

Hochschule Ruhr West
Fachbereich 3 - Institut Bauingenieurwesen
Studiengang Bauingenieurwesen B.Sc.



HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Bachelorarbeit zum Thema

„Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Überflutungsmodells
am Beispiel des im Forschungsprojekt KIWaSuS
verwendeten Untersuchungsgebiets“

zur Erlangung des akademischen Grades
BACHELOR OF SCIENCE (B.Sc.)

Vorgelegt von:

Nicole Wistuba

Matrikelnummer:

10009540

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Markus Quirmbach

Zweitgutachter:

Benjamin Burrichter M. Sc.

Dinslaken, den 23.12.2021

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema „Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Überflutungsmodell am Beispiel des im Forschungsprojekt KIWaSuS verwendeten Untersuchungsgebiet“ selbständig verfasst und dabei keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder gesamt noch in Teilen einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dinslaken, 23.12.2021

Ort, Datum

N. Wistuba

Unterschrift (Nicole Wistuba)

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Aufgabenstellung und Ziel	1
1.3 Forschungsprojekt KIWaSuS	2
2 Niederschlags-Abfluss-Modell	4
2.1 Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration	4
2.2 Modellaufbau	8
2.2.1 Kanalnetzdaten	9
2.2.2 Flächendaten	9
2.2.3 Gelände- bzw. Oberflächendaten	10
2.2.4 Belastungsgrößen	11
3 Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung	14
3.1 Modellansätze einer N-A-Modellierung in Bezug auf die Überflutungsprüfung	15
3.1.1 1D-Kanalnetzmodell	15
3.1.2 2D-Oberflächenmodell	17
3.1.3 Gekoppeltes 1D-2D Berechnungsmodell	18
4 Ablauf einer Modellkalibrierung	19
4.1 Datengrundlage	19
4.2 Sensitivitätsanalyse	21
4.3 Maße zur Bestimmung der Modellgüte	21
4.4 Kalibrierung von Modellparametern	23

5	Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+	24
5.1	1D Kanalnetzmodell.....	24
5.1.1	Time-Area-Modell (Modell A)	25
5.1.2	Kinematic-Wave-Modell (Modell B).....	26
5.1.3	Linear-Reservoir-Modell (Modell C).....	27
5.2	2D Oberflächenmodell.....	29
6	Kalibrierung eines gekoppelten 1D/2D Berechnungsmodells	29
6.1	Modellgrundlage	30
6.2	Erstellung von Modellvarianten und Bestimmung der Modellgüte	32
6.2.1	Auswertung der Modellvarianten und Gegenüberstellung	43
6.3	Anpassung der Modellstruktur.....	45
6.4	Kalibrierung der Modellparametern und Bestimmung der Modellgüte	49
6.4.1	Festlegung des hydrologischen Konzepts für die Modellkalibrierung	49
6.4.2	Sensitivitätsanalyse des Ansatzes Linear Reservoir	50
6.4.3	Parameterkalibrierung der Modellvariante 5	50
6.4.4	Auswertung der Kalibrierungsvarianten.....	55
7	Fazit und Ausblick	56
	Literaturverzeichnis.....	58
	Anlagen.....	60
	Anlage A – Auswertung der Modellvarianten.....	60
	Modell 6 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3	83
	Anlage B – Auswertung Modellvarianten der angepassten Modellstruktur	84
	Anlage C – Auswertung der hydrologischen Konzepte für Modellvariante 5 und das angepasste Untersuchungsgebiet	96
	Anlage D – Auswertung der Kalibrierungen.....	104
	Anlage E – Finales Kalibrierungsergebnis (Modellvariante 5 am angepassten Untersuchungsgebiet berechnet anhand „Linear Reservoir“.....	116

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ABFLUSSBILDUNG BEI BEFESTIGTEN FLÄCHEN (QUELLE: DWA-A 165-1).....	5
ABBILDUNG 2: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ABFLUSSBILDUNG BEI UNBEFESTIGTEN FLÄCHEN (QUELLE: DWA-A 165-1).....	5
ABBILDUNG 3: EMPFOHLENE ÜBERFLUTUNGSHÄUFIGKEITEN NACH DIN EN 752:2008 UND ÜBERSTAUHÄUFIGKEITEN NACH ARBEITSBLATT DWA-A 118:2006 UND ATV-DVWK (QUELLE: DWA-M 119)	12
ABBILDUNG 4: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ABFLUSSWIRKSAMEN FLÄCHEN EINES 1D- KANALNETZMODELLS (QUELLE: HORN ET AL. SEPTEMBER 2017).....	16
ABBILDUNG 5: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ABFLUSSWIRKSAMEN FLÄCHEN EINES 2D- OBERFLÄCHENMODELLS (QUELLE: HORN ET AL. SEPTEMBER 2017).....	17
ABBILDUNG 6: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ABFLUSSWIRKSAMEN FLÄCHEN EINES GEKOPPELTEN 1D-2D ABFLUSSMODELLS (QUELLE: (HORN ET AL. SEPTEMBER 2017).....	18
ABBILDUNG 7: VOREINGESTELLTE ZEIT-FLÄCHEN-KURVEN IN MIKE+ (QUELLE: DHI GROUP 2021)	25
ABBILDUNG 8: STANDARDPARAMETERSÄTZE FÜR DAS HYDROLOGISCHE MODELL B "KINEMATIC WAVE" IN MIKE+ (QUELLE: DHI GROUP 2021)	27
ABBILDUNG 9: UNTERSUCHUNGSGEBIET DES KIWASUS UNTERSUCHUNGSGEBIETES (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	30
ABBILDUNG 10: FLÄCHENARTEN DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES DES KIWASUS FORSCHUNGSPROJEKTS (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	31
ABBILDUNG 11: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 1 UND EVENT 13 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	36
ABBILDUNG 12: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 1 UND EVENT 16 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	36
ABBILDUNG 13: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 1 UND EVENT 37 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	37
ABBILDUNG 14: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 3 UND EVENT 13 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	38
ABBILDUNG 15: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 3 UND EVENT 16 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	38
ABBILDUNG 16: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR MODELLVARIANTE 1 AN MESSSTELLE 3 UND EVENT 20 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	38
ABBILDUNG 17: GEGENÜBERSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE DER MESSSTELLEN 1 UND 3 FÜR MODELLVARIANTE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	44

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 18: VERGLEICH DER ABFLUSSGANGLINIEN FÜR DIE ÜBERARBEITETE MODELLVARIANTE 5 AN MESSSTELLE 3 UND EVENT 16 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	48
ABBILDUNG 19: REFERENZPARAMETERSATZ FÜR DIE KALIBRIERUNG DES URSPRUNGSMODELLS 5 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	50
ABBILDUNG 20: PARAMETERSATZ FÜR DIE KALIBRIERUNG DER VERZÖGERUNGSZEIT (K1) (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	51
ABBILDUNG 21: PARAMETERSATZ FÜR DIE KALIBRIERUNG DER ANFANGSVERLUSTE (K2) (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	53
ABBILDUNG 22: EMPFOHLENE RAUHEITSWERTE NACH GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (QUELLE: LUBW 2020)	54

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE ABWEICHMAßE (QUELLE: DWA-M 165-1).....	23
TABELLE 2: GRAFISCHE DARSTELLUNG DES ZUSAMMENHANGES ZWISCHEN DER ABWEICHUNGSMASSE UND DER MODELLPARAMETER (QUELLE: DWA-M 165-1).....	24
TABELLE 3: UNTERTEILUNG DER BEI MIKE+ IM HYDROLOGISCHEN MODELL B "KINEMATIC WAVE" BERÜCKSICHTIGTEN OBERFLÄCHENTYPEN (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)....	26
TABELLE 4: IN MIKE+ VOREINGESTALLTE STANDARDPARAMETER FÜR DAS HYDROLOGISCHE ABFLUSSMODELL C2 "LINEAR RESERVOIR" (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	28
TABELLE 5: GRÖßENBASIERTE FLÄCHENAUFTEILUNG IM KIWASUS UNTERSUCHUNGSGEBIET (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	32
TABELLE 6: ÜBERSICHT DER FÜR DIE KALIBRIERUNG BERÜCKSICHTIGTEN NIEDERSCHLAGSEVENTS (QUELLE EIGENE DARSTELLUNG).....	32
TABELLE 7: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 1 FÜR MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	36
TABELLE 8: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 1 FÜR MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	38
TABELLE 9: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 2 FÜR MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	40
TABELLE 10: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 2 FÜR MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	40
TABELLE 11: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 5 FÜR MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	42
TABELLE 12: AUSWERTUNG DER MODELLVARIANTE 5 FÜR MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	42
TABELLE 13: AUSWERTUNG DER ÜBERARBEITETEN MODELLVARIANTE 5 FÜR MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	47
TABELLE 14: AUSWERTUNG DER ÜBERARBEITETEN MODELLVARIANTE 5 FÜR MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	48
TABELLE 15: GEGENÜBERSTELLUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER HYDROLOGISCHE ANSÄTZE FÜR DIE ÜBERARBEITETE MODELLVARIANTE 5 AN MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	49
TABELLE 16: ABBILDUNG 27: GEGENÜBERSTELLUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER HYDROLOGISCHE ANSÄTZE FÜR DIE ÜBERARBEITETE MODELLVARIANTE 5 AN MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	49
TABELLE 17: ERGEBNISSE DER SENSITIVITÄTSANALYSE VOM HYDROLOGISCHEN MODELL "LINEAR RESERVOIR" (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	50

Tabellenverzeichnis

TABELLE 18: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DES URSPRUNGSMODELLS (K0) UND DER KALIBRIERUNG (K1) AN MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	52
TABELLE 19: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DES URSPRUNGSMODELLS (K0) UND DER KALIBRIERUNG (K1) AN MESSSTELLE 2 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	52
TABELLE 20: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DER KALIBRIERUNGSLÄUFE K1 UND K2 AN MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	53
TABELLE 21: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DER KALIBRIERUNGSLÄUFE K1 UND K2 AN MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	53
TABELLE 22: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DER KALIBRIERUNGSLÄUFE K1 UND K3 AN MESSSTELLE 1 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	55
TABELLE 23: VERGLEICH DER ABWEICHUNGSMAÙE DER KALIBRIERUNGSLÄUFE K1 UND K2 AN MESSSTELLE 3 (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).....	55

Abkürzungsverzeichnis

DGM	-	Digitales Geländemodell
DWD	-	Deutscher Wetterdienst
KIWASuS	-	KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und Sturzfluten
KOSTRA-DWD	-	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und- auswertung des DWD
GIS	-	Geoinformationssystem
N-A-Modell, NAM	-	Niederschlags-Abfluss-Modell
MS	-	Messstelle

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

„Der Klimawandel und der Umgang mit dessen Folgen ist eine der zentralen Herausforderungen der Menschheit im 21. Jahrhundert“ (S.Weller et al., 2016).

Seit Beginn der Industrialisierung kommt es zu einem starken Anstieg der Treibhauskonzentration in der Atmosphäre, welcher durch die erhöhte Nutzung fossiler Brennstoffe, die Ausweitung der industriellen Produktion sowie der Viehzucht und die damit einhergehende Abholzung vieler Wälder geschuldet ist (Umweltbundesamt, 2021). Durch den Klimawandel kommt es neben der Zunahme von Hitzewellen und Trockenphasen ebenfalls zu einem Anstieg von extremen Starkregenereignissen, bei denen intensive Niederschläge in kürzester Zeit auftreten. Der Grund für die Zunahme an Starkregenereignissen ist die globale Erwärmung, da diese eine stärkere Verdunstung und einen höheren Feuchtigkeitsgehalt in der Luft bewirkt. Seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnungen im Jahre 1881 ist ein stetiger Anstieg der Temperatur zu verzeichnen. Im Vergleich zum Zeitraum 1881-1920 war die vergangene Dekade (2011-2020) 2 Grad Celsius wärmer (Kasper et al. September, 2021). Während Dürren als Konsequenz von längeren Trockenzeiten zu erwarten sind, kommt es durch die Starkniederschläge und einhergehende Überlastung der Kanalnetzte häufiger und intensiver zu flussbedingten Überschwemmungen und Sturzfluten (Brosseur et al., 2016). Charakteristisch für Sturzfluten ist das Auftreten in urbanen und gebirgigen Gebieten, sowie kurze Vorlaufzeit und hohe Fließgeschwindigkeiten. Auf Grund der kurzen Vorlaufzeit ist es problematisch die Bevölkerung rechtzeitig vor den Gefahren zu warnen und präventive Maßnahmen einzuleiten (Brosseur et al. 2016, 97–98). Es ist notwendig realitätsnahe und kurzfristige Niederschlags- und Überflutungsvorhersagen treffen zu können. Dies ermöglicht es, die Bevölkerung rechtzeitig vor drohenden Gefahren durch Sturzfluten oder Überschwemmungen zu warnen und zu schützen.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Kalibrierung eines gekoppeltes 1D-2D Überflutungsmodell am Beispiel des im Forschungsprojekt KIWaSuS (KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten) verwendeten Untersuchungsgebietes. Es wird zunächst anhand einer Literaturrecherche der theoretische Rahmen gesetzt. Der Fokus liegt dabei auf

der Niederschlags-Abfluss-Modellierung und deren Abflussprozess beeinflussende Modellkomponenten und -parameter in Bezug auf die Überflutungsprüfung. Zudem wird der grundlegende Ablauf einer Modellkalibrierung in Bezug auf die Software MIKE+ erläutert, bevor diese im zweiten Teil der Arbeit für das im Forschungsprojekt KIWASuS verwendete Untersuchungsgebiet durchgeführt wird. Für die Kalibrierung werden zunächst Modellvarianten erstellt, mit welcher die Bestandsanschlusssituation des Untersuchungsgebiet nachgebildet werden soll.

Für die geeigneten Modellvarianten wird anschließend eine Parameterkalibrierung, mit dem Ziel eine möglichst genaue Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Durchflüssen zu gewinnen, durchgeführt.

1.3 Forschungsprojekt KIWASuS

Durch die immer häufiger auftretende Überflutungsgefahr durch Starkregenereignisse werden immer öfter innerhalb von Organisationen, Unternehmen oder Forschungsprojekten Maßnahmen entwickelt, welche dazu beitragen sollen, die Bevölkerung rechtzeitig vor drohenden Gefahren zu warnen.

Auch die Beteiligten des Forschungsprojekt KIWASuS haben sich dieser Problematik angenommen und sich das Ziel gesetzt ein Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystem, welches vor plötzlich auftretenden Sturzfluten warnen soll, zu entwickeln. KIWASuS steht für „KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten“. Die Namensgebung des Forschungsprojekts verweist auf den Einsatz von maschinellen Lernverfahren in Form von künstlicher Intelligenz, welche bei der Entwicklung des Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystems verwendet wurde (KIWASuS, 2021).

Ziel ist es, im Laufe des Projekts auf folgende Probleme einzugehen, da diese zu starken Ungenauigkeiten in den Starkregenvorhersagen führen:

- Die geringe räumliche Dichte der bestehenden Hydrologischen Messnetze, die nicht für die Erkennung von Starkregen und Überflutungsgebieten ausreicht
- Die Langenrechendauern, die durch die physikalisch-basierten Modellansätze erzeugt werden
- Die Datenqualität günstiger Sensoren, die zu großen Unsicherheiten in der Abbildung hydrologischer Systemzustände führt

Einleitung

- Die eingesetzten Vorhersagealgorithmen, die nicht für eine genaue Abbildung der hohen Dynamik der Starkregenprozesse ausreicht

Die Entwicklung des Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystems erfolgt in sieben Arbeitspaketen. Bestandteil eines dieser Arbeitspakete ist die Ermittlung eines repräsentativen Überflutungsmodells für das Untersuchungsgebiet des Forschungsprojekts.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird eine intuitive digitale Karte anhand von maschinellen Lernverfahren entwickelt, die bereits frühzeitig vor dem Eintreten des eigentlichen Starkregeneignisses die Dimensionen der bevorstehenden Überflutung ortsgetreu und zuverlässig abbildet (KIWASuS, 2021).

Die dadurch resultierende Erhöhung der Vorwarnzeiten und der verbesserten Lokalisierung von Sturzfluten verhilft Kommunen dazu, die betroffenen Bürger rechtzeitig zu warnen und die benötigten Ressourcen an Personal und Schutzmaßnahmen wie etwa Feuerwehr, Katastrophenschutz oder Kanalnetzbetreiber für jedes Ereignis individuell bereitzustellen. Zudem soll es durch die Echtzeitinformationen ermöglicht werden eventuelle Stadtteillungen durch überflutete Autobahnen, Unterführungen, Bahnstrecken oder sonstigen Geländetiefpunkten rechtzeitig ermitteln zu können. Anschließend kann eine geeignete Routenauswahl für Rettungswäge für Hilfskräfte getroffen werden (KIWASuS, 2021).

2 Niederschlags-Abfluss-Modell

Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle, NAM) dienen der numerischen Ermittlung und Simulation von Abflüssen aus Niederschlagsereignissen auf der Oberfläche und in Entwässerungssystemen. Dabei können neben den bestehenden Netzzuständen auch Prognosen, welche zum Beispiel bei Neu- oder Umplanungen benötigt werden, abgebildet werden. N-A-Modelle werden klassischerweise für den Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen genutzt. Im Falle von Aus- und Umbauten werden diese zur Überprüfung und Überarbeitung der bestehenden Generalentwässerungsplanung (GEP) herangezogen (DWA, 2021). Neben der GEP und der Prüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit werden Überflutungsberechnungen und die Ermittlung von Abflüssen sowie entstehendem Überstau aus Kanalnetzen und auf der Oberfläche mittels N-A-Modellen durchgeführt. Durch den technischen Fortschritt im Rahmen der zunehmenden Digitalisierung sind hochauflösende Abflusssimulationen innerhalb vertretbarer Rechenzeiten möglich (DWA, 2021).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Abflussprozesse der Abflussbildung und der Abflusskonzentration vorgestellt. Anschließend folgt die Erläuterung des Modellaufbaus eines N-A-Modells und deren benötigten Eingangsdaten.

2.1 Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration

Die maßgebende Belastungsgröße eines Kanalnetztes wird durch das zufließende Niederschlagswasser definiert. Dabei ist zu beachten, dass das Volumen des Niederschlages, welcher während eines Ereignisses auf der Oberfläche auftritt, nicht gleich dem Volumen ist, welches anschließend tatsächlich im Entwässerungssystem ankommt. Grund dafür sind Anfangs- und Dauerverluste, welche zur Verringerung des abflusswirksamen Niederschlages führen. Als abflusswirksamer Niederschlag oder auch Effektivniederschlag wird das dem Kanalnetz tatsächlich zufließende Niederschlagswasser bezeichnet. Der Prozess, welcher hinter der Umwandlung des anfallenden Niederschlages zum Effektivniederschlag steckt, wird als Abflussbildung bezeichnet (DWA, 2006).

Im Anschluss an die Abflussbildung wird der abflusswirksame Niederschlag in die Abflussganglinie des Direktabflusses integriert, welcher im Bereich des eingesetzten Entwässerungssystems auftritt. Dieser Vorgang wird als Abflusskonzentration bezeichnet (DWA, 2006). Der Direktabfluss bezeichnet den Anteil des Abflusses, welcher ohne Verzögerungen entweder das

Niederschlags-Abfluss-Modell

nahegelegene Gewässer oder die entsprechenden Entwässerungssysteme erreicht (DWA, 2021).

Abflussbildung

„Der Prozess der Abflussbildung beschreibt die Umwandlung des gefallenen Niederschlages in den abflusswirksamen Niederschlag“ (DWA, 2021). Gründe für die Differenz der zuvor genannten Niederschläge bilden die Anfangs- und Dauerverluste. Zu den Anfangsverlusten zählen der Benetzungsverlust und der Muldenverlust. Zu den dauerhaft auftretenden Verlusten kommt es durch die Verdunstung (Evaporation) und die Versickerung (Infiltration). Wegen der unterschiedlichen Abflussverhalten von befestigten und unbefestigten Flächen, sollte diese im Rahmen der Abflussbildung getrennt betrachtet werden (DIN, 2017)

Eine graphische Darstellung des Prozesses der Abflussbildung für befestigte und unbefestigte Flächen lässt sich den Abbildung 1 und 2 entnehmen. Dabei stehen die Indizes „u“ und „nb“ für befestigte und nicht befestigte Flächen.

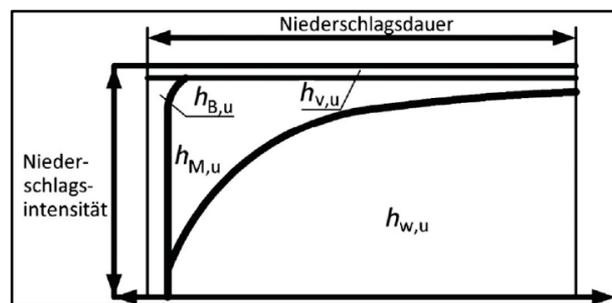


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Abflussbildung bei befestigten Flächen (Quelle: DWA-A 165-1)

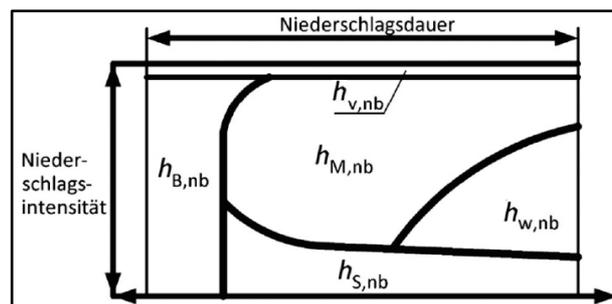


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Abflussbildung bei unbefestigten Flächen (Quelle: DWA-A 165-1)

mit:

h_B - Höhe des Benetzungsverlustes [mm]

h_M - Höhe des Muldenverlustes [mm]

Niederschlags-Abfluss-Modell

- h_N - Niederschlagshöhe [mm]
- h_S - Versickerungshöhe [mm]
- h_v - Verdunstungshöhe [mm]
- h_w - Höhe des effektiven Niederschlages [mm]

Die Anfangsverluste bei undurchlässig befestigten Flächen werden durch den Mulden- und Benetzungsverlust abgebildet. Der Benetzungsverlust bezeichnet die Verluste, die sich durch die Befeuchtung der Oberfläche ergeben und werden zu Beginn von der Niederschlagshöhe abgezogen. Der Muldenverlust, welcher durch die Verfüllung von z.B. Bodenvertiefungen entsteht, hängt von Geländeneigung dem Befestigungsgrad ab. Der Verlauf des Muldenverlustes sollte als zeitlich variabel angesehen werden (DWA, 2021).

Im Arbeitsblatt DWA-A 165-1 werden dabei folgende Grenzwerte für die Festlegung der Anfangsverluste befestigter Flächen empfohlen:

- Benetzungsverlust: 0,3 mm – 0,7 mm
- Muldenverlust: 0,5 mm – 2,0 mm

Die Abbildung der Anfangsverluste bei durchlässigen Flächen kann entweder über Verlustratenansätze oder Abflussbeiwertansätze erfolgen. Klassischerweise werden Verlustratenansätze für die Kanalnetzberechnung verwendet und mit Hilfe von Abflussbeiwertansätze auf Plausibilität geprüft. Bei den Verlustratenansätzen wird davon ausgegangen, dass der anfallende Niederschlag solange in den Boden infiltriert bis dieser vollständig gesättigt ist. Der weitere Niederschlag wird im Anschluss für die Befüllung der Mulden genutzt und anschließend als effektiver Niederschlag oberflächlich abgeleitet (DWA, 2021).

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Infiltrationsrate bildet der Ansatz von Horton, welche in den Gleichungen (1) und (2) dargestellt sind.

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) * e^{-k_{R,N}*t} \quad (1)$$

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) * e^{-k_{R,T}*t} \quad (2)$$

mit:

$f(t)$ - mögliche Infiltrationsrate zum Zeitpunkt t [mm/min]

f_0 - Anfangswert der Infiltrationsrate zum Zeitpunkt $t=0$ [mm/min]

Niederschlags-Abfluss-Modell

f_c - Endwert der Infiltrationsrate [mm/min]

$k_{R,N}$ - Rückgangskonstante im Niederschlagsereignis [1/min]

$k_{R,T}$ - Regenerationskonstante in der Trockenperiode [1/min]

Dieser Ansatz kann erst berücksichtigt werden, wenn die Niederschlagsintensität über dem Grenzwert der Infiltrationsrate liegt. Bei dem Ansatz der Abflussbeiwerte handelt es sich lediglich um eine pauschale Abschätzung der Verluste. Dabei wird anhand abgeschlossener Niederschlagsereignisse ein mittlerer Abflussbeiwert, der das Verhältnis des effektiven Niederschlages zum gefallenem Niederschlag angibt, ermittelt und auf zukünftige Ereignisse angewendet. Diese sind stark abhängig von den Gebiets- und Niederschlagseigenschaften und betrachten kaum physikalische Prozesse der Abflussbildung. Dadurch eignet sich dieser Ansatz eher für die Überprüfung des Verlustratenansatzes (DWA, 2021).

Grenzwerte der Anfangsverluste bei durchlässigen Flächen:

- Muldenverlust als Anfangsverlust: 3,00 mm – 8,00 mm
- Infiltration: keine Richtwerte, da diese abhängig von der Anfangsfeuchte, Bodeneigenschaften und Bodenbedeckung sind
- Abflussbeiwert: kein Richtwert, da abhängig von Gebiets- und Niederschlagseigenschaften

Von großer Bedeutung bei einer korrekten Abbildung der Anfangsverluste sind die Anfangsbedingungen. Diese sagen aus, ob die untersuchten Flächen zum Beobachtungsbeginn trocken oder nass sind, da es zu einer Veränderung im Verlauf der Anfangsverluste kommen kann. Bei der Simulation von Starkregenereignissen werden sowohl bei den befestigten als auch bei den unbefestigten Flächen trockene Anfangsbedingungen angenommen (DWA, 2021). Zudem ist während der Abflussbildung auch die Verdunstung zu berücksichtigen, da diese zur Muldentleerung, Abtrocknung der Oberflächen oder zur Abnahme der Bodenfeuchte führt (DWA, 2021). Die Berechnung der Abflussbildung kann entweder vereinfacht verschiedenen Flächentypen eines Einzugsgebietes vorgenommen erfolgen oder detailliert über die Berechnung eines Raster, mit definierter Zellengröße (DWA, 2021).

Abflusskonzentration

Die Abflusskonzentration beschreibt „die Umwandlung des flächenhaft verteilten abflusswirksamen Niederschlags in die am Tiefpunkt der betrachteten Teilfläche entstehende Abflussganglinie“ (DWA, 2006). Ausschlaggebende Einflussfaktoren haben die Fließvorgänge auf der Oberfläche, Translation, sowie die Verzögerungseffekte, die Retention. Da unbefestigte Flächen rauer sind als befestigte Flächen, kommt es zu einer größeren Verzögerung des Abflusses. Daher wird auf Grund des variierenden Abflussverhaltens zwischen befestigten und unbefestigten Flächen empfohlen verschiedene Parametersätze bei der Modellierung dieser zu berücksichtigen (DWA, 2006).

2.2 Modellaufbau

Ein N-A-Modell wird durch die Interaktion mehrerer Teilmodelle gebildet. Als Teilmodell sind Niederschlags- und Trockenwetterdatenmodelle, das Kanalnetzmodell, das Flächendatenmodell und das Geländedatenmodell zu nennen. Durch die einzelnen Teilmodelle werden verschiedene Wirkungsaspekte aufgezeigt. Im Rahmen der Modellierung sind diese zusammenzuführen, um die Auslastung der Entwässerungssysteme gesamthaft darstellen zu können. Es ist notwendig eine große Bandbreite an Eingangsdaten für die Modellierung zu beschaffen. Zu diesen Eingangsdaten zählen Eigenschaften aus dem Kanalnetz wie z.B. Schacht- und Haltungsinformationen auch Informationen zum Einzugsgebiet und den zugehörigen Niederschlagsbelastungen sind enthalten. Weiterführend werden Niederschlagsdaten aus Modellregen oder tatsächlich gemessenen Regen benötigt. Die Wahl der verwendeten Niederschlagsdaten ist abhängig von der Planungsaufgabe. Dabei werden alle benötigten Daten, wie beispielsweise Informationen zu den Flächennutzungen oder zu den Anschlusssituationen, zuvor aus Bestands- oder Planungsunterlagen gesammelt. Dies stellt bei den Bestandunterlagen eine Schwierigkeit dar, denn viele Aufzeichnungen liegen entweder weit zurück oder sind nicht existent. Daher ist eine Überprüfung der Bestandsdokumente auf Plausibilität und Aktualität durchzuführen. Anschließend werden diese Daten in ein für die jeweilige Software benötigtes Format überführt (DWA, 2021).

In den folgenden Abschnitten werden die für eine N-A-Modellierung benötigten Eingangsdaten vorgestellt und erläutert.

Vorauswahl

Vor dem Modellaufbau eines N-A-Modells muss anhand der Planungsaufgabe entschieden werden, ob ein hydrologischer oder hydrodynamischer Ansatz verfolgt wird. Hydrologische Modelle werden in der Regel für einfache Systeme wie z.B. bei Schmutzfrachtsystemen verwendet, da in diesem Fall stationäre Strömungen anhand der Kontinuitätsgleichung abgebildet werden. Überlastungen des Kanalnetzes werden nicht betrachtet (DWA, 2021). Hydrodynamische Modelle berücksichtigen im Vergleich zu den hydrologischen Modellen zusätzlich Überlastungseffekte wie Rückstau oder Fließumkehr im Kanalnetz. Dadurch sind diese für realitätsnahe Überstau- und Überflutungsberechnungen geeignet (DWA, 2021).

2.2.1 Kanalnetzdaten

Kanalnetze werden im Modell mit Hilfe von Stammdaten zu Schacht-, Speicher- und Transportelementen abgebildet. Dazu gehören neben den geographischen und geometrischen Informationen auch Belastungsgrenzen sowie die Kenn- und Beiwerte der einzelnen Elemente. Kanalnetzmodelle werden als Knoten-Kanten-Systeme abgebildet. Unter Knoten werden diverse Speicherelemente wie Schächten, Sonderbauwerke (z.B. Regenrückhaltebecken) oder naturnahe Regenbewirtschaftungselemente wie Mulden-Rigolen-Systeme eingeordnet. Zu den Kantenelementen hingegen gehören neben den Haltungen ebenso Pumpen oder Drosseln (DWA, 2021).

2.2.2 Flächendaten

Flächendaten erfüllen die Aufgabe den einzelnen Elementen der Entwässerungssystemen, individuelle Belastungsgrößen zuordnen zu können. Dies geschieht mittels der Zuweisung von kanalisierten Einzugsgebieten. Kanalisierten Einzugsgebieten werden definiert als der Anteil der gesamten kanalisierten Fläche, dessen Abfluss einem einzelnen Entwässerungselementen, wie z.B. einer Haltung, zugeordnet wird. Dabei wird der anfallende Niederschlagsabfluss über die grundstückseigenen Entwässerungsanlagen, beispielsweise über die Dachrinnen und entsprechende Anschlüsse in die städtischen Entwässerungsanlagen eingeleitet. Standardmäßig teilt man große zusammenhängende Gebiete analog der Flurstücke in Einzelflächen auf und ordnet diese anschließend den nächstgelegenen Anschlussstellen an das Entwässerungssystem zu (DWA, 2021). Im Bereich kleiner bis mittelgroß besiedelte Flächen kann dieser Ansatz als Realitätsgetreu beurteilt werden. Für eine Modellierung, mit besonderem Augenmerk auf große

Niederschlags-Abfluss-Modell

Flächen wie Industrie- oder Gewerbeflächen, müssen weitere Randbedingungen, wie zum Beispiel Informationen über die Bestandsanschlusssituation, bei der Zuordnung berücksichtigt werden. Diese Informationen können städtischen Verzeichnissen, wie Hausakten oder Bestandsaufnahmen entnommen werden. Werden diese Daten nicht berücksichtigt, besteht das Risiko größere Flächen dem Entwässerungssystem falsch zuzuordnen. Daher sollten die geographischen, geometrischen und hydraulischen Eigenschaften sowie die zugehörigen Anschlüsse aller Flächen an das Kanalnetz mit Sorgfalt eingepflegt werden. Andernfalls führt eine inkorrekte Abbildung von Flächendaten zu einer Über- oder Unterschätzung der Belastung im zugehörigen Entwässerungssystem. Als Befestigungsgrad eines Untersuchungsgebietes wird der prozentuale Anteil an befestigter Fläche im Verhältnis zur gesamthaft betrachteten Fläche bezeichnet. Hier können neben Literaturwerte auch Mittelungen über das gesamte Gebiet bzw. über repräsentative Bereiche verwendet werden (DWA, 2021).

Für die Simulationen werden Flächen mit homogenen Eigenschaften benötigt. Daher werden große zusammenhängende Einzugsgebiete in Einzelflächen mit homogenen hydraulischen Eigenschaften unterteilt. Grundsätzlich wird zwischen befestigten und unbefestigten Flächen unterschieden. Dies ist wichtig, da befestigte und unbefestigte Flächen verschiedene Anfangs- und Dauerverluste vorzeigen, welche unterschiedlich bei der Abflussbildung berücksichtigt werden. Für eine exaktere Abbildung der Flächen und zugehörigen Befestigungsgrade können sogenannte Orthofotos, wobei es sich um georeferenzierte Luftbilder handelt, ausgewertet werden. Dieses Verfahren ist Kosten- und aufwandsintensiver, führt jedoch zu einer wesentlich detailreicheren Zuordnung (DWA, 2021).

2.2.3 Gelände- bzw. Oberflächendaten

Für die Analyse von Fließwegen und Überflutungen werden detaillierte Informationen zur Geländehöhe und -struktur sowie derer Eigenschaften benötigt (Horn et al., 2017). Dafür werden digitale Geländemodelle (DGM) eingesetzt. In den DGM werden die Höhenpunkte der Geländepunkte in einem Raster repräsentativ abgebildet. Je kleiner die Auflösung der Rasterfelder dabei ist, desto detaillierter sind die Höhendaten für das untersuchte Gebiet. Zur Erhebung der benötigten Daten der DGM werden Laser Scannings eingesetzt (DWA, 2021).

Neben den Geländehöhen können Informationen zur Struktur eines Gebiets durch das DGM erlangt werden. Bestandteile der Struktur sind neben Gebäuden auch kleinere Elemente wie Mauern und Bordsteinkanten. Eine fehlerfreie Abbildung der einzelnen Strukturelemente ist

Niederschlags-Abfluss-Modell

maßgebend. Die einzelnen Kanten der Elemente bilden für ansteigendes Wasser Barrieren für die Ausbreitung. Auch die Höhe von Schachtdeckeln und Zuflüssen ist realitätsgetreu abzubilden, da diese als Austauschpunkt der Oberfläche mit dem Kanal dienen. Mit Hinblick auf die Überflutungsprüfung sind diese teils feinen Höhenunterschiede besonders präzise bei der N-A-Modellierung zu berücksichtigen. Ebenfalls ist es empfehlenswert, dass die Höhe von Gebäuden im DGM manuell hochgesetzt werden, damit diese in der Simulation umflossen und nicht überflossen werden. Zusätzlich relevant für das N-A Modell sind auch Eigenschaften, wie Rauheit oder Versickerungsfähigkeit der Oberfläche, da diese Einfluss auf den Prozess der Abflussbildung haben (DWA, 2021).

2.2.4 Belastungsgrößen

Die auf das Kanalnetz einwirkenden Belastungen setzen sich aus den Belastungsgrößen des Niederschlags und des Trockenwetterabflusses, bestehend aus häuslichem und gewerblichem Schmutzwasser sowie Fremdwasser, zusammen. Welche dieser Belastungsgrößen bei dem betrachteten Entwässerungssystemen zu berücksichtigen ist, ist abhängig von dem vorhandenen Entwässerungsverfahren (DWA, 2006). Bei den Entwässerungsverfahren wird zwischen dem Trenn- und dem Mischsystem unterschieden. In einem Mischsystem werden das häusliche und gewerbliche Schmutzwasser gemeinsam mit dem Regenwasser und dem Fremdwasser in einem gemeinsamen Kanal abgeleitet. Im Trennsystem hingegen wird unabhängig voneinander das Regenwasser in einem Regenwasserkanal und der Trockenwetterabfluss in einem Schmutzwasserkanal abgeleitet. Dies sorgt für die Entlastung bestehender Kanäle und ermöglicht, dass nur der Anteil an Niederschlagswasser, welcher für die Reinigung einer Kläranlage zugeführt werden muss, abgeleitet wird und der Rest durch dezentrale Maßnahmen versickert werden kann (DWA, 2006).

Niederschlagsdaten

Die maßgebende Belastung im Kanalnetz bildet das anfallende Niederschlagswasser. Bei der Modellierung des N-A-Modells sind zwei Arten des Niederschlags zu unterscheiden. Zu einem Daten aus tatsächlich gemessenen Niederschlagsereignissen und zum anderen synthetisch generierte Niederschlagsdaten. Welche dieser Niederschlagsarten am geeignetsten ist, ist in Hinblick auf die Planungsaufgabe und dem verwendeten hydrologischen Modell zu wählen, da den unterschiedlichen Zielen der Planung unterschiedliche Anforderungen an die Niederschlagsdaten gestellt werden (Horn et al., 2017). Auch die Wiederkehrzeiten und Dauerstufen von den

Niederschlags-Abfluss-Modell

verwendeten Niederschlagsdaten sind abhängig von der Planungsaufgabe. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die nach DWA-A 118 und DIN EN 752 empfohlenen Wiederkehrzeiten unterteilt nach Neubau- und Bestandsbauwerke, sowie nach den Nachweisen eines Überstaus oder einer Überflutung.

Örtlichkeit/Flächennutzung	Überflutungshäufigkeiten ¹⁾		Überstauhäufigkeiten	
	Entwurf/Neuplanung	Entwurf/Neuplanung	Bestehende Systeme ²⁾	
	1-mal in „n“ Jahren			
Ländliche Gebiete	1 in 10	1 in 2	-	
Wohngebiete	1 in 20	1 in 3	1 in 2	
Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete	1 in 30	seltener als 1 in 5	1 in 3	
Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	1 in 50	seltener als 1 in 10 ^{*)}	1 in 5	

ANMERKUNGEN
1) Empfohlene Werte für den Entwurf/Neuplanung nach DIN EN 752:2008.
2) Werte als „Mindestleistungsfähigkeit“ bestehender Systeme nach ATV-DVWK (2004).
*) Bei Unterführungen ist zu beachten, dass bei Überstau über Gelände in der Regel unmittelbar eine Überflutung miteinhergeht, sofern nicht besondere örtliche Sicherungsmaßnahmen bestehen.

Abbildung 3: Empfohlene Überflutungshäufigkeiten nach DIN EN 752:2008 und Überstauhäufigkeiten nach Arbeitsblatt DWA-A 118:2006 und ATV-DVWK (Quelle: DWA-M 119)

Als Überstau wird das Austreten des Wassers aus einem Kanalnetz an die Oberfläche und die gleichzeitige Verhinderung des Eindringens des oberflächlichen abfließenden Wassers in das Kanalnetz beschrieben. Als Überflutung hingegen wird der Fall beschrieben, wenn das ausdringende Wasser aus dem Entwässerungssystem zu einem Schadensfall, beispielsweise durch das Eindringen in Gebäude, führt (DWA, 2006).

Bei den Belastungsgrößen lässt sich zum einem zwischen Einzelereignissen und Ereignisreihen unterscheiden ebenso wie zwischen natürlichen und künstlich generierte Niederschlagsereignissen. Die Betrachtungen einzelner natürlicher Regenereignisse, beispielsweise von nennenswerten Starkregenereignissen, eignen sich laut DWA-A 165-1 (2021) für eine Modellkalibrierung sowie für die anschließende Validierung der Ergebnisse. Allerdings können diese Ereignisse auf Grund der kurzen Aufzeichnungsdauer nicht als repräsentativ für alle Witterungsverhältnisse angesehen werden. Niederschlagsreihen hingegen berücksichtigen über längere Zeit hinweg Niederschlagsereignisse mit verschiedenen Wiederkehrzeiten und Intensitäten. Diese können bei der Simulation entweder vollständig oder teilweise berücksichtigt werden, indem im Vorfeld nur die Ereignisse ausgewählt werden, welche für die Simulation am geeignetsten erscheinen. Durch die Auswahl maßgebender Ereignisse kann die Dauer der Berechnungszeiten

Niederschlags-Abfluss-Modell

der Simulationen messbar reduziert werden (DWA, 2021). Niederschlagsreihen können aus tatsächlichen Messungen, durch Niederschlagsschreiber oder Radarmessungen entstehen. Üblicherweise werden jedoch synthetisch generierte Niederschlagsereignisse, beispielsweise Modellregen, für eine N-A-Modellierung verwendet. Modellregen bietet den Vorteil, dass diese für diverse Dauern und Wiederkehrzeiten vorliegen und für viele Planungs- und Forschungsaufgaben eingesetzt werden können (DWA, 2021). Eine Grundlage für die Erzeugung von Modellregen bieten die vom DWD im Rahmen des KOSTRA-DWD 2010 erarbeiteten Starkregenauswertungen. Dabei wurden anhand historischer Ereignisse und statistischer Berechnungen repräsentative Niederschlagshöhen für verschiedenste Wiederkehrzeiten und Dauerstufen generiert. Die aktuellste Fortschreibung der KOSTRA Daten beruht auf einem Beobachtungszeitraum von 1951-2010 (Malitz und Ertel, 2015).

In besonders überflutungsgefährdeten Ortschaften erfolgt die Dimensionierung neuer Anlagen anhand von Modellregen, welcher nach DIN EN 752 (2017) für die Überflutungshäufigkeiten empfohlen wird (DWA, 2006). Auch für die Überflutungsprüfung bestehender Systeme sollten nach DWA-M 119 (2016) Modellregen mit einer Wiederkehrzeit von 30 bzw. 50 Jahren verwendet werden.

Trockenwetterdaten

Als zweite Belastungsgröße im N-A-Modell gilt der Trockenwetterabfluss. Der Trockenwetterabfluss bildet sich zu einem aus den Schmutzwetterabflüssen häuslicher und betrieblicher genutzter Flächen. Bei bestehenden Entwässerungssystemen sollte der Trockenwetterabfluss anhand Langzeit-Messungen aufgenommen werden, dadurch kann eine wirtschaftliche und realistische Abbildung der Abflüsse gewährleistet werden. Auf Grund großer Schwankungen des Schmutzwasseranfalls bei verschiedenen Flächennutzungen ist es empfehlenswert, die Messungen gesondert für Wohngebiete und Gewerbe- und Industriegebiete durchzuführen (DWA, 2006).

Der Anfall an häuslichem Schmutzwasser hängt im Wesentlichen von der Bevölkerungsdichte [Einwohner/ha], der Fläche des kanalisierten Einzugsgebietes [ha] und des Einwohner spezifischen Schmutzwasseranfalls [$l/(s \cdot 1000 \text{ Einwohner})$] ab. Das betriebliche Schmutzwasser wird anhand flächenspezifischer Angaben über die Abflussspende [$l/(s \cdot ha)$] und der Fläche an kanalisiertem Einzugsgebiet [ha] ermittelt. Fremdwasser zählt ebenfalls zu den Komponenten des

Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

Trockenwetterabflusses. Zum Fremdwasser gehören neben eindringendem Grundwasser, welches Undichtigkeiten im Kanalnetz geschuldet sein kann, auch zufließendes Drän- und Quellwasser. Durch Fehleinleitungen im Trennsystem ist das Zuführen von unerwünschtem Regenwasser in die Schmutzwasserkanäle umkehrt von Schmutzwasser den Regenwassersystem möglich. Der Fremdwasserabfluss wird mit Hilfe der flächenspezifischen Fremdwasserabfluss-spende [$l/(s \cdot ha)$] und des kanalisierten Einzugsgebietes [ha] berechnet (DWA, 2006).

3 Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

Die Überflutungsprüfung dient der Bewertung des Überflutungsrisikos und des entstehenden Schadenpotentials. Daraus resultierend finden diese Anwendung in der kommunalen und privaten Überflutungsvorsorge, sowie dem Risikomanagement.

Auf Grund der klimabedingten Zunahme an Starkregeneignissen gewinnt die Überflutungsprüfung an Relevanz. Neben der hydraulischen Überlastung der Entwässerungssysteme ist ebenfalls ein Überflutungsrisiko durch Zuflüsse aus ausufernden Bachläufen, Außengebieten oder sogenannten „schlafenden Gewässern“, welche ausgetrocknete bzw. stillgelegte Gewässer bezeichnen, vorhanden. Auch anstehendes Grundwasser kann Überflutungen auf der Oberfläche verursachen (DWA, 2016).

Üblicherweise werden Kanalsysteme anhand eines Bemessungsregens dimensioniert, d.h. dass eine kleine Überlastung des Kanalnetzes im Falle eines Niederschlagsereignisses, welches der Dauer und der Wiederkehrzeit des Bemessungsregens entsprechen, auftreten darf. Starkregeneignisse hingegen weisen eine höhere Wiederkehrzeit im Gegensatz zum Bemessungsregen auf (DWA, 2006). In DWA-M 119 (2016) wird zwischen Starkregen, seltene Starkregen und außergewöhnliche Starkregen unterschieden. Ein Starkregen liegt bei einer Wiederkehrzeit von größer einem Jahr $T_n \geq 1a$ vor. Regeneignisse mit einer Wiederkehrzeit, welche zwar oberhalb der maßgebenden Wiederkehrzeit des Überstaus aber im Rahmen der zugelassenen Wiederkehrzeit für Überflutungen liegen, werden als seltene Starkregen beschrieben. Alle Regeneignisse, welche die maßgebende Wiederkehrzeit von Überflutungen überschreiten, werden zu den außergewöhnlichen Starkregen gezählt (DWA, 2016).

Ein Ziel der Überflutungsprüfung ist die Ermittlung von besonders überflutungsgefährdeten Bereichen wie z.B. Tiefpunkte, Unterführungen oder hydraulische Engstellen im Kanalnetz sowie die Ermittlung der Schadenspotentiale, die sich durch die Überflutungen ergeben. Dabei

Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

hängt das Ausmaß einer Überflutung im Wesentlichen von den Gelände- und Einzugsgebietseigenschaften ab. Dazu gehören beispielsweise Informationen zum Geländegefälle, zu den Bauungstypen oder zum Abflussvermögen der Entwässerungssysteme (DWA, 2016).

Um eine ausreichende Risikobewertung vor Überflutungen gewährleisten zu können, ist die Durchführung einer Gefährdungs- und Schadenspotentialanalyse erforderlich. Die Gefährdungsanalyse dient der Ermittlung der Lage und des möglichen Ausmaßes von Überflutungen. Grundlage für die Gefährdungsanalyse bietet ein präzises Niederschlags-Abfluss-Modell für das untersuchte Gebiet, anhand dessen für verschiedene Niederschlagsintensitäten das Auftreten und die Dimension von Überflutungen prognostiziert werden können. Durch die Gefährdungsanalyse können Überflutungen und deren Wasserstände lokalisiert werden (DWA, 2016).

Die Schadenspotentialanalyse wird durchgeführt, um die Schadensanfälligkeit von Flächen und Objekten zu ermitteln, welche im Zuge eines Starkregens von einer Überflutung betroffen sind. Dabei werden nicht nur materielle, sondern auch immaterielle Schäden wie beispielsweise Personenschäden bewertet. Auch Betriebs- und volkswirtschaftliche Schäden werden bei der Analyse berücksichtigt (DWA, 2016).

Die Risikobewertung erfolgt anschließend durch die Überlagerung der Ergebnisse aus der Gefährdungs- und Schadenspotentialanalyse und wird anhand von Risikokarten grafisch dargestellt (DWA, 2016).

3.1 Modellansätze einer N-A-Modellierung in Bezug auf die Überflutungsprüfung

In den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.3 wurden die für den Modellaufbau wichtigen Eingangsdaten von Kanalnetzmodellen und Oberflächenmodellen erläutert. In den folgenden Abschnitten wird explizit auf die Wirkungsweise der Modelle und auf die Verwendung für eine Überflutungsprüfung eingegangen.

3.1.1 1D-Kanalnetzmodell

In Abbildung 4 ist der vereinfachte Aufbau eines Kanalnetzmodells dargestellt. Die abflusswirksamen Flächen sind in blau gekennzeichnet.

Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

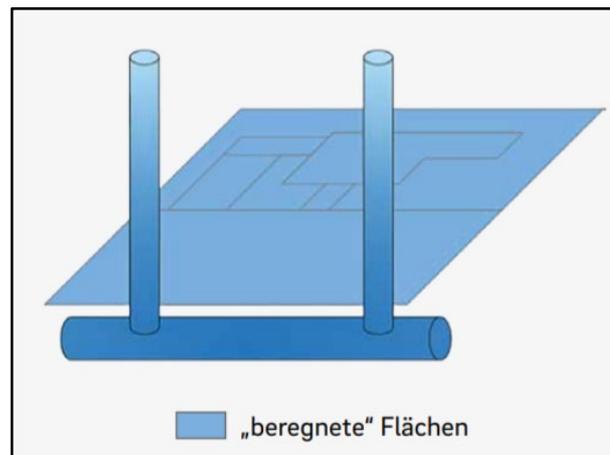


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung der abflusswirksamen Flächen eines 1D-Kanalnetzmodells (Quelle: Horn et al. September 2017)

Bei der Verwendung eines Kanalnetzmodells für die Simulation, wird für jedes Teileinzugsgebiet über hydrologische Ansätze Effektivniederschläge berechnet, welche gesamthaft über den nächstliegenden Schacht oder Straßeneinlauf dem Kanalnetz zugeleitet werden. Sobald die Kapazität des Kanalnetztes überschritten wird, wird das überstauende Wasser „virtuell zwischengespeichert, bis wieder ausreichend Abflusskapazität im Kanalnetz vorhanden ist“ (Horn et al., 2017). Kanalnetzmodelle werden als eindimensionale Modelle bezeichnet, da der Abfluss entlang des Kanals eine Hauptfließrichtung besitzt. Bestimmt durch diese Hauptfließrichtung erfolgen die Abflussvorgänge im Kanal über die Auflösung der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen. Bei der Verwendung eines 1D-Kanalnetzmodells können lediglich Überstauvolumen, Fließwege sowie Wasserstände in einem Kanal berechnet werden (DWA, 2021).

1D-Kanalnetzmodelle eignen sich für die Überprüfung der Abflusskapazitäten eines bestehenden Kanalnetzes, zur Analyse der Fließwege innerhalb des Entwässerungssystems und zur Dimensionierung von Neubauten anhand des maßgebenden Überstauvolumens (DWA, 2021).

Für eine Überflutungsprüfung eignen sich diese Modelle nicht, da die Ermittlung der Wasserstände an der Oberfläche nur über Abschätzungen der Überstauvolumina erfolgt und die auf der Oberfläche entstehenden Abflüsse, durch ein beispielsweise nicht kanalisiertes Einzugsgebiet, nicht berücksichtigt werden (Horn et al., 2017).

Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

3.1.2 2D-Oberflächenmodell

Oberflächenmodelle werden zur Berechnung der Abflussvorgänge auf der Oberfläche angewandt. Eine vereinfachte Darstellung der abflusswirksamen Flächen eines 2D-Oberflächenmodells ist in Abbildung 5 dargestellt.

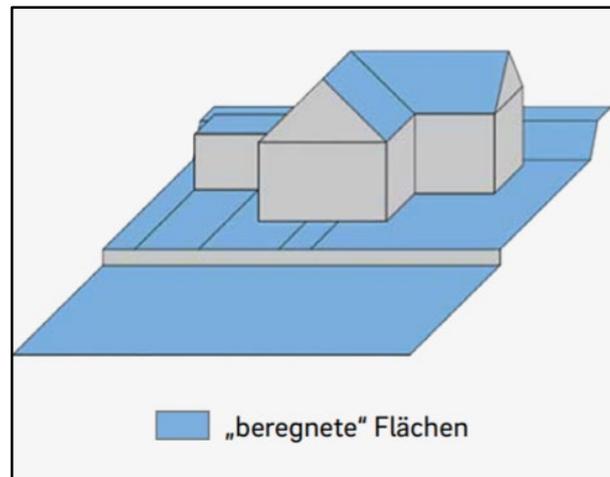


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der abflusswirksamen Flächen eines 2D-Oberflächenmodells (Quelle: Horn et al. September 2017)

Im Gegensatz zum Kanalnetzmodell besteht auf der Oberfläche keine feste Fließrichtung. Daher wird dieses Modell auch als 2D-Oberflächenmodell bezeichnet (Hürter, 2018). Grundlage für das 2D-Oberflächenmodell bieten DGM, welche entweder raster- oder dreiecksbasiert vorliegen. Für den Prozess der Abflussbildung wird je Rasterzelle durch die zeitdifferenzierte Zuweisung einer Regenspende und der Berücksichtigung von Verlustansätzen, der Effektivniederschlag berechnet. Abflusskonzentrationsprozesse werden durch die Berechnung von Strömungsvorgängen, beispielsweise durch Flachwassergleichungen oder Wellenansätze, ersetzt. Je engmaschiger das Raster eines DGM vorliegt, desto präziser kann die Abflussberechnung auf der Oberfläche durchgeführt werden (DWA, 2021). Als Ergebnisse können die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten auf der Oberfläche ermittelt werden. Jedoch wird bei der Berechnung über ein Oberflächenmodell kein anfallendes Wasser berücksichtigt, welches durch die Überlastung des Kanalnetzes auf die Oberfläche ausströmt. Im Umkehrschluss wird auch kein Zufluss des oberflächigen Wassers in das Kanalnetz berücksichtigt. Dadurch kann es bei der alleinigen Berücksichtigung eines Oberflächenmodells zu einer Über- bzw. Unterschätzung der Wassertiefen auf der Oberfläche kommen (Horn et al., 2017). Daher eignet sich dieses Modell ebenfalls nicht für eine Überflutungsprüfung.

Auswahl von Modellansätzen für eine Überflutungsprüfung

3.1.3 Gekoppeltes 1D-2D Berechnungsmodell

Bei gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodellen erfolgt die Abflussberechnung innerhalb des Kanalnetzes über 1D-Kanalnetzmodelle und der Oberflächenabfluss wird über 2D-Oberflächenmodelle abgebildet. Dies ermöglicht Flächen getrennt zwischen dem direkten Anschluss an das Kanalnetz und des oberflächlich ablaufenden Abflusses zu unterscheiden. Die bidirektionale Kopplung beider Modelle ermöglicht es im Fall einer Überlastung des Kanalnetzes das überstauende Wasser im Oberflächenmodell zu berücksichtigen und im Umkehrschluss kann das oberflächlich abfließende Wasser über Kopplungsstellen dem Kanalnetz zufließen und über das 1D-Kanalnetz weiterberücksichtigt werden. Die Kopplungs- bzw. Schnittstellen zwischen dem 1D-Kanalnetzmodell und dem 2D-Oberflächenmodell bilden Schächte sowie Straßeneinläufe (Horn et al., 2017).

Eine vereinfachte Darstellung des gekoppelten 1D-2D-Modells ist in Abbildung 6 dargestellt.

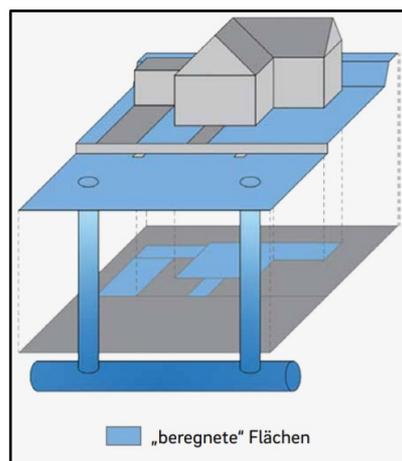


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der abflusswirksamen Flächen eines gekoppelten 1D-2D Abflussmodells (Quelle: (Horn et al. September 2017))

Die Ergebnisse der gekoppelten Berechnung sind neben den Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und im Kanalnetz auch eine realitätsnahe Abbildung der Überflutungsdimensionen, durch den flächendifferenzierten Ansatz der Abflussbildung (Horn et al., 2017).

Im Fall von Starkregen und den resultierenden urbanen Sturzfluten ist es auf Grund der 2D Strömungsansätze möglich auch Oberflächenabflüsse von Flächen, welche planmäßig nicht dem jeweiligen kanalisiertem Einzugsgebiet zugehören, im Entwässerungssystem zu berücksichtigen. Daher sind bei einer Überflutungsprüfung für Niederschläge mit größeren Dauern und Wiederkehrzeiten vorrangig gekoppelte Berechnungen des Kanalnetz- und Oberflächenmodells durchzuführen. Durch die Anwendung präziser und detaillierter Rechenetze bei der

Ablauf einer Modellkalibrierung

Anwendung von gekoppelten 1D-2D-Modellen besteht die Möglichkeit Überflutungen sowie die Fließwege realitätsnah nachzubilden. Nachteilig an der gekoppelten Berechnung ist der damit einhergehende hohe Rechenaufwand (DWA, 2016).

4 Ablauf einer Modellkalibrierung

Bei der Übertragung der realen Verhältnisse in ein softwarebehaftetes Modell kann es zu Abweichungen durch Vereinfachungen oder Schätzungen von Modellparameter sowie durch Fehlanschlüsse kommen (DWA, 2021). Um bei gleichbleibender Belastung eine möglichst exakte Übereinstimmung des simulierten Abflusses zum tatsächlich gemessenen Abfluss zu erlangen wird eine Modellkalibrierung durchgeführt. Dadurch ist die Steigerung der Realitätsnähe eines Systems zu erzielen. Um diese vornehmen zu können, sollten daher neben den gemessenen Niederschlagsdaten, welche für die Belastung der Simulation benötigt werden, auch die zeit- und ortsgleichen Durchflussmengen oder Wasserstände im Entwässerungssystem vorliegen (Muschalla et al., 2015). Modellunsicherheiten können bereits durch eine vom Bearbeiter fehlerbehaftete Erstellung der Modellstruktur hervorgerufen werden. Damit sind zum einem fehlerhafte Anschlusssituationen des Einzugsgebiets gemeint, aber auch geschätzte oder veraltete Modellparameter. Ebenfalls können fehlerhafte Messwerte von Niederschlägen und Abflüssen, welche für die Kalibrierung verwendet werden, für Unsicherheiten im System sorgen (Neubauer, 2018).

Die eigentliche Kalibrierung erfolgt über die Variierung der Modellparameter, dabei sollte nicht damit gerechnet werden eine vollkommenen Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Abflusswerten zu erlangen, sondern vielmehr auf eine repräsentative und plausible Annäherung hingearbeitet werden (Muschalla et al., 2015). In den folgenden Abschnitten wird auf den allgemeinen Prozess und die Eingangsdaten einer Modellkalibrierung eingegangen.

4.1 Datengrundlage

Bevor es zu der Kalibrierung der Parameter kommen kann, muss die erstellte Modellstruktur auf Plausibilität geprüft werden. Die Erstellung einer Modellstruktur wurde in Abschnitt 2 bereits erläutert. Im Rahmen des Entwässerungssystems muss überprüft werden, ob die gesamte bzw. nur die kanalisierten Flächen der Einzugsgebiete sowie deren Befestigungsgrade korrekt abgebildet werden. Für das Oberflächenmodell müssen Bruchkanten, Mauern und Gebäude ebenfalls auf Plausibilität geprüft oder entsprechend angepasst werden (DWA, 2021). Falls

Ablauf einer Modellkalibrierung

keine Angaben über die Anschlusssituationen der verschiedenen Flächennutzungen zur Verfügung stehen, sollten diese mittels Ortsbegehungen oder plausiblen Annahmen vorgenommen werden (DWA, 2021).

Neben den Flächendaten müssen auch die Belastungsdaten im Vorhinein geprüft werden. Dabei kann die Konzentration der Schmutzfrachtparameter mit den örtlichen Messungen oder anhand Regelwerke abgeglichen werden. Die Trockenwetterdaten sollten zum einen den einwohnerspezifischen Werten gegenübergestellt werden und zum anderen sollte der am Systemende anfallende Abfluss für einen Trockenwetterfall den örtlichen Werten entsprechen.

Die Niederschlagsdaten müssen so gewählt werden, dass sie als repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet gelten (DWA, 2021). Die Messdaten sollten zudem lückenlos vorliegen oder alternativ durch den Abgleich mit Messdaten zusätzlich eingesetzter Regenschreibern vervollständigt werden. Auch muss bei der Wahl der Messdaten darauf geachtet werden, zu welchen Jahreszeiten diese gemessen wurden, da es hierbei zu zusätzlichen Anpassungen, beispielsweise um den Schneefall zu berücksichtigen, im System kommen kann (DWA, 2021). Laut DWA-M 165-1 (2021) eignen sich kontinuierliche Zeitreihen der Niederschlagsmessung besonders gut für die Modellkalibrierung. Allerdings können ebenfalls einzelne Niederschlagsereignisse für die Kalibrierung verwendet werden. Falls die Belastungsdaten nicht durch Radarmessungen gewonnen werden, sollten bei den punktgemessenen Daten von einer gleichmäßigen Überregnung ausgegangen werden. Bei Starkregenereignissen ist dieser Ansatz jedoch auf Grund der hohen Intensität mit Vorsicht zu behandeln, da hierbei eher von einer unregelmäßigen Überregnung zu rechnen ist (DWA, 2021). Daher ist die Kalibrierung anhand von gemessenen Niederschlagsereignissen nicht empfehlenswert. Eine grobe Prüfung der Gleichmäßigkeit des Niederschlags lässt sich anhand der prozentualen Abweichung der Niederschlagshöhe einzelner Station im Gegensatz zu dem Mittelwert aller Stationen durchführen. Für den Mittelwert sollten dabei mindestens drei Stationen berücksichtigen und im Idealfall beträgt die Abweichung weniger als 15 %. Zusätzlich kann die Niederschlagssummenlinie einer einzelnen Station mit der gemittelten Niederschlagssummenlinie verglichen werden. Um eine ungleichmäßige Beregnung auszuschließen, sollte die Abweichung weniger als 30 % betragen (Schmitt et al. 2008).

4.2 Sensitivitätsanalyse

Nachdem die Datengrundlage des zu kalibrierenden Modells geprüft wurde, empfiehlt sich die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. Dabei wird überprüft, wie sich die Anpassung der Eingangsdaten auf die Ausgangsdaten bzw. die Ergebnisse auswirken (Härder, 2019). Bei der Anwendung auf Niederschlag-Abfluss Modelle wird somit untersucht, wie sich die Anpassung einzelner Modellparameter auf die Abflusskurven auswirkt (Neubauer, 2018). Dies kann zum einem dafür genutzt werden, um die Auswirkungen von Parameteranpassungen bei einem bereits vorhandenen und kalibrierten Modell zu ermitteln und somit einen Überblick über die Stabilität des Modells zu erhalten. Zum anderen kann die Sensitivitätsanalyse bei unkalibrierten Modellen genutzt werden, um damit gezielter die richtige Parameterwahl treffen zu können (Härder, 2019). Dies bietet sich vor allem bei gekoppelten 1D-2D Niederschlag-Abfluss Modellen an, da diese in der Regel eine hohe Berechnungszeit benötigen und somit bereits im Vorhinein eine grobe Erkenntnis über die Auswirkungen der Anpassungen verschiedener Parameter gewonnen werden kann. Dadurch können Parameter gezielt innerhalb Ihrer Grenzen variiert werden, wodurch der Umfang der Kalibrierung kompensiert wird.

4.3 Maße zur Bestimmung der Modellgüte

Um neben der visuellen Auswertung der Abflusskurven von simulierten und gemessenen Abflüssen eine quantitative Bewertung der Ergebnisse einer Modellkalibrierung durchführen zu können, werden Abweichmaße hinzugezogen. Für diese Arbeit wurden die durch das DWA-M 165-1 (2021) empfohlenen Abweichmaße des Volumenfehlers (VE), der Spitzenwertabweichung (DYMax) und des Effizienzkoeffizienten (NSE) untersucht.

Volumenfehler VE

Der Volumenfehler beschreibt die Abweichung des simulierten Abflussvolumens im Vergleich zum gemessenen Abflussvolumen innerhalb eines Niederschlagsereignisses. Die Berechnung des Volumenfehlers erfolgt anhand der Gleichung (3). Kommt bei der Berechnung ein Wert von 0 raus, so liegt keine Abweichung vor, was als optimale Lösung gilt. Wird das Volumen bei der Simulation überschätzt kommt beim Volumenfehler ein positiver Wert raus. Synchron dazu bietet ein negativer Volumenfehler die Auskunft über eine Unterschätzung des Volumens durch die Simulation (DWA, 2021).

$$VE = \frac{Sim_{vol} - Obs_{vol}}{Obs_{vol}} * 100 \quad (3)$$

mit:

VE - Volumenfehler [%]

Obs_{vol} - Gemessenes Abflussvolumen [m³]

Sim_{vol} - Simuliertes Abflussvolumen [m³]

Spitzenwertabweichung DYMax

Anhand der Spitzenwertabweichung wird die Abweichung des Maximalwertes (Peak) des Durchflusses der Simulation zur Messung bestimmt. Dabei wird keine zeitliche Verschiebung und auch kein definierter Zeitabschnitt berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt anhand des Spitzenabflusses innerhalb eines Niederschlagsereignisses und kann aus der Gleichung (4) entnommen werden. Genau wie beim Volumenfehler liegt bei der Spitzenwertabweichung mit 0 ein optimales Ergebnis und somit keine Abweichung zwischen der Simulation und der Messung vor. Bei einem negativen Ergebnis der Spitzenwertabweichung liegt der Peak der Simulation unter der Messung und bei einer positiven Lösung wird der Peak durch die Simulation überschätzt (DWA, 2021).

$$DYMax = \frac{Peak_{sim} - Peak_{obs}}{Peak_{obs}} * 100 \quad (4)$$

mit:

DYMax - Spitzenabflussfehler [%]

Peak_{obs} - maximal gemessener Durchfluss [l/s]

Peak_{sim} - maximal simulierter Durchfluss [l/s]

Effizienzkoeffizient NSE

Der Effizienzkoeffizient ist auch als Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) bekannt. Bei der Berechnung des NSE wird die quadrierte Abweichung des simulierten und gemessenen Durchflusses ins Verhältnis zu der Varianz der gemessenen Daten gesetzt. Dadurch wird ermittelt, wie gut sich die simulierte Durchflussganglinie an die gemessene Durchflussganglinie anpasst (Neubauer, 2018). Der NSE kann anhand der Gleichung (5) berechnet werden. Die Spannweite der Berechnungsergebnisse des NSE erstreckt sich von eins bis minus unendlich.

Ablauf einer Modellkalibrierung

Der optimale Wert des NSE liegt bei 1, dies bedeutet, dass der Verlauf der simulierten Durchflussganglinie sich optimal an die gemessene Kurve anpasst. Bei Werten unter 0 ist davon auszugehen, dass der tatsächliche Durchfluss anhand des Mittelwertes der Messdaten besser abgebildet wird als durch die Simulation.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i} - \bar{Q}_{gem})^2} \quad (5)$$

mit:

NSE - Nash-Sutcliffe-Effizienz [-]

Q_{gem} - gemessener Durchfluss [l/s]

Q_{sim} - simulierter Durchfluss [l/s]

\bar{Q}_{gem} - Mittelwert des gemessenen Durchflusses [l/s]

Um anhand der berechneten Abweichungsmaße eine Aussage über die Güte des Modells bzw. über die Kalibrierung treffen zu können, wurde das in Tabelle 1 abgebildete Bewertungsschema im DWA-M 165-1 (2021) vorgeschlagen.

Tabelle 1: Bewertungsschema für die Abweichmaße (Quelle: DWA-M 165-1)

Prüfgröße	Einheit	Bewertung		
		gut	mittel	unbefriedigend
VOL	%	< 10	10 – 20	> 20
DYMAX	%	< 15	15 – 25	> 25
E_2	-	> 0,7	0,4 – 0,7	< 0,4

4.4 Kalibrierung von Modellparametern

Die Kalibrierung von Modellparametern kann entweder automatisch durch softwareeigene Prozesse erfolgen oder manuell durch die Einstellung individueller Parametersätze durchgeführt werden. Die Anpassung der Parametersätze sollte dabei innerhalb eines realitätstreuen Gültigkeitsbereich erfolgen (DWA, 2021). Wenn innerhalb des Gültigkeitsbereichs keine zufriedenstellenden Kalibrierungsergebnisse zu erzielen sind, ist die Kalibrierung abzubrechen und auf mögliche Ursachen innerhalb der Eingangsdaten des Modells zu überprüfen. Die möglichen Parameter, welche bei einer Kalibrierung verändert werden können und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Abweichungsmaße sind in Tabelle 2 dargestellt.

Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+

Tabelle 2: Grafische Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Abweichungsmaße und der Modellparameter (Quelle: DWA-M 165-1)

Abweichung	Prozess/Phänomen	Kalibrierparameter (Auszug)
Abflussvolumen Niederschlagsabfluss	Abflussbildung (unter Berücksichtigung von Anfangsbedingungen)	Anfangsverluste (Mulden- und Benetzungsspeicher) Korrekturfaktor (Abflussbeiwert, Anschlussgrad) Versickerungseigenschaften
Maximalabfluss (Wellenscheitel)	Oberflächenabfluss (Abflusskonzentration) (hier nur in der Fläche)	Flächenkenngrößen (z. B. Retentionskonstanten, Zeit-Flächen-Funktionen, Oberflächenrauheiten)
Ganglinienverlauf	Abfluss in der Kanalisation (Abflusstransport und Speicherung)	Rauheiten, Einzelverluste Kennlinien Sonderbauwerke, Fließzeiten

5 Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung die Software MIKE+ verwendet. MIKE + ist eine Wassermodellierungssoftware, welche von der Firma „DHI“, mit Hauptsitz in Dänemark, entwickelt wurde. Die Softwareumgebung ermöglicht eine präzise Niederschlags-Abfluss Modellierung anhand verschiedener Methoden. Im weiteren Verlauf wird nochmal explizit auf diese eingegangen (DHI Group, 2021b). Ebenso können das Verwalten und Optimieren der gesamten Kanalisationsstruktur, die Modellierung von Flüssen und die Abbildung von Überflutungsszenarien in MIKE + durchgeführt werden (DHI Group, 2021b).

In den folgenden Abschnitten wird die Abbildung und Berechnung des 1D-Kanalnetzmodells und des 2D-Oberflächenmodells, in Bezug auf Kalibrierung eines N-A-Modells, in MIKE + erläutert.

5.1 1D-Kanalnetzmodell

Die Abflussberechnung im 1D-Kanalnetzmodell kann in MIKE+ anhand von verschiedenen hydrologischen Konzepten durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden für die Berechnung des effektiven Niederschlages die Konzepte Time-Area (Model A), Kinematic Wave (Model B) und French Linear Reservoir (Model C) berücksichtigt. Es ist hervorzuheben, dass die zuvor vorgestellten Abflussbildungsmodelle nach den hinterlegten Abflusstransportprozessen benannt wurden. Nach der Bestimmung des effektiven Niederschlages durch die Verwendung der

Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+

Modelle A, B oder C erfolgt die Berechnung des Durchflusses anhand der jeweilig hinterlegten Routing-Methode.

5.1.1 Time-Area-Modell (Modell A)

Die Abflussberechnung anhand des Time-Area-Modells erfolgt unter Berücksichtigung von Anfangsverlusten- und Dauerverlusten und der Größe des Einzugsgebietes, weshalb es als einfaches Abflussmodell mit geringen Datenaufwand angesehen werden kann (DHI Group, 2021a).

Die Berechnung des effektiven Niederschlags erfolgt anhand von Gleichung (6).

$$I_{eff}(t) = \begin{cases} I(t) - I_w(t) & \text{für } I(t) \geq I_w(t) \\ 0 & \text{für } I(t) < I_w(t) \end{cases} \quad (6)$$

mit:

$I_{eff}(t)$ - Effektivniederschlag zum Zeitpunkt t

$I(t)$ - tatsächlicher Niederschlag zum Zeitpunkt t

$I_w(t)$ - Benetzungsverlust zum Zeitpunkt t

Die Form der Abflussganglinie ist abhängig von der Konzentrationszeit und der berücksichtigten Zeit-Flächen-Kurve. In MIKE + sind dafür drei Zeit-Flächen-Kurven voreingestellt, welche sich aus der Form des Einzugsgebietes ableiten (DHI Group, 2021a). Die drei Kurven für ein rechteckiges Einzugsgebiet (rectangular), ein divergierendes „auseinanderstrebendes“ Einzugsgebiet (divergent) und ein konvergentes „sich annäherndes“ (convergent) Einzugsgebiet können der Abbildung 7 entnommen werden.

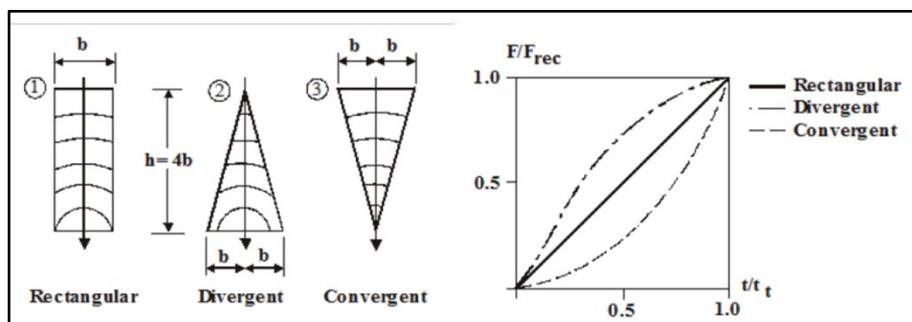


Abbildung 7: Voreingestellte Zeit-Flächen-Kurven in MIKE+ (Quelle: DHI Group 2021)

5.1.2 Kinematic-Wave-Modell (Modell B)

Die Abflussberechnung in Modell B erfolgt anhand der Ableitung des Abflusstransportprozesses der kinematischen Wellenberechnung nach Manning-Strickler. Der Abfluss wird dabei als Strömung in einem offenen Kanal mit Freispiegellage angenommen, wodurch die Betrachtung von Druckkräften unberücksichtigt bleibt. Für die Berechnung des abflusswirksamen Niederschlags werden neben den hydrologischen Verlusten (Anfangsverluste und Dauerverluste) die Einzugsgebietsgrößen berücksichtigt. Die Eingangsparameter für die kinematische Wellenberechnung sind die Lage, die Neigung sowie die Rauheit des Einzugsgebietes. Die Form der Abflussganglinie wird ebenfalls durch die eingestellten Parameter bestimmt (DHI Group, 2021a).

Das gesamte Einzugsgebiet wird bei Verwendung des Modelles B in Teilflächen aufgeteilt, welche entweder als durchlässig oder undurchlässig betrachtet werden. Die undurchlässigen Flächen werden dann nochmal in steile und flache Flächen unterteilt und die durchlässigen Flächen in kleine, mittlere oder große Flächen (DHI Group, 2021a).

Für die Berechnung des Abflusses, werden die einzelne Teileinzugsgebieten den in Tabelle 3 dargestellten Oberflächentypen zugeordnet, da nicht bei allen Oberflächentypen dieselben Verluste angesetzt werden. Tabelle 3 gibt zudem Auskunft darüber welche Verluste für die Berechnung bei den verschiedenen Oberflächentypen berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Unterteilung der bei MIKE+ im hydrologischen Modell B "Kinematic Wave" berücksichtigten Oberflächentypen (Quelle: eigene Darstellung)

Durchlässigkeit	Oberflächentyp	
Undurchlässig (Impervious)	Steil (step)	Verdunstung, Benetzung
	Flach (flat)	Verdunstung, Benetzung, Mulden
Durchlässig (Pervious)	Kleins (small)	Verdunstung, Benetzung, Mulden, Infiltration
	Mittel (medium)	
	Groß (large)	

Für jeden Oberflächentyp ist in MIKE+ ein eigener Parametersatz hinterlegt, unter dessen Berücksichtigung die Berechnung des Abflusses für jedes Teileinzugsgebiet zunächst separat erfolgt. Der Gesamtwert des abflusswirksamen Niederschlags wird dann über die Aufsummierung der Ergebnisse aus den Teileinzugsgebieten gebildet (DHI Group, 2021a). Die in MIKE* festgelegten Standardparameter für das Modell B können der Abbildung 8 entnommen werden.

Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+

Parameter	Steil	Undurchlässig Flach	Niedrig	Durchlässig Mittel	Höhe
Anfangsverlust					
Benetzung	0,05 [mm]				
Lager		0,6 [mm]	1 [mm]	1 [mm]	2 [mm]
Hortons Infiltrationskapazität					
Maximal			3,6 [mm/h]	36 [mm/h]	72 [mm/h]
Minimum			1,8 [mm/h]	3,6 [mm/h]	18 [mm/h]
Horton-Exponent					
Nasser Zustand			0,0015 [1/s]	0,0015 [1/s]	0,0015 [1/s]
Trockener Zustand			5E-06 [1/s]	1E-05 [1/s]	5E-05 [1/s]
Manning	80 [m ^{-(1/3)/s}]	70 [m ^{-(1/3)/s}]	30 [m ^{-(1/3)/s}]	30 [m ^{-(1/3)/s}]	12 [m ^{-(1/3)/s}]

Abbildung 8: Standardparametersätze für das hydrologische Modell B "Kinematic Wave" in MIKE+ (Quelle: DHI Group 2021)

Der effektive Niederschlag wird anhand folgender Formel für das Modell B „Kinematic Wave“ berechnet:

$$I_{eff}(t) = I(t) - I_E(t) - I_W(t) - I_I(t) - I_S(t) \quad , \quad I_{eff} \geq 0 \quad (7)$$

mit:

- $I_{eff}(t)$ - Effektivniederschlag zum Zeitpunkt t
- $I(t)$ - tatsächlicher Niederschlag zum Zeitpunkt t
- $I_E(t)$ - Verdunstungsverlust zum Zeitpunkt t (wird nur berücksichtigt, wenn eine Verdunstungs-Zeitreihe hinterlegt wurde)
- $I_W(t)$ - Benetzungsverlust zum Zeitpunkt t
- $I_I(t)$ - Infiltrationsverlust zum Zeitpunkt t
- $I_S(t)$ - Muldenverlust zum Zeitpunkt t

5.1.3 Linear-Reservoir-Modell (Modell C)

Das Modell C „Linear Reservoir“ zu Deutsch „Linearer Speicher“ basiert auf den Gleichungen des gleichnamigen Abflusstransportprozesses. Der Oberflächenabfluss wird dabei als proportional zur momentanen Wassertiefe angesehen. Das Modell C wird in MIKE+ in die globale Variante (Modell C1) und die französische Variante (C2) unterteilt, welche sich durch in den für die Simulation notwendigen Eingangsdaten unterscheiden. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird nur die französische Implementierung betrachtet. Für den Prozess der Abflussbildung werden im Modell C2 die Anfangsverluste, die Größe des Einzugsgebietes und die Infiltration berücksichtigt. Die Form der Abflussganglinie wird durch eine Zeit-Konstante gesteuert

Modellierung und Kalibrierung anhand von MIKE+

(DHI Group, 2021a). In Tabelle 4 sind die für das Modell C2 berücksichtigten Standardparameter von MIKE+ in Abhängigkeit von verschiedenen Oberflächentypen dargestellt.

Tabelle 4: In MIKE+ voreingestellte Standardparameter für das hydrologische Abflussmodell C2 "Linear Reservoir"
(Quelle: eigene Darstellung)

Oberflächentyp	Abflussart	Zeit-Konstante [1/min]	Anfangsverluste [mm]	Infiltrationskapazität [mm/h]		Zeit Koeffizient [1/h]	
				max.	min.	max.	min.
Voll durchlässiger Boden	Steil	0,50	0,00	-	-	-	-
	flach	0,20	0,50	-	-	-	-
	erweitert flach	0,10	1,00	-	-	-	-
Teilweise durchlässiger Boden	steil	0,50	0,00	2,00	0,50	3,00	0,10
	flach	0,20	0,50	2,00	0,50	3,00	0,10
	erweitert flach	0,10	0,20	2,00	0,50	3,00	0,10
Dach	steil	0,50	0,00	-	-	-	-
	flach	0,20	2,00	-	-	-	-
	erweitert flach	0,10	4,00	-	-	-	-
Durchlässiger Boden	steil	0,50	2,00	1,00	1,00	3,00	0,10
	flach	0,20	4,00	1,00	1,00	3,00	0,10
	erweitert flach	0,10	6,00	1,00	1,00	3,00	0,10

Der effektive Niederschlag für das Modell C2 „Linear Reservoir“ wird anhand der Gleichung (8) berechnet. Die anschließende Berechnung des Abflusstransportes erfolgt durch die Lösung von linearen Speichergleichungen.

$$I_{eff}(t) = I(t) - I_E(t) - I_I(t) - I_S(t) \quad (8)$$

mit:

$I_{eff}(t)$ - Effektivniederschlag zum Zeitpunkt t

$I(t)$ - tatsächlicher Niederschlag zum Zeitpunkt t

$I_E(t)$ - Verdunstungsverlust zum Zeitpunkt t (wird nur berücksichtigt, wenn eine Verdunstungs-Zeitreihe hinterlegt wurde)

$I_S(t)$ - Anfangsverlust (Benetzungs- und Muldenverlust) zum Zeitpunkt t

$I_I(t)$ - kumulierte Tiefe zum Zeitpunkt t

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

5.2 2D-Oberflächenmodell

Die Berechnung des Oberflächenabflusses in MIKE+ erfolgt anhand der rasterbezogenen Auflösung von Flachwassergleichungen, welche die zweidimensionale Strömungen „einer inkompressiblen Flüssigkeiten mit freier Oberfläche“ (DWA-M 165-1) beschreiben. Diese zweidimensionalen Flachwassergleichungen erhält man durch die Integration über die Tiefe von 3D Navier-Stokes Gleichungen. Dabei wird angenommen, dass die horizontale Ausdehnung des Fluids um ein Vielfaches größer ausfällt als die Tiefe, welche somit als vernachlässigbar angesehen werden kann. Die Flachwassergleichungen setzen sich aus zwei Komponenten zusammen, der Massenerhaltung (9) und der Impulserhaltung (10) welche folgend dargestellt sind (Fuchs 2021).

$$\frac{\partial h}{\partial t} * \nabla * (\bar{v} * h) = f_s \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} * \nabla \bar{v} + g * \nabla h + g * \nabla z - a_f \quad (10)$$

mit:

- t - Zeit [s]
- h - Wasserstand [m]
- \bar{v} - 2-dimensionaler Geschwindigkeitsvektor mit den horizontalen Komponenten in Richtung von x und y [m/s]
- f_s - Term beschreibt die Differenz von zufließendem Wasser (z.B. durch Niederschlag und abfließendem Wasser (z.B. durch Verdunstung) [m³/s]
- z - Geländehöhe [m]
- a_f - 2-dimensionale Verzögerung auf Grund von Reibung [m]
- ∇ - Nabla-Operator

6 Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

In den vorherigen Kapiteln wurde bereits der Aufbau eines N-A-Modells sowie die Durchführung einer Modellkalibrierung anhand der Software MIKE+ erläutert. In den folgenden Abschnitten wird die Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Überflutungsmodells am Beispiel des im Forschungsprojekt KIWASUS verwendeten Untersuchungsgebiet erläutert. Dafür werden

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

zunächst die zur Verfügung gestellte Datengrundlage vorgestellt, bevor im Anschluss die Durchführung der Kalibrierung und die Auswertungsergebnisse präsentiert werden.

6.1 Modellgrundlage

In Abbildung 9 ist das Untersuchungsgebiet des KIWASuS Forschungsprojekts dargestellt, welches im Süden der Nordrhein-Westfälischen Stadt Gelsenkirchen liegt.



Abbildung 9: Untersuchungsgebiet des KIWASuS Untersuchungsgebietes (Quelle: eigene Darstellung)

Bei den in Magenta eingefärbten Elementen handelt es sich um die Haltungen des Kanalisationssystems mit den zugehörigen Schächten. Das eigentliche Untersuchungsgebiet des Forschungsprojekts liegt innerhalb des rot umrandeten Bereichs. Das in abgestuften Grautönen gefärbte Rechteck bildet das zur Verfügung gestellte DGM, welches eine Auflösung von 4x4m hat, ab. Im DGM wurden Gebäude zur deutlicheren Abgrenzung zu den weiteren topografischen Daten überhöht mit einer Höhe von 70 m dargestellt.

Der Teil des Kanalisationssystems, welcher außerhalb des Untersuchungsgebiets liegt, wird als „Speckmantel“ bezeichnet. In der Abbildung 3 sind zudem die beiden Durchflusssmessstationen des Untersuchungsgebietes zu erkennen. Bei der südlich liegenden Messstelle handelt es sich um Messstelle 1 und bei der nördlich liegenden Station um Messstelle 3. Zudem ist wesentlich außerhalb des Untersuchungsgebietes die Niederschlagsmessstelle abgebildet, dessen Werte als Referenz für Kalibrierung verwendet werden. Für die Ausfertigung dieser Arbeit wurde ein

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

unkalibriertes Modell, bestehend aus voreingestellten Kanalnetzdaten-, Flächendaten-, Oberflächendaten- und Trockenwetterdatenmodellen, zur Verfügung gestellt. In Abbildung 10 sind die befestigten Flächen des Untersuchungsgebietes farblich unterteilt nach der Nutzungsart dargestellt.

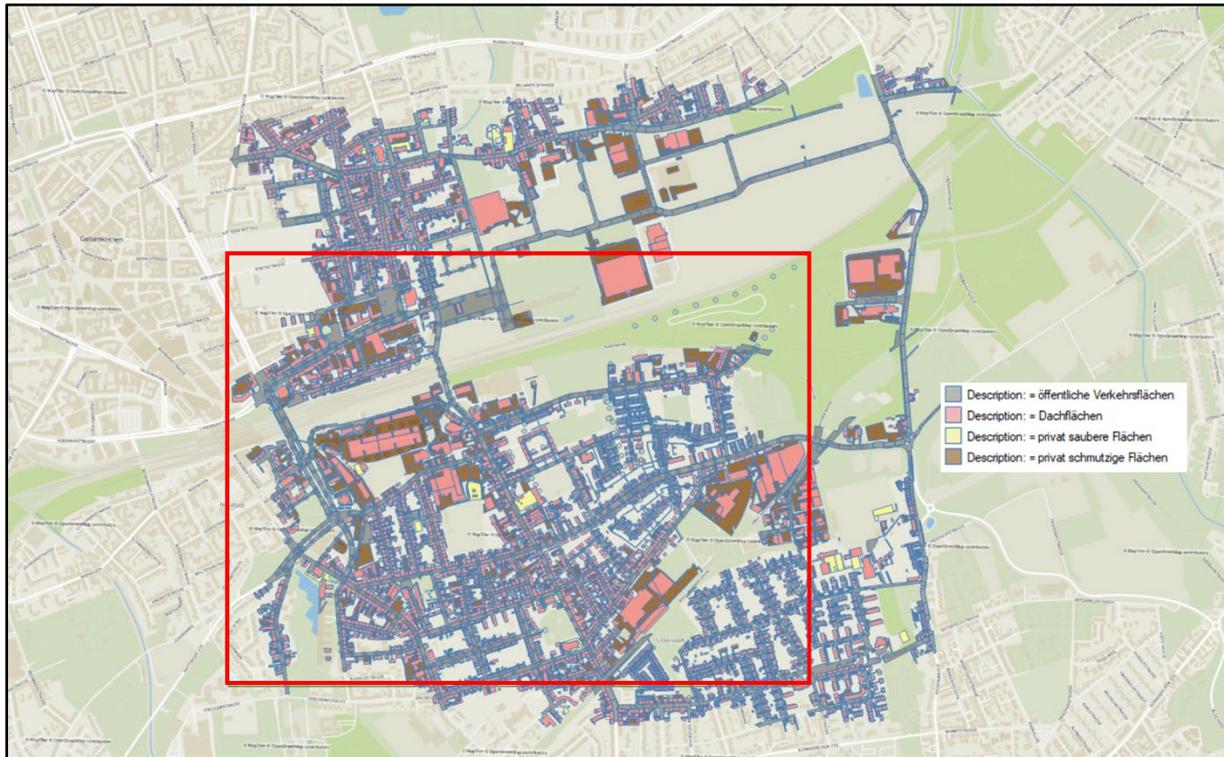


Abbildung 10: Flächenarten des Untersuchungsgebietes des KIWASuS Forschungsprojekts (Quelle: eigene Darstellung)

Die befestigten Flächen (ca. 2,1 km²) wurden dabei in vier Kategorien unterteilt:

- Dachflächen (0,81 km²)
- Privat saubere Fläche (0,13 km²)
- Privat schmutzige Flächen (0,49 km²)
- Öffentliche Verkehrsflächen (0,69 km²)

Es befinden sich 65 % der Flächen im Untersuchungsgebiet und die restlichen 35 % im Speckmantel. Eine detaillierte Aufteilung der befestigten Flächenanzahl des KIWASU Untersuchungsgebietes können aus Tabelle 5 entnommen werden.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 5: Größenbasierte Flächenaufteilung im KIWASUS Untersuchungsgebiet (Quelle: eigene Darstellung)

	Untersuchungsgebiet		Speckmantel		Gesamt	
	Absolut [km ²]	Prozentual [%]	Absolut [km ²]	Prozentual [%]	Absolut [km ²]	Prozentual [%]
Dachflächen	0,55	26%	0,25	12%	0,81	38%
Privat sauber Flächen	0,08	4%	0,05	2%	0,13	6%
Privat schmutzige Flächen	0,33	16%	0,15	7%	0,49	23%
Öffentliche Verkehrsflächen	0,41	19%	0,29	14%	0,69	33%
Summe absolut [km ²]	1,37	-	0,74	-	2,11	-
Prozentual	-	65%	-	35%	-	100%

Alle weiteren Flächen im Untersuchungsgebiet, zu denen auch die unbefestigten Flächen zählen, wurden bei der Simulation innerhalb MIKE+ im 2D-Oberflächenmodell berücksichtigt. Zusätzlich wurden natürliche Niederschlagsdaten zur Verfügung gestellt, welche an zwei Messstationen in 5-Minuten Intervallen im Untersuchungsgebiet gemessen wurden. Im Vorfeld wurden durch die Projektbeteiligten vier repräsentative Events ausgewählt, welche im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt wurden.

Berücksichtigte wurden die in Tabelle 6 dargestellten Events:

Tabelle 6: Übersicht der für die Kalibrierung berücksichtigten Niederschlagsereignisse (Quelle eigene Darstellung)

	Beobachtungszeitraum			Niederschlagsmenge [m ³]	
	Start	Ende	Dauer	Messstelle 1	Messstelle 3
event 13	13.07.21 23:35 Uhr	14.07.21 22:05 Uhr	22 h 30 min	2063	3774
event 16	27.07.21 12:35 Uhr	27.07.21 19:30 Uhr	6 h 55 min	732	1679
event 20	01.08.21 19:40 Uhr	01.08.21 23:10 Uhr	3 h 30 min	187	227
event 37	22.08.21 18:35 Uhr	22.08.21 20:05 Uhr	1 h 30 min	132	305

6.2 Erstellung von Modellvarianten und Bestimmung der Modellgüte

Ein ausschlaggebender Aspekt für die realitätsgetreue Abbildung des Bestandsnetzes eines Untersuchungsgebietes ist die Modellierung der Anschlusssituationen von Flächen an das Kanalnetz. Es ist zu beachten, dass die Flächen, welche im Bestand über das Kanalnetz entwässern im Modell korrekt an das Entwässerungssystem angeschlossen sind. Andernfalls erfolgt die Berechnung über das Modell der gekoppelten Simulation, welches für diesen Bereich nicht vorgesehen wird. Die Simulation wird fehlerhaft.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung dieser Arbeit liegen keine Angaben über die Entwässerungspfade der einzelnen Flächen vor. Daher wurde die Berechnung aller in Tabelle 5 aufgelisteten befestigten Flächen vorerst über das Kanalnetz vorgesehen. Um die tatsächliche Bestandsanschlussituation realitätsgetreuer im Modell nachbilden zu können, wurden Modellvarianten erstellt. Innerhalb der Modellvarianten wurden verschiedene Kombinationen der Flächenzuordnungen an das 1D-Kanalnetzmodell und an das 2D-Oberflächenmodell vorgenommen. Im Anschluss wurde die Simulation bidirektional gekoppelt anhand des 1D-2D-Berechnungsmodells durchgeführt. Zudem erfolgte die Simulation für die in Abschnitt 6.1 erläuterten Niederschlagsereignisse. Es wurde das hydrologische Modell „Linear Reservoir C2“ verwendet mit den in Abbildung 8 standardmäßig angewandten Parametern.

Die Bewertung der Varianten, hinsichtlich Ihrer Modellgüte, erfolgte anschließend anhand der im Abschnitt 4.3 beschriebenen Abweichmaße.

Es wurden folgende sechs Modellvarianten erstellt:

- Modell 1:

Alle **Dachflächen, privat sauberen, privat schmutzigen und öffentlichen Verkehrsflächen** (100% der befestigten Flächen).

- Modell 2:

Nur **Dachflächen** (61 % der befestigten Flächen) werden über das Kanalnetz berücksichtigt, die Berechnung der restlichen Flächen erfolgt über das 2D-Oberflächenmodell.

- Modell 3:

Die **Dachflächen, privat schmutzige Flächen und öffentliche Verkehrsflächen** (96 % der befestigten Flächen) werden an das Kanalnetz angeschlossen. Die Berechnung der privat sauberen Flächen erfolgt über das 2D-Oberflächenmodell

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

- Modell 4:

Die **Dachflächen, privat sauber und privat schmutzige Flächen** (81% der befestigten Flächen) werden über das Kanalnetz berechnet. Die öffentlichen Verkehrsflächen werden über das 2D-Oberflächenmodell berücksichtigt

- Modell 5:

Die **Dachflächen und öffentlichen Verkehrsflächen** (80 % der befestigten Flächen) werden über das 1D-Kanalnetz berücksichtigt. Die Berechnung der privat sauberen und privat schmutzigen Flächen erfolgt anhand des 2D-Oberflächenmodells

- Modell 6:

Die **Dachflächen und privat schmutzige Flächen** (77 % der befestigten Flächen) werden an das Kanalnetz angeschlossen. Die privat sauberen Flächen und öffentlichen Verkehrsflächen werden über das 2D-Oberflächenmodell berücksichtigt

Die Unterscheidung zwischen dem Anschluss an das Kanalnetz oder die Berechnung über das Oberflächenmodell erfolgt ausschließlich im Untersuchungsgebiet. Die Flächen, die im Speckmantel liegen, wurden ebenfalls bei der Simulation berücksichtigt, da sonst Flächen entfallen würden, welche zum Abflussvolumen an den Messstellen im Untersuchungsgebiet beitragen. Jedoch wurden alle Flächen im Speckmantel über das 1D-Kanalnetzmodell beachtet, da keine DGM vorliegt und folglich keine 2D-Oberflächenberechnung stattfinden konnte.

Im Folgenden wird auf die Auswertungen der Modelle 1,2 und 5 eingegangen. Dafür werden neben der Beurteilung der Abweichungsmaße auch die optische Betrachtung der Durchflussganglinien ausgewählter Ereignisse, für die Einstufung der Modellgüten hinzugezogen. Im Anschluss erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den einzelnen Modellvarianten, sowie ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den Messstellen 1 und 3.

Die Auswertungstabellen der Abweichungsmaße sowie die zugehörigen Abflussganglinien aller Modelle, unterteilt in die beiden Messstellen 1 und 3 und in Abhängigkeit der einzelnen Niederschlagsereignisse, können der Anlage A entnommen werden.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Die Abkürzungen in den grafisch dargestellten Durchflussganglinien werden folgende Bedeutungen zugeordnet:

Q M1	-	gemessener Durchfluss an Messstelle 1 [l/s]
Q M3	-	gemessener Durchfluss an Messstelle 3 [l/s]
Q Sim1	-	durch die Simulation berechneter Durchfluss an Messstelle 1 [l/s]
Q Sim 2	-	durch die Simulation berechneter Durchfluss an Messstelle 3 [l/s]

Modell 1 – Alle Flächen sind an das Kanalnetz angeschlossen

Im Modell 1 wurden alle befestigten Flächen über das Kanalnetzmodell berechnet. Aus den Tabellen 7 und 8 können die zugehörigen Abweichmaße VE, DYMAX und NSE entnommen werden. Für Messstelle 1 befinden sich der Volumenfehler, ausgenommen für das Event 37, in einem ausreichend guten Bereich. Auch bei der gemeinsamen Betrachtung der vier gewählten Events ist eine Abweichung von + 4 % der Simulation gegenüber der Messung zu verzeichnen, was ebenfalls in einem nach DWA-M 165-1 guten Bereich liegt.

Bei der Betrachtung des Peaks für Messstelle 1 fällt auf, dass diese für die Events 13 und 38 durch die Simulation überschätzt und für die Events 16 und 20 gut abgebildet werden. Die starke Abweichung des Peaks bei Event 13 lässt sich auch in der Abbildung 11 erkennen. Bei der gemeinsamen Betrachtung aller Events, liegt die Abweichung des Peaks mit +19,6 % in einem mittleren Bereich.

Die Abbildungen 12 - 15 zeigen die Durchflussganglinien der Events 13, 16 und 37 an Messstelle 1. Dabei ist zu erkennen, dass vor allem bei Event 37 die simulierte Ganglinie stark von der gemessenen abweicht, da die Simulation des Peaks zeitlich der dem gemessenen Peak liegt. Dies lässt darauf schließen, dass der tatsächliche Abfluss bei Event 13 langsamer stattfindet als es in der Simulation der Fall ist. Auch der NSE von -1,61 liegt in einem unbefriedigenden Bereich und bekräftigt somit diese Aussage. Bei den Events 13 und 16 hingegen liegt der NSE in einem mittelmäßigen Bereich. Ebenso ist in den Abbildungen zu erkennen, dass sich die Ganglinien der Messungen und Simulation besser anpassen als bei Event 37.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 7: Auswertung der Modellvariante 1 für Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2172,73	2063,26	109,47	5,31	269,56	172,33	97,23	56,42	0,52
event 16	670,75	731,60	-60,85	-8,32	448,60	440,41	8,19	1,86	0,58
event 20	203,46	186,89	16,57	8,87	126,45	114,03	12,42	10,89	0,15
event 37	193,27	132,54	60,73	45,82	151,86	109,46	42,40	38,74	-1,61
Sum	3240,22	3114,29	125,92	4,04	996,47	836,23	160,24	19,16	-0,09

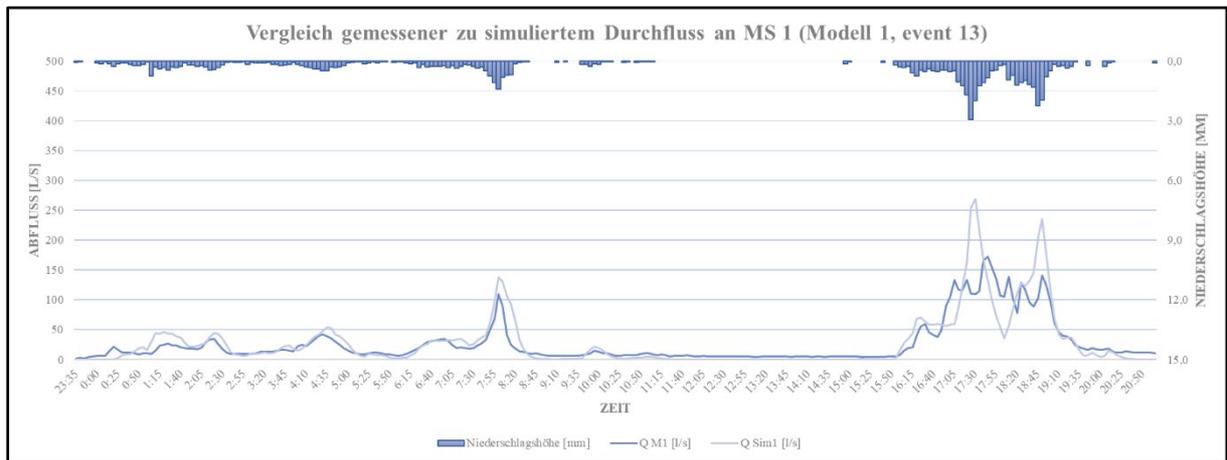


Abbildung 11: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 1 und Event 13 (Quelle: Eigene Darstellung)

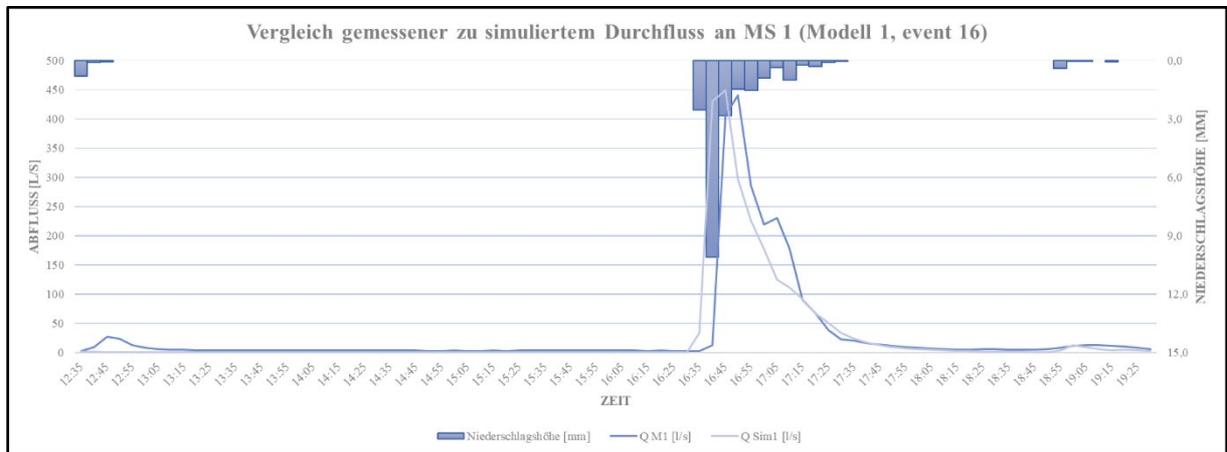


Abbildung 12: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 1 und Event 16 (Quelle: Eigene Darstellung)

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

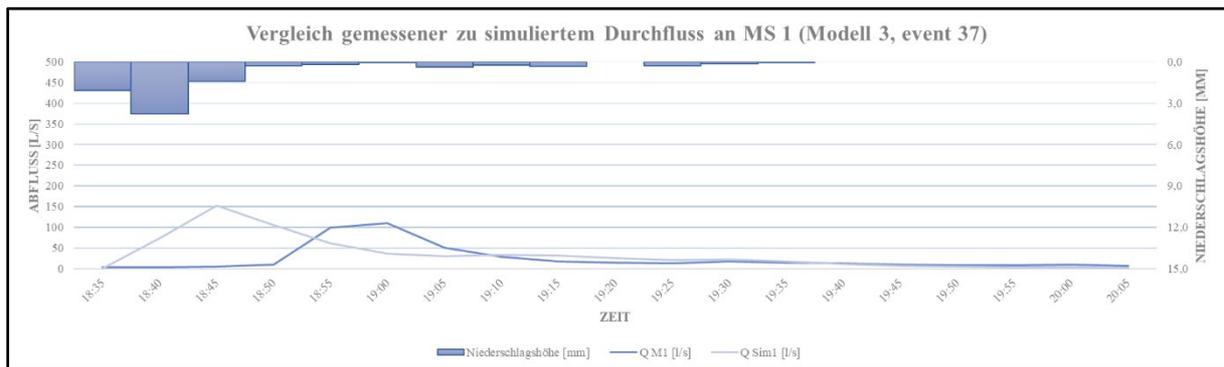


Abbildung 13: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 1 und Event 37 (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei Messstelle 3 sind bei allen Events starke Überschätzungen des Volumens und der Peaks durch die Simulation aufgetreten. Vor allem fällt dabei das Event 20 auf, da dort die Überschätzung des Volumens mit 185,5 % und des Peaks mit 484,3 % weit über den Werten der anderen Events liegt. Daraus resultiert auch, dass der NSE für alle Ereignisse Abweichungen von -0,68 bis -21,18 zeigen und somit eine nicht zufriedenstellende Darstellung der gemessenen Werte durch die Simulation gewährleistet wird. Ebenfalls bekräftigen die in den Abbildungen 16-18 dargestellten Gegenüberstellungen der Durchflussganglinien diese Ergebnisse. Der in Abbildung 17 rot eingekreiste Bereich und der vorherige starke Abfall der des simulierten Durchflusses für das Event 20 deutet auf einen in der Simulation aufgetretenen Rückstau hin. Zum gleichen Zeitpunkt kam es bei der Messung jedoch zu einem Höchststand des Durchflusses. Dieser Rückstau kann mit dem hoch anfallenden Volumen und der damit eintretenden Überlastung des Kanals hervorgerufen werden.

Durch die ermittelten Abweichungsmaße und die grafische Betrachtung der Ganglinien wird die Modellgüte des Modell 1 für die nördlich gelegene Messstelle 1 als unbefriedigend eingestuft.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 8: Auswertung der Modellvariante 1 für Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	7068,24	3773,74	3294,50	87,30	907,75	343,66	564,09	164,14	-0,68
event 16	2447,32	1679,32	768,01	45,73	1748,64	1006,38	742,26	73,76	-0,53
event 20	648,59	227,15	421,43	185,53	389,35	66,64	322,71	484,26	-21,18
event 37	584,20	305,35	278,85	91,32	479,81	313,66	166,15	52,97	-1,84
Sum	10748,35	5985,56	4762,79	79,57	3525,55	1730,34	1795,21	103,75	-6,05

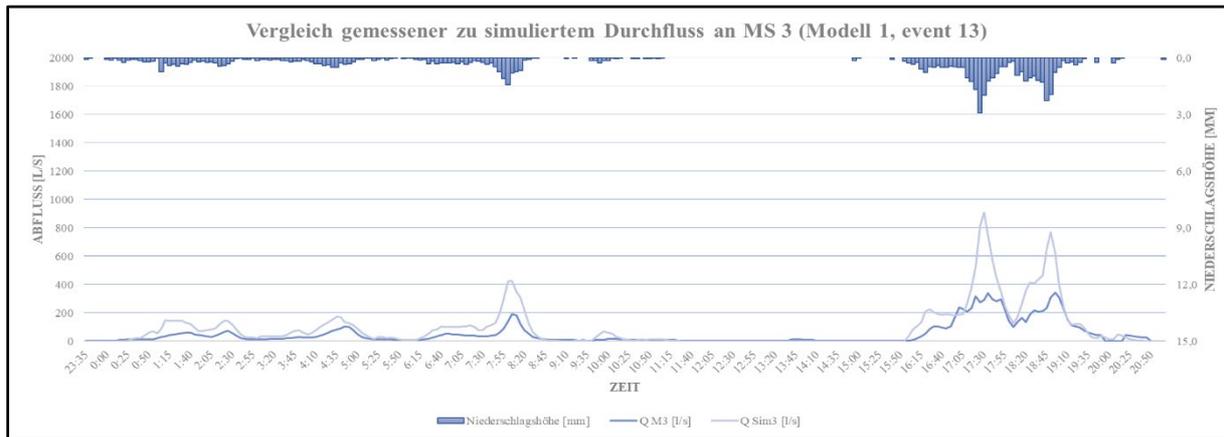


Abbildung 14: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 3 und Event 13 (Quelle: Eigene Darstellung)

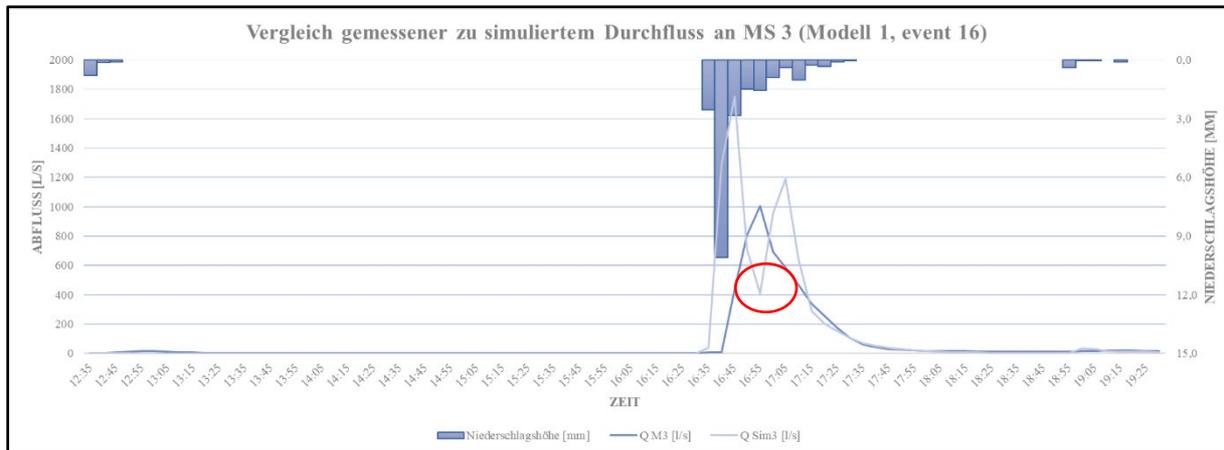


Abbildung 15: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 3 und Event 16 (Quelle: Eigene Darstellung)

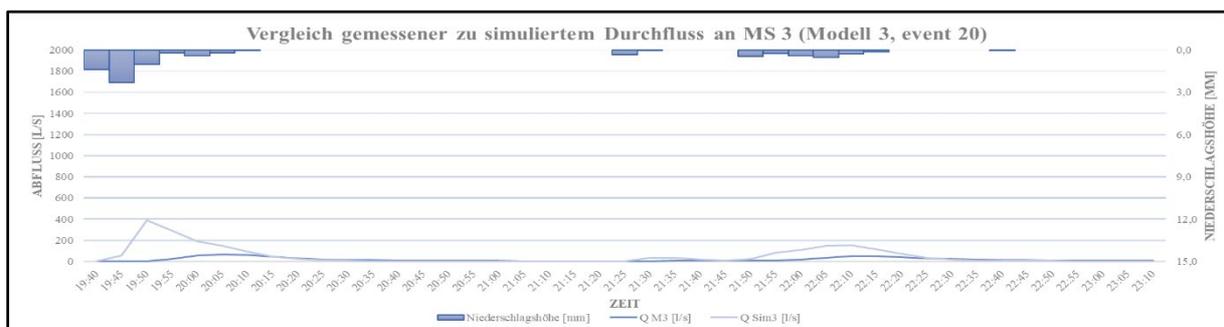


Abbildung 16: Vergleich der Abflussganglinien für Modellvariante 1 an Messstelle 3 und Event 20 (Quelle: Eigene Darstellung)

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Modell 2

Bei der Modellvariante 2 wurden neben aller sich im Speckmantel befindlichen Flächen nur die Dachflächen im Untersuchungsgebiet an das Kanalsystem angeschlossen und alle anderen Flächen wurden bei der Simulation über das 2D-Oberflächenmodell berücksichtigt. Der Anteil an befestigter Fläche, welche bei diesem Modell über das 1D-Kanalnetzmodell berücksichtigt wurde, macht 61 % der gesamten befestigten Fläche aus. Alle Auswertungstabellen und Durchflussganglinien können Anhang A entnommen werden.

Durch den geringen Anteil an angeschlossener Fläche lassen sich sowohl für Messstelle 1 als auch für Messstelle 3 Unterschätzungen des Volumens durch die Simulation verzeichnen. In Tabelle 9, welche die Auswertungen der Abweichungsmaße für die Messstelle 1 enthält, ist zu erkennen, dass Unterschätzungen des Volumens bei den Events 13,16 und 20 eine Abweichung von etwa - 40 % aufgetreten sind. Die Abbildung des Volumens durch die Modellvariante 1 ist somit nicht zufriedenstellend.

Die Abweichung des Peaks liegt für Messstelle 1 und die Events 13 und 37 in einem guten Bereich, für das Event 16 mit - 26,69 % in einem gerade noch akzeptablen Bereich und für Event 20 mit über - 40 % in einem unbefriedigenden Bereich. Die Unterschätzung des Spitzenabflusses lässt sich ebenfalls in den Durchflussganglinien (Anhang A) der Events 13 und 16 erkennen.

Durch die hohen Abweichungsmaße des Volumens und die teilweise nicht zufriedenstellenden Abbildungen der Spitzenwerte ist die Modellgüte des Modells 2 an Messstelle 1 insgesamt als eher ungenügend einzustufen.

Der NSE liegt bei Messstelle 1 für die Events 13 und 16 in einem mittleren und für die Events 20 und 37 in einem unbefriedigenden Bereich. Dies kann auch durch die grafische Betrachtung der Durchflussganglinien vernommen werden. Dabei lässt sich erkennen, dass die simulierte Ganglinie für das Event 13 eine wesentlich bessere Anpassung an die gemessene Ganglinie vermuten lässt als es bei Event 20 der Fall ist. Vor allem fällt durch die Betrachtung der Maxima des Event 20 auch die zeitliche Verschiebung der beiden Ganglinien auf, was auch durch den geringen NSE von 0,34 widerspiegelt wird.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 9: Auswertung der Modellvariante 2 für Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1179,40	2063,26	-883,86	-42,84	147,15	172,33	-25,18	-14,61	0,61
event 16	411,44	731,60	-320,16	-43,76	322,87	440,41	-117,55	-26,69	0,54
event 20	108,39	186,89	-78,50	-42,00	66,45	114,03	-47,58	-41,72	0,34
event 37	117,32	132,54	-15,22	-11,48	110,91	109,46	1,45	1,32	-0,87
Sum	1816,55	3114,29	-1297,74	-41,67	647,37	836,23	-188,86	-22,58	0,16

In der Tabelle 10 ist Auswertung der Simulation der Modellvariante 2 für die nördlich gelegene Messstelle 3 dargestellt.

Bei den ausgewerteten Abweichungsmaßen lässt sich erkennen, dass sich, im Gegensatz zur Messstelle 1, bei Messstelle 3 alle Volumenfehler mit 20 % bzw. weniger 20 % Abweichung in einem mittleren Bereich befinden, was zunächst auf eine akzeptable Modellgüte hinweisen lässt. Bei der Betrachtung des Peaks jedoch fällt sowohl bei der quantitativen Auswertung in Tabelle 10 als auch bei der optischen Betrachtung auf, dass der Spitzenwert mit einer Abweichung von über 120 % für das Event 20 nicht gut abgebildet wird. Auch für das Event 16 wird der Spitzenwert um 32 % bei Messstelle 3 überschätzt. Für das Event 13 liegt die Spitzenabweichung in einem mittleren Bereich.

Die Durchflussganglinie für das Event 13 lässt erkennen, dass die gemessene Abflussganglinie und die Simulation eine optisch gute Anpassung aufweisen, was ebenfalls durch einen NSE-Wert von 0,84 bestätigt wird. Für alle anderen Events weisen sowohl die NSE-Werte als auch die optische Betrachtung keine zufriedenstellende Anpassung der Abflussganglinien an Messstelle 3 auf.

Für das Event 13 an Messstelle 3 lässt sich aufgrund der Abweichungsmaße eine gute Modellgüte festlegen, da sowohl der Volumenfehler als auch die Spitzenwertabweichung und der NSE in einem mittleren bis guten Bereich liegen. Alle anderen Events werden durch die Modellvariante nicht gut abgebildet.

Tabelle 10: Auswertung der Modellvariante 2 für Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3011,55	3773,74	-762,19	-20,20	404,60	343,66	60,94	17,73	0,84
event 16	1404,92	1679,32	-274,40	-16,34	1334,12	1006,38	327,74	32,57	0,32
event 20	271,40	227,15	44,24	19,48	147,56	66,64	80,92	121,42	-1,78
event 37	302,97	305,35	-2,38	-0,78	266,97	313,66	-46,69	-14,89	-0,48
Sum	4990,84	5985,56	-994,72	-16,62	2153,25	1730,34	422,91	24,44	-0,28

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Modell 5

Bei der Modellvariante 5 erfolgte die Berechnung der Dachflächen und der öffentlichen Verkehrsflächen im Untersuchungsgebiet über das 1D-Kanalnetzmodell. Dies entspricht einem Anteil von 80 % der befestigten Flächen (Untersuchungsgebiet + Speckmantel), welche über das Kanalnetz berechnet werden. Die restlichen Flächen, wie die privat sauberen und schmutzigen Flächen oder Grünflächen, wurden über bei der Simulation über das 2D-Oberflächenmodell erfasst. Alle Auswertungstabellen und Durchflussganglinien können Anhang A entnommen werden.

In Tabelle 11 ist die quantitative Auswertung der Abweichmaße für das Modell 5 an den Messstellen 1 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Volumenfehler an Messstelle 1 nur für Event 37 im ungenügenden Bereich liegt und das Volumen für die anderen Events mittel bis gut durch die Simulation abgebildet wird, da die Abweichung bei unter 20 % liegt. Auch bei der gesamthaften Betrachtung des Volumens ist eine Abweichung von gerade mal 11 % zu verzeichnen.

Genau wie beim Volumen zeigt nur das Event 37 mit einer Abweichung von über 50 % des Spitzenabflusses die schlechteste Anpassung des simulierten Peaks an den gemessenen Maximalwert an. Für das Events 13, 16 und 20, liegen die Spitzenabweichungen in einem mittleren bis hin zum guten Spektrum. Die quantitativen Abweichungsmaße des Spitzenwertes lassen sich ebenfalls durch eine optische Begutachtung Abflussganglinien für die Events 13,16 und 37 an Messstelle 1 belegen.

Auch die NSE-Werte lassen sich durch die optische Betrachtung darlegen, da zu erkennen ist, dass beim Event 37 eine klare zeitliche Verzögerung der gemessenen und simulierten Ganglinie zu verzeichnen ist, wodurch auch der schlechte NSE-Wert von -2,36 zu erklären ist. Für die Events 13 und 16 liegen die NSE-Werte zwischen 0,4 und 0,7 und somit in einem mittleren Bereich. Durch die vorwiegend mittlere Bewertung der Abweichungsmaße der einzelnen Events sowie bei der gemeinsamen Betrachtung aller Events, wird auch die Modellgüte der Modellvariante 5 an Messstelle 1 als mittelmäßig klassifiziert.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 11: Auswertung der Modellvariante 5 für Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1768,08	2063,26	-295,18	-14,31	218,45	172,33	46,12	26,76	0,67
event 16	623,41	731,60	-108,19	-14,79	494,14	440,41	53,73	12,20	0,42
event 20	167,05	186,89	-19,84	-10,62	104,70	114,03	-9,33	-8,18	0,27
event 37	182,70	132,54	50,16	37,85	170,66	109,46	61,20	55,91	-2,36
Sum	2741,24	3114,29	-373,06	-11,98	987,94	836,23	151,71	18,14	-0,25

In der folgenden Tabelle sind die Auswertungsergebnisse der an Messstelle 3 durch das Modell 5 erzeugten Abweichungsmaße abgebildet.

Tabelle 12: Auswertung der Modellvariante 5 für Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4752,87	3773,74	979,13	25,95	618,90	343,66	275,24	80,09	0,63
event 16	2115,13	1679,32	435,81	25,95	1656,05	1006,38	649,67	64,56	-0,16
event 20	441,13	227,15	213,97	94,20	265,17	66,64	198,53	297,91	-8,19
event 37	487,54	305,35	182,19	59,67	447,44	313,66	133,78	42,65	-1,60
Sum	7796,67	5985,56	1811,11	30,26	2987,56	1730,34	1257,22	72,66	-2,33

Bei den ermittelten Abweichungsmaßen ist zu erkennen, dass das Volumen an Messstelle 3 durch die Simulation für alle Events, bei Event 13 und 16 nur leicht, überschätzt wird. Besonders auffällig ist die Abweichung des Events 20. Mit einem Volumenfehler von 94,20 % und einer Spitzenwertabweichung von fast 300 %, fallen die Abweichungsmaße des Events 20 im Vergleich zu den Ergebnissen der restlichen Ereignisse überproportional hoch aus.

Der Spitzenwertabfluss wird jedoch nicht nur bei Event 20 durch die Simulation überschätzt, sondern auch die simulierten Maximalwerte der Events 13,16 und 37 passen sich nicht gut an die gemessenen Werte an, was zudem auch in den Durchflussganglinien zu erkennen ist.

Bis auf den NSE des Events 13 liegen die NSE-Werte der anderen Events in unbefriedigenden Bereichen. Dies lässt sich ebenfalls durch die Betrachtung der Durchflussganglinien bestätigen, da zu erkennen ist, dass sich die Ganglinien bei Event besser anpassen, während bei den Events 16 und 20 kaum bis überhaupt keine Anpassung der gemessenen und simulierten Ganglinien zu erkennen ist.

Auf Grund der vorwiegend unbefriedigenden Klassifizierung der Abweichungsmaße und der nicht zufriedenstellenden optischen Angleichung, ist die Modellgüte der Modellvariante 5 für die Messstelle 3 als ungenügend einzustufen. Auch die gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse aller Events stützt diese Aussage.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

6.2.1 Auswertung der Modellvarianten und Gegenüberstellung

Bei den ausgewerteten Modellvarianten ist festzuhalten, dass bei kaum einem Modell insgesamt gute Abweichungsfehler für den Volumenfehler, die Spitzenwertabweichung, sowie den NSE vorliegen. Dies könnte zur Ursache haben, dass bei dem verwendeten hydrologischen Modell Linear Reservoir C2 zunächst die Standardwerte eingestellt worden waren. Dabei wurden beispielsweise noch keine spezifischen Parametereinstellungen bezogen auf die verschiedenen Flächennutzungsarten getroffen. Es ist klar zu erkennen, dass die Größe an angeschlossener Fläche Auswirkung auf das Abweichungsmaß des Volumenfehlers hat. Dies ist vor allem bei der Gegenüberstellung zwischen den Modellen 1 und 2 erkennen. Dadurch, dass bei Modell 1 alle Flächen an das Kanalnetz angeschlossen wurden entsteht bei der Simulation eine Überschätzung des Volumens. Im Gegensatz dazu unterschätzt die Simulation bei Modell 2 das gemessene Volumen um fast 50 % auf Grund der gerade mal 61 % an angeschlossener Fläche. Es kann jedoch nicht pauschal angenommen werden, dass das Volumen sich proportional zur angeschlossenen Fläche verhält, da das Volumen ebenfalls von den Nutzungsarten der angeschlossenen Flächen und deren Abflusswirksamkeit abhängt.

Zudem ist oftmals bei der geschlossenen Betrachtung der Modelle zu sehen, dass bei der Modellsimulation keine simultanen Abweichungen für alle Events erzielt werden konnten. Damit ist gemeint, dass die Simulationen für ein Event teilweise sehr gute Ergebnisse erzielt hatte, während bei anderen Events wesentlich größere Abweichungen aufgetreten sind. Dies ist vor allem bei den Events 20 und 37 aufgefallen. Ursache dabei können die kurzen Dauern und auch gering ausfallenden Niederschlagsmengen dieser Ereignisse sein. Bereits in den Durchflussganglinien der Events 20 und 37 lassen sich kaum Bewegungen erkennen. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die Hauptbelastungsgröße in diesen Zeiträumen durch den Trockenwetterabfluss definiert wurde, da nur geringe Niederschlagsmengen angefallen sind. Die Trockenwetterabflüsse wurden in MIKE+ jedoch nur anhand angenommener Werte hinterlegt, da keine Erkenntnisse über die Menge des tatsächlichen Trockenwetterabflusses im Untersuchungsgebiet vorlagen. Daher kann der Grund der teilweise großen Abweichungsmaße der Events 20 und 37 in der Über bzw. Unterschätzung der Trockenwetterabflüsse liegen. Zudem ist bei den zuvor genannten Events aufgefallen, dass auch die NSE-Werte am schlechtesten ausgefallen sind. Grund dafür ist die kurze Niederschlagsdauer. Abweichungen zwischen den Messwerten und der Simulation können bei langen Ereignissen auf Grund der großen Bandbreite an Messergebnissen besser kompensiert werden als bei kurzen Niederschlagsereignissen

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

mit nur wenigen Messwerten. Dabei verfälscht vor allem die zeitliche Verschiebung der gemessenen und simulierten Abflussganglinie die Ergebnisse der NSE-Werten.

Bei den Auswertungen fielen besonders die starken Abweichungen der Ergebnisse für die beiden Messstellen innerhalb einer Modellvariante auf. In Abbildung 17 ist beispielsweise die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Messstellen für die Modellvariante 1 dargestellt. Dabei kennzeichnen die grünen Felder eine gute Klassifizierung der jeweiligen Abweichungsmaße, die orange/gelben Felder eine mittlere bis grenzwertige Abweichung und die roten Felder die schlechten Abweichungsmaße. Bei dem Event 13 ist zu erkennen, dass die Volumenabweichung bei Messstelle 1 bei 5,31 % liegt und bei Messstelle 3 bei 87,30 % was einem Faktor von über 16 entspricht. Auch bei den Abweichungsmaßen DYMAX und NSE sind diese Unterschiede ersichtlich.

	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	5,31	87,30	16,45	56,42	164,14	2,91	0,52	-0,68	-1,30
event 16	-8,32	45,73	-5,50	1,86	73,76	39,64	0,58	-0,53	-0,91
event 20	8,87	185,53	20,93	10,89	484,26	44,47	0,15	-21,18	-139,39
event 37	45,82	91,32	1,99	38,74	52,97	1,37	-1,61	-1,84	1,14

Abbildung 17: Gegenüberstellung der Messergebnisse der Messstellen 1 und 3 für Modellvariante 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

Auch bei den anderen Modellvarianten sind diese Varianzen zwischen den Ergebnissen der Messstellen aufgetreten, was auf Fehlanpassungen im Modell hindeuten könnte. Die zugehörigen Gegenüberstellungen für alle Modellvarianten können Anhang A entnommen werden. Es konnte nicht davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen durch eine reine Parameterkalibrierung kompensiert werden können und somit ein repräsentatives N-A-Modell für das Untersuchungsgebiet zu erzielen, welches sowohl bei Messstelle 1 als auch bei Messstelle 3 gute Anpassungen aufweist. In einem nächsten Schritt wurden daher zunächst Anpassungen im Modell vorgenommen.

6.3 Anpassung der Modellstruktur

Da das Abflussvolumen bei Messstelle 3 verhältnismäßig größer ausfiel, wurde zunächst das angeschlossene Einzugsgebiet der Messstelle 3 untersucht, da die Überschätzung des Volumens durch zu viel an das Einzugsgebiet angeschlossene abflusswirksame Fläche erzeugt werden könnte.

Die Einzugsgebietsverknüpfungen werden bei MIKE + automatisch anhand des kürzesten Abstandes des Mittelpunktes einer Fläche zum nächstgelegenen Schacht erzeugt. Meistens stellt dies auch in der Realität die Regel dar, jedoch kann es dabei auch zu Abweichungen kommen. Bei Betrachtung der Anschlusssituation des Einzugsgebietes der Messstelle 3 ist besonders ein naheliegendes großes Industriegebiet aufgefallen. Obwohl diese Industriefläche über eigene Entwässerungssysteme verfügt, welche nicht in das Richtung des Einzugsgebietes ableiten, wurden diese Flächen an einen Schacht angeschlossen, der sich im Einzugsgebiet der Messstelle 3 befindet. Daher wurden zunächst die Anschlüsse des Industriegebietes korrigiert. Ein am Industriegebiet liegender Lebensmittelhandel hingegen war zu Beginn an die Entwässerungssysteme des Industriegebietes angeschlossen. Die dort angeschlossenen Flächen wurden an das öffentliche Kanalnetz angeschlossen. Bei einigen weiteren Gebäuden ist aufgefallen, dass die Gebäude und die zugehörigen privat sauberen und privat schmutzigen an unterschiedlichen Schächten angeschlossen waren, welche teilweise in verschiedene Richtungen entwässert haben. Auch diese Fehlanschlüsse wurden korrigiert, indem alle Flächen eines Grundstücks an einen Schacht angeschlossen wurden. Es wurden ebenfalls wenige Fehlanschlüsse im Einzugsgebiet der Messstelle 1 korrigiert.

Auf Grund der vorgenommenen Anpassungen im Einzugsgebiet der Messstelle 3 musste von starken Abweichungen der bisherigen Simulationsergebnisse der Messstelle 3 ausgegangen werden, weshalb eine erneute gekoppelte Simulation der Modellvarianten durchgeführt wurde. Es konnte zudem davon ausgegangen werden, dass die Anpassungen des Einzugsgebietes der Messstelle 3 keine Auswirkungen auf die Abflussvorgänge bei Messstelle 1 haben und auch die geringen Änderungen am Einzugsgebiet der Messstelle 1 selbst kaum Abweichungen in den bisherigen Ergebnissen für die Messstelle 1 bewirken.

Um den Rechenaufwand der Software zu minimieren wurde das Untersuchungsspektrum im Vorfeld eingegrenzt. Es wurden nur die Modelle berücksichtigt, welche nach der ersten Auswertung der Messstelle 1 die besten Modellgüten aufwiesen. Der Vorentscheid wurde dabei

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

anhand der vorliegenden Ergebnisse für die Messstelle 1 getroffen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die ermittelten Modellgüten an Messstelle 1 nach der erneuten Simulation stabil blieben. Zudem wurde die Annahme getroffen, dass die neuen Modellgüten für Messstelle 3 sich analog zu den vorliegenden aus Messstelle 1 verhalten werden.

Die Modelle 2 und 6 wiesen, trotz geringer Abweichungswerte des Maximalabflusses, im Gegensatz zu den restlichen Modellen die größten Volumenfehler bei der ersten Simulation an Messstelle 1 auf und wurden daher für die Kalibrierung nicht weiterverfolgt. Auf Grund dessen, dass bei Modell 4 keine Verkehrsflächen an das Kanalnetz angeschlossen waren, wurde die Plausibilität dieses Modell hinterfragt und anschließend ebenfalls verworfen. Zum anderen befand sich der Volumenfehler des Modells 4, trotz eines guten Abweichungsmaßes des Spitzenwertes, mit ca. -25 % in einem nicht zufriedenstellenden Bereich.

Für die erneute Simulation wurden nur die Modelle 1,3 und 5 weiter berücksichtigt, da die Modelle 1 und 3, trotz hoher Abweichung des Spitzenabflusses, für die Events 13,16 und 20 bisher die besten Anpassungen an das gemessene Abflussvolumen aufwiesen und sich für das Modell 5 sowohl der Volumenfehler als auch die Abweichung des Spitzenabflusses für die Events 13,16 und 20 in einem mittleren bis teils guten Abweichungsbereich befanden. Die Auswertungstabellen der eben beschriebenen Ergebnisse der jeweiligen Modelle können Anhang A entnommen werden.

Bei der erneuten Simulation erzielte die Modellvariante 5, bei welche die Dachflächen und öffentlichen Verkehrsflächen angeschlossen sind die beste Modellgüte, da sowohl der Volumenfehler als auch die Spitzenwertabweichung bei dieser Modellvariante am geringsten ausgefallen sind und auch der NSE den höchsten Wert und somit die beste Anpassung an die gemessene Durchflussganglinie aufwies. Daher wird im Folgenden nur auf die Analyse der durch die angepasste Modellvariante 5 erzielten Ergebnisse eingegangen. Die Auswertungen und Durchflussganglinien der angepassten Modellstruktur für die Modellvarianten 1, 3 und 5 können Anhang B entnommen werden.

Bei den Auswertungen und der Bestimmung der Modellgüte werden vorwiegend die Events 13 und 16 untersucht, da im vorherigen Abschnitt bereits festgestellt wurde, dass kaum Bewegung in der Durchflussganglinien der anderen beiden Events 20 und 37 zu verzeichnen sind. Zudem

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

ist davon auszugehen, dass das Durchflussvolumen dieser Events größtenteils durch den Trockenwetterabfluss entstanden ist, dadurch das in diesen Zeiträumen nur geringe Niederschlagsmengen angefallen sind.

Modell 5

In den Tabellen 13 und 14 sind die Auswertungstabellen der Simulation der überarbeiteten Modellvariante 5 abgebildet. Die zugehörigen Durchflussganglinien von Modell 5 können Anhang B entnommen werden.

Es ist zu erkennen, dass die leichten Anpassungen am Einzugsgebiet der Messstelle 1 zu einer Verbesserung des Volumenfehlers geführt haben und gleichzeitig zu einer Erhöhung des Spitzenwerts. Dies liegt daran, dass bei den Anpassungen mehr Flächen an die im Einzugsgebiet liegenden Haltungen angeschlossen wurden was zu einer Zunahme des Volumens führte. Bei den NSE-Werten sind an Messstelle 1 nur geringfügige Abweichungen entstanden. In Bezug auf die Events 13 und 16 liegt die überarbeitete Modellvariante 5 für den Volumenfehler in einem zufriedenstellenden Bereich und für den NSE und die Spitzenwertabweichung in einem mittleren Bereich.

Tabelle 13: Auswertung der überarbeiteten Modellvariante 5 für Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1819,82	2063,26	-243,44	-11,80	228,83	172,33	56,50	32,79	0,67
event 16	681,62	731,60	-49,99	-6,83	538,25	440,41	97,84	22,22	0,47
event 20	165,99	186,89	-20,91	-11,19	102,69	114,03	-11,34	-9,94	0,30
event 37	180,71	132,54	48,17	36,34	168,34	109,46	58,88	53,79	-2,22
Sum	2848,13	3114,29	-266,16	-8,55	1038,11	836,23	201,88	24,14	-0,20

Durch die Anpassungen im Einzugsgebiet der Messstelle 3 konnten messbare Verbesserungen der Abweichungsmaße erzielt werden. Der Volumenfehler für die Events 13 und 16 sowie bei der gemeinsamen Betrachtung aller Events liegt in einem guten bis mittleren Bereich. Obwohl die Spitzenwertabweichung durch die Überarbeitung bereits gesenkt werden konnte liegt sie für die Events 13 und 16 mit 57 % und 77 % weiterhin über der nach DWA-A 165-1 vorgeschlagener Maximalabweichung von 25 %. Der NSE für Event 13 liegt mit 0,79 in einem guten Bereich. Der NSE für Event 16 wurde durch die Überarbeitung verschlechtert. Bei Betrachtung der Abbildung 18 dargestellten Abflussganglinie des Events 16 ist zu erkennen, dass die Anpassung des Einzugsgebiets einen Rückstau im Kanal erzeugt hat. Dadurch, dass bei der Messung kein Rückstau aufgetreten ist, kann keine gute Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie erreicht werden, wodurch auch der NSE-Wert gering ausfällt.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 14: Auswertung der überarbeiteten Modellvariante 5 für Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3993,16	3773,74	219,42	5,81	539,64	343,66	195,98	57,03	0,79
event 16	2055,70	1679,32	376,38	22,41	1781,32	1006,38	774,94	77,00	-1,42
event 20	350,56	227,15	123,41	54,33	208,69	66,64	142,05	213,17	-4,68
event 37	397,55	305,35	92,20	30,20	380,63	313,66	66,97	21,35	-1,12
Sum	6796,97	5985,56	811,41	13,56	2910,28	1730,34	1179,94	68,19	-1,61

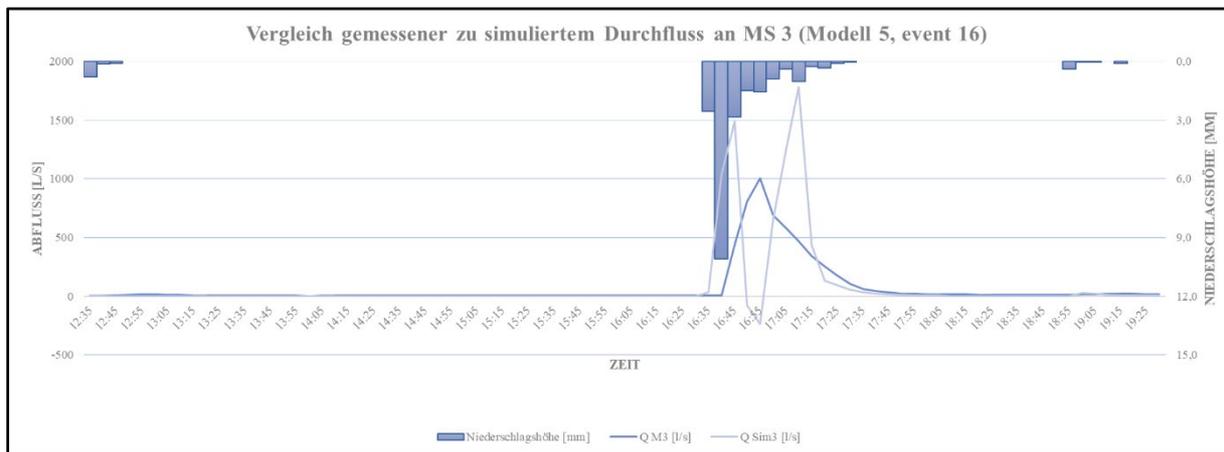


Abbildung 18: Vergleich der Abflussganglinien für die überarbeitete Modellvariante 5 an Messstelle 3 und Event 16 (Quelle: Eigene Darstellung)

Der durch die Simulation erzeugte Rückstau kann zur Ursache haben, dass die bei der Änderung der angeschlossenen Fläche im Einzugsgebiet zu viel abflusswirksame Fläche an einen Schacht bzw. an einen Haltungsstrang angeschlossen wurde. In Abbildung 18 ist zudem zu erkennen, dass im Zeitraum von 16:35 Uhr und 16:45 kurzzeitig eine Niederschlagshöhe von ca. 10 mm erreicht wurde, welche im Anschluss wieder sank. Dabei kann es durch die zu viel angeschlossene abflusswirksame Fläche zu einer Ausschöpfung der Kapazität der Haltung gekommen sein, was kurzfristig zu einem Rückstau im Kanal führte.

Da keine Unterlagen vorlagen, welche Aufschluss über die tatsächliche Anschlusssituation erbrachten, wurden keine weiteren Änderungen im Einzugsgebiet vorgenommen, welche dem Rückstauereffekt bei Event 16 entgegenwirken könnte. Jedoch wird dieser bei der Bewertung der Abweichungsmaße für das Event 16 an Messstelle 3 für die folgenden Kalibrierungsauswertungen gesondert betrachtet.

Da die Modellvariante 5, wie bereits erwähnt, von allen Modellvarianten die beste Modellgüte aufwies, wurde diese als einzige für die Parameterkalibrierung berücksichtigt.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

6.4 Kalibrierung der Modellparametern und Bestimmung der Modellgüte

In diesem Abschnitt wird der Ablauf und die Ergebnisse der Parameterkalibrierung der überarbeiteten Modellvariante 5 vorgestellt.

6.4.1 Festlegung des hydrologischen Konzepts für die Modellkalibrierung

Die bisherigen Simulationen der Modellvariante 5 wurden in MIKE+ mit dem hydrologischen Modell C2 „Linear Reservoir“ durchgeführt. Als ersten Schritt der Kalibrierung wurde die Simulation anhand des Modells A „Time-Area“ und Modell B „Kinematic Wave“ durchgeführt. Ziel der Simulation war ein hydrologisches Modell zu ermitteln, welches bereits mit den in Abschnitt 5.1 standardisierten Parametersätzen die beste Modellgüte erzielt, um dieses dann als hydrologisches Modell für die Kalibrierung festzulegen. Alle Auswertungstabellen und Durchflussganglinien für die Simulationen anhand der drei hydrologischen Modelle können Anlage C entnommen werden. Die Gegenüberstellung der Abweichungsmaße für die Messstellen 1 und 3 für die drei hydrologischen Modelle können exemplarisch den Tabelle 15 und 16 entnommen werden. In grün sind dabei die besterzielten Abweichungsmaße markiert, welche sowohl bei Messstelle 1 als auch bei Messstelle 3 größtenteils durch das Modell C2 „Linear Reservoir“ erzielt wurden.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse unterschiedlicher hydrologische Ansätze für die überarbeitete Modellvariante 5 an Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]			DYNAM [%]			NSE [-]		
	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir
event 13	-3,06	3,21	-11,80	66,30	69,59	32,79	0,53	0,49	0,67
event 16	-0,68	6,72	-6,83	57,70	60,28	22,22	-0,08	-0,05	0,47
event 20	-0,49	8,27	-11,19	3,80	14,30	-9,94	-0,60	-0,28	0,30
event 37	55,87	67,70	36,34	135,72	96,22	53,79	-5,60	-4,96	-2,22
Sum	0,16	7,08	-8,55	62,33	60,63	24,14	-1,44	-1,20	-0,20

Tabelle 16: Abbildung 27: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse unterschiedlicher hydrologische Ansätze für die überarbeitete Modellvariante 5 an Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]			DYNAM [%]			NSE [-]		
	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir	Time-Area	Kinematic Wave	Linear Reservoir
event 13	16,16	24,12	5,81	67,53	77,27	57,03	0,69	0,64	0,79
event 16	33,99	32,17	22,41	84,13	86,64	77,00	-2,50	-3,04	-1,42
event 20	68,42	82,84	54,33	240,19	223,71	213,17	-5,79	-4,78	-4,68
event 37	41,77	52,11	30,20	25,16	27,25	21,35	-1,35	-1,25	-1,12
Sum	24,45	30,04	13,56	76,16	79,29	68,19	-2,24	-2,11	-1,61

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Für die Kalibrierung wurde die überarbeitete Modellvariante 5 und der hydrologische Ansatz C2 „Linear Reservoir“ weiterverfolgt, welche im weiteren Verlauf der Arbeit als „Ursprungsmodell (K0)“ bezeichnet wird. Der für die Kalibrierung des Ursprungsmodell 5 verwendete Referenzparametersatz ist in Abbildung 19 dargestellt.

ID	Maximum [mm/h]	Reduction factor [0]	Initial loss [mm]	Lag time [min]	Infiltration	Minimum [mm/h]	Wet condition [h]	Dry condition [h]	Time constant [h]
▶ 1 -DEFAULT-	2	0,95	0,5	5	☐	0,5	3	0,1	12
2 Dachflächen	2	0,9	0,5	5	☐	0,5	3	0,1	12
3 Verkehrsflächen	2	0,9	0,5	5	☐	0,5	3	0,1	12
4 Schmutzig	2	0,9	1	5	☐	0,5	3	0,1	12
5 Sauber	2	0,9	1	5	☑	0,5	3	0,1	12

Abbildung 19: Referenzparametersatz für die Kalibrierung des Ursprungsmodells 5 (Quelle: eigene Darstellung)

6.4.2 Sensitivitätsanalyse des Ansatzes Linear Reservoir

Da die gekoppelte 1D-2D Abflussberechnung eine hohe Rechenzeit erfordert, wurde eine Sensitivitätsanalyse am ungekoppelten Kanalnetzmodell durchgeführt, um im Vorfeld einen Überblick darüber zu gewinnen, welche Auswirkungen die Anpassungen der Parameter des Linear Reservoir auf die Ganglinie und das Volumen hat. Die Sensitivitätsanalyse wurde an Messstelle 1 für die Events 13 und 16 durchgeführt, wobei nur der Abfluss im 1D-Kanalnetzmodell ausgewertet wurde.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die in Abbildung 19 dargestellten Standardparameter um ein bestimmtes Maß abgesenkt oder erhöht. Die Abweichungen auf das Volumen und auf den Spitzenabfluss wurden dabei dokumentiert. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse vom hydrologischen Modell "Linear Reservoir" (Quelle: Eigene Darstellung)

	Event	Anfangsverluste			Reduktionsfaktor			Verzögerungszeit		
		+50%	-	-50%	-0,05	0,9	+0,05	+50%	-	-50%
Auswirkungen auf das Volumen [%]	Event 13	-0,01	-	0,00	-0,06	-	0,06	0,00	-	0,00
	Event 16	-0,02	-	0,01	-0,06	-	0,05	-0,01	-	0,00
Auswirkungen auf den Spitzenwert [%]	Event 13	0,00	-	0,00	-0,06	-	0,06	-0,17	-	0,12
	Event 16	-0,02	-	0,01	-0,07	-	0,05	-0,26	-	0,37

6.4.3 Parameterkalibrierung der Modellvariante 5

Im Rahmen der Variantenuntersuchung im Abschnitt 6.2 wurde durch die Auswertung der Abweichungsmaße Modellvariante 5 für eine Kalibrierung des angepassten Untersuchungsgebietes festgelegt, da diese bereits durch die Anschlusssituation eine mittlere bis gute Anpassung an die Bestandssituation liefert. Auch wurde bei der Variantenuntersuchung festgestellt, dass

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

unter Verwendung des in MIKE+ implementierten Abflussberechnungsmodell „Linear Reservoir“ die besten Ergebnisse in Hinblick auf die Modellgüte erzielt wurden. In einem nächsten Schritt galt es dann durch die Parameteranpassung des Modells C „Linear Reservoir“ eine genauere Anpassung der Simulation an die Messung zu erreichen. Dabei wurde das besondere Augenmerk auf die Kalibrierung der Spitzenwertabweichung und des NSE gelegt, da das Volumen bereits für Messstelle 1 und 3 und die Events 13 und 16 in einem zufriedenstellenden Bereich lag. Zusätzlich würde die Erhöhung des Volumens zwar zu einer Minderung des Volumenfehlers bei Messstelle 1 führen, jedoch würde gleichzeitig einer Erhöhung des Volumenfehlers von Messstelle 3 und eine größere Spitzenwertabweichung beider Messstellen einhergehen. Alle Auswertungstabellen und Durchflussganglinien zu den folgenden Kalibrierungsläufen können Anlage D entnommen werden.

Die Auswertungen der Sensitivitätsanalyse für das 1D-Kanalnetzmodell zeigen, dass die größte Veränderung der Spitzenwertabweichung, durch die Anpassung der Verzögerungszeit erzielt werden konnten. Im Falle von Modellvariante 5 musste die Verzögerungszeit (Lag time) somit erhöht werden, um eine Absenkung des Spitzenwertes zu erreichen, weshalb diese im ersten Kalibrierungslauf (K1) für die Dachflächen und Verkehrsflächen von 5 Minuten auf 10 Minuten erhöht wurde. In Abbildung 20 sind der verwendete Parametersatz für den ersten Kalibrierungslauf abgebildet. Den Tabellen 18 und 19 können die Gegenüberstellungen der durch die Kalibrierung erzielten Abweichungsmaße in Bezug auf die Ursprungsmodellvariante 5 (K0) entnommen werden. In den Tabellen ist zu erkennen, dass die Anpassung der Verzögerungszeit bei beiden Messstellen zu einer Minderung der Spitzenwertabweichung und gleichzeitig zu einer Verbesserung des NSE geführt hat. Für die Events 13 und 16 liegen alle Werte an Messstelle 1 in einem zufriedenstellenden Bereich. Für Messstelle 3 liegen weiterhin nur die Volumenabweichungen der Events 13 und 16 sowie der NSE für das Event 13 in einem guten Bereich. Die Spitzenwertabweichungen werden weiterhin durch die Simulation überschätzt. Auch der NSE für Event 16 ist liegt, durch den simulierten Rückstau effekt, weiterhin in einem nicht zufriedenstellenden Bereich.

ID	Maximum [mm/h]	Reduction factor [0]	Initial loss [mm]	Lag time [min]	Infiltration	Minimum [mm/h]	Wet condition [h]	Dry condition [h]	Time constant [h]	
1	DEFAULT-	2	0,95	0,5	5	□	0,5	3	0,1	12
2	Dachflächen	2	0,9	0,5	10	□	0,5	3	0,1	12
3	Verkehrsflächen	2	0,9	0,5	10	□	0,5	3	0,1	12
4	Schmutzig	2	0,9	1	5	□	0,5	3	0,1	12
5	Sauber	2	0,9	1	5	☑	0,5	3	0,1	12

Abbildung 20: Parametersatz für die Kalibrierung der Verzögerungszeit (K1) (Quelle: eigene Darstellung)

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 18: Vergleich der Abweichungsmaße des Ursprungsmodells (K0) und der Kalibrierung (K1) an Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K0	K1	K0	K1	K0	K1
event 13	-11,69	-11,71	32,79	19,82	0,71	0,73
event 16	-6,67	-7,88	22,22	1,18	0,97	0,78
event 20	-10,79	-11,23	-9,94	-35,35	0,94	0,57
event 37	38,41	35,23	53,79	16,12	0,84	-0,93
Sum	-8,35	-8,78	24,14	1,99	0,87	0,29

Tabelle 19: Vergleich der Abweichungsmaße des Ursprungsmodells (K0) und der Kalibrierung (K1) an Messstelle 2 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K0	K1	K0	K1	K0	K1
event 13	5,81	5,81	57,03	40,66	0,79	0,86
event 16	22,41	15,10	77,00	54,32	-1,42	-0,19
event 20	54,33	54,89	213,17	131,36	-4,68	-2,15
event 37	30,20	30,71	21,35	-9,53	-1,12	-0,42
Sum	13,56	11,55	68,19	43,00	-1,61	-0,47

Wie man den in Tabelle 17 dargestellten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse entnehmen kann sind durch die Anpassung der Anfangsverluste und des Reduktionsfaktors kaum Veränderungen des Spitzenwerts erzielbar. Zudem liegen die Parameter der Anfangsverluste des Referenzparametersatz (vgl. Abbildung 19) bereits im mittleren Bereich der nach DWA-A 1651-1 empfohlenen Werte (vgl. Abschnitt 2.1), wodurch davon ausgegangen werden konnte, dass keine zielführenden Veränderungen der Abweichungsmaße unter Einhaltung der empfohlenen Grenzwerte erzielt werden können. Da für die Sensitivitätsanalyse jedoch nur die Abflussbildung über das 1D-Kanalnetzmodell berücksichtigt wurde, wurden in einem weiteren Kalibrierungslauf (K2) neben der in K1 erhöhten Verzögerungszeit die Anfangsverluste angepasst, um auch die möglichen Einflüsse des 2D-Oberflächenmodells auf die Abweichungsmaße zu berücksichtigen. Der dafür verwendete Parametersatz sowie die Gegenüberstellungen des 2. Kalibrierungslauf in Bezug zum 1. Kalibrierungslauf können Abbildung 21 und den Tabellen 20 und 21 entnommen werden. In den Gegenüberstellungen (vgl. Tabelle 20 und 21) ist zu erkennen, dass die Anpassung der Anfangsverluste unter Einbehaltung der Grenzwerte nur zu geringfügigen Veränderungen in den kurzen Events 16, 20 und 37 geführt hat was sich darauf zurückführen lässt, dass die Anpassung der Anfangsverluste bei Niederschlägen mit geringer Dauer einen größeren Einfluss auf das Volumen hat, als es der Fall bei längeren Niederschlagsereignissen ist. Da der Kalibrierungslauf 1 ohne die Veränderung der Anfangsverluste

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

und des Reduktionsfaktors bessere Abweichungsmaße aufzeigte, wurde die Parameter des 2. Kalibrierungslaufes verworfen.

ID	Maximum [mm/h]	Reduction factor [0]	Initial loss [mm]	Lag time [min]	Infiltration	Minimum [mm/h]	Wet condition [h]	Dry condition [h]	Time constant [h]
1 -DEFAULT-	2	0,95	0,5	5	<input type="checkbox"/>	0,5	3	0,1	12
2 Dachflächen	2	0,9	0,3	10	<input type="checkbox"/>	0,5	3	0,1	12
3 Verkehrsflächen	2	0,9	0,3	10	<input type="checkbox"/>	0,5	3	0,1	12
4 Schmutzig	2	0,9	1	5	<input type="checkbox"/>	0,5	3	0,1	12
5 Sauber	2	0,9	1	5	<input checked="" type="checkbox"/>	0,5	3	0,1	12

Abbildung 21: Parametersatz für die Kalibrierung der Anfangsverluste (K2) (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 20: Vergleich der Abweichungsmaße der Kalibrierungsläufe K1 und K2 an Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K1	K2	K1	K2	K1	K2
event 13	-11,71	-11,48	19,82	19,82	0,73	0,73
event 16	-7,88	-7,34	1,18	1,76	0,78	0,78
event 20	-11,23	-8,65	-35,35	-31,17	0,57	0,56
event 37	35,23	39,05	16,12	19,96	-0,93	-1,05
Sum	-8,78	-8,18	1,99	3,37	0,29	0,25

Tabelle 21: Vergleich der Abweichungsmaße der Kalibrierungsläufe K1 und K2 an Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K1	K2	K1	K2	K1	K2
event 13	5,81	6,10	40,66	40,66	0,86	0,86
event 16	15,10	15,79	54,32	54,89	-0,19	-0,23
event 20	54,89	59,26	131,36	140,36	-2,15	-2,56
event 37	30,71	34,28	-9,53	-6,50	-0,42	-0,47
Sum	11,55	12,27	43,00	44,23	-0,47	-0,60

Für die Anpassungen der Parameter des Linear-Reservoir-Modells waren nach den Ergebnissen von K2 im Vergleich zu K1 keine größeren Veränderungen der Abweichungsmaße mehr zu erwarten, weshalb zusätzlich zu dem in K1 implementierten Parametersatz die Kalibrierung des 2D-Oberflächenmodells hinzugezogen wurde. Auf Grund der hohen Rechenzeit wurde im Vorfeld keine Sensitivitätsanalyse für die Parameter des 2D-Oberflächenmodells durchgeführt, wodurch keine Erkenntnisse über die Auswirkungen der Parameteranpassungen zu Grunde lagen. Die Kalibrierung erfolgte anhand der Anpassung der Oberflächenrauheit. Als Richtwerte wurden dafür die von der LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) empfohlenen Rauheitswerte nach Gauckler-Manning-Strickler verwendet, welche in Abbildung 22 dargestellt sind.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

	Rauheit nach Gauckler-Manning-Strickler k_{st} [$m^{1/3}/s$]	
	Dünnfilm bis 2 cm	ab 10 cm
Ackerland	8-12	15-30
Ackerland, verschlammte	10-15	20-35
Gartenland	3-6	5-15
Wald, Gehölz, Laub- und Nadelholz	3-6	5-20
Grünland	5-10	20-35
Rasen	3-8	20-35
Siedlungsfläche	6-15	10-20
Dachflächen *	50-60	
Fließgewässer, Stehendes Gewässer *	15-35	
Fließgewässer, verschlammte *	25-50	
Fließgewässer, stark bewachsen *	5-20	
Wildbach *	10-15	
Gerinne, gemauert, Beton *	50-80	
Landwirtschaftlicher Weg (Kies, Schotter) *	20-40	
Straße, Weg (Asphalt) *	40-60	
Straße, Weg (gepflastert) *	30-50	

Abbildung 22: Empfohlene Rauheitswerte nach Gauckler-Manning-Strickler (Quelle: LUBW 2020)

Für alle bisherigen Simulationen und Kalibrierungen wurde einheitlich für die gesamte Oberfläche im Untersuchungsgebiet ein Rauheitswert von $15 \frac{m^{1/3}}{s}$ angesetzt. Dies entspricht dem Mittelwert, der vom LUBW empfohlenen Rauheit einer Siedlungsfläche. Die Verminderung der Rauheit würde die Oberfläche des Untersuchungsgebiet nicht realitätsgetreu repräsentieren, da es sich um ein urbanes und nicht um ein ländliches Gebiet handelt. Für den Kalibrierungslauf 3 wurden die Rauheit auf einen Wert von $35 \frac{m^{1/3}}{s}$ hochgesetzt, was ungefähr dem Mittelwert der Rauheitswerten von Rasenflächen und Straßen entspricht. In den Tabellen 22 und 23 sind die Gegenüberstellung der Abweichungsmaße für K1 ($k_{st} = 15 \frac{m^{1/3}}{s}$) und K3 ($k_{st} = 35 \frac{m^{1/3}}{s}$) dargestellt. Die Erhöhung der Rauheit hat bei beiden Messstellen und allen Events zu einer Verschlechterung der Spitzenwertabweichung und der NSE-Werte geführt, wodurch festgelegt werden kann, dass die Oberfläche als Siedlungsfläche mit einer Rauheit von $15 \frac{m^{1/3}}{s}$ im Modell am realitätsgetreuesten abgebildet wird.

Kalibrierung eines gekoppelten 1D-2D Berechnungsmodells

Tabelle 22: Vergleich der Abweichungsmaße der Kalibrierungsläufe K1 und K3 an Messstelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K1	K3	K1	K3	K1	K3
event 13	-11,71	-10,85	19,82	27,30	0,73	0,71
event 16	-7,88	-6,92	1,18	14,18	0,78	0,76
event 20	-11,23	-11,52	-35,35	-35,08	0,57	0,57
event 37	35,23	35,72	16,12	16,26	-0,93	-0,98
Sum	-8,78	-7,98	1,99	10,44	0,29	0,26

Tabelle 23: Vergleich der Abweichungsmaße der Kalibrierungsläufe K1 und K2 an Messstelle 3 (Quelle: Eigene Darstellung)

	VE [%]		DYMAX [%]		NSE [-]	
	K1	K3	K1	K3	K1	K3
event 13	5,81	6,23	40,66	43,79	0,86	0,86
event 16	15,10	26,29	54,32	69,07	-0,19	-0,84
event 20	54,89	54,78	131,36	133,54	-2,15	-2,18
event 37	30,71	29,74	-9,53	-7,53	-0,42	-0,41
Sum	11,55	14,90	43,00	52,64	-0,47	-0,64

In Hinblick auf die Bearbeitungszeit dieser Arbeit und unter Einhaltung der für die jeweiligen Parameter empfohlenen Grenzwerte wurden keine weiteren Kalibrierungsläufe durchgeführt.

6.4.4 Auswertung der Kalibrierungsvarianten

In Anbetracht aller in dieser Arbeit erstellten Modellvarianten und Kalibrierungen bietet die überarbeitete Modellvariante mit dem im K2 implementierten Parametersatz die beste Anpassung der simulierten Durchflussganglinie an die gemessene Ganglinie. Die Auswertungstabelle des finalen Modells und die dazugehörigen Ganglinien aller Events und Messstellen können Anlage E entnommen werden. Dabei ist jedoch hervorzuheben, dass die Festlegung dieser Modellvariante sich nur auf die im Rahmen der Bearbeitungszeit ermöglichten Simulationen und deren erzielte Ergebnisse bezieht.

Die Auswertungen des finalen Modells ergeben, dass für die Messstelle 1 alle Abweichungsmaße (VE, DYMAX und NSE) der Events 13 und 16 in einem, nach DWA-A 165-1, guten Bereich einzuordnen sind. Auch die gemittelten Volumenfehler und Spitzenwertabweichungen aller Events für Messstelle 1 bestätigen diese Einschätzung, weshalb das finale Modell für Messstelle 1 insgesamt eine gute und zufriedenstellte Modellgüte aufweist.

Fazit und Ausblick

Auch bei Messstelle 3 werden sowohl für die einzelne Betrachtung der Events 13 und 16 als auch bei der Betrachtung aller Events eine gute Volumenabweichung erreicht. Die Spitzenwertabweichung werden durch das finale Modell an Messstelle 3 weiterhin überschätzt und auch der NSE liegt bis auf Event 13 im unzulässigen Bereich. Die schlechte Modellgüte an Messstelle 3 durch das finale Modell und die starken Varianzen der Abweichungsmaße in Bezug auf Messstelle 3, lassen darauf schließen, dass grundlegende Fehler in der Modellstruktur vorliegen. Dabei sind vor allem die Anschlusssituationen, die Trockenwetterdaten und die Flächenparameter, hervorzuheben, da diese auf Annahmen basieren.

Eine weitere Ursache für die Abweichungen an Messstelle 3 können auch Fehler in den Belastungsdaten beispielsweise durch Messfehler der Niederschlags- bzw. Durchflussmengen, geschuldet sein. Nach DWA-M 165-1 wird zudem empfohlen für eine Kalibrierung Niederschlagsereignisse längerer Dauer zu berücksichtigen und Ergebnisse aus mindestens 3 Niederschlagsstationen und mindestens 5 verschiedener Ereignisse oder Modellregendaten zu verwenden. Auf Grund der mangelnden Datenverfügbarkeit in dieser Arbeit wurden lediglich 2 Messstationen und 4 Niederschlagsereignisse für die Modellierung berücksichtigt.

Da die Bearbeitungszeit beschränkt war wurden auch einige Vorentscheidungen für die Modellkalibrierung getroffen, um die langen Rechenzeiten zu kompensieren. Daraus resultiert auch dass nicht alle hydrologischen Modelle für die Kalibrierung berücksichtigt wurden, für welche eventuell bei der Parameterkalibrierung, auf Grund der unterschiedlichen Berechnungsverfahren, bessere Ergebnisse erzielt hätten können.

7 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auf Grund des Klimawandels und den damit einhergehenden Sturzfluten die Anfrage von detaillierten Überflutungsmodellen überproportional steigt. Der Erfolg einer realitätsgetreuen Modellierung des Niederschlag-Abfluss-Verhaltens und die Gewährleistung frühzeitiger Erkenntnisse von Überflutungsgefährdungen hängt dabei von vielen Faktoren ab. Eine große Verfügbarkeit von geprüften Bestand- und Belastungsdaten eines Untersuchungsgebiet bieten dabei den Grundstein für eine präzise Modellierung.

In Bezug auf die Entwicklung des Echtzeitwarn- und Echtzeitmanagementsystems der Beteiligten des KIWASuS Forschungsprojekts lässt sich sagen, dass für die Optimierung der in dieser Arbeit erzielten Kalibrierungsergebnisse, weitere Niederschlagsereignisse betrachtet wer-

Fazit und Ausblick

den sollten. Zudem sollten auch die Eingangsdaten der Modellstruktur, explizit im Einzugsgebiet der Messstelle 3, anhand von Bestandsdaten überprüft und bei Abweichungen angepasst werden. Zuletzt sollte die Kalibrierung weitere Oberflächenparameter für die Erzielung einer besseren Anpassung herangezogen werden.

Literaturverzeichnis

Brasseur, G.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (2016): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, Berlin; Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017.

DHI Group (2021a): MIKE 1D. DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling, 2021.

DHI Group (2021b): MIKE +. Stadt-Fluss-Überschwemmung. Online verfügbar unter <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mikeplus>, letzter Zugriff: 23.12.2021

DIN (2017): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement; Deutsche Fassung EN 752:2017, Beuth-Verlag, Juli 2017, Berlin.

DWA (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 118, März 2006, Hennef.

DWA (2016): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, DWA-Regelwerk; Merkblatt DWA-M 119; November 2016. Hennef.

DWA (2021): Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung - Teil 1: Anforderungen, DWA-Merkblatt; DWA-M 165-1; Mai 2021. Hennef.

Fuchs, K. (2021): Modellbasierte Ermittlung der Wirksamkeit von Schwammstadtansätzen auf die Reduzierung der Überflutung durch extreme Starkregen (Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover); Hannover; Januar 2021.

Härder, M. (2019): Sensitivitätsanalyse des Wasserhaushaltsmodells LARSIM. für das Einzugsgebiet des Oberen Mains (Bachelorarbeit, Technische Universität München), September 2017, München.

Horn, J. v.; Bonnet, C.; Jeskulke, M.; Hoppe, H.; Thielking, K.; Gatke, D.; Schäfer, K./Koch, M. (2017): Praxisleitfaden. Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen, 2017, Bremen.

Hürter, H. (2018): Erarbeitung gebietspezifischer Anwendungsempfehlungen für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen (Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern), April 2018, Kaiserslautern.

Kasper, F.; Imbery, F.; Friedrich, K.; Böttcher, F.; Herbst, M.; Deutschländer, T.; Friedrich, A.; Tinz, B. (2021). Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen, Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. Deutscher Wetterdienst/ Extremwetterkongress, September 2021, Offenbach am Rhein.

Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress_download.pdf?__blob=publication-File&v=1, letzter Zugriff 23.12.2021

KIWASuS (2021): KIWASuS – KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten. Hintergrund und Zielsetzung, 2021.

Online verfügbar unter <https://kiwasus.de/hintergrund-und-zielsetzung/>, letzter Zugriff: 23.12.2021

LUBW (2020): Anhänge 1 a, b, c zum Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Juli 2020, Karlsruhe.

Malitz, G.; Ertel, H. (2015): KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010), Abschlussbericht, 2015, Offenbach am Main.

Muschalla, D.; Sulzbacher, R.M.; Leimgruber, J.; Maier, R.; Ertl, T.; Neunteufel, R.; Kretschmer, F.; Tscheikner-Gratl, F.; (2015): Auf effizientem Wege von den Daten zum Modell (DATMOD). Sanierungs- und Anpassungsplanung von kleinen und mittleren Kanalnetzen, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Dezember 2012, Wien.

Neubauer, D. (2018): Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines hydrodynamischen Niederschlagsabflussmodells für das Einzugsgebiet Graz-Ziegelstraße (Masterarbeit, Technische Universität Graz), Mai 2018, Graz.

Schmitt, T. G.; Becker, M.; Flores, C.; Pfeiffer, E.; Sitzmann, D.; Uhl, M. (2008): Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzrechnungen, KA-Abwasser, Abfall, 55, Nr. 12/2008, S. 1306-1313.

Umweltbundesamt (2021): Klima und Treibhausgaseffekt, 2021

Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#grundlagen>.

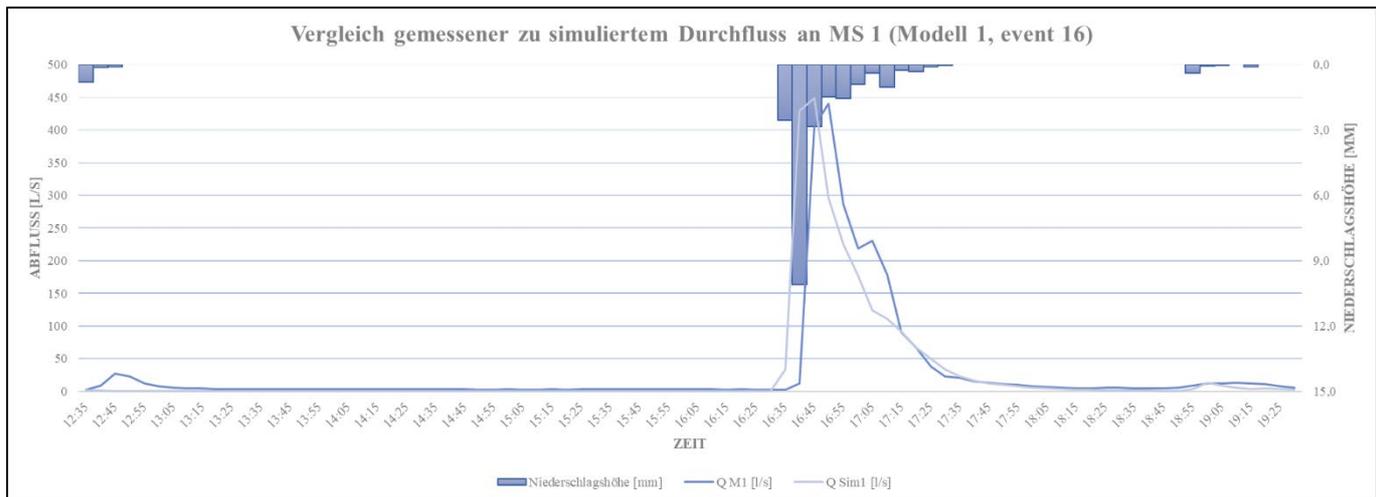
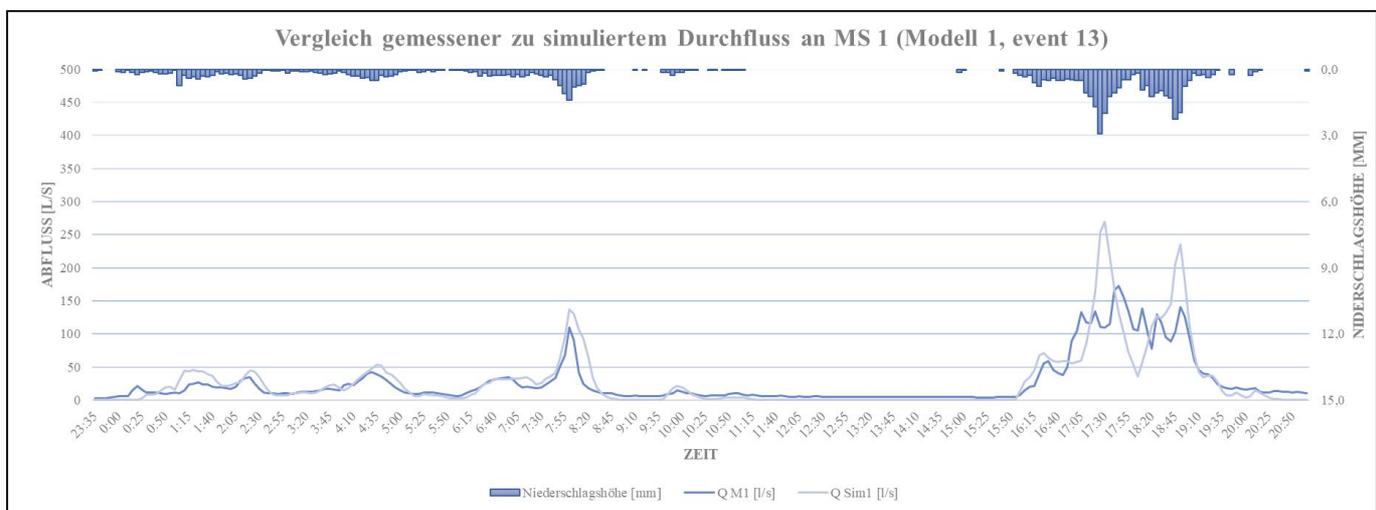
Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Naumann, T.; Nikolowski, J. N. (2016): Baukonstruktion im Klimawandel, Springer Vieweg, 2016, Wiesbaden.

Anlagen

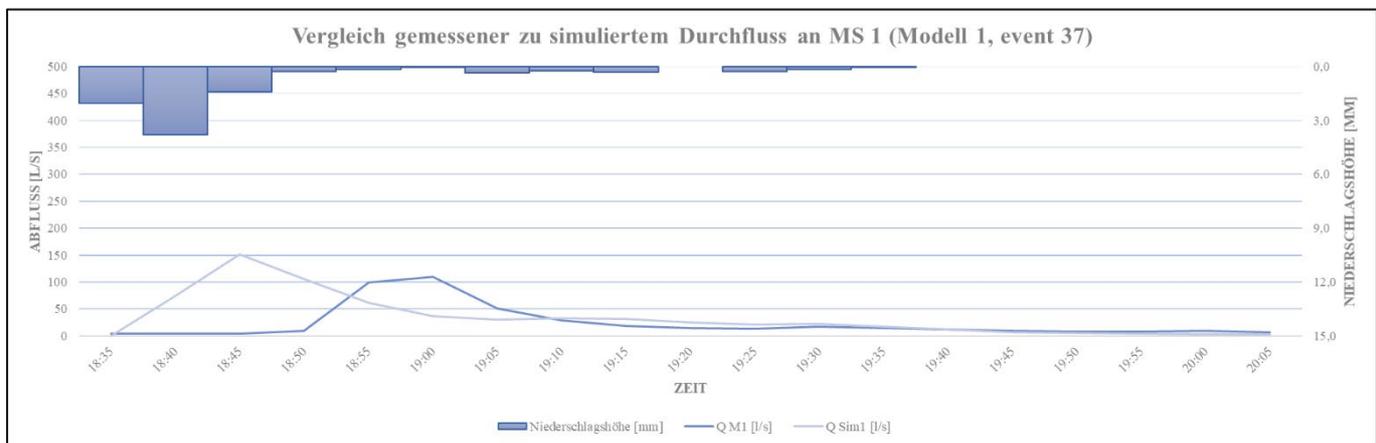
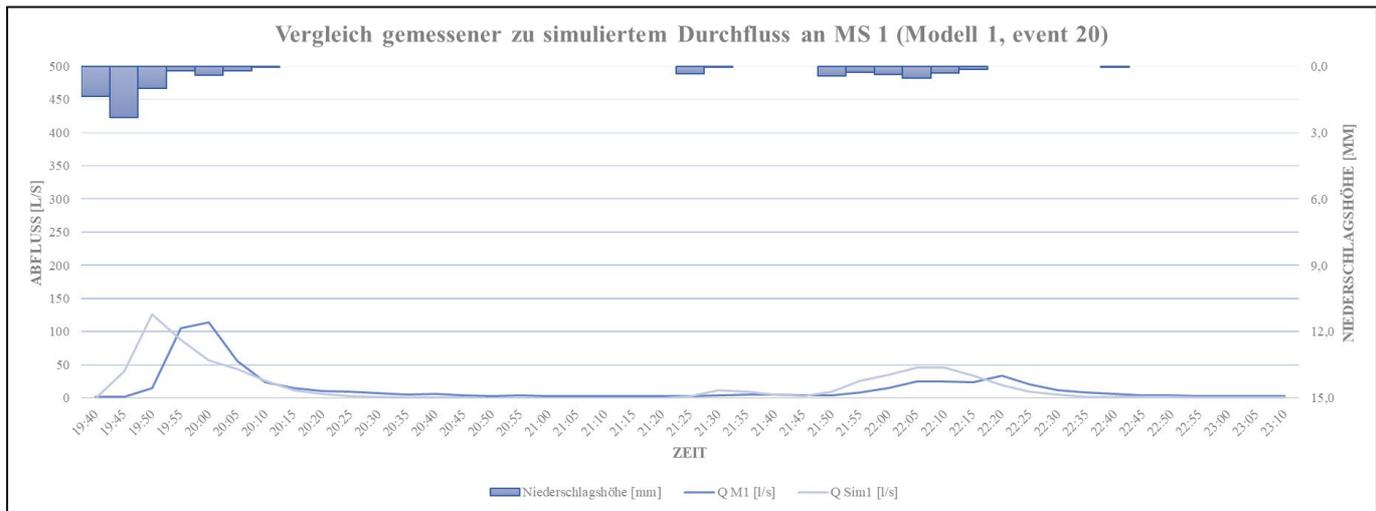
Anlage A – Auswertung der Modellvarianten

Modell 1- Messstelle 1

	Sim vol (m3)	Obs vol (m3)	delta (vol)	delta (%)	Peak Sim (m3/s)	Peak Obs (m3/s)	delta (peak)	delta (%)	E2 (NSE)
event 13	2172,73	2063,26	109,47	5,31	269,56	172,33	97,23	56,42	1,00
event 16	670,75	731,60	-60,85	-8,32	448,60	440,41	8,19	1,86	0,96
event 20	203,46	186,89	16,57	8,87	126,45	114,03	12,42	10,89	0,95
event 37	193,27	132,54	60,73	45,82	151,86	109,46	42,40	38,74	0,96
Sum	3240,22	3114,29	125,92	4,04	996,47	836,23	160,24	19,16	0,97

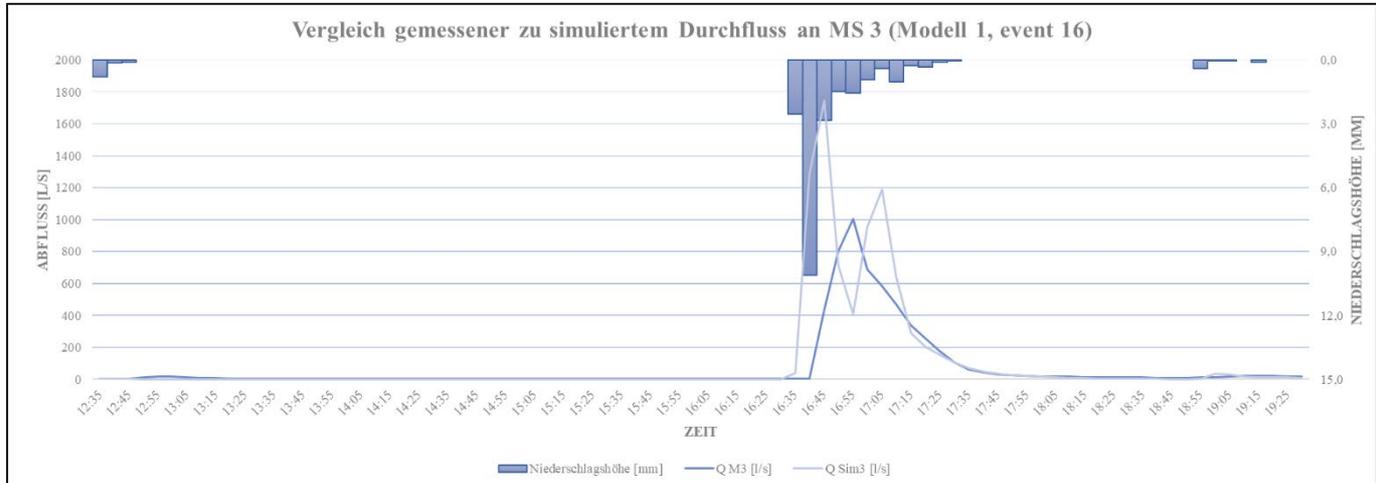
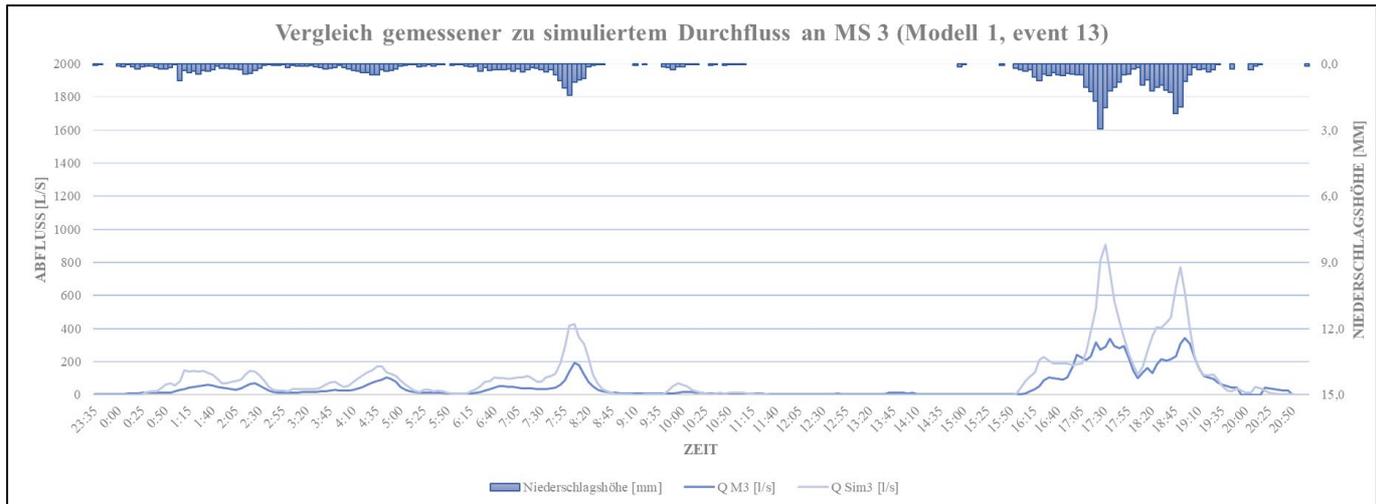


Anlagen

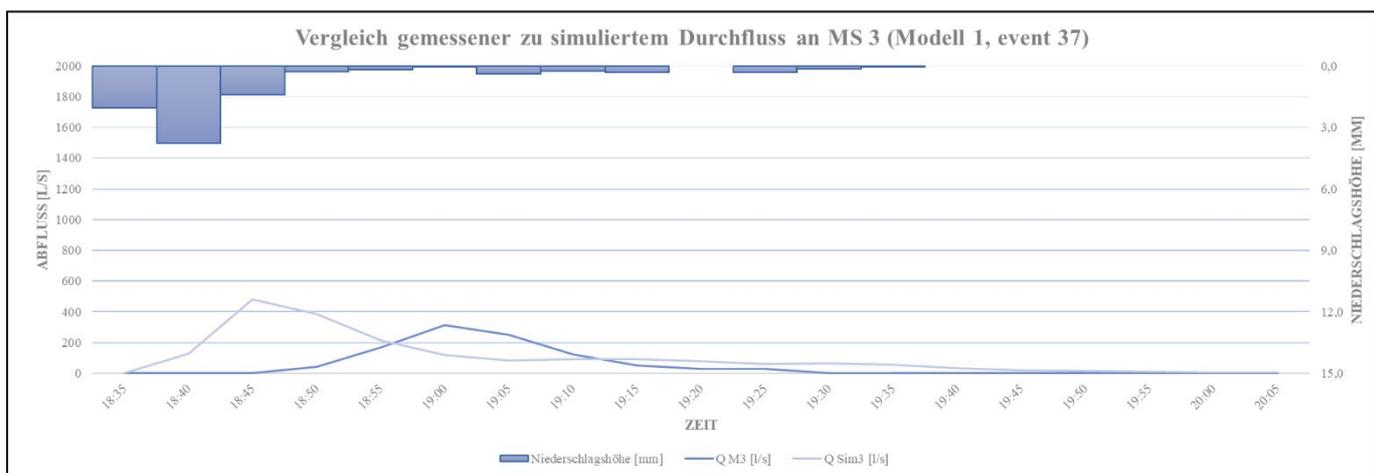
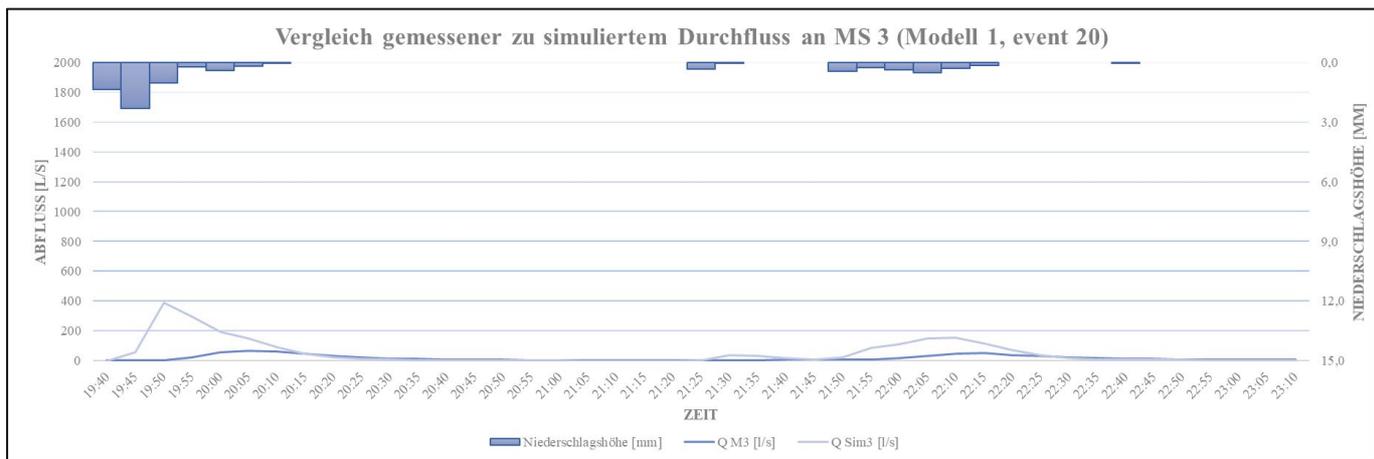


Modell 1 - Messstelle 3

	Sim vol (m3)	Obs vol (m3)	delta (vol)	delta (%)	Peak Sim (m3/s)	Peak Obs (m3/s)	delta (peak)	delta (%)	E2 (NSE)
event 13	7068,24	3773,74	3294,50	87,30	907,75	343,66	564,09	164,14	0,98
event 16	2447,32	1679,32	768,01	45,73	1748,64	1006,38	742,26	73,76	0,86
event 20	648,59	227,15	421,43	185,53	389,35	66,64	322,71	484,26	0,46
event 37	584,20	305,35	278,85	91,32	479,81	313,66	166,15	52,97	0,52
Sum	10748,35	5985,56	4762,79	79,57	3525,55	1730,34	1795,21	103,75	0,71



Anlagen



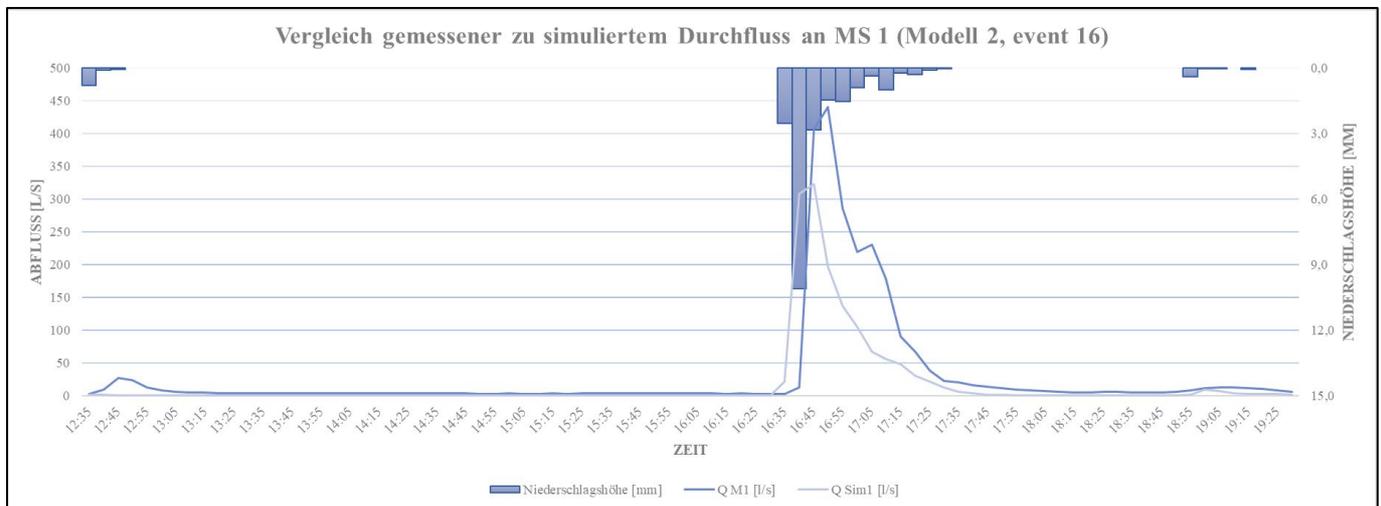
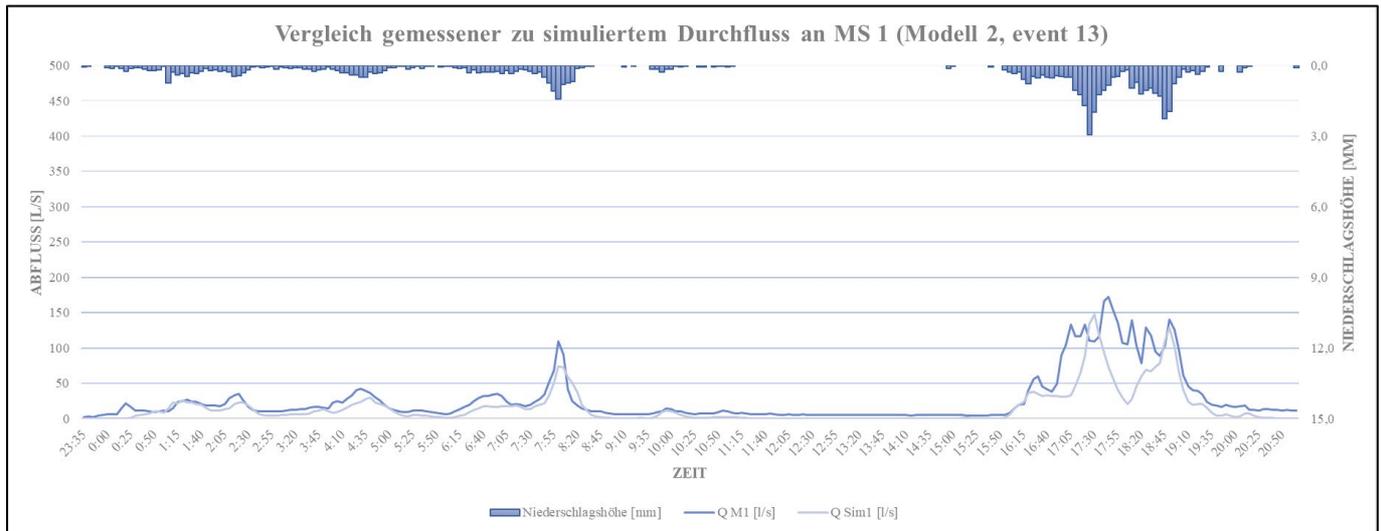
Modell 1 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

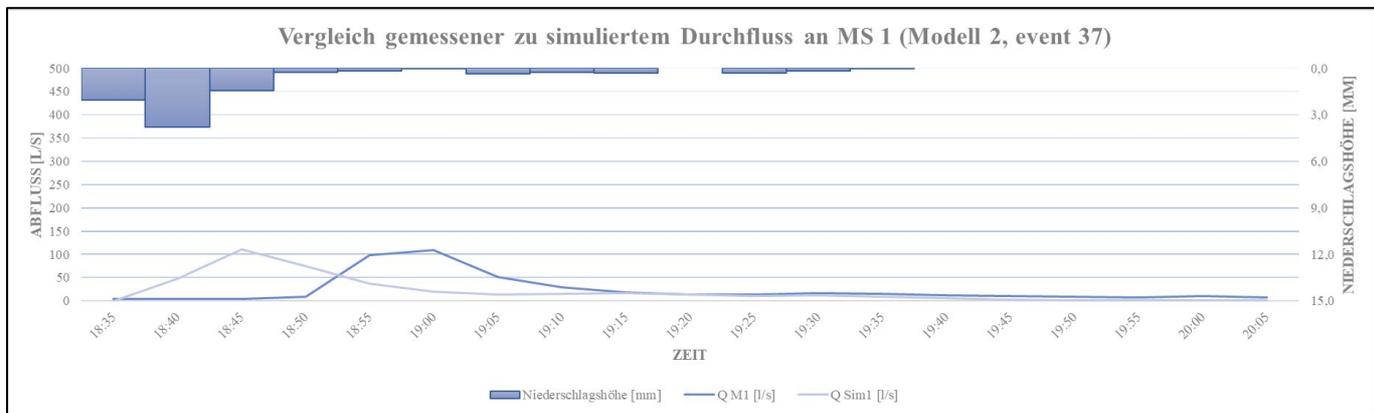
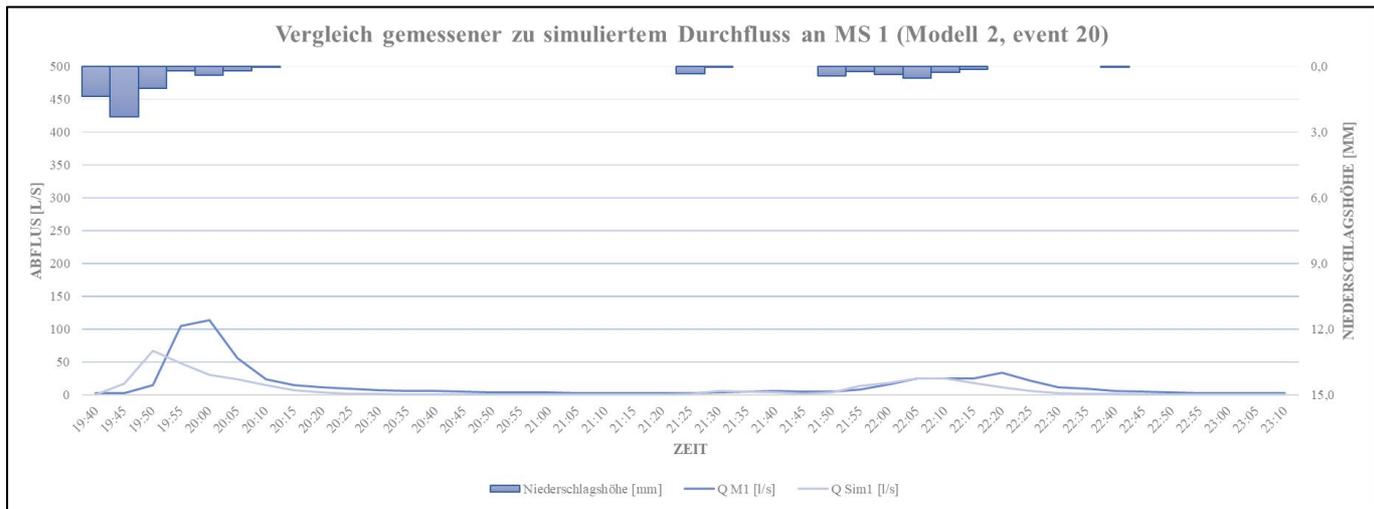
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	5,31	87,30	16,45	56,42	164,14	2,91	0,52	-0,68	-1,30
event 16	-8,32	45,73	-5,50	1,86	73,76	39,64	0,58	-0,53	-0,91
event 20	8,87	185,53	20,93	10,89	484,26	44,47	0,15	-21,18	-139,39
event 37	45,82	91,32	1,99	38,74	52,97	1,37	-1,61	-1,84	1,14

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 2 – Messstelle 1

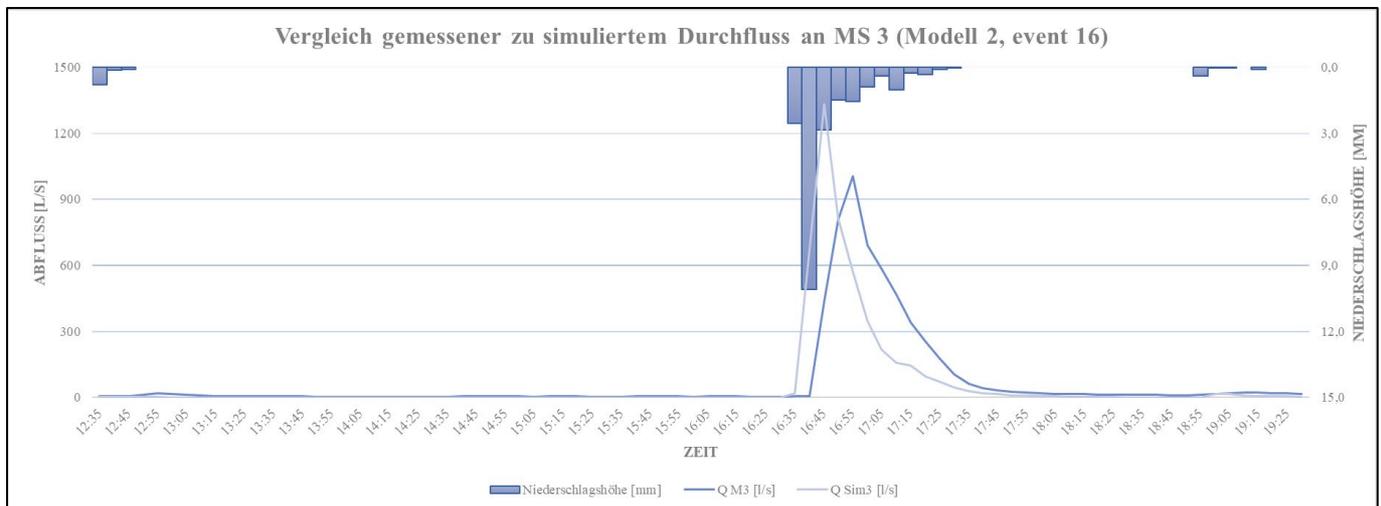
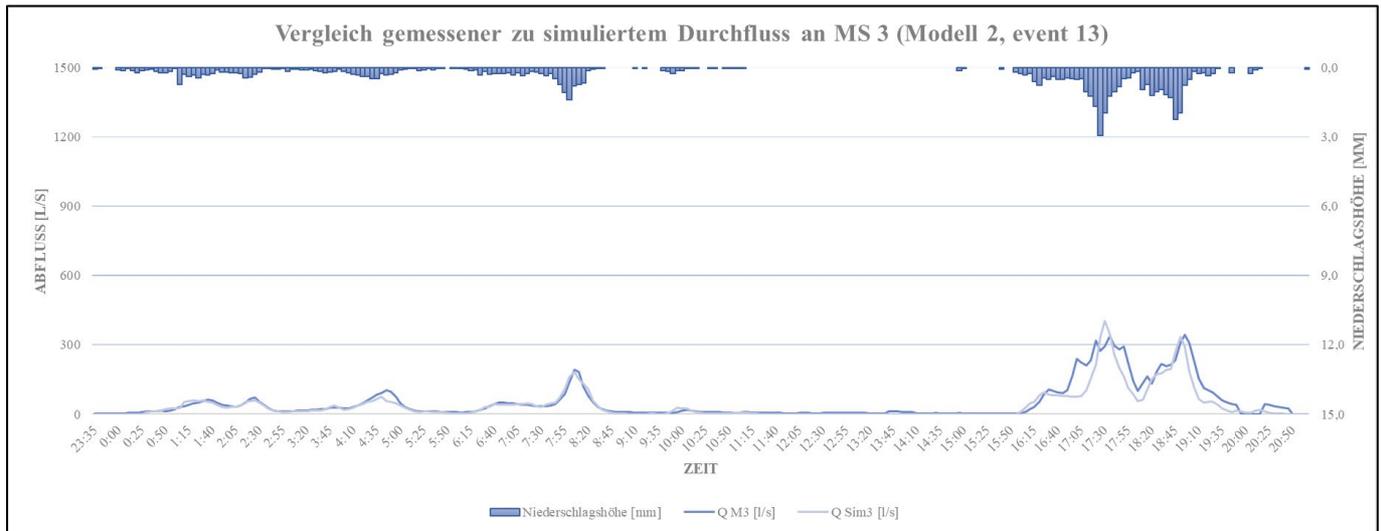
	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1179,40	2063,26	-883,86	-42,84	147,15	172,33	-25,18	-14,61	0,61
event 16	411,44	731,60	-320,16	-43,76	322,87	440,41	-117,55	-26,69	0,54
event 20	108,39	186,89	-78,50	-42,00	66,45	114,03	-47,58	-41,72	0,34
event 37	117,32	132,54	-15,22	-11,48	110,91	109,46	1,45	1,32	-0,87
Sum	1816,55	3114,29	-1297,74	-41,67	647,37	836,23	-188,86	-22,58	0,16



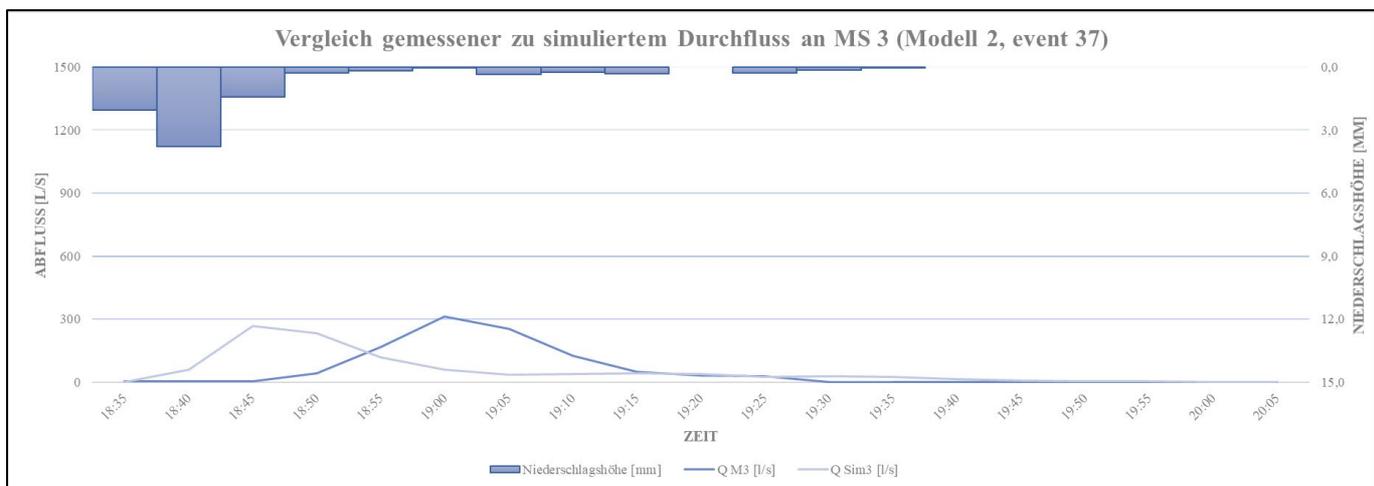
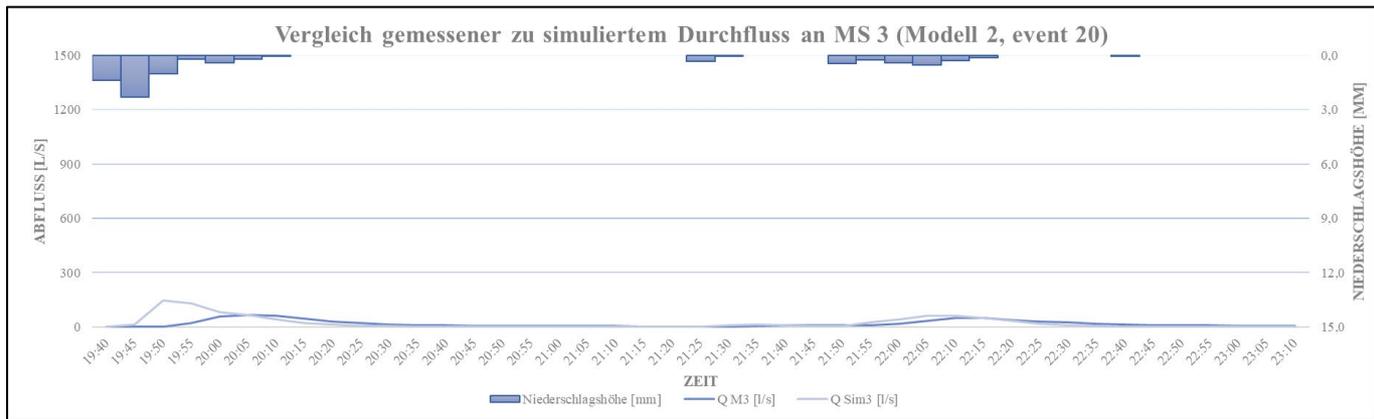


Modell 2 – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	Delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3011,55	3773,74	-762,19	-20,20	404,60	343,66	60,94	17,73	0,84
event 16	1404,92	1679,32	-274,40	-16,34	1334,12	1006,38	327,74	32,57	0,32
event 20	271,40	227,15	44,24	19,48	147,56	66,64	80,92	121,42	-1,78
event 37	302,97	305,35	-2,38	-0,78	266,97	313,66	-46,69	-14,89	-0,48
Sum	4990,84	5985,56	-994,72	-16,62	2153,25	1730,34	422,91	24,44	-0,28



Anlagen



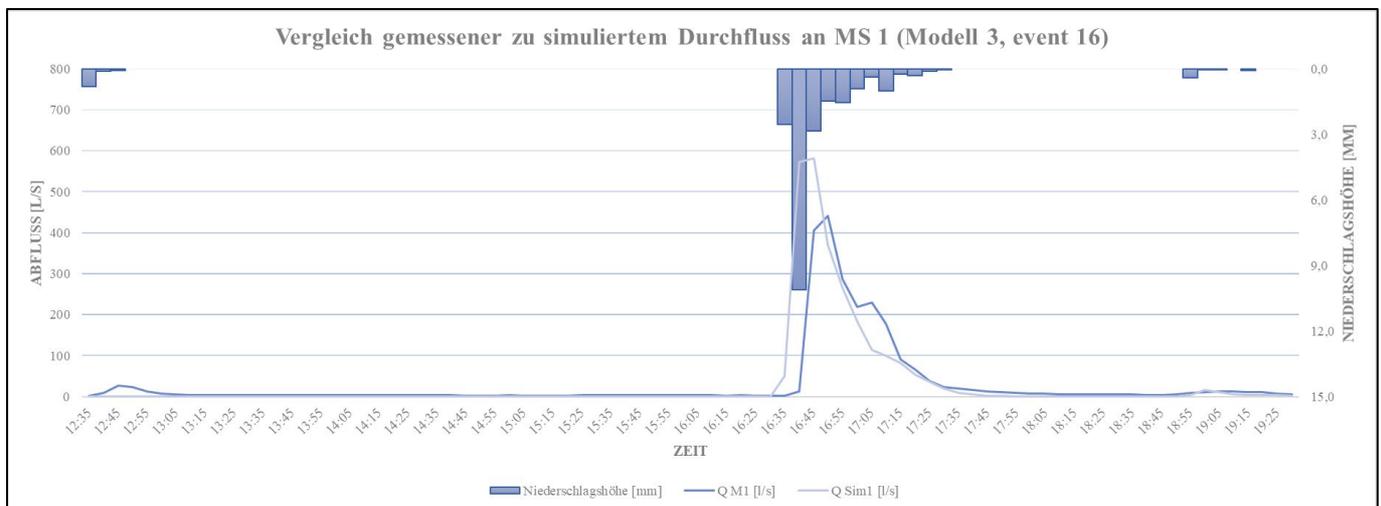
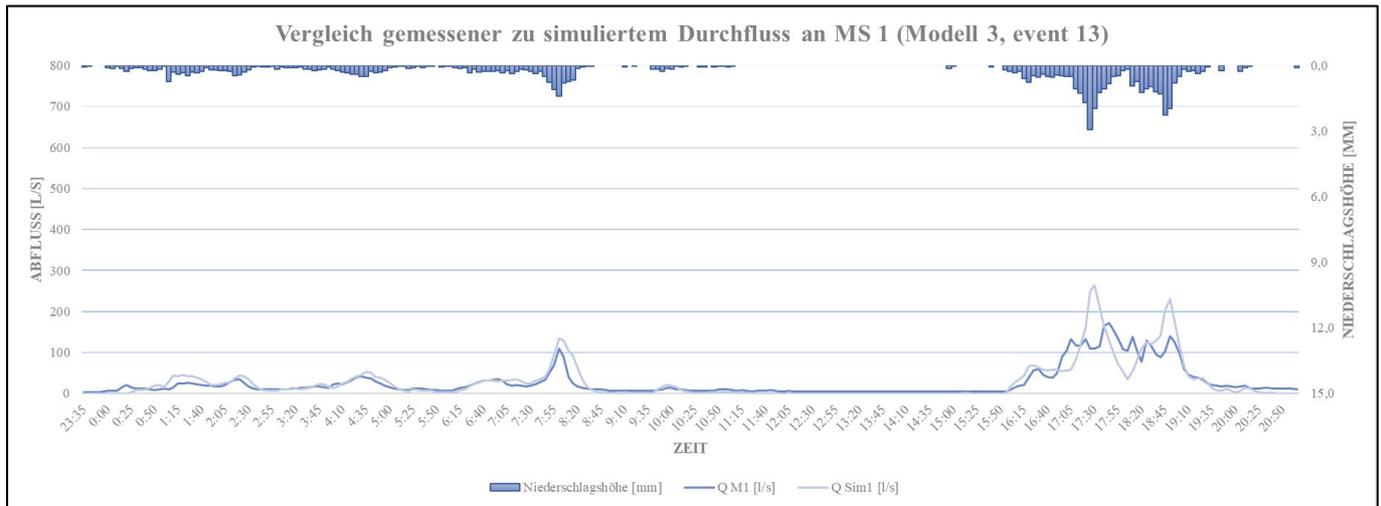
Modell 2 – Gegenüberstellung der Messstellen 1 und 3

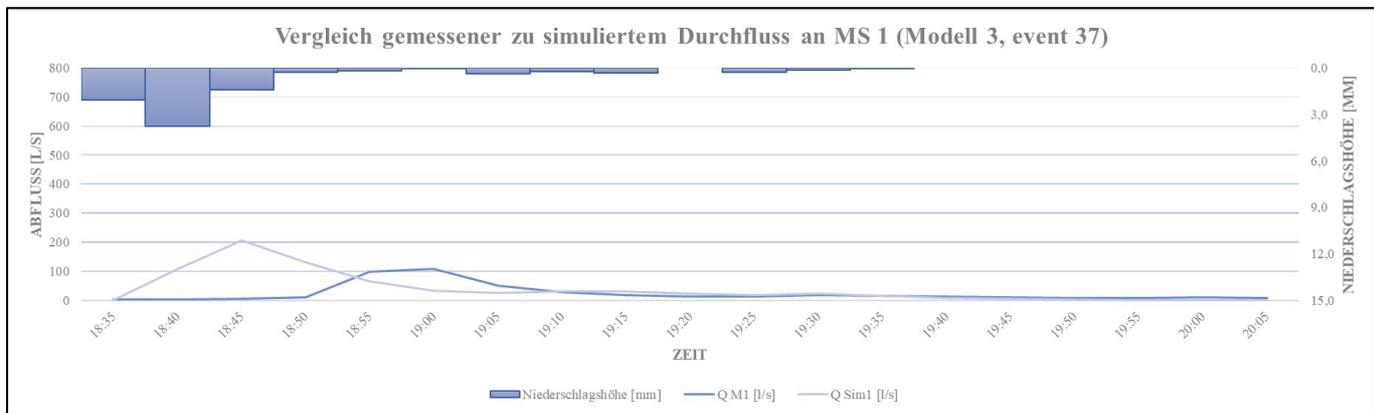
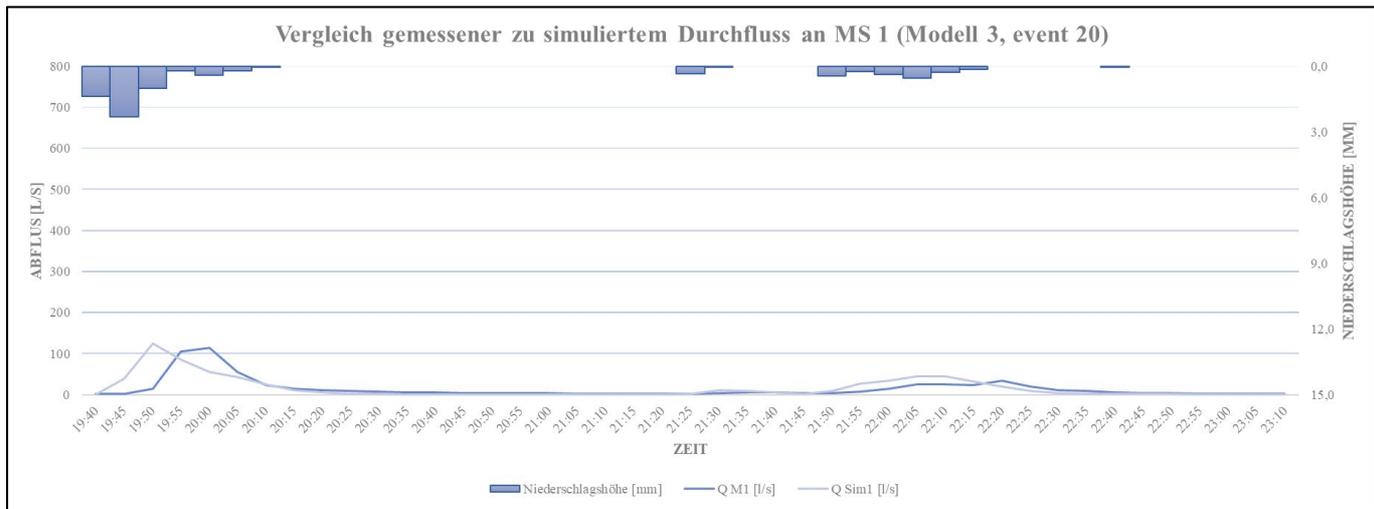
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	-42,84	-20,20	0,47	-14,61	17,73	-1,21	0,61	0,84	1,37
event 16	-43,76	-16,34	0,37	-26,69	32,57	-1,22	0,54	0,32	0,59
event 20	-42,00	19,48	-0,46	-41,72	121,42	-2,91	0,34	-1,78	-5,23
event 37	-11,48	-0,78	0,07	1,32	-14,89	-11,26	-0,87	-0,48	0,55

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 3 – Messstelle 1

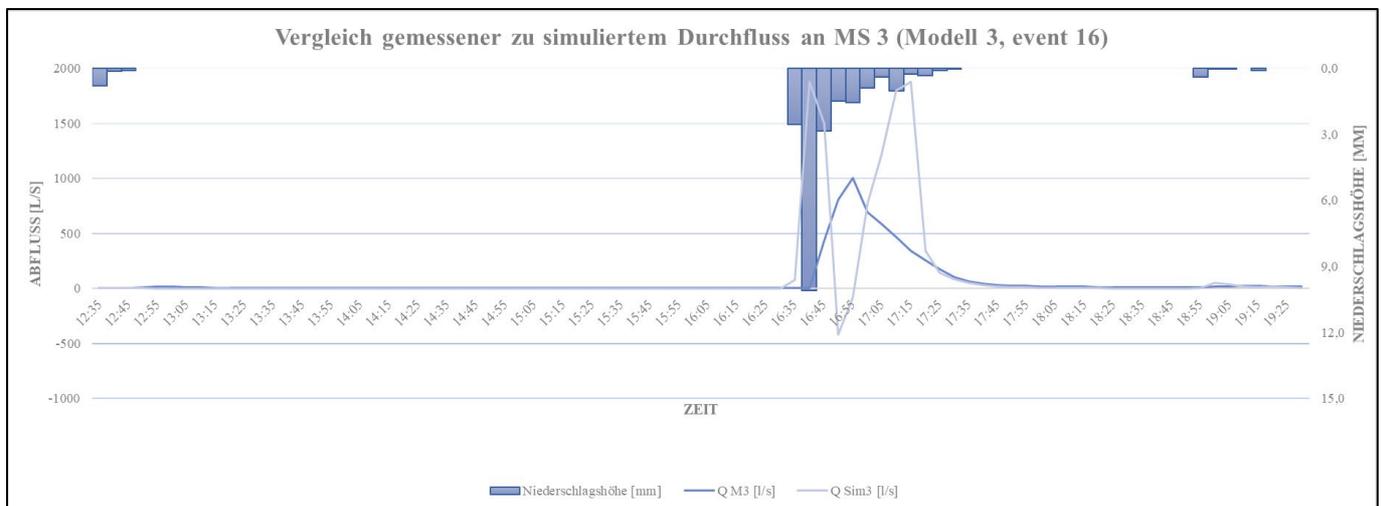
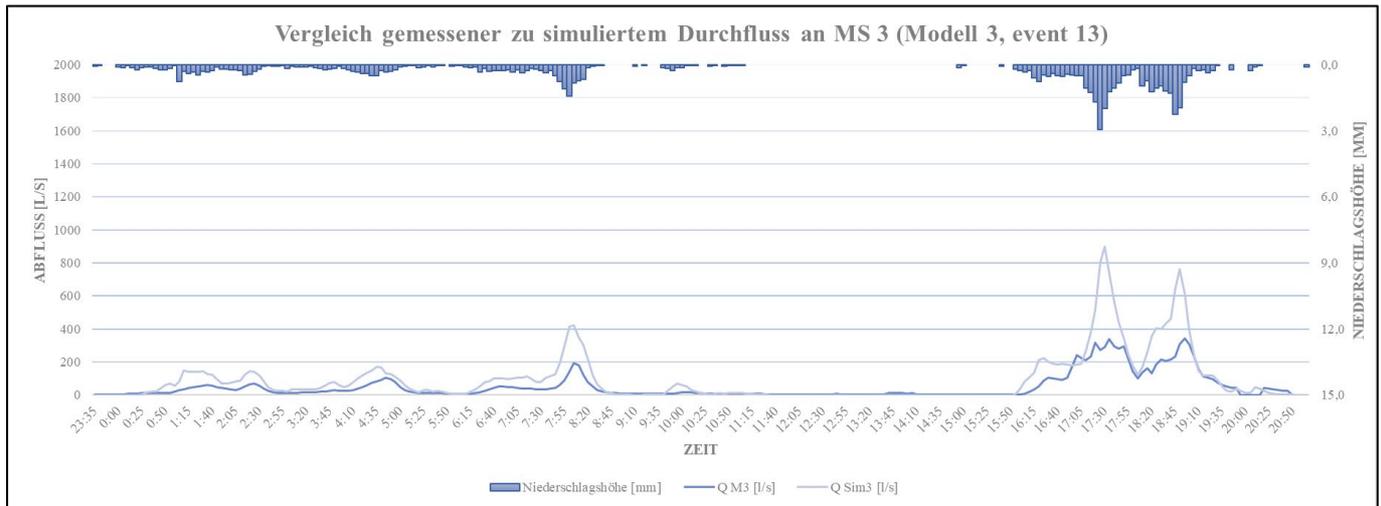
	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2132,99	2063,26	69,73	3,38	263,92	172,33	91,59	53,15	0,54
event 16	752,84	731,60	21,23	2,90	581,29	440,41	140,88	31,99	0,28
event 20	200,51	186,89	13,62	7,29	124,15	114,03	10,12	8,87	0,17
event 37	219,61	132,54	87,07	65,69	206,42	109,46	96,96	88,58	-3,48
Sum	3305,94	3114,29	191,65	6,15	1175,78	836,23	339,55	40,60	-0,62



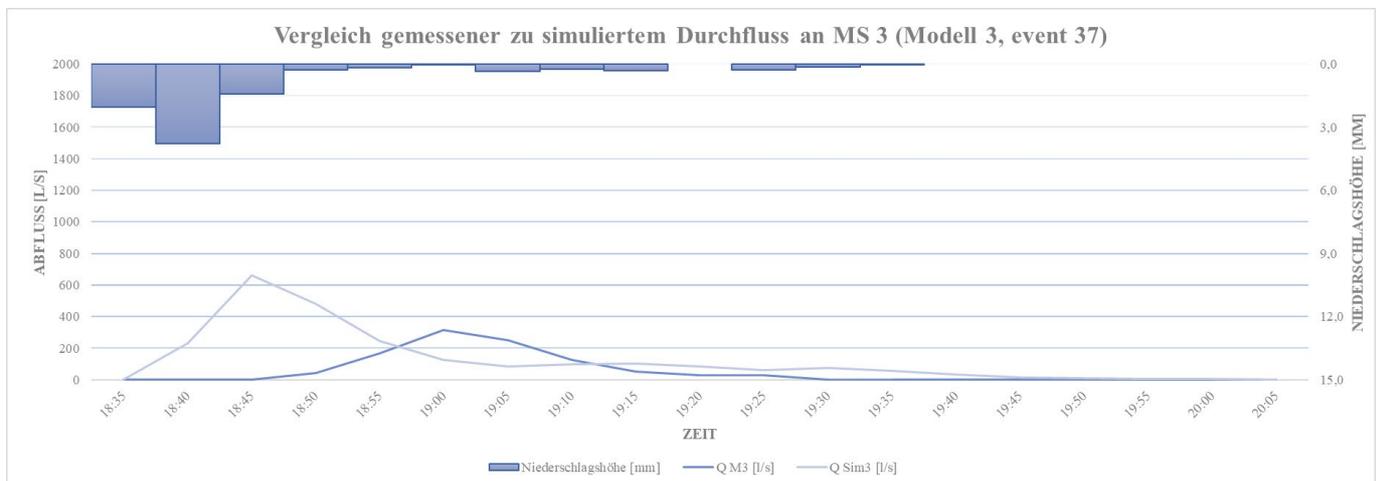
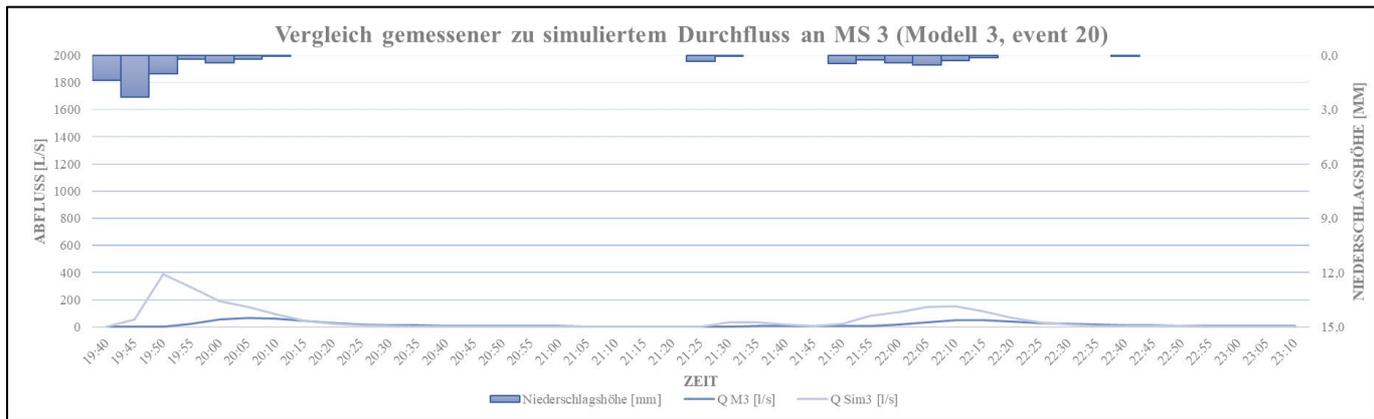


Modell 3 – Messstelle 3

	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	7001,06	3773,74	3227,33	85,52	898,37	343,66	554,71	161,41	-0,62
event 16	2855,06	1679,32	1175,74	70,01	1876,81	1006,38	870,43	86,49	-3,31
event 20	643,54	227,15	416,39	183,31	386,82	66,64	320,18	480,46	-20,80
event 37	710,63	305,35	405,28	132,73	660,21	313,66	346,55	110,48	-3,88
Sum	11210,30	5985,56	5224,74	87,29	3822,20	1730,34	2091,86	120,89	-7,15



Anlagen



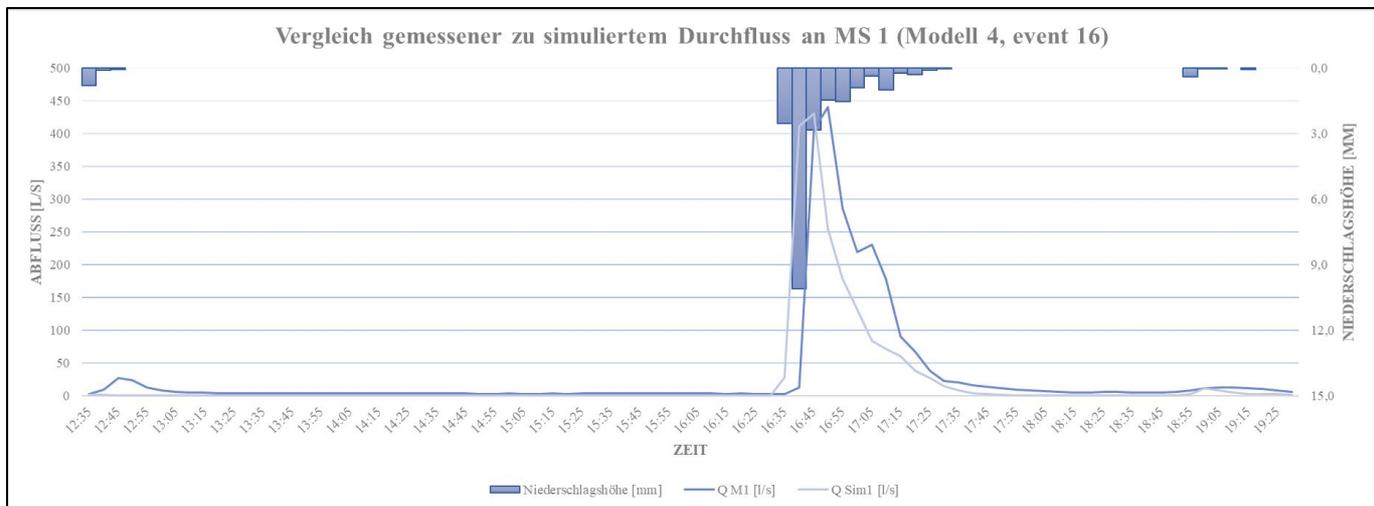
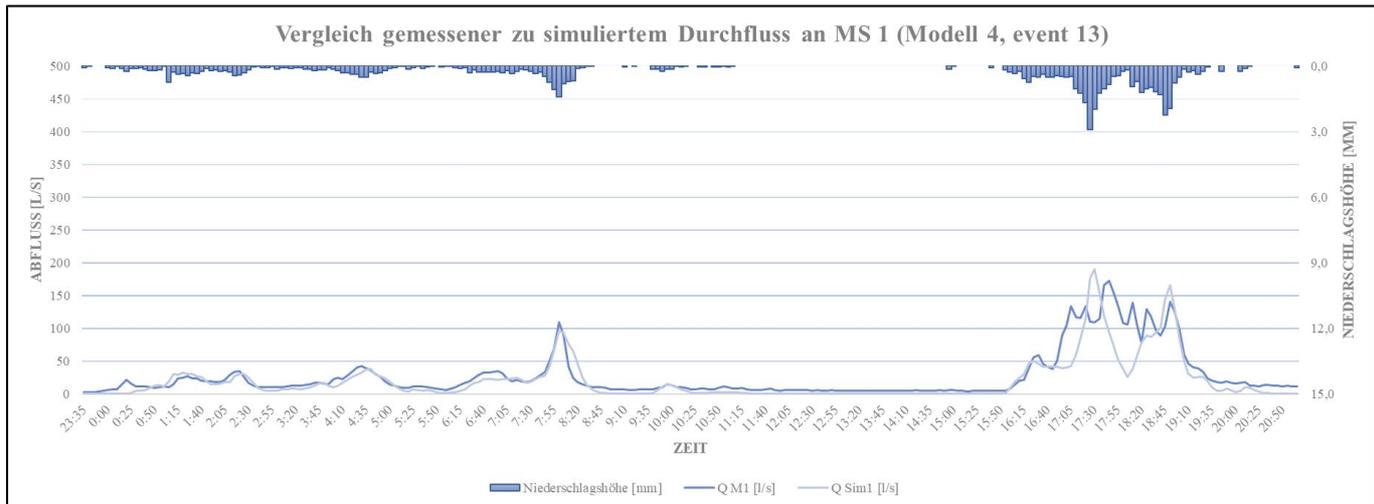
Modell 3 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

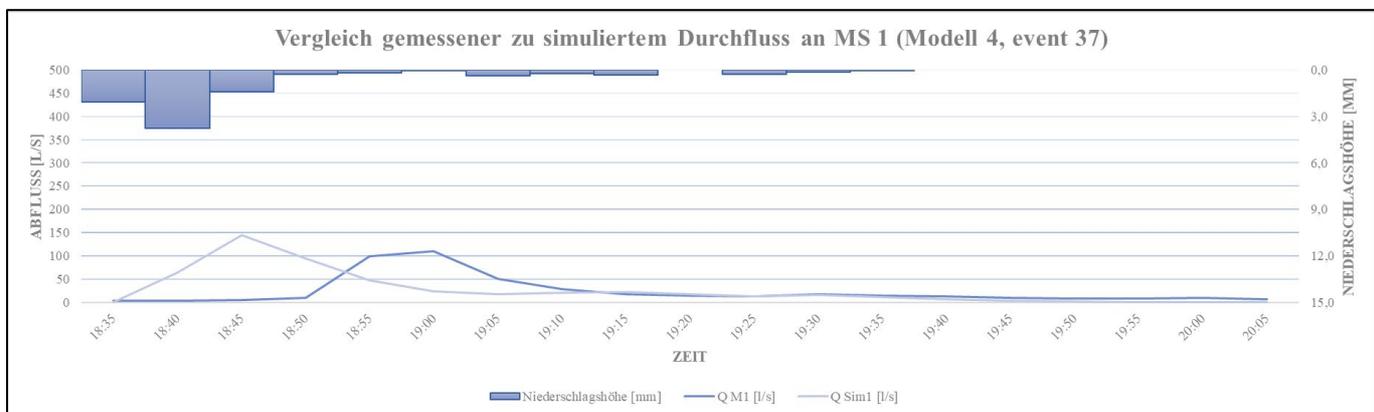
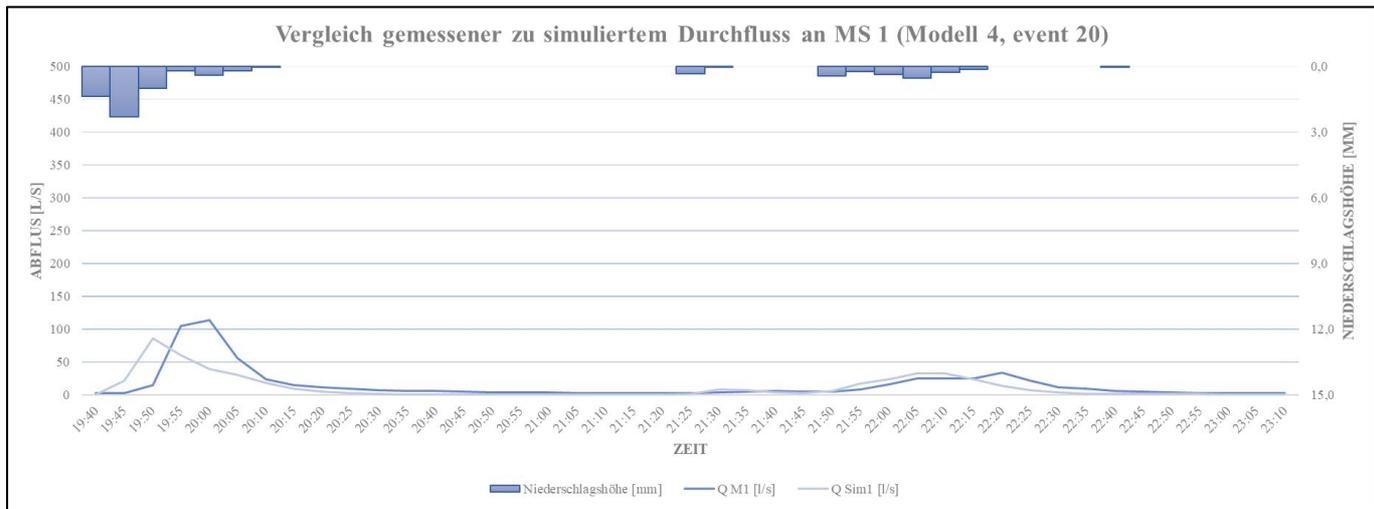
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	3,38	85,52	25,31	53,15	161,41	3,04	0,54	-0,62	-1,14
event 16	2,90	70,01	24,12	31,99	86,49	2,70	0,28	-3,31	-11,95
event 20	7,29	183,31	25,16	8,87	480,46	54,16	0,17	-20,80	-120,72
event 37	65,69	132,73	2,02	88,58	110,48	1,25	-3,48	-3,88	1,12

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 4 – Messstelle 1

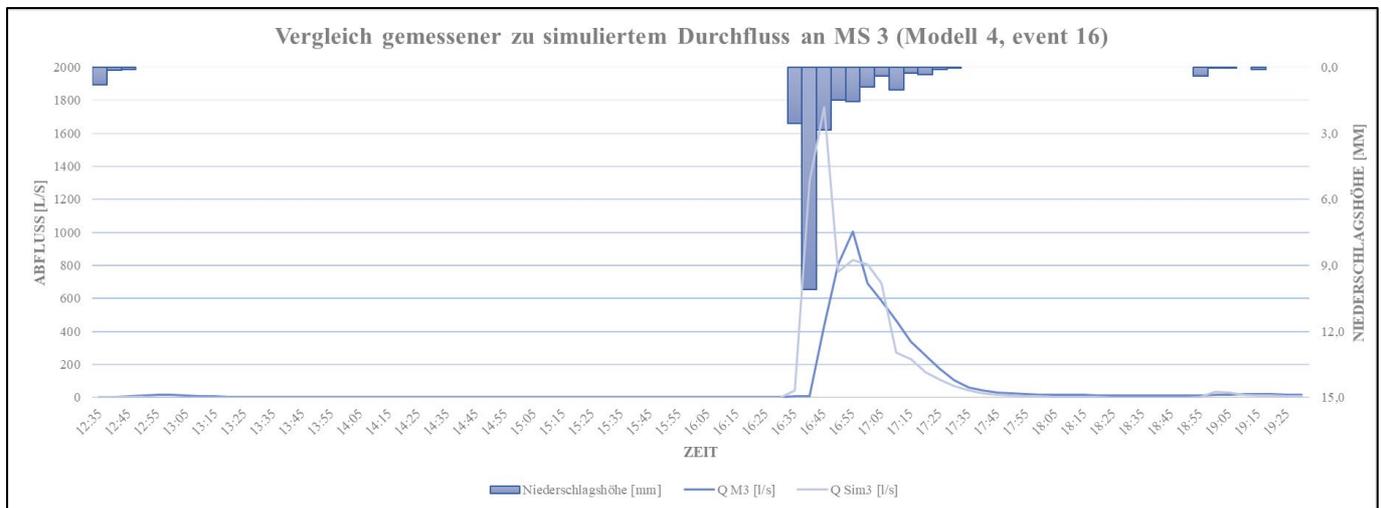
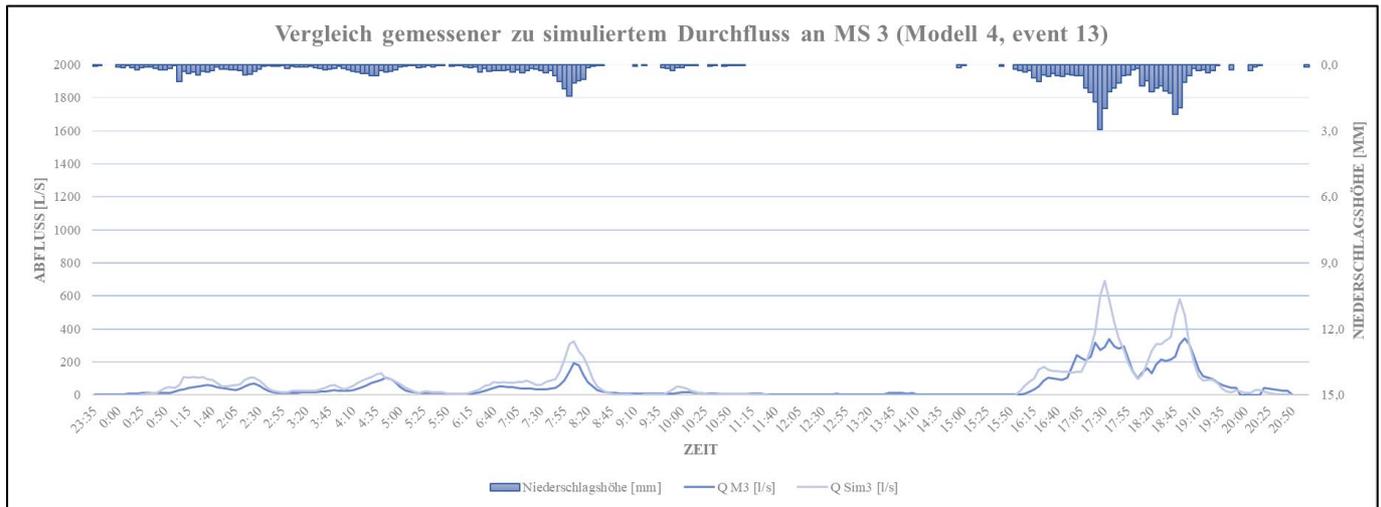
	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1521,69	2063,26	-541,57	-26,25	189,94	172,33	17,61	10,22	0,69
event 16	535,59	731,60	-196,01	-26,79	430,32	440,41	-10,10	-2,29	0,52
event 20	138,80	186,89	-48,09	-25,73	85,42	114,03	-28,61	-25,09	0,37
event 37	152,02	132,54	19,48	14,70	144,64	109,46	35,18	32,14	-1,51
Sum	2348,10	3114,29	-766,19	-24,60	850,32	836,23	14,09	1,68	0,02



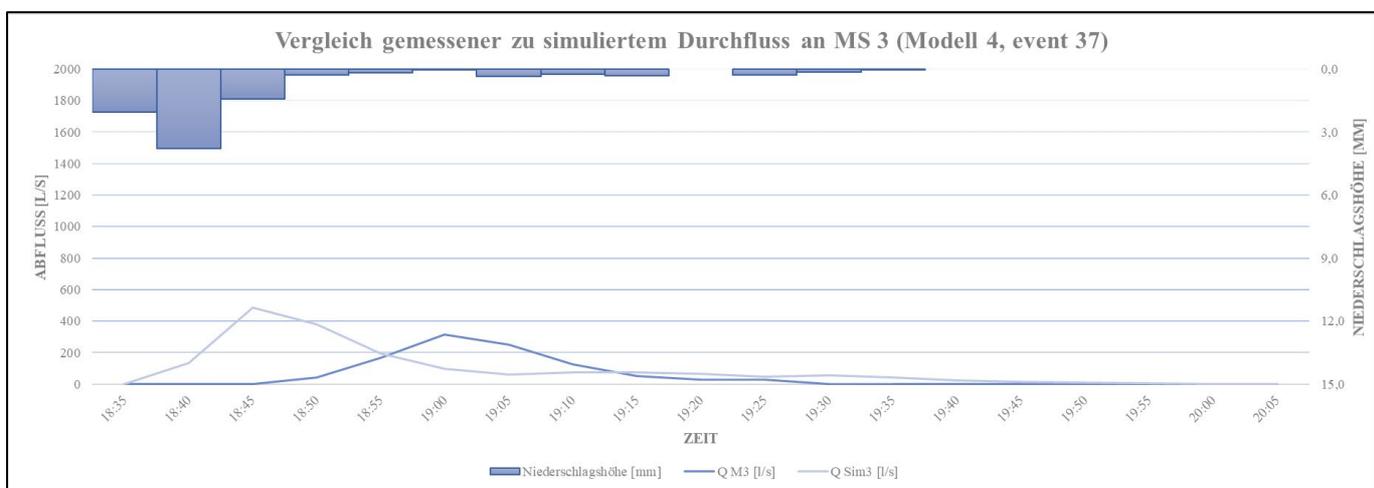
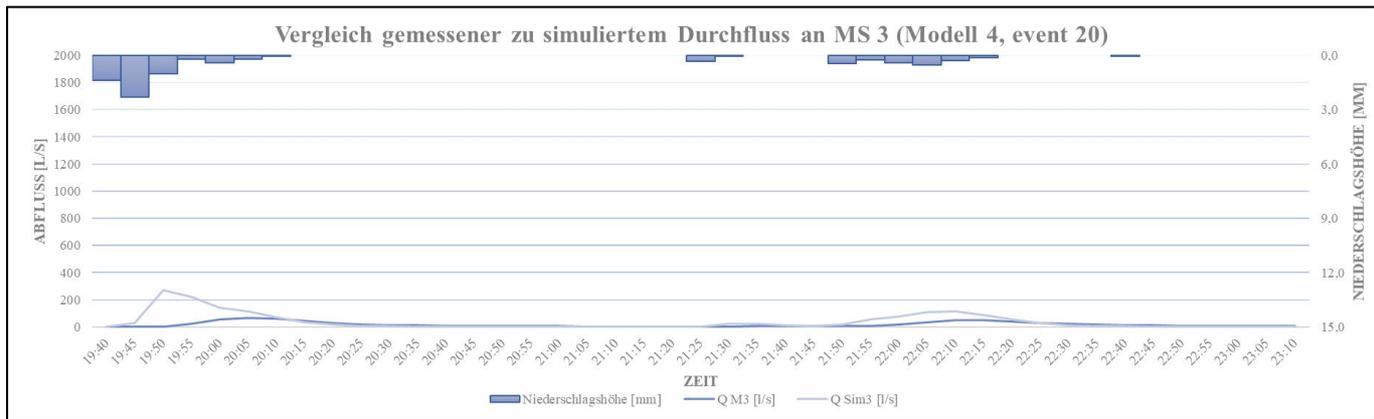


Modell 4 -Messstelle 1

	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	5325,23	3773,74	1551,49	41,11	693,72	343,66	350,06	101,86	0,41
event 16	2192,63	1679,32	513,31	30,57	1757,89	1006,38	751,51	74,67	-0,30
event 20	480,21	227,15	253,06	111,40	272,92	66,64	206,28	309,54	-9,66
event 37	531,33	305,35	225,98	74,01	486,23	313,66	172,57	55,02	-1,92
Sum	8529,40	5985,56	2543,84	42,50	3210,75	1730,34	1480,41	85,56	-2,87



Anlagen



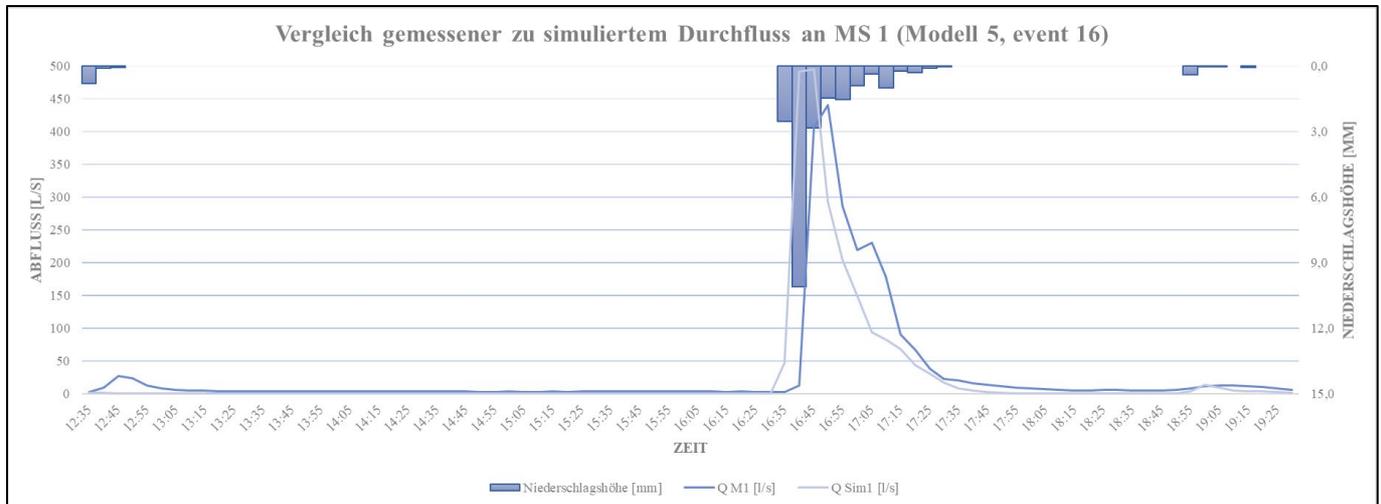
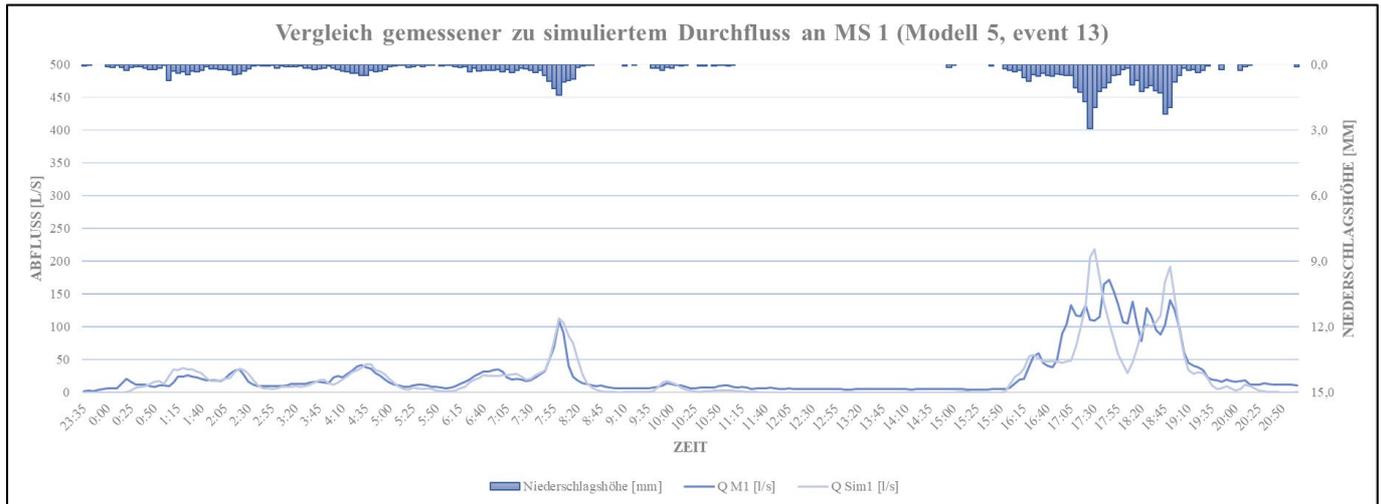
Modell 4 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

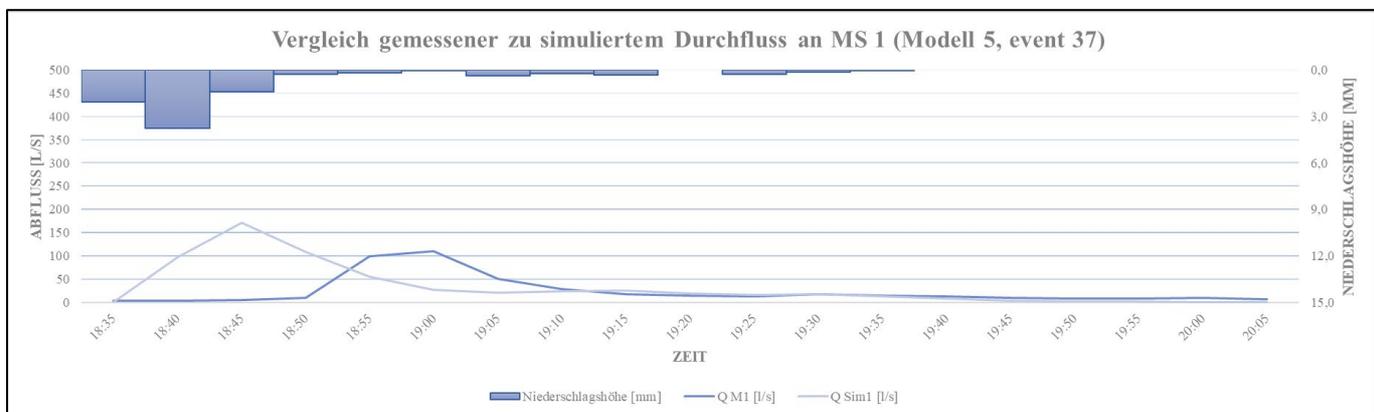
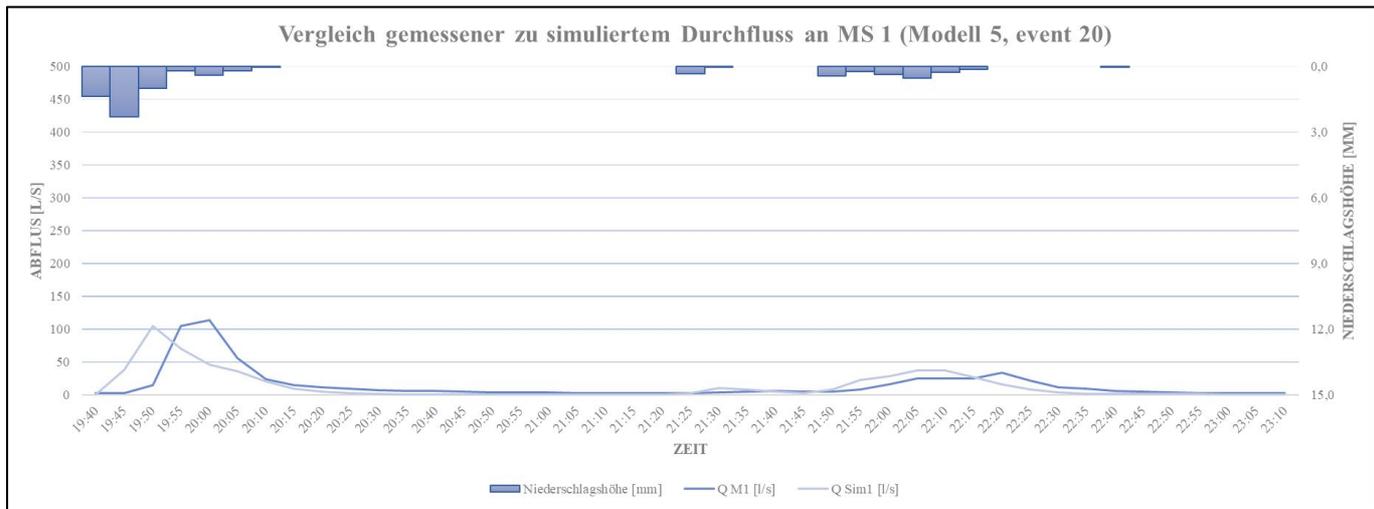
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	-26,25	41,11	-1,57	10,22	101,86	9,97	0,69	0,41	0,60
event 16	-26,79	30,57	-1,14	-2,29	74,67	-32,58	0,52	-0,30	-0,58
event 20	-25,73	111,40	-4,33	-25,09	309,54	-12,34	0,37	-9,66	-26,07
event 37	14,70	74,01	5,04	32,14	55,02	1,71	-1,51	-1,92	1,27

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 5 – Messstelle 1

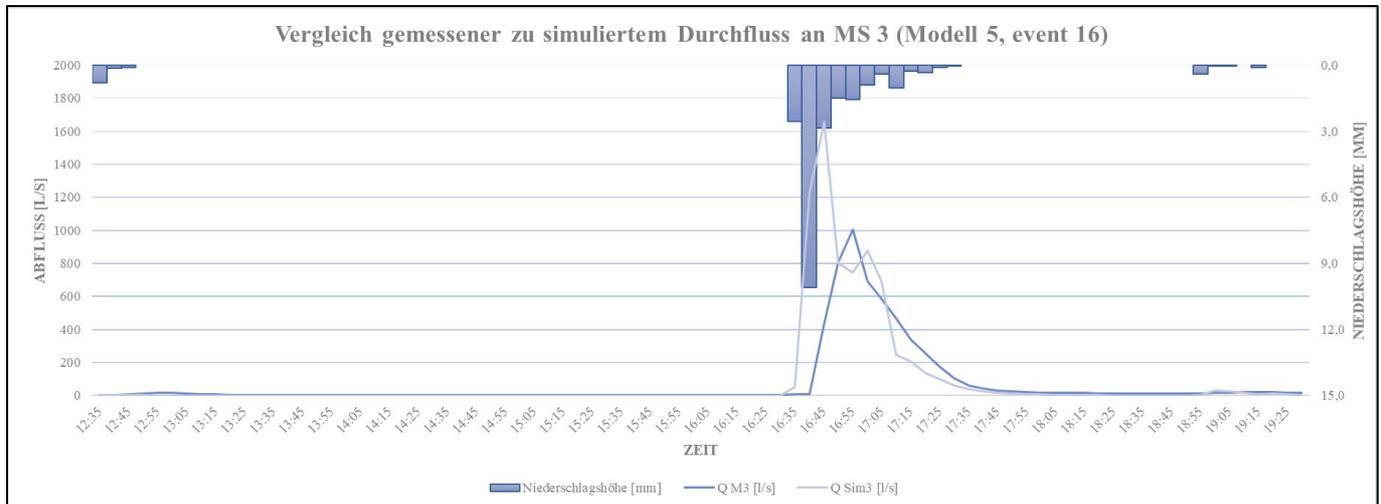
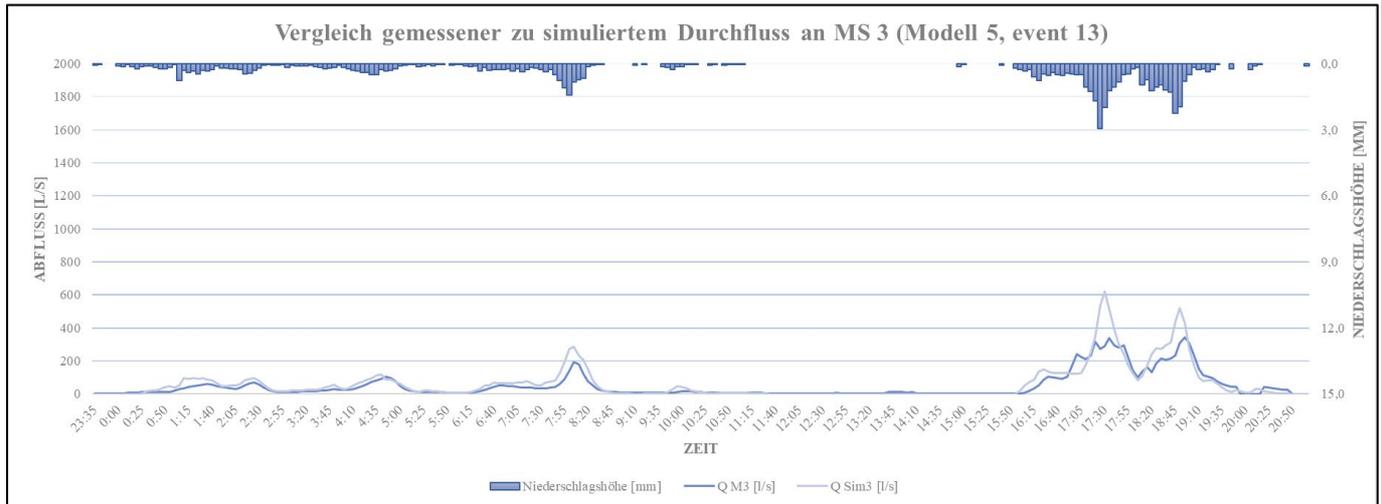
	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta (vol)	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1768,08	2063,26	-295,18	-14,31	218,45	172,33	46,12	26,76	0,67
event 16	623,41	731,60	-108,19	-14,79	494,14	440,41	53,73	12,20	0,42
event 20	167,05	186,89	-19,84	-10,62	104,70	114,03	-9,33	-8,18	0,27
event 37	182,70	132,54	50,16	37,85	170,66	109,46	61,20	55,91	-2,36
Sum	2741,24	3114,29	-373,06	-11,98	987,94	836,23	151,71	18,14	-0,25



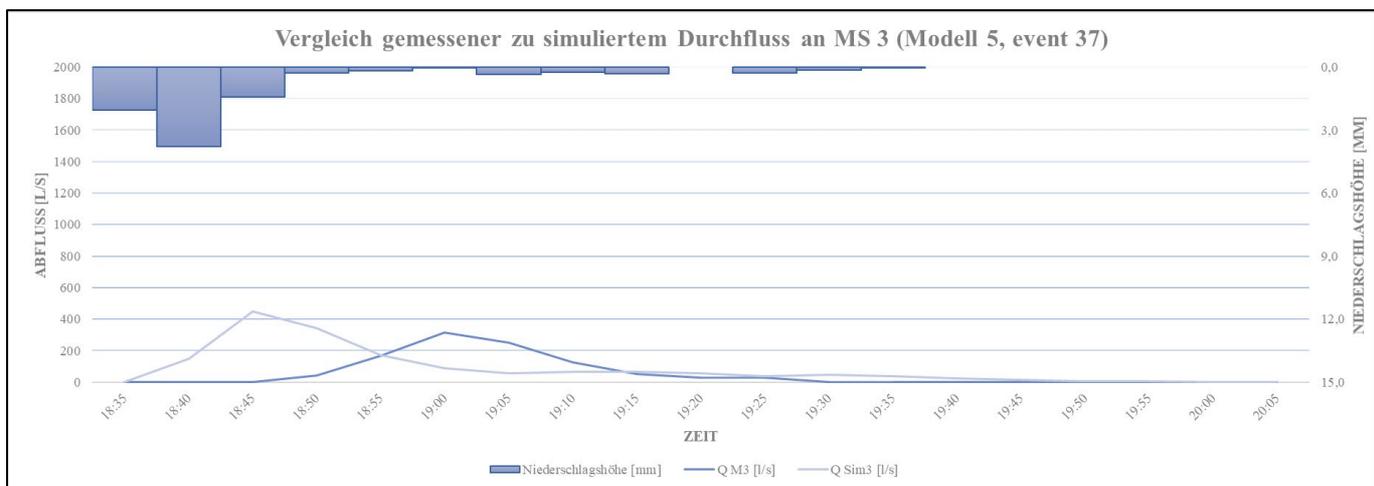
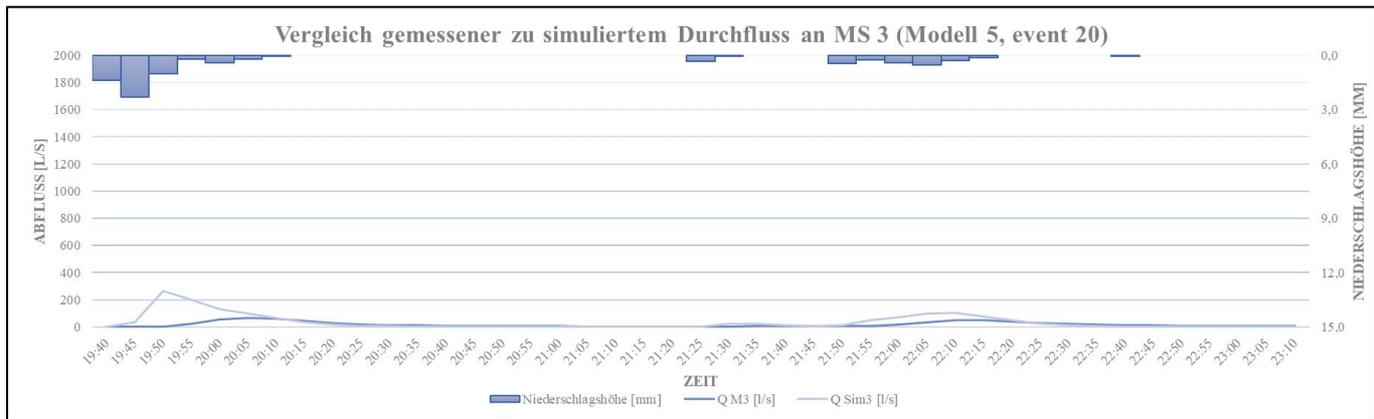


Modell 5 – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta (vol)	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4752,87	3773,74	979,13	25,95	618,90	343,66	275,24	80,09	0,63
event 16	2115,13	1679,32	435,81	25,95	1656,05	1006,38	649,67	64,56	-0,16
event 20	441,13	227,15	213,97	94,20	265,17	66,64	198,53	297,91	-8,19
event 37	487,54	305,35	182,19	59,67	447,44	313,66	133,78	42,65	-1,60
Sum	7796,67	5985,56	1811,11	30,26	2987,56	1730,34	1257,22	72,66	-2,33



Anlagen



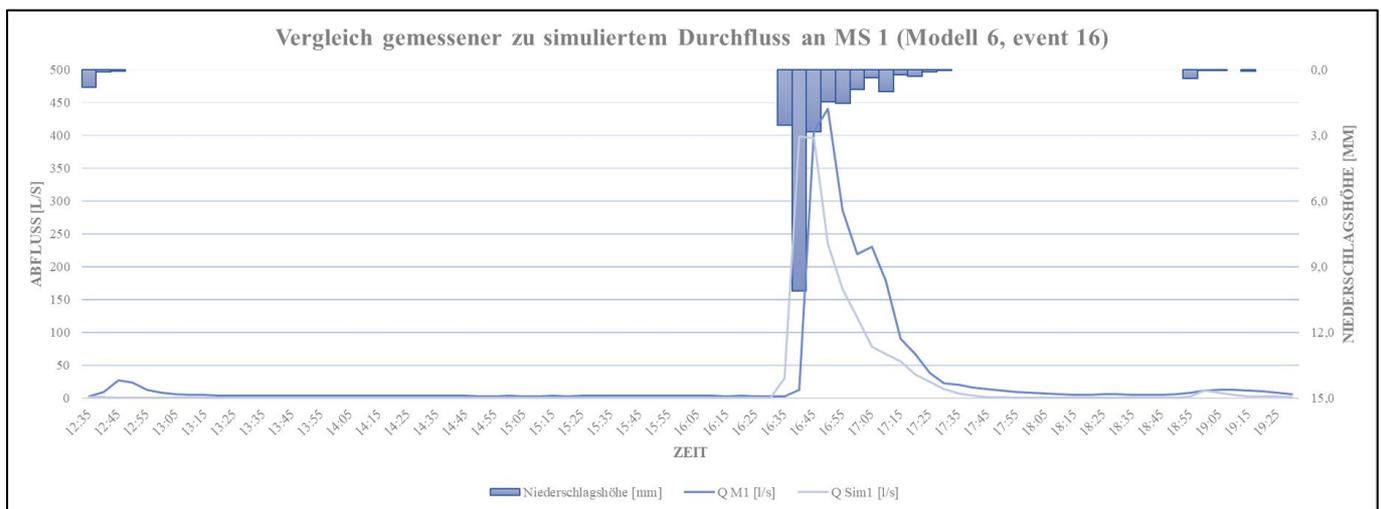
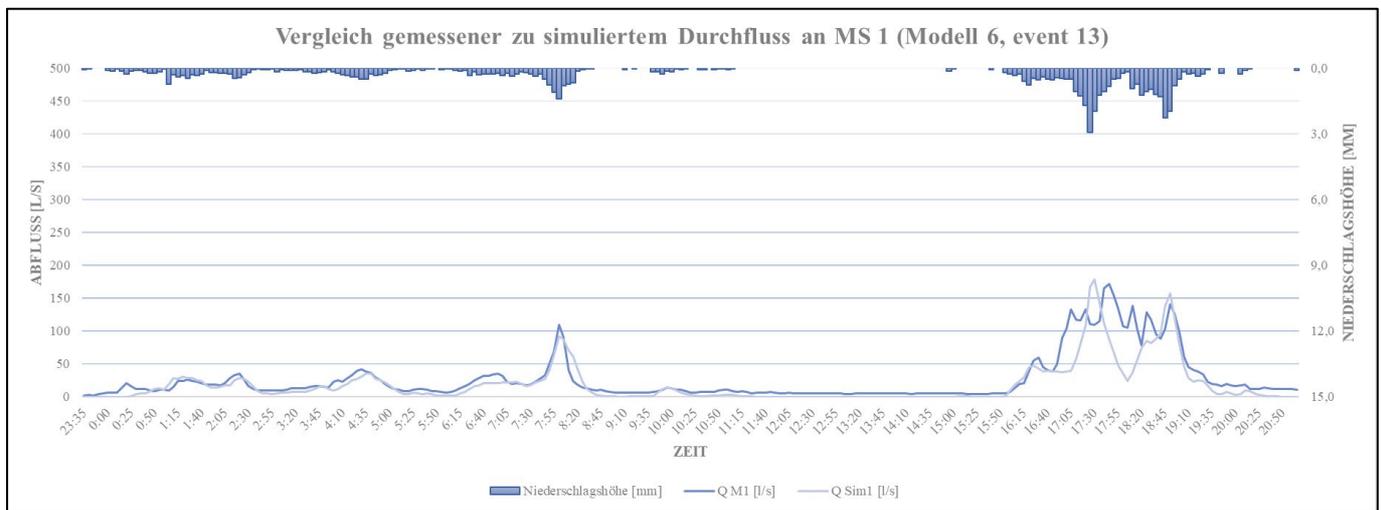
Modell 5 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	-14,31	25,95	-1,81	26,76	80,09	2,99	0,67	0,63	0,93
event 16	-14,79	25,95	-1,75	12,20	64,56	5,29	0,42	-0,16	-0,38
event 20	-10,62	94,20	-8,87	-8,18	297,91	-36,41	0,27	-8,19	-30,07
event 37	37,85	59,67	1,58	55,91	42,65	0,76	-2,36	-1,60	0,68

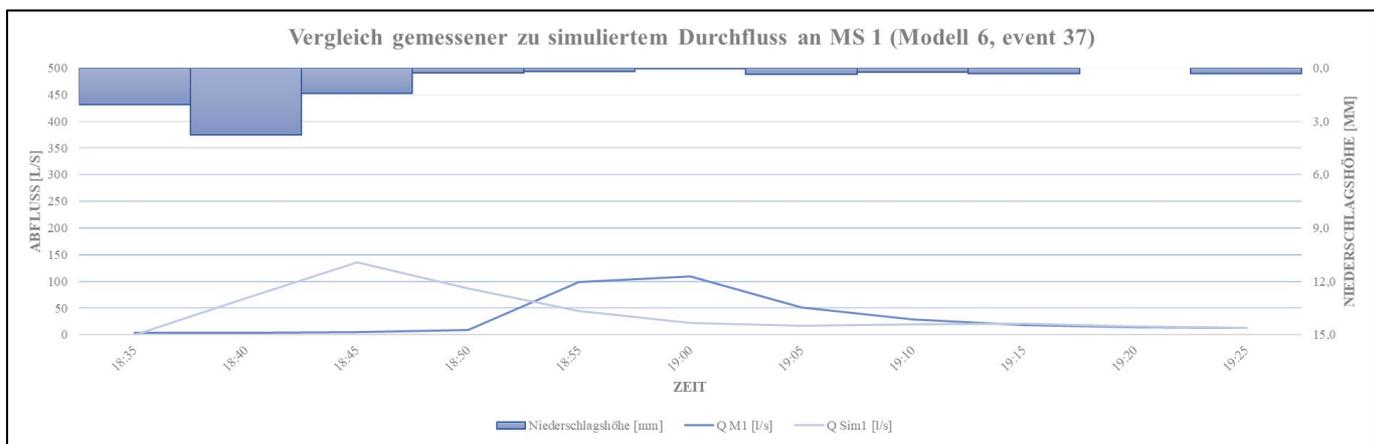
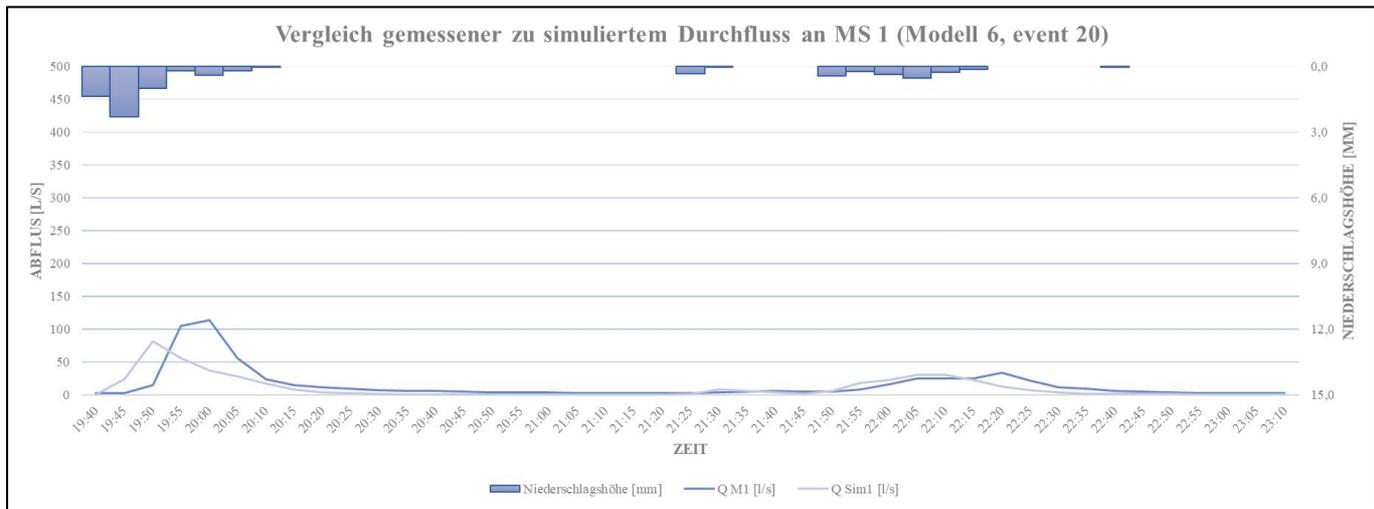
Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 6 – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1438,33	2063,26	-624,93	-30,29	178,33	172,33	6,00	3,48	0,68
event 16	503,05	731,60	-228,55	-31,24	397,84	440,41	-42,57	-9,67	0,51
event 20	131,83	186,89	-55,06	-29,46	81,66	114,03	-32,37	-28,39	0,35
event 37	132,62	106,46	26,17	24,58	135,71	109,46	26,25	23,99	-1,71
Sum	2205,84	3088,21	-882,37	-28,57	793,55	836,23	-42,68	-5,10	-0,05

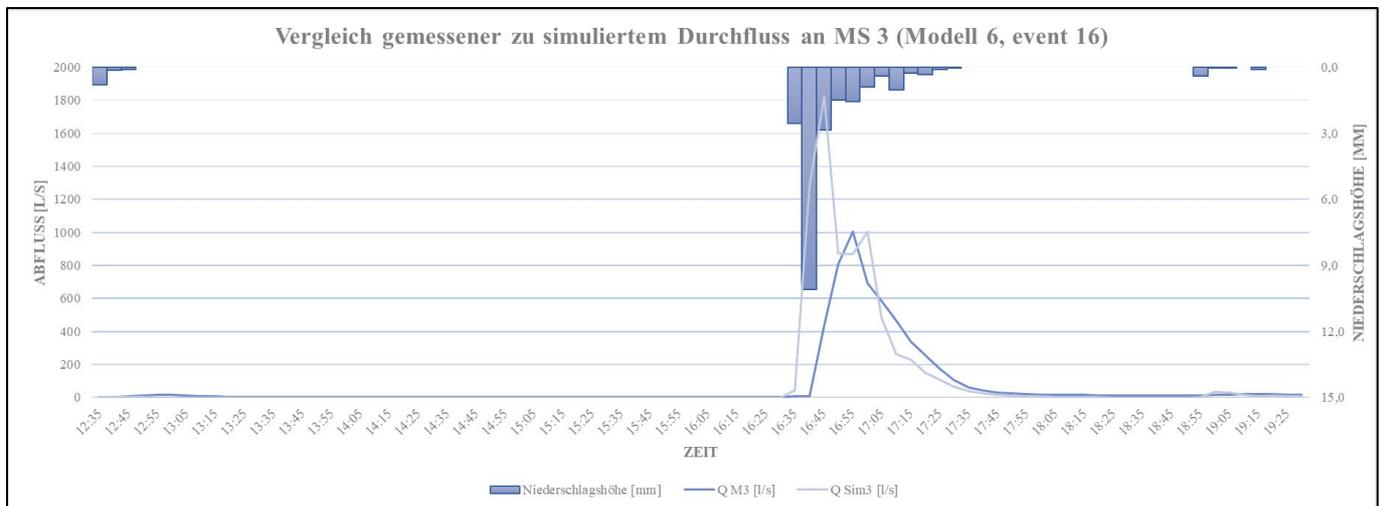
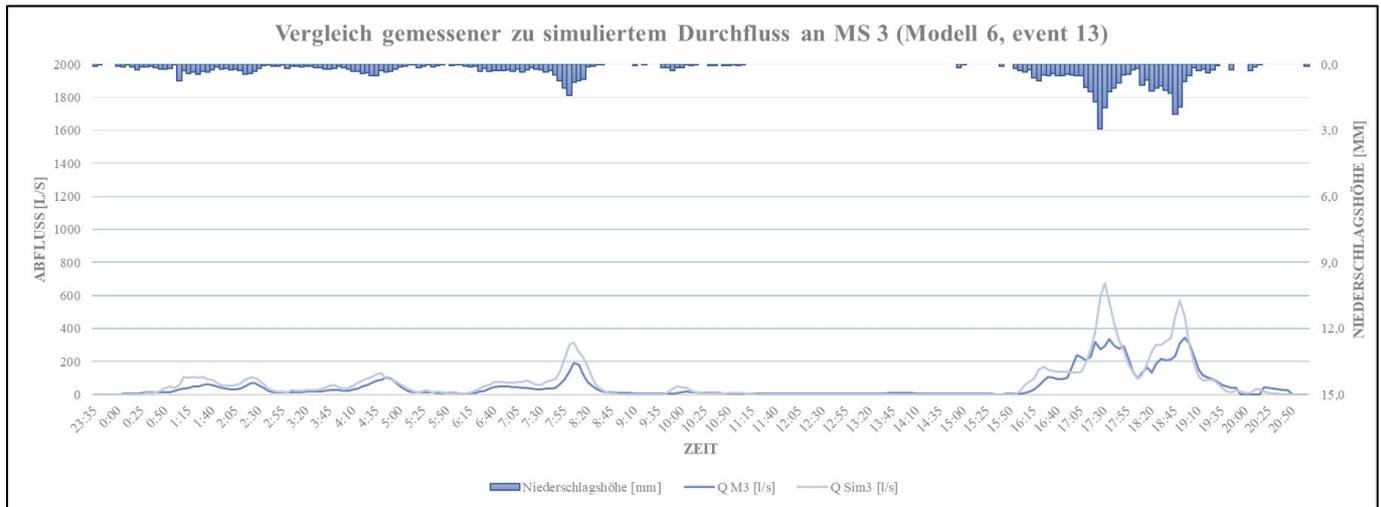


Anlagen

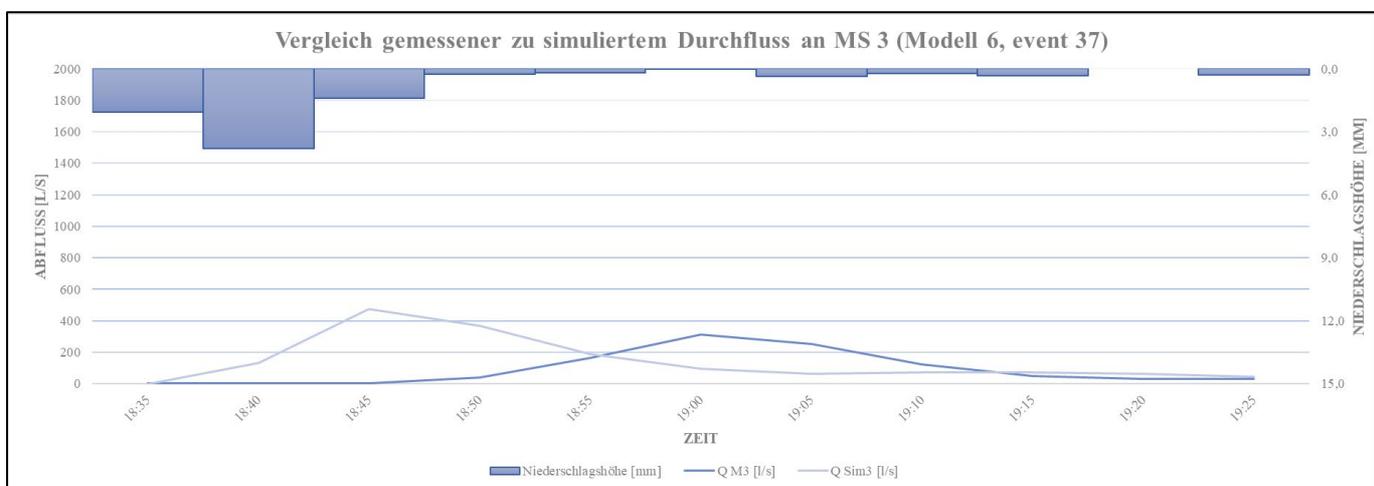
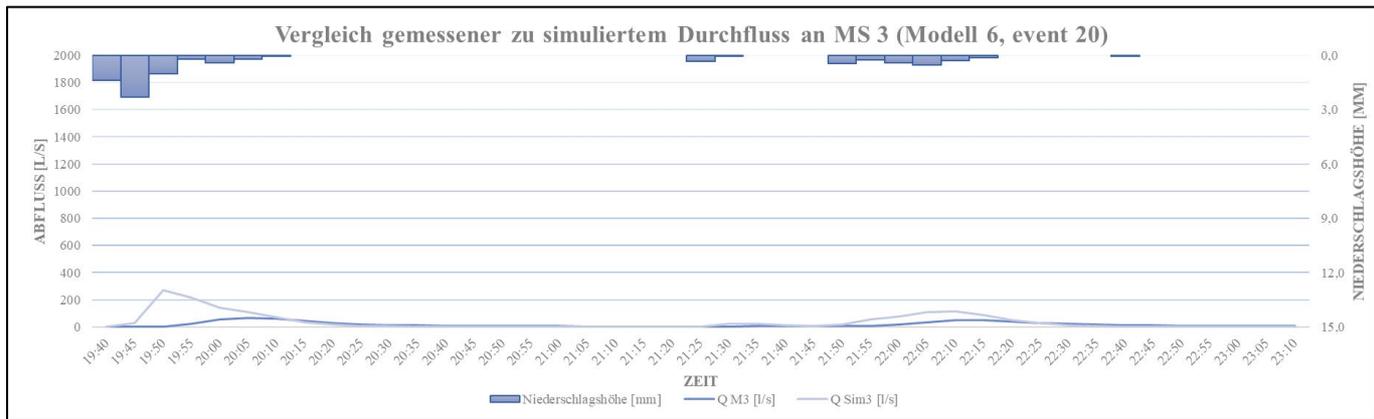


Modell 6 – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	Delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	5208,77	3773,74	1435,03	38,03	678,08	343,66	334,42	97,31	0,46
event 16	2237,03	1679,32	557,71	33,21	1824,71	1006,38	818,33	81,31	-0,37
event 20	470,64	227,15	243,49	107,19	268,52	66,64	201,88	302,93	-9,21
event 37	474,25	305,35	168,90	55,31	476,70	313,66	163,04	51,98	-2,74
Sum	8390,69	5985,56	2405,13	40,18	3248,00	1730,34	1517,66	87,71	-2,96



Anlagen



Modell 6 - Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

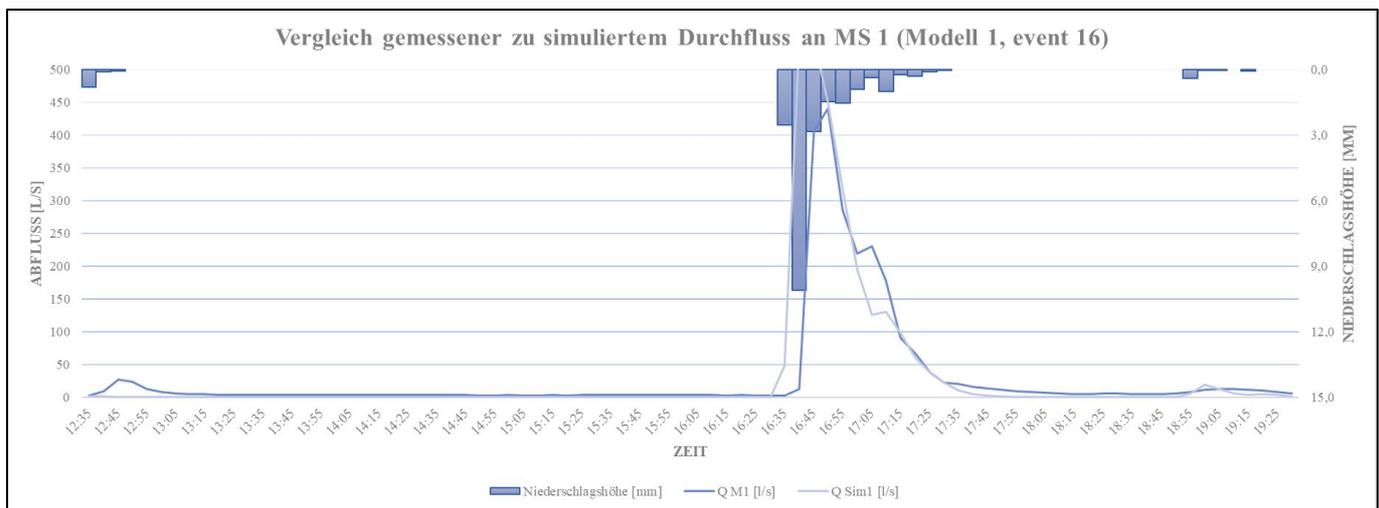
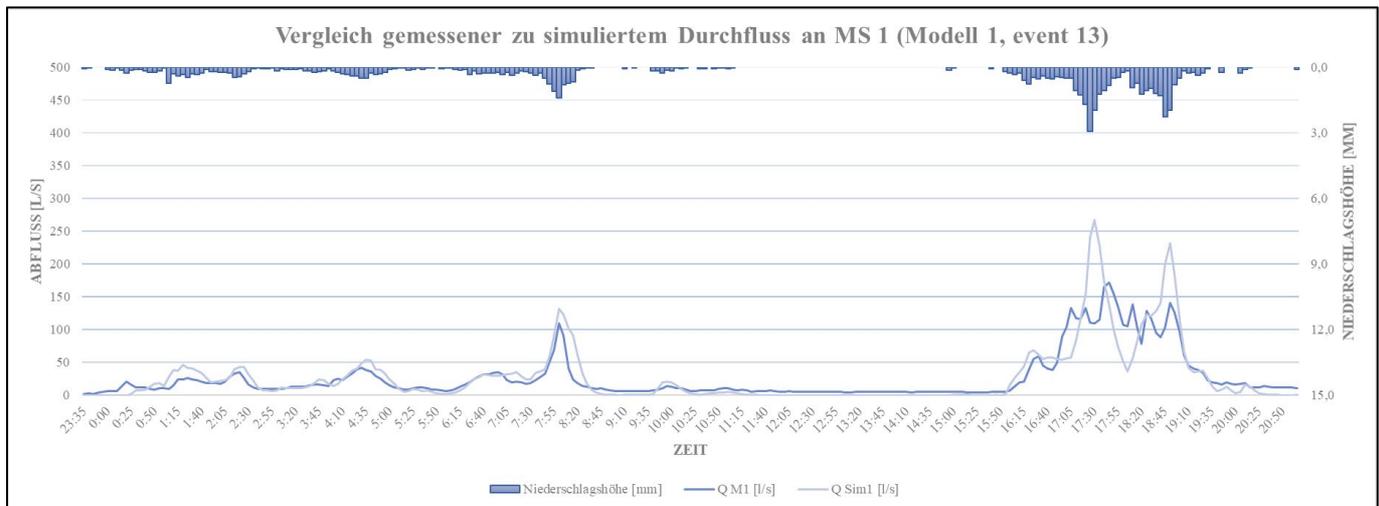
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	-30,29	38,03	-1,26	3,48	97,31	27,94	0,68	0,46	0,68
event 16	-31,24	33,21	-1,06	-9,67	81,31	-8,41	0,51	-0,37	-0,73
event 20	-29,46	107,19	-3,64	-28,39	302,93	-10,67	0,35	-9,21	-26,61
event 37	8,65	70,23	8,12	23,99	51,98	2,17	-1,37	-1,83	1,33

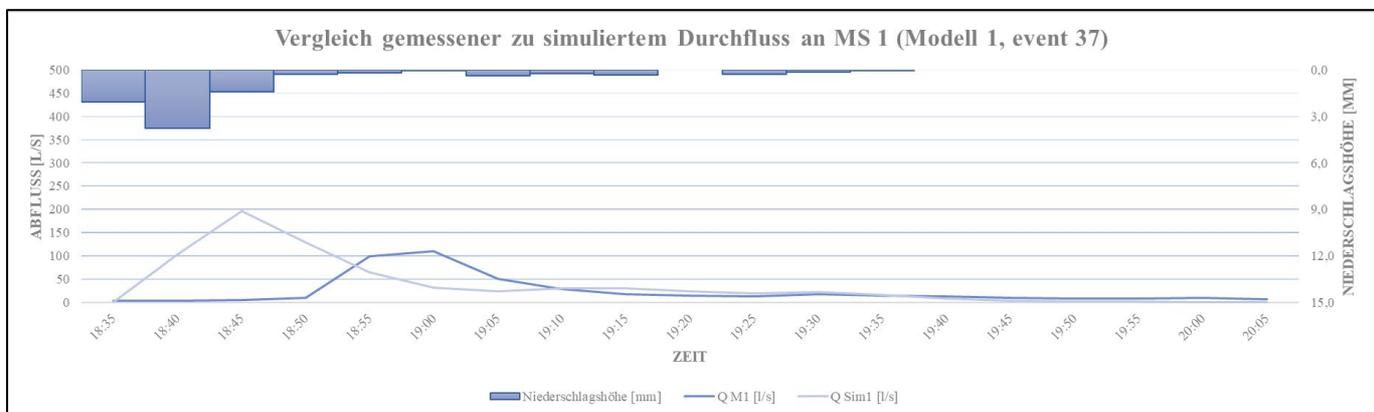
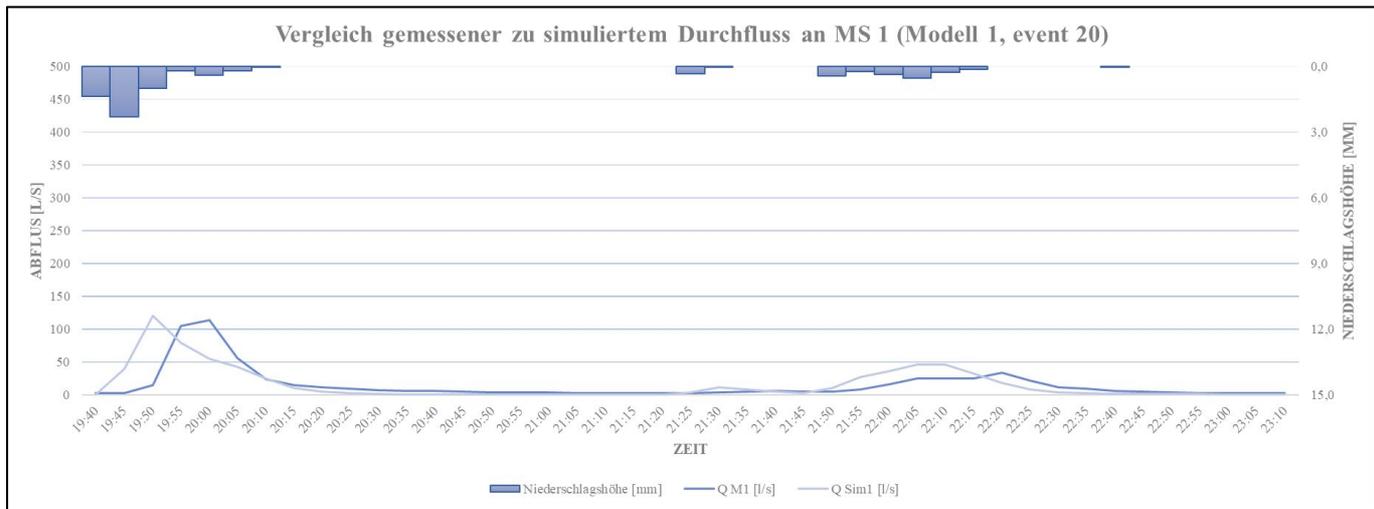
Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Anlage B – Auswertung Modellvarianten der angepassten Modellstruktur

Modell 1 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 1

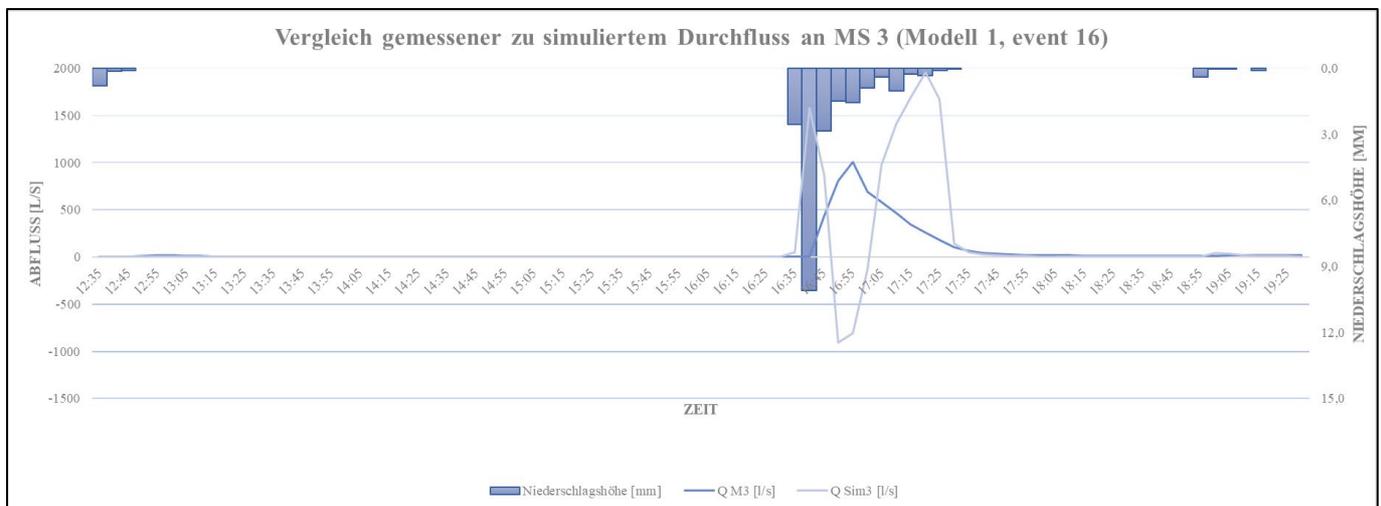
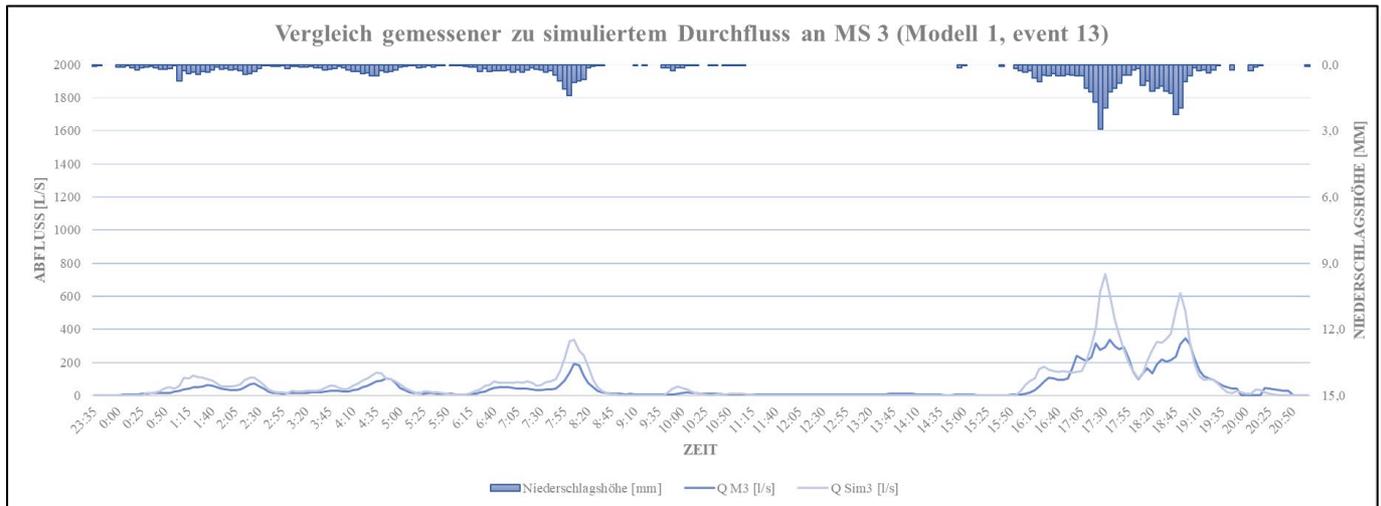
	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2126,90	2063,26	63,64	3,08	266,98	172,33	94,65	54,92	0,55
event 16	796,89	731,60	65,29	8,92	545,28	440,41	104,87	23,81	0,38
event 20	194,20	186,89	7,31	3,91	120,08	114,03	6,05	5,30	0,19
event 37	211,81	132,54	79,27	59,81	196,84	109,46	87,38	79,83	-3,18
Sum	3329,80	3114,29	215,51	6,92	1129,17	836,23	292,94	35,03	-0,52



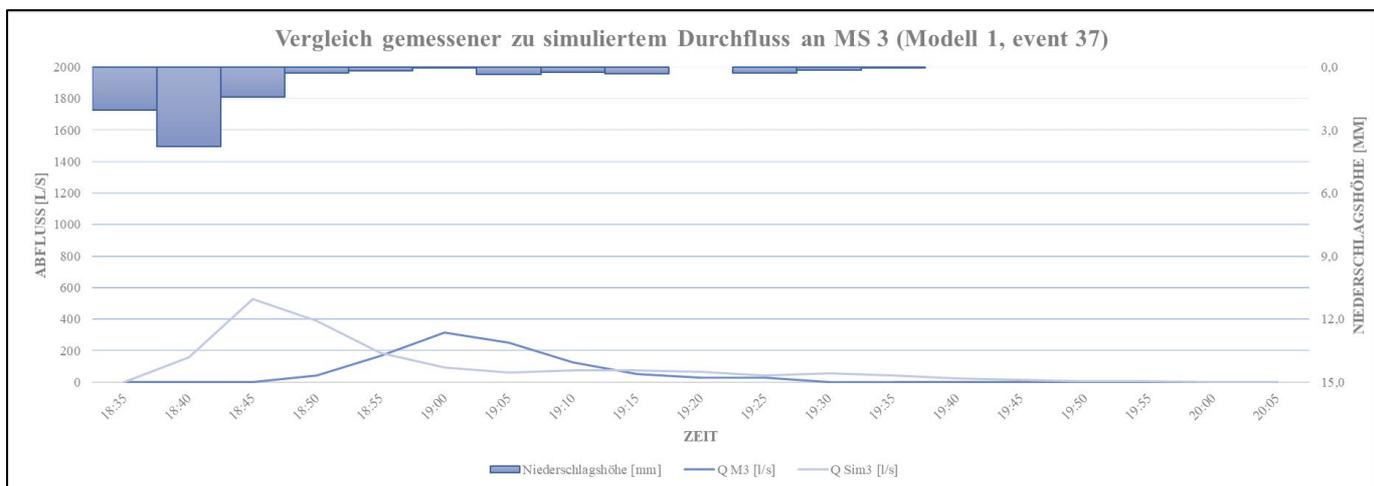
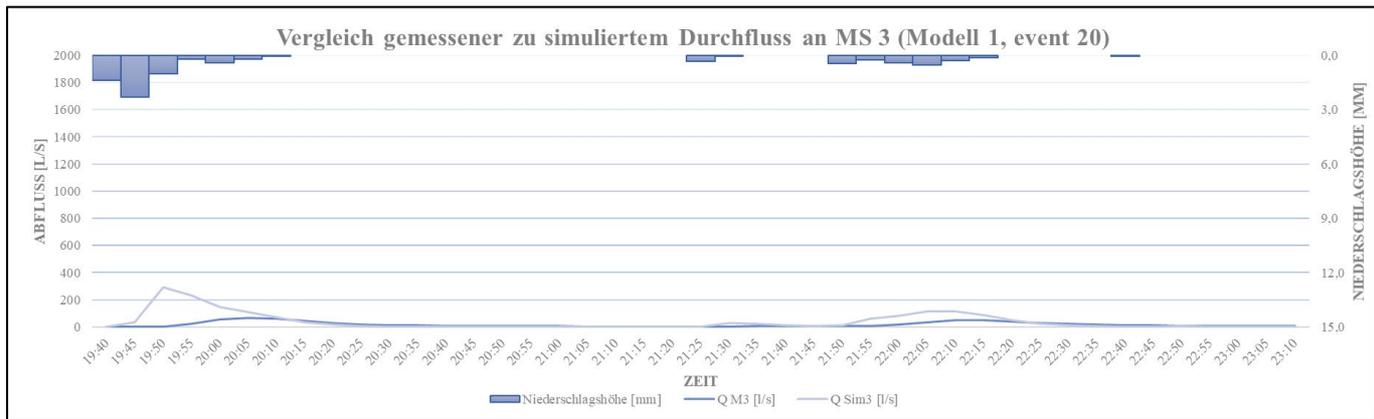


Modell 1 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 3

	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	5523,58	3773,74	1749,85	46,37	731,93	343,66	388,27	112,98	0,29
event 16	2634,92	1679,32	955,60	56,90	1955,14	1006,38	948,76	94,27	-5,37
event 20	489,28	227,15	262,12	115,39	293,03	66,64	226,39	339,72	-11,04
event 37	547,35	305,35	242,00	79,25	528,53	313,66	214,87	68,50	-2,29
Sum	9195,13	5985,56	3209,57	53,62	3508,63	1730,34	1778,29	102,77	-4,60



Anlagen



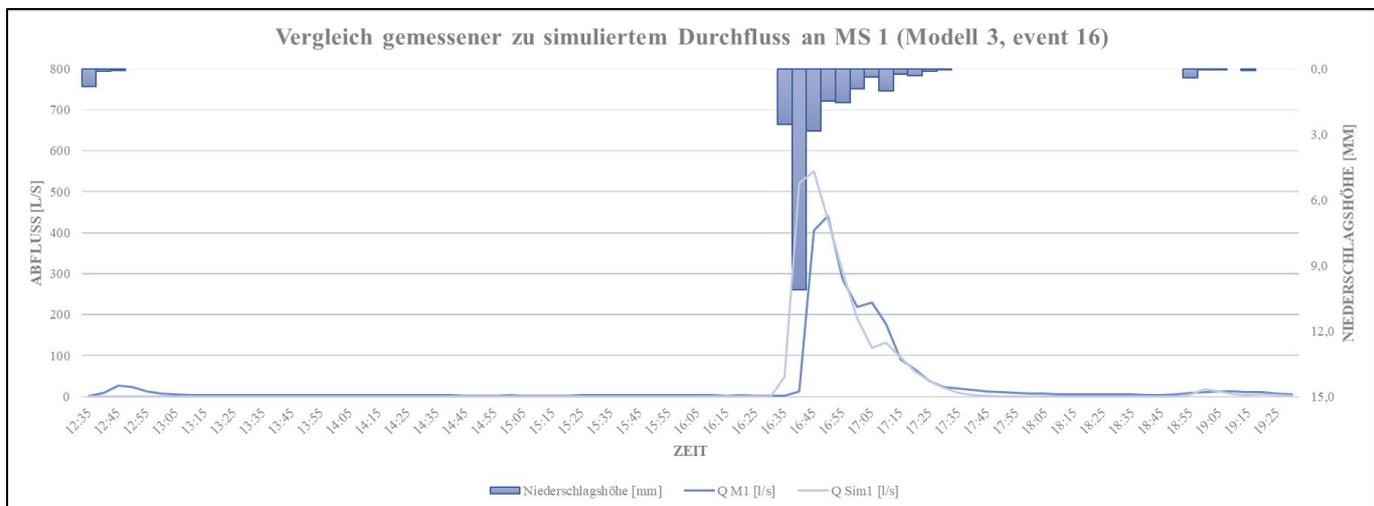
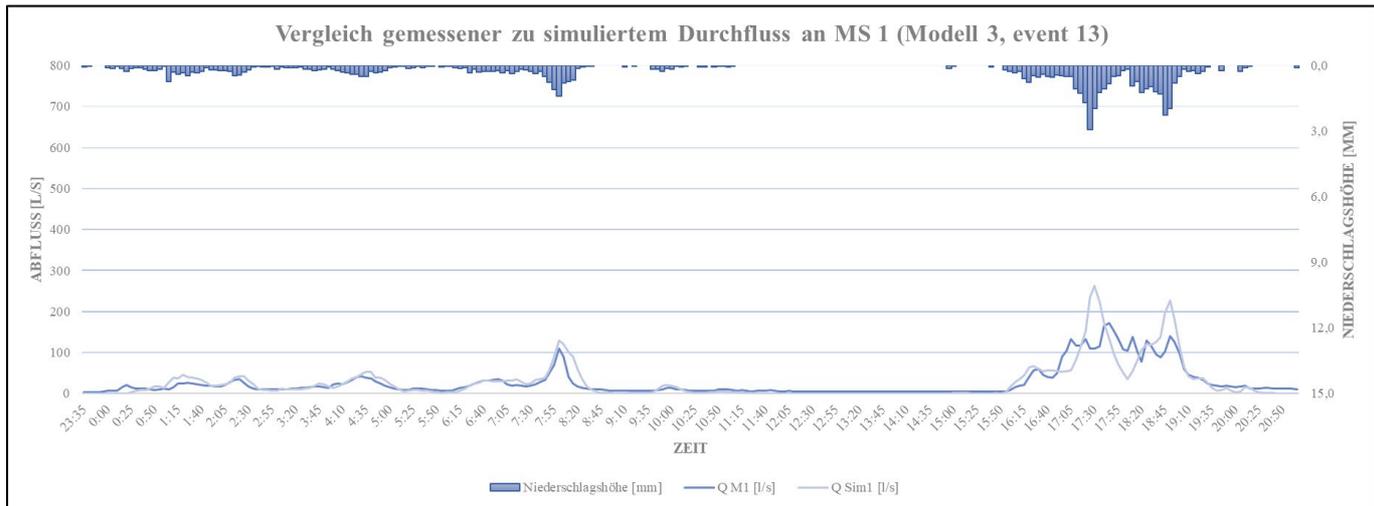
Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	3,08	46,37	15,03	54,92	112,98	2,06	0,55	0,29	0,53
event 16	8,92	56,90	6,38	23,81	94,27	3,96	0,38	-5,37	-14,03
event 20	3,91	115,39	29,52	5,30	339,72	64,04	0,19	-11,04	-59,12
event 37	59,81	79,25	59,81	79,83	68,50	0,86	-3,18	-2,29	0,72

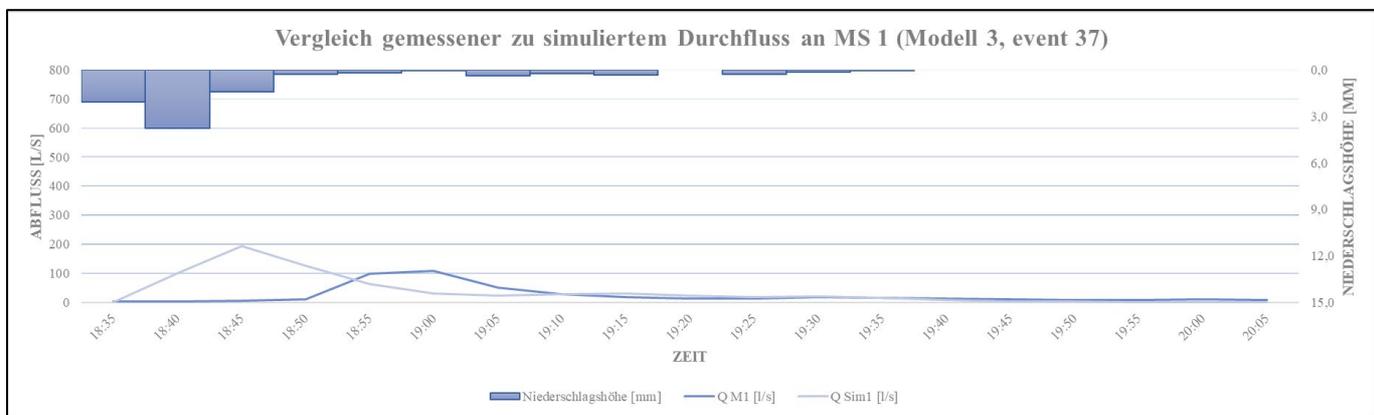
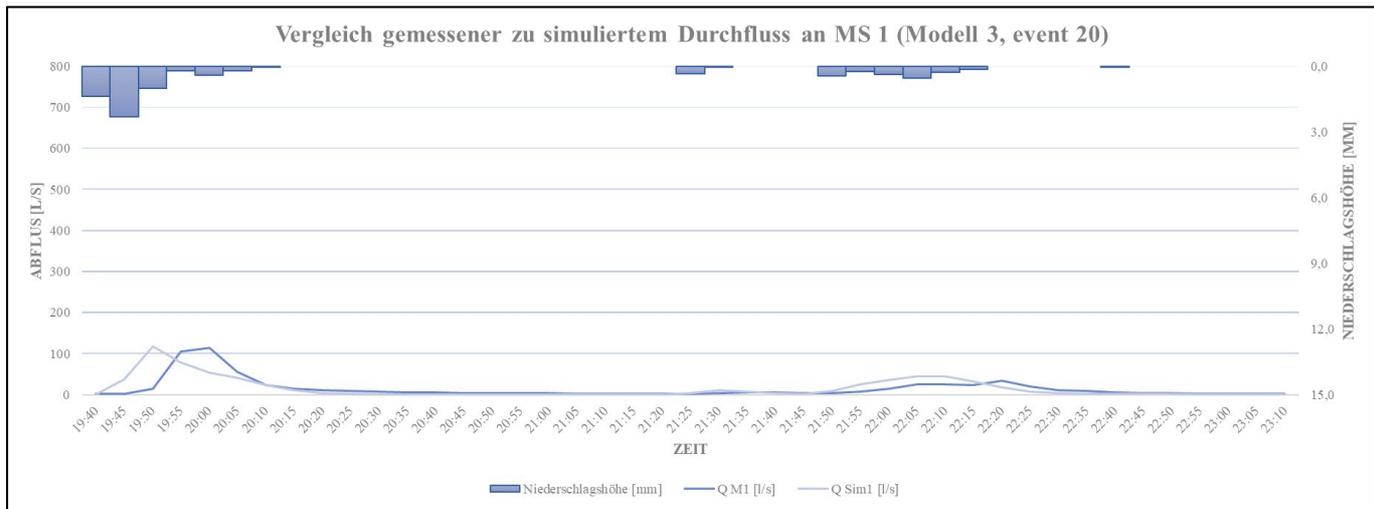
Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 3 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 1

	Sim vol [m³]	Obs vol [m³]	delta vol [m³]	VE [%]	Peak Sim [m³/s]	Peak Obs [m³/s]	delta peak [m³/s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2089,31	2063,26	26,05	1,26	262,38	172,33	90,05	52,25	0,56
event 16	778,47	731,60	46,87	6,41	548,92	440,41	108,51	24,64	0,42
event 20	190,69	186,89	3,80	2,03	117,89	114,03	3,86	3,39	0,20
event 37	207,97	132,54	75,43	56,91	193,29	109,46	83,83	76,59	-3,05
Sum	3266,45	3114,29	152,15	4,89	1122,48	836,23	286,25	34,23	-0,46

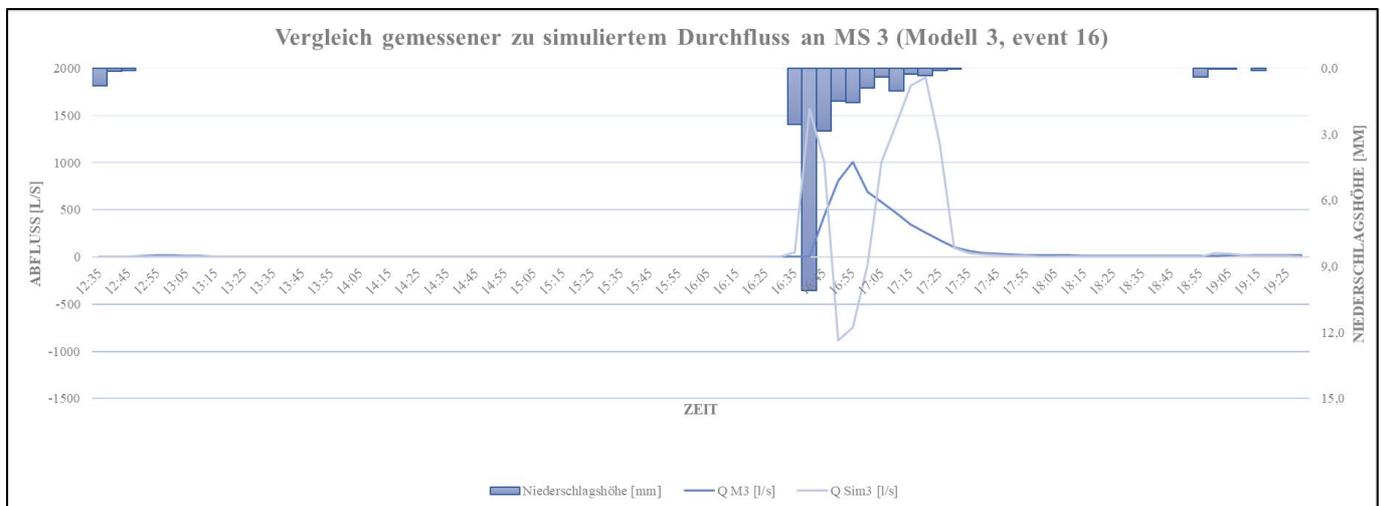
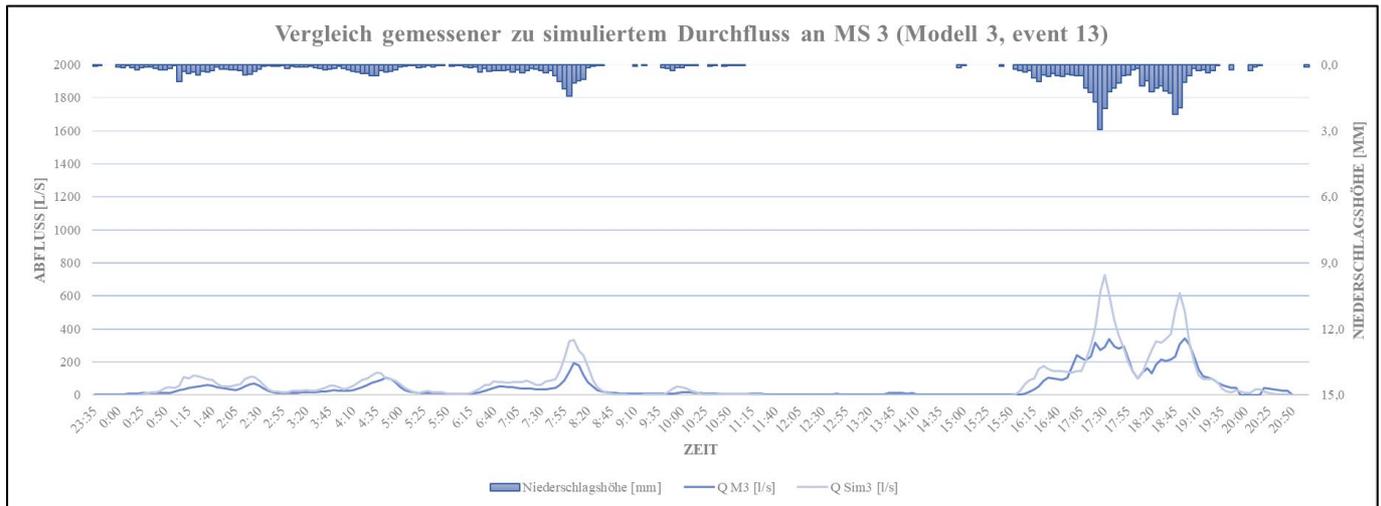


Anlagen

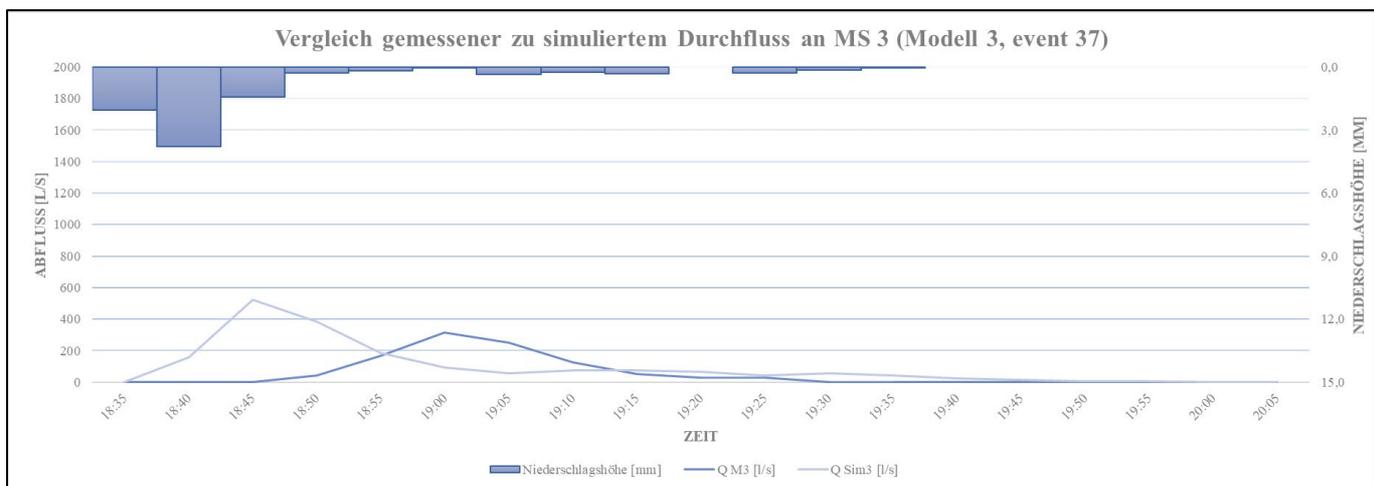
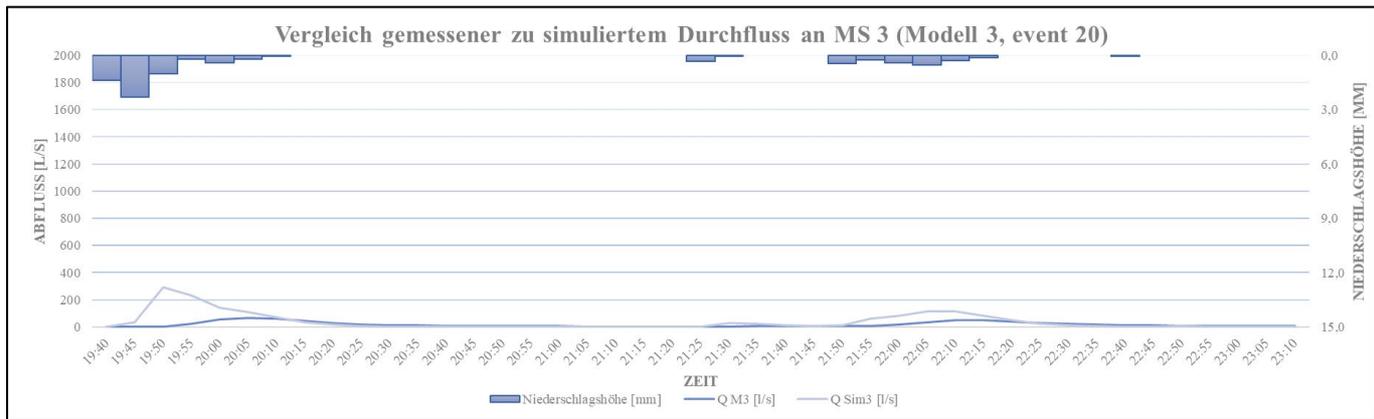


Modell 3 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	5489,53	3773,74	1715,79	45,47	727,70	343,66	384,04	111,75	0,31
event 16	2591,96	1679,32	912,64	54,35	1906,72	1006,38	900,34	89,46	-4,94
event 20	486,19	227,15	259,04	114,04	291,11	66,64	224,47	336,84	-10,86
event 37	544,05	305,35	238,70	78,17	525,16	313,66	211,50	67,43	-2,26
Sum	9111,72	5985,56	3126,16	52,23	3450,70	1730,34	1720,36	99,42	-4,44



Anlagen



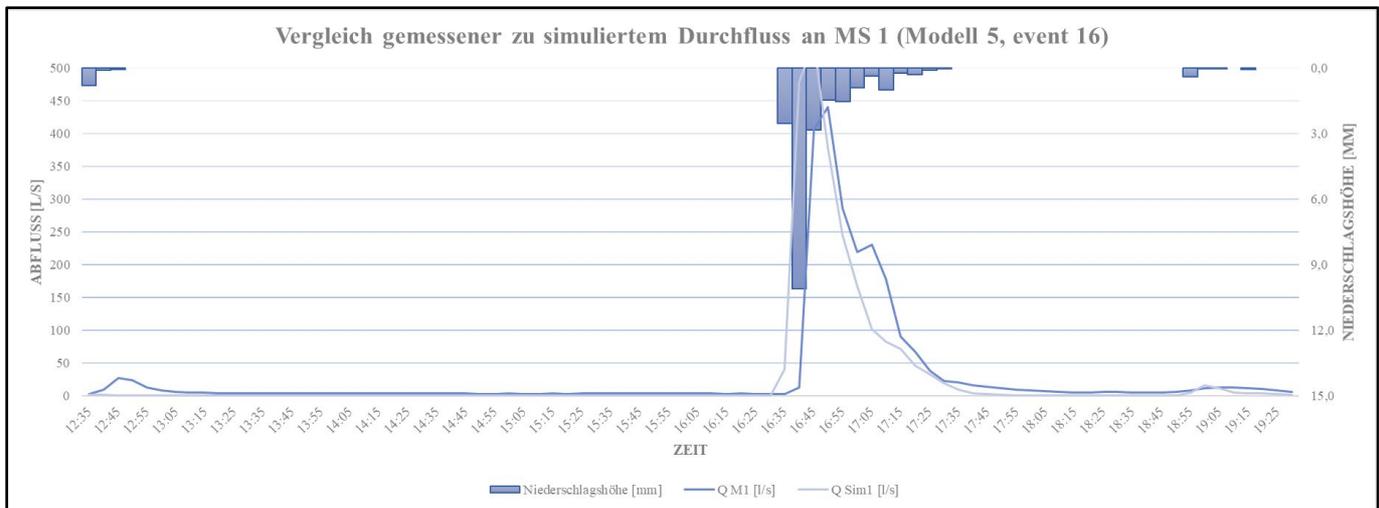
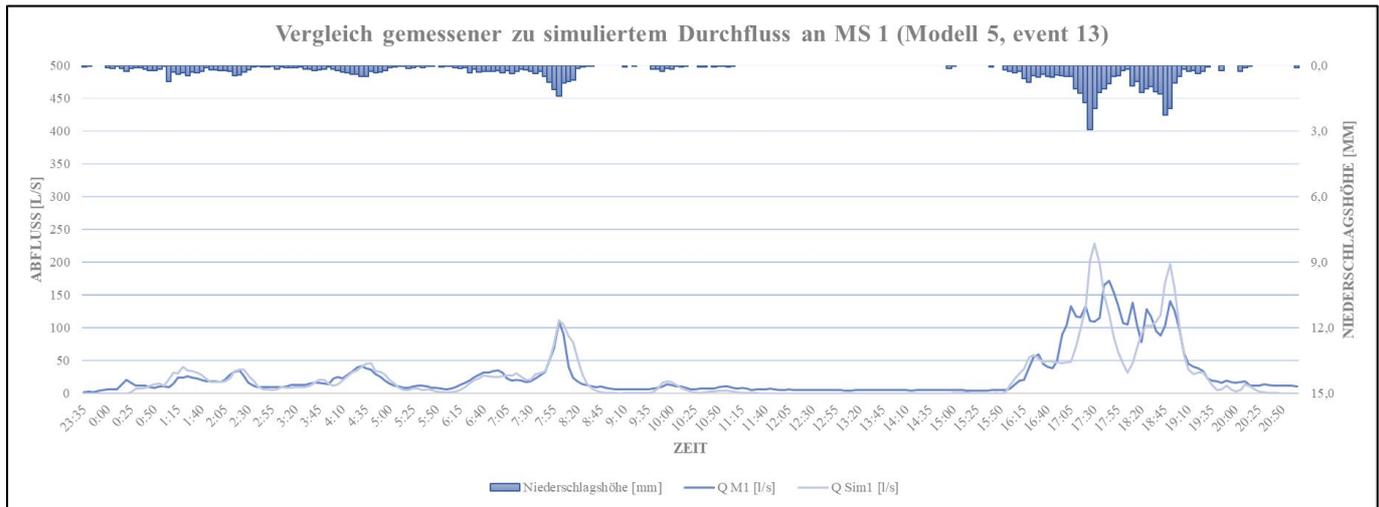
Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

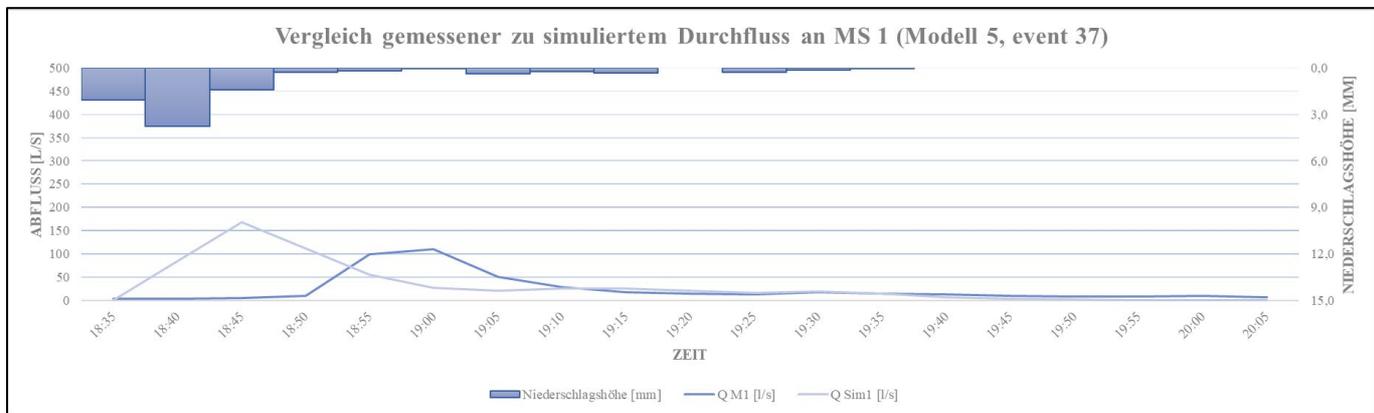
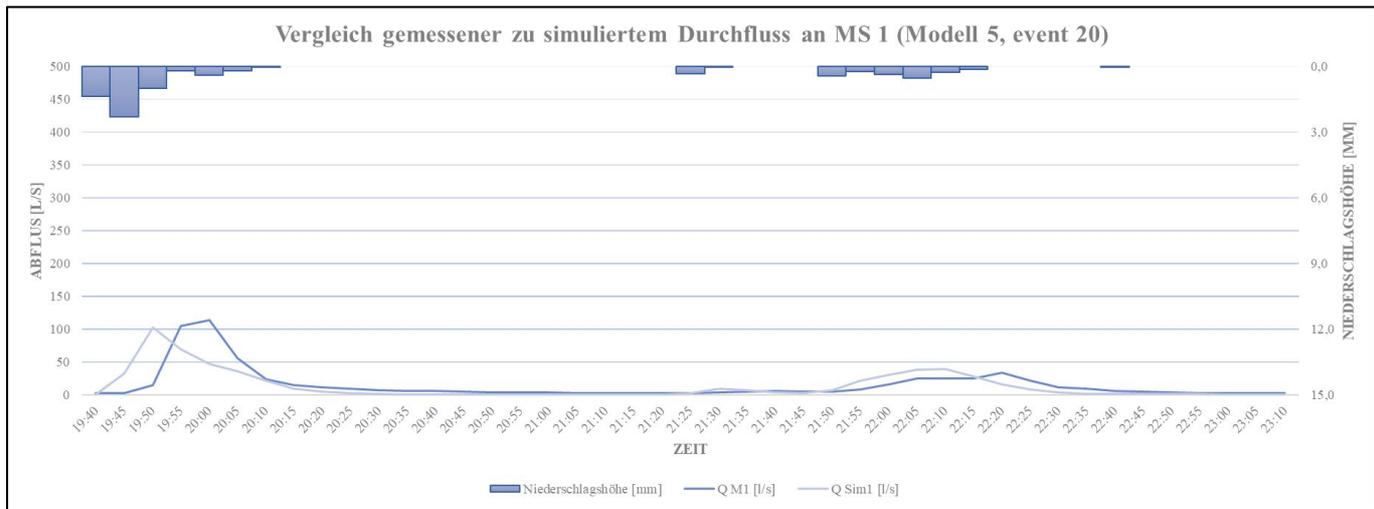
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	1,26	45,47	36,01	52,25	111,75	2,14	0,56	0,31	0,54
event 16	6,41	54,35	8,48	24,64	89,46	3,63	0,42	-4,94	-11,65
event 20	2,03	114,04	56,13	3,39	336,84	99,51	0,20	-10,86	-53,14
event 37	56,91	78,17	1,37	76,59	67,43	0,88	-3,05	-2,26	0,74

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

Modell 5 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 1

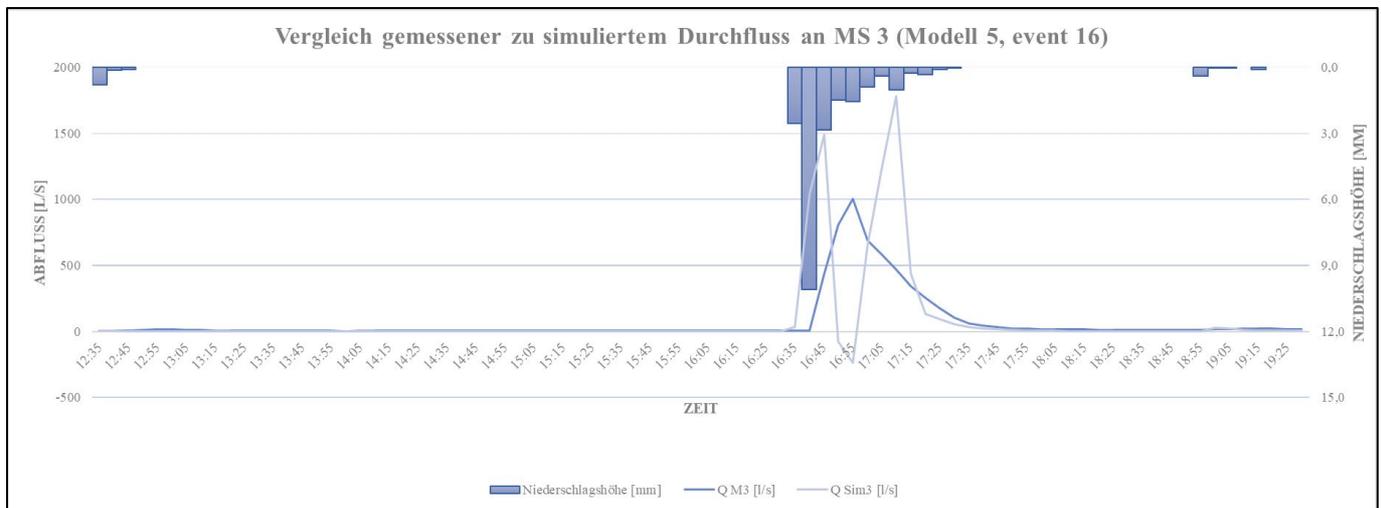
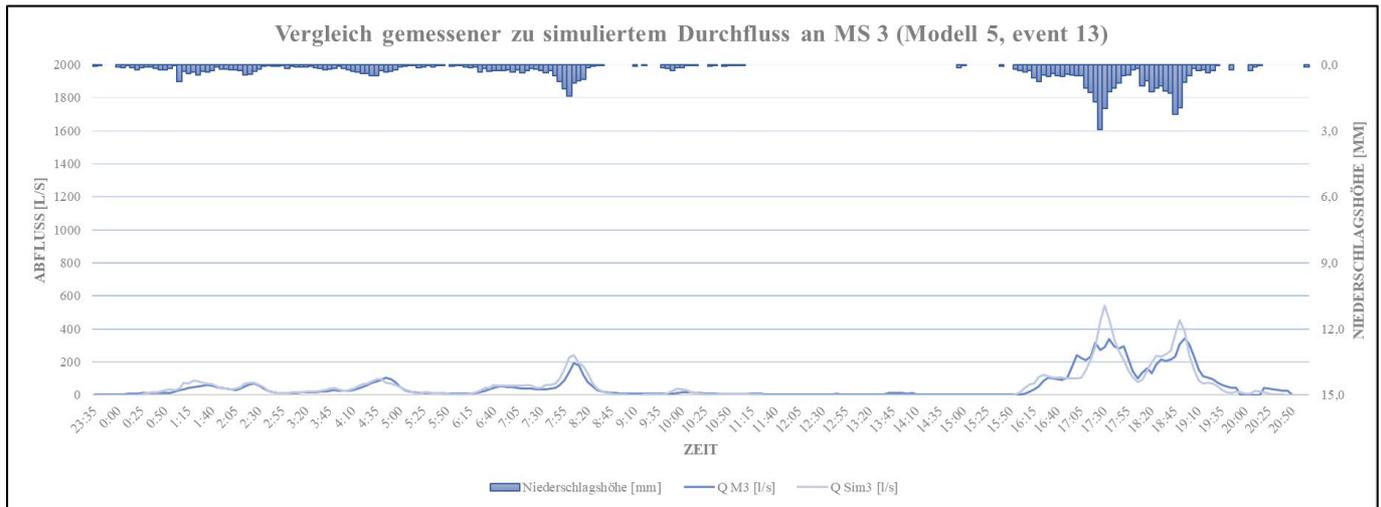
	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1819,82	2063,26	-243,44	-11,80	228,83	172,33	56,50	32,79	0,67
event 16	681,62	731,60	-49,99	-6,83	538,25	440,41	97,84	22,22	0,47
event 20	165,99	186,89	-20,91	-11,19	102,69	114,03	-11,34	-9,94	0,30
event 37	180,71	132,54	48,17	36,34	168,34	109,46	58,88	53,79	-2,22
Sum	2848,13	3114,29	-266,16	-8,55	1038,11	836,23	201,88	24,14	-0,20



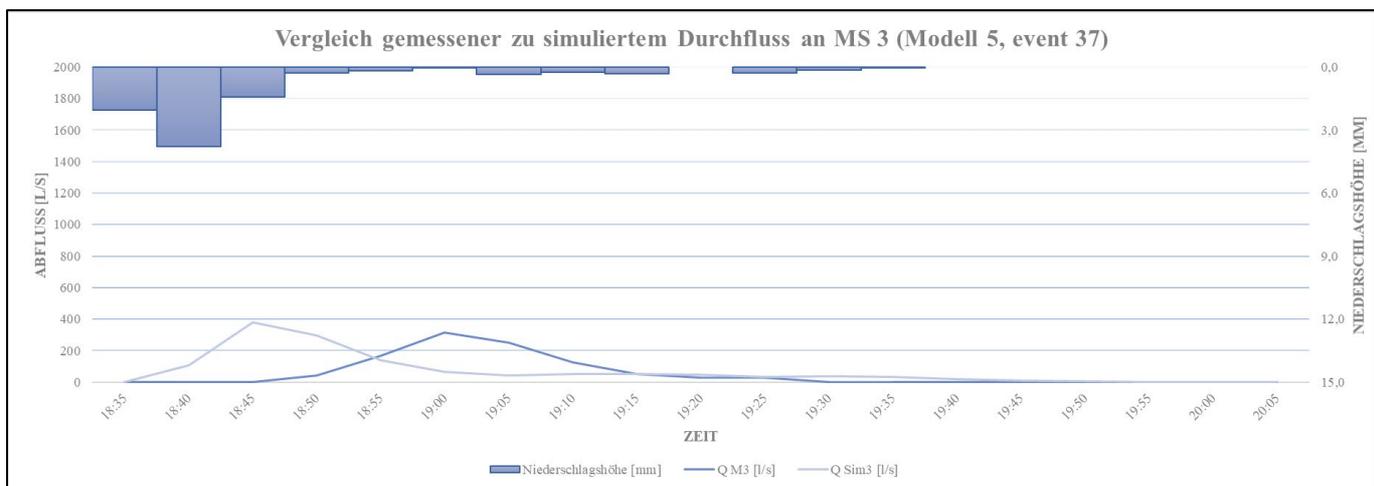
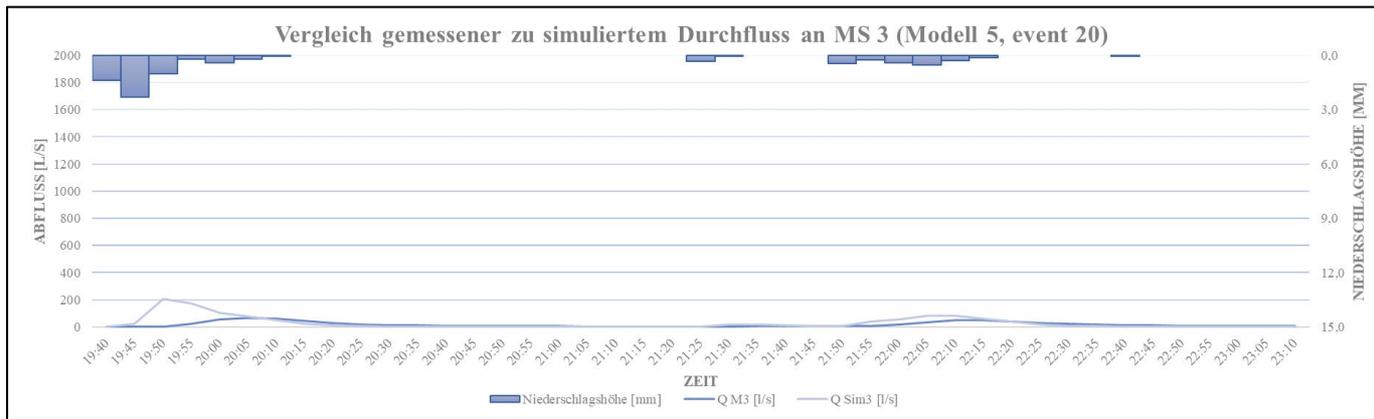


Modell 5 (angepasstes Untersuchungsgebiet) - Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3993,16	3773,74	219,42	5,81	539,64	343,66	195,98	57,03	0,79
event 16	2055,70	1679,32	376,38	22,41	1781,32	1006,38	774,94	77,00	-1,42
event 20	350,56	227,15	123,41	54,33	208,69	66,64	142,05	213,17	-4,68
event 37	397,55	305,35	92,20	30,20	380,63	313,66	66,97	21,35	-1,12
Sum	6796,97	5985,56	811,41	13,56	2910,28	1730,34	1179,94	68,19	-1,61



Anlagen



Gegenüberstellung Messstelle 1 und 3

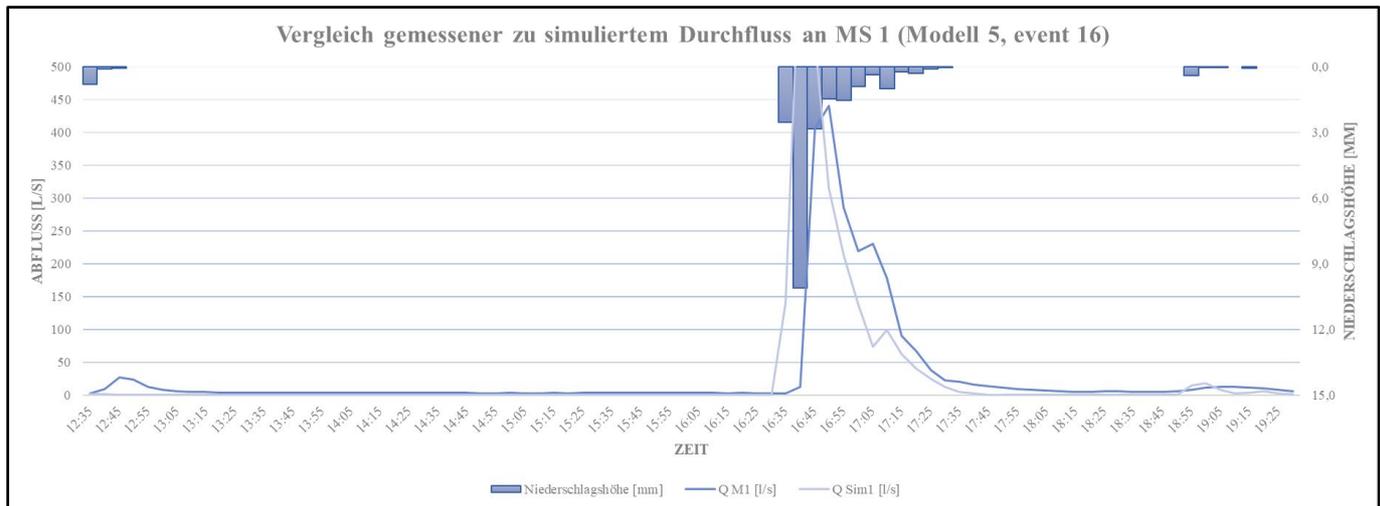
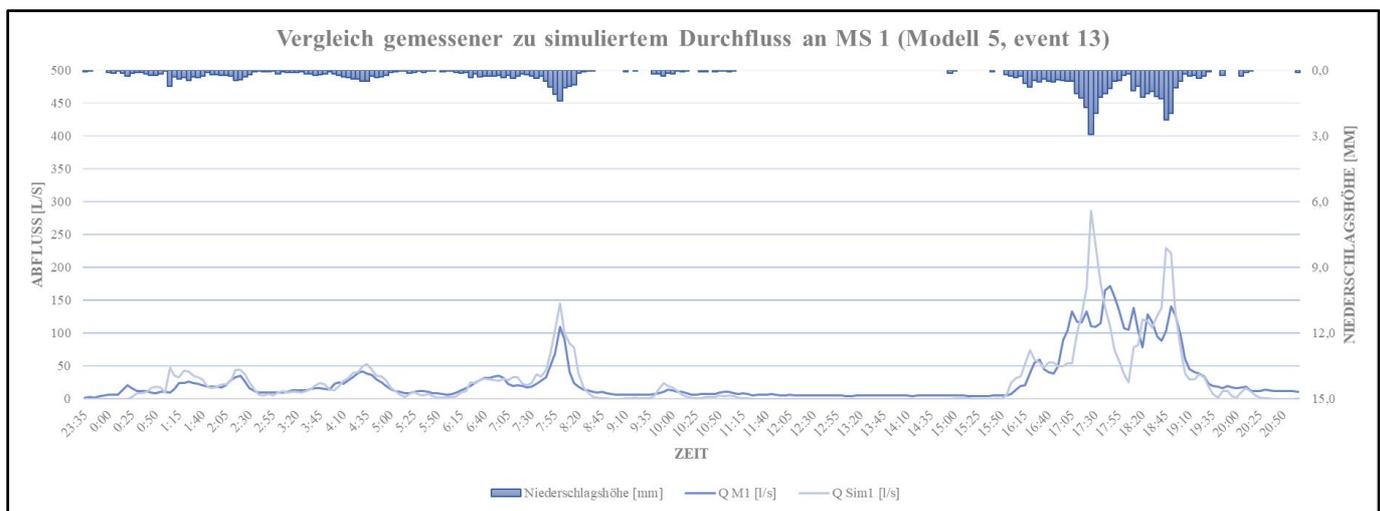
	VE (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	DYMAX (%)		Faktor zwischen MS 1 und MS 3	NSE		Faktor zwischen MS 1 und MS 3
	MS 1	MS 3		MS 1	MS 3		MS 1	MS 3	
event 13	-11,80	5,81	-0,49	32,79	57,03	1,74	0,67	0,79	1,19
event 16	-6,83	22,41	-3,28	22,22	77,00	3,47	0,47	-1,42	-3,00
event 20	-11,19	54,33	-4,86	-9,94	213,17	-21,44	0,30	-4,68	-15,70
event 37	36,34	30,20	0,83	53,79	21,35	0,40	-2,22	-1,12	0,50

Legende	Einstufung des Abweichungsmaß
	gut
	mittel
	grenzwertig
	unbefriedigend

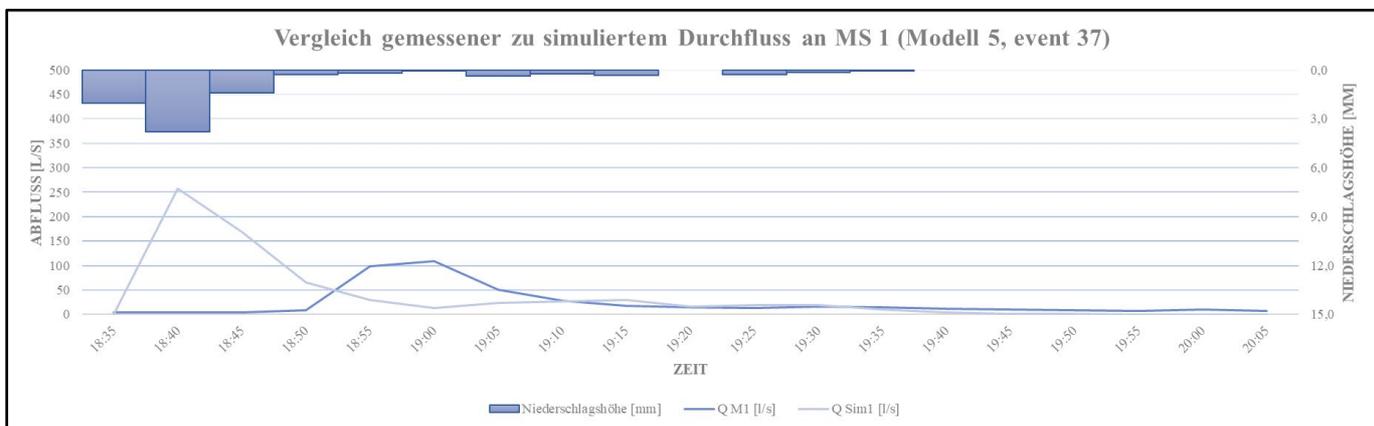
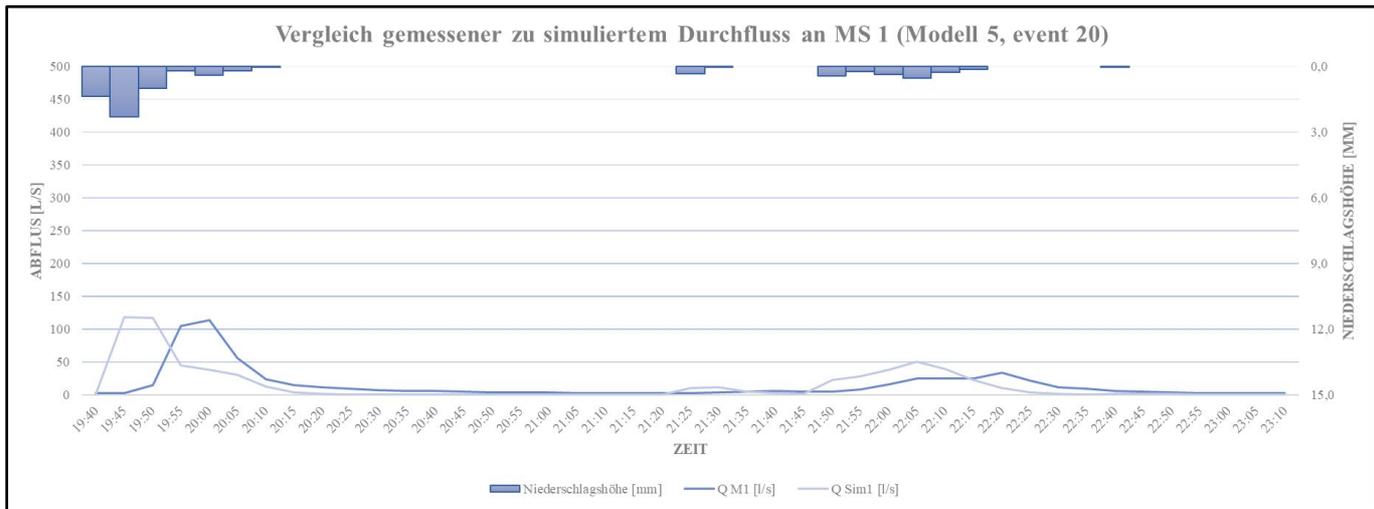
Anlage C – Auswertung der hydrologischen Konzepte für Modellvariante 5 und das angepasste Untersuchungsgebiet

Time-Area-Modell – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2000,11	2063,26	-63,15	-3,06	286,59	172,33	114,26	66,30	0,53
event 16	726,62	731,60	-4,98	-0,68	694,52	440,41	254,11	57,70	-0,08
event 20	185,98	186,89	-0,91	-0,49	118,36	114,03	4,33	3,80	-0,60
event 37	206,59	132,54	74,05	55,87	258,02	109,46	148,56	135,72	-5,60
Sum	3119,30	3114,29	5,00	0,16	1357,49	836,23	521,26	62,33	-1,44

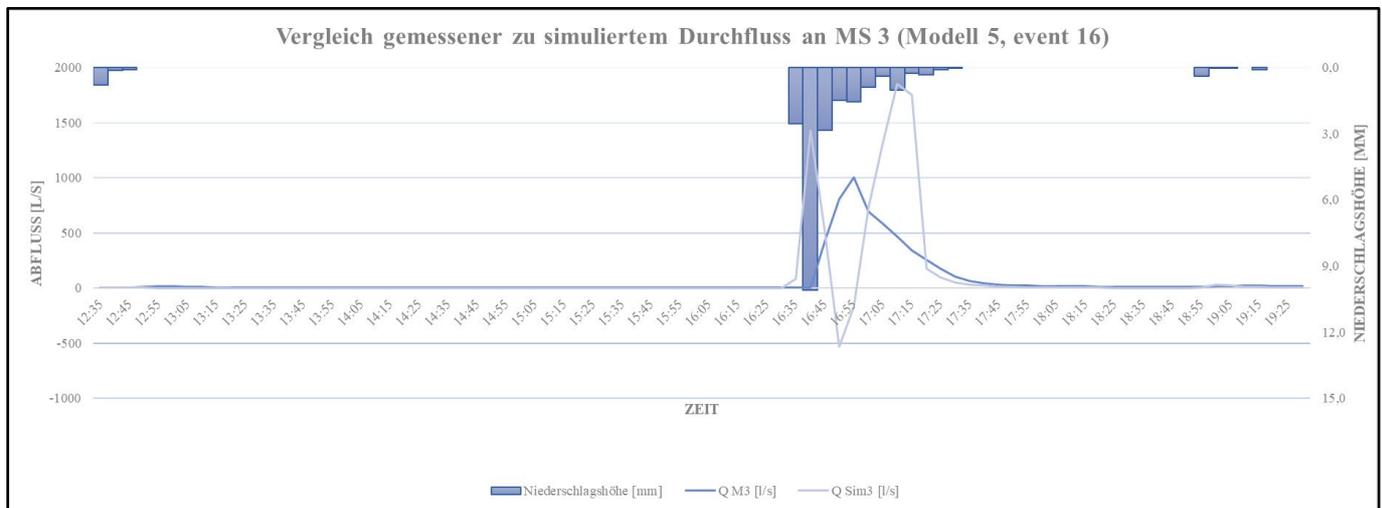
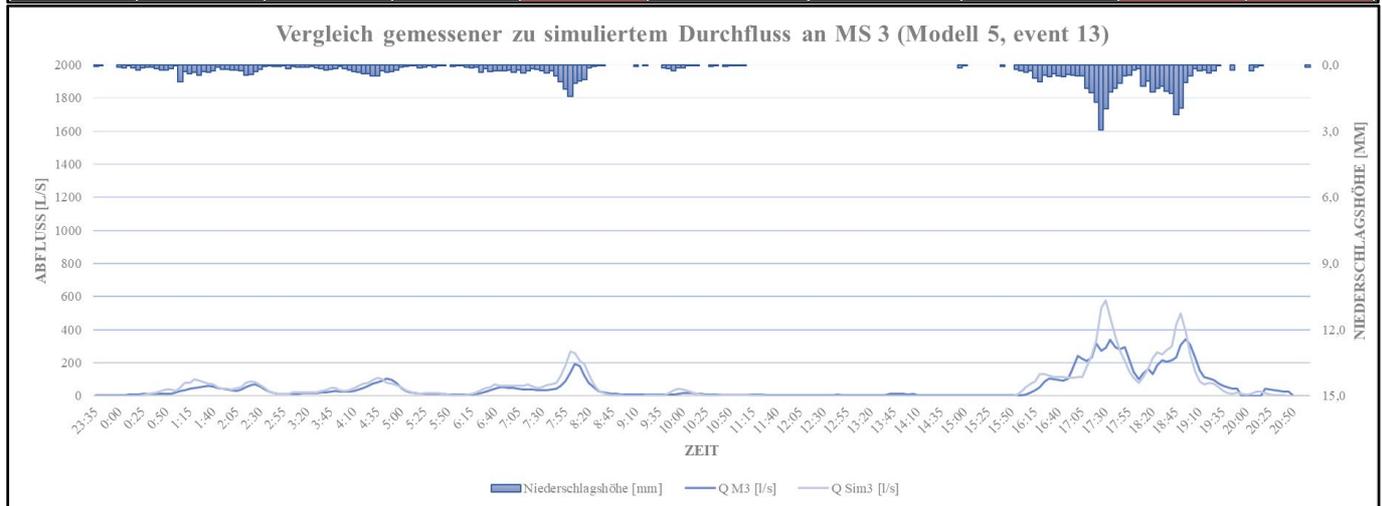


Anlagen

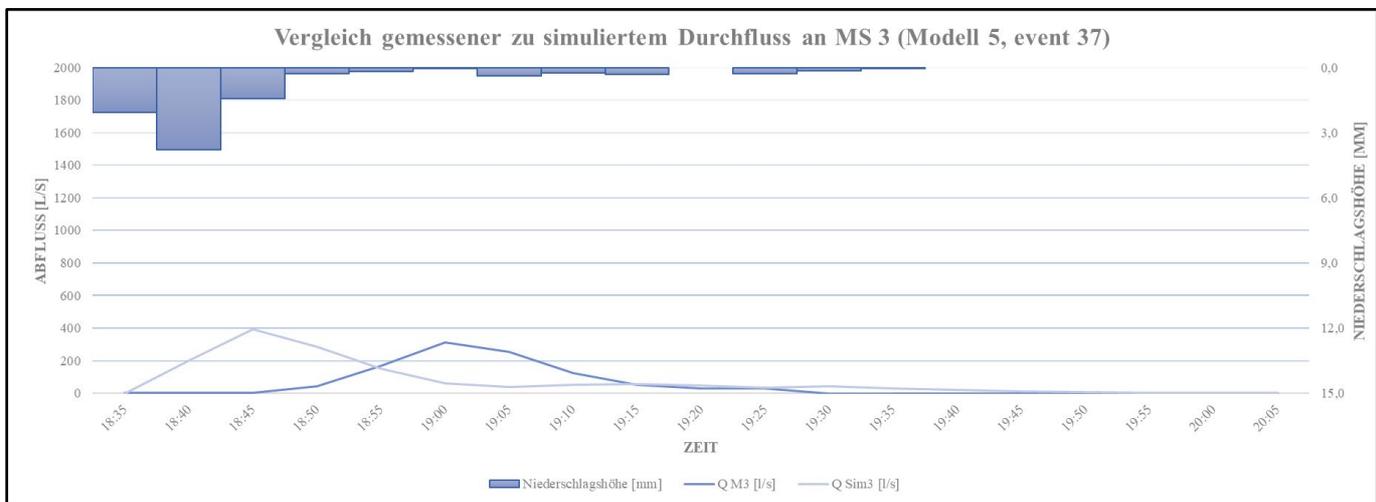
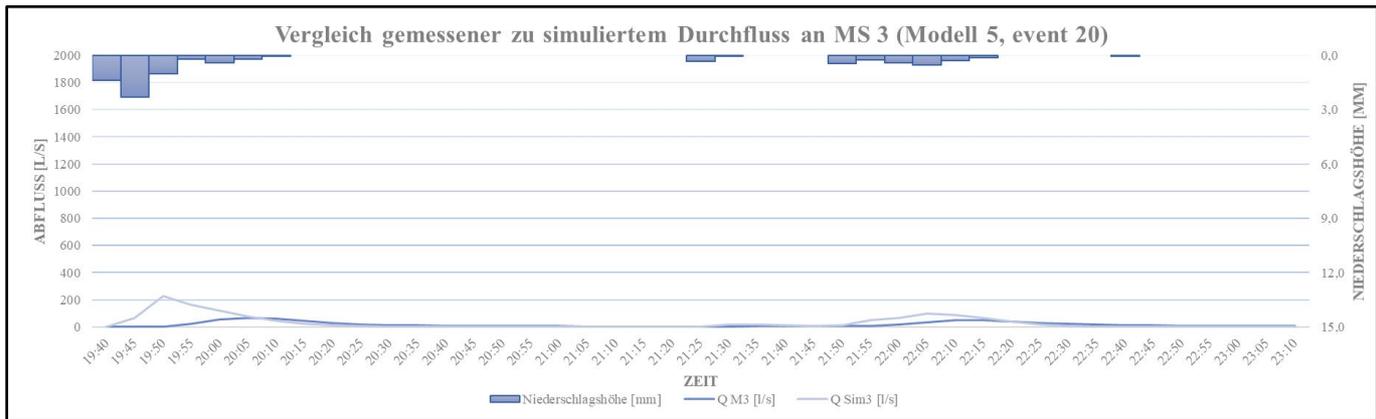


Time-Area-Modell – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4383,69	3773,74	609,95	16,16	575,75	343,66	232,09	67,53	0,69
event 16	2250,14	1679,32	570,82	33,99	1853,09	1006,38	846,71	84,13	-2,50
event 20	382,56	227,15	155,41	68,42	226,70	66,64	160,06	240,19	-5,79
event 37	432,90	305,35	127,55	41,77	392,57	313,66	78,91	25,16	-1,35
Sum	7449,29	5985,56	1463,73	24,45	3048,11	1730,34	1317,77	76,16	-2,24

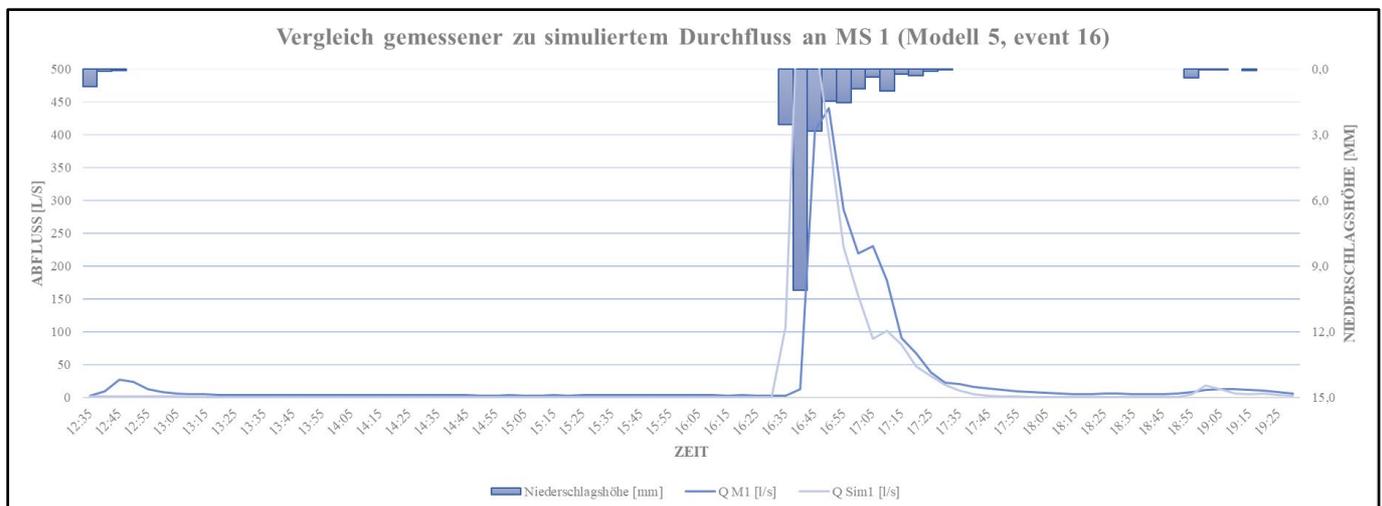
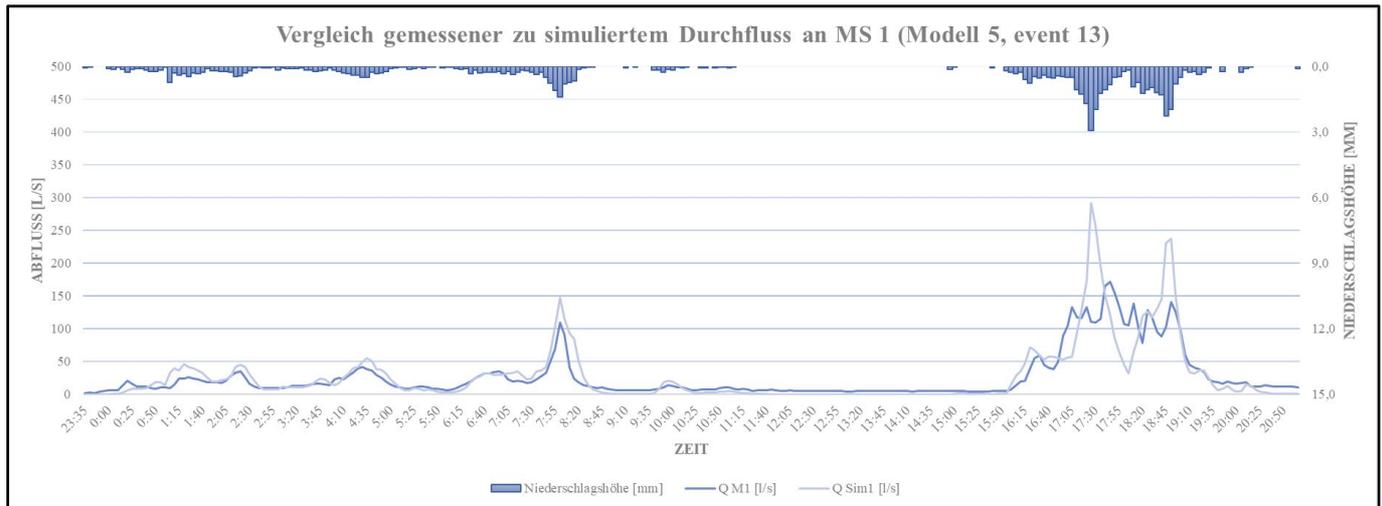


Anlagen

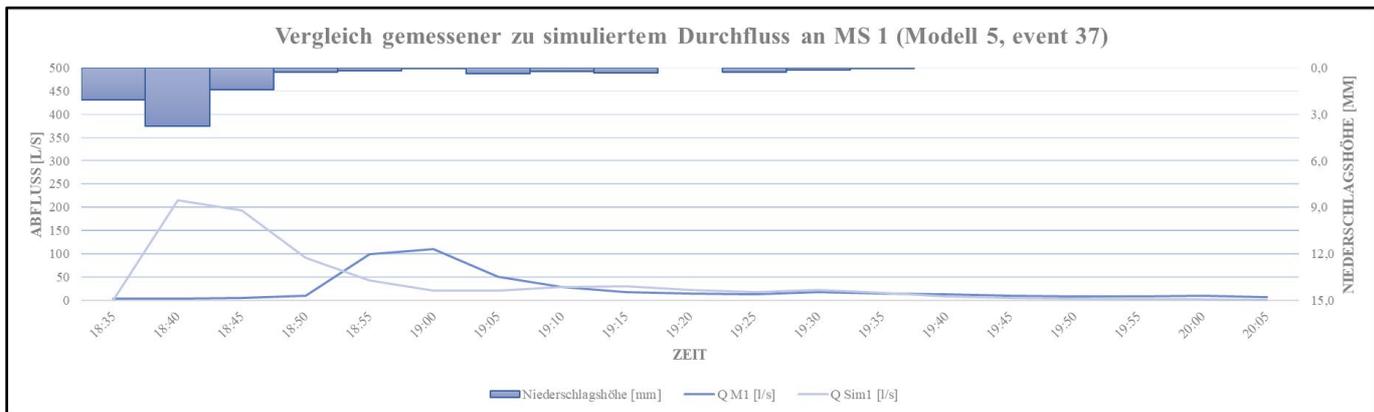
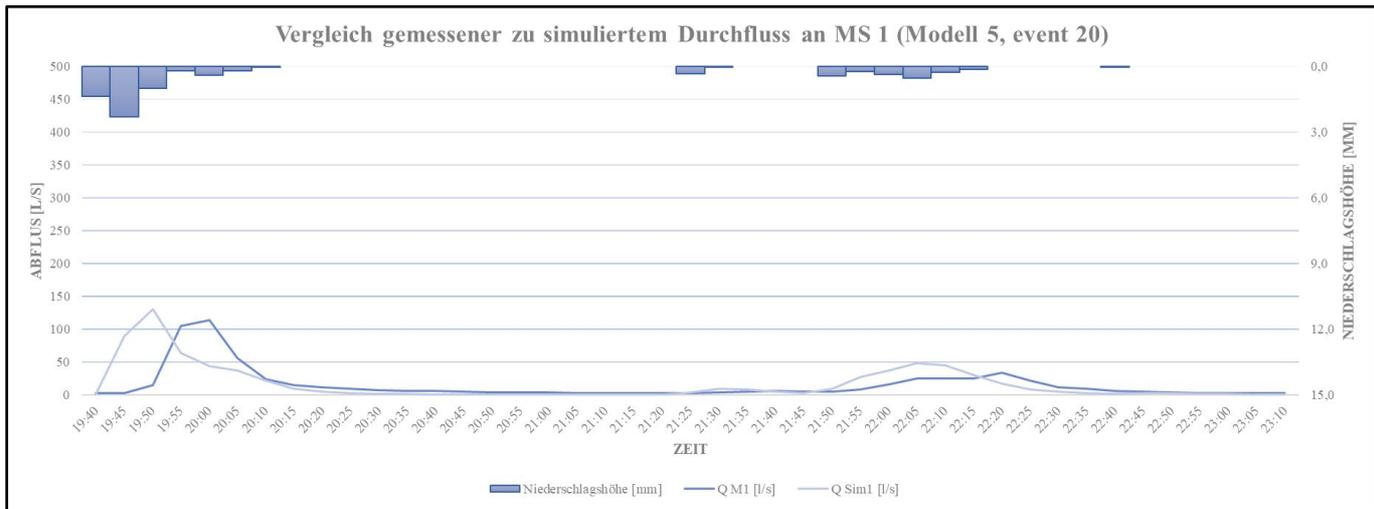


Kinematic-Wave-Modell – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	2129,48	2063,26	66,22	3,21	292,26	172,33	119,93	69,59	0,49
event 16	780,75	731,60	49,15	6,72	705,88	440,41	265,47	60,28	-0,05
event 20	202,35	186,89	15,46	8,27	130,34	114,03	16,31	14,30	-0,28
event 37	222,27	132,54	89,73	67,70	214,79	109,46	105,33	96,22	-4,96
Sum	3334,85	3114,29	220,55	7,08	1343,26	836,23	507,03	60,63	-1,20

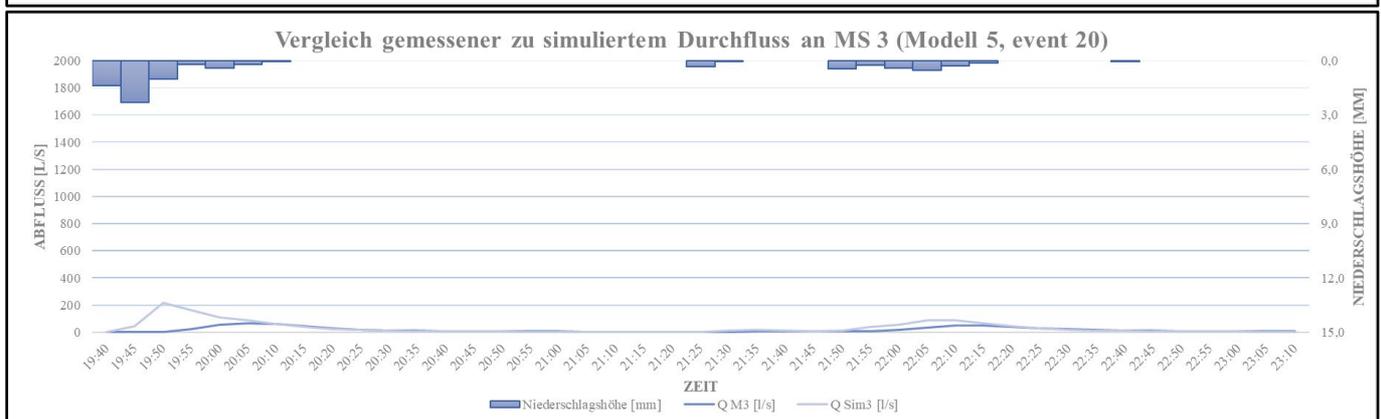
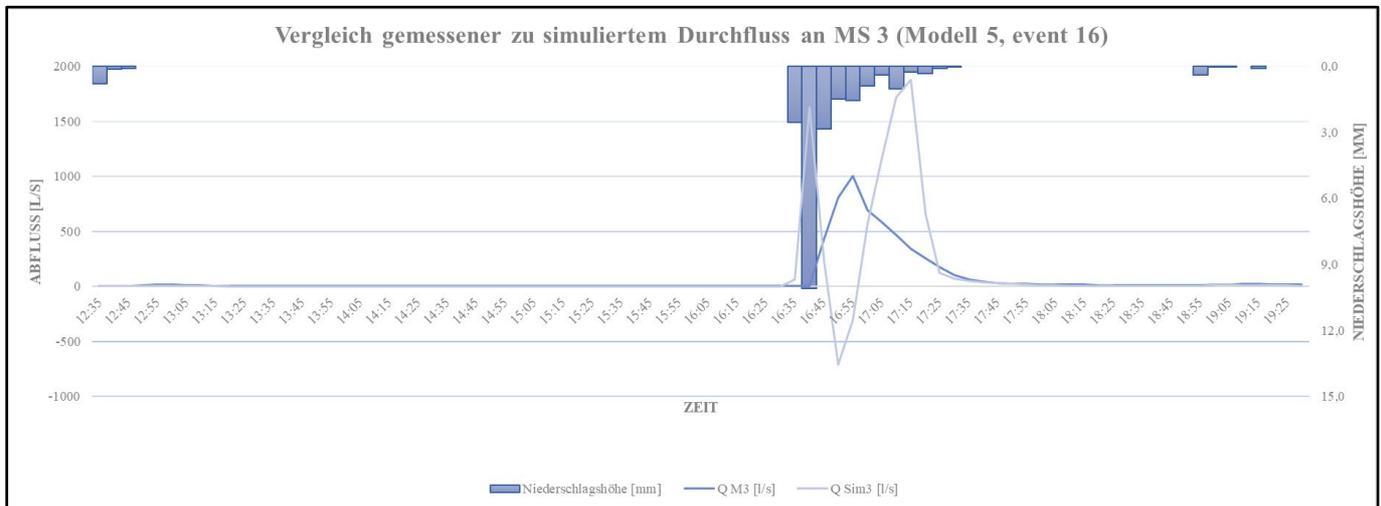
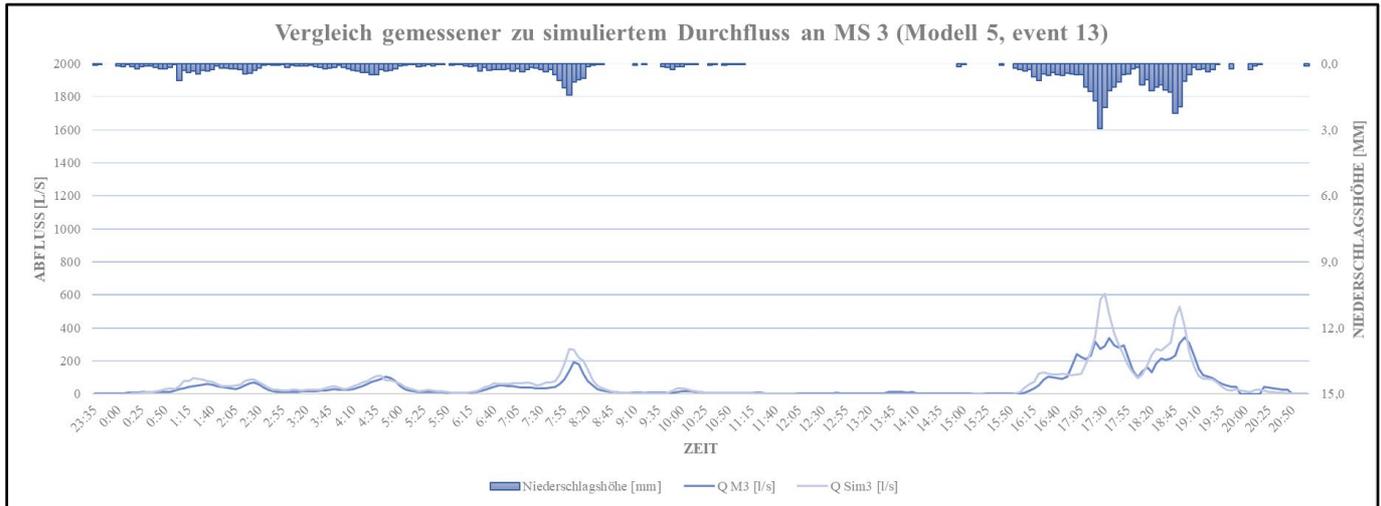


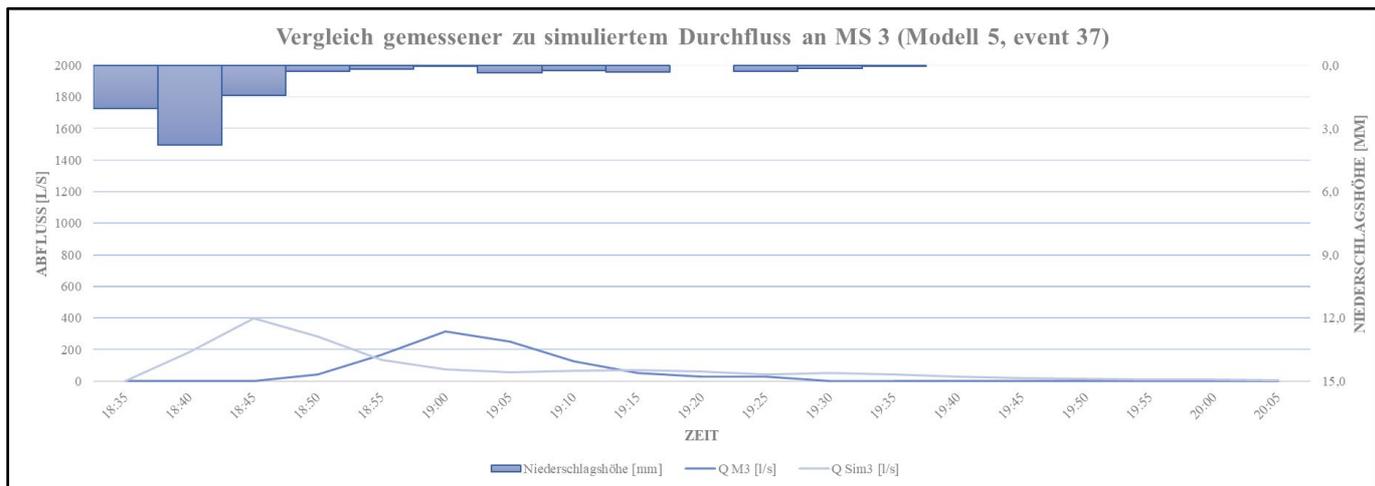
Anlagen



Kinematic-Wave-Modell – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4684,08	3773,74	910,34	24,12	609,19	343,66	265,53	77,27	0,64
event 16	2219,55	1679,32	540,23	32,17	1878,26	1006,38	871,88	86,64	-3,04
event 20	415,32	227,15	188,16	82,84	215,72	66,64	149,08	223,71	-4,78
event 37	464,47	305,35	159,12	52,11	399,12	313,66	85,46	27,25	-1,25
Sum	7783,42	5985,56	1797,86	30,04	3102,28	1730,34	1371,94	79,29	-2,11





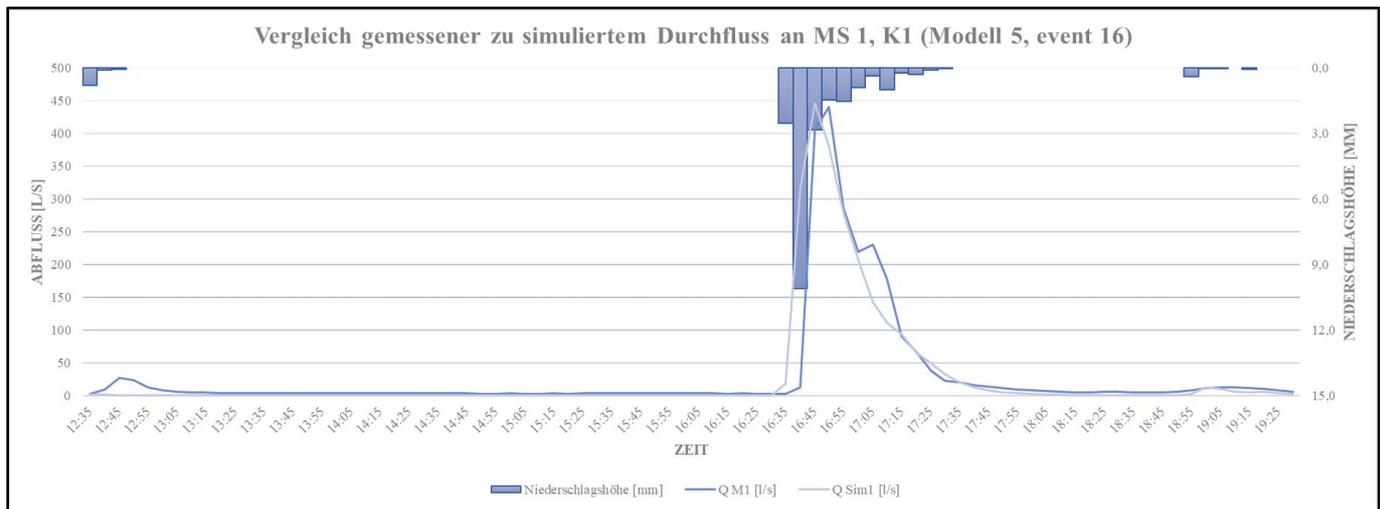
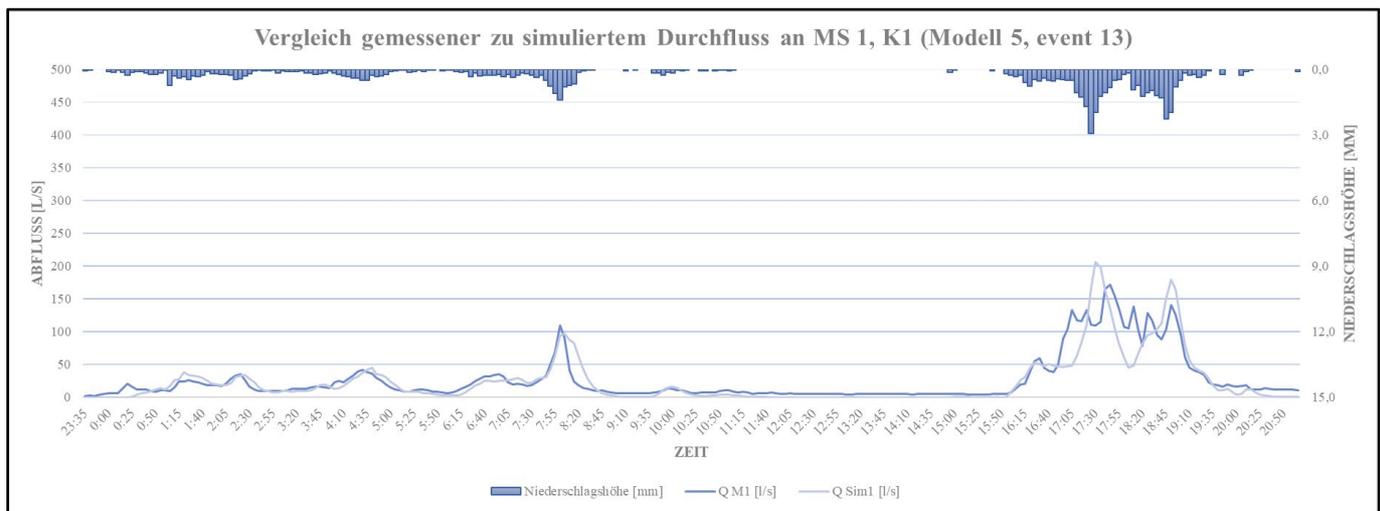
Linear-Reservoir-Modell

s. Anlage B „Modell 5 (angepasstes Untersuchungsgebiet)“

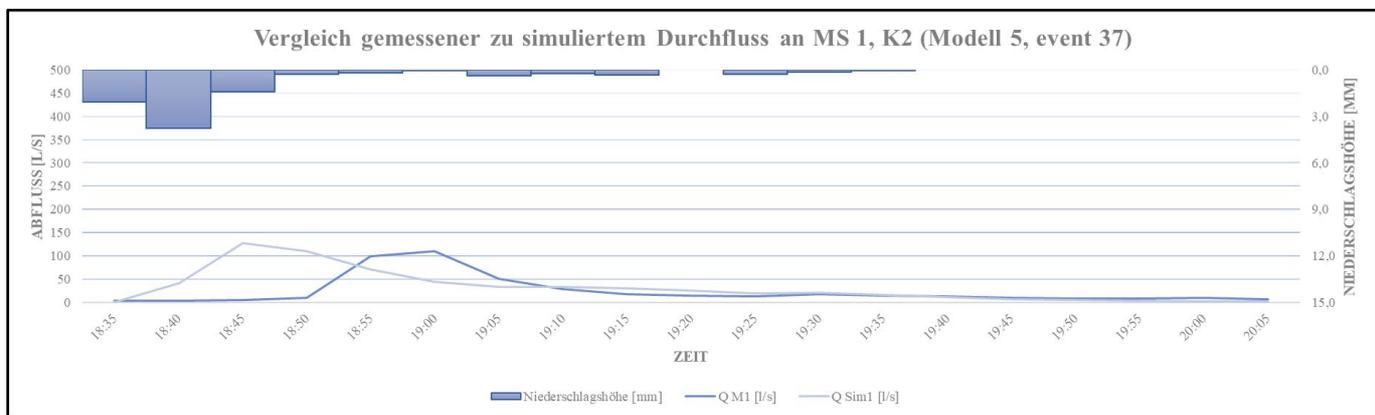
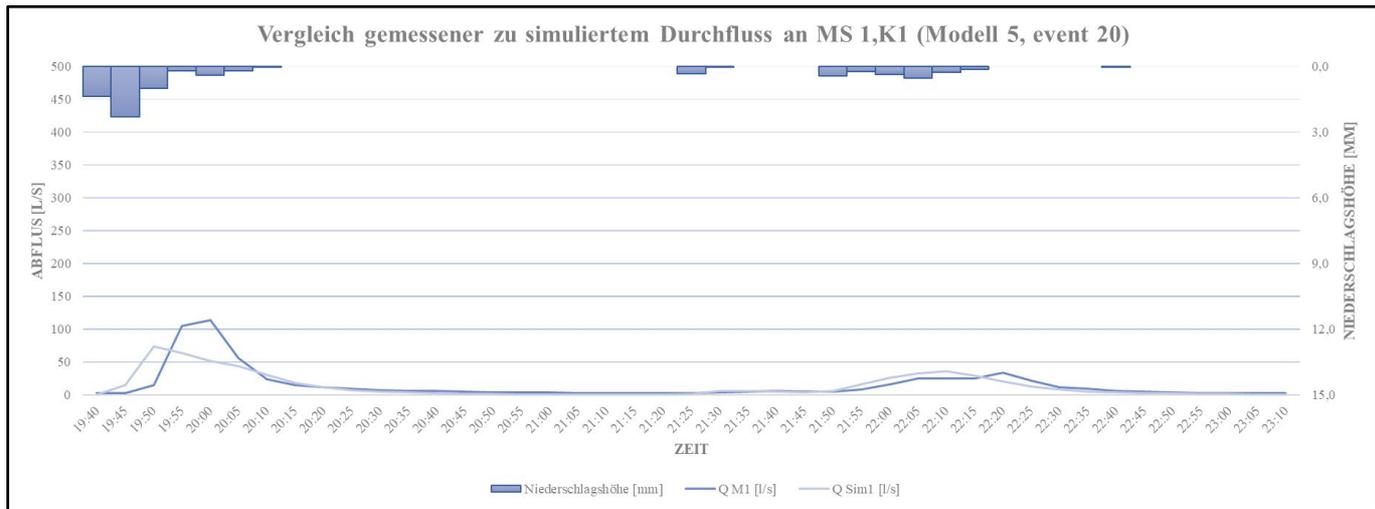
Anlage D – Auswertung der Kalibrierungen

Kalibrierung der Verzögerungszeit (K1) – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1821,67	2063,26	-241,59	-11,71	206,49	172,33	34,16	19,82	0,73
event 16	673,98	731,60	-57,62	-7,88	445,60	440,41	5,19	1,18	0,78
event 20	165,90	186,89	-21,00	-11,23	73,72	114,03	-40,31	-35,35	0,57
event 37	179,23	132,54	46,69	35,23	127,11	109,46	17,65	16,12	-0,93
Sum	2840,78	3114,29	-273,52	-8,78	852,91	836,23	16,68	1,99	0,29

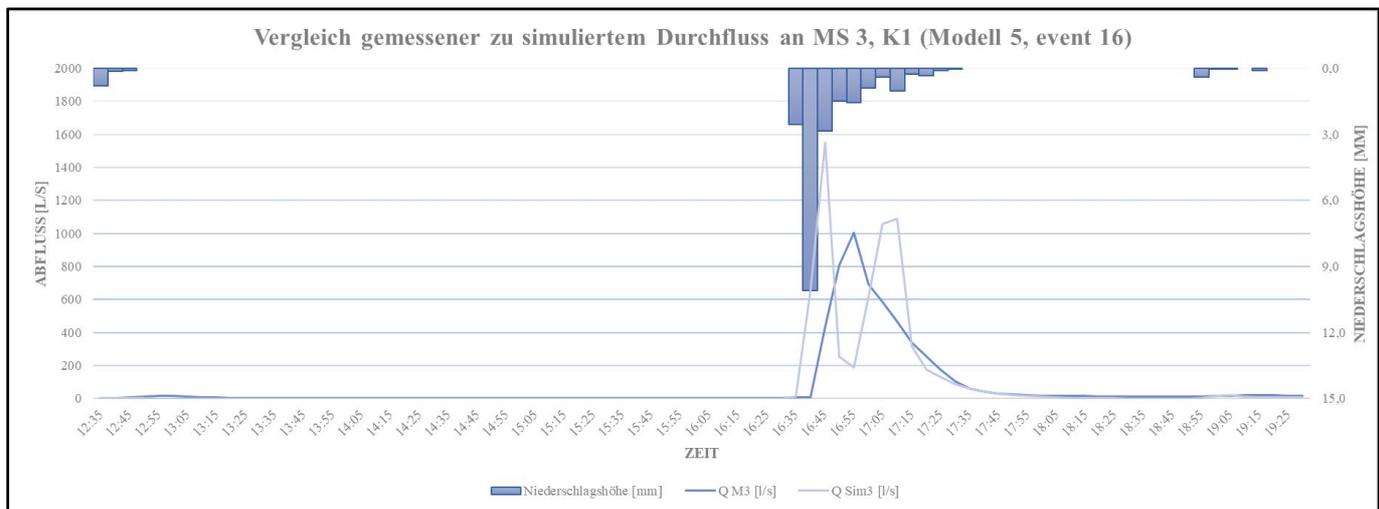
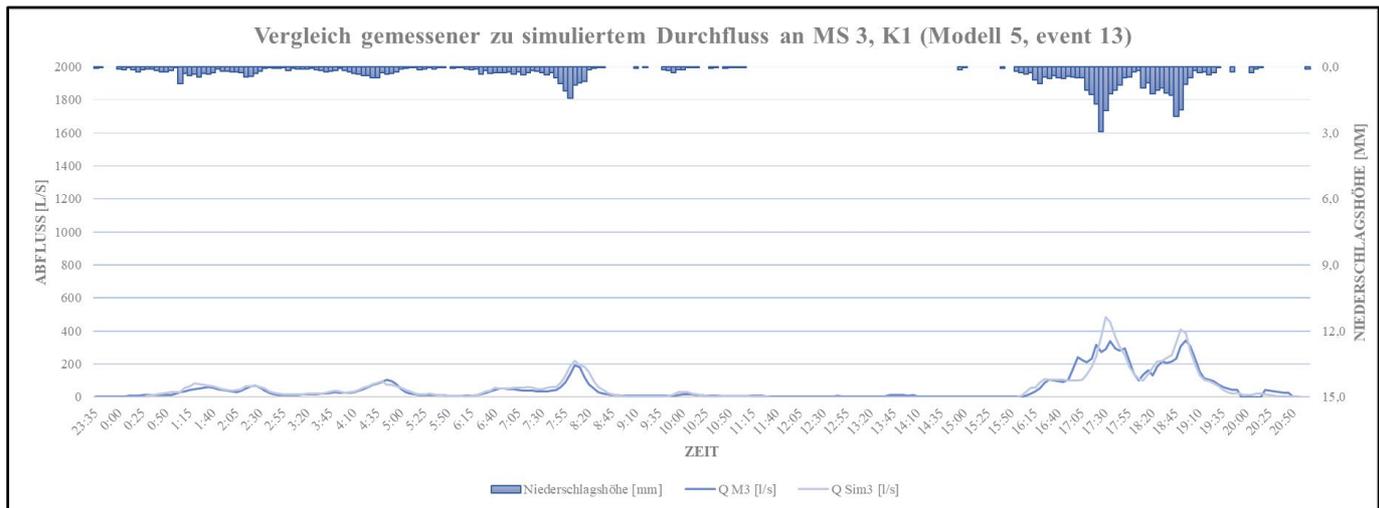


Anlagen

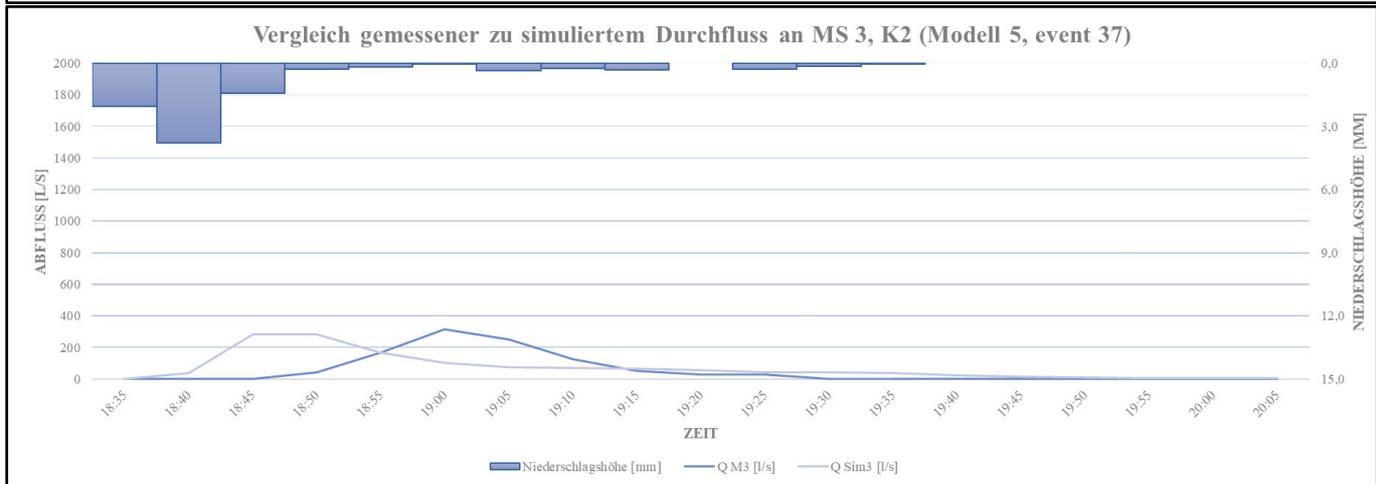
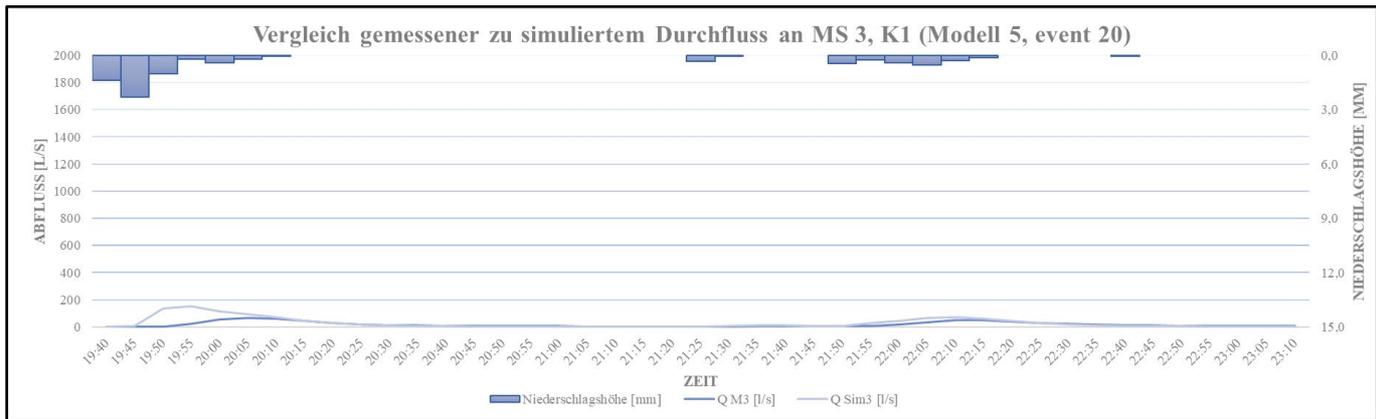


Kalibrierung der Verzögerungszeit (K1) – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3993,13	3773,74	219,39	5,81	483,38	343,66	139,72	40,66	0,86
event 16	1932,87	1679,32	253,55	15,10	1553,03	1006,38	546,65	54,32	-0,19
event 20	351,84	227,15	124,69	54,89	154,18	66,64	87,54	131,36	-2,15
event 37	399,11	305,35	93,76	30,71	283,76	313,66	-29,90	-9,53	-0,42
Sum	6676,96	5985,56	691,40	11,55	2474,34	1730,34	744,00	43,00	-0,47

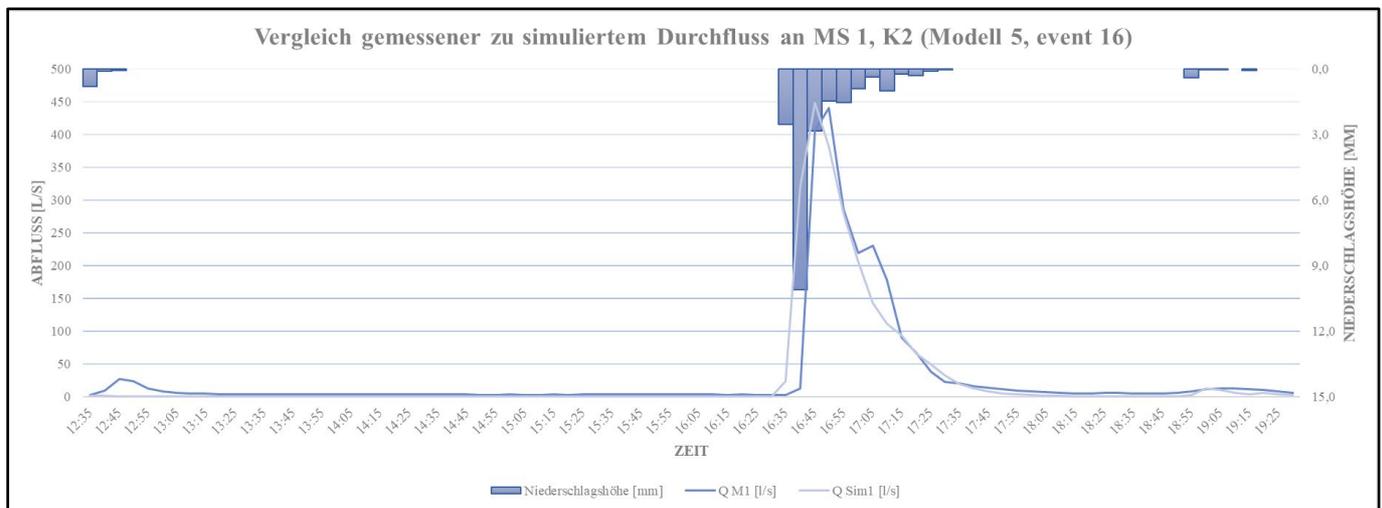
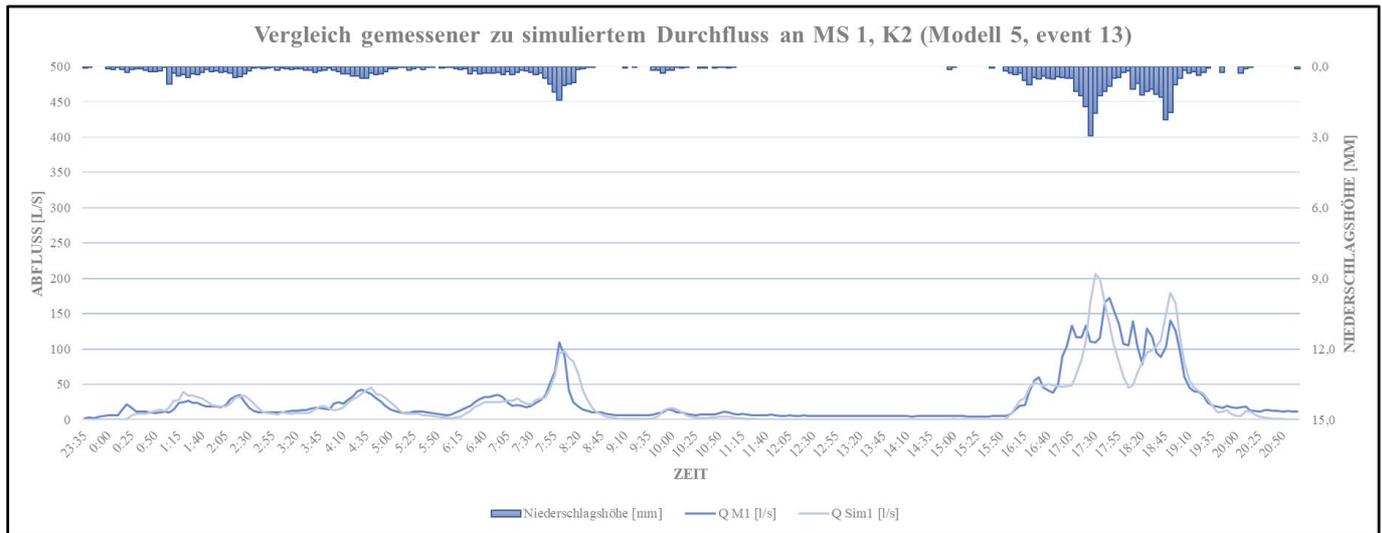


Anlagen

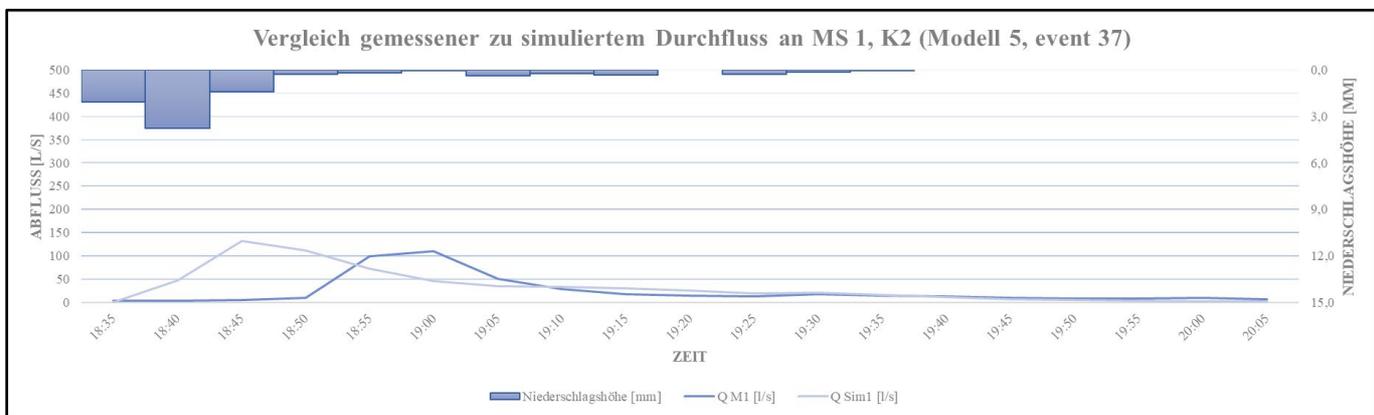
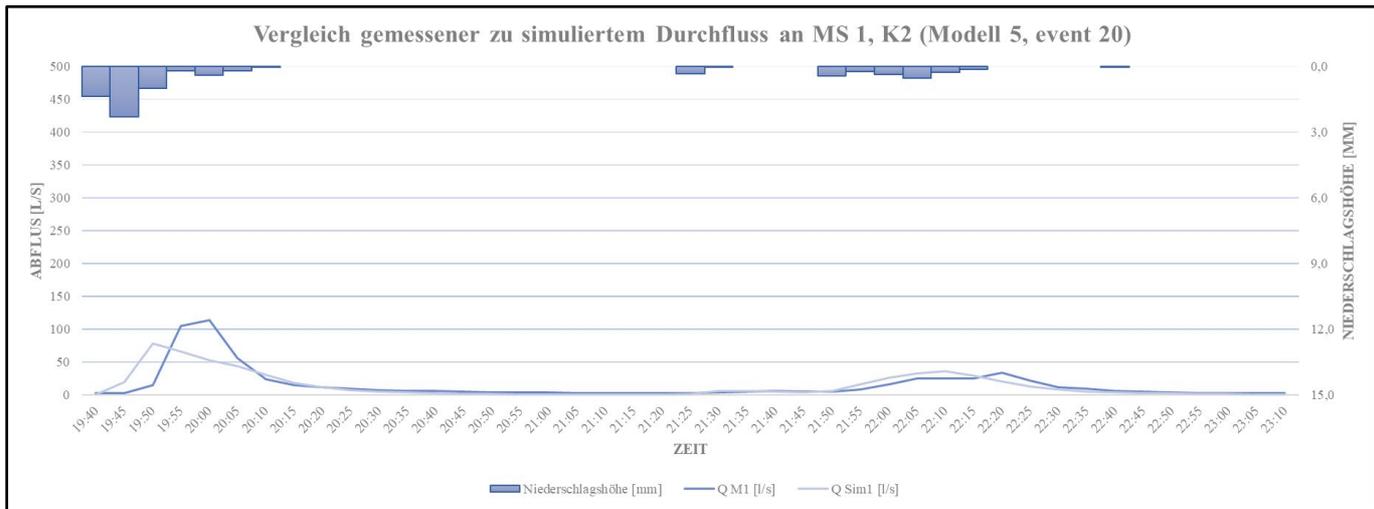


Kalibrierung der Anfangsverluste (K2) – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1826,46	2063,26	-236,80	-11,48	206,49	172,33	34,16	19,82	0,73
event 16	677,91	731,60	-53,70	-7,34	448,15	440,41	7,74	1,76	0,78
event 20	170,73	186,89	-16,17	-8,65	78,49	114,03	-35,54	-31,17	0,56
event 37	184,30	132,54	51,76	39,05	131,31	109,46	21,85	19,96	-1,05
Sum	2859,39	3114,29	-254,90	-8,18	864,44	836,23	28,21	3,37	0,25

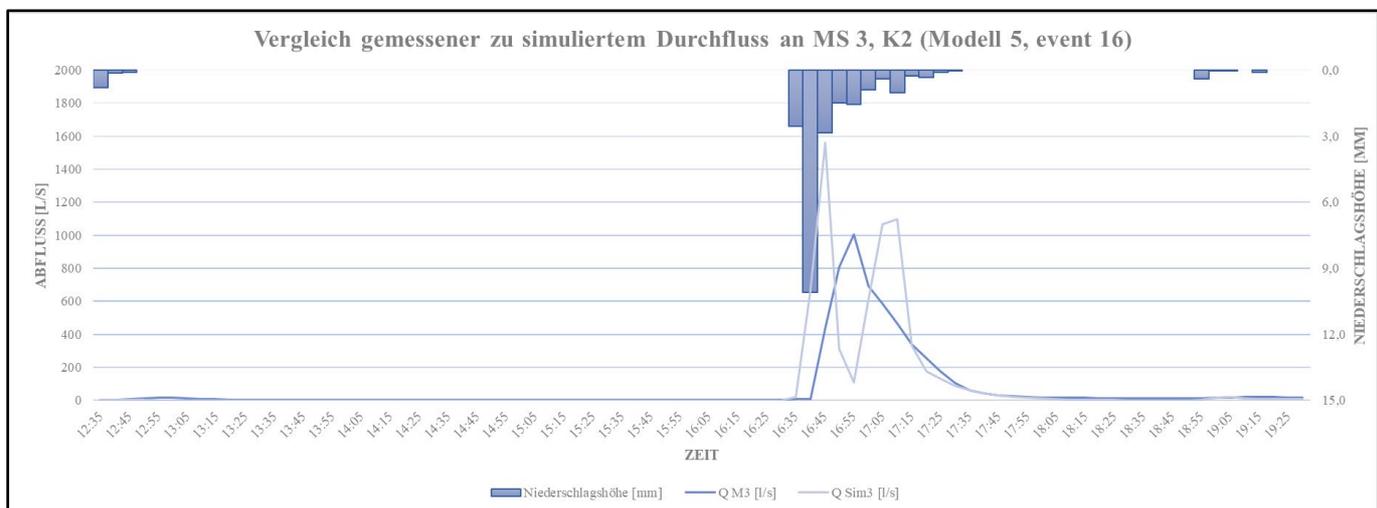
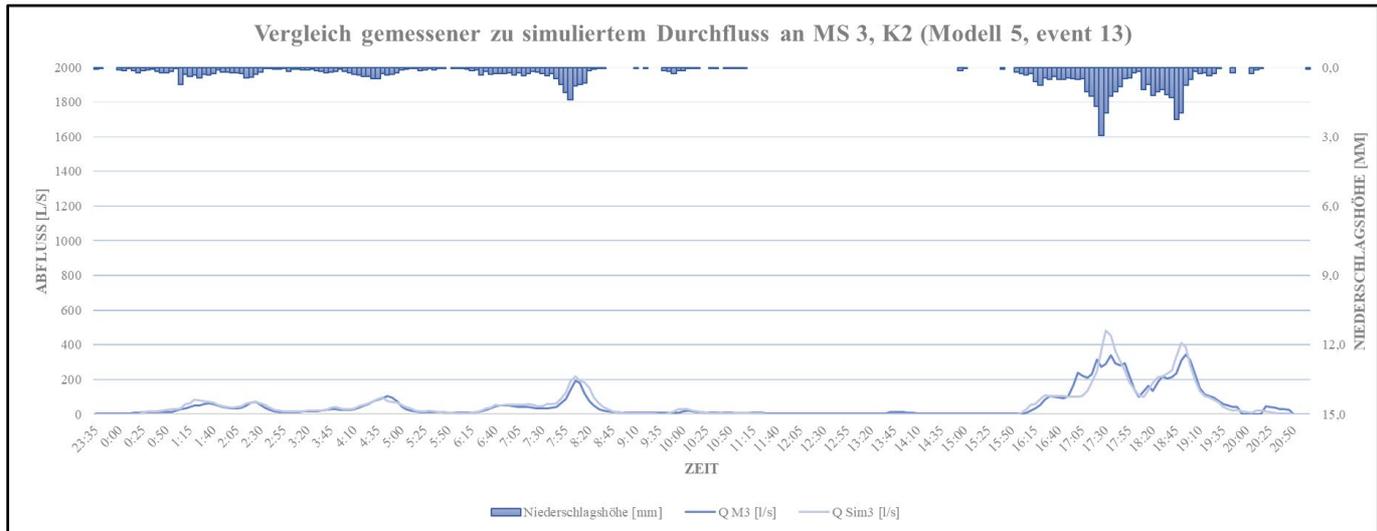


Anlagen

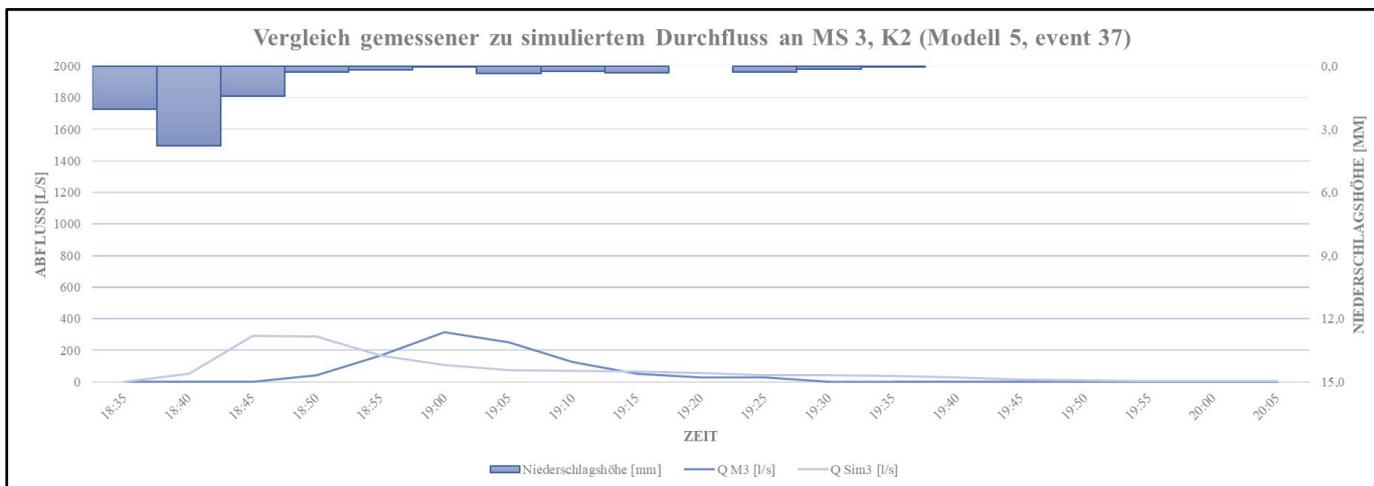
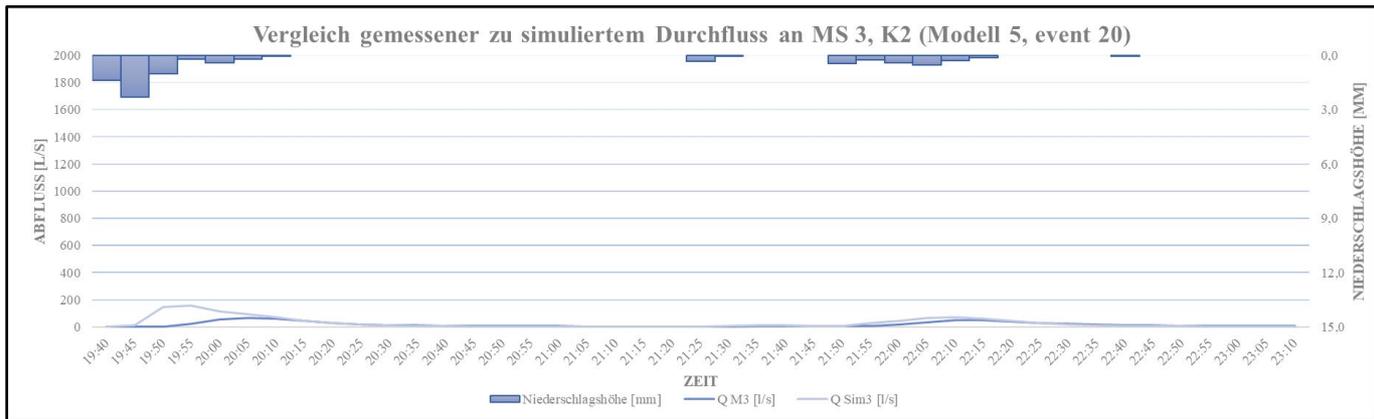


Kalibrierung der Anfangsverluste (K2) – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4003,75	3773,74	230,01	6,10	483,38	343,66	139,72	40,66	0,86
event 16	1944,54	1679,32	265,22	15,79	1558,80	1006,38	552,42	54,89	-0,23
event 20	361,76	227,15	134,60	59,26	160,18	66,64	93,54	140,36	-2,56
event 37	410,01	305,35	104,66	34,28	293,29	313,66	-20,38	-6,50	-0,47
Sum	6720,06	5985,56	734,50	12,27	2495,64	1730,34	765,30	44,23	-0,60

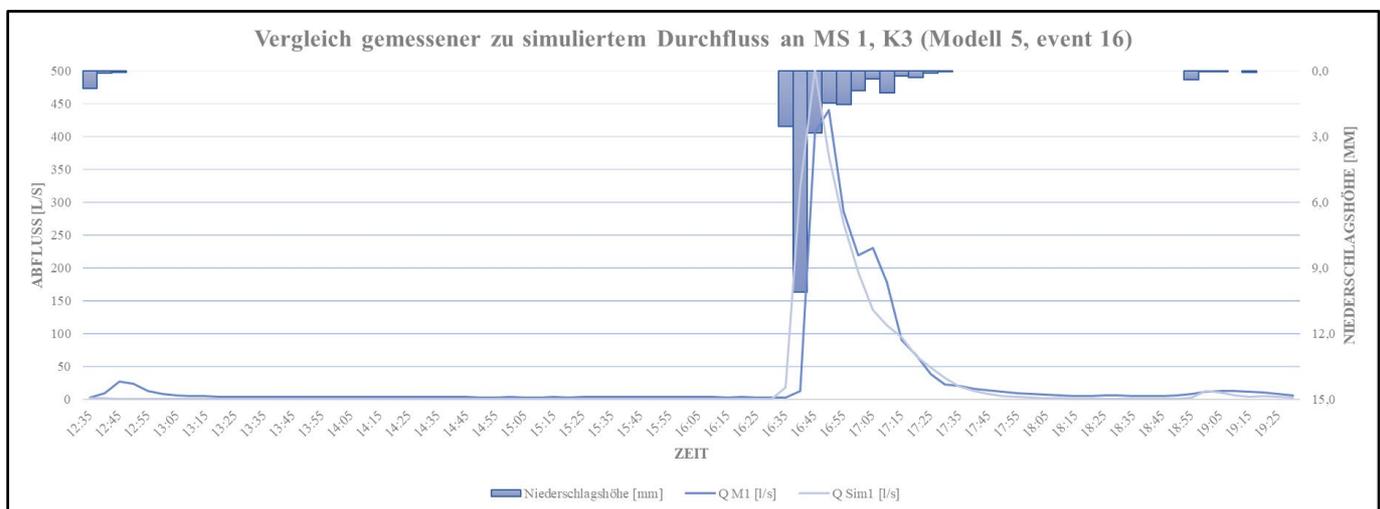
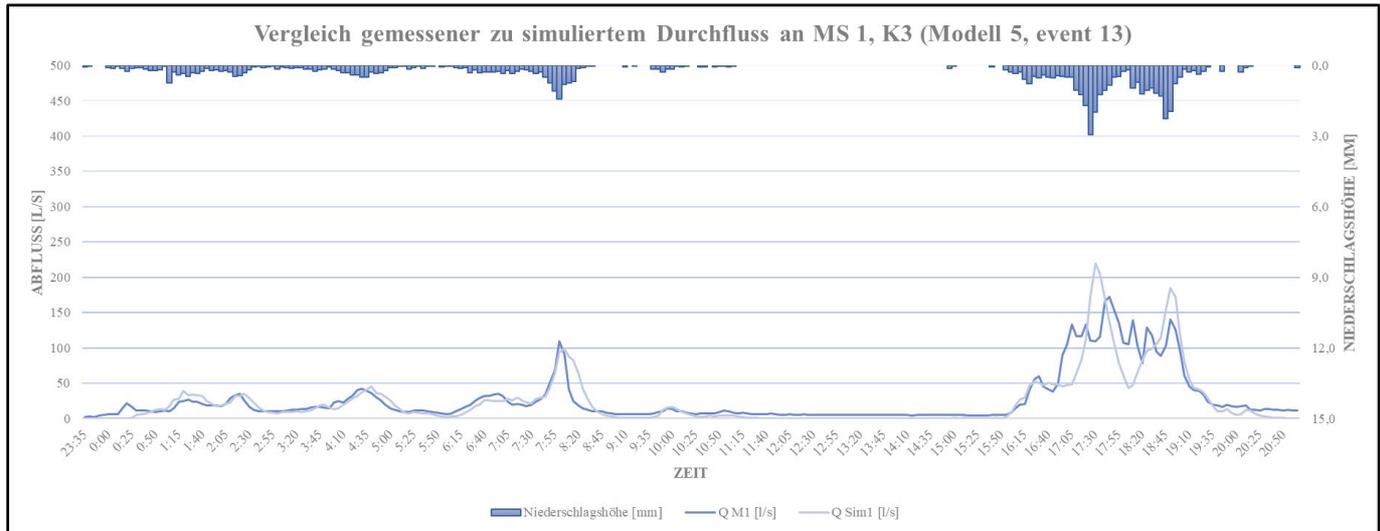


Anlagen

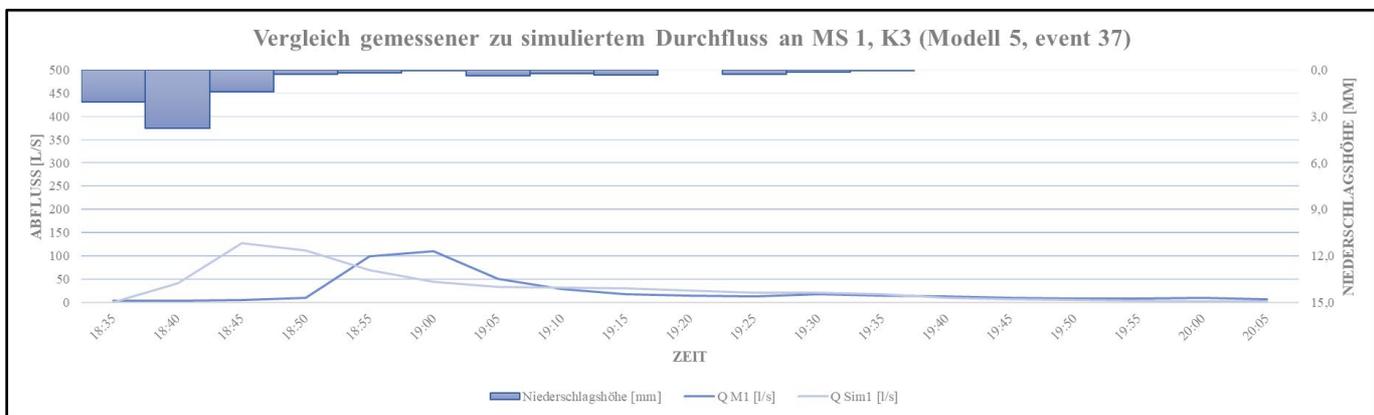
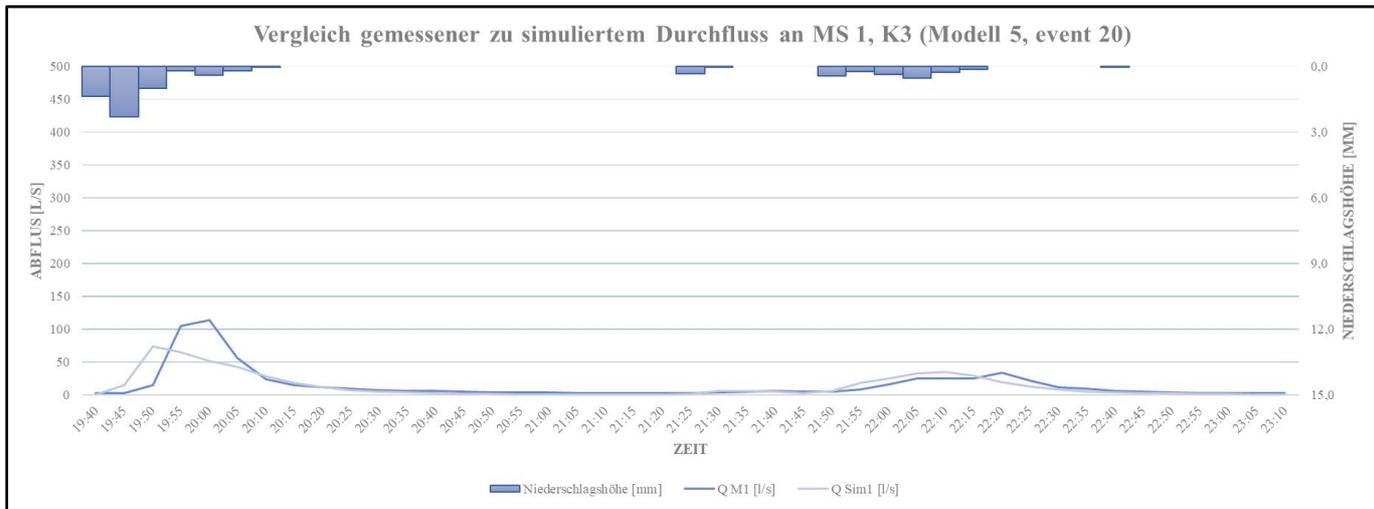


Kalibrierung der Oberflächenrauheit (K3) – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1839,48	2063,26	-223,78	-10,85	219,38	172,33	47,05	27,30	0,71
event 16	680,96	731,60	-50,65	-6,92	502,87	440,41	62,46	14,18	0,76
event 20	165,36	186,89	-21,54	-11,52	74,03	114,03	-40,00	-35,08	0,57
event 37	179,89	132,54	47,35	35,72	127,26	109,46	17,80	16,26	-0,98
Sum	2865,68	3114,29	-248,61	-7,98	923,54	836,23	87,31	10,44	0,26

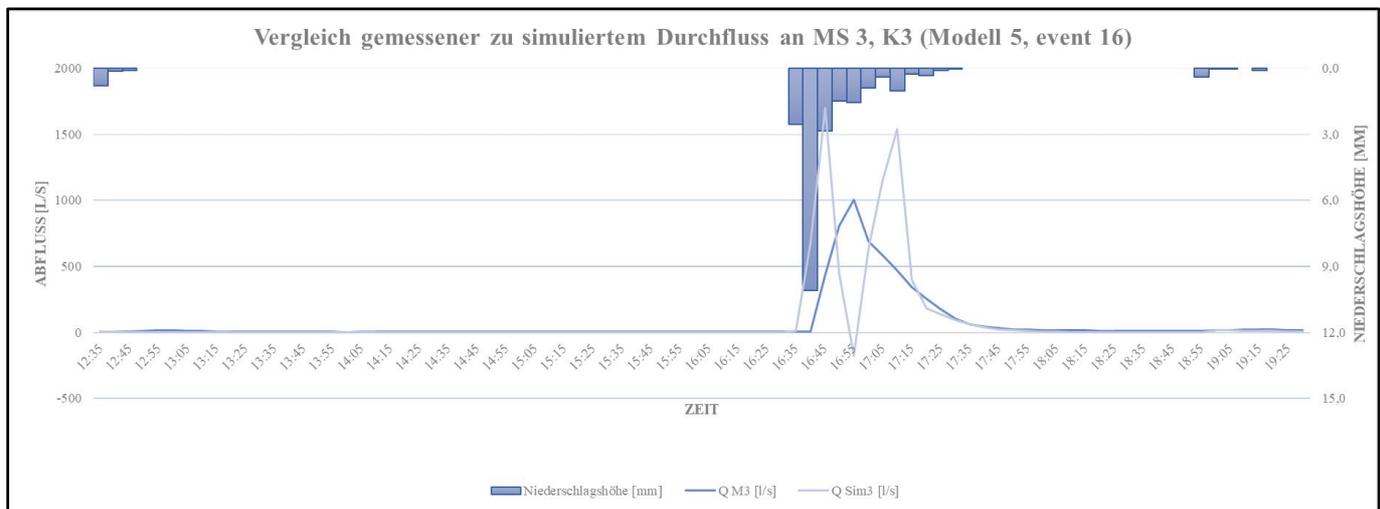
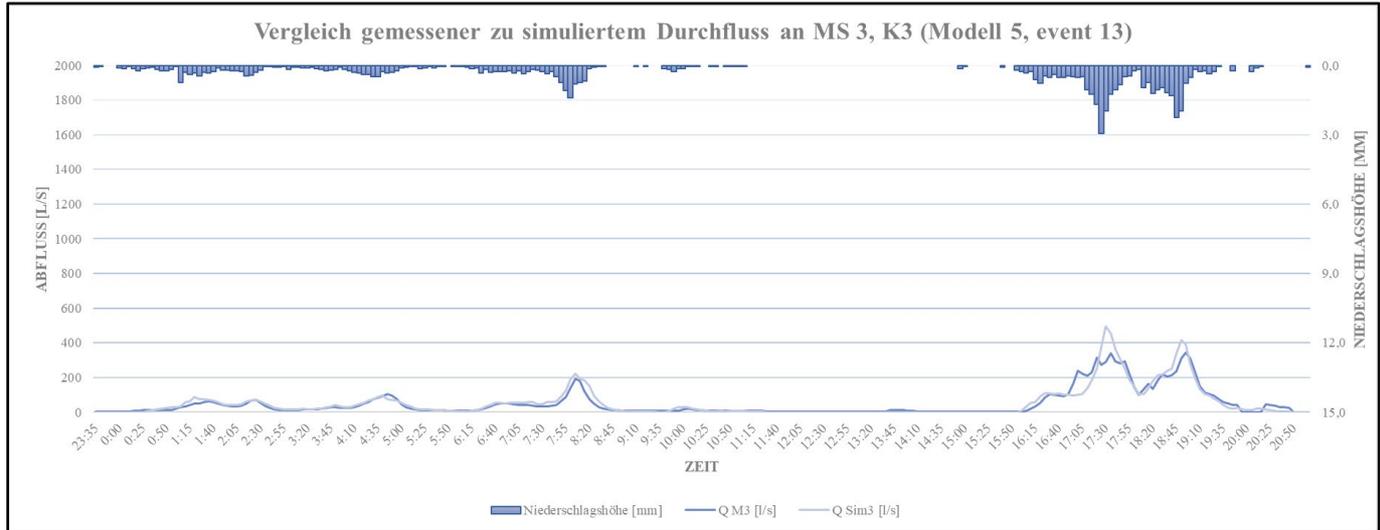


Anlagen

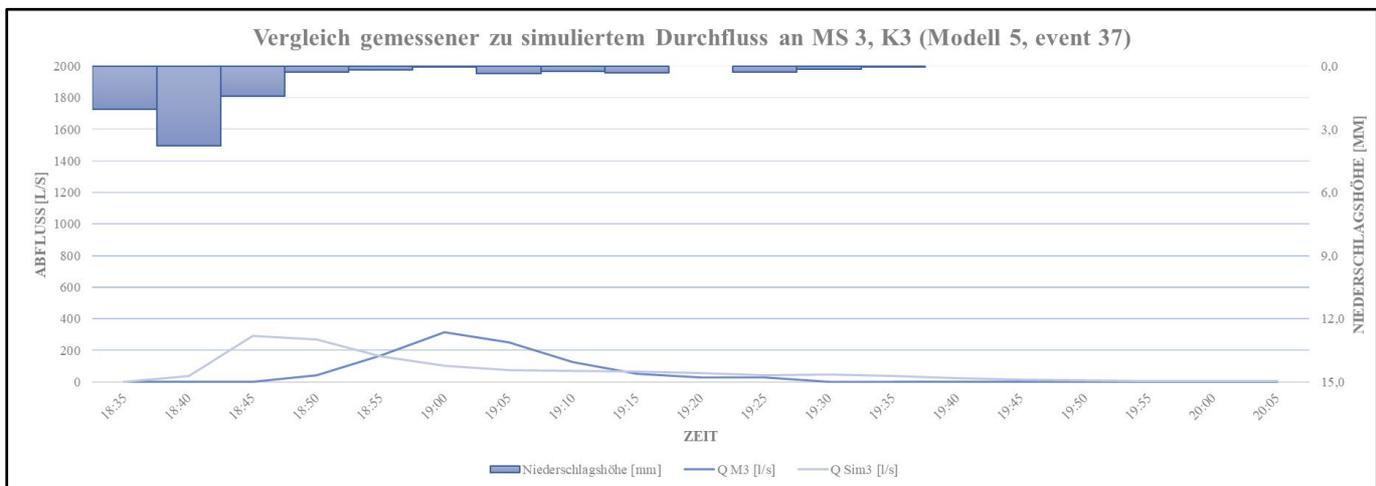
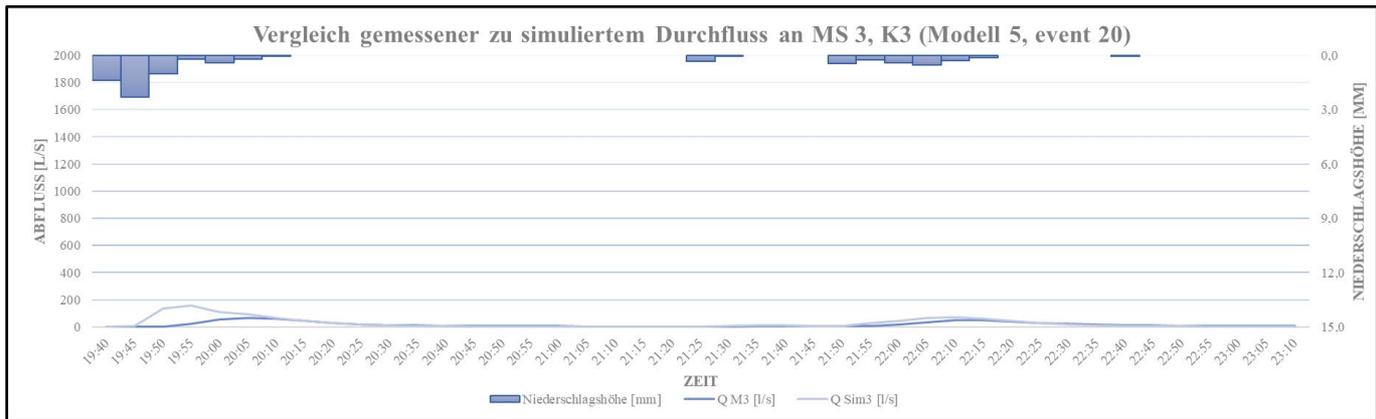


Kalibrierung der Oberflächenrauheit (K3) – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	4008,86	3773,74	235,12	6,23	494,14	343,66	150,48	43,79	0,86
event 16	2120,76	1679,32	441,44	26,29	1701,46	1006,38	695,08	69,07	-0,84
event 20	351,59	227,15	124,44	54,78	155,63	66,64	88,99	133,54	-2,18
event 37	396,16	305,35	90,81	29,74	290,03	313,66	-23,63	-7,53	-0,41
Sum	6877,37	5985,56	891,81	14,90	2641,26	1730,34	910,92	52,64	-0,64



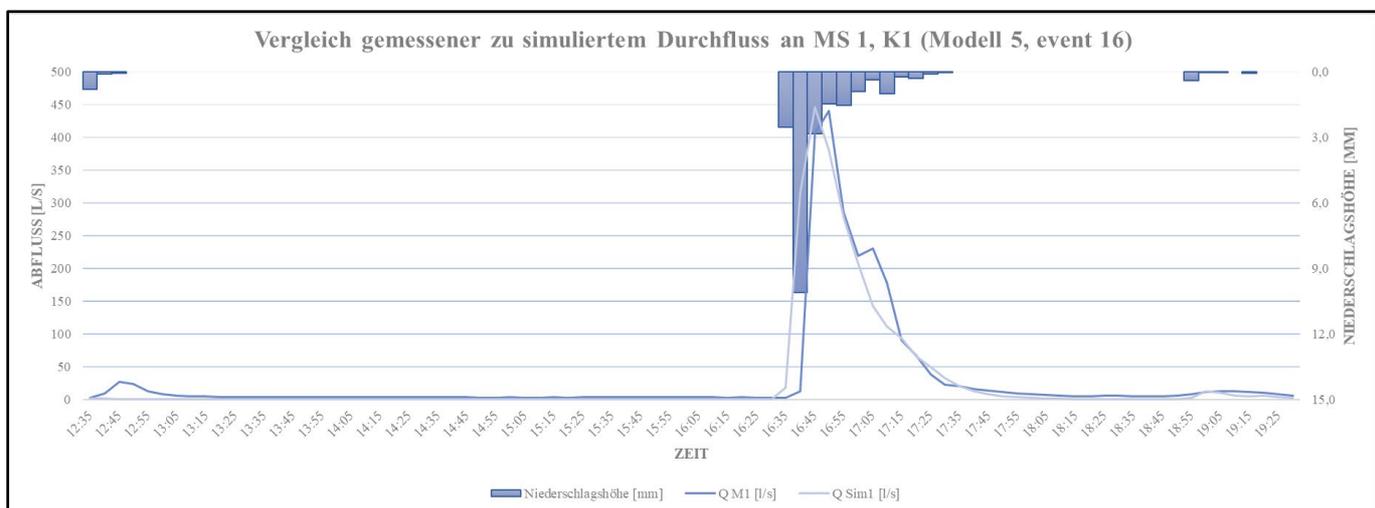
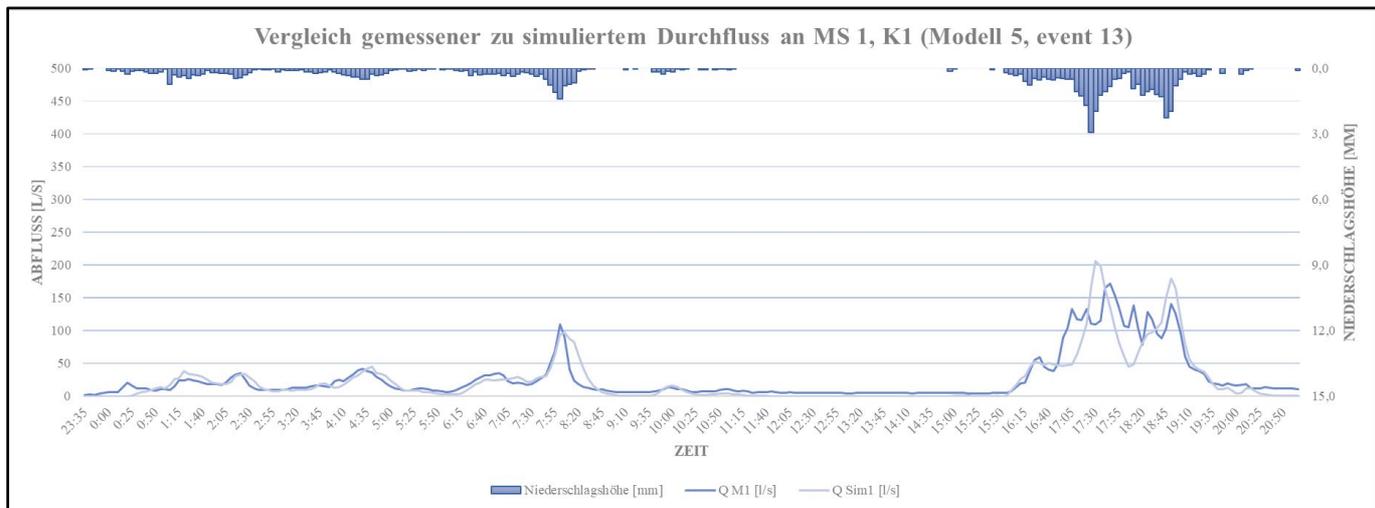
Anlagen



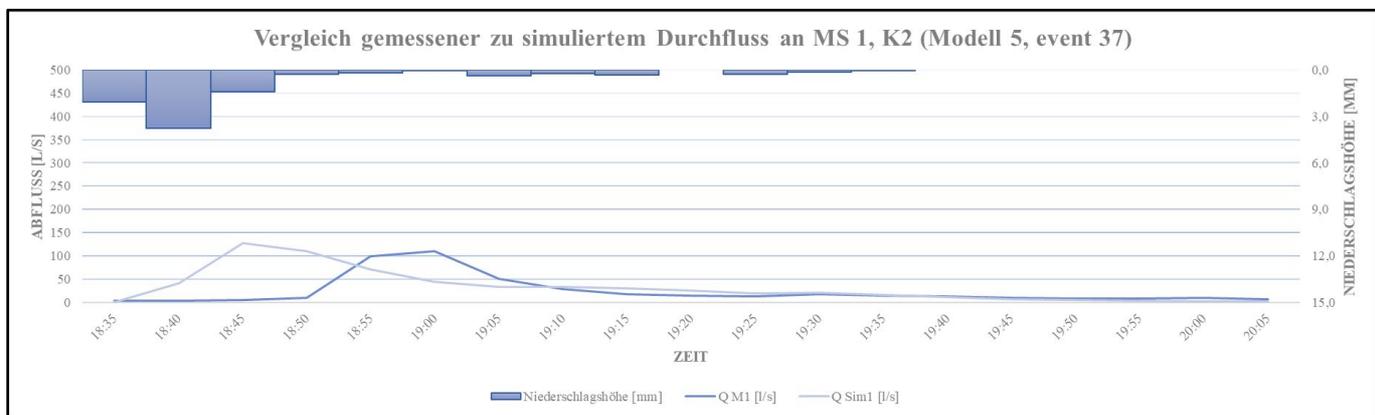
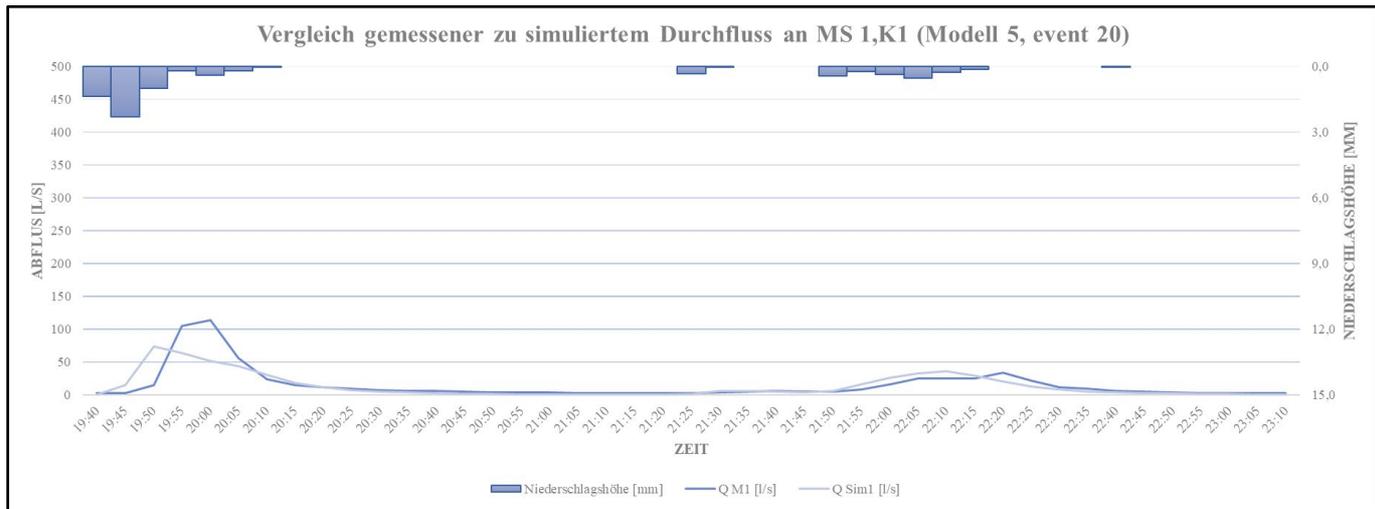
Anlage E – Finales Kalibrierungsergebnis (Modellvariante 5 am angepassten Untersuchungsgebiet berechnet anhand „Linear Reservoir“)

Finales Kalibrierungsergebnis – Messstelle 1

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	1821,67	2063,26	-241,59	-11,71	206,49	172,33	34,16	19,82	0,73
event 16	673,98	731,60	-57,62	-7,88	445,60	440,41	5,19	1,18	0,78
event 20	165,90	186,89	-21,00	-11,23	73,72	114,03	-40,31	-35,35	0,57
event 37	179,23	132,54	46,69	35,23	127,11	109,46	17,65	16,12	-0,93
Sum	2840,78	3114,29	-273,52	-8,78	852,91	836,23	16,68	1,99	0,29

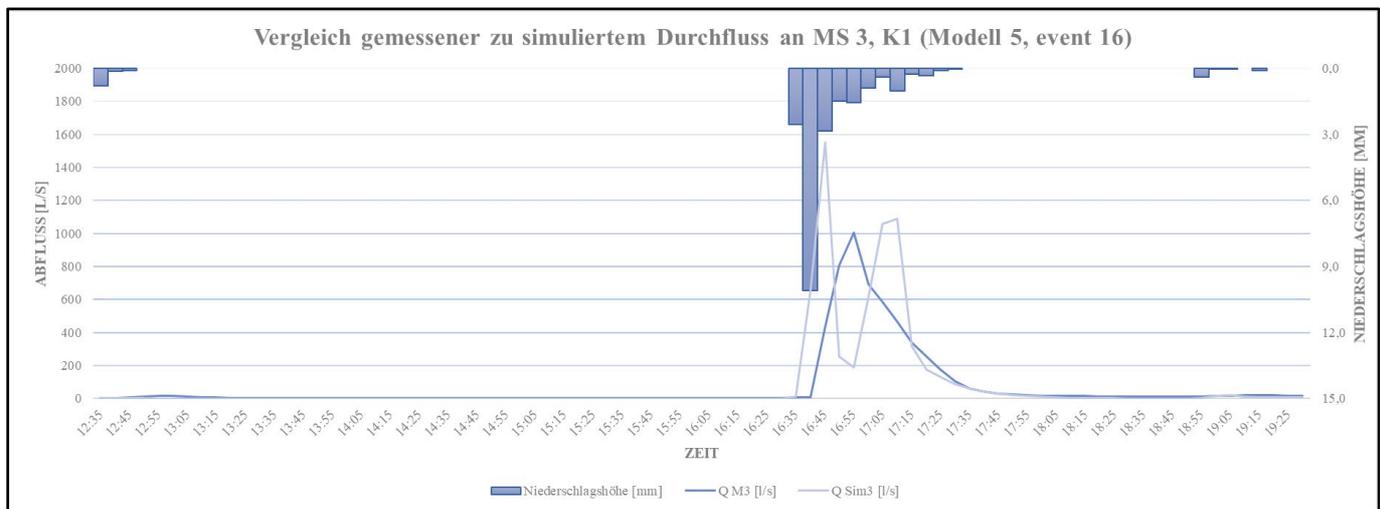
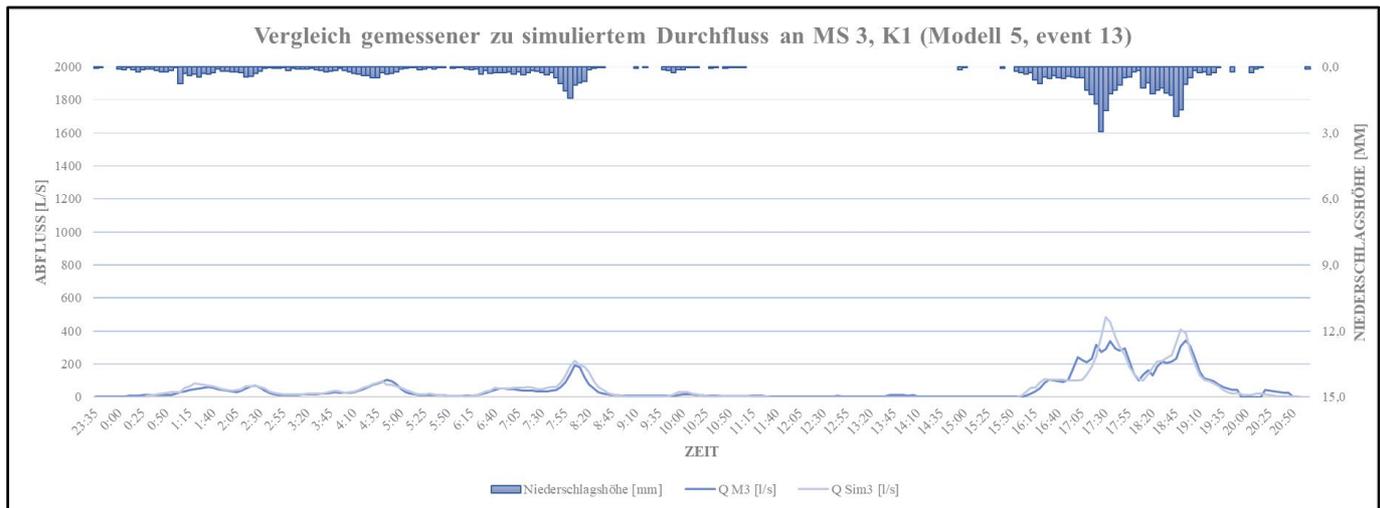


Anlagen



Finales Kalibrierungsergebnis – Messstelle 3

	Sim vol [m ³]	Obs vol [m ³]	delta vol [m ³]	VE [%]	Peak Sim [m ³ /s]	Peak Obs [m ³ /s]	delta peak [m ³ /s]	DYMAX [%]	NSE [-]
event 13	3993,13	3773,74	219,39	5,81	483,38	343,66	139,72	40,66	0,86
event 16	1932,87	1679,32	253,55	15,10	1553,03	1006,38	546,65	54,32	-0,19
event 20	351,84	227,15	124,69	54,89	154,18	66,64	87,54	131,36	-2,15
event 37	399,11	305,35	93,76	30,71	283,76	313,66	-29,90	-9,53	-0,42
Sum	6676,96	5985,56	691,40	11,55	2474,34	1730,34	744,00	43,00	-0,47



Anlagen

