebiete anwenden lässt.

Im Folgenden werden die zwei Verfahren erläutert, die vom NRCS in Kapitel 15 des National Engineering Handbook 630 empfohlen werden, um die Konzentrationszeit zu schätzen.

Verzögerungsbasierte Methode (Watershed lag Method)

Mockus entwickelte im Jahr 1961 eine Methode, um die Verzögerungszeit t_{Lag} eines Einzugsgebietes aus einfach zu ermittelnden Gebietseigenschaften abzuleiten. Aus dem empirischen Verhältnis $t_{Lag} = 0,6 * t_c$ lässt sich in weiterer Folge die Konzentrationszeit t_c errechnen.

Die von Mockus vorgeschlagene Formel lautet:

$$t_{Lag} = \frac{L^{0,8}(S + 25,4)^{0,7}}{7068,925 \cdot J^{0,5}} \quad (4.17)$$

beziehungsweise bei Einsetzen von $t_{Lag} = 0,6 * t_c$:

$$t_c = \frac{L^{0,8} \cdot (S + 25,4)^{0,7}}{4241,35 \cdot J^{0,5}} \quad (4.18)$$

Die Fließlänge L stellt die weiteste Distanz dar, die ein Wasserteilchen bis zum Gebietsauslass zurücklegen muss. Diese lässt sich mithilfe von Luftbildern oder Karten abschätzen, oder kann bei Vorliegen eines Digitalen Höhenmodells mithilfe von GIS-basierten Methoden ermittelt werden. Mockus veröffentlichte 1973 folgenden empirischen Zusammenhang zwischen L und der Einzugsgebietsfläche A :

$$L = 209 * A^{0,6} \quad (4.19)$$

Das Mittlere Einzugsgebietsgefälle J ist nicht zu verwechseln mit dem mittleren Gefälle des Fließweges, sondern bezieht sich auf das gesamte Einzugsgebiet. Der NRCS nennt in Kapitel 15 des National Engineering Handbook 630 (NEH 630-15) nennt folgende Methoden, um J zu ermitteln:

- Durch die Auswertung von Feldmessungen mit einem Inklinometer,

- basierend auf Geländekarten, indem an repräsentativen Stellen die Neigungen rechtwinkelig zu den Höhenschichtlinien abgelesen und gemittelt werden,
- oder bei Vorliegen von Rasterdaten durch GIS-basiertes Auszählen und Mittelung der Gefällewerte.

Die anderen im NEH 630-15 genannten Methoden sind nur für das US-Amerikanische Gebiet relevant.

Der maximale Gebietsrückhalt S entspricht dem mit der SCS-CN Methode ermittelten Wert für das Einzugsgebiet. Der Gültigkeitsbereich der Watershed-lag Methode liegt bei CN Werten von 50 bis 95 (Mockus 1961).

Geschwindigkeitsbasierte Methode (Velocity Method)

Diese physikalisch basierte Methode ist das Standardverfahren für die Ermittlung der Konzentrationszeit, das vom amerikanischen Landwirtschaftsministerium (NRCS – National Resource Conservation Service) verwendet wird. Es werden dabei drei elementare Fließprozesse unterschieden die in einer zeitlichen Abfolge hintereinander stattfinden: Zunächst erfolgt der Abfluss als verteilter Flächenabfluss („sheet flow“), welcher in den konzentrierten Flächenabfluss übergeht („shallow concentrated flow“) und zuletzt als Gerinneabfluss („open channel flow“) dem Gebietsauslass zustrebt.

In der Geschwindigkeitsbasierten Methode wird zunächst für jeden dieser Abflussprozesse die Fließzeit ermittelt. Die Summe der einzelnen Fließzeiten ergibt sodann die Konzentrationszeit t_c :

$$t_c = t_{sheet} + t_{shallow} + t_{chann} \quad (4.20)$$

Es ist zu beachten, dass die Konzentrationszeit wesentlich von den Eigenschaften des Niederschlagsereignisses abhängt. Der NRCS schlägt vor, der Berechnung der Konzentrationszeit das 2-jährliche, 24-stündige Niederschlagsereignis zugrunde zu legen, da davon ausgegangen wird, dass dieses repräsentativ für eine weite Bandbreite von Ereignissen ist. (USDA-NRCS, 2010).

Zur Ermittlung des verteilten Flächenabflusses wird eine von Welle und Woodward (1986) entwickelte vereinfachte Version der Fließformel nach Manning vorgeschlagen:

$$t_{sheet} = \frac{0,007 * (N * l)^{0,8}}{P_2^{0,5} * J^{0,4}} \quad (4.21)$$

N empirischer Rauigkeitskoeffizient

l Fließlänge des verteilten Flächenabflusses [Fuß]

P₂ Niederschlagsmenge eines 2-jährlichen, 24-stündigen Ereignisses [Zoll]

J Oberflächengefälle

Für die Fließlänge des verteilten Flächenabflusses *l* kann folgende Formel von McCuen und Spiess (1995) verwendet werden.

$$l = \frac{100 * \sqrt{S}}{n} \quad (4.22)$$

l Fließlänge des verteilten Oberflächenabflusses [Fuß]

S Gefälle

n Rauigkeitskoeffizient nach Manning

Bei der Anwendung der Formeln 4.21 und 4.22 ist darauf zu achten, dass diese für das imperiale Einheitensystem entwickelt wurden. Bei einer Anwendung mit SI-Einheiten sind die Parameter daher entsprechend umzurechnen.

Die Fließlänge des verteilten Oberflächenabflusses sollte nach Untersuchungen von Kibler und Aaron (1982) mit maximal 100 Fuß angesetzt werden. (NEH 630 Ch15, PDFS 15) Das HEC-HMS Technical Reference Manual nennt dahingegen einen Wert von 100 m. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

Der verteilte Oberflächenabfluss geht in den konzentrierten Flächenabfluss über, der entlang von Rinnen und ähnlichen Vertiefungen an der Oberfläche abfließt, ohne dass jedoch ein durchgehendes Gerinne mit einem abgrenzbaren Querschnitt definiert werden kann. Die Fließgeschwindigkeit des konzentrierten Flächenabflusses ist von der Oberflächenstruktur und dem Oberflächengefälle abhängig und kann aus dem Diagramm in Abb. 22 abgelesen werden.

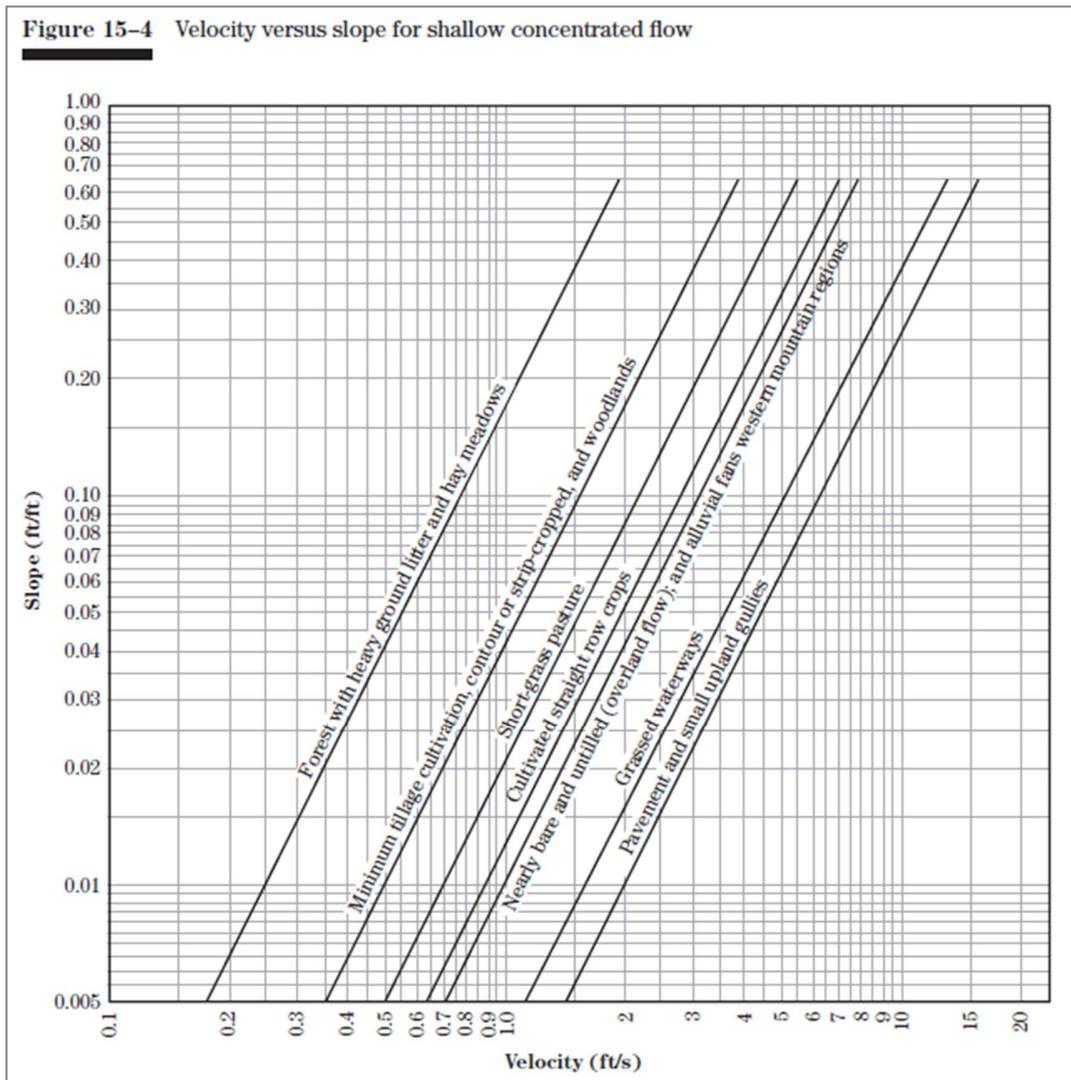


Abbildung 22: Diagramm zur Abschätzung der Fließgeschwindigkeit des konzentrierten Flächenabflusses im imperialen Einheitensystem (Quelle: NRCS)

Wenn der konzentrierte Flächenabfluss den Gerinnequerschnitt erreicht geht er in den Gerinneabfluss über. Die Formel von Strickler (siehe Formel 4.23) bietet eine ausreichend genaue Schätzung der Fließgeschwindigkeit des Gerinneabflusses.

$$v = R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} * k_{St} \quad (4.23)$$

v Fließgeschwindigkeit [m/s]

R hydraulischer Radius [m]

S Energieliniengefälle

k_{St} Rauigkeitskoeffizient nach Strickler

4.5.3.2. Umsetzung in HEC-HMS

In HEC-HMS kann zwischen einigen vorgegebenen Formen des SCS-UH mit unterschiedlichen Peak Rate Faktoren gewählt werden, sowie eine frei zu wählende Verzögerungszeit eingestellt werden.

4.5.4. Clark UH

4.5.4.1. Theorie

Die Methode von Clark (1945) stellt einen konzeptuellen Ansatz zur Ermittlung der Gebietseinheitsganglinie dar, bei dem der Abfluss im Einzugsgebiet durch die zwei Teilprozesse Translation und Retention dargestellt wird. Als Translation wird hierbei die gravitativ getriebene Bewegung des Wassers zum Gebietsauslass bezeichnet, während die Retention die Zusammenfassung sämtlicher verzögernder Wirkungen auf diese Bewegung, wie Oberflächenrauhigkeit und fließende Retention im Gerinne, darstellt.

Translation

Die mathematische Darstellung der Translation erfolgt mithilfe eines sogenannten Zeit-Flächen-Diagramms. Das Zeit-Flächen-Diagramm setzt die Flächenanteile des Einzugsgebietes mit den jeweiligen Konzentrationszeiten in Verbindung. Auf der Abszisse werden die Fließzeiten zum Gebietsauslass und auf der Ordinate die zugehörigen Flächenteile des Einzugsgebietes eingetragen.

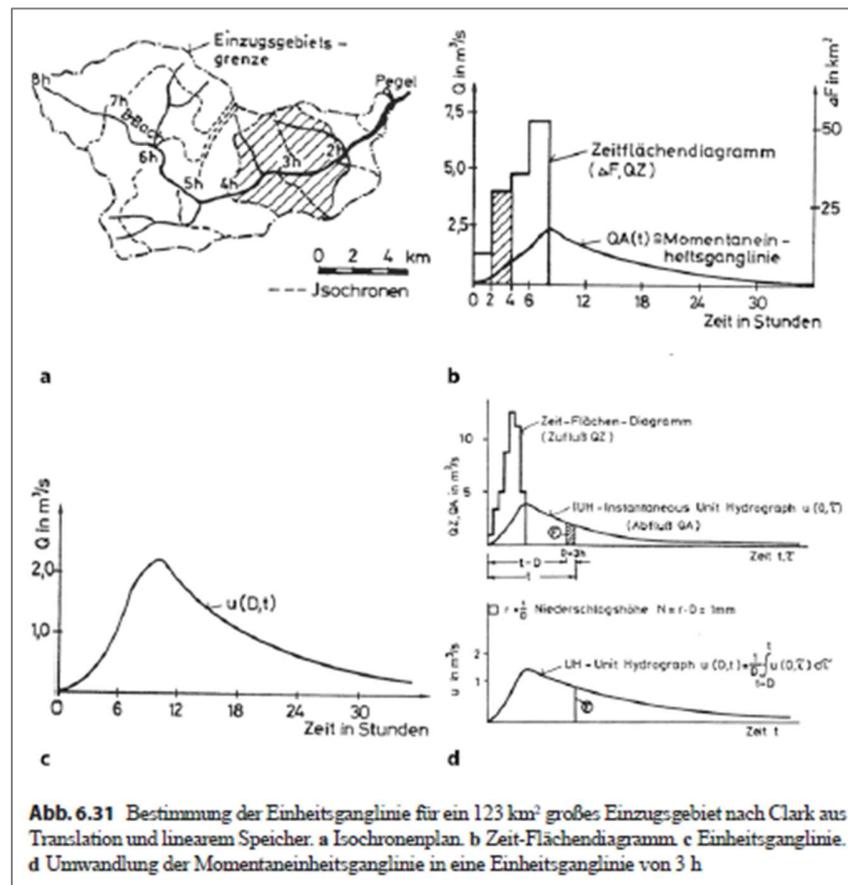


Abbildung 23: Beispiel für die Bestimmung der Einheitsganglinie mit dem Clark-Verfahren (Quelle: Maniak)

Das Zeit-Flächen-Diagramm kann zur Vereinfachung mithilfe eines Histogramms angenähert werden. Hierfür wird zunächst ein Zeitschritt Δt gewählt, der die Klassenbreite für das Histogramm bestimmt. Am Lageplan des Einzugsgebietes werden die Flächen, die den unterschiedlichen Fließzeitklassen entsprechen durch Linien gleicher Fließzeit (Isochronen) abgegrenzt. Der Flächeninhalt, der am Lageplan durch zwei Isochronen t_i und t_j und die Einzugsgebietsgrenzen abgegrenzt wird, wird im Histogramm in die jeweilige Fließzeitklasse eingetragen. Die Obere Klassengrenze der letzten Fließzeitklasse, auf die noch Flächenanteile entfallen definiert die Konzentrationszeit des Gesamteinzugsgebietes.

Alternativ zu der oben genannten Methode kann das Zeit-Flächen-Diagramm bei Vorliegen eines Digitalen Geländemodells auch mithilfe von GIS-Methoden ermittelt werden.

In einigen Studien wurde nachgewiesen, dass kein hoher Detailgrad des Zeit-Flächen-Diagramms notwendig ist, um mithilfe der Clark-Methode plausible Einheitsganglinien zu ermitteln. Turner und Burdoin (1941) und O’Kelly (1955) zeigten, dass eine Annäherung des Zeit-Flächen-Diagramms mithilfe von einfachen geometrischen Formen ausreichend ist. (Timothy D. Straub et al., 2000).

Indem der Gebietsniederschlag auf das Zeit-Flächen-Diagramm übertragen wird, gelangt man bei Anwendung der grundlegenden Annahmen für die Einheitsganglinie, nämlich Zeitinvarianz und Linearität, durch Skalierung und Superposition zum Abflusskonzentrationsdiagramm. (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, 1990)

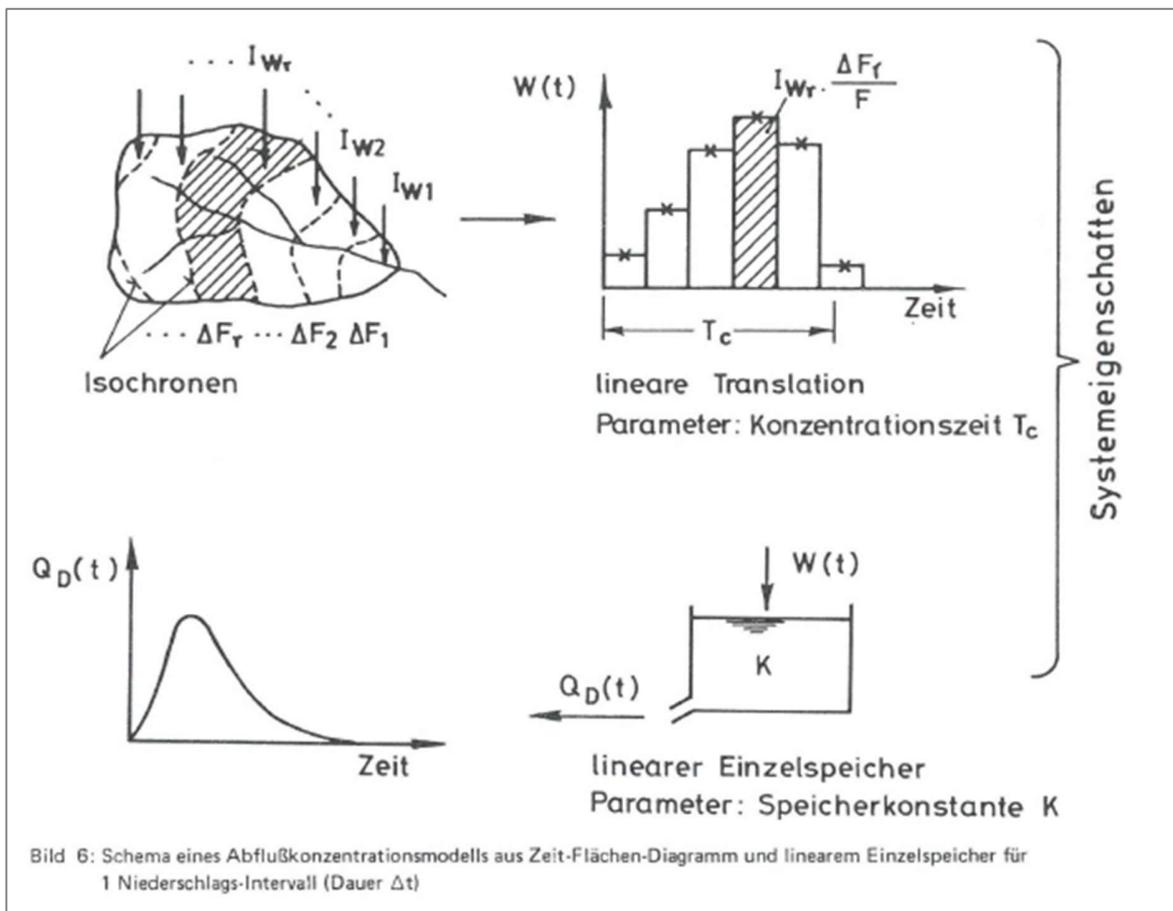


Abbildung 24: Schemadarstellung des Clark-Verfahrens (Quelle: DVWK)

Retention

Die Darstellung der Retention erfolgt beim der Clark-Verfahren mithilfe eines Linearen Einzelspeichers. Der Einzelspeicher wird konzeptuell am Gebietsauslass angenommen, sodass für den Speicherzufluss das Abflusskonzentrationsdiagramm herangezogen werden kann. Der Ausfluss aus dem Speicher stellt die zu modellierende Abflussganglinie dar.

Der Ansatz für den Linearen Speicher ergibt sich aus der Annahme, dass der Ausfluss aus dem Speicher linear zum Speicherinhalt ist:

$$S = K * q(t) \quad (4.24)$$

S Speicherinhalt [m^3]

K Speicherkonstante [s]

$q(t)$ Speicherausfluss zum Zeitpunkt t [m^3/s]

Die Kontinuitätsbedingung besagt, dass die Differenz aus Zu- und Abfluss der Änderung des Speicherinhalts entspricht:

$$\frac{dS}{dt} = p(t) - q(t) \quad (4.25)$$

$p(t)$ Zufluss zum Speicher zum Zeitpunkt t

Durch Einsetzen von Gleichung 4.25 in Gleichung 4.24 und eine näherungsweise Lösung mithilfe von finiten Differenzen erhält man die Arbeitsgleichung des Koeffizientenverfahrens (siehe Formel 4.26). Mit dieser kann der Speicherausfluss am Ende eines Zeitintervalls der Dauer Δt errechnet werden, wenn der Speicherzufluss und der Abfluss zu Beginn und zum Ende des Intervalls bekannt sind. (Maniak, 2010):

$$QA_2 = CQZ_m + (1 - C)QA_1 \quad (4.26)$$

wobei gilt:

$$C = \frac{\Delta t}{K + 0,5 * \Delta t} \quad (4.27)$$

und:

$$QZ_m = \frac{QZ_1 + QZ_2}{2} \quad (4.28)$$

Δt Dauer des betrachteten Zeitintervalls

QZ_1 Speicherzufluss zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls

QZ_2 Speicherzufluss zum Ende des betrachteten Zeitintervalls

QA_1 Speicherausfluss zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls

QA_2 Speicherausfluss zum Ende des betrachteten Zeitintervalls

Indem die Ordinaten des Abflusskonzentrationsdiagramms für den Speicherzufluss herangezogen werden, wird die Translationswelle durch den Linearpeicher geroutet und ergibt sodann die Abflussganglinie.

4.5.4.2. Umsetzung in HEC-HMS

HEC-HMS bietet zwei unterschiedliche Methoden für die Anwendung des Clark-UH-Verfahrens:

Bei der Standardmethode kann die Konzentrationszeit t_c als Eingangsparameter für die Translation und der Speicherkoeffizient K als Eingangsparameter für die Retention eingegeben werden. Des Weiteren kann zwischen einem vorgegebenen und einem benutzerdefinierten Zeit-Flächen-Diagramm gewählt werden.

Das im Programm inkludierte vorgegebene Zeit-Flächen-Diagramm geht von einem rautenförmigen Einzugsgebiet aus, sodass sich folgende Verhältnisse ergeben:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1,414 * \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{für } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1,5} & \text{für } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (4.29)$$

A_t kumulierter abflusswirksamer Flächenanteil zum Zeitpunkt t

A Flächeninhalt des Einzugsgebietes

Bei der Standardmethode wird gemäß der Grundannahme der Linearität davon ausgegangen, dass die hydrologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes unabhängig von der Niederschlagsintensität sind. Vor allem bei extremen Ereignissen entspricht diese Annahme allerdings nicht den natürlichen Gegebenheiten, weshalb in HEC-HMS mit der Variable-Parameter Methode eine Möglichkeit implementiert ist die Eingangsparameter t_c und K in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität einzustellen. Hierfür können für jeden Parameter benutzerdefinierte Prozentkurven

festgelegt werden, in denen das Verhältnis des jeweiligen Parameters zur Niederschlagsintensität abgebildet ist. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

ModClark UH

In HEC-HMS ist mit dem ModClark-Verfahren eine Umsetzung des Clark-Verfahrens in Form eines quasi-flächenverteilten („quasi-distributed“) Modells implementiert, die im Grunde die oben beschriebenen Berechnungen anwendet, jedoch für die Berechnung der Translation an Stelle eines Zeit-Flächen-Diagramms eine Rasterdarstellung des Einzugsgebietes verwendet. Das Einzugsgebiet wird hierbei in Rasterzellen eingeteilt und für jede Zelle wird die Fließzeit zum Gebietsauslass in Relation zur Konzentrationszeit des Einzugsgebietes errechnet.

Die Berechnung erfolgt über die Entfernung der Zelle zum Gebietsauslass, wobei die Fließzeit der Zelle mit der größten Entfernung genau der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. Für die Berechnung der Fließzeiten der einzelnen Zellen kommt folgende Formel zum Einsatz:

$$t_{zelle} = t_c \frac{d_{zelle}}{d_{max}} \quad (4.30)$$

t_{zelle} Fließzeit für die betrachtete Zelle

d_{zelle} Entfernung der betrachteten Zelle zum Gebietsauslass

d_{max} Entfernung zum Gebietsauslass der am weitesten vom Gebietsauslass entfernten Zelle

Der Effektivniederschlag wird für jede einzelne Zelle um die Fließzeit der Zelle verzögert und wie beim regulären Clark-Verfahren durch einen Linearspeicher geroutet. Dabei wird für alle Zellen ein einheitlicher Speicherkoeffizient verwendet.

Durch die oben beschriebene Vorgehensweise ergibt sich für jede Zelle eine eigene Abflussganglinie. Die Abflussganglinien der einzelnen Zellen werden sodann überlagert, wodurch sich die Abflussganglinie des Gesamteinzugsgebietes ergibt.

Für die Rasterdarstellung des Einzugsgebietes verwendet HEC-HMS ein eigenes Dateiformat, das mithilfe eigener GIS-Software erzeugt werden muss. Da die erforderliche Software für die Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht zur Verfügung stand wurde auf die Anwendung des ModClark-Verfahrens verzichtet. Das ModClark-Verfahren unterscheidet sich vom herkömmlichen Clark-Verfahren hauptsächlich durch

eine detailliertere Berücksichtigung der Translationsprozesse, die wie in Kapitel 4.5.4.1 beschrieben, einen eher geringen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse des ModClark-Verfahrens keine wesentlichen Abweichungen zu denen des regulären Clark-Verfahrens aufweisen würden.

5. Modellanwendung

In den folgenden Kapiteln soll untersucht werden, welche der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Modelle sich am besten eignen, um das gegenständliche Einzugsgebiet zu beschreiben. Hierfür werden für jedes Modell die Parameter auf die im jeweiligen Kapitel beschriebene Art und Weise ermittelt und die Berechnung für ausgewählte Ereignisse mittels HEC-HMS durchgeführt.

Es erfolgt eine Kalibrierung der Parameter unter Zuhilfenahme der in HEC-HMS implementierten Optimierungsalgorithmen, wobei das arithmetische Mittel der Kalibrierungsergebnisse für die Einzelereignisse als Parameter für das Einzugsgebiet herangezogen wird.

Die Berechnungsergebnisse werden mit den beobachteten Werten verglichen und die Abweichungen mithilfe der in HEC-HMS enthaltenen Zielindikatoren quantifiziert.

5.1. Kalibrierung

Bei der Kalibrierung werden die Modellparameter systematisch verändert und die Ergebnisse mit den beobachteten Werten verglichen. Dies wird solange iterativ durchgeführt bis keine Verbesserung der Ergebnisse mehr erzielt werden kann oder eine festgelegte Anzahl von Iterationsdurchläufen erreicht ist.

Die Kalibrierung kann händisch oder automatisch erfolgen. Bei der händischen Kalibrierung geben die Erfahrung und der Sachverstand des Anwenders vor, wie die Parameter angepasst werden und wann ein Ergebnis als zufriedenstellend, bzw. als das bestmögliche angenommen wird. Diese Vorgehensweise ist im Vergleich zur automatischen Kalibrierung sehr arbeitsintensiv und stark subjektiv geprägt, allerdings

bietet sie die Möglichkeit Expertenwissen und Erfahrungswerte in die Modellbildung einzubeziehen. Bei der automatischen Kalibrierung werden Optimierungsalgorithmen angewendet, die die Modellparameter nach einem bestimmten Muster iterativ anpassen, um einen bestimmten Zielindikator zu minimieren oder maximieren. Da der Wert des Zielindikators von den gewählten Parametersätzen abhängt spricht man von Zielfunktionen, die abhängig von der Anzahl der anzupassenden Parameter mehr oder weniger komplex sein können. Die in HEC-HMS enthaltenen Optimierungsalgorithmen sind die Univariate-Gradienten-Methode, die auf dem Newton-Verfahren beruht, und das Verfahren nach Nelder und Mead, die nicht mit der Ableitung der Zielfunktion arbeitet, sondern mithilfe eines sogenannten Simplex immer mehrere Parametersätze auf einmal vergleicht. (Hydrologic Engineering Center, 2000)

Die in HEC-HMS enthaltenen Zielindikatoren werden im Folgenden kurz vorgestellt. Bei der Anwendung eines Optimierungsalgorithmus kann immer nur ein Zielindikator als Zielfunktion gewählt werden, wobei die Wahl in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung erfolgt.

Summe der Residuen (Sum of Absolute Residuals, SAR)

Dieser Indikator gibt die Summe der Beträge der Abweichungen von berechneten und beobachteten Ordinaten (Residuen) der Abflussganglinie wieder. Die Summierung erfolgt ohne Gewichtung und es werden die Beträge der Abweichungen verwendet, um zu vermeiden, dass sich negative und positive Abweichungen kompensieren.

$$SAR = \sum_{i=1}^n |q_b(i) - q_s(i)| \quad (5.1)$$

n Gesamtzahl der Ordinatenwerte

$q_b(i)$ Beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt i

$q_s(i)$ Berechneter Abfluss zum Zeitpunkt i

Summe der quadrierten Residuen (Sum of Squared Residuals, SSR)

Bei diesem Indikator werden die Quadrate der Residuen summiert. Durch die Quadrierung der einzelnen Residuen wird bewirkt, dass stärkere Abweichungen stärker gewichtet werden.

$$SSR = \sum_{i=1}^n (q_o(i) - q_s(i))^2 \quad (5.2)$$

Abweichung der Abflussspitzen in Prozent (Percent Error in Peak)

Dieser Indikator vergleicht lediglich die Abflussspitzen der beobachteten und berechneten Ganglinie und lässt die anderen Ordinatenwerte sowie den Zeitpunkt der Abflussspitzen außer Acht. Dies ist vor Allem für jene Anwendungsfälle relevant, bei denen das Ziel der Modellierung eine möglichst genaue Voraussage des Spitzenabflusses ist, wie zum Beispiel bei der Ermittlung von Überflutungsflächen.

$$PEP = 100 * \left| \frac{q_s(max) - q_o(max)}{q_o(max)} \right| \quad (5.3)$$

Spitzengewichtete Wurzel der Quadrierten Residuen (Peak-weighted Root Mean Square Error, PRMSE)

Dieser Indikator enthält einen Term zur Gewichtung jener Ordinaten, die den durchschnittlichen Abflusswert über- bzw. unterschreiten. Für jene Ordinaten, bei denen der beobachtete Wert über dem Durchschnitt liegt, ist der Gewichtungsfaktor größer als 1,00, für jene Werte unter dem Durchschnitt ist der Gewichtungsfaktor kleiner als 1,00. Hierdurch werden hohe Abflusswerte im Bereich der Abflussspitze stärker gewichtet, was für wasserwirtschaftliche Anwendungen geeignet ist.

$$PRMSE = \left(\frac{\sum (q_o(i) - q_s(i))^2 * \left(\frac{q_o(i) + \bar{q}_o}{2 * \bar{q}_o} \right)}{n} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

In der vorliegenden Arbeit wird der PMRSE als Zielfunktion für die Kalibrierung verwendet, da er sowohl die Bedeutung des Spitzenabflusses als auch des gesamten Abflussvolumens berücksichtigt.

5.2. Auswahl Ereignisse

Für die Kalibrierung von Ereignismodellen werden üblicherweise mehrere beobachtete Ereignisse verwendet und das arithmetische Mittel der Kalibrierungsergebnisse der Einzelereignisse gebildet. Die Wahl der Ereignisse sollte nach Möglichkeit so ausfallen, dass möglichst viele hydrologische Situationen erfasst sind, und mindestens ein großes und mehrere kleine Ereignisse enthalten sind, allerdings sollten auch Ereignisse für die Validierung aufbewahrt werden. Es sollte zudem darauf geachtet werden, dass Ereignisse verwendet werden, bei denen das gesamte Einzugsgebiet überregnet wurde und die Niederschlagsdauer größer als die Konzentrationszeit ist, sodass Beobachtungswerte vorliegen, bei denen das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt. (Hydrologic Engineering Center, 2000).

Des Weiteren sollten die Abflussganglinien der gewählten Ereignisse nach Möglichkeit nur eine deutliche Abflussspitze aufweisen (Maniak, 2010) und über einen deutlich ausgeprägten abfallenden Ast verfügen, sodass das Leerlaufen des Gebietsspeichers gut abgebildet wird.

Aus dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Messzeitraum vom 27.01.2015 bis 09.02.2018 wurden drei Ereignisse gewählt, die den oben genannten Anforderungen möglichst gut entsprechen. Um eine Beeinflussung durch Schneeschmelzprozesse und Schneeablagerungen im Gerinne auszuschließen wurden nur Ereignisse aus dem Zeitraum von Mai bis September in Betracht gezogen.

Die Auswahl der Ereignisse erfolgte optisch anhand einer überlagerten Darstellung der Niederschlags- und Abflussganglinien. Als Kriterium für den Beginn des Hochwasserganglinie wurde jenes Zeitintervall herangezogen, in dem der Abfluss das Mittel der Abflüsse der drei davorliegenden Intervalle erstmals um $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ übersteigt. Das Mittel der letzten drei Abflusswerte vor dem Beginn des Hochwasserganglinie wurde als Basisabfluss definiert.

In Tabelle 3 sind die Kennwerte der gewählten Ereignisse aufgelistet, die zugehörigen Niederschlags- und Abflussganglinien sind in den Abb. 25 bis 27 dargestellt.

Tabelle 3: Kennwerte der ausgewählten Ereignisse

	Ereignis 1	Ereignis 2	Ereignis 3
Zeitpunkt Anfang	22.05.2015 09:00	02.09.2017 13:00	19.09.2017 00:00
Zeitpunkt Ende	28.05.2015 08:35	06.09.2017 07:35	26.09.2017 18:35
Niederschlagshöhe $h_{N,\Sigma}$ [mm]	69,4	31,5	64,1
Kumulierte Abflusshöhe $h_{Q,\Sigma}$ [mm]	15,2	8,3	19,1
Anfangsverluste $h_{N,Av}$ [mm]	14,4	3,2	6,3
Niederschlagsverluste $h_{N,v}$ [mm]	39,8	20,0	38,7
Abflussbeiwert a	0,22	0,26	0,30
Niederschlagsdauer [min]	1.575	1.010	1.785
Niederschlagsintensität [mm/h]	2,6	1,9	2,2

Die Beobachtungswerte für die Anfangsverluste wurden grafisch ermittelt, indem jener Zeitpunkt auf der Abflussganglinie herausgesucht wurde, ab dem ein signifikanter Anstieg erfolgt. Die kumulierte Niederschlagshöhe bis zu diesem Zeitpunkt entspricht den Anfangsverlusten $h_{N,Av}$.

Die kumulierte Abflusshöhe $h_{Q,\Sigma}$ stellt die auf die Fläche des Einzugsgebietes bezogene Abflussfracht dar.

Die Beobachtungswerte für die kumulierten Niederschlagsverluste $h_{N,v}$ ergaben sich aus den Differenzen zwischen den kumulierten Niederschlagshöhen $h_{N,\Sigma}$ und den kumulierten Abflusshöhen $h_{Q,\Sigma}$ und den Anfangsverlusten $h_{N,Av}$.

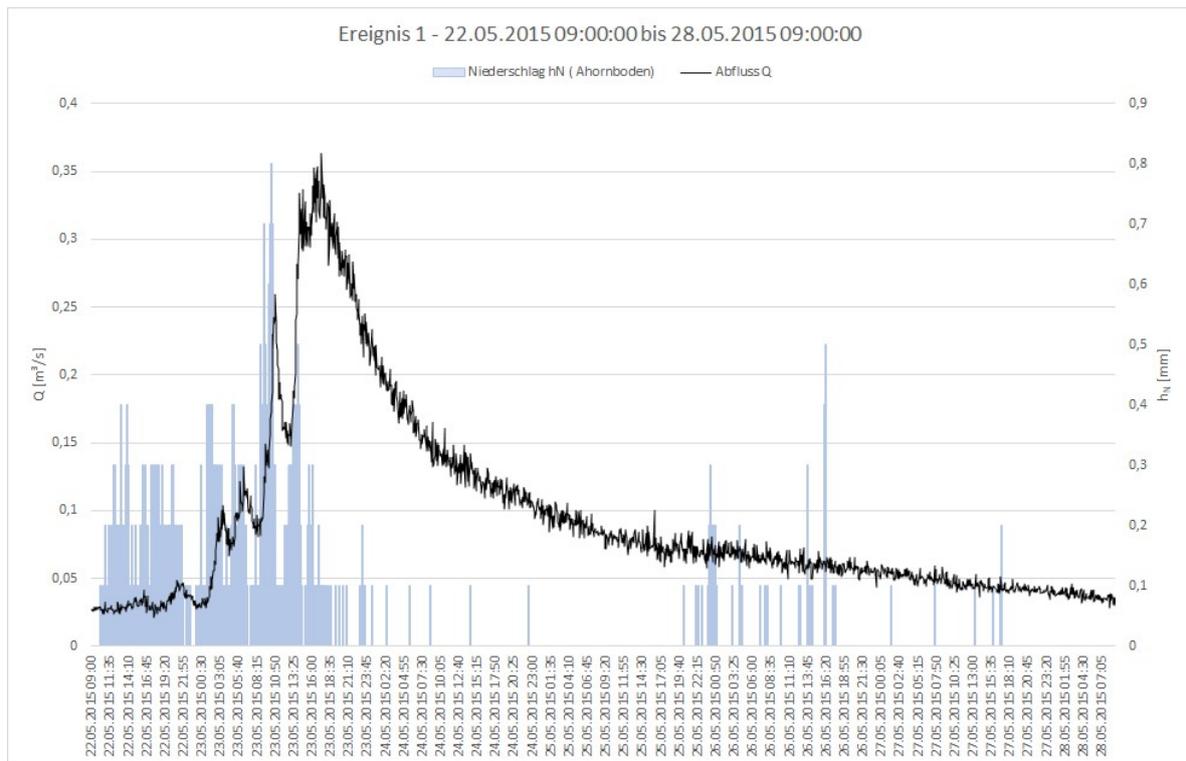


Abbildung 25: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 1

Ereignis 1 vom 22.05.2015, 09:00 Uhr bis zum 28.05.2015, 08:35 Uhr weist eine kumulierte Abflusshöhe des Direktabflusses $h_{Q,\Sigma}$ von 15,2 mm und eine kumulierte Niederschlagshöhe $h_{N,\Sigma}$ von 69,4 mm auf. Daraus ergibt sich ein Abflussbeiwert a von 0,22. Die Anfangsverluste $h_{N,Av}$ betragen 0,5 mm und die kumulierten Niederschlagsverluste $h_{N,v}$ 53,7 mm.

Vom 22.05.2015, 10:15 Uhr bis zum 24.05.2018, 02:30 Uhr kann ein einheitliches hochwasserauslösendes Niederschlagsereignis abgegrenzt werden. Die im späteren Verlauf des Hochwasserereignisses aufgetretenen Einzelniederschläge können für die Kalibrierung vernachlässigt werden. Die mittlere Niederschlagsintensität des Ereignisses beträgt 2,6 mm/h, wobei die Intensität, wie bei allen untersuchten Ereignissen, keinen konstanten Verlauf aufweist, sondern mehrmals anschwillt und wieder abnimmt. Die Intensitäten sind in der zweiten Hälfte des Niederschlagsereignisses deutlich höher als in der ersten. Das erste deutliche An- und Abswellen des Niederschlages endete ca. am 22.05.2015 um 21:15 und löste nur ein geringes Ansteigen der Abflussgangwelle aus. Auf die darauffolgenden Intensitätsschübe ist dahingegen eine deutliche Reaktion der Abflussganglinie erkennbar. Die Reaktion des Abflusses wurde mit jedem

neuerlichen Anstieg der Niederschlagsintensität schneller und stärker, bis die Abflussganglinie am 23.05.2015 um 17:20 Uhr ihr Maximum mit einem Abfluss von $0,364 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichte. Die Abflussspitze fällt relativ genau mit dem Ende des Niederschlagsereignisses zusammen. Danach geht die Abflussganglinie in einen kontinuierlich fallenden Verlauf über, der mit seiner charakteristischen Form das langsame Leerlaufen des Gebietsspeichers darstellt.

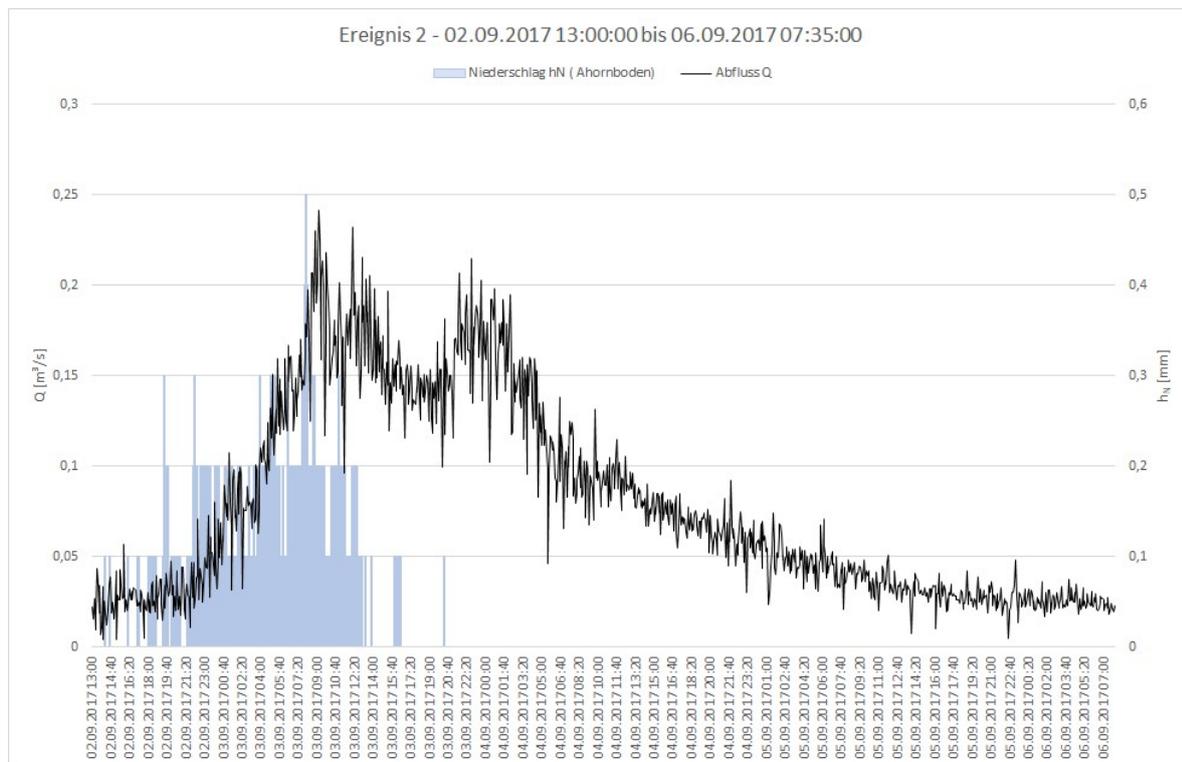


Abbildung 26: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 2

Ereignis 2 vom 02.09.2017, 13:00 Uhr bis zum 06.09.2017, 07:35 Uhr hat ein deutlich geringeres Ausmaß als die beiden anderen Ereignisse. Es weist eine kumulierte Höhe des Direkten Abflusses $h_{Q,\Sigma}$ von 8,3 mm und eine kumulierte Niederschlagshöhe $h_{N,\Sigma}$ von 31,5 auf. Daraus ergibt sich ein Abflussbeiwert a von 0,26. Die Abflussganglinie reagiert schon auf die ersten Niederschläge, weshalb keine Anfangsverluste $h_{N,Av}$ festgestellt wurden. Die kumulierten Niederschlagsverluste $h_{N,v}$ betragen 23,2 mm. Das hochwasserauslösende Niederschlagsereignis lässt sich deutlich abgrenzen und endete am 03.09.2017 um 12:50, im späteren Verlauf des Hochwasserereignisses

wurden bis auf zwei Ausnahmen keine Einzelniederschläge mehr gemessen. Der Intensitätsverlauf des hochwasserauslösenden Niederschlages weist im Vergleich zu den beiden anderen Ereignissen etwas weniger Schwankungen auf, was aber auch an der kürzeren Dauer liegen kann. Insgesamt liegt der Schwerpunkt der Intensität in der zweiten Hälfte des Niederschlagsereignisses.

Analog zum Niederschlag weist auch die Abflussganglinie im Anstieg einen etwas ruhigeren Verlauf auf. Der Spitzenabfluss von $0,241 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde am 03.09.2017 um 09:10 erreicht. Danach erfolgte ein kurzer Rückgang des Abflusses, der, ausgelöst durch einen neuerlichen Anstieg der Niederschlagsintensität unterbrochen wurde. Kurz nach der ersten Abflussspitze wurde am 03.09.2017 um 12:10 eine neuerliche Spitze von $0,232 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht.

Danach wurden keine nennenswerten Niederschläge mehr gemessen, weshalb zu erwarten wäre, dass das Einzugsgebiet leerläuft und die Abflussganglinie kontinuierlich fällt. Entgegen dieser Annahme erfolgte allerdings am 03.09.2017 um 21:15 ein neuerlicher Anstieg der Ganglinie, der am 03.09.2017 um 22:45 in einer Abflussspitze von $0,215 \text{ m}^3/\text{s}$ gipfelte. Dieser neuerliche Anstieg steht mit keinem gemessenen Niederschlag im Zusammenhang. Dies kann entweder durch einen Messfehler erklärt werden oder dadurch, dass das Einzugsgebiet nicht einheitlich überregnet wurde und daher der Niederschlag, der das neuerliche Anschwellen des Abflusses verursachte, nicht gemessen werden konnte. Bei Betrachtung des Intensitätsverlaufs der gemessenen Niederschläge könnte eine kleinräumige Schauerzelle, die sich über das Einzugsgebiet bewegte als mögliche Erklärung dienen. Diese Annahme kann allerdings nicht überprüft werden, da sich in der Nähe des Einzugsgebietes keine weiteren Niederschlagsmessstellen mit ausreichender zeitlicher Auflösung befinden.

Im Anschluss an den beschriebenen neuerlichen Anstieg geht die Abflussganglinie in einen kontinuierlich fallenden Verlauf über.

Eine automatische Kalibrierung mithilfe von Optimierungsalgorithmen würde für Ereignis 2 verfälschte Ergebnisse liefern, da der beschriebene Neuanstieg des Abflusses in der Simulation aufgrund des Fehlens der zugehörigen Niederschlagsdaten nicht aufscheinen würde. Für die händische Kalibrierung kann das Ereignis dennoch

herangezogen werden, da der sonstige Verlauf der Abflussganglinie eine charakteristisch ausgeprägte Form aufweist.

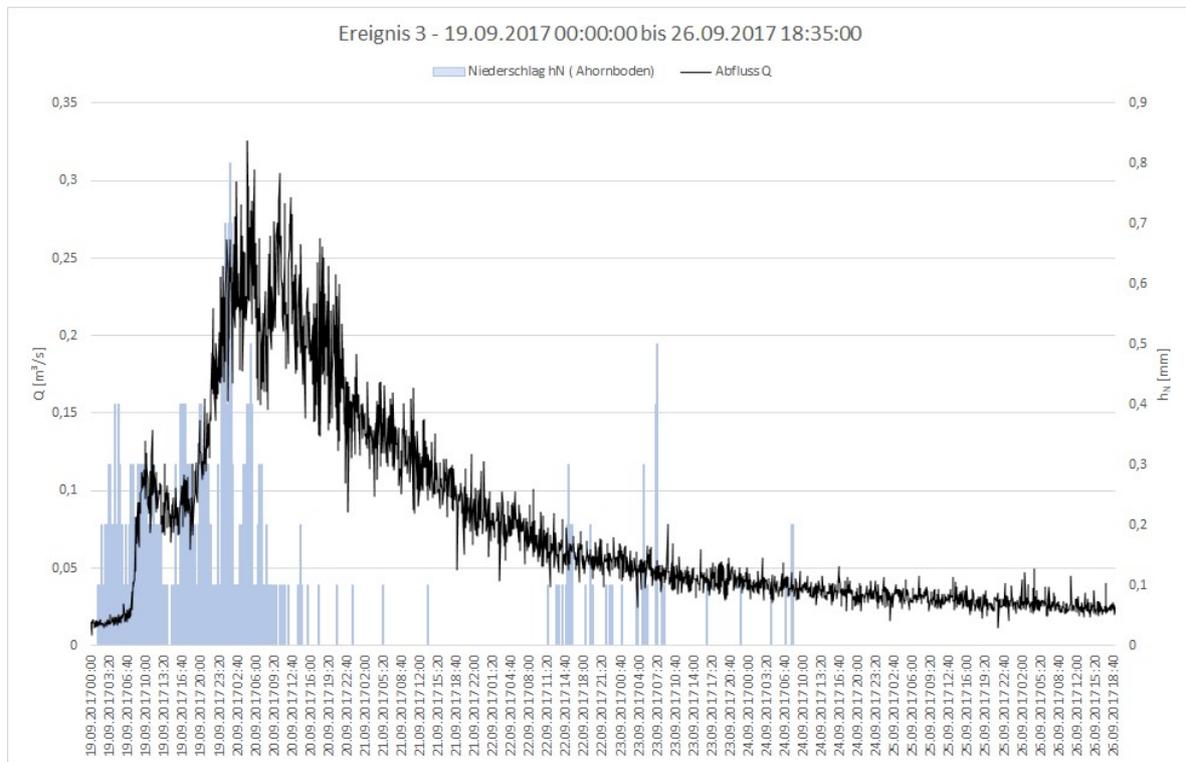


Abbildung 27: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 3

Ereignis 3 vom 19.09.2017, 00:00 Uhr bis zum 26.09.2017, 18:35 Uhr weist eine kumulierte Abflusshöhe des Direktabflusses $h_{Q,\Sigma}$ von 19,1 mm und eine kumulierte Niederschlagshöhe $h_{N,\Sigma}$ von 64,1 mm auf. Daraus ergibt sich ein Abflussbeiwert a von 0,30. Die Anfangsverluste $h_{N,AV}$ betragen 0,5 mm und die kumulierten Niederschlagsverluste $h_{N,V}$ 44,5 mm.

Grundsätzlich ähnelt der Verlauf von Ereignis 3 jenem von Ereignis 1. Nachdem auf das erste Ansteigen der Niederschlagsintensität keine starke Reaktion der Abflussganglinie erfolgte, führten die Intensitätsschübe im weiteren Verlauf des Ereignisses zu einem unmittelbaren Anstieg des Abflusses.

Die Abflussspitze ist weniger deutlich ausgeprägt als bei Ereignis 1, vielmehr lassen sich drei Spitzen identifizieren, die in kurzen zeitlichen Abständen aufeinanderfolgen. Die erste Spitze am 20.09.2017 um 04:30 ist zugleich das Abflussmaximum von 0,326 m³/s.

Am 20.09.2017 um 10:25 wurde, ausgelöst durch ein neuerliches Ansteigen der Niederschlagsintensität, eine weitere Abflussspitze von $0,305 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht. Ebenso löste ein nochmaliger Anstieg der Niederschlagsintensität die dritte Abflussspitze am 20.09.2017 um 18:10 mit einer Höhe von $0,258 \text{ m}^3/\text{s}$ aus.

Nach dem Erreichen der dritten Abflussspitze geht die Abflussganglinie in einen kontinuierlich fallenden Verlauf über.

5.3. Modellierung der Abflussbildung

5.3.1. Verlustratenverfahren

Das Verlustratenverfahren eignet sich vor Allem für jene Anwendungsfälle, in denen ausreichende Abflussdaten vorliegen, um die Verlustraten auf die in Kapitel 4.4.1.2 erläuterte Art und Weise aus den Niederschlag-Abflussdaten rückzurechnen. Da dies für den gegebenen Fall nicht zutrifft und da die in Kapitel 4.4.1.2 erwähnten Anhaltspunkte für die Schätzung der Anfangsverluste und der Verlustrate auf das gegenständliche Einzugsgebiet nicht angewendet werden können, wäre eine Untersuchung der Ergebnisse des Verlustratenverfahrens nicht sehr aussagekräftig. Für die Berechnung der Abflussbildung wurde in der vorliegenden Arbeit daher nur das SCS-CN Verfahren angewendet.

5.3.2. CN-Verfahren

In HEC-HMS können für das CN-Verfahren zwei Parameter eingegeben werden: Die Anfangsverluste $h_{N,Av}$ und die Kurvennummer CN .

Da im Einzugsgebiet unterschiedliche Flächennutzungen und Untergrundverhältnisse vorkommen wurde als CN-Wert für das Gesamteinzugsgebiet das flächengewichtete Mittel der CN-Werte der Teilflächen verwendet. Die Anfangsverluste wurden mithilfe von Formel 4.6 bei einer Initial-Abstraction-Ratio von $\lambda = 0,05$ berechnet.

Die Abgrenzung der Teilflächen erfolgte optisch anhand von Orthofotos, auf denen zunächst die Grenzen der Oberflächennutzungen eingetragen wurden, die sodann im Zuge einer Feldbegehung verifiziert wurden.

Der CN-Wert stellt einen empirischen Wert dar, der aus Tabellen entnommen werden kann, die zum Beispiel vom NRCS auf der Basis von Berechnungsversuchen und der Auswertung von natürlichen Ereignissen veröffentlicht werden. Die Tabellenwerte werden auf Grundlage der folgenden drei Eingangsfaktoren ausgewählt:

- Untergrundverhältnisse, dargestellt durch die „Hydrologic Soil Group“ (HSG),
- Oberflächennutzung,
- und Oberflächenbewirtschaftung

Untergrundverhältnisse:

Die Berücksichtigung der Untergrundverhältnisse erfolgt bei der CN-Methode durch die Einordnung in eine von vier Hydrologischen Bodengruppen („Hydrologic Soil Group“):

- Gruppe A - Böden mit sehr geringem Abflusspotential: Zu dieser Gruppe gehören Böden mit einer großen hydraulischen Leitfähigkeit, wie zum Beispiel Sande und Kiese. Der Tonanteil beträgt typischerweise weniger als 10 % während der Anteil and Sand bzw. Kies über 90 % liegt.
- Gruppe B - Böden mit einem eher geringen Abflusspotential: Zu dieser Gruppe zählen sandige Lehme und lehmige Sande, bei denen keine Hindernisse für die Versickerung in den Untergrund vorliegen. Der typische Tonanteil liegt typischerweise bei 10 bis 20 % während der Sandanteil bei 50 bis 90 % liegt.
- Gruppe C – Böden mit eher hohem Abflusspotential: In dieser Gruppe sind Böden mit einer eher geringen hydraulischen Leitfähigkeit zusammengefasst, wie Lehme bzw. schluffige Lehme. Der Tonanteil liegt typischerweise bei 20 bis 40 %, der Sandanteil bei weniger als 50 %.
- Gruppe D – Böden mit sehr hohem Abflusspotential: Die Böden dieser Gruppe weisen eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit auf, wie zum Beispiel Tone. Der Tonanteil liegt typischerweise bei über 40 % und der Sandanteil bei unter 50 %. Zu dieser Gruppe werden zudem auch jene Böden gezählt, bei denen die Tiefe bis zur wasserundurchlässigen Schicht weniger als 50 cm beträgt.

Der NRCS schlägt in Kapitel 7 des National Engineering Handbook 630 Grenzwerte der hydraulischen Leitfähigkeit und des Bodenaufbaus vor, anhand derer eine Zuordnung zu

den Hydrologischen Bodengruppen erfolgen kann. Die zugehörigen Grenzwerte sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Grenzwerte für die Einordnung in Hydrologische Bodengruppen (Quelle: NRCS)

Depth to water impermeable layer ^{1/}	Depth to high water table ^{2/}	K _{sat} of least transmissive layer in depth range	K _{sat} depth range	HSG ^{3/}
<50 cm [<20 in]	—	—	—	D
50 to 100 cm [20 to 40 in]	<60 cm [<24 in]	>40.0 µm/s (>5.67 in/h)	0 to 60 cm [0 to 24 in]	A/D
		>10.0 to ≤40.0 µm/s (>1.42 to ≤5.67 in/h)	0 to 60 cm [0 to 24 in]	B/D
		>1.0 to ≤10.0 µm/s (>0.14 to ≤1.42 in/h)	0 to 60 cm [0 to 24 in]	C/D
		≤1.0 µm/s (≤0.14 in/h)	0 to 60 cm [0 to 24 in]	D
	≥60 cm [≥24 in]	>40.0 µm/s (>5.67 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	A
		>10.0 to ≤40.0 µm/s (>1.42 to ≤5.67 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	B
		>1.0 to ≤10.0 µm/s (>0.14 to ≤1.42 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	C
		≤1.0 µm/s (≤0.14 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	D
>100 cm [>40 in]	<60 cm [<24 in]	>10.0 µm/s (>1.42 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	A/D
		>4.0 to ≤10.0 µm/s (>0.57 to ≤1.42 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	B/D
		>0.40 to ≤4.0 µm/s (>0.06 to ≤0.57 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	C/D
		≤0.40 µm/s (≤0.06 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	D
	60 to 100 cm [24 to 40 in]	>40.0 µm/s (>5.67 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	A
		>10.0 to ≤40.0 µm/s (>1.42 to ≤5.67 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	B
		>1.0 to ≤10.0 µm/s (>0.14 to ≤1.42 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	C
		≤1.0 µm/s (≤0.14 in/h)	0 to 50 cm [0 to 20 in]	D
>100 cm [>40 in]	>10.0 µm/s (>1.42 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	A	
	>4.0 to ≤10.0 µm/s (>0.57 to ≤1.42 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	B	
	>0.40 to ≤4.0 µm/s (>0.06 to ≤0.57 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	C	
	≤0.40 µm/s (≤0.06 in/h)	0 to 100 cm [0 to 40 in]	D	

1/ An impermeable layer has a K_{sat} less than 0.01 µm/s [0.0014 in/h] or a component restriction of fragipan; duripan; petrocalcic; orstein; petrogypsic; cemented horizon; dense material; plastic; bedrock, paralithic; bedrock, lithic; bedrock, dense; or permafrost.

2/ High water table during any month during the year.

3/ Dual HSG classes are applied only for wet soils (water table less than 60 cm [24 in]). If these soils can be drained, a less restrictive HSG can be assigned, depending on the K_{sat}.

Basierend auf der Beschreibung des Einzugsgebietes von Ruf (Forstliche Bundesversuchsanstalt) und den Fernerkundungsdaten, die für die Erstellung der vorliegenden Arbeit in Form eines Digitalen Geländemodells und eines Orthofotos vorlagen, kann allgemein von einer sehr geringen Bodenmächtigkeit ausgegangen

werden, sodass gemäß Kapitel 7 des NEH eine vorläufige Zuordnung der einzelnen Teilflächen zur Hydrologischen Bodengruppe D erfolgte. Diese Zuordnung wurde im Zuge von Feldbegehungen anhand von natürlichen Bodenaufschlüssen verifiziert und gegebenenfalls korrigiert.

Oberflächennutzung und Oberflächenbewirtschaftung:

Im Kapitel 8 des National Engineering Handbook 630 (NEH 630-8) wird zwischen Oberflächennutzung und Oberflächenbewirtschaftung unterschieden, wobei mit der Oberflächennutzung die Bedeckung der Geländeoberfläche mit einer bestimmten Nutzungsform wie z.B. Landwirtschaft, Siedlungsgebiet, Wald, etc. beschrieben wird und die Oberflächenbewirtschaftung sich auf die Bewirtschaftungspraxis, vor allem von landwirtschaftlich genutzten Flächen, bezieht.

Das NEH 630-8 enthält Beschreibungen für eine Vielzahl von unterschiedlichen Formen der Oberflächennutzung, wobei der Schwerpunkt auf einer detaillierten Unterteilung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzungsformen liegt, da die CN-Methode ursprünglich für vorwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiete entwickelt wurde. Bei der Beschreibung einiger Nutzungsklassen wird zusätzlich anhand der unterschiedlichen Oberflächenbewirtschaftungspraktiken der hydrologische Zustand bewertet, wobei zwischen Gut („Good“), Mittel („Fair“) und Schlecht („Poor“) unterschieden wird.

Bei bewaldeten Flächen wird zwischen natürlichem Wald („Forest“) und Forst („Wood“), also landwirtschaftlich genutztem Wald, unterschieden. Diese Unterscheidung ist von großer Bedeutung, da in natürlichen Wäldern, vor allem bei solchen auf einem Untergrund der Hydrologischen Bodengruppe A mit einer anstehenden undurchlässigen Schicht, ein „Complacent-Violent“ Abflussverhalten vorliegt, welches nicht den Grundannahmen der CN-Methode entspricht.

Dies liegt daran, dass beim „Complacent-Violent“ Abflussverhalten in der Regel kein oder kaum Oberflächenabfluss auftritt, da der gesamte Niederschlag in den Untergrund versickert. Bei Extremereignissen mit größeren Wiederkehrintervallen kommt es allerdings zu einer Vollauffüllung der Porenräume, sodass keine Versickerung in den gesättigten Untergrund mehr stattfinden kann und jeder weitere Niederschlag an der

Oberfläche abfließt. Vor allem bei der Modellierung von Extremereignisse mit einem Wiederkehrintervall von mehr als 100 Jahren wird die Anwendung der CN-Methode daher nicht empfohlen. (USDA-NRCS, 2017b)

Bei Vorliegen von Mischformen zwischen natürlichem Wald und Forst liegt die Einordnung im Ermessen des Anwenders.

Hydrologische Boden-Landnutzungs-Kombinationen

In Kapitel 9 des NEH 630 (NEH 630-9) werden für eine Vielzahl von unterschiedlichen Boden-Landnutzungs-Kombinationen oder „Soil-Cover-Complexes“ CN-Werte in tabellarischer Form vorgestellt. Tab. 5 zeigt einen Ausschnitt der CN-Tabellen mit den für das gegenständliche Einzugsgebiet relevanten CN-Werten.

Tabelle 5: Ausgewählte CN-Werte (Quelle: NRCS)

Cover description			CN for Hydrologic Soil Group			
Land Use or Cover type	Land Treatment	Hydrologic condition	A	B	C	D
Woods		Poor	37	58	70	77
		Fair	28	51	66	73
		Good	23	46	52	70
Meadow - continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay		Good	23	49	63	71
Pasture, grassland, or range - continuous forage for grazing		Poor	60	73	81	85
		Fair	40	61	73	79
		Good	31	52	67	74

Feldbegehungen

Am 15.09.2019 und am 03.12.2018 wurden Begehungen des Einzugsgebietes vorgenommen, um die anhand von Orthofotos vorgenommenen Abgrenzungen der Teilflächen und der jeweiligen Nutzungs- und Untergrundverhältnisse zu verifizieren.

Hierfür wurde zunächst unter der Zuhilfenahme von Wanderkarten und Satellitenbildern eine Begehungsrouten festgelegt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Route durch alle zuvor ausgewiesenen Teilflächen führt, sofern die Wegbarkeit des Geländes dies zuließ. Des Weiteren wurden Stationen eingeplant, von denen eine gute Aussicht über

das Einzugsgebiet und nach Möglichkeit eine gute Einsehbarkeit der schwer zugänglichen Teilflächen zu erwarten war.

Eine Einschätzung der Untergrundverhältnisse erfolgte anhand von natürlichen Bodenaufschlüssen, wie zum Beispiel Böschungsabbrüchen am Wegrand, die mithilfe eines Spatens aufbereitet wurden (s. Kapitel 2.3).

Da im Vorfeld der Begehung nicht ausgeschlossen werden konnte, dass Boden-Landnutzungskombinationen im Einzugsgebiet anzutreffen sind, die, wie weiter oben beschrieben für die Anwendung des CN-Verfahrens ungeeignet sind, wurden bei der Begehung auch die Abflussbeiwertklassen nach der Geländeanleitung von Markart (G. Markart et al., 2004) erhoben, um die Abflusentstehung alternativ zum CN-Verfahren auch über den Abflussbeiwert berechnen zu können. Hierbei wurde analog zum CN-Verfahren das flächengewichtete Mittel der Abflussbeiwerte der Teilflächen als Abflussbeiwert für das Gesamteinzugsgebiet herangezogen.

Um auch eine Abschätzung der Abflussverhältnisse im Gerinne zu ermöglichen, wurden bei den Begehungen das Gerinnebett streckenweise abgegangen, sofern dieses zugänglich war, und auf Fotos dokumentiert (s. Abb. 28 und 29).



Abbildung 28: Gerinneabschnitt unterhalb der Schindleralm mit schematischer Markierung des Gerinnverlaufs. (15.09.2019)



Abbildung 29: Gerinneabschnitt ca. 50 m oberhalb des Gebitsauslasses, in Fließrichtung fotografiert. (03.12.2018)

Die Abgrenzungen der Teilflächen und die zugehörigen CN-Werte und Abflussbeiwertklassen nach Markart sind in Abb. 30 und in den Tabellen 6 und 7 ersichtlich, die Nummerierung der Teilflächen bezieht sich auf die Tabellen 6 und 7.

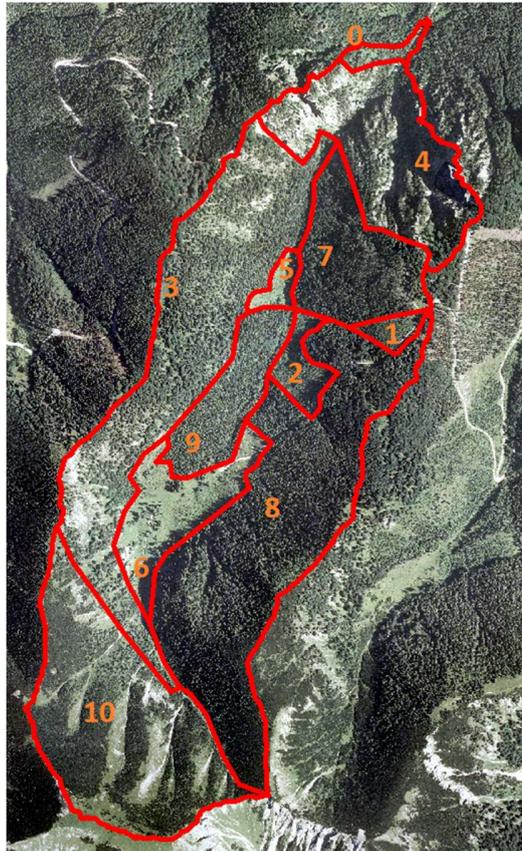


Abbildung 30: Abgrenzungen der Teilflächen mit Nummerierung für Tabelle 6 (Quelle: www.atlas.noel.gv.at, bearbeitet)

Der NRCS empfiehlt CN-Werte für Mischflächen aus Wald und Wiese („Wood-grass-combination, orchard“) zu errechnen, indem die CN-Werte für Wald und jene für Wiese entsprechend der vorliegenden Flächenverteilung gewichtet werden. Da in der Literatur keine CN-Werte für Flächen gefunden wurden, die der Teilfläche 10 entsprechen (Latschenbewuchs mit Einsprengseln von alpinen Rasenflächen und nacktem Fels), wurde diese Vorgehensweise übernommen, wobei eine Flächenverteilung von 85 % Wald („Wood“) und 15 % Wiese („Pasture“) angenommen wurde und für den hydrologischen Zustand aufgrund des unmittelbar anstehenden Felses mit „Poor“ festgelegt wurde. (USDA-NRCS, 2017b)

Markart gibt in der „Provisorischen Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen“ für jede Abflussbeiwertsklasse Wertebereiche für den Abflussbeiwert vor (G. Markart et al., 2004). Wenn für jede Teilfläche der Mittelwert des für die jeweilige Abflussbeiwertsklasse vorgegebenen Wertebereichs verwendet wird, ergibt sich für den Abflussbeiwert im Einzugsgebiet ein flächengewichteter Abflussbeiwert von $a_{\text{Markart}} = 0,51$.

Tabelle 6: CN-Werte für die einzelnen Teilflächen im Einzugsgebiet. Nummerierung der Teilflächen gemäß Abb. 30

Teilfläche Nr.	Fläche [m ²]	CN ₂₀	CN ₀₅	Beschreibung gemäß Tab. 5
0, 4	291.644	100	100	Fels, undurchlässig
1, 2, 3, 5, 7, 8, 9	1.431.906	70	77	Woods, Hydrologic condition: Good
6	132.890	71	78	Meadow
10	412.148	78	84	Mix: 85 % Wood, 15% Pasture, Hydrologic condition: Poor
Summe:	2.268.588	Flächengew. Mittel:		
		75	81	

Tabelle 7: Abflussbeiwerte nach Markart für die einzelnen Teilflächen im Einzugsgebiet. Nummerierung der Teilflächen gemäß Abb. 30

Teilfläche Nr.	Fläche [m ²]	Abflussbeiwerts- klasse nach Markart	Abflussbeiwert nach Markart a_{Markart} (Klassenmittelwert)	Anmerkung
0, 4	291.644	5	0,88	Fels - kompakt, starke Rinnenbildung im Unterhang
1, 2, 3, 5, 7, 8, 9	1.431.906	3	0,41	Fichtenwald - vergrast, starke Hangneigung
6	132.890	3	0,41	Mähwiese - keine Weide, pflegerische Bewirtschaftung
10	412.148	4	0,63	Latsche - subanstehender Fels, vergrast
Summe:	2.268.588		Flächengewichtetes Mittel:	
			0,51	

Ergebnisse und Kalibrierung

Für jedes Ereignis wurden zwei Berechnungsdurchläufe in HEC-HMS vorgenommen, einmal unter der Zugrundelegung einer Initial-Abstraction-Ratio von $\lambda = 0,05$ mit dem wie oben beschrieben ermittelten CN-Wert von $CN_{20} = 75$ und einmal mit einer Initial-Abstraction-Ratio von $\lambda = 0,20$, wobei mithilfe von Formel 4.9 ein CN-Wert von $CN_{05} = 81$ errechnet wurde. Die Anfangsverluste wurden mithilfe von Formel 4.6 berechnet und ergaben sich für $\lambda = 0,05$ zu $h_{N,Av,05} = 4$ mm und für $\lambda = 0,20$ zu $h_{N,Av,20} = 12$ mm. Die Ergebnisse für die kumulierten Niederschlagsverluste ($h_{N,v,20}$ für $\lambda = 0,20$ bzw. $h_{N,v,05}$ für $\lambda = 0,05$), den kumulierten Effektivniederschlag ($h_{A,20}$ für $\lambda = 0,20$ bzw. $h_{A,05}$ für $\lambda = 0,05$) sowie die resultierenden Abflussbeiwerte (a_{20} für $\lambda = 0,20$ bzw. a_{05} für $\lambda = 0,05$) sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 8: Berechnungsergebnisse für die Abflussentstehung bei $\lambda = 0,20$ bzw. $\lambda = 0,05$

ERGEBNISSE HEC-HMS ($\lambda = 0,20$)					
CN = 81					
	$h_{N,Av,20}$	$h_{N,v,20}$ [mm]	$h_{A,20}$ [mm]	h_N [mm]	a_{20} [-]
Ereignis 1	12,0	41,2	28,2	69,4	0,41
Ereignis 2	12,0	26,7	4,8	31,5	0,15
Ereignis 3	12,0	39,8	24,3	64,1	0,38

ERGEBNISSE HEC-HMS ($\lambda = 0,05$)					
CN = 75					
	$h_{N,Av,05}$	$h_{N,v,05}$ [mm]	$h_{A,05}$ [mm]	h_N [mm]	a_{05} [-]
Ereignis 1	4,0	40,9	28,5	69,4	0,41
Ereignis 2	4,0	24,8	6,7	31,5	0,21
Ereignis 3	4,0	39,1	25,0	64,1	0,39

Die Ergebnisse für Ereignis 2 sind in grau dargestellt, da sie, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, nicht uneingeschränkt für die Kalibrierung verwendet werden können.

Aus den beobachteten Niederschlags- und Abflusswerten wurden mithilfe von Formel 5.5 (Hübl) die CN-Werte rückgerechnet, die den jeweiligen Beobachtungswerten entsprachen.

Formel für die Berechnung des potentiellen Speichervermögens und der Kurvennummer aus Messdaten mit einer variablen initial abstraction ratio (Hübl):

$$CN = \frac{25400}{\frac{h_N}{\lambda} + \frac{h_Q \cdot (1 - \lambda) - \sqrt{h_Q^2 \cdot (\lambda - 1)^2 + 4 \cdot \lambda \cdot h_N \cdot h_Q}}{2 \cdot \lambda^2} + 254} \quad (5.5)$$

Die Rückrechnung der CN-Werte erfolgten wieder sowohl für eine Initial-Abstraction-Ratio von $\lambda = 0,05$ als auch von $\lambda = 0,20$. In Tabelle 9 sind die Berechnungsergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 9: Aus Beobachtungsdaten rückgerechnete CN-Werte

	$S_{20, obs}$ [-]	$CN_{20, obs}$ [-]	$h_{N,Av,20,obs}$ [mm]		$S_{05, obs}$ [-]	$CN_{05, obs}$ [-]	$h_{N,Av,05,obs}$ [mm]
Ereignis 1	105	71	21,1	Ereignis 1	180	59	9,0
Ereignis 2	42	86	8,3	Ereignis 2	67	79	3,4
Ereignis 3	76	77	15,2	Ereignis 3	119	68	5,9

Der Vergleich der a priori ermittelten CN-Werte von $CN_{05} = 75$ und $CN_{20} = 81$ mit den rückgerechneten CN-Werten aus den Beobachtungen ergibt, dass die CN-Werte grundsätzlich überschätzt, also die Niederschlagsverluste unterschätzt wurden. Ereignis 2 ist von diesen Beobachtungen ausgenommen, da aufgrund des in Kapitel 5.2 beschriebenen Verlaufs der Ganglinie keine aussagekräftige Rückrechnung der CN-Werte möglich ist.

Werden die rückgerechneten CN-Werte für die unterschiedlichen Annahmen der Initial-Abstraction-Ratio λ verglichen, ergibt sich, dass für $\lambda = 0,20$ die beobachteten CN-Werte von Ereignis 1 und 3 im Mittel um 7 unter der Schätzung von $CN_{20} = 81$ liegen, während sie für $\lambda = 0,05$ im Mittel um 11,5 unter der Schätzung von $CN_{05} = 75$ liegen. Die Abweichungen liegen demnach in derselben Größenordnung, wobei die Schätzung des CN-Wertes mit $\lambda = 0,20$ geringfügig besser ist.

Bei der Betrachtung der Anfangsverluste können die Ergebnisse für Ereignis 2 miteinbezogen werden, da hier das Augenmerk auf dem Anfangsphasen der jeweiligen Ereignisse liegt und die in Kapitel 5.2 beschriebenen Abweichungen der Abflussganglinie von Ereignis 2 erst im späteren Ereignisverlauf auftreten.

Die in den Abbildungen 31 und 32 dargestellten Diagramme zeigen den Vergleich der beobachteten und berechneten Anfangsverluste für eine Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,20$ bzw. von $\lambda = 0,05$. Es ist deutlich zu erkennen, dass die berechneten Anfangsverluste für eine Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,05$ den beobachteten Werten besser entsprechen als für eine Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,20$.

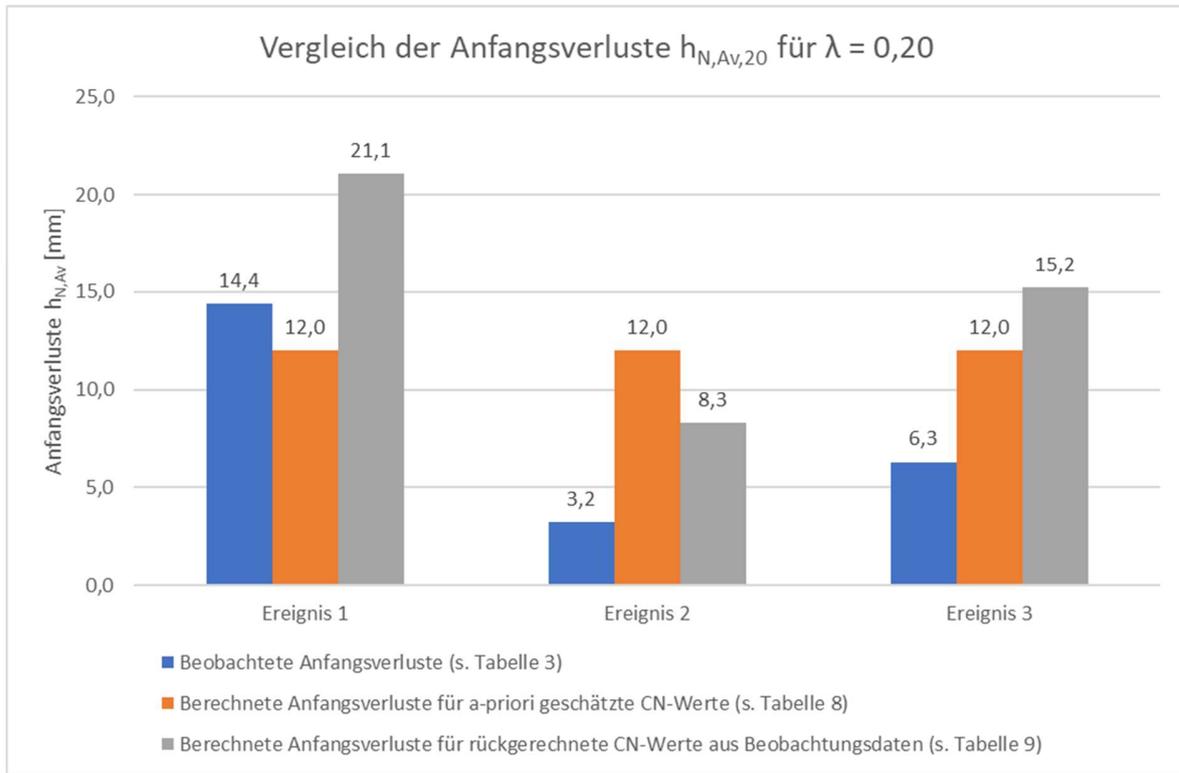


Abbildung 31: Vergleich der Anfangsverluste für eine Initial Abstraction Ratio von 0,05

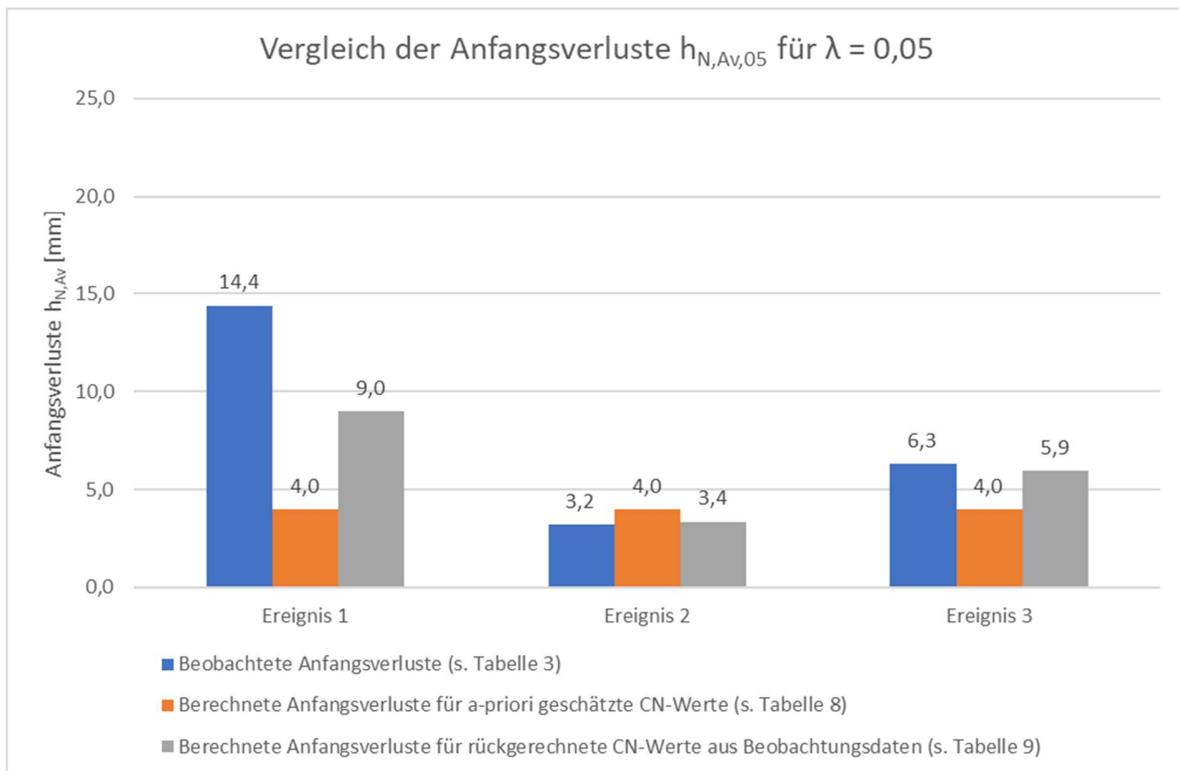


Abbildung 32: Vergleich der Anfangsverluste für eine Initial Abstraction Ratio von 0,05

Der Mittelwert der beobachteten Anfangsverluste beträgt 8,0 mm. Im Vergleich dazu beträgt der Mittelwert der a priori Schätzungen 14,0 mm für $\lambda = 0,20$ und 4,0 mm für $\lambda = 0,05$ während der Mittelwert der berechneten Anfangsverlusten für die aus den Messdaten rückgerechneten CN-Werte bei 14,9 mm für $\lambda = 0,20$ und 6,1 mm für $\lambda = 0,05$ liegt. Es kann daher festgehalten werden, dass für das gegenständliche Einzugsgebiet die Empfehlung des NRCS für die Verwendung einer Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,05$ bestätigt werden kann.

Für die Kalibrierung wurde das arithmetische Mittel der CN_{05} -Werte von Ereignis 1 und Ereignis 3 herangezogen, welches sich zu $CN_{05,kal} = 63$ ergibt. Für die Errechnung der Anfangsverluste wurde eine Initial Abstraction Ratio von $\lambda = 0,05$ verwendet, wodurch sich ein kalibrierter Anfangsverlust von $h_{N,Av,05,kal} = 7$ mm ergibt.

5.4. Modellierung der Abflusskonzentration

Die Modellierung der Abflusskonzentration wurde für jedes der in Kapitel 4.5 vorgestellten Verfahren durchgerechnet, um einen Vergleich der Verfahren zu ermöglichen. Beim SCS-UH Verfahren wurden zwei Berechnungsdurchgänge durchgerechnet, wobei beim ersten Durchgang die Werte der Eingangsparameter mit den in den jeweiligen Kapiteln vorgestellten Methoden aus den Einzugsgebietseigenschaften ermittelt wurden, ohne eine Anpassung an die beobachteten Abflussdaten vorzunehmen, und beim zweiten Durchgang eine Kalibrierung der Parameter durchgeführt wurde.

Beim ersten Berechnungsdurchlauf wurden für die Ermittlung des Effektivniederschlages die unkalibrierten a priori Schätzungen der CN-Parameterwerte, $CN_{05} = 75$ und $h_{N,Av,05} = 4$ mm (siehe Kapitel 5.3.2), verwendet.

Beim zweiten Berechnungsdurchläufe wurde mit den kalibrierten CN-Parameterwerten, $CN_{05,kal} = 63$ und $h_{N,Av,05,kal} = 7$ mm, gerechnet.

Durch diese Vorgehensweise soll sich die Möglichkeit eines Vergleichs zwischen den Modellierungsergebnissen mit und ohne Abflussbeobachtungen ermöglichen.

Das Snyder Verfahren und das Clark Verfahren verwenden empirische Parameter, die nur durch die Kalibrierung mit beobachteten Abflussbeiwerten festgelegt werden können, weshalb bei diesen Verfahren kein Berechnungsdurchlauf mit geschätzten Parameterwerten erfolgte.

Die Kalibrierung erfolgte grundsätzlich automatisiert mittels HEC-HMS, wobei als Optimierungsverfahren die Univariate Gradienten Methode und als Zielindikator der PRMSE (siehe Kapitel 5.1) gewählt wurde. Da sich Ereignis 2 aufgrund der in Kapitel 5.2 erläuterten Gründe nicht für eine automatisierte Kalibrierung mit Zielindikatoren, die sich auf die Residuen beziehen, eignet, erfolgte die Kalibrierung für Ereignis 2 händisch. Hierbei wurde maßgeblich darauf geachtet, dass die Ordinaten- und Abszissenwerte der berechneten und beobachteten, vor Allem im Bereich der Abflussspitze, möglichst nahe beieinander liegen und die Form des abfallenden Astes, der das Leerlaufen des Einzugsgebietes widerspiegelt, möglichst genau wiedergegeben wird.

5.4.1. Snyder UH

Für die Anwendung des Snyder Verfahrens in HEC-HMS ist die Eingabe der Parameter t_p und C_p erforderlich.

Bei C_p handelt es sich um einen rein empirischen Parameter, der durch Kalibrierung festgelegt wird. Als Startwert wurde der Mittelwert des von Bedient und Huber angegebenen Wertebereichs für C_p (siehe Kapitel 4.5.2) herangezogen, welcher bei $C_p = 0,6$ liegt.

Für die Berechnung von t_p mit Formel 4.11 mussten die geometrischen Parameter L und L_c ermittelt werden. Die Gerinnelänge L wurde aus der polygonalen Gerinnedarstellung auf der Internetseite atlas.noe.gv.at gemessen (siehe Abb. 33) und ergab sich zu $L = 3.309$ m. Für die Ermittlung von L_c wurde das Einzugsgebiet und der Gerinneverlauf in AutoCAD nachgezeichnet, um den Flächenschwerpunkt des Einzugsgebietes ermitteln zu können (siehe Abb. 33). Anhand der Darstellung in AutoCAD wurde für L_c ein Wert von $L_c = 1.756$ m gemessen.

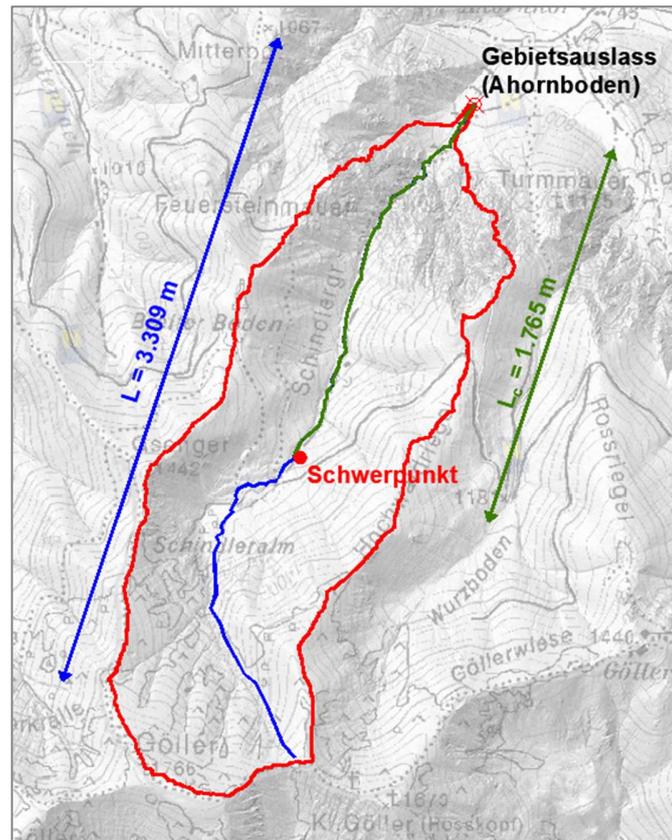


Abbildung 33: Ermittlung der Parameter L und L_c (Quelle: www.atlas.gv.at, bearbeitet)

Für die Schätzung von C_t diene als Anhaltspunkt die Feststellung von Bedient und Huber, dass der Wert von C_t mit der Steilheit des Einzugsgebietes abnimmt. Obwohl die Werte für C_t typischerweise zwischen 1,8 und 2,2 liegen, wurden für gebirgige Einzugsgebiete auch schon Werte bis hinab zu 0,4 angegeben (Hydrologic Engineering Center, 2000). Aufgrund der Steilheit des gegenständlichen Einzugsgebietes wurde als Schätzwert für $C_t = 0,6$ angenommen.

Mit den genannten Eingangswerten ergibt sich durch Einsetzen in Formel 4.11 ein Wert von $t_p = 0,76$ h.

Als Nächstes mussten für jedes der untersuchten Ereignisse die Niederschlagsdauern t_R ermittelt werden, um zu kontrollieren ob die Bedingung für das Verhältnis zwischen t_p und t_R gemäß Gleichung 4.14 erfüllt ist. Hierbei wurden nur die zusammenhängenden Niederschläge zum Ereignisbeginn berücksichtigt, einzelne kurze Niederschläge im späteren Ereignisverlauf wurden vernachlässigt.

Die ermittelten Niederschlagsdauern ergaben sich zu:

- $t_{R,1} = 31,6$ h für Ereignis 1,
- $t_{R,2} = 17,5$ h für Ereignis 2 und
- $t_{R,3} = 31,9$ h für Ereignis 3.

Gleichung 4.14 war demnach bei keinem Ereignis erfüllt, sodass für alle Ereignisse die modifizierte Verzögerungszeit mithilfe von Formel 4.15 errechnet werden musste.

Folgende modifizierte Verzögerungszeiten t_{mp} wurden errechnet und als Eingangsparameter in HEC-HMS verwendet:

- $t_{mp,1} = 8,6$ h für Ereignis 1,
- $t_{mp,2} = 5,1$ h für Ereignis 2 und
- $t_{mp,3} = 8,7$ h für Ereignis 3.

Die Modellierung ergab im Grunde eine gute Annäherung der beobachteten Ganglinien, vor allem hinsichtlich des Spitzenabflusses und der Form des abfallenden Astes. Eine deutliche Abweichung ist in allen modellierten Ganglinien beim Zeitpunkt der Abflussspitze zu beobachten. Dieser Fehler könnte zwar eventuell mit einer Reduzierung der Verzögerungszeit t_p verringert werden, da HEC-HMS bei der Berechnung der fehlenden Ordinatenwerte mit dem Clark-Verfahren (siehe Kapitel 4.5.2) dann allerdings den Speicherkoeffizienten automatisch verringert, kommt es damit auch zu einer spitzeren und „unruhigeren“ Form der Ganglinie und zu einer Überschätzung des Spitzenabflusses. Für die meisten Anwendungen ist die richtige Einschätzung des Spitzenabflusses und der Abflussdynamik von größerer Bedeutung als der genaue Zeitpunkt der Abflussspitze. Daher wurde der Schätzwert für t_p beibehalten und nur der Parameter C_p kalibriert.

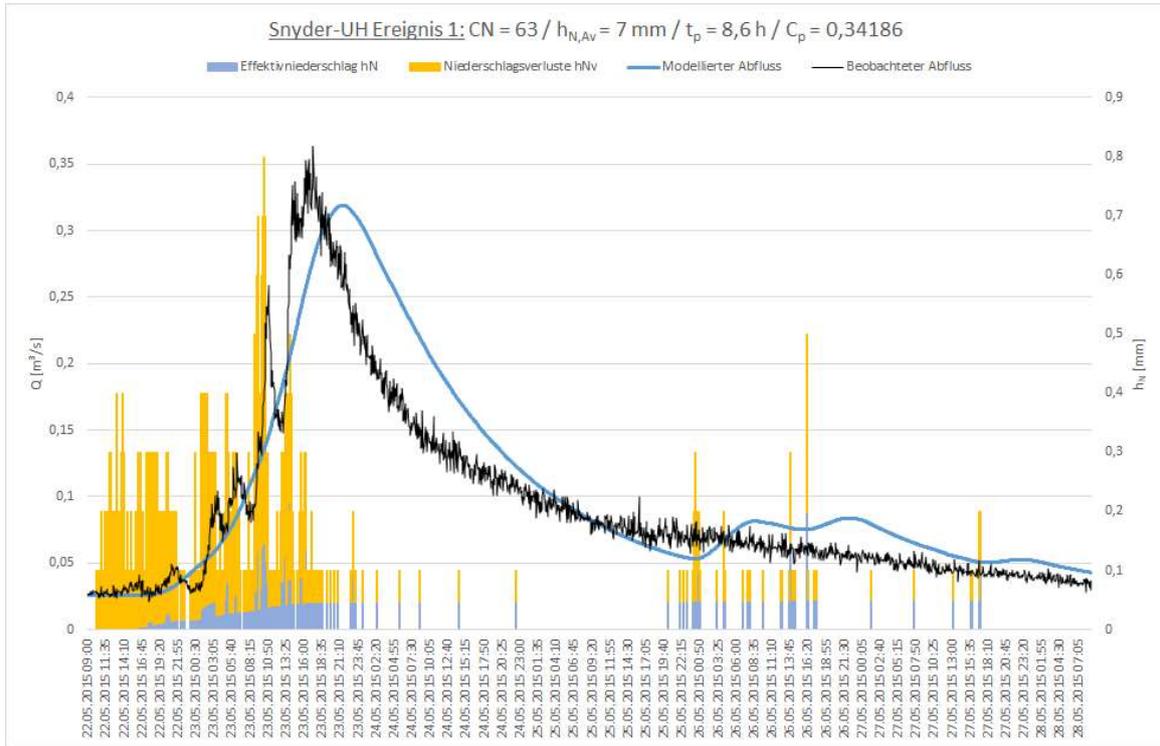


Abbildung 34: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 1

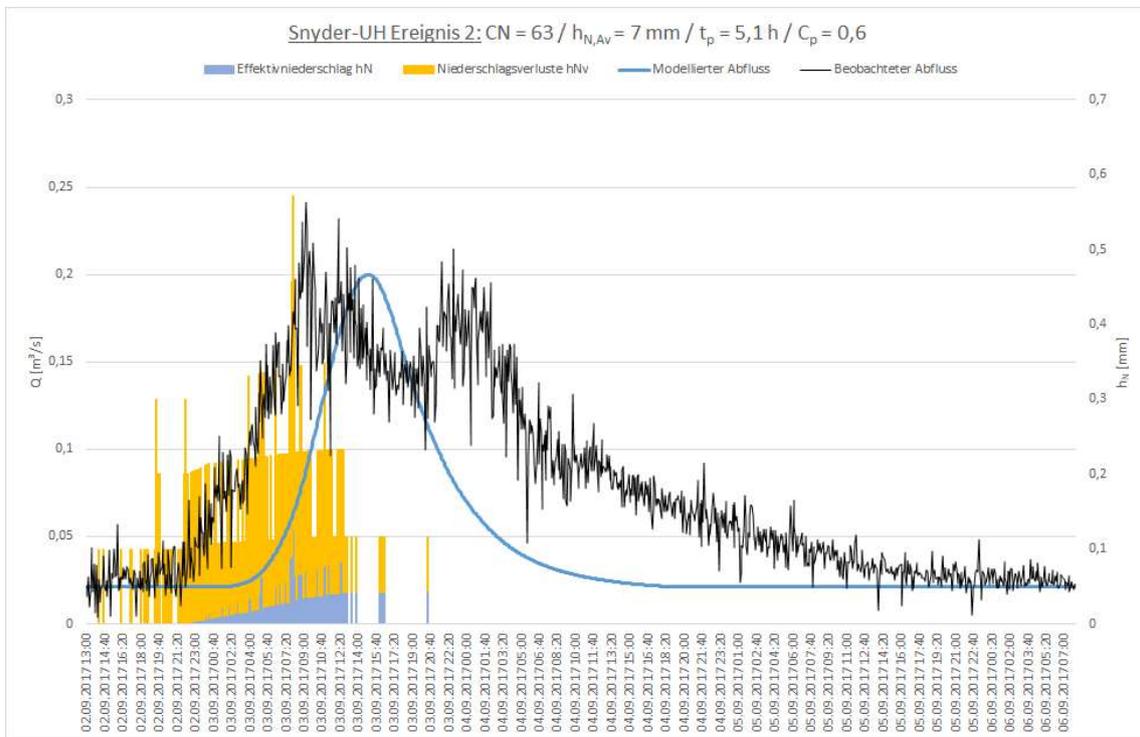


Abbildung 35: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 2

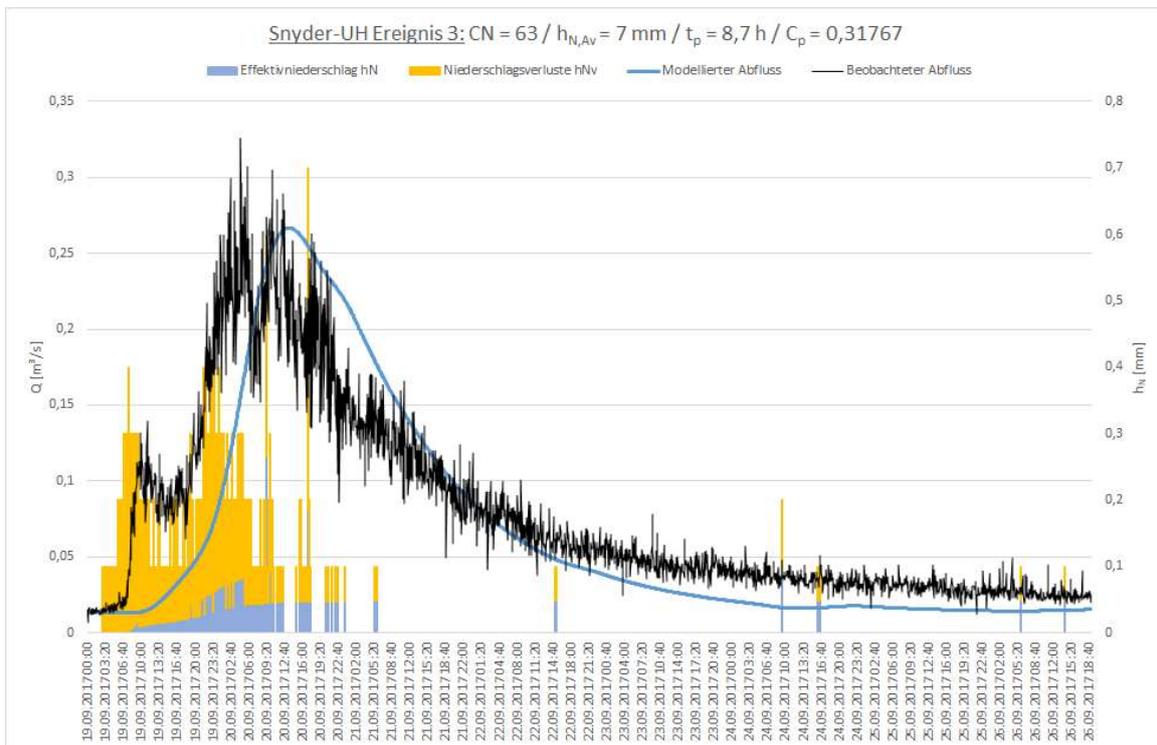


Abbildung 36: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 3

5.4.2. SCS UH

Für die Modellierung der Abflussganglinie in HEC-HMS ist die Wahl einer SCS Einheitsganglinie anhand des erwarteten Peak-Rate-Factors, sowie die Eingabe der Konzentrationszeit erforderlich.

Als Einheitsganglinie wurde der Standard-SCS-UH mit einem Peak-Rate-Factor von 484 gewählt.

Für die Ermittlung der Konzentrationszeit wurde die Watershed-Lag Methode angewendet. Hierfür wurden zunächst fünf repräsentative Stellen ausgesucht, bei denen das Gefälle anhand der Höhenschichtlinien graphisch ermittelt wurde (siehe Abb. 37). Das arithmetische Mittel dieser fünf Gefällewerte ergab ein mittleres Einzugsgebietsgefälle von $J = 66\%$.

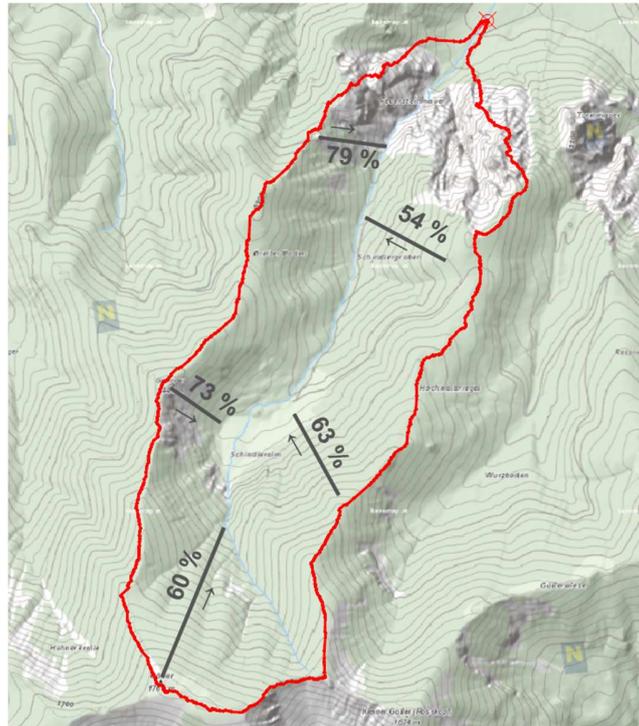


Abbildung 37: Graphische Ermittlung des mittleren Gefälles im Einzugsgebiet (Quelle: www.atlas.gv.at, bearbeitet)

Da der Ursprung des Hauptgerinnes sehr nahe bei der Einzugsgebietsgrenze liegt und das Einzugsgebiet eine längliche Form aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Länge des Hauptgerinnes mit 3.309 m eine gute Schätzung für den maximalen Fließweg / im Einzugsgebiet darstellt.

Durch Einsetzen in Formel 4.17 ergibt sich somit als Eingangswert für die Konzentrationszeit $t_c = 0,5$ h bzw. $t_c = 30$ min.

Der erste Berechnungsdurchlauf wurde sodann mit den Eingangsparametern $CN = 75$, $t_c = 30$ min und der Standard-Einheitsganglinie mit einem Peak Rate Faktor von $PRF = 484$ vorgenommen.

In den in Abb 38 – 40 dargestellten Modellierungsergebnissen sind die Abweichungen zwischen den modellierten und beobachteten Ganglinien deutlich ersichtlich. Mit den angenommenen Parameterwerten ergibt sich nicht nur eine deutliche Überschätzung der Abflussspitzen, was aufgrund der in Kapitel 5.3.2 dargelegten Überschätzung des CN-Wertes den Erwartungen entspricht, sondern auch eine deutliche Abweichung in der Abflussdynamik. Dies drückt sich im unruhigen Verlauf der modellierten Ganglinien mit der spitzen Form der Abflussspitzen aus, während die beobachteten Abflussganglinien

einen sanfteren Verlauf mit einem langsamen Auslaufen des Gebietspeichers am abfallenden Ast aufweisen.

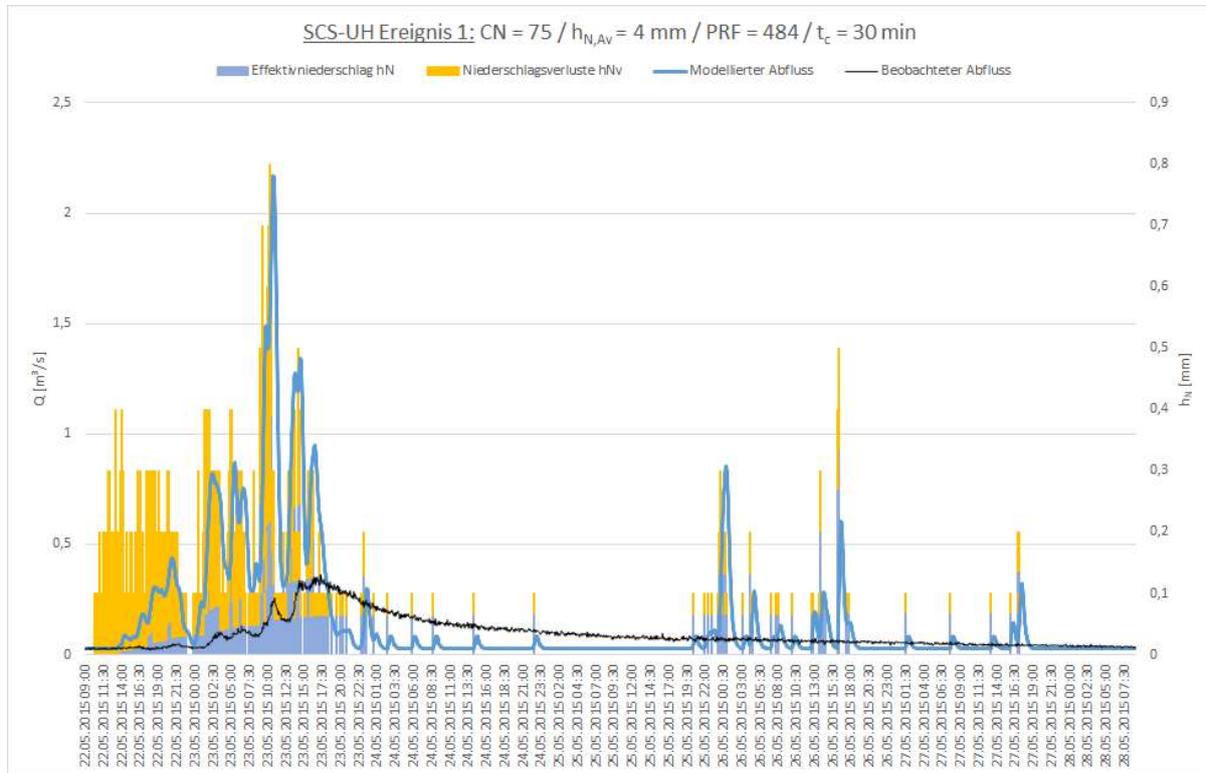


Abbildung 38: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 1

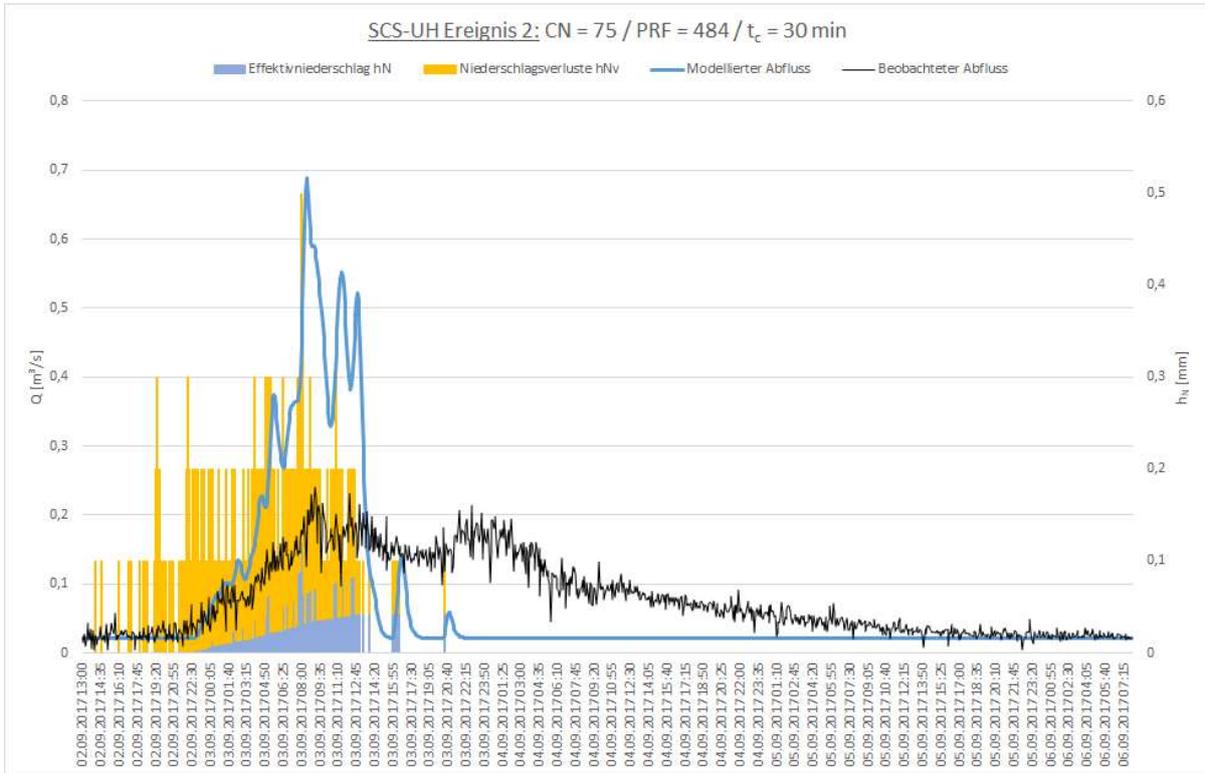


Abbildung 39: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 2

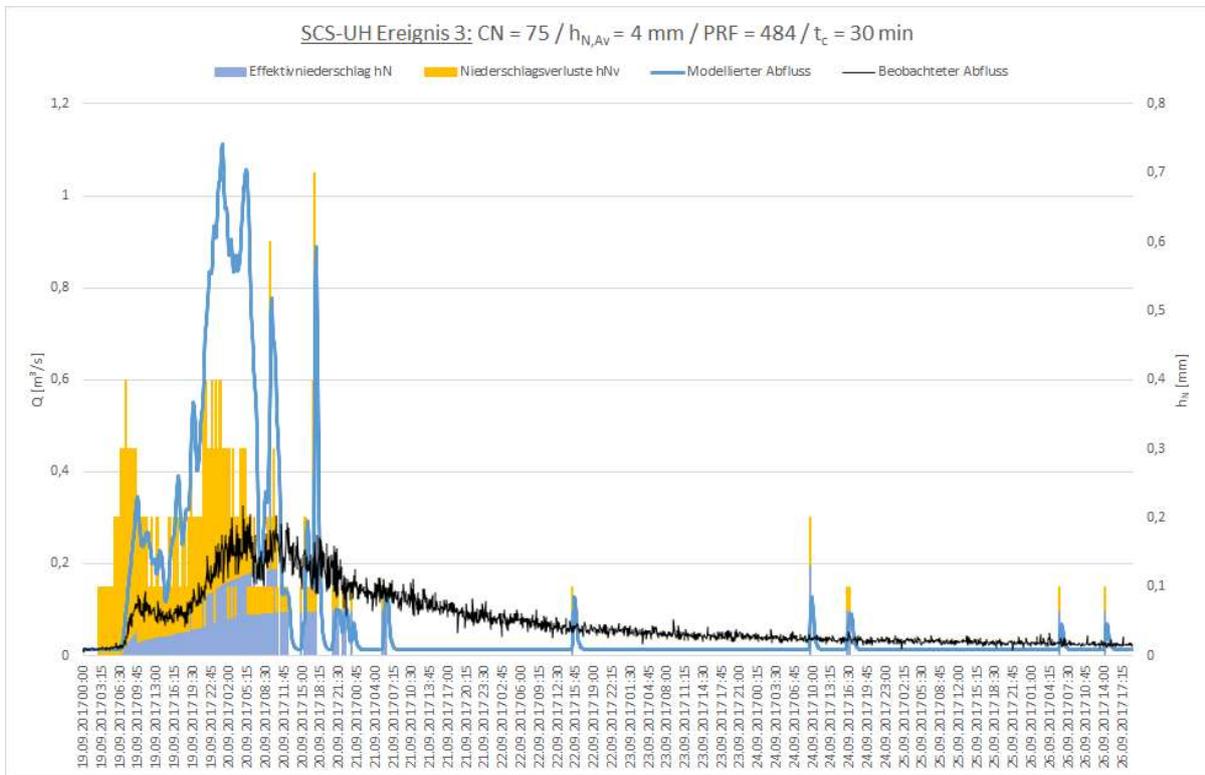


Abbildung 40: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 3

Im zweiten Berechnungsdurchlauf wurde sodann der kalibrierte CN-Wert von $CN = 63$ verwendet und der PRF mit einem Wert von 484 beibehalten, während der Wert der Konzentrationszeit T_c kalibriert wurde.

Dadurch konnten zwar deutliche Verbesserungen erzielt werden, eine deutliche Abweichung der Modellierungsergebnissen von den beobachteten Abflüssen blieb allerdings bestehen. Neben einer verschobenen Lage der Abflussspitzen wiesen die abfallenden Äste der modellierten Ganglinien einen wesentlich steileren Verlauf als die beobachteten Ganglinien.

Es wurde daher ein neuerlicher Berechnungsdurchlauf vorgenommen, wobei ein SCS-UH mit einem PRF von 100, der einen wesentliche flacheren Verlauf des abfallenden Astes als der Standard SCS-UH aufweist, verwendet wurde und eine neuerliche Kalibrierung der Konzentrationszeit t_c vorgenommen wurde.

Wie in den Abb. 41 – 43 ersichtlich ist konnten dadurch sehr gute Ergebnisse erzielt werden, wobei die Abflussspitzen immer noch leicht nach hinten verschoben und die abfallenden Arme der modellierten Ganglinien etwas steiler sind als die der beobachteten. Eine weitere Annäherung wäre eventuell mithilfe einer Einheitsganglinie mit einem noch niedrigeren PRF möglich, allerdings ist in HEC-HMS keine Einheitsganglinie mit einem geringeren PRF als 100 verfügbar.

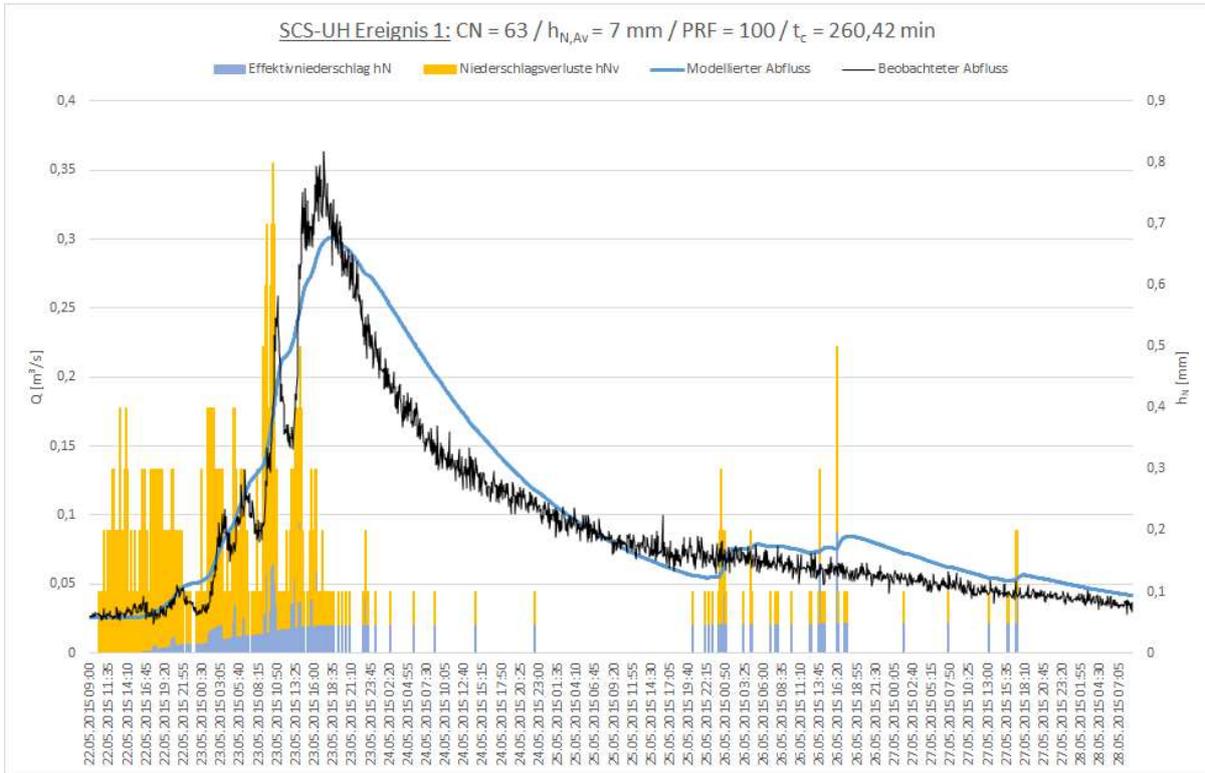


Abbildung 41: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 1 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c

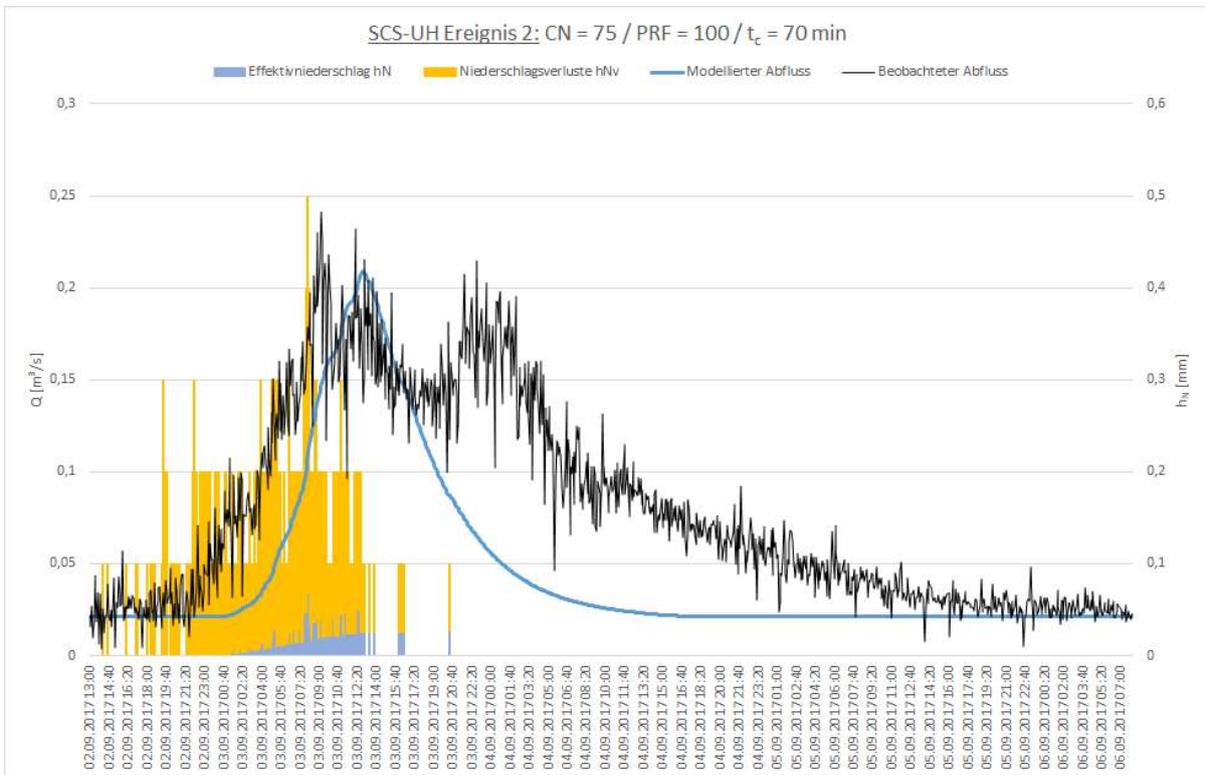


Abbildung 42: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 2 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c

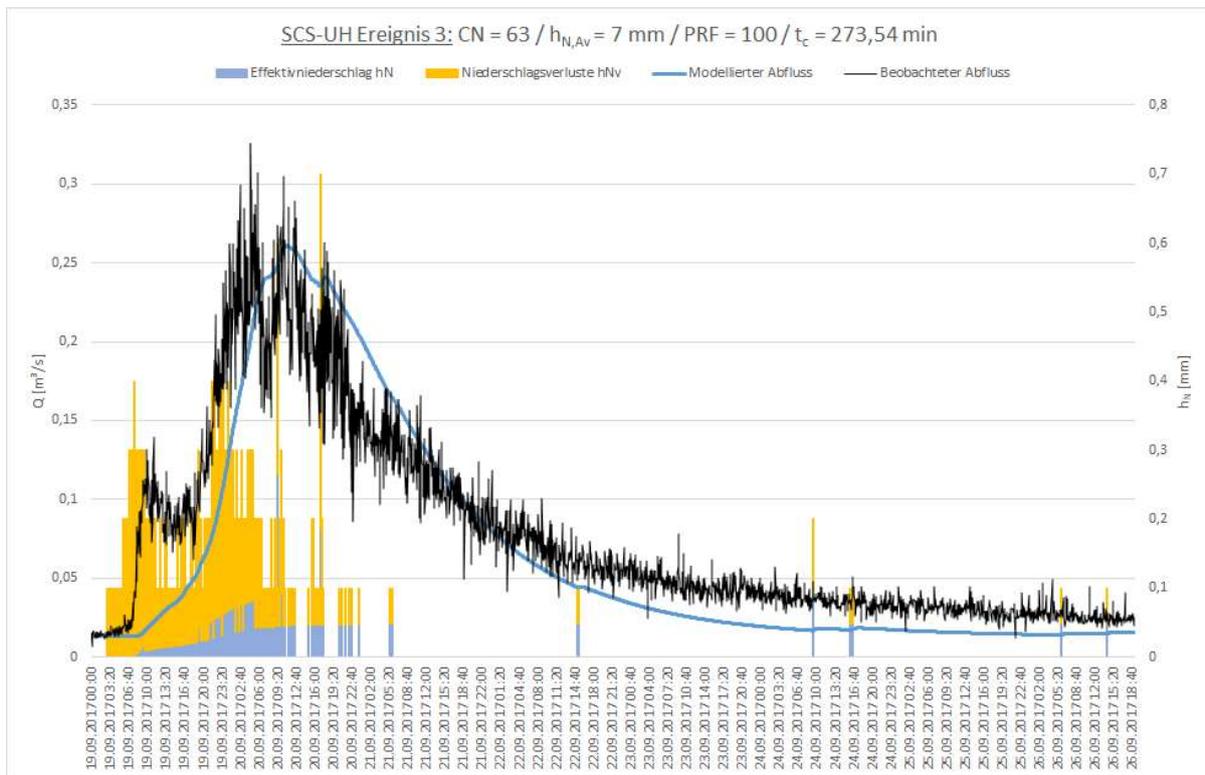


Abbildung 43: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 3 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c

5.4.3. Clark UH

Beim Clark Verfahren werden die Prozesse Translation und Retention berücksichtigt (siehe Kapitel 4.5.4). Für die Berechnung der Translationsprozesse kann in HEC-HMS die Konzentrationszeit definiert sowie ein Zeit-Flächen-Diagramm gewählt werden, wobei als Eingangsparameter für die Retention die Speicherkonstante K dient. Während die Konzentrationszeit t_c und das Zeit-Flächen-Diagramm physikalische Eigenschaften des Einzugsgebietes repräsentieren, stellt die Speicherkonstante K einen rein empirischen Parameter dar, der durch Kalibrierung mithilfe von Abflussbeobachtungen ermittelt werden muss.

Mithilfe von ESRI ArcGIS wurde aus dem Digitalen Geländemodell ein Zeit-Flächen-Diagramm erstellt und in HEC-HMS importiert. Die Darstellung des Zeit-Flächen-Diagramms ist in HEC-HMS in Form einer „percentage curve“ umgesetzt, bei der auf der Abszisse der prozentuelle Teil der Konzentrationszeit und auf der Ordinate der prozentuelle Anteil der Einzugsgebietesfläche aufgetragen wird, der zum jeweiligen Zeitpunkt zum Abfluss beiträgt.

Als Schätzung für die Konzentrationszeit wurde mit $t_c = 0,5$ h der Wert von der SCS-UH Methode übernommen.

Im ersten Berechnungsdurchgang wurde der Speicherkoeffizient K kalibriert, wodurch schon sehr gute Ergebnisse erreicht werden konnten.

Die beobachteten Ganglinien zeigten allerdings noch immer eine schnellere Reaktion auf den gefallenen Niederschlag auf die modellierten, was auf eine kürzere Konzentrationszeit deutet. Daher wurde für jedes Ereignis ein zweiter Berechnungsdurchgang vorgenommen, bei dem die Konzentrationszeit kalibriert wurde. Als Wert für den Speicherkoeffizient wurde der jeweilige kalibrierte Wert aus dem ersten Berechnungsdurchgang verwendet.

Wie in den Abb. 44 – 46 ersichtlich ist, konnte das Abflussverhalten des Einzugsgebietes mit den kalibrierten Parameterwerten sehr gut nachgebildet werden.

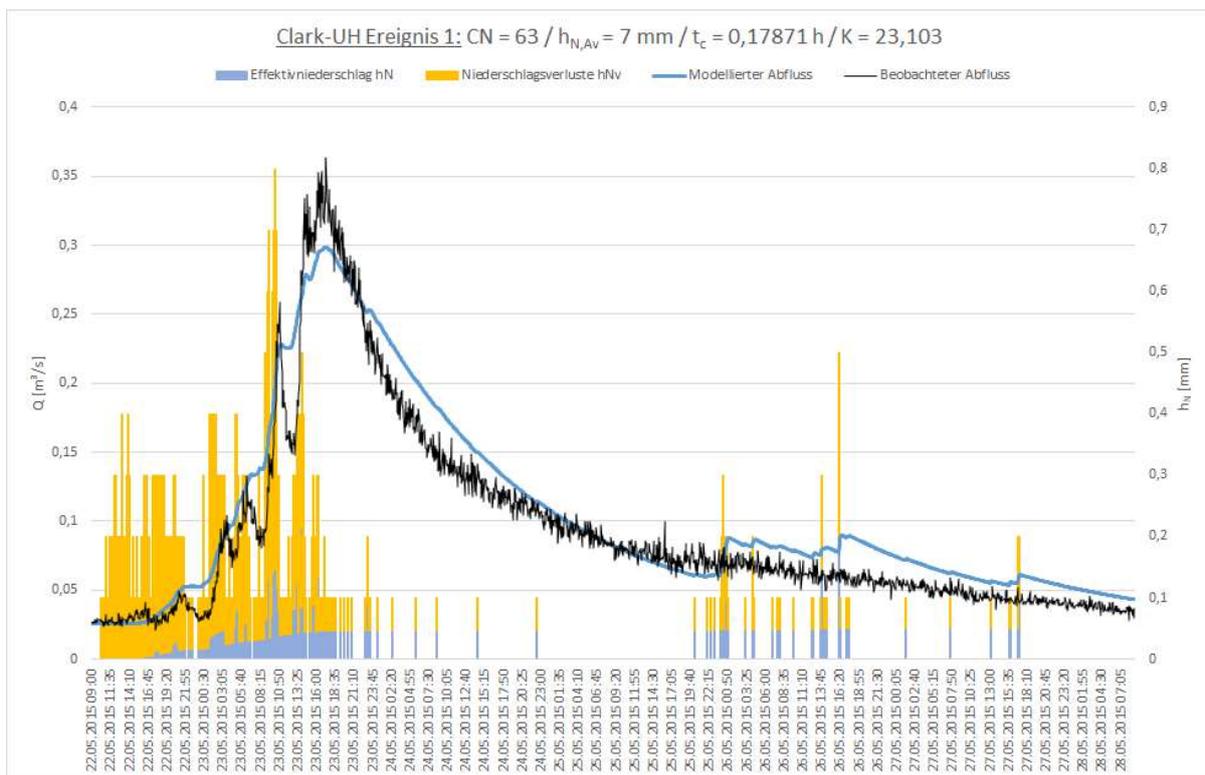


Abbildung 44: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 1

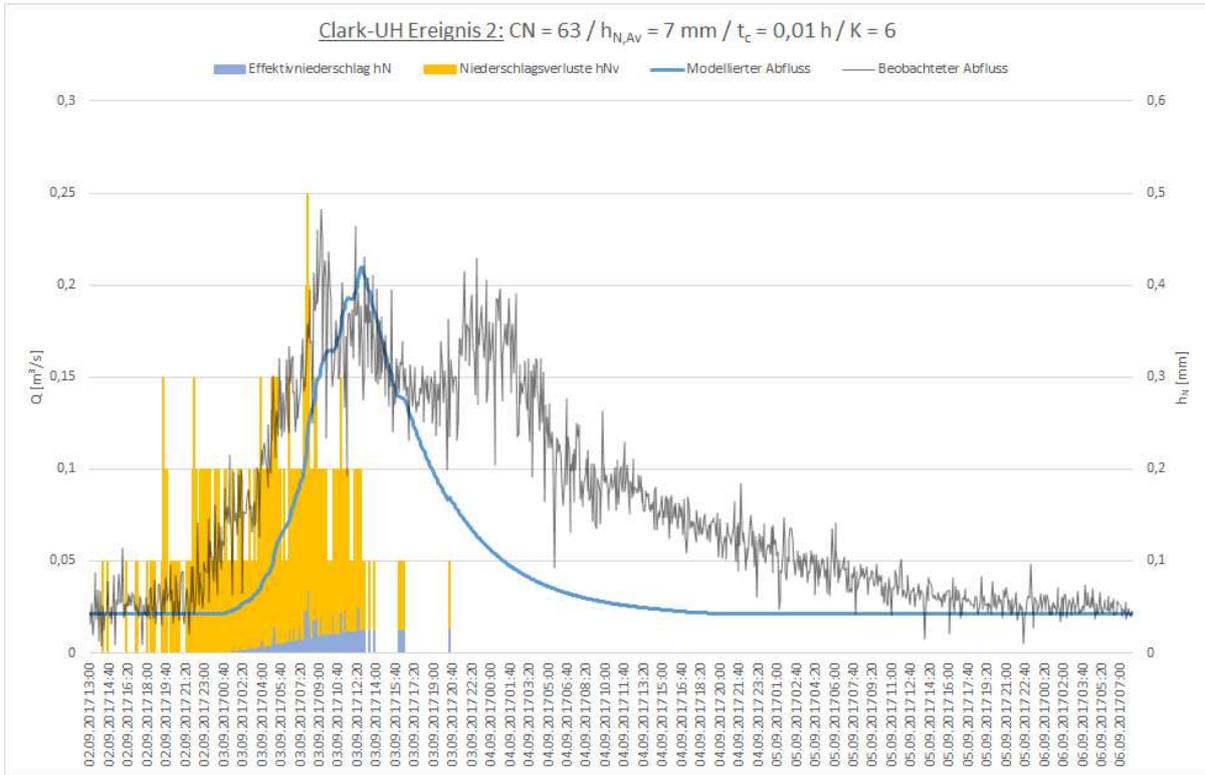


Abbildung 45: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 2

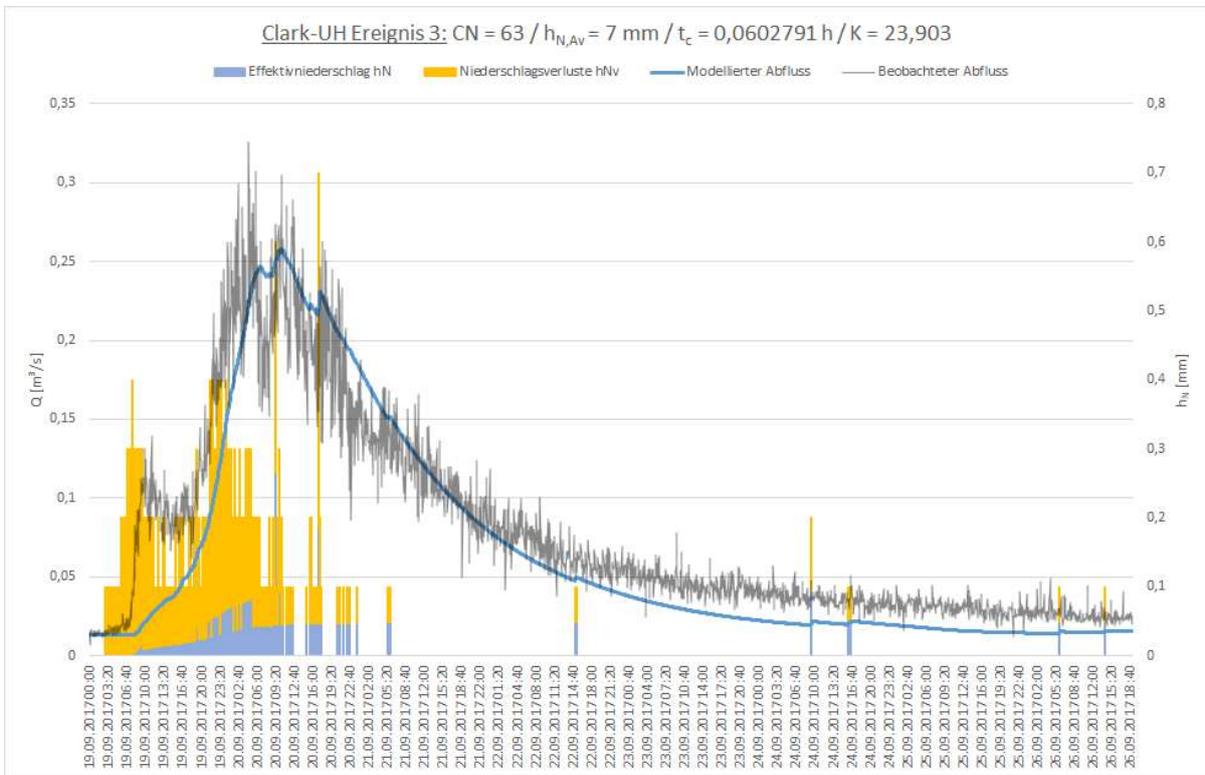


Abbildung 46: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 3

5.4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modellierungsergebnisse zeigen, dass sich das Abflussverhalten des Einzugsgebietes mit den in HEC-HMS implementierten Methoden auf Grundlage der gegebenen Datenlage sehr gut darstellen lässt.

Das SCS-UH Verfahren stellt das einzige Verfahren für die Modellierung der Abflusskonzentration dar, das so konzipiert ist, dass es auch ohne historische Abflussmesswerte angewendet werden kann. Die restlichen Verfahren arbeiten mit empirischen Parametern, die nicht aus Eigenschaften des Einzugsgebietes hergeleitet werden können und erfordern daher Abflusswerte für die Parameterkalibrierung.

Für das gegenständliche Einzugsgebiet ergab der Vergleich mit den beobachteten Ereignisganglinien allerdings, dass mit dem SCS-UH Verfahren keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden konnten, wenn keine Kalibrierung der Eingangsparameter erfolgte.

Bei der Verwendung von kalibrierten Parametern konnte grundsätzlich mit allen untersuchten Verfahren gute Ergebnisse erzielt werden, wobei die besten Ergebnisse aus den Berechnungen mit dem Clark-Verfahren stammen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Verfahren am besten dazu in der Lage ist das langsame Leerlaufen des Gebietsspeichers darzustellen. Das Einzugsgebiet entspricht mit seiner wannenartigen Form und der engen Klamm am Gebietsauslass sehr stark dem Idealbild eines Einzelspeichers, weshalb es mit dem konzeptuellen Linearspeicher des Clark-Modells passend nachgestellt werden kann.

Bei der Betrachtung der beobachteten Ganglinien ist auffallend, dass es, vor allem am ansteigenden Ast, oft zu kurzen, heftigen Reaktionen des Abflusses nach Intervallen mit erhöhter Niederschlagsintensität kommt, die die langfristige Abflussprozesse überlagern. Diese Reaktionen, weisen aufgrund des raschen Anstieges und des unmittelbar danach wieder erfolgenden Rückganges der Abflussganglinie eine spitze Form auf. Die modellierten Ganglinien lassen im Vergleich dazu zwar auch eine sehr schnelle Reaktion auf intensivere Niederschlagsintervalle erkennen, allerdings erfolgt nach dem

heftigen Anstieg kein Rückgang der Ganglinie, sondern lediglich eine Verringerung der Steigung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die beschriebene Dynamik der beobachteten Abflussganglinien aus den Abflussspenden des Hochortgrabens ergeben.

Hinsichtlich der SCS CN-Methode und der Initial Abstraction Ratio konnte die Empfehlung des NRCS für die Verwendung eines Wertes von $\lambda = 0,05$ bestätigt werden, wie in Kapitel 5.3.2 gezeigt wurde.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich HEC-HMS und im speziellen das SCS-CN Verfahren für die Berechnung des Effektivniederschlages und das Clark Verfahren für die Berechnung der Abflusskonzentration sehr gut für die Niederschlag-Abfluss Modellierung von Einzugsgebieten eignen, die dem des Schindlergrabens ähneln. Dies gilt allerdings nur sofern Abflussdaten für die Kalibrierung vorhanden sind, da mit den unkalibrierten a priori Schätzungen der Parameterwerte keine brauchbaren Ergebnisse erzielt wurden.

6. Literaturverzeichnis

Literatur

(1990): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil 1: Analyse. Parey in Komm, Hamburg.

Bedient, P. B., & Huber, W. C. (Hrsg.) (1992): Hydrology and floodplain analysis. Addison-Wesley, New York.

Bergmeister, K., J. Suda, J. Hübl, F. Rudolf-Miklau (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Ernst & Sohn, Berlin.

Blum (2012): Bodenkunde in Stichworten. Borntraeger, Stuttgart.

Chow, V. T., D. R. Maidment, L. W. Mays (2008): Applied hydrology. McGraw-Hill, New York.

Forstliche Bundesversuchsanstalt: Die Wilbäche des Keerbachgebietes, Wien.

G. Markart, B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza, R. Stern (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/ Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien.

Hübl, J.: SCS-Kurvennummern Verfahren zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlages, Wien.

Hydrologic Engineering Center (2000): Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Reference Manual, Washington DC.

Jiang, R. (2001): Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio. Diplomarbeit.

Lecher, K. (Hrsg.) (2001): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Mit 170 Tabellen. Parey, Berlin.

Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

ÖWAV-Arbeitsausschuss (2018): ENTWURF ÖWAV-Regelblatt 220. Niederschlag-Abflussmodellierung, Wien.

P. K. Singh, S. K. Mishra, M. K. Jain (2014): A Review of the Synthetic Unit Hydrograph: From the Empirical UH to Advanced Geomorphological Methods. Hydrological Sciences Journal, 2014.

R. E. Smith (1978): A Proposed Infiltration Model for Use in Simulation of Field Scale Watershed Hydrology.

Richard H. Hawkins, Timothy J. Ward, Donald E. Woodward (2015): The Complacent-Violent Runoff: A Departure from Traditional Behavior. In: Proceedings (CD).

Timothy D. Straub, Charles S. Melching, Kyle E. Kocher (2000): Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. U.S. Geological Service, Urbana, Illinois.

USDA-NRCS (2017a): National Engineering Handbook 630 - Hydrology, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.

USDA-NRCS (2017b): National Engineering Handbook 630 - Hydrology, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes.

USDA-NRCS (2010): National Engineering Handbook 630 - Hydrology, Chapter 15 Time of Concentration.

USDA-NRCS (2007): National Engineering Handbook 630 - Hydrology, Chapter 16 Hydrographs.

Victor M. Ponce, Luis Magallon: Initial Abstraction Revisited.

Victor M. Ponce, Richard H. Hawkins (1996): Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?, 1/1996, S. 11–19.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte mit markierter Lage des Untersuchungsgebietes (Quelle: atlas.noe.gv.at, bearbeitet)	4
Abbildung 2: Orthofoto mit eingezeichnetem Einzugsgebiet und Flusslauf (Quelle: ehyd.gv.at, bearbeitet)	5
Abbildung 3: 3D-Ansicht des Einzugsgebietes (Quelle: maps.google.at, bearbeitet)	7
Abbildung 4: Reliefkarte des Einzugsgebietes (Quelle: atlas.noe.gv.at)	7
Abbildung 5: Natürlicher Bodenaufschluss an der Uferkante des Schindlergrabens (15.09.2019)	10
Abbildung 6: Lage der Messstellen	18
Abbildung 7: Ganglinie des Pegelstandes im Messgerinne Ahornboden, Mai 2010	24
Abbildung 8: Instandsetzungsarbeiten am Messgerinne	25
Abbildung 9: Messgerinne mit Trägerkonstruktion für die Messgeräte bei der Begehung am 04.12.2018	26
Abbildung 10: Prinzip SCS-CN-Verfahren (QUELLE: Hübl SCS)	41
Abbildung 11: Scatterplot zur Entwicklung von $\lambda = 0,2$ (SEKUNDÄRQUELLE: JIANG) ..	42
Abbildung 12: Beispiel für ein Einzugsgebiet mit Complacent-Violent Abflussverhalten im Vergleich zur Berechnung mit $CN = 75$ (QUELLE: ...Departure_Traditional_Behavior-Hawkins)	47
Abbildung 13: Parameter des Snyder-UH, t_r steht hierbei für die Niederschlagsdauer, U_p für den Spitzenabfluss Q_p (QUELLE: TechRefMan)	50
Abbildung 14: Schematische Darstellung des dimensionslosen SCS-UH. Es gilt: $q_p \triangleq Q_p$, $T_c \triangleq t_c$, $T_c \triangleq t_c$, usw. (QUELLE: NEH 630 Ch 16)	53
Abbildung 15: Diagramm zur Abschätzung der Fließgeschwindigkeit des konzentrierten Flächenabflusses im imperialen Einheitensystem (QUELLE: NEH 630 CH 15)	58
Abbildung 16: Beispiel für die Bestimmung der Einheitsganglinie mit dem Clark-Verfahren (QUELLE: Maniak, S365, PDFS378)	60
Abbildung 17: Schmemadarstellung des Clark-Verfahrens (QUELL: DVWK Teil 1, PDFS 17) ..	61
Abbildung 18: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 1	70
Abbildung 19: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 2	71
Abbildung 20: Beobachtete Niederschlag- und Abflussganglinie von Ereignis 3	73
Abbildung 21: Abgrenzungen der Teilflächen mit Nummerierung	81
Abbildung 22: Ermittlung der Parameter L und L_c	89
Abbildung 23: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 1	91
Abbildung 24: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 2	91
Abbildung 25: Ganglinie Snyder-UH für Ereignis 3	92
Abbildung 26: Graphische Ermittlung des mittleren Gefälles im Einzugsgebiet	93
Abbildung 27: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 1	94
Abbildung 28: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 2	95
Abbildung 29: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 3	95
Abbildung 30: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 1 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c	97
Abbildung 31: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 2 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c	97
Abbildung 32: Ganglinie SCS-UH für Ereignis 3 mit kalibrierter Konzentrationszeit t_c	98
Abbildung 33: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 1	99
Abbildung 34: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 2	100
Abbildung 35: Ganglinie Clark-UH für Ereignis 3	100