



EINZUGSGEBIETS-BASIERTE
MODELLIERUNG PLUVIALER
HOCHWÄSSER AUSGELÖST
DURCH STARKNIEDERSCHLÄGE
AM BEISPIEL VON EINEM
PILOTGEBIET IN
OBERÖSTERREICH

**DIPLOMARBEIT VON
MATHIAS LAUDACHER**

**Einzugsgebietsbasierte Modellierung
pluvialer Hochwässer ausgelöst durch
Starkniederschläge am Beispiel von
einem Pilotgebiet in Oberösterreich**

DIPLOMARBEIT von

Mathias Laudacher

MATRNr.: 01340310

ZU ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES DIPLOM
INGENIEUR

BETREUER: KARSTEN SCHULZ, UNIV.PROF.
DIPL.GEOÖKOL. DR.RER.NAT.

MITBETREUER: HERRNEGGER MATHEW, DIPL.-ING.
DR.NAT.TECHN.

EINGEREICHT AM 10.10.2020

DEPARTMENT FÜR WASSER-ATMOSPHERE-UMWELT
(WAU)
INSTITUT FÜR HYDROLOGIE UND WASSERWIRTSCHAFT
(HYWA)
UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Hintergrund	12
1.2	Stand der Forschung	13
1.3	Zielsetzung / Fragestellung	14
1.4	Aufbau	15
2	Material und Methoden	16
2.1	Definition Starkniederschlag (Starkregen)	16
2.2	Entstehung Starkregen	18
2.3	Oberirdische Abflussbildungsprozesse	19
2.3.1	Abfluss infolge Infiltrationsüberschuss	21
2.3.2	Abfluss infolge Sättigungsüberschuss	21
2.4	Bemessungsniederschlag	22
2.4.1	3 Typen von Niederschlagsauswertungen:	23
2.4.2	MaxModN	23
2.4.3	ÖKOSTRA	24
2.4.4	Bemessungsniederschlag	24
2.5	Intensitätsverteilungen anfangsbetonter Niederschläge aus der Literatur	25
2.5.1	Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der BOKU	25
2.5.2	DVWK-Empfehlung (DVWK-Regel 113/1984)	26
2.5.3	Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz	27
2.6	Rauheitsbeiwerte Grundlagen Erläuterung	28
2.7	Abflussbeiwerte Grundlagen Erläuterung	32
2.7.1	Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot})	32
2.7.2	Abflussbeiwert unter Abflusskonstanz (ψ_{const})	33
2.7.3	Experimentelle Abflussbeiwertenerhebung	34
2.7.4	Umrechnung von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) in Abhängigkeit der Niederschlagsintensitäten (i_T)	37
2.7.5	HydroBod NÖ	38
2.7.6	Übertragung der HydroBod NÖ auf Oberösterreich	40
2.8	Niederschlags-Abfluss-Modell (JFlow)	45
2.8.1	2d Flachwassergleichung	47

2.8.2	Massenerhaltung	47
2.8.3	Impulserhaltung	47
2.8.4	Diskretisierung der Fläche	49
2.8.5	Diskretisierung der Zeit	49
2.9	Pilotgebiet Schwertberg	51
3	Ergebnisse	52
3.1	Niederschlagsauswertung	52
3.1.1	Niederschlagsdaten der ZAMG	52
3.1.2	Wetterstationen der ZAMG	54
3.2	Starkregenauswertung	55
3.2.1	Rohdaten Niederschlagsverteilung	56
3.2.2	Normierung der Zeit	57
3.2.3	Normierung der Fläche	58
3.3	Normganglinie	59
3.3.1	Gumbel-Verteilung (Extremwertverteilung Typ 1)	60
3.3.2	Auswertung der einzelnen Wetterstationen	62
3.3.3	Auswertung der anfangsbetonten Niederschlagsdaten	70
3.3.4	Entwicklung der Normganglinie	74
3.4	Niederschlags-Abfluss-Modellierung	80
3.4.1	Gebietsabgrenzung	80
3.4.2	Digitales Geländemodell (DGM)	82
3.4.3	Niederschlagsereignis	84
3.4.4	Dachwasser (hydrograph losses)	87
3.4.5	Rauhigkeitsbeiwertkarte	88
3.4.6	Abflussbeiwertkarte	92
3.5	Starkregenmodellierung	99
3.5.1	Hangwasserhinweiskarten verschiedener Modellszenarien	99
3.5.2	Differenzrechnung: Normganglinie und Blockregen	104
3.5.3	Monitoringlines	107
3.5.4	Gegenüberstellung Realereignis und Simulation	113
4	Diskussion	130
5	Zusammenfassung	142
	Literaturverzeichnis	144
6	Anhang	152

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende

Diplomarbeit/Masterarbeit

ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln geahndet wird („Verwendung unerlaubter Hilfsmittel“) und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann.

Diese Arbeit wurde neben der gedruckten Version auch auf CD-Rom/USB zur Prüfung der o.g. Erklärung bei der zuständigen Prüferin/dem zuständigen Prüfer hinterlegt.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank DI DR. Arthur Eisenbeiss der es mir ermöglicht hat mich mit diesem Thema so intensiv auseinanderzusetzen. Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem EPZ bedanken, die mir bei Fragen und mit guten Ratschlägen stets zur Seite gestanden sind.

Meinen lieben Freund Gabriel danke ich ganz besonders für seine Hilfe und für seine unzähligen Expertisen sowie sein stets offenes Ohr bei Fragen bezüglich der Starkregenauswertung.

Meinem Bruder möchte ich für seine fachmännisch angefertigte Zeichnung zur Illustration der Oberflächenabflussbildungsprozesse danken.

Der Größte Dank jedoch gilt meiner Frau Daria, die mir in dieser intensiven Zeit stets den Rücken freigehalten hat und in den letzten Monaten unglaubliches geleistet hat und mir dadurch erst diese Arbeit ermöglicht hat.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Für Lina, meinen Lebensmittelpunkt

Abstract

Deutsch: Die vorliegende Diplomarbeit gibt einen Überblick über die zentralen Eingangsparameter in die Niederschlags-Abfluss-Modellierung und deren Auswirkung auf das Modellergebnis am Beispiel von Hangwassersimulationen an einem in Oberösterreich gelegenen Pilotgebiet. Dabei wurde auf der Grundlage von Starkregenauswertungen eine Intensitätsganglinie (Normganglinie) für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse entwickelt und auf das Konzept der Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) angewendet. Unter Verwendung der ermittelten Eingangsgrößen wurden Oberflächenabflusssimulationen auf der Grundlage eines 2d hydraulischen Modells durchgeführt. Dabei wurde die Einflussnahme zwischen einem Niederschlagsereignis mit Intensitätsverteilung (Normganglinie) und einer Rechteckverteilung (Blockregen), sowie die Auswirkungen im Modell angewendeter Abflussbeiwerte (ψ_{const}) als Verlustgrößen, untersucht. Der Autor erhofft sich durch die Feststellung einer typischen Intensitätsverteilung von Starkniederschlägen, sowie deren Anwendung in Kombination mit Abflussbeiwerten (ψ_{const}), eine signifikante Verbesserung der Simulationsergebnisse in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung.

Englisch: The present thesis gives an overview of the most influential input parameters in rainfall-runoff- Models and their effect on the model result by using flash flood simulations at a pilot area in Upper Austria. Based on heavy rainfall evaluations, an intensity curve (Normganglinie) was developed for precipitation events with an emphasis on the beginning. The developed curve was applied to the concept of surface runoff coefficients with constant discharge (ψ_{const}). By using the determined input parameters, surface runoff simulations were executed based on a 2d hydraulic model. Whereby the influence between a precipitation event with an intensity distribution (Normganglinie) and a rectangular distribution (Blockregen) was examined. Furthermore, the impact of surface runoff coefficients (ψ_{const}) as a loss term were considered in the model. The author expects that the determination of a typical hydrograph of heavy precipitation events and its application in combination with runoff coefficients (ψ_{const}) will improve the results of rainfall-runoff Simulations.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Oberflächenabflussbildungsprozesse: Abfluss infolge Infiltrationsüberschuss (Horton'scher Oberflächenabfluss) (links), Abfluss infolge Sättigungsüberschuss (Dunn'scher Oberflächenabfluss) (rechts) [Laudacher, 2020]	20
2.2	Bemessungsniederschlag des Gitterpunktes 2636, Lage östlich von Schwertberg; Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oben) und ÖKOSTRA (unten)-Werten [BMLRT, o.j.]	22
2.3	Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des Instituts für Alpine Naturgefahren (IAN): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts) [Hübl, 1998]	25
2.4	Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (seit 2004 DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts)	26
2.5	Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des Geo7 (Schweiz): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts) [Kipfer et al., 2018]	27
2.6	Charakteristik der Rauheit von Gerinnehydraulik (links) und Hangwasserabflüssen/Oberflächenabflüssen (rechts) [Rodriguez, 2017]	30
2.7	schematische Darstellung der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung [Kohl, 2011] [Achleitner et al., 2020], Initialabstraktionszeit (t_o), Oberflächenlaufzeit (t_{OB}), Nachlaufzeit (t_N), Niederschlagsintensität (i_T), Abflussbeiwert ($\psi(t)$)	33
2.8	Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität (i_T) und dem Oberflächenabflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) für verschiedene Abflussklassen [Kohl et al., 2013]	37
2.9	Abflussbeiwert in Abflusskonstanz (ψ_{const}) für einen standardisierten Niederschlag ($N = 100$ mm; $D = 60$ min) mit Berücksichtigung einer potentiellen Verschlammungsneigung; Modell HydroBod NÖ II [Sotier et al., 2017]	40
2.10	Standardabweichung der Abflussbeiwerte in Abflusskonstanz (ψ_{const}) bei Klassifizierung nach der Kombination aus Corine Landnutzung und geologischen Einheiten (CLC_{2012} und GK_{200}) [Kohl und Achleitner, 2019]	42

2.11	Abflussbeiwert in Abflusskonstanz (ψ_{const}) übertragen entsprechend der Klassifizierung von Corine Landcover (CLC_{2012}) in Kombination mit geologischen Einheiten (GK_{200}) - Kartenausschnitt Oberösterreich und Niederösterreich [Kohl und Achleitner, 2019]	43
2.12	Gegenüberstellung der Übertragenen Mittelwerte samt Standardabweichung (Box-Plots) mit den experimentell erhobenen Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) (rot) aus Schwertberg (2015/2016) [Kohl und Achleitner, 2019]	44
2.13	Schematisches Diagramm der Tabellen einer JFlow Projektdatenbank Tabellen sind farbcodiert nach ihrem Typ: Eingabedatentabellen sind blau, Tabellen sind orange und Ausgabedatentabellen sind grau. Abhängigkeiten zwischen Tabellen werden durch Pfeile angezeigt, wobei durchgezogene und gestrichelte Linien die erforderlichen bzw. optionalen Abhängigkeiten angeben [Berry, 2020]	46
2.14	Gerinneskizze [Volz, 2002]	48
2.15	Pilotgebiet Schwertberg: Orthofoto (links) Hillshade/Schummerung (rechts)	51
3.1	Bei den roten Kreisen mit schwarzer Füllung handelt es sich um die betrachteten Wetterstationen: Linz, Freistadt, Gmunden, Bad Zell, Enns, Horsching, Bad Ischl, Wels; Das rote Kreuz markiert das Pilotgebiet Schwertberg [ZAMG, o.J.]	54
3.2	Wels: Die Abbildungen zeigen die Ganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) (Beginn und Ende des Ereignisses wird bei einer erstmaligen Überschreitung bzw. letztmaligen Unterschreitung einer Intensität von 0,2 mm/min gewählt.)	55
3.3	Rohdaten für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels	56
3.4	Normierung der Ereignisdauer für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels	57
3.5	Normierung der Fläche unter der Niederschlagskurve für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels	58
3.6	Die Gumbelverteilung ist zweiparametrig, doppelt exponentiell, asymmetrisch mit einer festen Schiefe und rechtsseitig unbegrenzt [Nachtnebel, 2007]	61
3.7	Wels: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	63

3.8	Bad Ischl: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	64
3.9	Freistadt: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	65
3.10	Gmunden: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	67
3.11	Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten anfangsbetonnten Niederschlagsganglinien (50 % der Niederschlagssumme fallen bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer) sowie die Kurvenanpassung (Gumbel-Verteilung) für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . . .	70
3.12	Vergleich der Kurvenanpassungen mittels Gumbel-Verteilung, anfangsbetonte Niederschlagsereignisse gesamt (anf.N.ges.) [Grün], anfangsbetonte Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min (anf.N.0,2) [Rot].	73
3.13	Normganglinie (Norm.anf.N.ges.): Die Abbildung zeigt die standardisierte (flächenkorrigierte) Gumbel-Verteilung mit der Fläche unter der Kurve von 1	76
3.14	Die Abbildungen zeigen die Anwendung der Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) für ein T100D60 Ereignis (links) und für ein T30D30 Ereignis (rechts) auf der Grundlage von Bemessungsniederschlägen	77
3.15	Intensitätsverteilung auf Grundlage der Normganglinie (links), Niederschlagsereignis konstanter Intensität (Blockregen) (rechts) für den 100 jährlichen, 60-minütigen Bemessungsniederschlag für Schwertberg; Normganglinie und Blockregen besitzen die gleiche Niederschlagssumme von 48,9 mm	87
3.16	Übersichtskarte der Landbedeckungsklassen für das Pilotgebiet Schwertberg	89
3.17	schematische Darstellung des Abflussbeiwertes in Abflusskonstanz($\psi_{(const)}$) ohne Initialabstraktion (t_o) [Achleitner et al., 2020], Initialabstraktionszeit (t_o), Oberflächenlaufzeit (t_{OB}), Nachlaufzeit (t_N), Niederschlagsintensität (i_T), Abflussbeiwert ($\psi_{(t)}$)	92

3.18	Geologische Karte (GK_{200}) (links); Corine Land Cover (CLC_{2012}) (rechts)	93
3.19	Verschneidung der GK_{200} (gelbe Linien) mit CLC_{2012} (rote Linien)(links); Die aus der Verschneidung der GK_{200} mit CLC_{2012} resultierenden 26 Flä- chen mit deren Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz ψ_{const})	94
3.20	Repräsentative Abflussbeiwertkurven aus dem Pilotgebiet Schwertberg: Abflussbeiwerte ($\psi_{const_{48,9}}$) auf der Grundlage der Normganglinie (Run162) (links), Abflussbeiwerte ($\psi_{const_{48,9}}$) auf der Grundlage des Blockregens (Run163) (rechts)	96
3.21	Maximale Wasserstände: Normganglinie mit Abflussbeiwerte bei Abfluss- konstanz (ψ_{const}) aus Run162 (links), Blockregen mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 163 (rechts)	100
3.22	Maximale Fließgeschwindigkeiten: Normganglinie mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run162 (links), Blockregen mit Abflussbei- werte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 163 (rechts)	101
3.23	Maximale Wasserstände: Normganglinie ohne Abflussbeiwerte bei Abfluss- konstanz (ψ_{const}) aus Run164 (links), Blockregen ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 165 (rechts)	102
3.24	Maximale Fließgeschwindigkeit: Normganglinie ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run164 (links), Blockregen ohne Abflussbei- werte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 165 (rechts)	103
3.25	Differenzrechnung: Subtraktion der maximalen Wassertiefen aus Norm- ganglinie und Blockregen ($Run162h_{max} - Run163h_{max}$) (links),Subtraktion der maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Normganglinie und Blockregen ($Run162v_{max} - Run163v_{max}$) (rechts)	104
3.26	Prozentuale Auswertung der Differenzrechnungen auf Basis des 0,5 x 0,5 m Rasters: Prozentanteile der Differenzen an den Differenzbereichen ($Run162h_{max} - Run163h_{max}$) für die gesamte Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Differenzbereichs von ± 2 cm (links), Prozentan- teile der Differenzen an den Differenzbereichen ($Run162v_{max} - Run163v_{max}$) für die gesamte Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Dif- ferenzbereichs von $\pm 0,1$ m/s (rechts)	105
3.27	Übersicht über die im Modell umgesetzten Monitoringliens/Kontrollquerschnitte für das betrachtete Einzugsgebiet in Schwertberg	107
3.28	Geländequerschnitte der untersuchten Monitoringlines mit eingezeichneten maximalen Wasserständen der Simulationen Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})) , Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})), Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte (ψ_{const})), Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwerte (ψ_{const}))	108

3.29	Darstellung der Abflüsse an den untersuchten Monitoringlines der Simulationen Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte (ψ_{const}) (oben) und Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte (ψ_{const}) (unten)	109
3.30	Darstellung der Abflüsse an den untersuchten Monitoringlines der Simulationen Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte (oben) und Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwerte (unten)	112
3.31	Übersicht über die Standorte bei denen eine Gegenüberstellung der Realereignisse und der Simulationsergebnisse von Normganglinie und Blockregen durchgeführt wurde	114
3.32	STANADORT1 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2016 aus Schwertberg (links) Der gelbe Kegel markiert die Anschlagmarke des Wasserstands dargestellt am Bild rechts [Achleitner et al., 2017]	115
3.33	STANADORT1 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.32	115
3.34	STANADORT1 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)	116
3.35	STANADORT2 Ereignisaufnahmen aus dem Jahr 2011 aus Schwertberg/Poneggen, Der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle	118
3.36	STANADORT2 Run162: Maximale Wassertiefen >5 cm (oben links), Maximale Wassertiefen >2 cm (Mitte links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen >5 cm (oben rechts), Maximale Wassertiefen >2 cm (Mitte rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.35	119
3.37	STANADORT2 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)	121
3.38	STANADORT3 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2011 aus Schwertberg/Poneggen, der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle	122
3.39	STANADORT3 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.38	123
3.40	STANADORT3 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)	124

3.41	STANADORT4 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2016 aus Schwertberg, Der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle	125
3.42	STANADORT4 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), Maximale Wassertiefen plus Hillshade (Mitte links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), Maximale Wassertiefen plus Hillshade (Mitte rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.41	126
3.43	STANADORT4 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)	128
6.1	Linz: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	152
6.2	Bad Zell: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	153
6.3	Enns: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	153
6.4	Hörsching: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind	154
6.5	zeigt die in Schwertberg in der Form von Modifikationen am digitalen Geländemodell um 15cm erhöhten offen Mauern	156

Tabellenverzeichnis

2.1	Modellregen für Niederschläge von einer Stunde mit prozentualen 5 Minuten Anteilen [Kipfer et al., 2018]	27
2.2	Empfehlung höhenabhängiger Rauigkeitsbeiwerte (Strickler-Werte k_{st}) *Für diese Landnutzungsarten sind keine Dünnfilmabflüsse anzusetzen [LUBW, 2020]	31
2.3	Abflussbeiwertklassen (AKL), Klassengrenzen des Abflussbeiwertes als Absolutwert (ψ_{100}) [abs.] bzw. in % des aufgebrachtten Niederschlages (ψ_{100}) [%] [Kohl, 2011], Grün = positive Abflussverhältnisse, rot = hoher Abfluss [Markart et al., 2006]	36
2.4	Berechnungsstandorte und zugehörnde Klassenbezeichnungen, CLC: 112 = Nicht durchgängig städtische Prägung, 211 = Nicht bewässertes Ackerland (Berechnungsversuche Schwertberg 2015/2016) [Kohl und Achleitner, 2019] .	43
3.1	Wels: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)	63
3.2	Bad Ischl: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)	64
3.3	Freistadt: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)	66
3.4	Gmunden: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . .	67
3.5	Vergleich der entwickelten Normganglinie mit Verteilungsfunktionen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.5); max. Int. = maximale Intensität [mm/min], Zeit bei Erreichen der maximalen Intensität [min]	78
3.6	Auflistung der Landbedeckungsklassen und deren prozentuale Anteile am Pilotgebiet Schwertberg	90
3.7	Übersicht der Rauigkeitsbeiwerte für die im Pilotgebiet Schwertberg ausgewiesenen Landbedeckungsklassen	90

3.8	Flächen-ID's der Abflussbeiwertklassen des Pilotgebiets Schwertberg mit den dazugehörigen Flächen der GK_{200} und CLC_{2012} sowie den ausgewiesenen Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz ($\psi_{const100}$)	95
3.9	Gegenüberstellung repräsentativer mittlerer Oberflächenabflüsse und Dränung der Normganglinie (Run162) und des Blockregens (Run163) aus dem Pilotgebiet Schwertberg	97
3.10	Übersicht über die Eingangsparameter der durchgeführten Niederschlags-Abfluss-Simulationen mittels JFlow	99
6.1	Linz: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . . .	152
6.2	Bad Zell: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . . .	153
6.3	Enns: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . . .	154
6.4	Hörsching: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) . .	154
6.5	Gegenüberstellung aller mittlerer Oberflächenabflüsse und Dränung der Normganglinie (Run162) und des Blockregens (Run163) aus dem Pilotgebiet Schwertberg	155

Kapitel 1

Einleitung

„Katastrophen kennt allein der Mensch, sofern er sie überlebt. Die Natur kennt keine Katastrophen“ [Frisch, 1986].

1.1 Hintergrund

Die Veränderung des globalen Klimas ist allgegenwärtig und zu einem der Hauptthemen des 21. Jahrhunderts geworden. „Untersuchungen ergeben, dass mit einer Erwärmung von bis zu 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau einige regionale klimatische Veränderungen eintreten werden, darunter eine Erhöhung extremer Temperaturen in vielen Regionen (hohes Vertrauen), Zunahmen der Häufigkeit, Intensität und/oder Menge an Starkniederschlag in einigen Regionen (hohes Vertrauen)“ [Masson Delmotte et al., 2018].

Auch Österreich ist von den klimatischen Veränderungen und dadurch hervorgerufenen Wetterextremen nicht gefeit. Vertraut man den Einschätzungen der ZAMG, wird es auch in Oberösterreich künftig vermehrt zu extremen Ereignissen kommen [ZAMG, 2020].

Betrachtet man die letzten Sommer, so hatten diese eines gemeinsam, sie waren durchwegs heiß und es traten in Oberösterreich punktuell Unwetter mit enormen Niederschlagsmengen innerhalb kürzester Zeit auf. Mit den Auswirkungen solcher Unwetter ändern sich auch die Bedrohungen für unser Bundesland. Bei solch starken Regenfällen, wo 50 Litern pro m² (und mehr) in 60 Minuten keine Seltenheit sind, entstehen auf Grünland reißen-de Flüsse und öffentliche Kanäle sind unmöglich in der Lage die Wassermengen geregelt abzuleiten [Starl, 2020]. Die steigende Bodendegradation wie auch Verbauungsdichte und die damit einhergehende Bodenversiegelung verschärfen die Situation zusätzlich.

Das häufigere Auftreten von Starkniederschlägen hat zur Folge, dass Überflutungen an Orten auftreten, an denen in der Vergangenheit nie welche aufgetreten sind. Radarda-

ten zeigen insbesondere, dass kurze Starkregen (und damit Sturzfluten) überall auftreten können [Seibert und Auerswald, 2020]. Anders ausgedrückt sind Auswirkungen dieser Extremwettererscheinungen nicht nur auf flusshochwassergefährdete Bereiche beschränkt, sondern treten meist abseits von Gewässern auf und treffen dadurch Regionen, Menschen und deren Bauwerke in völlig unvorbereitetem Zustand.

Dazu kommt, dass das Bewusstsein in der Bevölkerung die Hangwasserthematik betreffend nach wie vor sehr gering ist. Ein Grund dafür ist der in Österreich nicht ausreichend vorhandene Stand der Technik, welchen die vorliegende Arbeit in den betrachteten Bereichen ebenfalls versucht zu definieren bzw. mit zu gestalten, sodass dann klare Regeln für die Anwendung in der Hangwasserprävention entstehen können.

1.2 Stand der Forschung

Modernste Simulationsmodelle ermöglichen heute das vorzeitige Erkennen signifikanter Risikogebiete für Hangwasser. Zentrale Berechnungsrundlage bilden bei den Simulationsmodellen die sogenannten Eingangsparmeter, wie zum Beispiel Niederschlag, Rauheitsbeiwerte oder Verlustgrößen. „Für die praktische Anwendung in der Niederschlagsabflussmodellierung stellt der Inputparameter Niederschlag die größte Unbekannte dar“ [Kohl, 2011]. So ist es bei der Berechnung von Oberflächenabflüssen mit Niederschlags-Abfluss-Modellen nach wie vor verbreitet, einen sogenannten Blockregen zu verwenden, das heißt die Niederschlagsintensität bleibt über den gesamten Zeitraum des Niederschlags konstant, obwohl andere Niederschlagsverläufe durchaus zu höheren Abflussspitzen führen können [Kohl, 2011]. Die Umsetzung einer zeitlichen Niederschlagsintensität ist wichtig, da der Abflussscheitel die Höhe des Schadens und die geschädigte Fläche bestimmt. Die kleinsten Scheitelabflüsse entstehen meist, wenn ein Blockregen angenommen wird. Eine konstante Niederschlagsintensität ist allerdings in der Regel unrealistisch, gerade bei kurzen, konvektiven Starkregen [Seibert und Auerswald, 2020]. In der Realität lässt sich eine deutliche Variabilität in der zeitlichen Niederschlagsintensität bei einem Schauer oder Gewitter feststellen [Kohl, 2011]. Eine Studie aus Baden Württemberg zeigt, dass Starkniederschlagsereignisse dort im mittel Anfangsbetont sind [Koch et al., 2016].

Des Weiteren zeigt die Aufarbeitung von Hochwasserereignissen, dass bei plausibler Parametrisierung eines Ereignismodells unter Verwendung flächig und zeitlich aufgelöster Niederschlagsdaten Ergebnisse erzielt werden können, die sehr nahe an veröffentlichten Pegeldaten liegen [Kohl et al., 2008] [Starl, 2020]. Unter solchen Voraussetzungen steigt auch das Vertrauen in die Realitätsnähe der kalkulierten Abflüsse von unbeobachteten Teileinzugsgebieten [Kohl et al., 2013].

1.3 Zielsetzung / Fragestellung

Die zentrale Berechnungsrundlage in Niederschlags-Abfluss-Modellen bilden die sogenannten Eingangsparameter, die da wären Niederschlag, Rauheitsbeiwerte oder Verlustgrößen wie zum Beispiel die Infiltration. Als Eingangsparameter mit der größten Auswirkung auf die Simulationsergebnisse eines näherungsweise Modell wurde in vorarbeiten der Niederschlag bzw. dessen Intensitätsverteilung identifiziert. Des Weiteren gilt der Niederschlag als größte Unbekannte in der Niederschlagsabflussmodellierung [Kohl, 2011]. Für eine Verbesserung der Simulationsergebnisse von Oberflächenabfluss in Folge von Infiltrationsüberschuss (sogenanntem Horton'schem Oberflächenabfluss [Horton, 1933]) ist es deshalb notwendig die zeitliche Verteilung der Niederschlagsintensität zu kennen. Auf der Grundlage von Starkregenauswertungen soll der zeitliche Intensitätsverlauf von Starkniederschlägen mittels Funktion bestmöglich beschrieben werden. Die dadurch in dieser Arbeit auf der Grundlage realer Niederschlagsereignisse entwickelte Normganglinie wird unter der Verwendung eines 2d hydraulischen Modells an einem Pilotgebiet angewendet. Durch die Verwendung einer Niederschlagsganglinie, bei welcher die zeitliche Variabilität der Intensität berücksichtigt wird, anstelle eines nach wie vor oft zur Anwendung kommenden Blockregens, sollen die Simulationsergebnisse (Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit) deutlich verbessert werden. Als Weiterer tragender Eingangsparameter in das Niederschlags-Abfluss-Modell sind die Verluste zu nennen, die in der vorliegenden Arbeit in der Form von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) umgesetzt werden. Auf Grund der Tatsache, dass die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) eine Abhängigkeit der Niederschlagsintensität aufweisen, soll im Rahmen dieser Arbeit des Weiteren eine Anwendung bei einer verwendeten Niederschlagsganglinie erarbeitet werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Feststellung einer typischen Intensitätsverteilung von Starkniederschlägen, sowie deren Anwendung in der Kombination mit Abflussbeiwerten (ψ_{const}), wodurch eine signifikante Verbesserung der Simulationsergebnisse in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung sicher gestellt werden soll.

Folgende Forschungsfragen sollen beantwortet werden:

Forschungsfrage 1:

Lässt sich anhand von Auswertungen realer Starkregenereignisse eine typische Verteilung von Starkniederschlägen in Bezug auf deren Kurvenbetontheit (anfangs-, mitten-, endbetont) feststellen?

Forschungsfrage 2:

Kann die Intensitätsverteilung eines Starkniederschlagsereignisses als Eingangsparameter in die Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Grund von marginalen Auswirkungen eines näherungsweisen Modells vernachlässigt werden, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist?

Forschungsfrage 3:

Kann auf Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) als möglicher Verlustparameter in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Grund von marginalen Auswirkungen eines näherungsweisen Modells verzichtet werden, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist?

1.4 Aufbau

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Intensitätsganglinien der 5 maximalen Niederschlagsereignisse, für die Zeiträume 10 min, 30 min und 60 min, in Minutenaufösung an 8 Wetterstationen in Oberösterreich. Auf Grundlage dieser Auswertung der Niederschlagsaufzeichnungen von 52 Realereignissen wird eine anfangsbetonte Normganglinie entwickelt, welche es ermöglicht Niederschlagssummen vorgegebener Dauer anhand einer zeitlichen Intensitätsverteilung zu beschreiben.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird das 2d hydraulische Niederschlags-Abfluss-Modell JFlow angewendet, um einen Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen einem Niederschlagsereignis mit Intensitätsverteilung (Normganglinie) und einer Rechteckverteilung (Blockregen) zu untersuchen. Die angewandte Intensitätsganglinie wurde dabei auf der Grundlage der entwickelten Normganglinie generiert und besitzt die selbe integrale Niederschlagsmenge wie der ebenfalls im Modell angewendete Blockregen. Des Weiteren werden Verluste, bei denen die Infiltration als prägendste Einflussgröße zu nennen ist, in der Form von Abflussbeiwerten in Abflusskonstanz (ψ_{const}) im Modell angewendet. Bei dem für den Vergleich zwischen Normganglinie und Blockregen verwendete Pilotgebiet handelt es sich um eine bereits des öfteren von Hangwasser betroffenen in Oberösterreich gelegenen Gemeinde namens Schwertberg.

Kapitel 2

Material und Methoden

Die nachfolgenden Kapiteln befassen sich mit der Beschreibung der Starkregendefinition sowie mit der Entstehung von Starkniederschlägen. Des Weiteren wird eine Übersicht über die oberirdischen Abflussbildungsprozesse bei Starkregen gegeben. In weiterer Folge wird auf die Definition sowie auf Anwendungsgebiete der vom Hydrographischen Dienst veröffentlichten Bemessungsniederschläge eingegangen. Neben der Betrachtung von Intensitätsverteilungen von Starkregenereignissen wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls das Niederschlags-Abfluss-Modell JFlow betrachtet. Auf Grund dessen wird im Kapitel 2.8 näher auf die 2d hydraulische Starkregensimulationssoftware JFlow eingegangen. Weitere Themengebiete dieses Kapitels sind Rauheitsbeiwerte sowie eine detaillierte Beschreibung von Abflussbeiwerten.

2.1 Definition Starkniederschlag (Starkregen)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einen Starkregen zu definieren. In weiterer Folge sind die gängigsten Definitionen aufgelistet und erläutert:

a) **Definition nach Intensität und Niederschlagsmenge:**

Bei dieser Definition gibt es immer eine bestimmte Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit, die überschritten werden muss. Zur Bestimmung dient z.B. die Definition von Wussow [Wussow, 1922]: $N_{cr} = \sqrt{5 * d}$

Die kritische Niederschlagsmenge N_{cr} [mm] ist abhängig von der Niederschlagsdauer t_N [min].

Der DWD [DWD, o.j.] definiert starken Niederschlag ab einer Niederschlagsmenge ≥ 10 mm/h oder $\geq 1,7$ mm in 10 min und sehr starken Regen ≥ 50 mm/h oder $\geq 8,3$ mm in 10 min.

b) **Definition nach statistischer Auswertung bzw. nach Wiederkehrzeiten:**

Diese Definition behandelt die Wahrscheinlichkeit bzw. Häufigkeit mit der eine Niederschlagsmenge in einer gewissen Dauer in einem Gebiet auftritt. Diese Definition berücksichtigt also regionale Unterschiede. Der DWD spricht von

Starkregen wenn die Niederschlagsmenge im Mittel 3,6 Mal pro Jahr an einer Messstation auftritt. Starkregen tritt somit statistisch an etwa jedem Tag auf [climate service center.de, 2012].

c) **Definition von ESSL (European Severe Storm Laboratoy):**

Starkregen wird so definiert, dass er in derart großen Mengen fällt, dass signifikante Schäden verursacht werden, oder dass, wenn keine Schäden bekannt sind, außerordentlich hohe Niederschlagsmengen innerhalb einer Periode von höchstens 24 Stunden gemessen wurden.

d) **Definition unter Berücksichtigung von Jährlichkeiten und Bodenverhältnissen:**

Die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) untergliedert im Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement Starkregenereignisse in seltene, außergewöhnliche- und extreme Ereignisse und berücksichtigt hierbei die Jährlichkeit (Wiederkehrrate), Dauer des Ereignisses sowie die Standortgegebenheiten (verschlämmter- bzw. unverschlämmter Boden) [Koch et al., 2016].

- (i) Seltenes Oberflächenabflussereignis unverschlämmt (sOFu)/verschlämmt (sOFv): Niederschlagsereignis: Dauer 1h, T=30 Jahre, keine Bodenverschlammung eingetreten.
- (ii) Außergewöhnliches Oberflächenabflussereignis unverschlämmt (aOFu)/verschlämmt (aOFv): Niederschlagsereignis: Dauer 1h, T=100 Jahre, keine Bodenverschlammung eingetreten.
- (iii) Extremes Oberflächenabflussereignis (eOF): höchstes beobachtetes Niederschlagsereignis in Baden-Württemberg, Dauer 1h, Berücksichtigung der kleinräumigen Erhöhung in konvektiven Zellen und eingetretener Bodenverschlammung (Worst-Case-Szenario).

Es gibt also kein einheitliches Kriterium für Starkniederschlag und die Definitionen fallen sehr unterschiedlich aus. Die Definitionen 2 des DWD und 4 unterscheiden sich beispielsweise sehr stark in der Jährlichkeit. Ein Niederschlagsereignis kann nach Definition 2 des DWD als Starkregen klassifiziert werden sobald es eines der 3,6 stärksten Ereignisse des Jahres ist, nach Definition 4 müsste es jedoch das stärkste Ereignis innerhalb von 30 Jahren sein. Bei Definition 1 gibt es keine Berücksichtigung von regionalen Unterschieden. In Gebieten in denen generell weniger Niederschlag fällt, kommt es unter Umständen durch hydrophoben Bodenbedingungen aufgrund von Austrocknung schon bei geringeren Niederschlagsmengen zu Überschwemmungen [Markart et al., 2006] [Fohrer et al., 2016]. Das wird bei dieser Definition nicht berücksichtigt. Definition 3 klassifiziert Starkniederschläge aufgrund ihrer Auswirkungen. Definition 4 ist eine Erweiterung von Definition 2 welche neben der Wiederkehrrate ebenfalls verschiedene Bodenzustände berücksichtigt.

2.2 Entstehung Starkregen

Starkregen tritt meist bei kräftigen Schauern oder Gewittern auf. Dabei handelt es sich um konvektive Systeme die entstehen können, wenn die Atmosphäre labil geschichtet ist. Bei starken Gewittern kann es auch zu Hagel und Fallböen kommen [Maniak, 2010]. Der Einfluss von Hagel auf den Hangwasserabfluss ist jedoch noch nicht ausreichend untersucht und des weiteren derzeit numerisch nicht eindeutig bestimmbar [Kohl, 2011].

Starkregenereignisse können sehr lokal auftreten. Eine einzelne Gewitterzelle weist typischerweise einen Durchmesser von weniger als 10km auf und hat eine Lebensdauer von 30 bis 60 min [Bott, 2016]. Gefährlicher für pluviale Überschwemmungen sind jedoch sogenannte Multizellen und Superzellen. Multizellen setzen sich aus mehreren Einzelzellen zusammen, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Bei günstigen Bedingungen entstehen so an der Vorderseite eines Gewitters immer neue konvektive Zellen. Bei einer Superzelle handelt es sich um eine einzelne große Gewitterzelle, die jedoch eine deutlich längere Lebensdauer als eine Einzelzelle besitzt. Durch die räumliche Trennung von Auf- und Abwindschlauch (hervorgerufen durch vertikale Windscherung) wird verhindert, dass der einsetzende Niederschlag, der für Konvektion benötigt wird, die Zufuhr von feuchten und warmen Luft unterbricht. Besonders hohe Niederschlagssummen an einem Ort ergeben sich aus Wetterlagen, wo sich konvektive Zellen kaum oder gar nicht von der Stelle verlagern. Der Starkregen kann dann längere Zeit in einem kleinen Gebiet fallen und enorme Hochwässer produzieren [Bott, 2016]. Starkregenereignisse können auch bei sehr kräftigen Tiefs, bei denen Dauerregen die Starkregenschwelle überschreitet, auftreten und so ein größeres Gebiet betreffen.

Generell ist Starkregen ein Phänomen, das aufgrund der besseren Voraussetzungen für Konvektion hauptsächlich im Sommerhalbjahr, auftritt. Für die großen Niederschlagsmengen in recht kurzer Zeit müssen massive Quellwolken mit großen Wassermengen entstehen. Dies ist jedoch nur bei ausreichend warmer Luft möglich, da kalte Luft weniger Feuchtigkeit und Energie enthält. Da die Fähigkeit der Luft Wasserdampf zu halten stark temperaturabhängig ist und die mittlere Jahrestemperatur durch den Klimawandel einem Anstieg unterliegt [Masson Delmotte et al., 2018], so ist dadurch ebenfalls mit einer Erhöhung der Niederschlagsraten bei Starkregenereignissen zu rechnen. Die Prognose für die Zunahme der Niederschlagsintensität liegt bei 7 % pro Grad Celsius der Atmosphäre [Formayer, 2019]. Bei Starkniederschlägen mit einer Dauerstufe von 1 Stunde sind für Oberösterreich sogar stärkere Anstieg von 10 bis 11 % bei einer Temperatur Zunahme der Luft um ein Grad Celsius zu verzeichnen [Achleitner und Starl, 2019].

2.3 Oberirdische Abflussbildungsprozesse

Bei der Abflussbildung in der Fläche handelt es sich um einen sehr komplexen und einen vielen Parameter umfassenden Prozess. Dabei weist die Abflusentstehung zwei wesentliche Merkmale auf, nämlich die Heterogenität im Raum und ihre Variabilität in der Zeit [Kohl, 2011].

Unter dem Begriff Oberflächenabfluss, in der Hangwasserthematik, auch oft als Hangwasserabfluss bezeichnet, wird das Wasser verstanden, das auf der Geländeoberfläche der Geländeneigung folgend abfließt. Dabei suggeriert der Begriff Oberflächenabfluss ein homogenes Fließen in der Fläche das auch häufig als „sheet flow“ bezeichnet wird. Diese Charakteristik des homogenen flächigen Abflusses weisen jedoch nur Flächen mit sehr geringem Fließhöhen auf. Auf Hängen ist ein solches flächiges Fließverhalten bei Starkniederschlägen nur auf kurzen Fließstrecken von wenigen Metern zu beobachten. Das Kleinrelief des Geländes führt, selbst an homogen und für das menschliche Auge sehr ausgeglichen erscheinenden Standorten, rasch zur Abflusskonzentration [Kohl, 2011].

Es können zwei Mechanismen unterschieden werden, die zu einer Überschreitung des Wasseraufnahmevermögens der Bodenoberfläche und damit nachfolgend zur Bildung von Oberflächenabfluss beitragen [Fohrer et al., 2016]:

- Die Regenintensität ist größer als die aktuelle Rate der Infiltration durch die Bodenoberfläche. In diesem Fall spricht man von Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss oder von Horton'schem Abfluss [Horton, 1933].
- Die Geländeoberfläche ist schon wassergesättigt und kann daher keinen Niederschlag mehr aufnehmen. Unter diesen Umständen ist von Oberflächenabfluss infolge von Sättigungsüberschuss oder Dunn'schem Abfluss die Rede [Dunne et al., 1975]. Zu diesem zählt auch der Abfluss infolge von Niederschlag auf Wasserflächen wie Fluss-, See- oder Feuchtgebietsflächen.

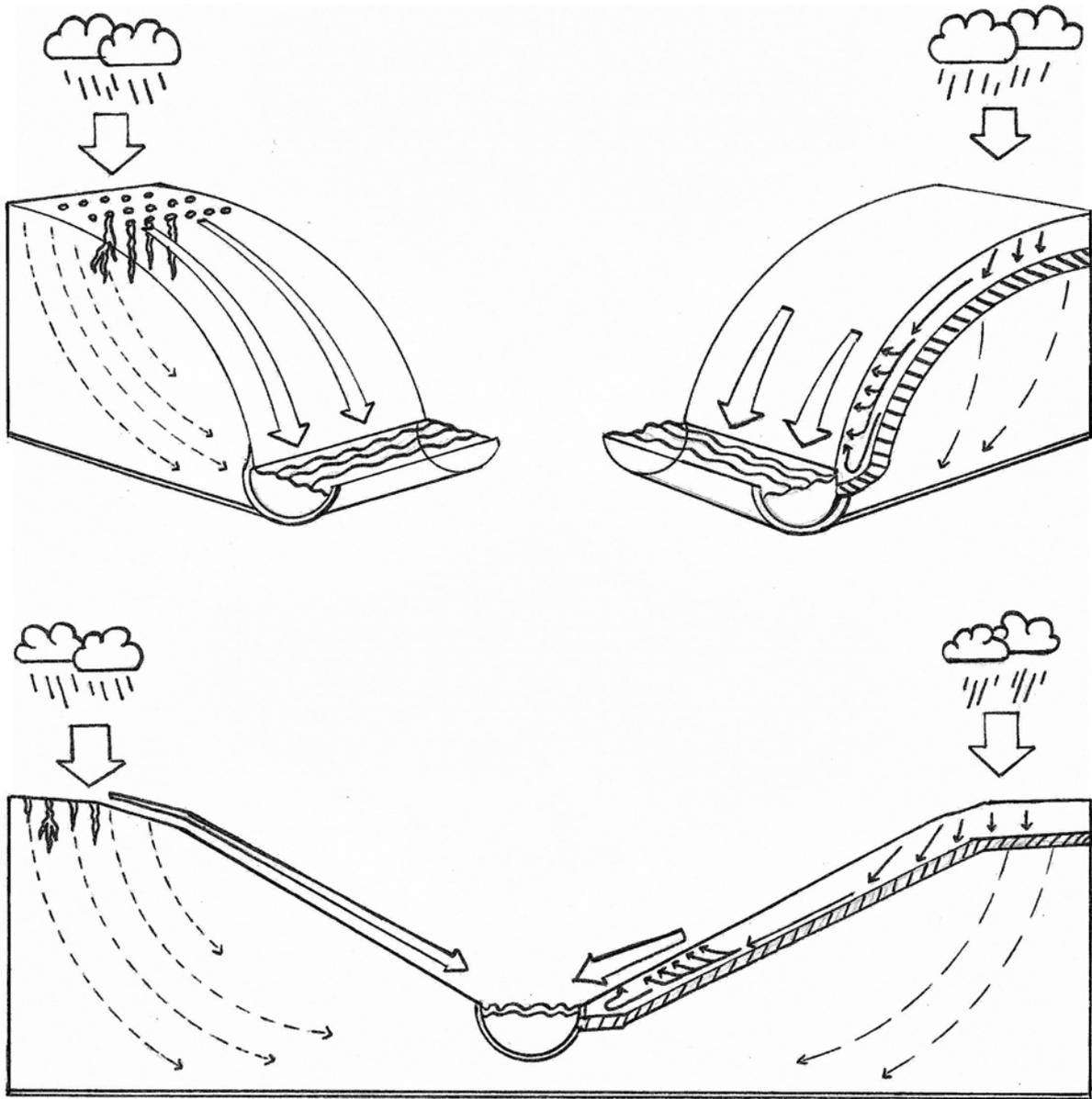


Abbildung 2.1 Oberflächenabflussbildungsprozesse: Abfluss infolge Infiltrationsüberschuss (Horton'scher Oberflächenabfluss) (links), Abfluss infolge Sättigungsüberschuss (Dunn'scher Oberflächenabfluss) (rechts) [Laudacher, 2020]

Des Weiteren wird der sogenannte Return Flow unterschieden. Der Return Flow bezeichnet jenes Wasser, welches einmal infiltriert ist und an einer anderen Stelle wieder an die Oberfläche tritt um von dort aus abzufließen. Dieser Abflussmechanismus kann ebenfalls zum Oberflächenabfluss gezählt werden [Fohrer et al., 2016]. Durch das verlangsamte Abfließen des infiltrierten Wassers im Bodenkörper ist eine Verzögerung des erneut an die Oberfläche tretenden Return Flow zu beobachten. Da es sich bei Starkniederschlägen um Niederschlagsereignisse mit vorwiegend kurzer Dauer handelt, scheint es legitim den Return Flow in der Starkregenmodellierung zu vernachlässigen, was des Weiteren der Tatsache geschuldet ist, dass dessen numerische Berücksichtigung im Modell derzeit nicht möglich ist.

2.3.1 Abfluss infolge Infiltrationsüberschuss

Der Abflussbildungsprozess infolge von Infiltrationsüberschuss wird auch Horton'scher Oberflächenabfluss (Hortonian overland flow, HOF) bezeichnet und ist der am häufigsten in der Natur anzutreffende Abflussmechanismus [Bronstert et al., 2005]. Der Horton'sche Oberflächenabfluss entsteht da, wo die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens übersteigt. Dadurch kann ein Teil des Niederschlags nicht infiltrieren und fließt deshalb abzüglich des Muldenrückhalts oberflächlich ab. Der Muldenrückhalt stellt dabei die im Einzugsgebiet vorhandenen Senken z.B. Geländedepressionen da, die Hangwasser zurückhalten [Fohrer et al., 2016]. Der Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss stellt somit den Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz dar (siehe Kapitel 2.7.2). Horton betrachtete die Bodenoberfläche somit quasi als „Sieb“, welches den Niederschlag in einen Oberflächenanteil und einen Bodenanteil trennt. Die Bedeutung des Oberflächenabflusses nimmt dabei mit der Niederschlagsintensität zu, da die Infiltrationsrate zwar keine Konstante, jedoch begrenzt ist [Kohl, 2011]. Des Weiteren tritt Infiltrationsüberschuss verstärkt an Flächen auf, wo geringe Infiltrationskapazitäten des Oberbodens gegeben sind. Ein schwaches Infiltrationsvermögen besitzen vor allem Böden mit einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit (Fähigkeit des Bodens Wasser in die Tiefe zu leiten), wobei Verschlammung, Verdichtung und Verkrustung zusätzlich eine verschärfende Wirkung aufweisen [Fohrer et al., 2016]. Feldmessungen in der Form von Beregnungsversuchen zeigen dabei eine beträchtliche räumliche Heterogenität und zeitlich Variabilität von Infiltrationsraten und Infiltrationskapazitäten [Kohl, 2011]. Auf Grund dessen, tragen unterschiedliche Flächen eines Hanges in einem Einzugsgebiet während eines Starkregenereignisses unterschiedlich zum Oberflächen-, Hangwasserabfluss bei. Des Weiteren sind Niederschlags-Abfluss-Ereignisse, die einen vorwiegenden Horton'schen Oberflächenabfluss aufweisen, durch ihre schnelle Reaktion im Abflussgeschehen (Abflussganglinie) charakterisiert [Fohrer et al., 2016].

2.3.2 Abfluss infolge Sättigungsüberschuss

Der Abflussbildungsprozess infolge von Sättigungsüberschuss wird auch Dunn'scher Oberflächenabfluss (saturation overland flow, SOF) bezeichnet. Bei Oberflächenabfluss infolge Sättigungsüberschuss, handelt es sich um Niederschlag, der direkt zum Abfluss kommt, da der Boden auf den er trifft, weitestgehend gesättigt ist [Fohrer et al., 2016].

„Weitgehende Sättigung“ ist ein dehnbarer Begriff, wobei Böden mit freier Durchlässigkeit bei Starkregen so gut wie nie eine Vollsättigung erreichen. Dementsprechend ist Sättigungsabfluss mit dem Auftreten von Stauhorizonten bzw. schwach durchlässigen Schichten unter der Bodenoberfläche verknüpft [Kohl, 2011].

FAZIT:

Wie eine Vielzahl von durchgeführten Beregnungsversuchen vom BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) zeigen, weisen bei Starkregen hoher Intensität nur wenige Versuchsstandorte einen Abflussmechanismus auf der vom „Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss“ abweicht [Kohl, 2011]. Auf Grund dessen bezieht sich die Verwendung des Begriffes Oberflächenabfluss in der vorliegenden Arbeit immer auf den Abflussmechanismus des Horton'schen Oberflächenabflusses in Folge von Infiltrationsüberschuss.

2.4 Bemessungsniederschlag

Seit 2009 bietet das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus BMLRT, Abteilung Wasserhaushalt (HZB), im Internetportal für hydrographische Daten Österreichs (eHYD) Bemessungsniederschläge zur Verwendung an [BMLRT, o.j.].

Auf eHYD stehen für die gesamte Fläche Österreichs 3 Typen von Niederschlagsauswertungen für die Dauerstufen (D) von 5 Minuten bis 6 Tagen und mit einer Wiederkehrzeit/Jährlichkeit (T) von 1 bis 100 Jahren zur Verfügung.

Hydrographischer Dienst in Österreich

16.12.2008 10:1

Bemessungsniederschlag h [mm] (gewichtete (g1,g2) Starkniederschlagsauswertung - h=g1MaxModN+g2ÖKOSTRA)											
Gitterpunkt: 2636; (M31, R: 95866m, H: 5349267m)											
Flächenabminderung: keine											
Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten											
Wiederkehrzeit (T)	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
Dauerstufe (D)											
5 Minuten	7.2	10.3	12.2	14.5	17.6	20.7	21.7	22.5	24.8	26.6	27.9
	6.4	8.8	10.4	12.2	14.7	17.1	17.9	18.5	20.4	21.8	22.8
	5.4	7.0	8.0	9.2	10.9	12.6	13.1	13.5	14.8	15.7	16.4
10 Minuten	9.0	13.1	15.6	18.6	22.6	26.6	27.9	29.0	32.0	34.3	36.0
	8.1	11.2	13.1	15.4	18.4	21.5	22.5	23.3	25.6	27.4	28.7
	7.1	9.1	10.4	11.9	13.9	16.0	16.6	17.1	18.7	19.9	20.8
15 Minuten	10.4	15.3	18.2	21.8	26.6	31.4	32.9	34.1	37.7	40.5	42.5
	9.3	12.9	15.1	17.7	21.3	24.8	25.9	26.8	29.5	31.6	33.0
	8.3	10.6	12.0	13.7	16.0	18.3	19.0	19.6	21.3	22.7	23.6
20 Minuten	11.4	16.8	20.1	24.0	29.3	34.7	36.4	37.8	41.7	44.8	47.1
	10.3	14.2	16.6	19.5	23.3	27.2	28.4	29.4	32.3	34.5	36.2
	9.3	11.8	13.3	15.2	17.6	20.1	20.9	21.6	23.4	24.9	26.0
30 Minuten	13.1	19.3	23.2	27.8	34.0	40.2	42.2	43.8	48.4	52.0	54.7
	11.9	16.2	18.9	22.1	26.5	30.9	32.3	33.5	36.7	39.2	41.1
	10.9	13.5	15.2	17.3	20.1	22.9	23.8	24.6	26.7	28.3	29.5
45 Minuten	15.0	22.1	26.5	31.8	39.0	46.2	48.5	50.3	55.7	59.8	62.9
	13.8	18.6	21.6	25.2	30.1	35.1	36.7	38.0	41.7	44.5	46.6
	12.9	15.9	17.8	20.1	23.2	26.4	27.5	28.3	30.7	32.5	33.9
60 Minuten	16.4	24.3	29.0	34.8	42.7	50.6	53.2	55.2	61.1	65.7	69.0
	15.2	20.5	23.6	27.5	32.8	38.2	39.9	41.3	45.3	48.5	50.6
	14.4	17.7	19.6	22.1	25.6	29.1	30.2	31.1	33.7	35.8	37.1
90 Minuten	18.8	27.9	33.3	40.1	49.2	58.4	61.4	63.8	70.6	75.9	79.7
	17.7	23.5	27.0	31.4	37.3	43.4	45.3	46.9	51.4	54.9	57.3
	16.9	20.5	22.7	25.6	29.3	33.3	34.6	35.6	38.5	40.8	42.3

* - ÖKOSTRA-Wert ist größer/gleich dem MaxModN-Wert
 () - Bemessungsniederschlag liegt am Rand oder außerhalb der Bandbreite
 MaxModN - maximierte Modellniederschläge (HAÖ=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvektives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert))
 ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DNWK124, modifiziert)

Abbildung 2.2 Bemessungsniederschlag des Gitterpunktes 2636, Lage östlich von Schwertberg; Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen) und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [BMLRT, o.j.]

2.4.1 3 Typen von Niederschlagsauswertungen:

- MaxModN - maximierte Modellniederschläge
- Bemessungsniederschlag
- ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen

Gemäß Hydrographischem Dienst Österreichs wird für Niederschlagsabflussmodelle und Bemessungsaufgaben die Verwendung der Bemessungsniederschlagswerte empfohlen [BMLRT, o.j.]. Die Zurverfügungstellen Bemessungsniederschläge werden dabei aus einem gewichteten Mittel der MaxModN- und ÖKOSTRA-Werten bestimmt.

Bei den MaxModN-Daten handelt es sich um Modellniederschläge aus maximierten Rand- und Anfangsbedingungen. Wohingegen die ÖKOSTRA-Daten interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen darstellen. Die Bemessungsniederschläge sind eine Kombination aus den Auswertungen der maximierten Modellniederschläge (MaxModN) und den Interpolierten ÖKOSTRA-Messstellenauswertungen [Weilguni, 2009].

2.4.2 MaxModN

Für Bemessungsfragen in Wildbacheinzugsgebieten sind vor allem Starkregen kurzer Dauer mit vorwiegend konvektivem Charakter von Bedeutung. Dieser Niederschlagstyp überregnet meist nur verhältnismäßig kleine Flächen für kurze Dauer mit hoher Intensität [Kohl, 2011]. Da diese kleinräumigen Starkregenereignisse nur unzureichend durch das bestehende Niederschlagsmessstellennetz beschrieben werden, können und dadurch Beobachtungsdaten fehlen, wurde von Lorenz und Skoda 2001 ein Modell zur Vorhersage von lokalen konvektiven Starkregenereignissen entwickelt [Lorenz und Skoda, 2001a]. Das Ergebnis dieser Niederschlagsmodellrechnungen sind die sogenannten MaxModN-Daten, welche unter maximierten Rand- und Anfangsbedingungen abgeleitet wurden. Die Niederschlagsmodellrechnungen beschreiben Starkniederschläge für Dauerstufen bis maximal 12 Stunden und liefern wie alle Ergebnisse von Modellrechnungen nur Schätzwerte [Kohl, 2011]. Niederschläge für Dauerstufen von 12 Stunden bis 6 Tage entstammen aus dem numerischen Vorhersagemodell ALADIN [Weilguni, 2015]. Die Niederschlagsauswertungen beider Modellrechnungen liegen auf einem Gitternetz mit ca. 6 km x 6 km Rasterweite vor.

MaxModN-Ereignisse stellen maximierte Modellniederschläge dar und liefern aufgrund der maximierten Rand- und Anfangsbedingungen wahrscheinlich „zu hohe“ Niederschläge [Weilguni, 2015]. Im Vergleich mit den extremwertstatistischen Messstellenauswertungen (ÖKOSTRA) liefern sie starke Überschätzungen ($> 100\%$) [Kohl, 2011].

2.4.3 ÖKOSTRA

Das Akronym ÖKOSTRA steht für Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und –auswertung. Im Rahmen des Projekts wurden 141 hochaufgelöste Messstellenauswertungen von Niederschlagsdaten durchgeführt und mit extremwertstatistischen Auswertungen von Ombrometerdaten (853 Messstellen) ergänzt. Bei den Auswertungen handelt es sich somit um Messstellenauswertungen von Beobachtungsreihen, welche in weiterer Folge auf das Österreichgitternetz (ca. 6 km x 6 km) der Niederschlagsauswertungen übertragen wurden [Weilguni, 2015].

ÖKOSTRA-Ergebnisse liefern vermutlich zu geringe Niederschlagswerte [Fachabteilung19A, 2008] bzw. neigen dazu, das tatsächliche Niederschlagsverhalten zu unterschätzen [Kainz, 2007]. Grund dafür ist unter anderem die lokale Struktur von konvektiven Niederschlägen und die für deren Erfassung zu geringe Dichte der Niederschlagsmessstellen, wodurch kleinräumige Starkregenereignisse nur unzureichend erfasst werden [Kohl, 2011]. Dazu kommen messtechnische Unzulänglichkeiten der Niederschlagsschreiber (Ombrographen), wie sie zum Beispiel bei Verwirbelungen von Regentropfen durch Wind passieren (Windfehler) [Gattermayr, 2005].

2.4.4 Bemessungsniederschlag

Auf Grund der Tatsache, dass die MaxModN- Werte wahrscheinlich „zu hohe“ und die ÖKOSTRA- Werte wahrscheinlich „zu niedrige“ Niederschlagssummen beschreiben, war die Notwendigkeit einer dritten Niederschlagsauswertung gegeben, bei der es sich um die Bemessungsniederschläge handelt [Weilguni, 2015]. Hierzu wurde aus den Daten der ÖKOSTRA und des MaxModN schließlich ein gewichteter Mittelwerte abgeleitet, der nun als empfohlener Bemessungsniederschlag für die Siedlungswasserwirtschaft vorliegen [BMLFUW, 2006].

Die öffentlich auf ehyd.gv.at einsehbaren Bemessungsniederschläge liegen auf einem Gitternetz mit ca. 6 km x 6 km Rasterweite auf [Eybl et al., 2018]. Die Bemessungsniederschläge werden, wie bereits oben geschildert, durch zwei Kriterien gekennzeichnet: die Dauer und die Jährlichkeit. Die Bemessungsniederschläge geben somit die Niederschlagssumme für eine gewisse Dauer an. Es wird jedoch keine Aussage über die Verteilung der Niederschlagsintensität getroffen. Dadurch ist es dem Anwender überlassen eine bestimmte Niederschlagsganglinie anzuwenden.

2.5 Intensitätsverteilungen anfangsbetonter Niederschläge aus der Literatur

Der nachstehende Abschnitt beschäftigt sich mit der Erläuterung von bereits bestehenden Ansätzen für die Niederschlagsverteilung. Die betrachteten Funktionen stellen lediglich einen Teilausschnitt der existierenden Intensitätsverteilungen dar. Bei der Auswahl wurde auf die Vielfalt der unterschiedlichen Herangehensweisen und Verwendungszwecke bedacht genommen.

2.5.1 Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der BOKU

Am Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der BOKU wurde eine Umrechnungsfunktion für Niederschlagssummen zu anfangsbetonte Niederschlagsverteilungen erstellt. Diese Verteilungsfunktion wurde gezielt für Wildbacheinzugsgebiete entwickelt und basiert auf keinen Auswertungen von realen Starkregenereignissen.

Die Niederschlagshöhen werden mit Hilfe von Aufteilungsfunktionen in einen anfangsbetonten Niederschlag umgerechnet, wobei darauf geachtet wurde, dass sich bei der Summation der Niederschlagsordinaten über kürzere Zeitintervalle keine größeren Niederschlagshöhen ergeben als den Bemessungsereignissen entspricht [Hübl, 1998].

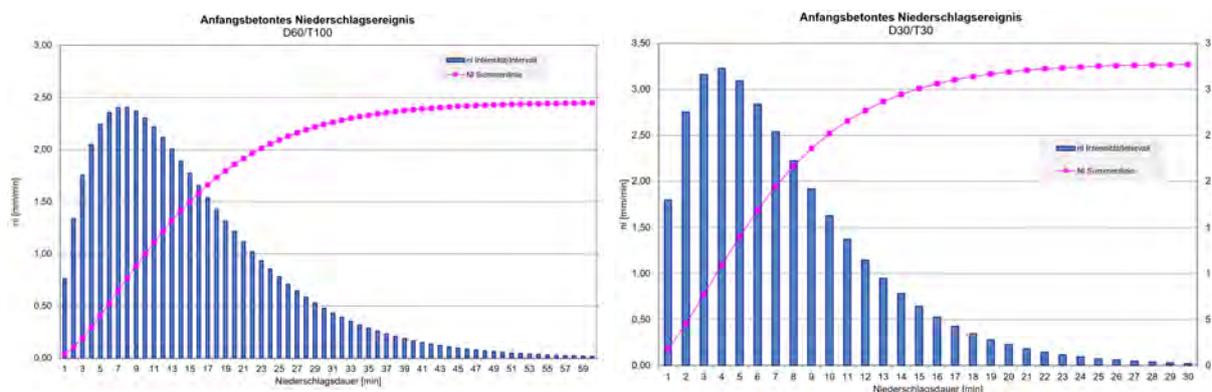


Abbildung 2.3 Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des Instituts für Alpine Naturgefahren (IAN): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts) [Hübl, 1998]

Das IAN gibt für ein T100D60 Ereignis ($\sum N = 48,9$ mm) die maximale Intensität von 2,4 mm/min 7 min nach Ereignisbeginn an. Ein T30D30 Ereignis ($\sum N = 32,7$ mm) ergibt eine maximale Intensität von 3,2 mm/min nach 4 min nach Ereignisbeginn.

2.5.2 DVWK-Empfehlung (DVWK-Regel 113/1984)

Standardmäßig wird auch noch in Deutschland der für eine Dauerstufe vorgegebene Bemessungsniederschlag gleichmäßig über alle Zeitschritte der Dauerstufe verteilt („Blockregen“). Alternativ dazu können auch anfangs-, mitten- oder endbetonte Intensitätsverteilungen des Niederschlags nach DVWK-Regel 113 (DVWK 1984) vorgegeben werden [LARSIM, 2020].

Bei der Empfehlung vom DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (seit 2004 DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) handelt es sich um einen sehr pragmatischen Ansatz zur Umrechnung von Niederschlagssummen in eine anfangs-, mitten-, bzw. endbetonte Niederschlagsverteilung. Die Empfehlung für eine anfangsbetonte Niederschlagsverteilung besagt, dass in den ersten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % der Niederschlagssumme, in den nächsten 30 % der Niederschlagsdauer 20 % und in den letzten 50 % der Niederschlagsdauer 30 % der Niederschlagssumme fallen [Seibert und Auerwald, 2020]. Bei der Empfehlung handelt es sich daher nicht um eine kontinuierliche Verteilungsfunktion sondern lediglich um eine Aufteilung der Niederschlagssumme in Rechtecke.

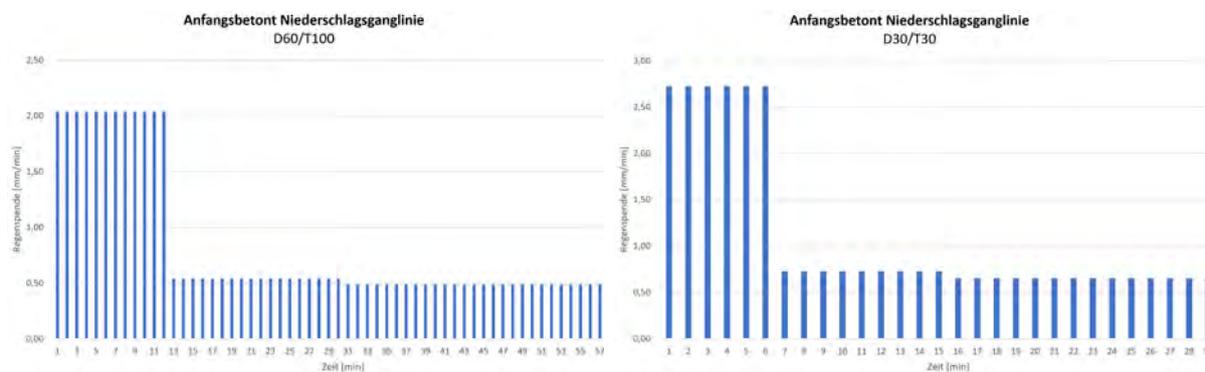


Abbildung 2.4 Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (seit 2004 DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts)

Die DVWK-Empfehlung gibt für ein T100D60 Ereignis ($\sum N = 48,9$ mm) die maximale Intensität von knapp über 2 mm/min mit einer konstanten Intensität von 12 min an. Ein T30D30 Ereignis ($\sum N = 32,7$ mm) ergibt eine maximale Intensität von 2,7 mm/min mit einer konstanten Intensität von 6 min.

2.5.3 Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz

Das geowissenschaftliche Büro geo7 AG entwickelte im Rahmen der Erstellung der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz im Auftrag des Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine anfangsbetonte Niederschlagskurve zur Umrechnung beliebiger Niederschlagsereignisse mit vorgegebener Niederschlagssumme.

Für die Entwicklung der Intensitätskurve wurde als maßgebendes Niederschlagszenario ein Gewitter mit einer Wiederkehrperiode von ungefähr 100 Jahren und einer Dauer von einer Stunde verwendet. In weiterer Folge wurde die Schweiz unter der Berücksichtigung von Topografie, Geologie, Boden und klimatischen Verhältnissen flächendeckend in Modellierungsregionen unterteilt. Für jede Modellierungsregion wurde unter der Absprache mit den Kantonen jeder der 256 Regionen eine Niederschlagsmenge für einen einstündigen Niederschlag mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren zugewiesen.

Basierend auf den Niederschlagswerten (T100D60) wurde für alle Regionen aus den Niederschlagsmengen eine Niederschlagsganglinie für 5 min Zeitschritte abgeleitet. Die der Untersuchung zugrunde gelegten Intensitäten resultieren aus den ausgewählten Niederschlagsereignissen der Modellierungsregionen.

Tabelle 2.1 Modellregen für Niederschläge von einer Stunde mit prozentualen 5 Minuten Anteilen [Kipfer et al., 2018]

Minuten ab Ereignisbeginn	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Häufigkeit pro Stunde [%]	9,3	17,81	18,7	14,37	11,13	7,43	5,28	4,47	3,41	3,01	2,68	2,44

Das Resultat der Auswertung ist eine prozentuale Verteilung der Niederschläge über eine Stunde und kann an beliebige Niederschläge vorgegebener Niederschlagssumme angewendet werden.

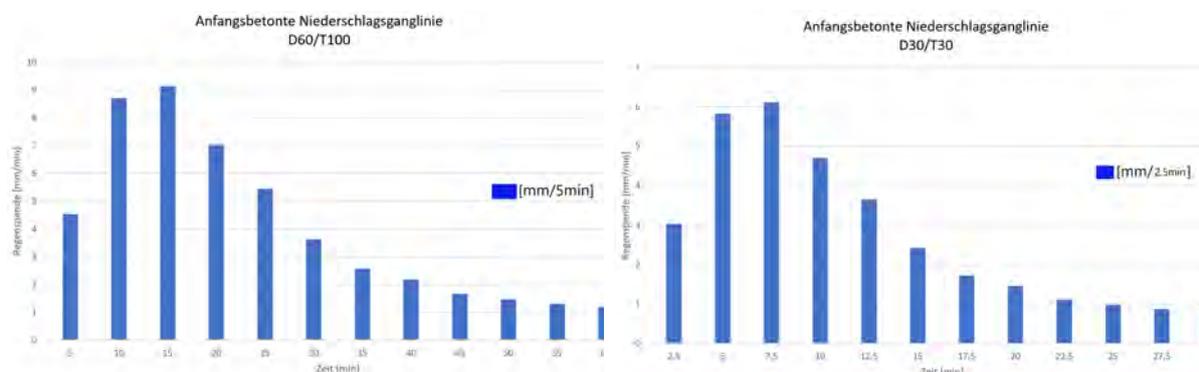


Abbildung 2.5 Anfangsbetonte Niederschlagsganglinien des Geo7 (Schweiz): T100D60 ($\sum N = 48,9$ mm) (links) T30D30 ($\sum N = 32,7$ mm) (rechts) [Kipfer et al., 2018]

Das Büro geo7 weist für ein T100D60 Ereignis ($\sum N = 48,9$ mm) eine maximale Intensität von 1,8 mm/min von der 10 bis zur 15 min nach Ereignisbeginn aus. Ein T30D30 Ereignis

($\sum N = 32,7$ mm) ergibt eine maximal Intensität von 2,4 mm/min im Intervall von 5 bis 7,5 min nach Ereignisbeginn. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei dem T100D60 Ereignis um 5 min Zeitschritte und beim T30D30 Ereignis um 2,5 min Zeitschritte handelt. Dies war erforderlich um die prozentuale Methode der Schweiz auf Niederschlagsereignisse mit einer Ereignisdauer ungleich 60 min anwenden zu können. Bei der Abweichung der 5 min Zeitschritte handelt es sich streng genommen um eine alternative Anwendungsmethode, welche jedoch um eine Vergleichbarkeit zwischen den beschriebenen Verteilungsfunktionen zu ermöglichen vom Autor der vorliegenden Arbeit als legitim erachtet wird.

2.6 Rauheitsbeiwerte Grundlagen Erläuterung

Bei einer Betrachtung der Erdoberfläche fällt deren unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit auf. Vergleicht man beispielsweise Asphaltflächen mit Grünlandflächen, wird man zwangsläufig auf deren andersartige Beschaffenheit aufmerksam. Es ist naheliegend, dass sich die Ausprägung der Oberfläche ebenfalls auf das Abflussgeschehen von Oberflächenabfluss auswirkt. Um diese Einflussnahme der Oberflächenbeschaffenheit auf das Abflussgeschehen zu beschreiben, kommen in der Hydraulik sogenannte Rauheitsbeiwerte zur Anwendung. Diese beschreiben den Fließwiderstand unterschiedlicher Oberflächen in Abhängigkeit ihrer Oberflächenbeschaffenheit und können als hydraulisches Widerstandsmaß verstanden werden [Achleitner et al., 2020] [UniversitätKarlsruhe, 2003].

Eine weitverbreitete Anwendung der Rauheitsbeiwerte erfolgt an Hand des Fließgesetzes nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER (GMS-Formel). Die Rauheiten kommen darin im sogenannten Strickler-Beiwert (k_{st}) bzw. im Manning-Beiwert ($n = 1/k_{st}$) zum Ausdruck [UniversitätKarlsruhe, 2003].

$$v = k_{st} \cdot R^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (2.1)$$

$$R = \frac{A}{U} \quad (2.2)$$

$$Q = v \cdot A \quad (2.3)$$

v = mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]; k_{st} = Strickler-Beiwert [$m^{2/3}/s$] dimensionsbehaftet; I_e = Energieliniengefälle [-] Bei stationärer, gleichförmiger Wasserbewegung gilt Energieliniengefälle I_e = Sohlgefälle I_s ; R = hydraulischer Radius [m]; A = Abflussquerschnitt [m^2]; U = benetzte Sohle [m]

Bei der Strickler-Formel handelt es sich um eine empirische Formel, welche dimensionsbehaftet ist. Die Dimension des Strickler-Beiwerts ist $m^{2/3}/s$. Die Strickler-Formel hat somit den Nachteil, dass sie dimensionsanalytisch nicht homogen ist [Gerhard, 2009]. Der

k_{st} -Wert kann nur indirekt messtechnisch erfasst werden durch die Rückrechnung von gemessenen Fließgeschwindigkeiten, Wasserhöhen (Wasserspiegellagen) bzw. Abflüssen bestimmter Abflussereignisse [UniversitätKarlsruhe, 2003]. Aufgrund der linearen Abhängigkeit zwischen Fließgeschwindigkeit und k_{st} -Wert ist bei gleich bleibender Geometrie die Fließgeschwindigkeit bzw. der k_{st} -Wert umso größer, je glatter und regelmäßiger die Oberflächenbeschaffenheit ist [UniversitätKarlsruhe, 2003]. Mit anderen Worten umso größer der k_{st} -Wert ist umso glatter ist die Oberflächenbeschaffenheit. Der Umkehrschluss daraus ist umso kleiner der k_{st} -Wert ist umso rauer die Oberfläche und umso größer der von der Oberfläche ausgehende Widerstand auf den Abfluss (kleiner k_{st} großes Widerstandsmaß).

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche bezüglich vorhandener Rauigkeitsbeiwerte durchgeführt. Die für einzelne Landnutzungsarten ausgewiesenen k_{st} -Werte divergieren dabei sehr stark und beschreiben ihrem Ursprung entsprechend in den meisten Fällen Abflüssen in Gerinnen. Vereinzelt geben jedoch auch Strickler- bzw. ManningsN-Werte für Vorlandrauhigkeiten an. Die Vorlandrauhigkeiten beschreiben hierbei ihrem Namen entsprechend Oberflächenbeschaffenheiten einzelner Landnutzungsarten im Einzugsgebiet. Die Vorlandrauhigkeiten differieren bei den einzelnen Autoren ebenso stark wie die Rauigkeiten für die Beschreibung von Gerinnen. Für nähere Ausführungen sowie eine tabellarische Aufschlüsselung von in der Literatur angeführten Rauigkeitsbeiwerten sei auf den technischen Bericht des Rainman Projekts verwiesen [Achleitner et al., 2020].

Auf Grund der Tatsache, dass der Strickler-Beiwert (k_{st}) direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit v bzw. zum Abfluss Q ist, wird durch den k_{st} -Wert das Rechenergebnis maßgeblich beeinflusst. Die Anwendung der GMS-Formel setzt daher die möglichst exakte Kenntnis des Strickler-Beiwertes voraus [UniversitätKarlsruhe, 2003]. Auf Grund dessen stellen Rauigkeiten einen wichtigen Eingangsparameter für die 2d hydrodynamische numerische Modellierung von Starkregen und den daraus resultierenden Hangwasserabflüssen dar. Wobei darauf bedacht zu nehmen ist, dass Niederschlags-Abfluss-Modelle je nach modelltechnischer Umsetzung unterschiedlich sensitiv auf Rauigkeitsbeiwerte sind [Achleitner et al., 2020]. Bei dem in dieser Arbeit angewendeten 2d hydrodynamischen Modell namens JFlow gehen die Rauigkeitsbeiwerte in der Form von ManningsN-Werten ($n = 1/k_{st}$) in den Term des Reibungsgefälles ein (siehe Kapitel 2.8.1).

Des Weiteren ist zu beachten, dass die Rauigkeitsbeiwerte insbesondere bei natürlichen und vegetationsbehafteten Landnutzungsarten von der Überflutungstiefe abhängen und bei kleinen Überflutungstiefen rauer gewählt werden müssen [LUBW, 2020]. Des Weiteren sind Hangwasserabflüsse durch einen flächigen Oberflächenabfluss mit geringen Überflutungstiefen charakterisiert. Auf Grund dessen ist es in der hochaufgelösten und flä-

chendeckenden 2d hydraulischen Starkregenmodellierung notwendig, mit überflutungstiefenabhängigen Rauigkeitsbeiwerten zu rechnen [LUBW, 2020]. Anders ausgedrückt ist es aufgrund der Charakteristika von Hangwasserabflüssen unumgänglich höhenabhängige Rauigkeiten anzuwenden.

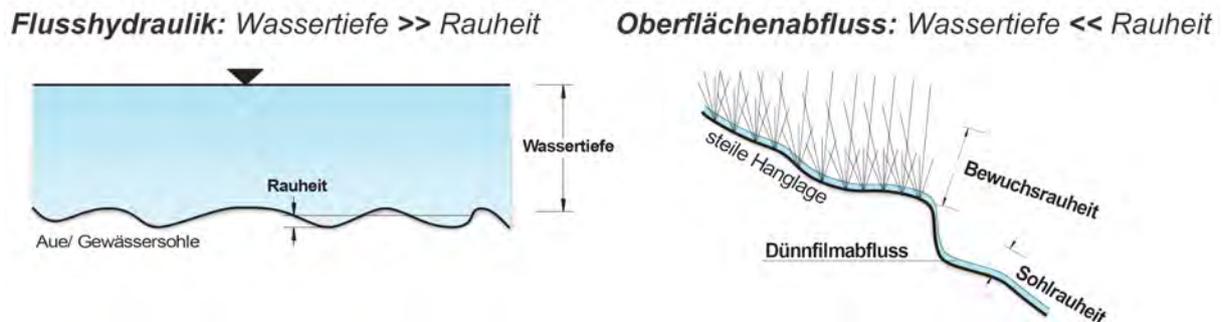


Abbildung 2.6 Charakteristik der Rauigkeit von Gerinnehydraulik (links) und Hangwasserabflüssen/Oberflächenabflüssen (rechts) [Rodriguez, 2017]

Die von Baden-Württemberg veröffentlichte Tabelle basierend auf laufenden Forschungsarbeiten¹ gibt Empfehlungen für Rauigkeitsbeiwerte (k_{st} -Werte) von unterschiedlichen Landnutzungsarten. Die erhobenen k_{st} -Werte wurden dabei in Versuchsaufbauten im Wasserbaulaboratorium der Hochschule RheinMain ermittelt (Kipprinnenversuche) und entstammen daher keinen Feldversuchen.

[1] Forschungsvorhaben KLIMPRAX, Labormessungen am Wasserbaulaboratorium der Hochschule RheinMain; Literaturstudie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) am Fachbereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik sowie Labormessungen an der Hochschule für Technik und Wirtschaft, Saarbrücken

	Rauheit nach Gauckler-Manning-Strickler k_{st} [$m^{1/3}/s$]	
	Dünnsfilm bis 2 cm	ab 10 cm
Ackerland	8-12	15-30
Ackerland, verschlammmt	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, verschlammmt *	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	

Tabelle 2.2 Empfehlung höhenabhängiger Rauheitsbeiwerte (Strickler-Werte k_{st}) *Für diese Landnutzungsarten sind keine Dünnsfilmabflüsse anzusetzen [LUBW, 2020]

Basierend auf den erhobenen höhenabhängigen Rauigkeiten wird in der Praxis die Verwendung des Fließtiefen h abhängigen Beiwertes $k_{st}(h)$ für Vegetationsflächen empfohlen [Rodriguez, 2017].

$$v = k_{st}(h) \cdot R^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (2.4)$$

v = mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]; $k_{st}(h)$ = Fließtiefen h abhängiger Strickler-Beiwert [$m^{2/3}/s$] dimensionsbehaftet.; I_e = Energieliniengefälle [-] Bei stationärer, gleichförmiger Wasserbewegung gilt Energieliniengefälle I_e = Sohlgefälle I_s ; R = hydraulischer Radius [m]

Dabei werden für die Anwendung tiefenabhängiger/höhenabhängiger Rauheitsbeiwerte folgende Grenzziehungen vorgeschlagen [LUBW, 2020]:

- Bis zu einer Überflutungstiefe von 2 cm wird der „Dünnsfilm“-Wert (siehe Tabelle 2.2) als Rauheitswert verwendet.
- Ab 10 cm wird der Rauheitswert aus der Literatur angesetzt.
- Dazwischen wird interpoliert (ggf. auch in Stufen).

2.7 Abflussbeiwerte Grundlagen Erläuterung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung des Abflussbeiwertkonzepts zur Beschreibung desjenigen Teils des Niederschlags der unmittelbar zum Abfluss (effektiv Niederschlag) beiträgt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem bereits sehr alten Abflussbeiwertkonzept welches jedoch nach wie vor ein wichtiges und oft angewandtes praktisches Werkzeug in der Ingenieurhydrologie darstellt [Gpptschalk und Weingartner, 1998]. Der Abflussbeiwert beschreibt den Anteil des Abflusses (effektiver Niederschlag) an der gesamten Niederschlagsmenge [Zilch et al., 2012].

$$\psi = \frac{A_o}{N} = \frac{N_{eff}}{N} \quad (2.5)$$

ψ = Abflussbeiwert [-], A_o = Abfluss, N = Gesamtniederschlag [mm], N_{eff} = effektiver Niederschlag [mm]

Petrascheck (1978) definiert den dimensionslosen Abflussbeiwert: „letztlich [als] nichts anderes als eine reine Verhältniszahl, die in sich nicht nur die spezifischen Gebietseigenschaften – wie Form, Neigung, Rauigkeit und Bodendurchlässigkeit – enthält, sondern auch ereignisspezifische Charakteristiken, wie Vorgeschichte, Dauer und Verlauf der Regenintensitäten [beinhaltet]“ [Petrascheck, 1987]. Zeller beschreibt den Abflussbeiwert als Wasserverlust-Koeffizient, der die Gesamtheit des nicht unmittelbar zum Abfluss gelangenden Oberflächenwassers berücksichtigt [Zeller, 1974]. Durch die vorangegangenen Definitionen wird der sogenannte Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) definiert [Kohl, 2011].

2.7.1 Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot})

Der Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) ist, wie bereits erläutert, als Quotient aus dem direkt zum Abfluss (A_o) gelangendem Niederschlagswasser und dem Gesamtniederschlag (N) zu verstehen. Der direkt zum Abfluss (A_o) gelangende Anteil des Niederschlags ist somit gleichbedeutend dem Effektivniederschlag (N_{eff}). Der Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) beinhaltet somit die Zeitspanne der Initialabstraktion, daran anschließend die Phase des beginnenden Abflusses sowie die Abflusskonstanz und den Nachlauf [Markart et al., 2006]. Auf Grund dessen beinhaltet der Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) die Summe der initialen Verluste die wiederum stark von der Vorfeuchte abhängig sind. Die Initialverluste beinhalten Interzeption, Evaporation, Muldenretention, Speicherung im Boden und Transpiration. Der Gesamtabflussbeiwert ist deshalb unabdingbar mit den Vorbedingungen des Standortes verknüpft [Kohl, 2011].

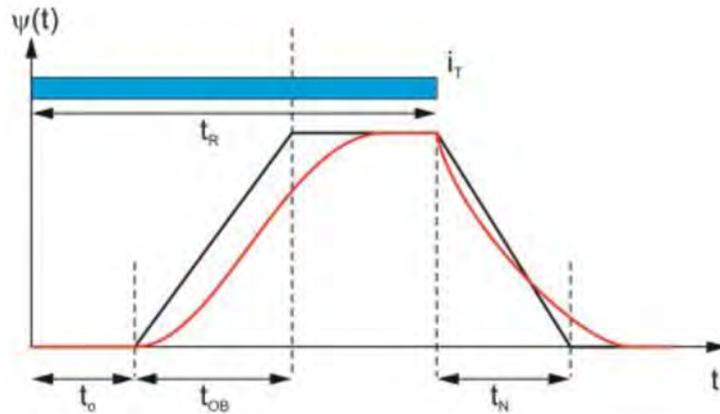


Abbildung 2.7 schematische Darstellung der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung [Kohl, 2011] [Achleitner et al., 2020], Initialabstraktionszeit (t_o), Oberflächenlaufzeit (t_{OB}), Nachlaufzeit (t_N), Niederschlagsintensität (i_T), Abflussbeiwert ($\psi(t)$)

Zeitliche Beschreibung des Gesamtabflussbeiwerts

- Initialabstraktionszeit (t_o): „Die Initialabstraktion (Synonym: Anfangsverlust) entspricht jener Niederschlagshöhe, die erforderlich ist, um einen Direktabfluss zu erzeugen. Der Begriff Vorfeuchte ist sehr eng mit den Begriffen Initialabstraktion und Abstraktionszeit verbunden. Zu diesen Niederschlagsverlusten zählen das Haftwasser an Boden und Vegetation (Interzeption), die Verdunstung an Boden und Vegetation (Evaporation), der aktive Wasserverbrauch der Pflanzendecke (Transpiration), der Wasserrückhalt in Bodenebenenheiten (Muldenspeicher) sowie die initiale Versickerung (Infiltration). Die Vorfeuchte ist entscheidend für den Füllzustand des Systems, oder anders ausgedrückt, für das freie Abstraktionsvolumen.“ [Kohl, 2011]
- Oberflächenlaufzeit (t_{OB}): Die Zeitspanne vom einsetzenden Abfluss bis zum Erreichen des Maximalwertes (Abflusskonstanz); (Phase des beginnenden Abflusses [Markart et al., 2006])
- Abflusskonstanz (ψ_{const}): Konstantes Verhältnisses zwischen Niederschlag und Abfluss; Phase des konstanten Abflusses (ψ_{const}) [Kohl, 2011].
- Nachlaufzeit (t_N): Abnehmender Oberflächenabfluss bei Niederschlagsende

2.7.2 Abflussbeiwert unter Abflusskonstanz (ψ_{const})

Vom Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) ist der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) zu unterscheiden. Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) stellt einen Teilausschnitt des Gesamtabflussbeiwerts dar und beschreibt einen Gleichgewichtszustand zwischen Zufluss und Abfluss (= Abflusskonstanz) [Sifalda, 1996]. Mit anderen Worten wird durch den Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) ein von Phasenende des beginnenden Abflusses (t_{OB}) bis zum Anfang der Nachlaufzeit (t_N) andauerndes konstantes Gleichgewichtsverhältnis zwischen Niederschlag und Abfluss beschrieben. Der Beginn der Nachlaufzeit

(t_N) ist durch das Niederschlagsende ($t_{R_{ende}}$) markiert. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der Abflusskonstanz ist durch die Konzentrationszeit beschrieben die aus Initialabstraktionszeit (t_o) und Phase des beginnenden Oberflächenabflusses (t_{OB}) besteht.

Auf Grund der Tatsache, dass der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz weder die Initialabstraktion (t_o) noch die Phase des beginnenden Abflusses (t_{OB}) beinhaltet, ist dieser auch deutlich geringer von der Summe der initialen Verluste beeinflusst [Markart et al., 2006]. Untersuchungen von Kohl und Markart (2003) zeigen, dass die Abflussbeiwerte unter Abflusskonstanz (ψ_{const}) auf der selben Fläche bei gleicher Regenintensität kaum variieren [Kohl und Markart, 2003]. Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) ist somit unabhängig von Vorbedingungen [Kohl, 2011]. Wodurch der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz einer besseren Vergleichbarkeit sowie breiteren Anwendungsmöglichkeiten unterliegt. Aus diesem Grund ist der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) die Grundlage weiterer Untersuchungen in dieser Arbeit. In weiterer Folge bezieht sich falls nicht explizit anders angegeben der Begriff Abflussbeiwert auf den Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}).

2.7.3 Experimentelle Abflussbeiwertenerhebung

Die Zuweisung von Abflussbeiwerten für Starkregenereignisse zu bestimmten Flächen kann einerseits durch experimentelle Felderhebungen durch Beregnungsversuche bzw. flächendeckend durch verschiedene Modellanwendungen (siehe Kapitel 2.7.5) erfolgen. In der Praxis wird vielfach nur anhand ungenauer bzw. nicht gebietspezifischer Literaturangaben eine Zuweisung von Abflussbeiwerten durchgeführt. So finden sich in vielen Publikationen tabellarische Angaben zu Abflussbeiwerten, es bleibt jedoch weiterhin das Problem der Generalisierung und der Übertragbarkeit dieser Resultate auf andere Einzugsgebiete [Markart et al., 2006]. Auf Grund dessen hat sich Kohl 2011 (BFW) sehr detailliert mit der Ermittlung von verbesserten Felddaten aus Beregnungsversuchen zur Beschreibung von Hochwasserabflüssen resultierend aus Starkregenereignissen in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten beschäftigt [Kohl, 2011].

Versuchsaufbau Beregnungsversuche des BFW [Kohl, 2011]

Dem Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen (BFW) stehen zwei Großregenanlagen für Beregnungsversuche im Feld zur Verfügung. Die Versuchsanlage ist für die Simulation von konvektiven Starkregenzellen konzipiert und beregnet eine Versuchsfläche zwischen 50 und $> 100 \text{ m}^2$ Größe (Standard: 80 m^2). Bei der Durchführung der Beregnungsversuche am Feld kommt ein Blockniederschlag (Rechteckverteilung) zur Anwendung, der durch zu und abschalten von Beregnungsdüsen zwischen 30 und 120 mm/h variiert werden kann. Bei der Versuchsdurchführung werden ebenfalls die Außenseiten, die nicht mehr Teil der Untersuchungsfläche sind, mitberegnet. Dadurch wird der laterale

Abdrift des Niederschlages durch Wind bzw. seitliches Abfließen und Infiltrieren aus der Versuchsfläche verhindert.

Die während der Beregnung konstante Intensität führt nach verstrichener Initialabstraktionszeit (t_o) zu Oberflächenabfluss. Nach der Überwindung der Phase des beginnenden Abflusses (t_{OB}) stellt sich ein Oberflächenabfluss bei Abflusskonstanz ein. Dieser ist Charakterisiert durch einen Gleichgewichtszustand zwischen Zufluss (Niederschlag) und Abfluss [Sifalda, 1996]. Dieser Abfluss wird durch den Versuchsaufbau an Schlitzen unterhalb der Versuchsfläche über Folien gesammelt und über Regenrinnen bzw. Rohre in kalibrierte Auffangbehälter geleitet. Dadurch ist es möglich den Abflussbeiwert unter Abflusskonstanz (ψ_{const}) der sich aus dem Verhältnis von Effektivniederschlag zu Gesamtniederschlag bei Abflusskonstanz ergibt zu ermitteln. Der Abflussbeiwert unter Abflusskonstanz (ψ_{const}) wird um eine Vergleichbarkeit und weitere Anwendung zu gewährleisten in der Regel für ein 60 minütiges Blockregenereignis mit einer Intensität von 100 mm/h erhoben.

Während der Durchführung der Starkregensimulationen erfolgen in der Regel auch umfangreiche weitere Untersuchungen wie z.B. die Beschreibung von Vegetation und Intensität der Landnutzung. Des Weiteren werden in mehreren Profilen die wichtigsten bodenphysikalischen Kennwerte (Lagerungsdichte, Porenvolumina, Textur) sowie mittels Bodenfeuchte-Sonden (z.B. Time Domain Reflectometry TDR-Sonden) der Bodenwassergehalt bestimmt.

Trotz der standardisierten Versuchsanordnung sowie standardisierter Versuchsdurchführung bei Beregnungsversuchen stellt dennoch jede einzelne Starkregensimulation ein Unikat dar. „Der Oberflächenabflussbeiwert als Wirkungsparameter der Faktoren: Vegetation, Boden und Landnutzung unterliegt zeitlichen Schwankungen bzw. Veränderungen. Die Amplitude des Einflusses auf das Abflussverhalten reicht dabei von Jahrhunderten (z.B. Bodenentwicklung), über Dekaden (Landnutzungsänderung, z.B. Aufforstungen) und jährlichen Schwankungen (saisonale Weidewirtschaft) bis zu Veränderungen innerhalb weniger Tage (z.B. Planierungen).“ [Kohl, 2011].

Auf Grund dessen ist die Angabe von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz nur in Form von Bandbreiten bzw. Abflussbeiwertklassen sinnvoll. Für die Abschätzung des Abflussverhaltens bei konvektiven Starkregen wurde ein System mit 7 Abflussbeiwertklassen erstellt [Markart et al., 2006].

AKL	Ψ_{100} [abs.]	Ψ_{100} [abs.] Rechenwert	Ψ_{100} [%]
0	0	0,001	0
1	> 0 – 0,10	0,050	> 0 – 10
2	> 0,10 – 0,30	0,200	> 10 – 30
3	> 0,30 – 0,50	0,400	> 30 – 50
4	> 0,50 – 0,75	0,625	> 50 – 75
5	> 0,75 – < 1	0,875	> 75 – < 100
6	1	1,000	100

Tabelle 2.3 Abflussbeiwertklassen (AKL), Klassengrenzen des Abflussbeiwertes als Absolutwert (ψ_{100}) [abs.] bzw. in % des aufgebrachten Niederschlages (ψ_{100}) [%] [Kohl, 2011], Grün = positive Abflussverhältnisse, rot = hoher Abfluss [Markart et al., 2006]

Erläuterung der Abflussbeiwertklassen [Kohl, 2011][Markart et al., 2006]

- Abflussbeiwertklasse 0: Flächen, die keinen Oberflächenabfluss liefern, also z.B. (grob) blockige Schutthalden größerer Ausdehnung.
- Abflussbeiwertklasse 1: Standorten mit Zwergstrauchheiden ist die Bereitschaft zur flächigen Abflussbildung gering (z.B. Alpenrose, Heidelbeere oder Hochwaldbeständen mit dichtem Zwergstrauchunterwuchs auf lockerem Untergrund und ohne regelmäßige hohe Vorbefeuchtung) Diese Standorte lassen sich meist gut einschätzen, daher die engen Klassengrenzen (maximal 10 % des Niederschlages fließen an der Oberfläche ab).
- Abflussbeiwertklasse 2: Sehr pfleglich bewirtschaftete Mähwiesen weisen in der Regel eine AKL 2 auf. Mit zunehmender Abflussbereitschaft lassen sich die Einheiten nicht mehr so deutlich eingrenzen, wodurch breitere Klassengrenzen erforderlich sind (Maximal 20 % des Niederschlages fließen an der Oberfläche ab).
- Abflussbeiwertklasse 3: Bereits geringe (für den Aufnehmenden vor Ort oft kaum erkennbare) Zusatzbelastungen, wie kurzzeitige mechanische Beanspruchungen, z.B. durch Weide oder Befahren, bewirken oft schon einen weiteren Anstieg des Abflusspotentials (AKL 3).
- Abflussbeiwertklasse 4 und 5: Mit zunehmendem Nutzungsgrad (Planien, Schipisten, Weiderasen, beweidete Mähwiesen, Weidewälder) und generell auf sehr bindigen Böden nimmt die Abflussdisposition zu. Derartige Flächen lassen sich jedoch nicht sehr eng abgrenzen, daher wurden die Abflussbeiwertklassen 4 und 5 in Relation zu den AKL 1 bis 3 bewusst weiter gefasst.
- Abflussbeiwertklasse 6: Annähernd vollständiger Abfluss des Niederschlages an der Oberfläche ist auf stehenden Gewässern, vorverfüllten Flächen (z.B. Niedermoore, Quellenmoore) und versiegelten, dichten Standorten zu erwarten (AKL 6).

2.7.4 Umrechnung von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) in Abhängigkeit der Niederschlagsintensitäten (i_T)

Die Abhängigkeit des Abflussbeiwerts von der Niederschlagsintensität wurde experimentell am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW mittels einer Vielzahl an Regensimulationen unterschiedlicher Stärke überprüft [Kohl, 2011]. Über Berechnungen unterschiedlicher Intensität konnte ein empirischer Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert (siehe Abbildung 2.8) abgeleitet werden [Kohl und Achleitner, 2019].

Aus der Notwendigkeit heraus, dass für die Ereignismodellierung und die dabei zum Einsatz kommenden Niederschlagsabflussmodelle immer häufiger eine universelle Anwendbarkeit erwartet wird, wurde eine Funktion zur Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten für Niederschläge unterschiedlicher Intensität (i_T) aus den Regensimulationen abgeleitet [Kohl, 2011] [Kohl et al., 2013].

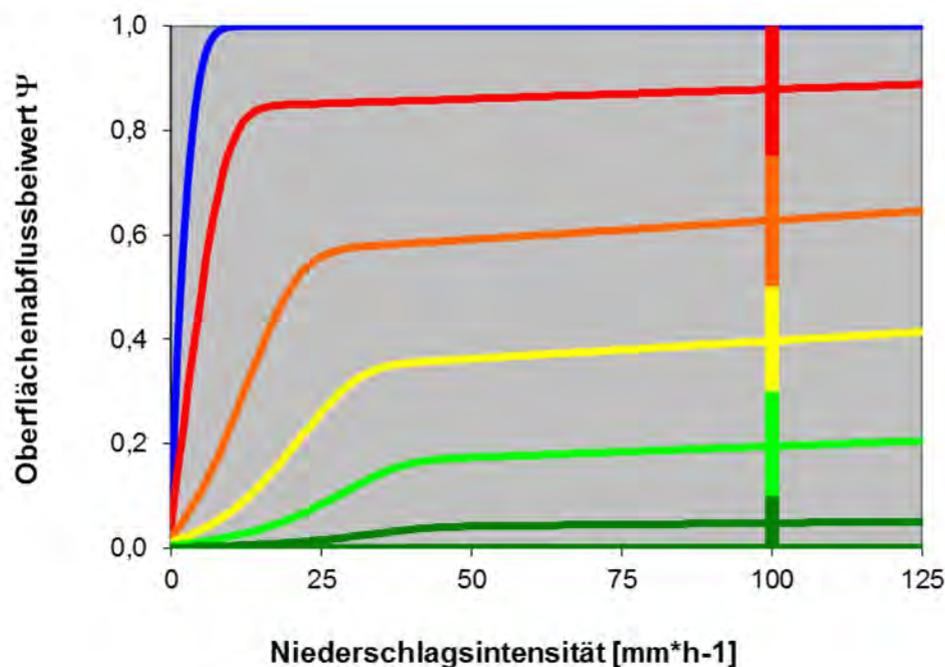


Abbildung 2.8 Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität (i_T) und dem Oberflächenabflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) für verschiedene Abflussklassen [Kohl et al., 2013]

Die Abbildung 2.8 zeigt, dass zwischen 30 und 100 mm Niederschlag pro Stunde der Abflussbeiwert einen moderaten Anstieg aufweist [PielerBüro, 2014]. Es zeigt sich des Weiteren, dass der Bereich $> 30 \text{ mm/h}$ eine lineare Zunahme des Abflussbeiwertes von durchschnittlich 6 % ($\% \text{ je } mm \cdot h^{-1}$) besitzt [Kohl et al., 2002]. Wohingegen die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz unterhalb der Intensitäten 30 mm/h einer sehr starken Änderung bei sinkender Niederschlagsintensität unterliegt [PielerBüro, 2014].

Auf Grundlage der durchgeführten Stark- und Dauerregensimulationen konnte die folgende Gleichung Abgeleitet werden. Die entwickelte Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und dem Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz.

$$\psi_{NS} = (0,3 \cdot \psi_{100}^2 + 0,7 \cdot \psi_{100}) \cdot (1 - EXP(-0,03 \cdot EXP((0,1 \cdot EXP(3,3 \cdot \psi_{100}))) \cdot i_T^{\wedge}(-0,7 \cdot \psi_{100} + 1))) + (-0,0035 \cdot \psi_{100} + 0,0035) \cdot i_T \quad (2.6)$$

Ausgehend von einem aus Berechnungsversuchen bzw. aus Modellen ermittelten durchschnittlichen Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz für einen 60 minütigen Starkregen der Intensität 100 mm/h (ψ_{const}) ist es möglich durch einsetzen der Intensität (i_T) in die Gleichung 2.6 den dazugehörigen Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ($\psi_{NS_{const}}$) zu berechnen [Kohl et al., 2013]. Mit anderen Worten kann somit der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz für beliebige Regenintensitäten ermittelt werden, sofern der Abflussbeiwert für den Standardstarkregen ($\psi_{const_{100}}$) von einer Stunde mit konstanter Intensität von 100 mm/h bekannt ist [Kohl, 2011].

2.7.5 HydroBod NÖ

Bei dem Projekt HydroBod NÖ (HYDRologische BODenkenndaten NiederÖsterreich) handelt es sich um ein mehrjähriges Projekt mit zwei Projektphasen. Auftraggeber war das Land NÖ, Gruppe Wasser, Abteilung Wasserwirtschaft sowie die Wildbach und Lawinerverbauung, Sektion Wien, Niederösterreich und Burgenland.

Die erste Projektphase der HydroBod NÖ wurde 2012 abgeschlossen und hatte zwei primäre Ziele [Eder et al., 2011]:

- Entwicklung und Ableitung homogener und flächendeckender Information in Form hydrologischer Bodenkennwerte.
- Flächige Ableitung der hydrologischen Reaktion des Landnutzungs-/ Bodenkomplexes während Starkregenereignissen (Hydrologische Reaktionstypen, Abflussbeiwerte).

Bei den in der ersten Projektphase abgeleiteten hydrologischen Bodenkennwerten handelt es sich um die hydraulische Leitfähigkeit (Fähigkeit des Bodens Wasser in die Tiefe zu leiten), das Gesamtporenvolumen (Luftraum innerhalb des Bodenkörpers) und die nutzbare Feldkapazität (Wasserspeichervermögen des Bodens). Die Ableitung dieser Bodenkennwerte erfolgt über sogenannte Pedotransferfunktionen (PTF). Unter PTF versteht man Funktionen, welche aus leicht(er) messbaren bodenphysikalischen Parametern wie z.B. Textur (= Bodenart oder Korngrößenverteilung), Lagerungsdichte, Humusgehalt und Grobstoffanteil des Bodens hydrologische Bodenkennwerte ableiten. Diese hydrologischen

Kennwerte stellen die wichtigsten Merkmale des Wasserhaushaltes eines Bodenkörpers dar [Eder et al., 2011]. Neben den abgeleiteten hydrologischen Bodenkennwerten wurden des weiteren flächendeckende Erhebungen der Landnutzung sowie geologischen Einheiten durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurde des Weiteren ein neues GIS-basiertes Bodenspeichermodell namens HydroBod -Modell entwickelt welches, ausgehend von den oben beschriebenen Basisdaten und daraus abgeleiteten Kennwerten, parametrisiert wurde.

In der zweiten Projektphase (2012-2017) wurden die bodenhydrologischen Basisdaten bzw. die Ableitungen daraus im Hinblick auf eine bessere Übereinstimmung mit gemessenen Abflussereignissen optimiert [Kohl und Achleitner, 2019]. Die in der Hydrobod NÖ verwendeten Basisdaten wie zum Beispiel die Bodenkarte und Geologie weisen einen mittleren bis großen Maßstab (1:25.000 bis 1:200.000) auf. Auf Grund dessen sind auch die abgeleiteten hydrologischen Basisdaten nicht parzellenscharf. Die räumliche Genauigkeit der Bearbeitung ist mit einem Zielwert von 1:50.000 definiert [Sotier et al., 2017].

Das aktuelle HydroBod II Modell dient zur dynamischen Simulation der Abflussbildung und dadurch zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Oberflächenabflusses. Vom Modell wird jedoch keine Interaktion mit benachbarten Zellen bzw. Abflusskonzentration an der Oberfläche erfasst [Kohl und Achleitner, 2019]. Das angewendete Infiltrationsmodell ist in der Lage die Versickerung zeitlich diskretisiert zu berechnen. In der ersten Phase erfolgt eine vollständige Infiltration und daher kein Oberflächenabfluss. Mit fortschreitendem Niederschlag erhöht sich das im Boden befindliche Wasser, wodurch sich die Infiltrationskapazität verringert. Ab dem Zeitpunkt, wo die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität übersteigt, erfolgt Oberflächenabfluss.

Für die Ableitung der flächendeckenden Abflussbeiwertkarte für Niederösterreich erfolgte zunächst die Simulation des Abflussverhaltens bei definierten Randbedingungen. Die HydroBod NÖ (zweite Projektphase) berücksichtigt sämtliche Parameter, die auf den Abflussbeiwert Einfluss haben. Eingangsparemeter für das Modell sind die Niederschlagssumme, die Niederschlagsdauer, der Vorfeuchtezustand (trocken, mittel, feucht, gesättigt) sowie die Verschlammungsneigung (verschlämmt, nicht verschlämmt) definiert [PielerBüro, 2016]. Die Niederschlagsdaten werden im Modell als Blockregen mit einer konstanten Intensität eingetragen [Sotier et al., 2017]. Bei dem im Modell berücksichtigten Blockregen handelt es sich um ein einstündiges Niederschlagsereignis (Dauer 60 min) mit einer Intensität von 100 mm/h. Ein häufig auftretendes Phänomen bei Niederschlägen hoher Intensität ist die Verschlammung von Oberflächen (Regentropfenerosion, splash erosion). Grund dafür ist die Ausformung von sehr großen und schweren Tropfen bei Starkregenereignissen und eine damit verbunden hohe kinetische Energie der aufpral-

lenden Regentropfen, wodurch es zu einer mechanischen Zerkleinerung der Bodenaggregate und einem Herauslösen von Feinteilen und Feinkörnern sowie deren Sedimentation und damit einhergehender Verlegung der Bodenporen kommt. [Winkelhofer, 2016]. Diese kann die Infiltrationsleistung eines Bodens stark herabsetzen und wirkt sich dadurch auf die Abflussbildung aus. Analysen zeigen, dass vor allem die Annahme verschlämmt, nicht verschlämmt sowie der Vorfeuchtezustand erheblichen Einfluss auf den Abflussbeiwert haben und dessen Schwankungsbreite verursachen [PielerBüro, 2016]. Im HydroBod Modell als auch HydroBod II Modell wurde als Modellansatz für die Verschlämmung ein Worst-Case Szenario mit extremer Verschlämmung an Ackerstandorten definiert. Bei Waldstandorten sowie Dauergrünland wird aufgrund der schützenden Pflanzendecke keine Verschlämmung angenommen [Sotier et al., 2017]. Aus der Simulation des Oberflächenabflusses wurde in weiterer Folge der Abflussbeiwert in Abflusskonstanz (ψ_{const}) für ganz Niederösterreich abgeleitet [Kohl und Achleitner, 2019].

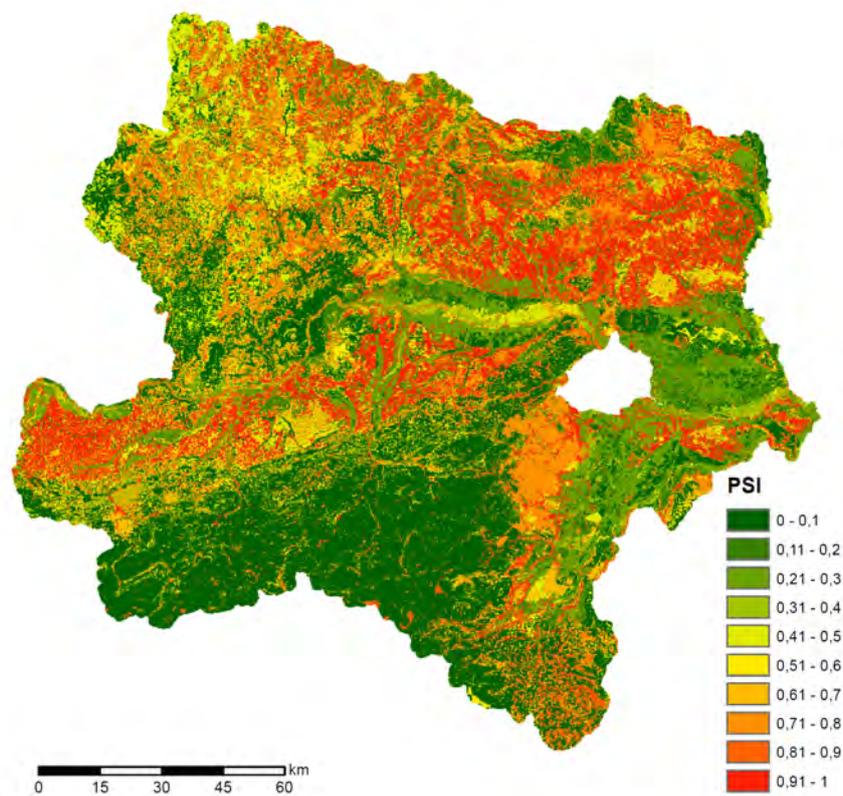


Abbildung 2.9 Abflussbeiwert in Abflusskonstanz (ψ_{const}) für einen standardisierten Niederschlag (N = 100 mm; D = 60 min) mit Berücksichtigung einer potentiellen Verschlämmungsneigung; Modell HydroBod NÖ II [Sotier et al., 2017]

2.7.6 Übertragung der HydroBod NÖ auf Oberösterreich

Auftraggeber der Abflussbeiwertkarte für Oberösterreich war das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft. Die Ausführenden Instanzen waren das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW – Institut für Naturgefahren) und der Arbeitsbereich Wasserbau

der Universität Innsbruck [Kohl und Achleitner, 2019].

Für die Ausweisung von mittleren Abflussbeiwerten für die Fläche Oberösterreichs wurde eine vereinfachte Vorgehensweise gewählt [Kohl und Achleitner, 2019]. Die in Niederösterreich im Projekt HydroBod NÖ I und II erstellten hochaufgelösten, flächendeckenden Abflussbeiwertkarten dienten als Basis für die Übertragung der Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}). Dabei wurden die ermittelten Abflussbeiwerte in NÖ einer Klassifizierung anhand von (a) Corine-Land-Cover CLC Klassen (b) geologischen Einheiten aus GK200 und (c) der Kombination aus (a) und (b) unterzogen [Kohl und Achleitner, 2019]. Der Grund warum für die Übertragung der Abflussbeiwerte die Karten der CLC-Klassen und GK200 gewählt wurden, folgt aus dem pragmatischen Ansatz heraus, da diese in Niederösterreich und Oberösterreich flächendeckend vorhanden sind.

Corine-Land-Cover (CLC)

Corine-Land-Cover (Coordination of Information on the Environment) ist ein von der Europäischen Kommission ins Leben gerufenes Projekt. Seit Mitte der 1980er Jahre werden digitale Satellitenbilder einheitlich erfasst und hinsichtlich ihrer Flächennutzung ausgewertet. Die Daten werden periodisch aufgenommen und stehen frei zur Verfügung. Die CLC-Karten unterscheiden 44 verschiedenen Landnutzungsklassen und verzeichnet Flächen mit einer minimalen Kartierungseinheit von 25 ha mit einer Mindestbreite von 100 m. Die der Auswertung zugrunde gelegten Satellitendaten besitzen einen Maßstab von 1:100.000. Für die Übertragung der Abflussbeiwerte wurde die CLC-Karte aus dem Jahr 2012 verwendet [EuropäischeKommission, o.j.].

Geologische Karte (GK200)

Bei der Geologische Karte 1:20.000 handelt es sich um eine von der Geologischen Bundesanstalt veröffentlichten flächendeckenden Übersichtskarte für ganz Österreich. Die GK200 gibt Aufschluss über die geologischen Formationen im Untergrund und ist über die open government Plattform frei erhältlich [GeologischeBundesanstalt, 2008].

Für die Überführung der Abflussbeiwerte erfolgte zunächst eine Klassifizierung der Niederösterreichischen Abflussbeiwertkarte anhand der CLC-Karte und der GK200 sowie einer Kombination aus beiden. Nach der Zuweisung der unterschiedlichen Abflussbeiwerten zu den einzelnen Landnutzungen bzw. geologischen Einheiten wurde für alle in einer Klasse befindlichen Einheiten jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung der Abflussbeiwerte in den einzelnen Klassen wird berechnet, um die entsprechenden Unsicherheiten darzustellen. Die mittlere Standardabweichung der kombinierten Karte aus CLC und GK200 weist 22 % auf.

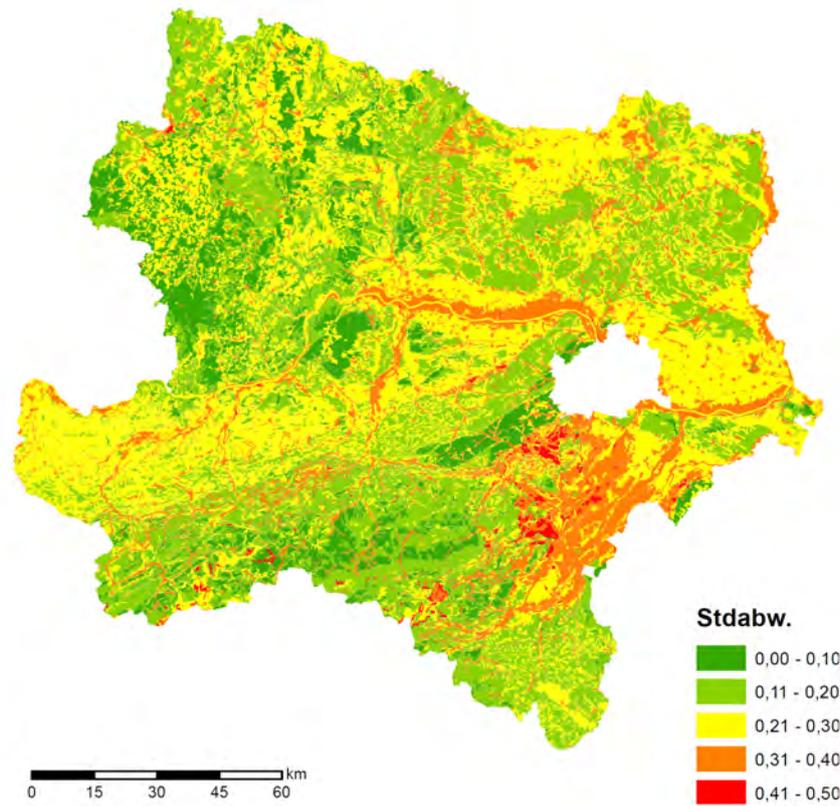


Abbildung 2.10 Standardabweichung der Abflussbeiwerte in Abflusskonstanz (ψ_{const}) bei Klassifizierung nach der Kombination aus Corine Landnutzung und geologischen Einheiten (CLC_{2012} und GK_{200}) [Kohl und Achleitner, 2019]

Die hohe Standardabweichung kann durch die vorgenommenen Vereinfachungen und räumlichen Unschärfen der Datensätze begründet werden [Achleitner et al., 2020]. Einen großen Einfluss hat dabei die grobe räumliche Abgrenzung der Corine Daten sowie die ebenfalls groben geologischen Datensätze [Kohl und Achleitner, 2019]. Aus der Verschneidung der GK_{200} und Corine (CLC_{2012}) Daten wurden 115999 Polygone identifiziert, wobei der Datensatz um Polygone kleiner 1000m^2 bereinigt wurde. Es verbleiben damit 98771 Polygone mit 2152 Kombinationen aus CLC_{2012} und GK_{200} [Kohl und Achleitner, 2019].

Die kombinierte Abflussbeiwertkarte aus CLC_{2012} und GK_{200} wurde in weiterer Folge auf Oberösterreich übertragen. Die Unsicherheiten in der Übertragung werden ebenfalls deutlich, wenn die Zuweisung ähnlicher bzw. vergleichbarer geologischer Einheiten betrachtet wird. In Niederösterreich sind beispielsweise ca. 170 geologische Einheiten ausgewiesen, in Oberösterreich handelt es sich um ca. 330 ausgewiesene Einheiten. Zudem sind räumliche und inhaltliche Inkonsistenzen an Kartierungsgrenzen unumgängliche Fehlerquellen [Achleitner et al., 2020].

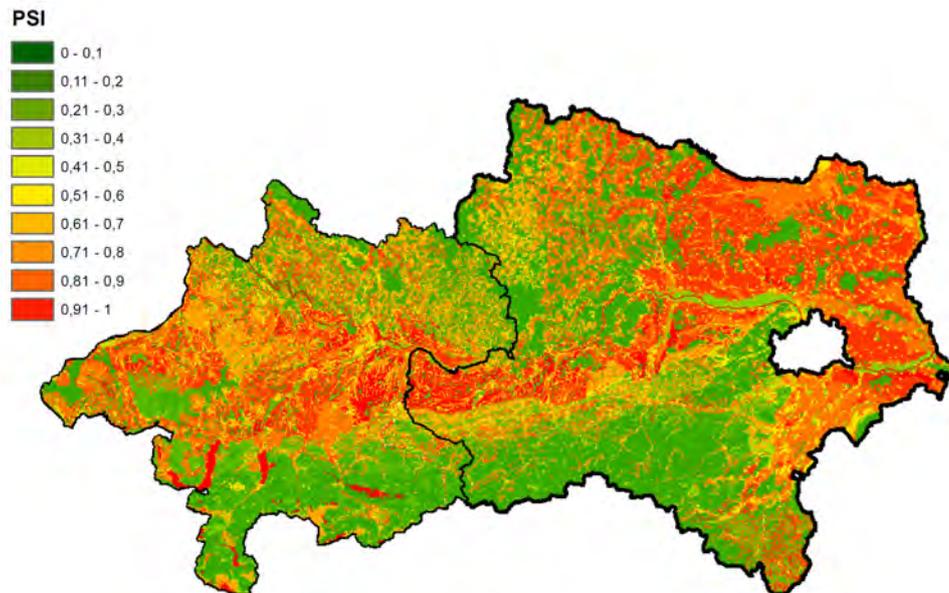


Abbildung 2.11 Abflussbeiwert in Abflusskonstanz (ψ_{const}) übertragen entsprechend der Klassifizierung von Corine Landcover (CLC_{2012}) in Kombination mit geologischen Einheiten (GK_{200}) - Kartenausschnitt Oberösterreich und Niederösterreich [Kohl und Achleitner, 2019]

Verifikation durch Beregnungsversuche aus Schwertberg

Die durch die Übertragung der HydroBod NÖ nun für Oberösterreich flächendeckend zur Verfügung stehende Abflussbeiwertkarte wurde vom BFW – Institut für Naturgefahren und der Universität Innsbruck unter anderem mit 10 bereits bestehenden Beregnungsversuchen aus Schwertberg verglichen. Die Beregnungen erfolgten 2015 und 2016 in Schwertberg im Rahmen des ACRP Projects SAFFER. Im Rahmen des Vergleichs wurden die experimentell erhobenen Abflussbeiwerten (ψ_{const}) mit den Abflussbeiwerten (ψ_{const}) aus der Übertragenen HydroBod NÖ verglichen.

Beregnung	Klasse	CLC	GK
SAFFER_BF 1/1	1	112	Löß
SAFFER_BF 2/1	1	112	Löß
SAFFER_BF 3/1	1	112	Löß
SAFFER_BF 4/1	2	112	Niederterrasse
SAFFER_BF 5/1	2	112	Niederterrasse
SAFFER_BF 6/1	2	112	Niederterrasse
SAFFER_BF 7/1	3	211	Linz Formation
SAFFER_BF 8/1	3	211	Linz Formation
SAFFER_BF 9/1	4	211	Löß
SAFFER_BF 10/2	4	211	Löß

Tabelle 2.4 Beregnungsstandorte und zugehörige Klassenbezeichnungen, CLC: 112 = Nicht durchgängig städtische Prägung, 211 = Nicht bewässertes Ackerland (Beregnungsversuche Schwertberg 2015/2016) [Kohl und Achleitner, 2019]

Aus den Beregnungsversuchen, welche mit einer Intensität von 100 mm/h über eine Zeitspanne von 60 min betrieben wurden, entstammen die experimentell ermittelten Abfluss-

beiwerte in Abflusskonstanz (ψ_{const}). Diese sind jeweils dem Mittelwert samt Schwankungsbreite (Standardabweichung) der Übertragenen HydroBod NÖ gegenübergestellt. Die Klasseneinteilung entspricht der jeweiligen Kombination aus CLC- und GK-Klasse [Kohl und Achleitner, 2019].

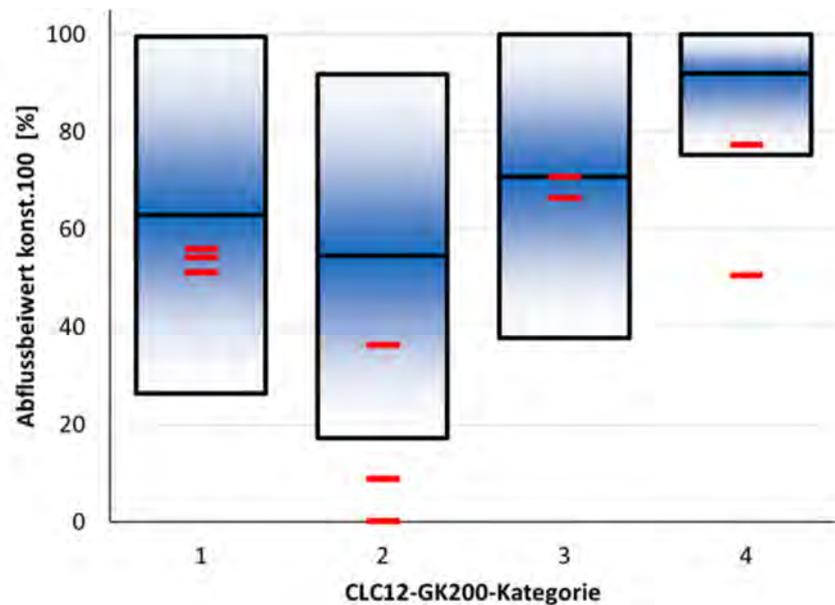


Abbildung 2.12 Gegenüberstellung der Übertragenen Mittelwerte samt Standardabweichung (Box-Plots) mit den experimentell erhobenen Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) (rot) aus Schwertberg (2015/2016) [Kohl und Achleitner, 2019]

Die Abbildung 2.12 zeigt eine Überschätzung der Abflussbeiwerte (ψ_{const}) aus der Übertragenen Abflussbeiwertkarte im Vergleich zu den im Feld mit Berechnungsversuchen ermittelten Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}). Die Klassen 2 (CLC: Nicht durchgängiges städtische Prägung, GK: Niederterrasse) und die Klasse 4 (CLC: Nicht bewässertes Ackerland, GK: Löß) zeigen hierbei die größten Abweichung zwischen gemessenen und übertragenen Abflussbeiwerte (ψ_{const}). Die Klasse 1 (CLC: Nicht durchgängiges städtische Prägung, GK: Löß) und die Klasse 3 (CLC: Nicht bewässertes Ackerland, GK: Linz Formation) zeigen hingegen eine gute, wenn auch eine leicht unterschätzende Näherung der Übertragenen Abflussbeiwerte an die gemessenen. Grundsätzlich lässt sich für die in Schwertberg durchgeführte Gegenüberstellung der Abflussbeiwerte eine klare Überschätzung der Übertragenen Abflussbeiwerte gegenüber der Messwerte feststellen. Die maximalen Wasserstände in der Simulation sind für die Untersuchungsflächen deshalb als eher überschätzend zu werten. Des Weiteren wurde für die Übertragene HydroBod ein Modellansatz gewählt, der einem Worst-Case-Szenario mit extremer Verschlämmung an Ackerstandorten entspricht, wodurch die Überschätzung der Modellwerte im Vergleich zur Realität durchaus nachvollziehbar sind.

Der technische Bericht des Rainman Reports kommt bei einer genaueren Betrachtung der flächendeckenden Abflussbeiwertkarte für Oberösterreich zu dem Schluss, dass sowohl räumlich als auch vom Informationsgehalt (grobe CLC Klassen) keine Aussagen im Detailmaßstab gemacht werden können [Achleitner et al., 2020].

2.8 Niederschlags-Abfluss-Modell (JFlow)

Das vorwiegende Einsatzgebiet der Niederschlagsabflussmodellierung von Starkregenereignissen ist die Abschätzung von maximal Abflüssen in unbeobachteten Einzugsgebieten, bei diesen per Definition keine Abflusspegel bzw. Anschlagsmarken bekannt sind. Das Verbesserungspotenzial liegt dabei vor allem in den Prozessbereichen Niederschlag und Oberflächenabfluss [Kohl et al., 2013]. Für die Simulation von pluvialen Überflutungen wird in der vorliegenden Arbeit das rasterbasierte 2d hydraulische Modell JFlow verwendet (entwickelt von JBA Consulting, UK).

JFlow verwendet zum Modellaufbau die Projektdatenbank PqAdmin mit festem und vordefiniertem Tabellenschema. JFlow-Simulationen werden erstellt, indem eine Projektdatenbank mit den erforderlichen Eingabedaten gefüllt wird. Die Datenbank in Tabellenform ermöglicht es verschiedene Eingabe- und Ausgabeparameter zu kombinieren. Die in einem Modell berücksichtigte Menge an Eingangsparameter ist stark von den Anforderungen an das Projekt und die zu beantwortenden Fragestellung abhängig. Die Reihenfolge des Aufbaus der Projektdatenbank ist durch das vorgegebene Datenbankschema sowie durch die Abhängigkeit zwischen den Tabellen bestimmt. Auf Grund dessen werden JFlow-Simulationen „von unten nach oben“ erstellt, wobei die Komponenten der unteren Ebene als erstes definiert werden müssen um diese in den ansteigenden Ebenen in „Sets“ zusammen zu fassen. Diese Datensätze beschreiben in weiterer Folge eine Simulation und definieren die Eingangsparameter eines Modells.

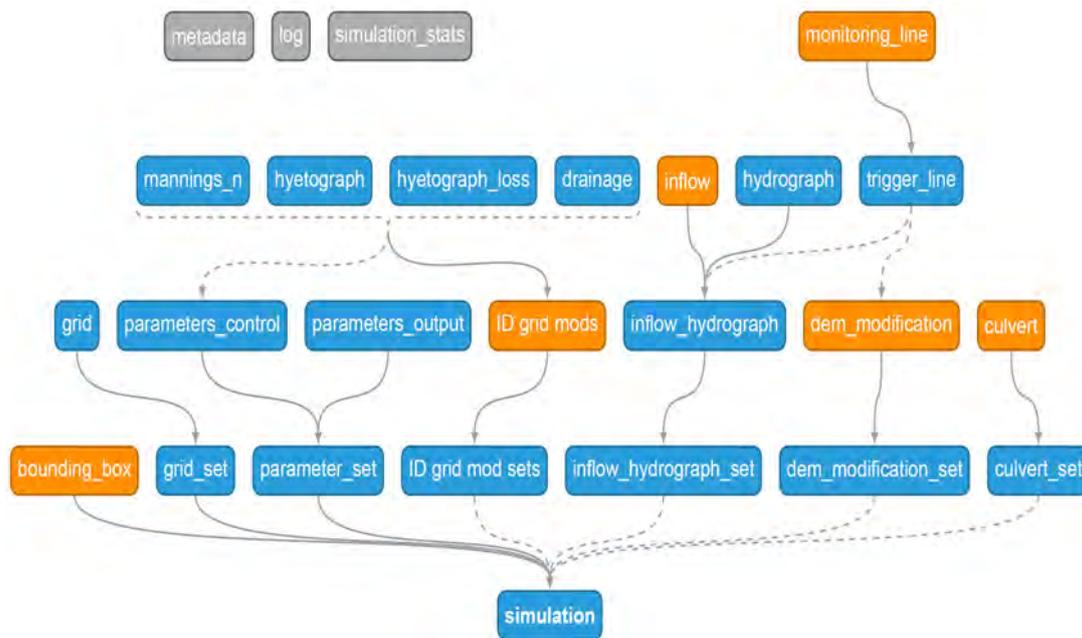


Abbildung 2.13 Schematisches Diagramm der Tabellen einer JFlow Projektdatenbank Tabellen sind farbcodiert nach ihrem Typ: Eingabedatentabellen sind blau, Tabellen sind orange und Ausgabedatentabellen sind grau. Abhängigkeiten zwischen Tabellen werden durch Pfeile angezeigt, wobei durchgezogene und gestrichelte Linien die erforderlichen bzw. optionalen Abhängigkeiten angeben [Berry, 2020]

Die Datenbanktabellen sind mit Überprüfungsmechanismen versehen, um häufig auftretende Modelleingabefehler zu kontrollieren und zu vermeiden. Dem Modell zugrunde gelegte Geodaten, wie zu Beispiel Einzugsgebietsgröße (`bounding_box`), DEM-Modifikationen usw. werden mit der Geoinformationssystemsoftware QGIS in die Datenbank eingegeben. Die Softwarepakete für die Datenbankverwaltung (Pgadmin) und die GIS-Anwendung (QGIS) sind Open Source. Sobald das Modell eingerichtet ist, kann es im Vorverarbeitungsmodus (`preprocessing-mode`) ausgeführt werden, sodass der Benutzer vor einer endgültigen Ausführung auf Eingabe- bzw. Modellierungsfehler aufmerksam gemacht wird. JFlow wurde entwickelt, um die Erhaltungsgleichungen unter Verwendung von Grafikprozessoren (GPUs) im Gegensatz zur herkömmlichen Zentraleinheit (CPU) zu lösen. Aufgrund einer großen Anzahl parallelisierbarer Kerne in einer GPU und der Möglichkeit, Simulationen auf mehreren GPUs auszuführen, kann JFlow große Simulationen schnell und effizient ausführen und ist somit ein überaus geeignetes Werkzeug für die Berechnung von großflächigen pluvialen Überflutung mit feiner DGM-Auflösung.

Um die Plausibilität von Oberflächenabflüssen zu überprüfen, ist es möglich sogenannte Monitoring Lines an gewünschten Stellen in JFlow zu implementieren, die die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit pro festgelegtem Zeitintervall während der Simulation aufzeichnen und daraus den Abfluss (m^3/s) bestimmen. Eine Kopplung des Oberflächenabflusses mit einem Kanalnetz ist mit JFlow nicht möglich. Mit den in JFlow verfügbaren Werkzeugen und Methoden, wie zum Beispiel Entwässerung (`drainage`), Durchlass (`culvert`) und Niederschlagsverluste (`hyetograph_loss`), ist es jedoch möglich, zeitabhängige

Verluste (zB. Infiltration), den Durchfluss von Kanälen sowie den Effektivniederschlag zu beschreiben. JFlow wurde von der Environmental Agency of England zusammen mit anderen hydrodynamischen Modellen anhand eines Benchmarktests erfolgreich bewertet [Néelz und Pender, 2013] und des Weiteren dafür verwendet eine flächendeckende hochaufgelöste pluviale Hochwasserkarte von England sowie Pilotregionen in Belgien zu berechnen [Cauwenberghs et al., 2018].

2.8.1 2d Flachwassergleichung

Die Starkregensimulationssoftware JFlow löst zweidimensionale Flachwassergleichungen basierend auf der Massenerhaltung 2.7 und auf zwei Impulserhaltungsgleichungen (in X- und Y-Richtung) 2.8, 2.9:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.9)$$

Wobei h die Wassertiefe, u und v Geschwindigkeiten in X- bzw. Y-Richtung, t die Zeit, g die Beschleunigung durch die Schwerkraft, S_{0x} und S_{0y} die Neigung des Sohlgefälles in X- bzw. Y-Richtung und S_{fx} und S_{fy} ist das Reibungsgefälle (Energienliniengefälle) in X- bzw. Y-Richtung [Berry, 2020]

2.8.2 Massenerhaltung

Die Massenerhaltung wird durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben. Die Kontinuitätsgleichung ergibt sich aus einer summarischen und sich ausgleichenden Gegenüberstellung (Bilanzierung) der ein- und austretenden Massenströme über das betrachtete Kontrollvolumen [Volz, 2002].

2.8.3 Impulserhaltung

Die Impulserhaltung in X- bzw. Y-Richtung wird durch die Bewegungsgleichung beschrieben. Die Bewegungsgleichung ergibt sich aus einer summarischen und sich ausgleichenden Gegenüberstellung (Bilanzierung) der ein- und austretenden Impulsströme über das betrachtete Kontrollvolumen [Volz, 2002].

Sohlgefälle (S_{0x} , S_{0y}) und Reibungsgefälle (Energienliniengefälle) (S_{fx} , S_{fy})

Das Sohlgefälle beschreibt die Neigung der Geländeoberfläche. Das Energienliniengefälle beschreibt den Energieverlust der Strömung durch Reibungsverluste verursacht durch die Rauheit von überflossenen Oberflächen [Volz, 2002]. Zur Berechnung des Energienliniengefälles gibt es zwei gängige empirische Ansätze (Ansatz nach Darcy-Weisbach und Ansatz nach Manning-Strickler) [Kammerer et al., 2019]. Im Modell JFlow ist der Ansatz nach Manning-Strickler implementiert.

Das Sohl- und Reibungsgefälle (Energienliniengefälle) in X- bzw. Y-Richtung ist wie folgt definiert [Berry, 2020]:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, \quad S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.10)$$

$$S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.11)$$

Wobei S_{0x} und S_{0y} das Sohlgefälle beschreiben, z den Abstand in der Höhe, x und y den Abstand in der Länge; S_{fx} und S_{fy} ist das Reibungsgefälle (Energienliniengefälle), n ist die Manning's Rauigkeit ($n = 1/k_{st}$).

Die Flachwassergleichung basiert auf den nachfolgenden Annahmen [Volz, 2002]:

- Bei der Flachwassergleichung liegt eine Strömung mit freier Oberfläche vor. Grund dafür ist der große Dichteunterschied zwischen Gas (Luft) und Flüssigkeit, wodurch die Massenträgheitskraft an der Grenzfläche vernachlässigt werden kann.
- Die Stromfäden sind nur schwach gekrümmt, weshalb eine hydrostatische Druckverteilung angenommen werden kann.

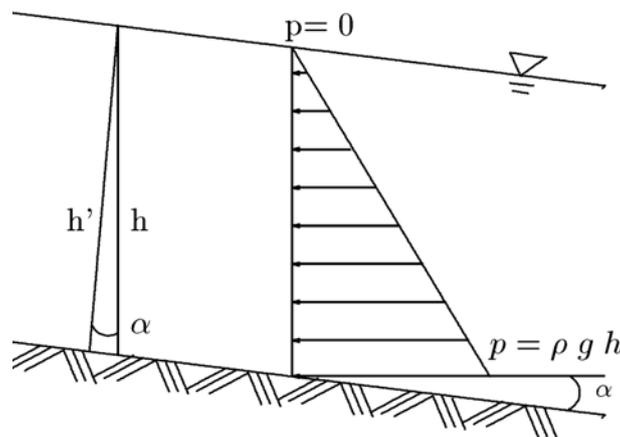


Abbildung 2.14 Gerinneskizze [Volz, 2002]

- Es liegt ein geringes Gefälle vor, für den Neigungswinkel α gelten die Beziehungen: $\sin \alpha \approx \alpha$ und $\cos \alpha \approx 1$ (siehe Abbildung 2.14). Somit gilt auch die Beziehung $h' \approx h$.
- Die Wassertiefe h ist sehr viel kleiner als die Gerinnelänge l .
- Das Wasser ist inkompressibel.
- Es liegt eine Strömung mit langen Wellen vor, die bei einem Verhältnis von Wellenlänge zu Wassertiefe von ≥ 20 gegen ist.

Die Flachwassergleichung kann ebenfalls als tiefengemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (NSG = Impulsgleichung (Bewegungsgleichung) + Kontinuitätsgleichung) bezeichnet werden [Berry, 2020].

2.8.4 Diskretisierung der Fläche

JFlow löst die Flachwassergleichungen numerisch auf der Grundlage der räumlichen Diskretisierung unter Verwendung der Finiten-Volumen-Methode (FVM) [Berry, 2020]. Dabei wird über das Berechnungsgebiet ein Gitternetz gelegt, wodurch das zu betrachtende Einzugsgebiet in finite Volumenelemente unterteilt wird [Volz, 2002]. JFlow als rasterbasiertes Modell nutzt hierzu die regulären Raster des digitalen Geländemodells (DGM). Das DGM stellt die Geländeoberfläche der Erde mittels Gitternetz dar, das als Koordinaten X , Y , Z auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten aus periodisch stattfindenden Überfliegungen mittels LIDAR (Light Detection and Ranging) erhoben wird. Das Ergebnis dieser Überfliegungen sind Raster gleicher Größe, wobei jede Zelle einen konstanten Höhenwert darstellt, der dem Datum der Überfliegung entspricht.

2.8.5 Diskretisierung der Zeit

Für die Lösung der Flachwassergleichung muss neben der räumlichen Diskretisierung ebenfalls eine Diskretisierung der Zeit vorgenommen werden. Hierzu wird die Simulationsdauer in einzelne Zeitpunkte zerlegt [Volz, 2002]. JFlow verwendet für die Diskretisierung der dynamischen Zeitschritte die sogenannte Courant-Friedrich-Lewy (CFL) Bedingung [Berry, 2020]. Die CFL-Zahl beschreibt die Ausbreitung einer Strömung während eines Zeitschrittes Δt im Verhältnis zum Gitterabstand Δx und dadurch die maximale zulässige Zeitschrittlänge Δt bei der betrachteten Gitternetzgröße Δx . Auf Grund dessen müssen die internen Berechnungsschritte vom Modell umso kleiner gewählt werden umso höher die Fließgeschwindigkeit und umso feiner die dem Modell zugrunde gelegte Rasterauflösung gewählt ist [Beffa, 2008].

Die CFL-Zahl gibt somit an, um wie viele Zellen sich eine betrachtete Größe pro Zeitschritt maximal fortbewegt [Clebsch et al., 1928].

$$c = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (2.12)$$

Wobei c die Courant-Zahl, u die Geschwindigkeit, Δt der diskrete Zeitschritt und Δx der diskrete Ortsschritt ist. Die CFL-Bedingung besagt, dass $c \leq 1$ [Courant et al., 1967] sein muss, damit das explizite Verfahren stabil ist und dadurch die Massenerhaltung gewährleistet bleibt. Das CFL-Kriterium wird vom Modell dadurch optimiert, dass die zur Zeitschrittbestimmung im Modell angewendete CFL-Zahl möglichst nahe an 1 angenähert wird, wodurch die CFL-Bedingung nämlich, dass die Zeitschrittlänge nicht größer sein darf als die Zeitdauer, die von einem Wasserpartikel gebraucht wird, um von einem Gitterpunkt zum Nächsten zu gelangen erfüllt ist [Volz, 2002]. Im Falle von JFlow wird die CFL-Bedingung im Modell nicht mit $c \leq 1$ umgesetzt, sondern mit der verschärften Bedingung von $c \leq 0,5$ [Berry, 2020].

2.9 Pilotgebiet Schwertberg

Die in Schwertberg dokumentierten Katastropheneinsätze infolge von Hangwasserabflüssen belaufen sich auf den 8. bis 11. Juni 2011 sowie den 9. Juni 2016 wo Poneggen ein Ortsteil in Schwertberg überschwemmt wurde. Des Weiteren wurde am 3. Mai 2013 abermals die in Poneggen/Schwertberg gelegene Bachstraße überflutet. Zuletzt wurde Schwertberg am 24. Juli 2016 durch ein lokales Starkregenereignis überflutet [Kürmayr, 2016]. Bei diesem Starkregenereignis war das gesamte Gemeindegebiet Schwertbergs von Hangwasserüberschwemmungen betroffen. Die zahlreichen Feuerwehreinsätze bieten eine umfassende Datengrundlage mit Überflutungsmarken und Bilddokumentation von den stattgefundenen Katastropheneinsätzen. Das in der vorliegenden Arbeit betrachtete Pilotgebiet befindet sich in der Marktgemeinde Schwertberg im oberösterreichischen unteren Mühlviertel, im Bezirk Perg. Das betrachtete Einzugsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von 2,16 km². Die gesamte Gemeinde Schwertberg umfasst eine Fläche von 18,79 km² und befindet sich 20 km östlich der Stadt Linz. Die Einwohnerzahl beläuft sich auf 5.321

(1. Jänner 2020) mit einer Bevölkerungsdichte von 283 Einwohnern pro km² (Statistik Austria: Bevölkerung am 1. Jänner 2020). Schwertberg liegt auf 268 m ü. A. Das betrachtete Einzugsgebiet ist im Norden durch hügeliges Alpenvorland charakterisiert (ca. 346 m ü. A.) an deren Ausläufern sich die Gemeinde Schwertberg befindet. Die Aist begrenzt im Osten und der Poneggenbach im Westen sowie im Süden das betrachtete Einzugsgebiet von Schwertberg. Die Aist weist eine gesamte Länge von 13,7 km auf. Der Poneggenbach besitzt eine gesamte Länge von 7 km und umfasst ein Einzugsgebiet von 3,8 km² bevor er im Südosten von Schwertberg in die Aist mündet. Die Aist, wie auch der Poneggenbach, weisen im Siedlungsbereich von Schwertberg gelbe und rote Gefahrenzonen der WLW (Wildbach- und Lawinerverbauung) auf [DorisPlattform(GisLandOberösterreich), o.j.]. Die mittlere Jahresniederschlagssumme von Schwertberg beträgt 787 mm [CLIMA-Daten, o.j.].



Abbildung 2.15 Pilotgebiet Schwertberg: Orthofoto (links) Hillshade/Schummerung (rechts)

Kapitel 3

Ergebnisse

Das Kapitel der Ergebnisse befasst sich mit der Erläuterung der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung der Intensitätsverteilung von Starkregenereignissen. Des Weiteren wird auf die Parameterwahl sowie die technische Implementierung im Niederschlags-Abfluss-Modell JFlow näher eingegangen. Der letzte Abschnitt des Ergebnisteils befasst sich mit der Modellanwendung am Pilotgebiet Schwertberg. Hierbei wird unter der Berücksichtigung von höhenabhängigen Rauigkeiten und Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz ein Vergleich zwischen Blockregen und der entwickelten Intensitätsverteilung (Normganglinie) untersucht.

3.1 Niederschlagsauswertung

Die Abschätzung des Niederschlags ist für die Niederschlags-Abflussmodellierung sehr entscheidend, da kein Modell, sei es physikalisch fundiert oder empirisch begründet, in der Lage sein wird, akkurate Abflussprognosen zu erzeugen, wenn die Eingangsgrößen den Niederschlagsinput nicht angemessen charakterisieren [Kohl, 2011].

Die Abschnitte bis einschließlich 3.13 zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Starkregenauswertung auf Basis der 52 untersuchten Niederschlagsereignisse, bei denen es sich jeweils um die 5 stärksten 10 minütigen, 30 minütigen und 60 minütigen Ereignisse der 8 betrachteten Wetterstationen (siehe 3.1.2) handelt.

3.1.1 Niederschlagsdaten der ZAMG

Die Daten der untersuchten Extremereignisse mit starkem Niederschlag in kurzer Zeit wurden von der ZAMG mittels GEV-MLE-Statistik ("Generalized extreme value maximum likelihood estimates") bestimmt und zur Verfügung gestellt [ZAMG, o.j.]. Bei den untersuchten Niederschlagsereignissen handelt es sich jeweils um die 5 stärksten 10 minütigen, 30 minütigen und 60 minütigen Ereignisse der 8 betrachteten Wetterstationen, wobei sich diese Ereignisse überlagern können. Ein 10 minütiges Ereignis kann beispielsweise im 3 minütigen bzw. 60 minütigen Ereignis enthalten sein. Je nach Station gibt es dadurch 5 bis 9 verschiedene Niederschlagsereignisse. In Hörsching, eine Gemeinde

in Oberösterreich, Südwestlich von Linz, gibt es aufgrund fehlender Datenaufzeichnungen nur 4 Niederschlagsereignisse. Die Niederschlagsdaten liegen in 1 minütiger Auflösung mit einer Genauigkeit von 0,1 mm vor, wodurch es möglich ist die Intensität in Abhängigkeit der Zeit genauer zu untersuchen.

Die Stationsaufzeichnungen umfassen im Schnitt 20 Jahre innerhalb des Zeitraumes 1982 bis 2019. Die Extremniederschlagsereignisse stammen jedoch bis auf zwei Ereignisse aus den letzten 20 Jahren. Alle betrachteten Niederschlagsereignisse sind nach der Definition von Intensität und Niederschlagsmenge (Kriterien nach Wussow [Wussow, 1922] und DWD [DWD, o.j.]) sowie nach der Definition von Wiederkehrzeiten (DWD [climate service center.de, 2012]) als Starkniederschläge einzustufen.

Bei den betrachteten Starkregenereignissen handelt es sich größtenteils um konvektive Niederschläge, da diese lokal zu den größten Niederschlagsmengen in kurzer Zeit führen. Es ist anzunehmen, dass sich in den Daten auch advektive Niederschlagsereignisse befinden, die durch Fronten, also an starken Luftmassengrenzen, entstanden sind. Da starke Oberflächenabflüsse durch Niederschläge mit hohen Intensitäten entstehen, wird nicht zwischen den Entstehungsursachen der Niederschläge unterschieden.

Besonders bei Kaltfronten dürfte sich allerdings ein ähnliches Bild in der Ganglinie wie bei konvektiven Niederschlägen zeigen. Grund dafür ist, dass es bei einer Kaltfront ebenfalls zu starken Vertikalbewegungen in der Atmosphäre kommen kann und dadurch nicht selten Gewitter auftreten [Zilch et al., 2012].

3.1.2 Wetterstationen der ZAMG

Bei den 8 betrachteten Wetterstationen handelt es sich um: Linz (8 Ereignisse), Freistadt (8 Ereignisse), Gmunden (5 Ereignisse), Bad Zell (6 Ereignisse), Enns (5 Ereignisse), Hörsching (4 Ereignisse), Bad Ischl (9 Ereignisse), Wels (7 Ereignisse).

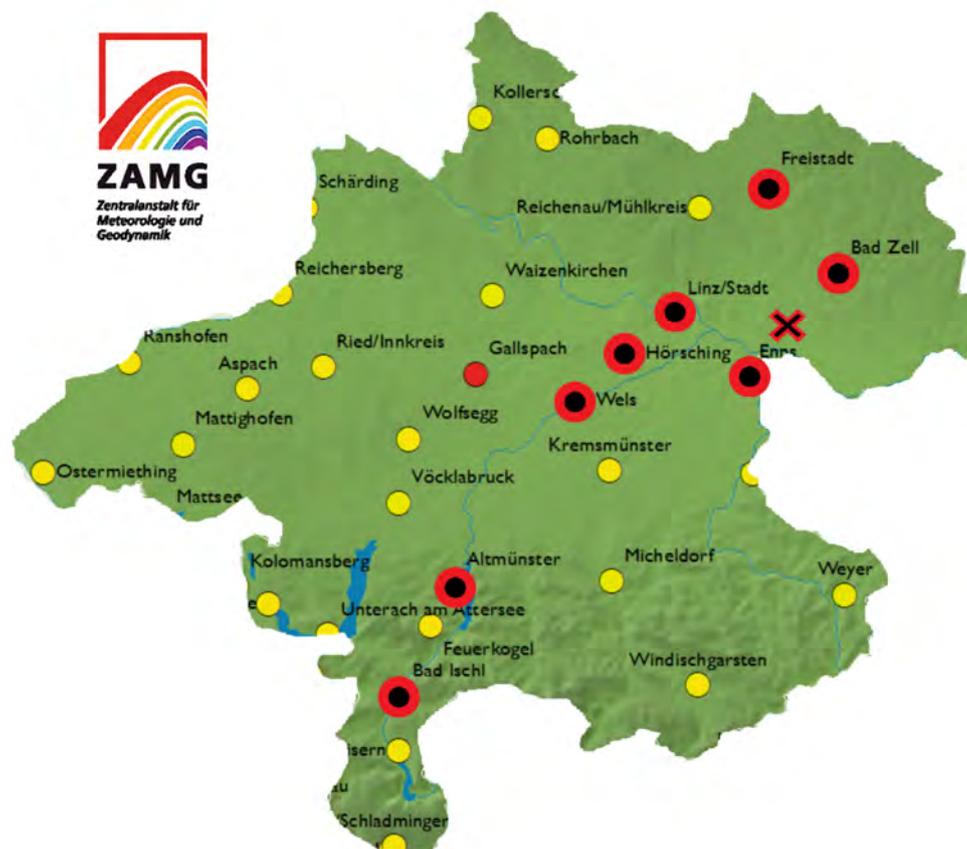


Abbildung 3.1 Bei den roten Kreisen mit schwarzer Füllung handelt es sich um die betrachteten Wetterstationen: Linz, Freistadt, Gmunden, Bad Zell, Enns, Hörsching, Bad Ischl, Wels; Das rote Kreuz markiert das Pilotgebiet Schwertberg [ZAMG, o.J.]

Insgesamt wurden 52 Starkniederschläge analysiert. Die 8 betrachteten Wetterstationen sind durch Ihre Lage und Topographie sowie damit einhergehende Wettersituationen für Oberösterreich charakteristisch. Bad Ischl und Gmunden (Altmünster) wurden auf Grundlage der topographischen Lage der Wetterstationen im bergigen Terrain ausgewählt. Die Stationen (Linz, Freistadt, Bad Zell, Enns, Hörsching, Wels) befinden sich in flacheren Gefilden und wurden aufgrund der Nähe zum Untersuchungsgebiet Schwertberg gewählt. Die betrachteten Wetterstationen mit deren aufgezeichneten Niederschlagsintensitäten sind deshalb als repräsentativ für das betrachtete Einzugsgebiet in Schwertberg zu werten.

3.2 Starkregenauswertung

Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation der Verteilung von Starkniederschlagsganglinien auf Basis von Extremereignissen von ausgewählten oberösterreichischen Wetterstationen der ZAMG [ZAMG, o.j.]. Natürliche Niederschlagsereignisse weisen mannigfaltigste Verlaufsformen auf und werden häufig anhand ihrer Niederschlagsverläufe nach dem zeitlichen Auftreten ihres Intensitätsmaximums in anfangs-, mittel- und endbetonte Niederschläge sowie Blockregen eingeteilt [Kohl, 2011]. Da die Kurvenbetontheit der Niederschlagsganglinie in erster Linie von der Wahl des Start- und Endpunktes des Ereignisses abhängt, ist deren Definition besonders wichtig. Gerade bei länger andauernden Niederschlagsereignissen stellt sich die Frage nach der Wahl des Start- und Endpunktes des Ereignisses, zumal Beginn und Ende der Ereignisdaten beliebige Werte vergleichbarer Zeitpunkte sind.

Es wurden hier einmal das gesamte Ereignis (Start: ab erstem Einsetzen von Regen, Ende: so, dass mindestens 2 min kein Regen fällt und danach nur noch zeitweise Niederschlag an der Messgrenze von 0,1 mm auftritt) und einmal der Beginn und das Ende bei einer erstmaligen Überschreitung bzw. letztmaligen Unterschreitung einer Intensität von 0,2 mm/min gewählt. Die Intensität von 0,2 mm/min wurde nach dem Kriterium für Starkregen des DWD gewählt, das besagt, dass 10 mm/h die Grenze für Starkregen ist. Das entspricht einer Intensität von $\geq 0,16$ mm/min, gerundet auf die Messgenauigkeit der Daten entspricht das $\geq 0,2$ mm/min.

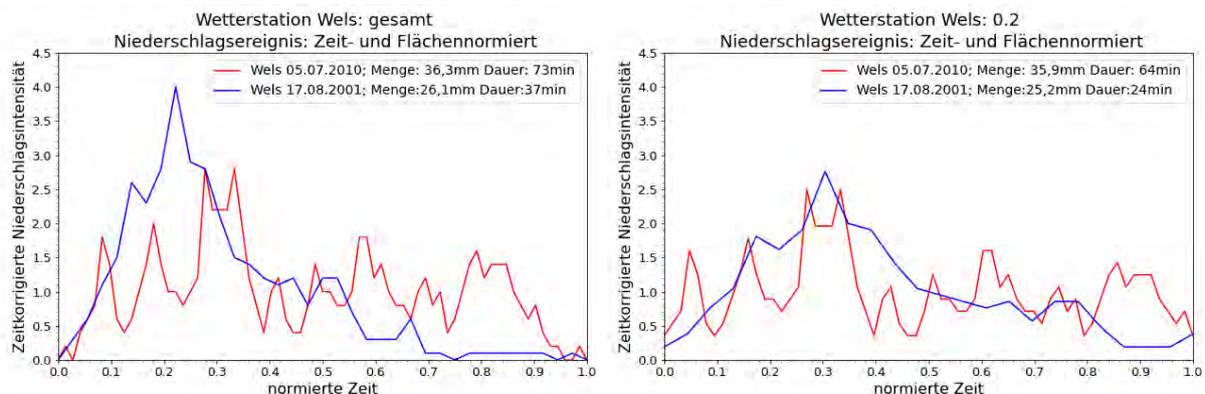


Abbildung 3.2 Wels: Die Abbildungen zeigen die Ganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts) (Beginn und Ende des Ereignisses wird bei einer erstmaligen Überschreitung bzw. letztmaligen Unterschreitung einer Intensität von 0,2 mm/min gewählt.)

Durch die Betrachtung der gesamten Ereignisdauer sowie der beschnittenen Ereignisse mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min wird die Abhängigkeit der Niederschlagsverteilung durch die Wahl des Start- und Endpunktes des Ereignisses untersucht. Durch die Betrachtung der Ereignisse mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min wird gewährleistet die Zeitspanne der Niederschlagsereignisse zu betrachten, die per Definition Starkregenereignisse darstellen. Des Weiteren wird es den Niederschlagsganglinien durch die Beschneidung geringer Anfangs- und Endintensitäten erschwert eine anfangs- bzw. endbetonte Kurven-

ausprägung anzunehmen. Auf Grund dessen ermöglicht die Betrachtung der gesamten Ereignisse in Verbindung mit den adaptierten Ereignissen mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min ein unverfälschtes Bild auf die tatsächliche Verteilung der Niederschlagsganglinien und ermöglicht dadurch die Bestimmung der einzelnen Niederschlagsereignisse nach ihrer Kurvenbetontheit: anfang- mitten oder endbetont.

Die nachfolgenden Unterkapiteln beschreiben die Transformation der Rohdaten und die dadurch gewährleistete einheitliche Analyse der Niederschlagsganglinien.

3.2.1 Rohdaten Niederschlagsverteilung

Auf Grund der Tatsache, dass die betrachteten Starkregenereignisse ihrer Natur entsprechend unterschiedliche Dauern sowie Niederschlagssummen aufweisen, ist es für die Vergleichbarkeit und die Entwicklung einer Normganglinie notwendig die einzelnen Ereignisse zu transformieren.

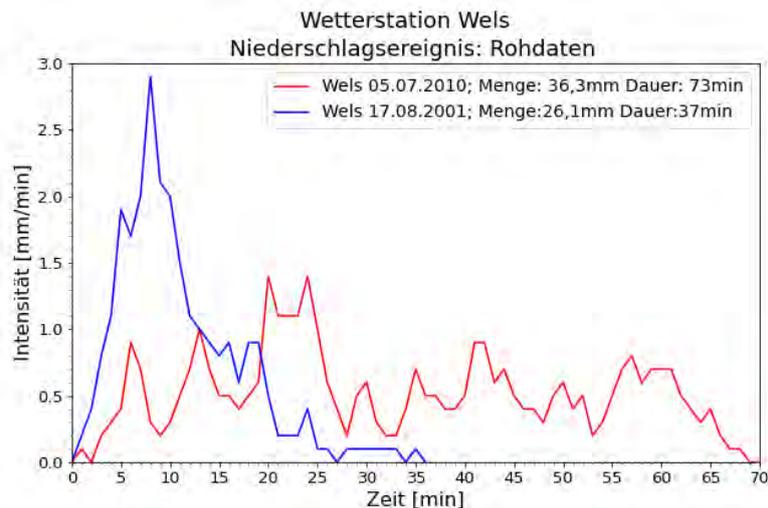


Abbildung 3.3 Rohdaten für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels

3.2.2 Normierung der Zeit

Um die zeitliche Variabilität der Niederschlagsintensität unabhängig von der Dauer der einzelnen Ereignisse vergleichen zu können, wurde eine zeitliche Normierung durchgeführt. Dazu wurden bei den einzelnen Ereignissen alle Zeitwerte durch die Gesamtdauer des Ereignisses dividiert. Danach haben alle Ereignisse die gleiche Dauer von 1 (jedoch unterschiedlich viele Zeitschritte). Dadurch kann festgestellt werden, wann im Mittel die höchste Niederschlagsintensität unabhängig des (beliebigen) Aufzeichnungsstartpunktes und -endpunktes der einzelnen Niederschlagsereignisse auftritt.

$$D = t_1 - t_0 \quad (3.1)$$

$$\text{Zeitnormierung (x - Achse)} : \frac{t}{(t_1 - t_0)} = \frac{t}{D} = t' \quad (3.2)$$

D = Dauer [min]; t = Zeit [min]; t_1 = Ereignisende [min]; t_0 = Ereignisbeginn [min]; t' = normierte Zeit [-]

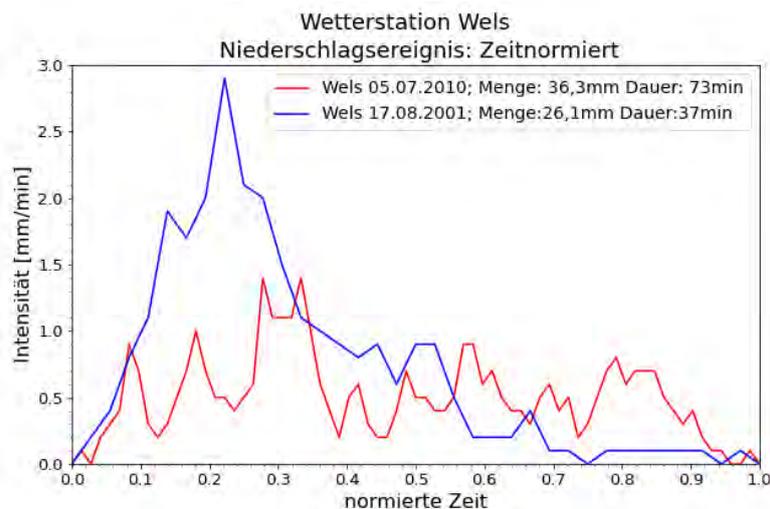


Abbildung 3.4 Normierung der Ereignisdauer für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels

3.2.3 Normierung der Fläche

Aufgrund der zeitlichen Normierung entspricht die Fläche unter den einzelnen Niederschlagskurven der durchschnittlichen Niederschlagsmenge geteilt durch die durchschnittliche Dauer des betrachteten Niederschlagsereignisses. Um die Intensitätsverteilung der Niederschlagsereignisse unabhängig von der Niederschlagssumme der Einzelnen Ereignisse vergleichen zu können, wurde eine Normierung der Fläche durchgeführt. Grund dafür ist, dass die Flächen unter den Kurven nicht dieselben sind. Für die Flächennormierung wurden die einzelnen Intensitäten eines Niederschlagsereignisses durch die Niederschlagssumme in Abhängigkeit der Ereignisdauer dividiert. Damit ergeben die Integrale unter den einzelnen Niederschlagsganglinien jeweils die gleiche Fläche von 1.

$$\text{Flächennormierung (y - Achse)} : \frac{P}{(\sum P \div D)} = P' \quad (3.3)$$

P = Niederschlagsintensität [mm/min]; t = Zeit [min]; t_1 = normiertes Ereignisende [-]; t_0 = normierter Ereignisbeginn [-]; P' = Zeitkorrigierte Niederschlagsintensität [-]

$$\int_{t_0}^{t_1} P dt = \sum P \quad (3.4)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{P}{(\sum P \div D)} dt = 1 \quad (3.5)$$

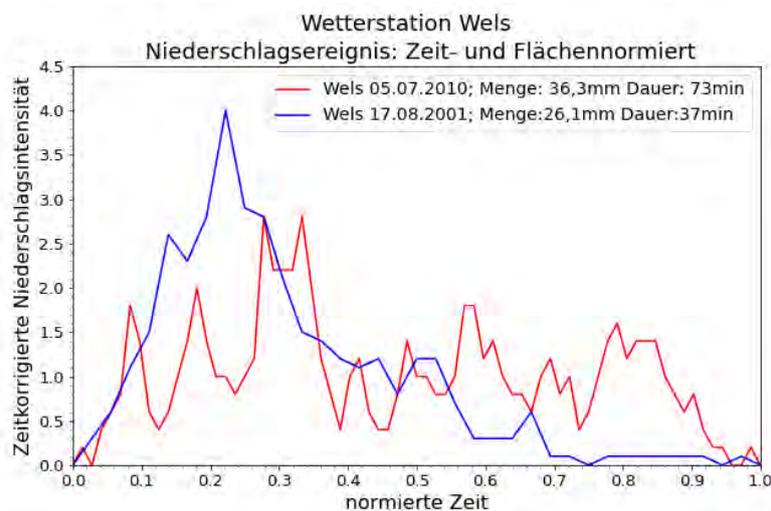


Abbildung 3.5 Normierung der Fläche unter der Niederschlagskurve für zwei Niederschlagsereignisse der Wetterstation Wels

3.3 Normganglinie

Der nachstehende Abschnitt befasst sich mit der Erläuterung der angewandten Methoden zur Entwicklung der Normganglinie. Unter der Bezeichnung Normganglinie wird in dieser Arbeit eine Niederschlagsganglinie verstanden, welche es erlaubt, beliebige Niederschlagssummen wie zum Beispiel die der Bemessungsniederschläge einer zeitlichen qualitativen Intensitätsverteilung zuzuführen. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Normganglinie basiert auf der Analyse von realen Starkregenereignissen (siehe Kapitel 3.1.1).

Die Intensitätsverteilungen der einzelnen Ereignisse wurden, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, einer Transformation durch eine Normierung der Ereignisdauer und der Gesamtniederschlagsmenge je Ereignis unterzogen, um eine Vergleichbarkeit und Kategorisierung der Form der Verteilung (anfangs- mitten- endbetont) herzustellen.

Das Kriterium für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse in dieser Arbeit ist, dass 50 % der Niederschlagssumme im ersten Drittel der Ereignisdauer gefallen sein müssen, um als anfangsbetontes Niederschlagsereignis gewertet zu werden. Mit anderen Worten müssen 50 % des Niederschlags vor der 0,33 fachen Dauer des Ereignisses gefallen sein. Dieses Kriterium ergibt des Weiteren, dass die maximale Intensität der anfangsbetonten Ereignisse im ersten Drittel der Ereignisdauer liegen. Auf der Grundlage des für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse angewendeten Kriteriums werden in dieser Arbeit Ereignisse bei denen 50 % des Niederschlags zwischen dem 0,33 bis 0,66 fachen der Dauer gefallen sind als mittenbetonte Ereignisse gewertet. Dementsprechend gelten Ereignisse bei denen 50 % des Niederschlags nach dem 0,66 fachen der Dauer erreicht werden als endbetonte Ereignisse.

Kriterium für anfangs- mitten und endbetonte Niederschlagsereignisse:

- Anfangsbetonte Niederschlagsereignisse: 50 % der Niederschlagssumme fallen bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer.
- Mittenbetonte Niederschlagsereignisse: 50 % der Niederschlagssumme fallen zwischen der 0,33 bis 0,66 fachen Ereignisdauer.
- Endbetonte Niederschlagsereignisse: 50 % der Niederschlagssumme fallen nach der 0,66 fachen Ereignisdauer.

Auf eine nähere Untersuchung der mitten- und endbetonten Niederschlagsereignisse wurde in dieser Arbeit verzichtet, da anhand der Untersuchungen der gesamten Niederschlagsereignisse eine deutliche Anfangsbetonung festgestellt werden konnte. Das Hauptaugenmerk wurde stattdessen auf die anfangsbetonten Niederschlagsereignisse gelegt und auf deren Grundlage eine Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsverteilungen entwickelt.

Das Kriterium, dass 50 % des Niederschlags vor der 0,33 fachen Dauer des Ereignisses fallen müssen, hat sich bei einem Vergleich mit anderen Kriterien wie z.B. der Flächenschwerpunkt oder die Beschreibung der Verteilung anhand der Schiefe als am aussagekräftigsten erwiesen. Auf Grund der häufig auftretenden Anfangsbetontheit und einer gegen Ende hin langsam abnehmenden Niederschlagsintensität kommt es bei der Anwendung des Flächenschwerpunkts sowie bei der Schiefe zu einer verfälschten Beschreibung der Niederschlagsverteilung.

3.3.1 Gumbel-Verteilung (Extremwertverteilung Typ 1)

Die auf der Grundlage des beschriebenen Kriteriums als anfangsbetonte Niederschlagsereignisse identifizierten Intensitätsverteilungen, wurden in weiterer Folge anhand einer Extremwertverteilung, der Gumbel-Verteilung, beschrieben und daraus die Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) entwickelt.

Bei der Gumbelverteilung handelt es sich um eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche zu den Extremwertverteilungen vom Typ 1 mit zwei Parametern (β, μ) gehört. β stellt hierbei den Maßstabsparameter dar, welcher die Ausprägung bzw. Höhe der maximalen Intensität auf der Y-Achse beschreibt. μ beschreibt die Lage des Peaks auf der X-Achse und wird daher als Lageparameter bezeichnet.

Gumbel-Verteilung

Dichtefunktion:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{1}{\beta} \cdot (x-\mu)} e^{-e^{-\frac{1}{\beta} \cdot (x-\mu)}} \quad (3.6)$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta} \cdot (x-\mu)}} \quad (3.7)$$

β = Maßstabsparameter , μ = Lageparameter

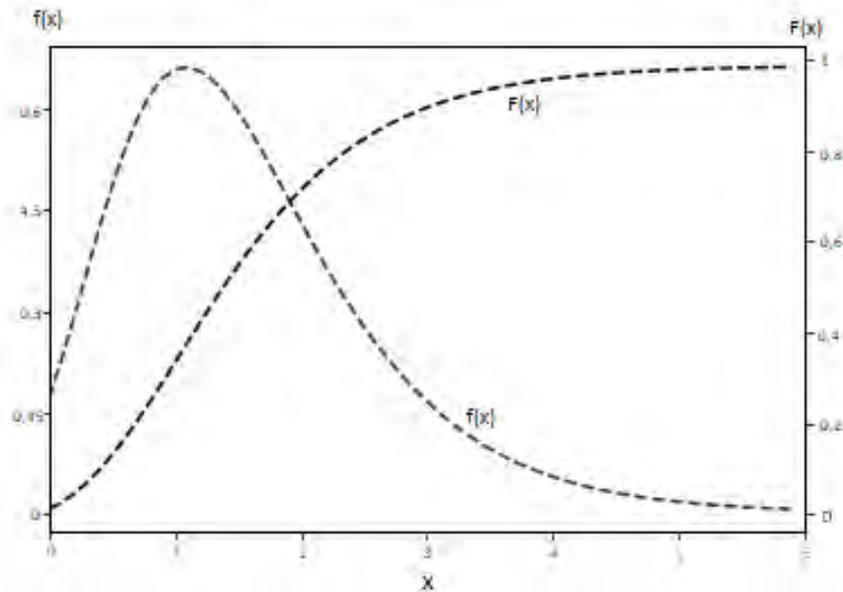


Abbildung 3.6 Die Gumbelverteilung ist zweiparametrig, doppelt exponentiell, asymmetrisch mit einer festen Schiefe und rechtsseitig unbegrenzt [Nachtnebel, 2007]

Charakteristika Gumbel-Verteilung [Nachtnebel, 2007]

- 2-parametrig
- doppelt exponentiell
- asymmetrisch mit fester Schiefe
- Parameter μ = Lageparameter
- Parameter β = Maßstabsparameter
- linksseitig bei 0 begrenzt
- rechtsseitig unbegrenzt

Als Anwendungsbereich der Gumbel-Verteilung wird explizit die Auswertung von Niederschlägen vorgegebener Dauer angeführt [Nachtnebel, 2007]. Auf Grund dessen wird die Gumbel-Verteilung für die in dieser Arbeit durchgeführte Entwicklung einer Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse herangezogen. Wie in Kapitel 3.13 bereits erläutert werden in dieser Arbeit alle jene Niederschlagsereignisse als anfangsbetont gewertet, bei denen 50 % des Niederschlags vor der 0,33 fachen Dauer des Ereignisses gefallen sind. Die dadurch identifizierten Niederschlagsereignisse werden mit einer Kurvenanpassung mittels Gumbel-Verteilung gefittet. Bei der Gumbel-Verteilung handelt es sich um eine zwei-parametrig Funktion mit den Parametern β und μ , die bei der Kurvenanpassung als variabel definiert wurden und mit der Methode der kleinsten Quadrate

(Abstandsquadrate) ermittelt wurden. Dabei wird die Summe der quadratischen Differenzen zwischen den beobachteten und den prognostizierten Werten der zugrunde gelegten Funktion minimiert [Kneip, o.j.].

Die Kurvenanpassung auf der Grundlage der Gumbel-Verteilung unter der Anwendung der kleinsten Abstandsquadrate gibt Aufschluss über die Funktionsterme β und μ . Die dadurch ermittelten Größen β und μ beschreiben nun auf Grundlage der gegebenen Funktion die bestmögliche Anpassung an die Datenpunkte der betrachteten anfangsbetonten Niederschlagsereignisse. Betrachtet man die Fläche unter der gesamten Dichtefunktion, also deren Integral von $-\infty$ bis $+\infty$, so ergibt diese 1. Da es sich bei der Gumbel-Verteilung um eine linksseitig bei 0 begrenzte Funktion handelt und des weiteren zur Entwicklung der Normganglinie die Dichtefunktion rechtsseitig mit 1 begrenzt wurde, kommt es zu Abweichungen der Fläche unter der Kurve von 1.

Um der Abweichung der Fläche von 1 Rechnung zu tragen wurde die durch die Kurvenanpassung ermittelte Dichtefunktion durch ihre Fläche unter der Kurve dividiert und dadurch nochmals flächennormiert. Die daraus erhaltene Kurve weist das Integral unter der Kurve von 1 auf und stellt die entwickelte Normganglinie da. Diese Normganglinie kann nun auf beliebige Niederschlagssummen vorgegebener Dauer, wie zum Beispiel die der Bemessungsniederschläge, angewendet werden und ergibt so eine quantitative zeitliche Intensitätsverteilung.

3.3.2 Auswertung der einzelnen Wetterstationen

In weiterer Folge werden für 4 charakteristische Wetterstationen die einzelnen Niederschlagsereignisse dargestellt. Die ebenfalls in die weitere Auswertung eingegangenen, im Anschluss jedoch nicht näher erläuterten weiteren Wetterstationen, befinden sich im Anhang. Für die anschließend betrachteten Wetterstationen werden die zeit- und flächennormierten Intensitätsganglinien anhand des Kriteriums, bis wann 50 % des Niederschlags während des Ereignis gefallen sind, untersucht.

Auswertung Wetterstation Wels

Die Auswertung der Wetterstation in Wels umfasst 7 Starkregenereignisse. Die Ereignisse wurden zwischen 2001 und 2018 aufgezeichnet. Alle gemessenen Starkregenereignisse wurden dabei im Sommerhalbjahr zwischen Juni und August verzeichnet.

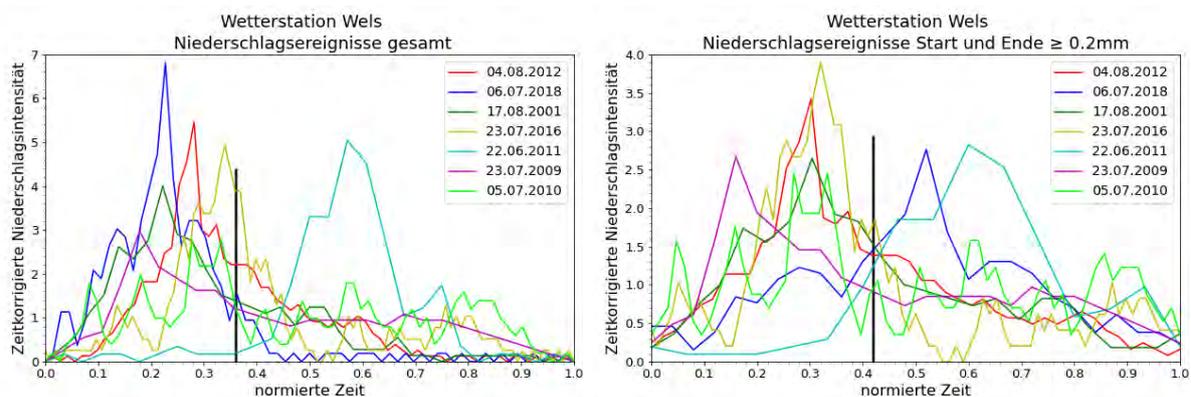


Abbildung 3.7 Wels: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 3.1 Wels: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Wels gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
04.08.2012	72	54,6	0,32	4,20
06.07.2018	67	34,9	0,23	3,60
17.08.2001	37	26,1	0,27	2,90
23.07.2016	104	39,7	0,35	1,90
22.06.2011	29	16,1	0,57	2,90
23.07.2009	29	20,7	0,36	2,20
05.07.2010	73	36,3	0,42	1,40
gesamte Ereignisse gemittelt			0,36	

Wels Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
04.08.2012	44	52,8	0,36	4,20
06.07.2018	26	32,6	0,50	3,60
17.08.2001	24	25,2	0,37	2,90
23.07.2016	79	38,0	0,34	1,90
22.06.2011	16	15,4	0,60	2,90
23.07.2009	26	20,6	0,36	2,20
05.07.2010	64	35,9	0,43	1,40
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,42	

Niederschlagsereignisse gesamt

Anhand dem in dieser Arbeit angewendeten Kriterium sind 3 der Niederschlagsereignisse bei den betrachteten gesamten Niederschlagsereignissen anfangsbetont (43 %). 4 der Starkregenereignisse weisen eine mittenbetonte Ganglinie auf (57 %). Keines der betrachteten Ereignisse ist endbetont. Auf der Grundlage des angewendeten Kriteriums ist die Gesamtheit der in Wels analysierten Starkregenereignisse mittenbetont wobei eine klare Tendenz Richtung Anfangsbetontheit zu erkennen ist. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,36 fachen Ereignisdauer.

Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min

Bei den Ereignissen Start und Ende $\geq 0,2$ mm werden der Beginn und das Ende des Ereignisses bei einer erstmaligen Überschreitung bzw. letztmaligen Unterschreitung einer Intensität von 0,2 mm/min gewählt. Den beschnittenen Ereignissen ist es auf Grund der Eliminierung geringerer Intensitäten erschwert eine anfangsbetonte Intensitätsverlauf anzunehmen. Das äußert sich darin, dass auf Grundlage des angewendeten Kriteriums keines der in Wels betrachteten Ereignisse eine Anfangsbetontheit aufweist. Die Verschiebung

von den Intensitätsverläufen in Richtung Mittenbetontheit ist durch die Tatsache gegeben, dass alle der 7 Starkregenereignisse die Hälfte der Niederschlagssumme zwischen dem 0,33 bis 0,66 fachen der Ereignisdauer aufweisen. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,42 fachen Dauer der Ereignisse. Das Faktum, dass die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min die Hälfte der Niederschlagssumme bis zur 0,42 fachen der Ereignisdauer aufweisen, zeigt dennoch die Tendenz zur Anfangsbetontheit als zu einer endbetonten Niederschlagsverteilung.

Auswertung Wetterstation Bad Ischl

Die Auswertung der Wetterstation in Bad Ischl umfasst 9 Starkregenereignisse. Die Ereignisse wurden zwischen 2009 und 2016 aufgezeichnet. Alle gemessenen Starkregenereignisse wurden dabei im Sommerhalbjahr zwischen Mai und August verzeichnet.

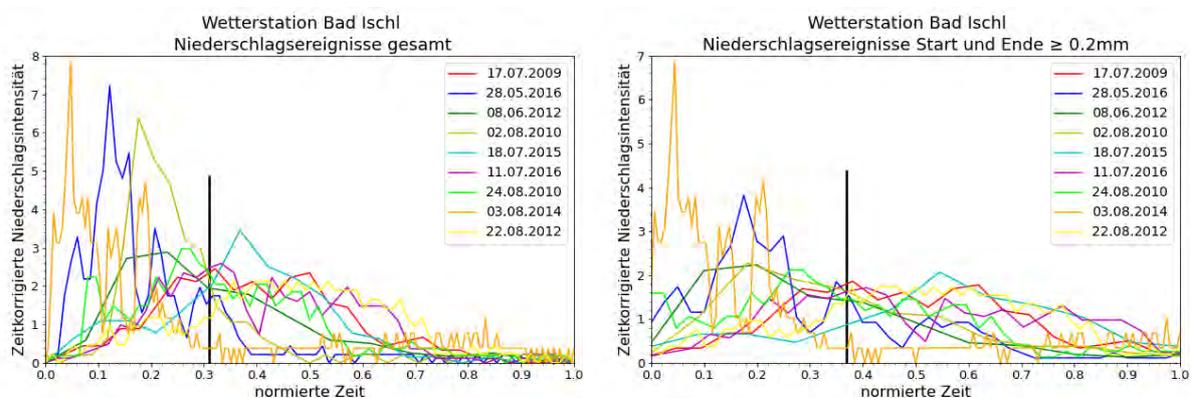


Abbildung 3.8 Bad Ischl: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 3.2 Bad Ischl: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Bad Ischl gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
17.07.2009	29	25,1	0,39	2,2
28.05.2016	83	37,5	0,16	3,3
08.06.2012	14	15,3	0,30	3,4
02.08.2010	35	16,0	0,24	3,0
18.07.2015	20	12,1	0,39	2,2
11.07.2016	43	34,0	0,38	2,1
24.08.2010	63	33,3	0,32	1,6
03.08.2014	186	47,2	0,16	2,0
22.08.2012	74	30,9	0,46	0,9
gesamte Ereignisse gemittelt			0,31	

Bad Ischl Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
17.07.2009	22	24,8	0,47	2,2
28.05.2016	41	34,6	0,24	3,3
08.06.2012	11	15,2	0,28	3,4
02.08.2010	12	14,5	0,34	3,0
18.07.2015	12	11,7	0,55	2,2
11.07.2016	28	33,1	0,47	2,1
24.08.2010	43	33,7	0,34	1,6
03.08.2014	157	45,3	0,16	2,0
22.08.2012	59	30,1	0,51	0,9
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,37	

Niederschlagsereignisse gesamt

Auf der Grundlage des angewendeten Kriteriums sind 5 der Niederschlagsereignisse anfangsbetont (56 %). 4 der Starkregenereignisse weisen eine mittenbetonte (44 %) Ganglinie auf. Keines der betrachteten Ereignisse weist eine endbetonte Niederschlagsganglinie auf. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,31 fachen Ereignisdauer. Dadurch ist die Gesamtheit der in Bad Ischl ausgewerteten Starkregenereignisse anfangsbetont.

Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min

Die beschnittenen Ereignisse mit einer Grenze von Start und Ende bei 0,2 mm/min erschweren wie bereits erwähnt das Erreichen von anfangsbetonten Niederschlagsganglinien. 3 der insgesamt 9 Starkregenereignisse in Bad Ischl weisen dennoch eine Anfangsbetontheit (33 %) auf. Unter den verschärften Bedingungen sind 6 der Ereignisse als mittenbetont (66 %) zu werten. Es ist abermals eine klare Verschiebung in Richtung Mittenbetontheit zu verzeichnen. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,37 fachen Ereignisdauer. Im Mittel sind die Ereignisse in Bad Ischl auf der Grundlage der 0,2 mm/min Grenze somit mittenbetont. Die Hälfte der Niederschlagssumme fällt jedoch deutlich vor dem 0,5 fachen der Ereignisdauer, wodurch ebenfalls eine Neigung zur Anfangsbetontheit zu erkennen ist.

Auswertung Wetterstation Freistadt

Die Auswertung der Wetterstation in Freistadt umfasst 8 Starkregenereignisse. Die aufgezeichneten Ereignisse fanden zwischen 1998 und 2012 statt. Alle aufgezeichneten Ereignisse wurden dabei im Sommerhalbjahr in den Monaten Juli und August verzeichnet. Auf Grundlage der Abbildung 3.9 zeigt sich eine klare Abgrenzung der einzelnen Ganglinien in anfangsbetont und mittenbetont mit Tendenz zur Endbetontheit.

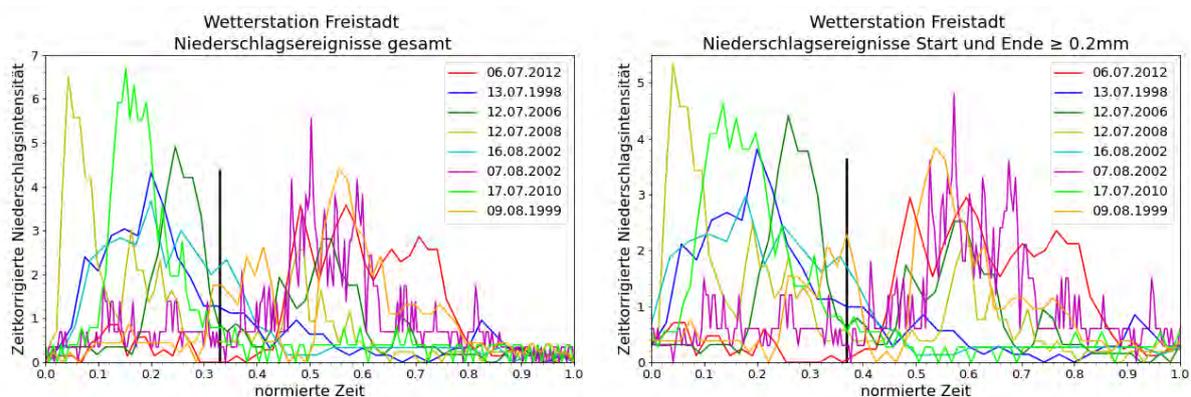


Abbildung 3.9 Freistadt: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 3.3 Freistadt: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Freistadt gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
06.07.2012	59	40,6	0,58	2,50
13.07.1998	41	25,0	0,23	2,70
12.07.2006	62	34,8	0,33	2,80
12.07.2008	93	39,6	0,18	2,80
16.08.2002	36	21,0	0,25	2,20
07.08.2002	291	83,6	0,51	1,60
17.07.2010	132	33,2	0,20	1,70
09.08.1999	64	28,7	0,55	2,00
gesamte Ereignisse gemittelt			0,35	

Freistadt Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
06.07.2012	48	39,9	0,61	2,50
13.07.1998	36	24,8	0,23	2,70
12.07.2006	55	34,3	0,34	2,80
12.07.2008	74	38,3	0,21	2,80
16.08.2002	29	20,7	0,24	2,20
07.08.2002	242	80,1	0,58	1,60
17.07.2010	82	29,7	0,20	1,70
09.08.1999	55	28,2	0,54	2,00
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,37	

Niederschlagsereignisse gesamt

5 der in Freistadt betrachteten Starkregenereignisse weisen einen deutlichen anfangsbetonten (62 %) Intensitätsverlauf auf. 3 der Starkregenereignisse weisen eine mittenbetonte Ganglinie auf (38 %), wobei bei die Hälfte des gefallenen Niederschlags nach der 0,5 fachen Dauer des Ereignisses erreicht wird. Bei allen 3 mittenbetonten Ereignissen lässt sich hierdurch eine schwache Tendenz zur Endbetontheit feststellen. Keines der betrachteten Ereignisse weist eine endbetonte Niederschlagsganglinie auf. Im Mittel fallen 50 % der Niederschlagssumme in der 0,35 fachen Ereignisdauer. Auf der Grundlage der angewendeten Grenze für anfangs-, mitten-, und endbetonte Intensitätsverläufe ist die Summe der gemittelten Ereignisse als mittenbetont mit einer klaren Tendenz zur anfangsbetontheit zu werten.

Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min

Die Anzahl an anfangsbetonten Ganglinien der beschnittenen Ereignisse in Freistadt mit einer Grenze von Start und Ende bei 0,2 mm/min beträgt 4 (50 %). Bei den 4 anfangsbetonten Ereignisse wird die Hälfte der Niederschlagssumme zwischen dem 0,20 und 0,24 fachen der Dauer erreicht, wodurch eine ausgeprägte Anfangsbetontheit zu verzeichnen ist. Bei den restlichen 4 Niederschlagsereignissen in Freistadt handelt es sich um mittenbetonte (50 %) Intensitätsverteilungen. Unter den verschärften Bedingungen der $\geq 0,2$ mm/min Grenze fallen im Mittel 50 % des Niederschlags in der 0,37 fachen Ereignisdauer. Auf der Grundlage des gewählten Kriteriums ist von einer Mittenbetontheit auszugehen, die jedoch eine klare Tendenz zur Anfangsbetontheit zeigt.

Auswertung Wetterstation Gmunden

Die Auswertung der Wetterstation in Gmunden umfasst 5 Starkregenereignisse. Die Ereignisse wurden zwischen 2009 und 2014 aufgezeichnet. Alle gemessenen Starkregenereignisse wurden dabei im Sommerhalbjahr zwischen Juni und August verzeichnet. Bei

einem Betrachten der Abbildung 3.10 ist die Mittenbetontheit aller Starkregenereignisganglinien auffallend. Eine mögliche Erklärung für diese einmalig unter den betrachteten Wetterstationen vorkommende Ausprägung ist die Geographischelage der Wetterstation in Altmünster an Traunsee (Station läuft unter der Ortsbezeichnung Gmunden bei der ZAMG.). Die Wetterstation befindet sich am Westufer des Traunsees in unmittelbarer Nähe zu hügeligem/bergigem Gebiet. Von einer Einflussnahme der lokalen Begebenheiten aus Topographie und Seenähe auf die Intensitätsverteilung erscheint durchaus plausibel.

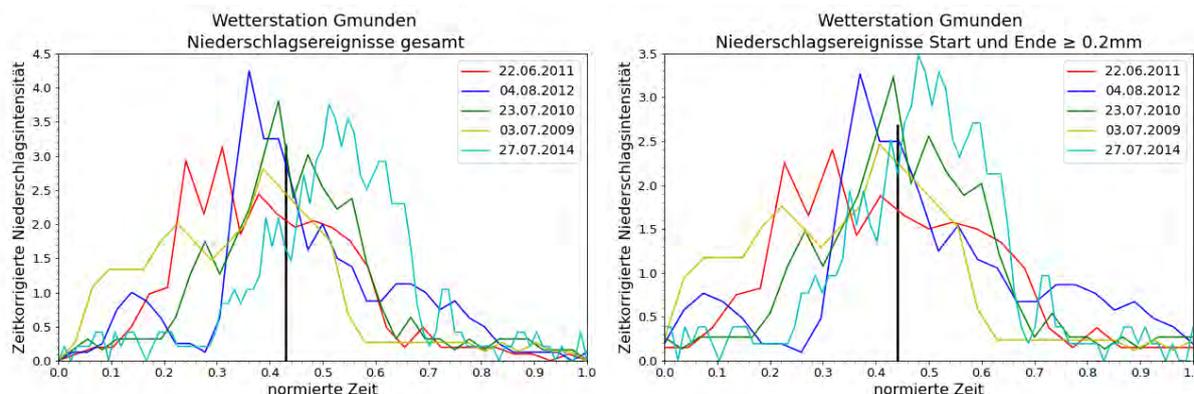


Abbildung 3.10 Gmunden: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 3.4 Gmunden: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Gmunden gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
22.06.2011	30	29,7	0,39	3,20
04.08.2012	37	28,8	0,43	3,40
23.07.2010	37	22,7	0,44	2,40
03.07.2009	32	23,2	0,37	2,10
27.07.2014	85	40,2	0,53	1,80
gesamte Ereignisse gemittelt			0,43	

Gmunden Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
22.06.2011	23	29,3	0,41	3,20
04.08.2012	28	28,1	0,45	3,40
23.07.2010	31	22,3	0,45	2,40
03.07.2009	28	23,0	0,38	2,10
27.07.2014	78	39,8	0,50	1,80
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,44	

Niederschlagsereignisse gesamt

Auf der Grundlage des angewendeten Kriteriums ist keines der in Gmunden untersuchten Ereignisse anfangsbetont. Alle 5 Niederschlagsganglinien weisen eine mittenbetonte (100 %) Ganglinie auf. Des Weiteren besitzt keines der betrachteten Ereignisse eine endbetonte Niederschlagsganglinie. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,43 fachen Ereignisdauer. Die Gesamtheit der in Gmunden ausgewerteten Starkregenereignisse ist eindeutig mittenbetont.

Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min

Die Unterschiede in der Intensitätsverteilung zwischen Gmunden gesamt und Gmunden Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min sind gering. Bei den beschnittenen Ereignissen handelt es sich ebenfalls ausschließlich um mittenbetonte (100 %) Starkregenereignisse. Es treten keine anfangs-, bzw. endbetonte Verteilungen auf. Im Mittel fallen 50 % des Niederschlags in der 0,44 fachen Ereignisdauer. Im Mittel sind die Ereignisse in Gmunden auf der Grundlage der 0,2 mm/min Grenze somit rein mittenbetont.

FAZIT

Auf Grundlage der durchgeführten Auswertung anhand der angewendeten Kriteriumsgrenzen für anfangs-, mitten-, und endbetonte Intensitätsverläufe lassen sich folgende Aussagen tätigen:

- 46 % der Niederschlagsereignisse gesamt erreichen 50 % der Niederschlagssumme vor der 0,33 fachen Ereignisdauer.
- 23 % der Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min erreichen 50 % der Niederschlagssumme vor der 0,33 fachen Ereignisdauer.
- 54 % der Niederschlagsereignisse gesamt erreichen 50 % der Niederschlagssumme zwischen der 0,33 bis 0,66 fachen Ereignisdauer.
- 77 % der Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min erreichen 50 % der Niederschlagssumme zwischen der 0,33 bis 0,66 fachen Ereignisdauer.
- 75 % der mittenbetonten Niederschlagsereignisse gesamt erreichen 50 % der Niederschlagssumme zwischen der 0,33 bis 0,5 fachen Ereignisdauer.
- 78 % der mittenbetonten Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min erreichen 50 % der Niederschlagssumme zwischen der 0,33 bis 0,5 fachen Ereignisdauer.
- Keines der insgesamt 52 ausgewerteten Ereignisse erreicht die 50 % der Niederschlagssumme im letzten Drittel der Ereignisdauer.
- 87 % der Niederschlagsereignisse gesamt erreichen 50 % der Niederschlagssumme vor der Hälfte der Ereignisdauer.
- 79 % der Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min erreichen 50 % der Niederschlagssumme vor der Hälfte der Ereignisdauer.

Die gewählten Intervalle für anfangsbetont ($\leq 0,33$), mittenbetont ($0,33 - 0,66$) und endbetont ($\geq 0,66$) erwiesen sich als sehr harte Grenzen. Eine etwas weitere Wahl der Intervallgrenzen für anfangs- und endbetonte Ereignisse und gleichzeitig ein engeres Intervall für mittenbetonte Ereignisse wäre möglicherweise sinnvoll, würde jedoch das auf Grundlage der durchgeführten Auswertung erhaltene Gesamtbild nicht verändern, wodurch man sich für das Beibehalten der Grenzen entschieden hat. Ergänzend sei jedoch noch angemerkt, dass viele der Ereignisse aufgrund der frei gewählten Grenzen unter die Kategorie der mittenbetonten Niederschlagsverläufe fallen, jedoch dennoch in ihrem Verlauf die maximale Intensitätsspitze sowie die Hälfte der Niederschlagssumme vor der Halben Ereignisdauer aufweisen und dadurch ebenfalls einem anfangsbetonten Intensitätsverlauf folgen.

Die Auswertungen der Niederschlagsereignisse gesamt zeigen, dass die Hälfte der Niederschlagssumme bei 87 % der Ereignisse vor der halben Ereignisdauer erreicht wird. Des Weiteren weisen 71 % der Ereignisse 50 % der Niederschlagssumme vor der 0,4 fachen Ereignisdauer auf. Das angewandte Kriterium, das anfangsbetonte Niederschläge 50 % der Niederschlagssumme vor dem 0,33 fachen der Ereignisdauer besitzen wird noch von 46 % der betrachteten Niederschlagsereignisse erfüllt. Die Erkenntnisse welche auf Grundlage der durchgeführten Auswertungen gewonnen werden konnten, sind sehr eindeutig und zeigt, dass Intensitätsverläufe von Starkregenereignissen im Mittel einer eindeutigen Anfangsbetontheit unterliegen.

Wie bereits eingangs erwähnt, sind die Auswertungen der restlichen Wetterstationen im Anhang siehe (Kapitel 6) der Arbeit einzusehen.

3.3.3 Auswertung der anfangsbetonten Niederschlagsdaten

Der nachstehende Abschnitt befasst sich mit der näheren Auswertung der anfangsbetonten Niederschlagsganglinien aller Wetterstationen auf der Grundlage der in Kapitel 3.3.2 identifizierten anfangsbetonten Niederschlagsereignisse gesamt. Die in den Kapiteln 3.3.2 und 3.13 bereits ausführlich erläuterte Definition von dem in dieser Arbeit angewendetem Kriterium von anfangsbetonten Niederschlagsereignissen, wonach 50 % der Niederschlagssumme bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer fallen müssen, wurde ebenfalls der nachstehende Analyse der Niederschlagsereignisse gesamt zugrunde gelegt. Die beschnittenen Ereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min müssen um eine Vergleichbarkeit der Niederschlagsauswertung zu ermöglichen das Kriterium der anfangsbetonten Intensitätsverteilung nicht erfüllen. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten die selben Ereignisse der Auswertung zugrunde gelegt werden. Die Niederschlagsereignisse gesamt erfüllen dabei das angewendete Kriterium, welches durch die Beschneidung der Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min nicht mehr von allen Ereignissen erfüllt wird.

Das hart gewählte Kriterium für die Niederschlagsereignisse gesamt bei dem, wie bereits mehrfach erläutert, die Hälfte der Niederschlagssumme im ersten Drittel der Ereignisdauer gefallen sein muss, erfüllt des Weiteren die Maxime, dass die maximale Niederschlagsintensität (Peak) bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer stattgefunden hat. Das harte Kriterium, welches sich durch die Wahl eines engen Intervalls von $\leq 0,33$ ergibt, erscheint jedoch für die weitere Auswertung bzw. die Beschreibung eines standardisierten anfangsbetonten Intensitätsverlaufs (Normganglinie) durchaus zweckmäßig und sinnvoll.

Anfangsbetonte Niederschlagsereignisse aller Wetterstationen

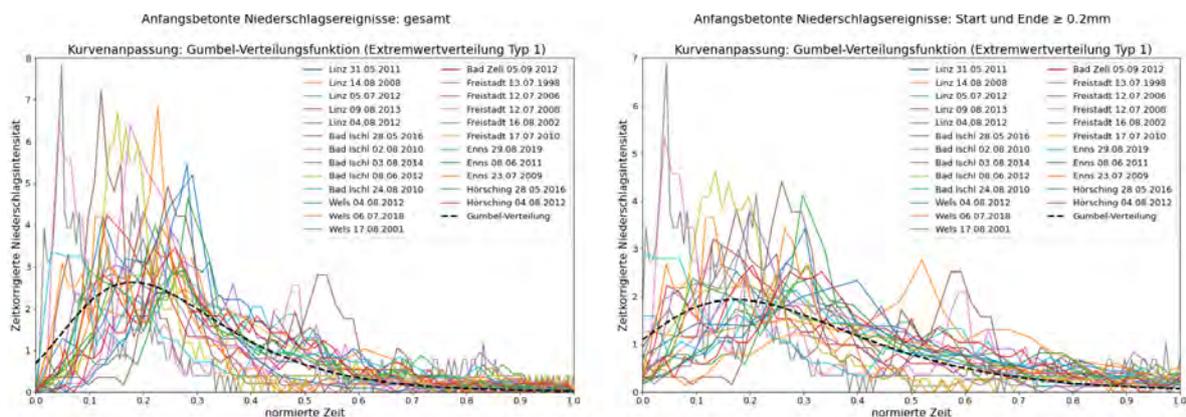


Abbildung 3.11 Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten anfangsbetonten Niederschlagsganglinien (50 % der Niederschlagssumme fallen bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer) sowie die Kurvenanpassung (Gumbel-Verteilung) für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei $0,2$ mm/min (rechts)

Abbildung 3.11 zeigt die Niederschlagsereignisse aller Wetterstationen die auf der Basis der Niederschlagsereignisse gesamt das Kriterium der Anfangsbetontheit erfüllen. Von den insgesamt 52 ausgewerteten Ereignissen sind 24 Ereignisse (46 %) anfangsbetont (Linz 5, Bad Ischl 5, Wels 3, Bad Zell 1, Freistadt 5, Enns 3 und Hörsching 2 Ereignisse). Anhand dieser Ereignisse wurde eine Kurvenanpassung mittels Gumbel-Verteilung durchgeführt, wodurch die Maßstabsparameter (β) und der Lageparameter (μ) bestimmt wurden. Die Kurvenanpassung wurde mittels Methode der kleinsten Abstandsquadrate durchgeführt. Der Verlauf der gefitteten Funktion ist der Abbildung 3.11 als schwarz gestrichelte Linie zu entnehmen und beschreibt den mittleren anfangsbetonten Intensitätsverlauf aus der Natur.

Funktionen der durchgeführten Kurvenanpassung aus Abbildung 3.11

anfangsbetonte Niederschlagsereignisse gesamt (**anf.N.ges.**):

$$f_{anf.N.ges.}(x) = \frac{1}{0,140} e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)}} \quad (3.8)$$

Maßstabsparameter = $\beta = 0,140$

Lageparameter = $\mu = 0,181$

anfangsbetonte Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min (**anf.N.0,2**):

$$f_{anf.N.0,2}(x) = \frac{1}{0,190} e^{-\left(\frac{x-0,173}{0,190}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,173}{0,190}\right)}} \quad (3.9)$$

Maßstabsparameter = $\beta = 0,190$

Lageparameter = $\mu = 0,173$

Bei einem Vergleich der Maßstabsparameter (β) der Niederschlagsereignisse gesamt (anf.N.ges.) ($\beta = 0,14$) und der Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min (anf.N.0,2) ($\beta = 0,19$) aus den Kurvenanpassungen wird der niedrigere Wert der anf.N.ges. im Vergleich zur anf.N.0,2 ersichtlich, was sich wie der Abbildung 3.12 zu entnehmen ist in einer höheren maximalen Intensität widerspiegelt. Durch die Lage der Maßstabszahl (β) im Nenner der Funktion ist der Peak der Verteilung umso höher je kleiner die Maßstabszahl ausfällt. Generell lässt sich der höhere Peak der Gumbel-Verteilung gesamt gegenüber der Gumbel-Verteilung Start und Ende $\geq 0,2$ mm dadurch Begründen, dass sich durch die Beschneidung der anf.N.0,2 Ereignisse ein flacherer bzw. breiterer Verlauf der Ganglinie einstellt. Der flachere und breitere Verlauf der Gumbel-Verteilung bzw. aller anf.N.0,2 Ereignisse im Vergleich zu den anf.N.ges. Ereignissen ergibt sich aufgrund

der Tatsache, dass Niederschlagsganglinien typischerweise einen Verlauf aufweisen der in Richtung Ereignisende langsam mit geringen Intensitäten ausläuft. Dadurch wird bei einer Beschneidung der Ereignisse, eine verhältnismäßig große Zeitspanne im Verhältnis zur Ereignisdauer, jedoch mit einem geringen Niederschlagsanteil an der Niederschlagssumme des Ereignisses abgeschnitten. Auf Grund der durchgeführten Normierung der Zeit werden die Ereignisse mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min im Vergleich zu den Niederschlagsereignissen gesamt dadurch mehr in die Länge gezogen, wodurch sich der flachere Verlauf der Intensitätsverteilungen ergibt und sich bei der Kurvenanpassung in einer geringeren Ausprägung des Peaks widerspiegelt. Mit anderen Worten kommt es durch das vorne und hinten Abschneiden von geringen Intensitäten zu einer breiteren Intensitätsverteilung und damit zu einem schwächer ausgeprägten Maximum.

Der Lageparameter μ beschreibt die Lage des Peaks auf der X-Achse. Bei einem Vergleich der Lageparameter (μ) der Niederschlagsereignisse gesamt (anf.N.ges.) ($\mu = 0,18$) und der Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min (anf.N.0,2) ($\mu = 0,17$) wird der etwas früher eintretende Peak der Gumbel-Verteilung Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min deutlich (siehe Abbildung 3.12).

Durch die Beschneidung geringer Intensitäten, um dadurch über die gesamte Ereignisdauer das Starkregenkriterium ($\geq 0,2$ mm/min) zu erfüllen, wird die Ausprägung anfangsbetonter Niederschlagsganglinien erschwert. Die Gründe für das frühere Erreichen des Peaks der anf.N.0,2 im Gegensatz zur anf.N.ges. erfordert noch weitere Untersuchungen. Die Form sowie die Ausprägung des Peaks der Gumbel-Verteilung anf.N.0,2 die, wie bereits erläutert, nicht dem Kriterium der Anfangsbetontheit (50 % der Niederschlagssumme fallen bis zu der 0,33 fachen Ereignisdauer) unterliegen muss zeigt jedoch ebenfalls eine klare Anfangsbetontheit der analysierten Niederschlagsverteilungen.

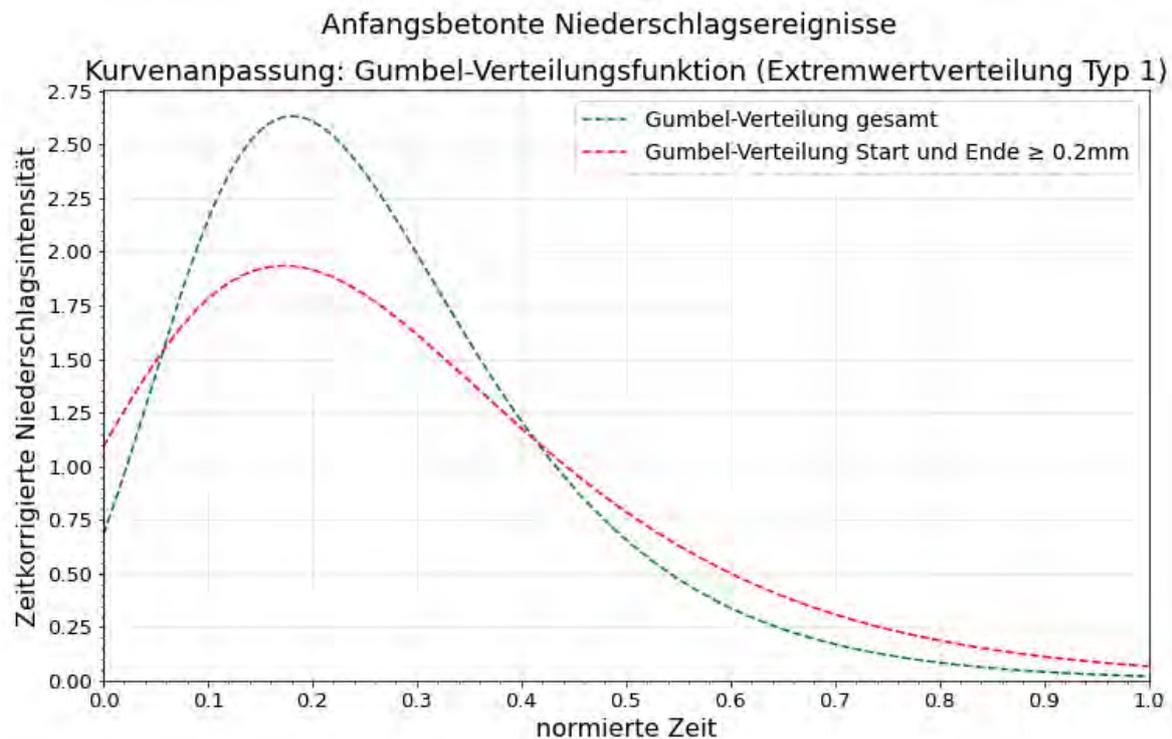


Abbildung 3.12 Vergleich der Kurvenanpassungen mittels Gumbel-Verteilung, anfangsbetonte Niederschlagsereignisse gesamt (anf.N.ges.) [Grün], anfangsbetonte Niederschlagsereignisse Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min (anf.N.0,2) [Rot].

Fläche unter der durchgeführten Kurvenanpassung 3.12

Nachfolgend wird auf die Fläche unter den entwickelten Verteilungsfunktionen eingegangen. Grundsätzlich ergibt das Flächenintegral bei einer gesamten Betrachtung der Gumbel-Verteilung von $-\infty$ bis $+\infty$ 1. Die Abweichungen der Flächen unter den Kurven von 1 ergeben sich, wie bereits in Kapitel 3.3.1 erläutert durch die beidseitige Begrenzungen der Funktionen (linksseitig bei 0 und rechtsseitig bei 1).

Das Integral von **anf.N.ges.:**

$$\int_0^1 \frac{e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)}}}{0,140} dx = 0,971 \quad (3.10)$$

Das Integral von **anf.N.0,2:**

$$\int_0^1 \frac{e^{-\left(\frac{x-0,173}{0,190}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,173}{0,190}\right)}}}{0,190} dx = 0,904 \quad (3.11)$$

Wie dem Flächenintegral 3.10 und 3.11 zu entnehmen ist beträgt die Fläche unter der

Kurve anf.N.ges. 0,971 und die Fläche unter der Kurve anf.N.0,2 entspricht 0,904. Die Abweichungen von 1 sind daher marginal. Dennoch ist ein geringere Flächenabweichung von 1 der anf.N.ges. Ereignisse mit einer Abweichung von 0,03 gegenüber der anf.N.0,2 Ereignisse mit einer Abweichung von 0,1 erkennbar.

3.3.4 Entwicklung der Normganglinie

Der nachfolgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Erläuterung und Ergebnisbeschreibung der entwickelten Normganglinie (Norm.anf.N.ges.) für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse. Auf Grund der in Kapitel 3.3.3 aufgezeigten geringeren Abweichung des Kurvenintegrals von 1 der Niederschlagsereignisse gesamt (anf.N.ges.) sowie einem Kurvenverlauf ,der, wie die Auswertungen zeigen, die in der Natur auftretenden Intensitätsverläufen besser beschreibt, wird die weitere Auswertung bzw. die Entwicklung der Normganglinie auf Grundlage der Gumbel-Verteilung gesamt basierend auf den anfangsbetonten Niederschlagsereignissen gesamt (anf.N.ges.) durchgeführt.

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben beträgt das Flächenintegral der anf.N.ges. 0,97 und weicht dadurch geringfügig um 0,03 von 1 ab. Für die Anwendung der Normganglinie auf beliebige Niederschlagssummen ist es jedoch notwendig, dass die Gumbel-Verteilung eine Fläche von 1 besitzt. Deshalb wird der Abweichung der Fläche von 1 dahingehend Rechnung getragen, dass die durch die Kurvenanpassung ermittelte Dichtefunktion durch ihre Fläche unter der Kurve dividiert wird und dadurch nochmals einer Flächennormierung unterzogen wird. Die daraus erhaltene Kurve weist das Integral unter der Kurve von 1 auf und stellt die entwickelte Normganglinie dar.

Flächenstandardisierte Gumbel-Verteilung

$$f(x) = c \cdot \frac{1}{\beta} e^{-\frac{1}{\beta} \cdot (x-\mu)} e^{-e^{-\frac{1}{\beta} \cdot (x-\mu)}} \quad (3.12)$$

$$c = \frac{1}{A_{anf.N.ges.}} = \frac{1}{0,971} = 1,030 \quad (3.13)$$

β = Maßstabsparameter , μ = Lageparameter, c = Vorfaktor, $A_{anf.N.ges.}$ = Fläche unter der Kurve anfangsbetonte Niederschlagsereignisse gesamt

Für die nochmalige Flächennormierung wurde ein Vorfaktor c eingeführt. Dieser ist der Funktion vorangestellt und multipliziert die durch einsetzen der normierten Zeitschritte (x-Werte) erhaltenen Funktionswerte (y-Werte), wodurch das Integral der Fläche unter der Kurve 1 ergibt. Mit anderen Worten wird die durch die Kurvenanpassung erhaltene Verteilung anf.N.ges. (siehe Abbildung 3.12) nochmals durch ihre Fläche unter der Kurve

dividiert und nimmt dadurch eine Fläche unter der Kurve von 1 an.

Normganglinie (Norm.anf.N.ges.):

$$f_{Norm.anf.N.ges.}(x) = 1,02991 \cdot \frac{e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)}}}{0,140} \quad (3.14)$$

Maßstabsparameter = $\beta = 0,140$

Lageparameter = $\mu = 0,181$

Vorfaktor = $c = 1,030$

Wie bereits erläutert weist die Verteilungsfunktion nach Gumbel aufgrund der durchgeführten Flächennormierung die Fläche unter der Kurve von 1 auf. Es kann somit von einer standardisierten Verteilung gesprochen werden bei der es sich um die in dieser Arbeit entwickelte Normganglinie für anfangsbetonte Niederschläge handelt.

Das Integral der Normganglinie (Norm.anf.N.ges.):

$$\int_0^1 \frac{1}{0,971} \cdot \frac{e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-0,181}{0,140}\right)}}}{0,140} dx = 1 \quad (3.15)$$

Die nachstehende Abbildung 3.13 zeigt die standardisierte Gumbel-Funktion fort an als Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) bezeichnet. Charakteristika der Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) sind:

- Das Flächenintegral der Funktion ist gleich 1 (flächennormiert).
- Die X-Achse der normierten Zeit geht von 0 bis 1 (zeitnormiert).

Auf Grund dessen ist es möglich mithilfe der entwickelten Normganglinie jegliche Niederschlagssummen vorgegebener Dauer anhand einer zeitlichen Intensitätsverteilung beruhend auf realen Starkniederschlagsereignissen zu beschreiben.

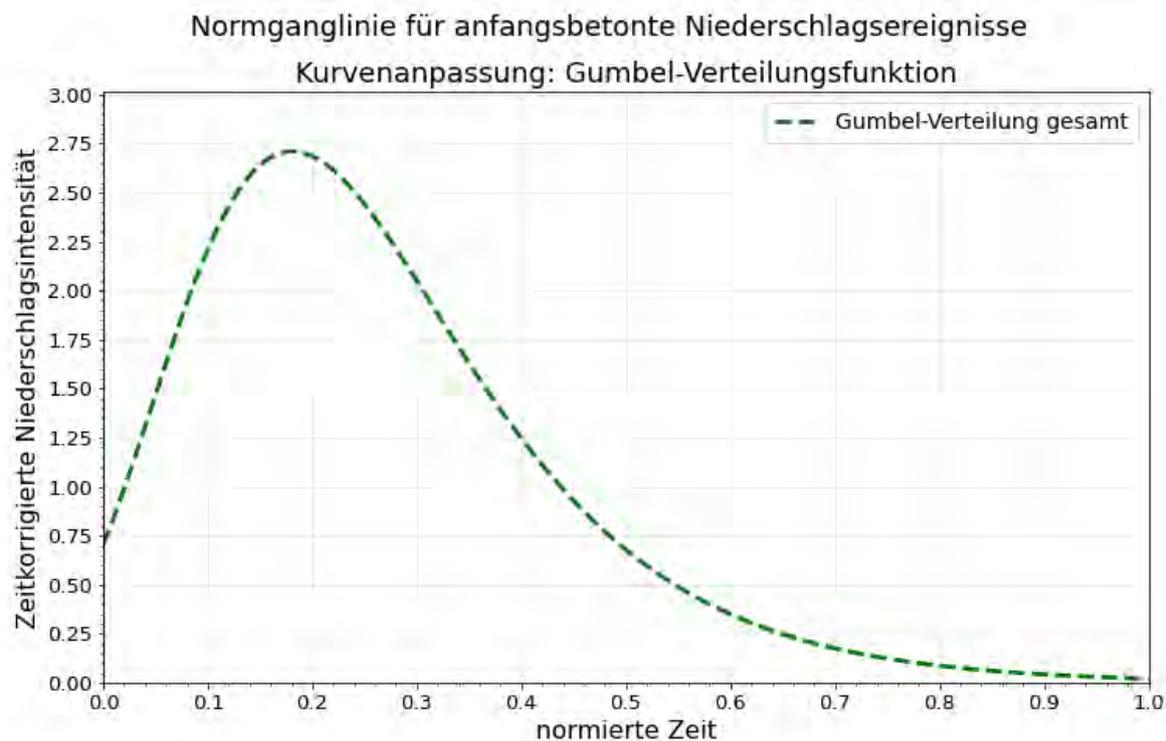


Abbildung 3.13 Normganglinie (Norm.anf.N.ges.): Die Abbildung zeigt die standardisierte (flächenkorrigierte) Gumbel-Verteilung mit der Fläche unter der Kurve von 1

Anwendung der Normganglinie (Norm.anf.N.ges.)

Die nachstehenden Grafiken zeigen die Anwendung der Normganglinie anhand von zwei Bemessungsniederschlägen. Die linke Grafik beschreibt ein Ereignis der Wiederkehrzeit von 100 Jahren und einer Dauer von 60 Minuten mit einer Niederschlagssumme von 48,9 mm. Die rechte Grafik beschreibt die Intensitätsverteilung eines Bemessungsniederschlags mit der Wiederkehrzeit von 30 Jahren und 30 Minuten und mit einer Niederschlagssumme von 32,7 mm. Bei beiden Ereignissen handelt es sich um Bemessungsniederschläge aus Schwertberg in Oberösterreich. Angesichts der durchgeführten Flächennormierung, wodurch das Integral unter der standardisierten Gumbel-Verteilung 1 ergibt und der umgesetzten Normalisierung der Ereignisdauer von 0 bis 1 (Zeitnormierung), können beliebige Bemessungsniederschläge mit ihrer ausgewiesenen Niederschlagssumme und Niederschlagsdauer einer anfangsbetonten Intensitätsverteilung zugeführt werden. Dabei werden die minütigen Intensitäten ($\frac{\text{Niederschlagssumme}}{\text{Niederschlagsdauer}}$) mit den zeitkorrigierten Niederschlagsintensitäten (Y-Achse) der Normganglinie multipliziert. Wichtig dabei ist, dass die Niederschlagssumme des Bemessungsniederschlags sowie dessen Dauer gleich bleibt. Die entwickelte Funktion weist durch ihren Kurvenverlauf dem jeweils betrachteten Bemessungsniederschlag lediglich einen charakteristischen anfangsbetonten Intensitätsverlauf zu. Das Ergebnis sind anfangsbetonte Niederschlagsganglinien mit der Ereignisdauer in Minuten auf der X-Achse und der Regenintensität in Millimeter pro Minute auf der Y-Achse. Da die entwickelte Normganglinie auf der Auswertung von in der Realität gemessenen

Starkniederschlagsereignissen basiert entspricht der Intensitätsverlauf der an Bemessungsniederschlägen angewendeten Normganglinie einem möglichen in der Natur auftretenden Starkregenereignis, bei dem es je nach Standortgegebenheiten zu Hangwasserabflüssen kommen kann.

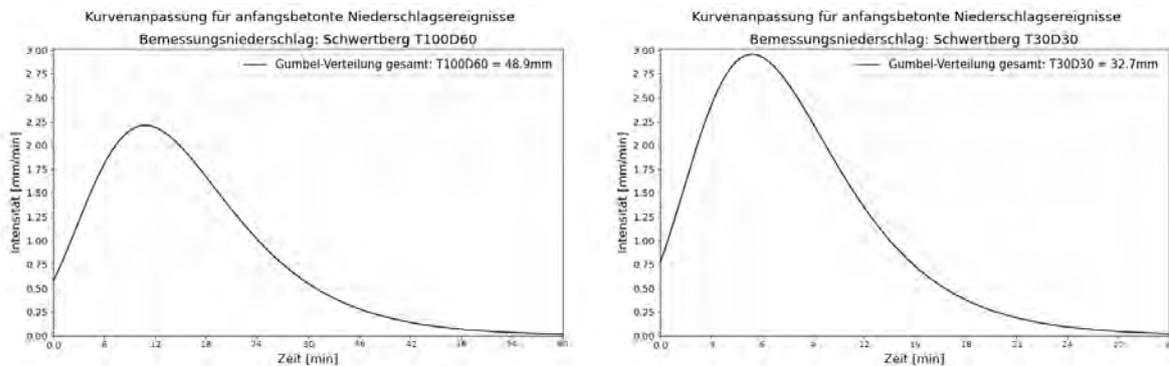


Abbildung 3.14 Die Abbildungen zeigen die Anwendung der Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) für ein T100D60 Ereignis (links) und für ein T30D30 Ereignis (rechts) auf der Grundlage von Bemessungsniederschlägen

Bei einem näheren Betrachten der Abbildung 3.14 fällt die höhere maximale Intensität der Niederschlagsverteilung des T30D30 Ereignisses im Vergleich zum T100D60 auf. Die maximale Intensität der Normganglinie für ein T100D60 Ereignis ($\sum N = 48,9$ mm) beträgt 2,2 mm/min und wird 10 min nach Ereignisbeginn erreicht. Das T30D30 Ereignis weist eine maximale Intensität von 2,9 mm/min nach 5 min ab Ereignisbeginn auf. Diese Ausprägungen der Ganglinien sind auf die ausgewiesenen Niederschlagssummen der Bemessungsregen zurückzuführen. Trotz der doppelt so langen Ereignisdauer des 100 jährlichen 60-minütigen Ereignisses gegenüber dem 30 jährlichen 30-minütigen Ereignis ist die Niederschlagssumme keinesfalls doppelt so groß. Das T100D60 Starkregenereignis weist eine Niederschlagssumme von 48,9 mm auf wobei das T30D30 eine Niederschlagssumme von 32,7 mm besitzt. Das T30D30 Ereignis ist dadurch lediglich um 16,2 mm geringer als das T100D60 Ereignis bei der halben Ereignisdauer. Auf Grund dessen ergibt sich bei dem T30D30 Ereignis die extreme Ausprägung der Niederschlagsspitze mit einer maximalen Intensität von nahezu 3 mm/min.

Vergleich der entwickelten Normganglinie mit Verteilungsfunktionen aus der Literatur

Der nachstehende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Vergleich der maximalen Intensitäten sowie deren zeitliches Auftreten der in Kapitel 2.5 im Detail beschriebenen Umrechnungsfunktionen für beliebige Niederschlagssummen aus der Literatur und der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Normganglinie (siehe Kapitel 3.13).

Die nachstehende Tabelle 3.5 zeigt eine Gegenüberstellung der maximalen Intensitäten und deren zeitliches Auftreten nach Niederschlagsbeginn von 3 aus der Literatur stammenden Anwendungen der Berechnung von zeitlich Verteilten Intensitätsganglinien und der entwickelten anfangsbetonten Normganglinie basierend auf realen Starkniederschlagsauswertungen. Die Tabelle zeigt die Anwendung der Umrechnungsfunktionen auf Grundlage eines 100 jährlichen 60-minütigen (T100D60) und einem 30 jährlichen 30-minütigen (T30D30) Ereignis. Die angewendete Niederschlagssumme ist bei allen Niederschlagsfunktionen die selbe wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander gewährleistet ist.

Bedeutung der in der Tabelle angeführten Abkürzungen:

- IAN: Institut für Alpine Naturgefahren (IAN) der BOKU
- DVWK: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DVWK-Empfehlung (DVWK-Regel 113/1984))
- GEO7: Geowissenschaftliches Büro geo7 AG (Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz)
- Norm.anf.N.ges.: Normganglinie anfangsbetonter Niederschlagsereignis gesamt

	T100D60		T30D30	
	max. Int.	Zeit	max. Int.	Zeit
IAN	2,4	7	3,2	4
DVWK	2	bis 12	2,7	bis 6
GEO7	1,8	10-15	2,5	5-7,5
Norm.anf.N.ges.	2,2	10	2,9	5

Tabelle 3.5 Vergleich der entwickelten Normganglinie mit Verteilungsfunktionen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.5); max. Int. = maximale Intensität [mm/min], Zeit bei Erreichen der maximalen Intensität [min]

Bei einem Vergleich der 3 beschriebenen Umrechnungsmöglichkeiten von Ereignissen bestimmter Niederschlagssummen und Dauer in eine anfangsbetonte Intensitätsverteilung fallen zunächst die ähnlichen maximalen Intensitäten sowie ein gutes Übereinstimmen der maximalen Niederschlagsintensität im Ereignisverlauf auf. Bei einem Vergleich der entwickelten Normganglinie für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse (Norm.anf.N.ges.) mit Verteilungsfunktionen aus der Literatur werden ähnliche Kurvenverläufe sowie ähnliche maximale Intensitäten erreicht. Dennoch kommt es zu geringen Abweichungen wonach die Verteilungsfunktion des Instituts für Alpine Naturgefahren (IAN) die höchste maximale Intensität und das früheste Auftreten des Spitzenniederschlags sowohl für das Ereignis T100D60 und T30D30 aufweist. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Normganglinie (Norm.anf.N.ges.) zeigt eine etwas geringere maximale Intensität als die des IAN, jedoch eine höhere maximale Intensität als die Verteilungskurve des DVWK und der GEO7. Das zeitliche Erreichen der maximalen Intensität der Normganglinie tritt ebenfalls nach der IAN, jedoch vor der DVWK und GEO7 Verteilung auf. Der Umrechnungsansatz des DVWK für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse liegt mit seinem maximalen Niederschlag zwischen der Verteilungsfunktion der Normganglinie (Norm.anf.N.ges.) und der Verteilungsfunktion des IAN. Ebenso verhält es sich mit dem Zeitpunkt des Eintretens der maximalen Niederschlagsintensität. Die Verteilungsfunktion der GEO7 zeigt die geringste maximale Intensität sowie das späteste Erreichen des maximalen Niederschlags sowohl beim T100D60 wie auch beim T30D30 Ereignis.

3.4 Niederschlags-Abfluss-Modellierung

Für die Simulation von pluvialen Überflutungen wird in der vorliegenden Arbeit das rasterbasierte 2d hydraulische Modell JFlow verwendet (entwickelt von JBA Consulting, UK). In den nachstehenden Kapiteln werden die grundlegenden Eingangsparameter sowie deren Anwendung und Umsetzung im Niederschlags-Abfluss-Modell erläutert. Auf Grund der bereits mehrfachen Betroffenheit durch Überflutungen aus Starkregenereignissen wurde das Einzugsgebiet in Schwertberg für die Anwendung der in Kapitel 3.13 vorgestellten Normganglinie und deren Vergleich mit einem Niederschlagsereignis konstanter Intensität (Blockregen) gleicher Niederschlagssumme gewählt.

3.4.1 Gebietsabgrenzung

Die auftretenden Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt sind die Folge von Regenereignissen, die innerhalb einer Wasserscheidenlinie stattfinden, die die Punkte des Interesses begrenzt. Das Gebiet innerhalb einer Wasserscheidenlinie definiert ein Einzugsgebiet (EZG) und kann ebenfalls als Entwässerungsgebiet oder Abflussgebiet bezeichnet werden. Ein Einzugsgebiet umfasst somit jene Fläche, die alle Niederschläge und daraus entstehenden Abflüsse in ein Fließgewässer ableitet und am Einzugsgebietsauslass das Einzugsgebiet gesammelt verlässt. Das durch den Einzugsgebietsauslass fließende Wasservolumen resultiert dadurch zur Gänze aus der dieser Stelle zuzuordnenden Einzugsgebietsfläche [Baumgartner und Liebscher, 1996].

Grundsätzlich liegen die Einzugsgebiete in Österreich in den Größenordnungen von einigen Quadratkilometern bis einige wenige 10 km², die größten EZG in Oberösterreich sind ca. 20 km². Bei einer Analyse des am Umweltbundesamt aufliegenden Datensatzes mit ausgewiesenen Detailsinzugsgebieten zeigt sich, dass die mittlere Größe von in Oberösterreich gelegenen Einzugsgebieten ca. 2 km² ist. Das betrachtete Einzugsgebiet für das Politgebiet Schwertberg besitzt eine Fläche von ca. 2,2 km² und liegt somit im oberösterreichischen Durchschnitt.

Der in der vorliegenden Arbeit im Pilotgebiet Schwertberg angewendete Bemessungsniederschlag stellt einen Punktniederschlag dar, der an jedem beliebigen Ort des Gitterpunktbereichs (ca. 6 x 6 km) auftreten kann [Kohl, 2011]. Es stellt sich die Frage ob die der Arbeit zugrunde gelegten Annahme, nämlich dass das betrachtete Einzugsgebiet Schwertberg vollständig und homogen beregnet wird, als legitim zu werten ist.

Für Bemessungsfragen in Wildbacheinzugsgebieten, bei denen ebenfalls der Fokus bei der Hangwassersimulation liegt, werden Starkregen kurzer Dauer mit vorwiegend konvek-

vem Ursprung herangezogen [Kohl, 2011]. Da diese Starkregenereignisse typischerweise sehr lokal auftreten und dadurch eine geringe räumliche Ausbreitung aufweisen, stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit einer Niederschlagsabminderung, sollte eine Niederschlagszelle in ihrer Ausdehnung nicht das gesamte Einzugsgebiet vollständig und homogen beregnen. Grundsätzlich gilt, dass Punktniederschläge, um einen repräsentativen Gebietsniederschlagswert zu erhalten, abgemindert werden müssen [BMLFUW, 2006]. Überspannt ein zu betrachtendes Einzugsgebiet jedoch mehrere Gitterpunkte, ist ein flächengewichteter Mittelwert berechenbar. Dieser hat wiederum als Punktwert Gültigkeit an jedem beliebigen Ort des Einzugsgebietes [Kohl, 2011].

Für die räumliche Reduktion von Gebietsniederschlagswerten (Bemessungsniederschlägen) gibt es zwei Möglichkeiten [Kohl, 2011]:

- Die Gesamtfläche wird homogen mit einem abgeminderten Niederschlag beaufschlagt.
- Die Beaufschlagung erfolgt flächendifferenziert, ausgehend von einem Regenzentrum wird der Niederschlag zum Rand der Niederschlagszelle hin sukzessive verringert.

Der Abminderungsfaktor (ARF) des Niederschlagsinputs in das Niederschlags-Abfluss-Modell variiert dabei zwischen 0 und 1 und ist im wesentlichen von der Niederschlagshöhe, der Niederschlagsdauer und der Gebietsfläche abhängig [Weilguni, 2009]. Ein Vergleich von Kohl 2011 zu den in der Fachliteratur veröffentlichten Abminderungswerten zeigt eine geringe Übereinstimmung mit den Messdaten der Abminderungsfaktoren für kurze Dauerstufen (<60 min) von Starkniederschlägen. Für längere Dauerstufen (>12 Stunden) nähern sich die Abminderungsfunktionen deutlich an [Kohl, 2011], wobei Ereignisse dieser Dauer keine Relevanz für die Starkregensimulation besitzen. Eine ebenfalls von Kohl 2011 durchgeführte Analyse von einem für Österreich flächenmäßig repräsentativen Einzugsgebiet von 4 km² zeigt die Abminderung nach Lorenz und Skoda [Lorenz und Skoda, 2001b] von 4 % und eine Abminderung nach Blöschl [Blöschl, 2009] um 11 %. [Kohl, 2011]

Für eine Beantwortung der Frage ob und vor allem ab welcher Einzugsgebietsgröße die Notwendigkeit einer Abminderung von Niederschlägen besteht, ist es erforderlich die Ausdehnung konvektiver Gewitterzellen zu kennen und dadurch eine Aussage über die Möglichkeit einer vollständigen Überregnung von Einzugsgebieten treffen zu können. Im Rahmen des Projektes „Naturgefahrenmanagement Bucklige Welt – Wechselland (BUWELA)“ werden für den Zeitraum 2003-2007 die Flächenausdehnung von konvektiven Ereignissen in Niederösterreich (Bucklige Welt – Wechselland) ausgewertet [Pistotnik, 2009]. Die Ergebnisse der Auswertung wurden von Kohl 2011 wie folgt zusammengefasst: Die mittlere Flächenausdehnung der österreichischen Wildbacheinzugsgebiete beträgt ca. 5 km². Die größten konvektiven Zellen übertreffen die Fläche des größten Wildbaches, die Hälfte

aller Gewitterzellen ist größer als 97 % der Wildbäche. Die Ergebnisse sind aufgrund des begrenzten Untersuchungsgebiets nur bedingt auf andere Gebiete übertragbar und geben auch keinen Aufschluss darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Vollüberregung konkreter, einzelner Einzugsgebiete eintritt. „Es erscheint jedoch der Schluss zulässig, dass Vollüberregungsszenarien für viele österreichische Wildbacheinzugsgebiete durchaus realistisch sein können.“[Kohl, 2011]

Auf Grund der für mittlere Einzugsgebietsgrößen (ca. 5 km²) in Österreich gering ausfallende Abminderungsfaktor sowie der Möglichkeit einer flächendeckenden Überregung kommt Kohl 2011 zu folgendem Schluss: "Für kleine Gebiete, z.B. in der Größenordnung österreichischer Wildbäche, spielt die Frage der räumlichen Überregung eine untergeordnete Rolle, wobei mit der Größe der Einzugsgebiete die Bedeutung der Flächenabminderung zunimmt."[Kohl, 2011]. Diese Schlussfolgerung wird weiter untermauert durch den Fakt, dass es sich bei dem Interessengebiet der Erstellung von Gefahrenkarten aus der Oberflächenabflussmodellierung um Bereiche mit vorwiegend hohem Gefälle handelt, wodurch es bei einer Abminderung des Niederschlags möglicherweise zu einer Unterschätzung der Hangwassergefährdung kommt. Bei Fluss nahen Bereichen, bei denen die Vollüberregung von großen Einzugsgebieten zu unrealistischen Ausuferungen des Gerinnes kommen kann, handelt es sich um untergeordnete Interessengebiete der Hangwassermodellierung. Um den unrealistischen Ausuferungen dennoch Rechnung zu tragen wird empfohlen, Flussschläuche einer bestimmten Einzugsgebietsgrenze im Modell hydraulisch unwirksam zu machen. Dies kann zum Beispiel durch eine manuelle Modifikation des digitalen Geländemodells passieren, bei welcher der Flussschlauch um eine definierte Tiefe abgesenkt wird.

FAZIT

Die der Arbeit zugrunde gelegten Annahme, dass das betrachtete Einzugsgebiet in Schwertberg (2,2 km²) vollständig und gleichmäßig beregnet wird, ist somit berechtigt. Ferner ist eine Vollüberregung aller in Österreich gelegenen Einzugsgebiete und besonders der in Oberösterreich ausgewiesenen Detailsinzugsgebieten mit einer mittleren Ausdehnung von ca. 2 km² in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung für die Erstellung von Hangwassergefahrenhinweiskartenkarten im Rahmen einer konservativen Betrachtung zulässig.

3.4.2 Digitales Geländemodell (DGM)

Die Topographie der Erdoberfläche an einem bestimmten Ort wird durch digitale Geländedaten in einer Simulation berücksichtigt. Dabei wird die Erdoberfläche von einem Gitternetz überzogen, dass durch die Koordinaten X, Y, Z auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten aus periodisch stattfindenden Überfliegungen mittels LIDAR (Light Detection

and Ranging) erhoben werden. Diese räumlichen Daten werden unter der Verwendung von Geoinformationssystemen (GIS) aufbereitet, analysiert und graphisch dargestellt. Die sogenannten digitalen Geländemodelle (DGM) beinhalten keine lokalen Strukturen wie zum Beispiel Gebäude oder bestehende Verrohrungen. Des Weiteren sind in der Regel keine Brücken oder Durchlässe im Geländemodell berücksichtigt.

Bei dem in der Arbeit angewandten 2d hydraulischen Modell JFlow handelt es sich um ein rasterbasiertes Software wodurch in der vorliegenden Arbeit ein DEM-Raster (Digital Elevation Model) verwendet wird, dass aus regelmäßigen quadratischen Gittern besteht. Hierbei ist jede Rasterzelle des Gitters durch einen konstanten Höhenwert definiert. Ein anderer Modellansatz, auf den in weiterer Folge nicht weiter eingegangen wird, ist die Erdoberfläche mittels unregelmäßigen Dreiecken zu beschreiben. Dieser Ansatz wird als Triangulated Irregular Network (TIN) bezeichnet.

Das in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommende DGM (digitales Geländemodell) weist eine Auflösung von 0,5m x 0,5m auf, wodurch die einzelnen Rasterzellen eine Fläche von 0,25 m² besitzen. Das beim Land Oberösterreich aktuellste aufliegende DGM für Schwertberg wurde im Jahr 2016 mittels Befliegung erhoben und besitzt eine Auflösung von mindestens 4 Punkte pro m² und eine Höhengenaugigkeit von ± 10cm (Standardabweichung) [DorisPlattform(GisLandOberösterreich), o.J.].

Die angewandte Auflösung des Rastergitters wurde so gewählt, dass kleine lokale Strukturen wie zum Beispiel Mauern, Straßenkanten, Ackerfurchen, Geländesenken, usw. im digitalen Geländemodell weitestgehend enthalten sind. Grundsätzlich ist in der Hangwassersimulation ein digitales Geländemodell zu verwenden, dass eine Auflösung von 1m x 1m oder feiner entspricht, um im Siedlungsgebiet lokale Strukturen ausreichend genau wiedergeben zu können. Des Weiteren wurde im technischen Bericht des Rainman Projekts aufgezeigt, dass der Fehler mit den von Niederschlags-Abfluss-Modellen ausgegeben Wassertiefen mit gröberen Auflösungen von digitalen Geländemodellen zunimmt [Achleitner et al., 2020].

Das den Simulationen zugrunde gelegte DGM wurde im Zuge des Preprocessing adaptiert. Dabei wurden die im Einzugsgebiet befindlichen Gebäude auf der Grundlage des beim Land aufliegenden Gebäudedatensatz (Vektordatendateiformat .shp polygon) um 6 m erhöht. Dadurch werden der Realität entsprechend Häuser als Abflusshindernisse berücksichtigt. Des Weiteren wurde ein Datensatz der den Grundstückskataster (Vektordatendateiformat .shp line) beschreibt und ebenfalls am Land aufliegend ist, dahingehend berücksichtigt, dass die Grundstücksumrandungen mit offenen Mauern versehen wurden um die in der Realität bestehenden Gartenmauern und Bordsteinkanten zu berücksichtigen. Die an Hauszufahrten offenen Umrundungen, die ebenfalls eine Abflussverändernde Wirkung aufweisen können, wurden dabei im Modell um 15 cm erhöht. Die im betrachte-

ten Einzugsgebiet in Schwertberg bestehenden Gefahrenzonenpläne der WLW (Wildbach- und Lawinenverbauung) wurden auf Grund der geringen Einzugsgebietsgröße von 2,2 km² nicht weiter berücksichtigt. Es sei an dieser Stelle jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei einer Erstellung von flächendeckenden Hangwasserhinweiskarten Flüsse, die einen ausgewiesenen Gefahrenzonenplan der WLW bzw. HQ-Zone besitzen, als hydraulisch unwirksam zu berücksichtigen sind, da es sonst je nach Einzugsgebietsgröße zu unrealistischen Ausuferungen der Gewässer kommen kann. Eine gängige Möglichkeit Gewässer als hydraulisch unwirksam zu berücksichtigen ist diese im Modell einzutiefen, wodurch Überflutungsszenarien aus Flusshochwasser (fluvialen Überflutungen) verhindert werden.

3.4.3 Niederschlagsereignis

"Für die praktische Anwendung in der Niederschlagsabflussmodellierung stellt der Inputparameter Niederschlag die größte Unbekannte dar." [Kohl, 2011] Skoda beschreibt dieses Dilemma wie folgt: Es gibt keinen „wahren Bemessungswert“, der für alle Zwecke der Praxis universell Geltung hat, sondern je nach Auswertemodus und/oder Fragestellung aus der Praxis lässt sich ein mutmaßlicher spezifischer Extremwert nur innerhalb einer Bandbreite angeben. Die Auswahl des Verfahrens muss derzeit nach den Anforderungen im jeweiligen Anwendungsgebiet getroffen werden [Skoda et al., 2007]. Gemäß der Empfehlung des Hydrographischen Dienst Österreichs wird in der nachstehenden Niederschlagsabflussmodellierung der Bemessungsniederschlag angewendet [BMLRT, o.j.].

Wahl von Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) und Dauerstufe

Als maßgebende Wiederkehrzeit wird das 100-jährliche Regenereignis angenommen, da in der Schutzwasserwirtschaft dieser Schutzgrad angestrebt wird [PielerBüro, 2016].

Aus der Tatsache heraus, dass für jede Anlaufzeit eines Hochwasserscheitels eine eigene kritische Regendauer entscheidend ist, wird für die Identifikation der entscheidenden Niederschlagsdauer das Konzentrationszeitverfahren angewendet [Kreps und Schimpf, 1965]. Die Konzentrationszeit (t_c) ist jede Zeitspanne zwischen dem Regenbeginn und dem Zeitpunkt, an dem erstmals der direkte Abfluss von allen Teilgebieten eines Einzugsgebietes den Gebietsauslass erreichen [PielerBüro, 2016]. Die Konzentrationszeit beschreibt somit die Fließzeit des am weitest entfernten Punkt bis zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes. Entspricht die Fließzeit von dem am weitest entfernten Punkt im Einzugsgebiet bis zum Gebietsauslass (=Konzentrationszeit t_c) mindestens der Regendauer des betrachteten Niederschlags mit konstanter Intensität, so ist die erhaltene Abflussganglinie die mit dem höchsten Scheitelabfluss [Maniak, 2010].

Um in unseren Fall den 100-jährigen Scheitelabfluss zu ermitteln, wird die Dauerstufe (=Niederschlagsdauer (t_N)) gleich der Konzentrationszeit (t_c) gesetzt [PielerBüro, 2014]. Für die Bestimmung der Konzentrationszeit (t_c) gibt es in der Literatur mehrere empirische Formeln, die nachfolgend angeführt sind. Da die Ergebnisse der einzelnen Verfahren

mitunter stark voneinander abweichen, sollte die Konzentrationszeit aus einem Mittelwert mehrerer Verfahren gebildet werden [PielerBüro, 2016].

Abschätzungsmethode nach KREPS [1975]:

$$T_c = 0,89 \cdot EG^{0,4} - 15 \quad (3.16)$$

Abschätzungsmethode nach KERBY (1959):

$$T_c = 0,7452 \cdot L^{0,47} \cdot n^{0,47} \cdot J^{-0,235} \quad (3.17)$$

Abschätzungsmethode nach SPECHT:

$$T_c = \left(\frac{1}{2} \text{bis} \frac{1}{3} \right) \cdot L \quad (3.18)$$

T_c = Mittlere Fließzeit [h]

EG = Einzugsgebietsgröße [km²]

L = Fließlänge [km]

n = Rauigkeitskoeffizient nach Manning = $n = 1/k_{st}$ [m^{2/3}/s]

J = Gefälle des Fließweges [-]

Anwendung am Pilotgebiet in Schwertberg:

EG = 2,16 km²

Hierbei handelt es sich um die Einzugsgebietsfläche.

L = 2,1 km

Hierbei handelt es sich um die Entfernung des am weitest entfernten Punkt zum Auslass.

n = 0,0347

Der hier eingesetzte Rauigkeitskoeffizient stellt die mittleren Rauigkeit des Einzugsgebiets da. Die angewandten höhenabhängigen Rauheitsbeiwerte wurden hierbei ebenfalls gemittelt.

J = 0,046

Das hier eingesetzte Gefälle beschreibt die Neigung zwischen höchsten und niedrigsten Punkt des Einzugsgebiets.

$T_{c(Kreps)} = 1,061 \text{ h} = 64 \text{ min}$

$T_{c(Kerby)} = 0,449 \text{ h} = 27 \text{ min}$

$T_{c(Specht)} = 0,872 \text{ h} = 52 \text{ min}$

Mittlere Fließzeit = $T_c = 0,794 \text{ h} = 48 \text{ min}$

Die Konzentrationszeit (t_c) gebildet aus dem Mittel der betrachteten Abschätzmethoden

$(T_{c(Kreps)}, T_{c(Kerby)}, T_{c(Specht)})$ ergibt 48 min (0,8 h). Die im Modell betrachtete Dauerstufe des Niederschlags muss deshalb mindestens 48 min betragen. Auf Grundlage dieser Berechnungen wird die nächst größere ausgewiesene Dauerstufe der Bemessungsniederschläge gewählt, diese beträgt 60 min. Dem Niederschlagsabflussmodell wird somit ein 100-jährliches 60-minütiges Ereignis (T100D60) zu Grunde gelegt.

Wahl der Niederschlagssumme

Auf Grund der Tatsache, dass Schwertberg mit seiner geografischen Lage annähernd zwischen zwei Gitterpunkten des ca. 6 km x 6 km Rasters der Bemessungsniederschläge liegt wurden die Bemessungsniederschläge der Gitterpunkt 2635 (T100D60 = 48.1 mm) und 2636 (T100D60 = 50.6 mm) ihren Abständen zum Ortszentrum in Schwertberg entsprechend interpoliert. Die Anwendung der Interpolierten Bemessungsniederschläge ist deshalb plausibel, da Einzugsgebiete die mehrere Gitterpunkte überspannen ihren gewichteten Flächenanteilen entsprechend gemittelt werden können [Kohl, 2011]. Der durch die Interpolation erhaltene Bemessungsniederschlag des T100D60 Starkregenereignisses für Schwertberg weist eine Niederschlagssumme von 48,9 mm auf. Die Niederschlagssumme von 48,9 mm in 60 min beschreibt ein hundertjährliches Niederschlagsereignis für Schwertberg und wird der in dieser Arbeit durchgeführten Niederschlags-Abfluss-Modellierung zugrunde gelegt.

Anwendung der Normganglinie in Schwertberg

Der im Niederschlags-Abfluss-Modell angestellte Vergleich, zwischen einer Niederschlagsganglinie auf der Grundlage der entwickelten Normganglinie und einem Niederschlagsereignis mit konstanter Intensität (Blockregen), wird ein Bemessungsniederschlag mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren und einer Dauerstufe von 60 Minuten mit einer Niederschlagssumme von 48,9 mm zugrunde gelegt. Wichtig dabei ist, dass die angewendete Normganglinie dieselbe integrale Niederschlagsmenge wie der im Modell berücksichtigte Blockregen besitzt.

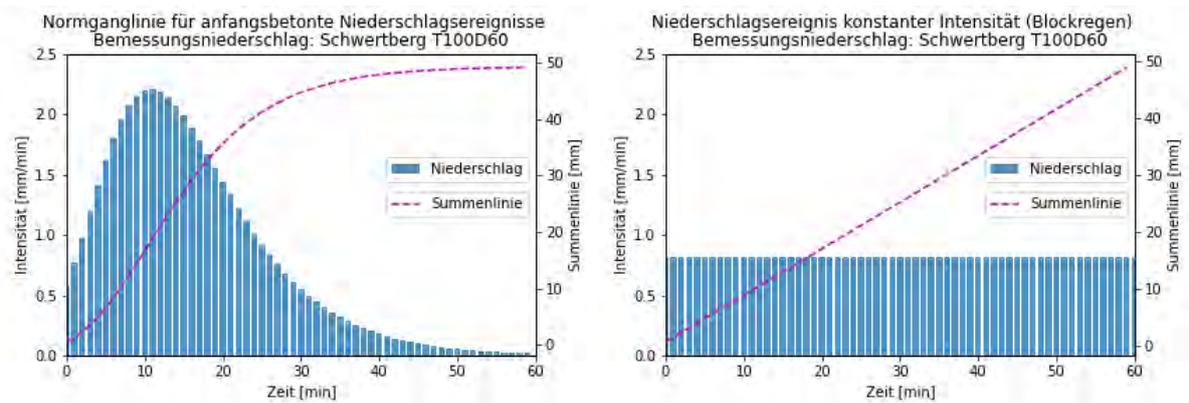


Abbildung 3.15 Intensitätsverteilung auf Grundlage der Normganglinie (links), Niederschlagsereignis konstanter Intensität (Blockregen) (rechts) für den 100 jährlichen, 60-minütigen Bemessungsniederschlag für Schwertberg; Normganglinie und Blockregen besitzen die gleiche Niederschlagssumme von 48,9 mm

Nach der Festlegung der im Modell angewandten Jährlichkeit, Dauerstufe und zeitlichen Intensitätsverteilung ist als nächster Schritt die Wahl der gleichen (äquidistanten) Zeitintervalle des aufgetragenen Niederschlags von Entscheidung. Grundsätzlich gilt je detaillierter die Ergebnisse sein sollen und je kleiner das betrachtete Einzugsgebiet, desto feiner ist die erforderliche Auflösung des aufgetragenen Niederschlags zu wählen. Eine zu grobe Auflösung führt zu unterschätzten Scheitelabflüssen, da die Abflussspitzen bei einer zu starken Mittelung nicht aufgelöst werden können [Seibert und Auerswald, 2020]. Auf Grund dessen wurde für das in JFlow implementierte Niederschlagsereignis eine minutige Auflösung gewählt. Ein Weiterer Grund für die Wahl der sehr kleinen Zeitintervalle ist, dass sich dadurch kein Mehraufwand in der Implementierung noch in der Rechenzeit des angewendeten Modells ergibt.

3.4.4 Dachwasser (hydrograph losses)

Der nachfolgende Abschnitt stellt den in dieser Arbeit angewandten pragmatische Ansatz der Berücksichtigung von Dachwasser im Modell dar. Die Berechnung von Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke wird durch die ÖNORM B 2501:2016 sowie die ÖNORM B 2506-1:2013 Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen definiert, wobei diese in der vorliegenden Arbeit keine Anwendung gefunden haben und stattdessen eine vereinfachte Berücksichtigung der Dachwässer gewählt wurde.

Wie in Kapitel 3.4.1 ausführlich erläutert, wurde das in Schwertberg gewählte Einzugsgebiet homogen und flächig überregnet. Durch diese Annahme werden folglich ebenfalls die Dachflächen der im Modell berücksichtigten Gebäude mit dem angewendeten Niederschlagsereignis einer Jährlichkeit von 100 Jahren und einer Dauerstufe von 60 Minuten mit einer Niederschlagssumme von 48,9 mm beregnet. Auf Grund der Tatsache, dass Gebäude durch Ihre Anbindung an das örtlich bestehende Kanalsystem (Trenn- und Mischsystem)

angebunden sind oder über eigne Sicheranlagen verfügen, ist davon auszugehen, dass dadurch ein bestimmter Prozentsatz des auf der Dachfläche auftreffenden Niederschlags durch das Kanalsystem abgeleitet wird. In dieser Arbeit wurde der 5 jährliche 60 minütige Bemessungsniederschlag als Ereignis definiert, dass durch das in Schwertberg bestehende Kanalsystem abgeleitet werden kann und dadurch dem System entzogen wird. Im Modell wurde kein Kanalsystem bzw. eine Kopplung von Oberflächenabfluss und Kanalsystem berücksichtigt. Durch die damit einhergehende Vereinfachung ist das Niederschlagsereignis T5D60 als Verlustterm definiert, wodurch ein in der Realität möglicherweise neuerliches Austreten des Niederschlagswassers aus der Kanalisation nicht nachgestellt werden kann.

Für den im Modell berücksichtigten Oberflächenabfluss von Gebäudedächern definierten Prozentsatz wurde das T5D60 (27 mm) von dem T100D60 abgezogen ($T100D60 - T5D60 = 21,9$ mm) und durch die Niederschlagssumme dividiert. Dadurch erhält man den Anteil von 45 % der von den Dachflächen der Gebäude oberflächlich abfließt. Im Umkehrschluss bedeutet das 55 % des Niederschlags über den Gebäuden dem Modell entzogen wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der Wahl des Ereignisses T5D60 als Grundlage für die Dachwasserberechnung um einen frei gewählten Wert aus den Bemessungsniederschlägen handelt und je nach dimensionierten Kanalsystem andere bzw. realistischere Werte angenommen werden können. Mit der aufgezeigten Umsetzung sollte lediglich eine Möglichkeit der Berücksichtigung von Dachwässern aufgezeigt werden.

3.4.5 Rauigkeitsbeiwertkarte

Das nachstehende Kapitel befasst sich mit der Beschreibung und Erläuterung der im Modell angewendeten Rauigkeitsbeiwerte. Rauigkeitsbeiwerte werden stets anhand der Landnutzung sowie dem vor Ort gegebenen Bewuchs definiert.

Die Hauptverwendung von Landbedeckungsklassen besteht darin, dem Simulationsmodell Informationen zur hydraulischen Rauheit zu liefern. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet von Rauheitsbeiwerten in Verbindung mit Bodenkennwerten ist die Berechnung von Verlustgrößen bzw. von Abflussbeiwerten um in weiterer Folge auf den Effektivniederschlag zu schließen. In dem 2d hydraulischen Modell JFlow werden die Rauheitsbeiwerte in der Form von ManningsN-Werten berücksichtigt und beschreiben dabei eine Oberflächenrauheit um dadurch Reibungsverluste zu berechnen. Dabei gilt umso größer der ManningsN-Wert umso rauer die Oberfläche und damit einhergehend ein hoher Fließwiderstand. Für den im deutschsprachigen Raum weit verbreiteten Stricklerbeiwert ($(n = 1/k_{st})$) gilt hingegen umso größer der Wert umso glatter die Oberflächenbeschaffenheit.

Die Abbildung 3.16 zeigt die für Schwertberg von Seitens der Raumplanung ausgewiesenen Landbedeckungsklassen, die manuell um die Kategorie Grünland für die Einzugsgebiets-

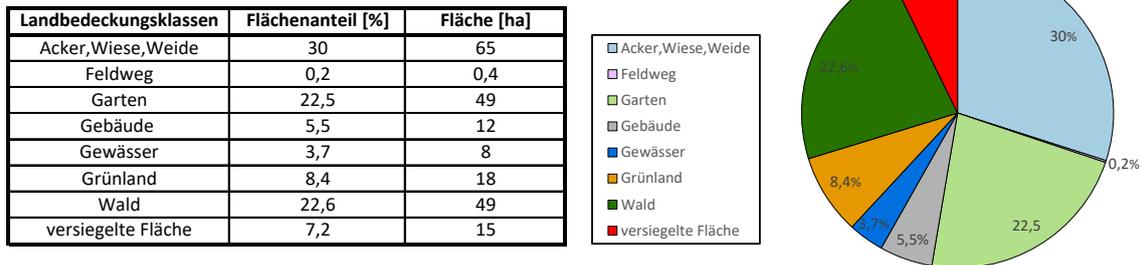
fläche erweitert wurde. Des Weiteren wurde für die in den Landbedeckungsklassen nicht enthaltenen, im Modell jedoch berücksichtigten offenen Mauern (siehe Kapitel 3.4.2) eine weitere Kategorie wie der Tabelle 3.7 zu entnehmen ist, eingefügt. Anhand dieser Landbedeckungsklassen wurden für die ausgewiesenen Landbedeckungen Rauheitsbeiwerte gewählt. Wie der nachstehenden Grafik zu entnehmen ist, weist die Einzugsgebietsfläche in Schwertberg 8 verschiedene Landnutzungsklassen auf, wobei die Kategorie Acker, Wiese und Weide als eine Kategorie zusammengefasst sind.



Abbildung 3.16 Übersichtskarte der Landbedeckungsklassen für das Pilotgebiet Schwertberg

Die im Modell zu Anwendung kommenden Rauheitsbeiwerte wurden anhand der Landbedeckungsklassen siehe Tabelle 3.6 definiert. Hierbei weist die Landbedeckung Acker, Wiese und Weide die in einer Kategorie zusammen gefasst sind den größten Flächenanteil mit 30 % auf. Wald und Garten umfassen jeweils 22 % und die Flächenbedeckungsklassen Feldweg, Gebäude, Gewässer, Grünland und versiegelte Fläche jeweils < 10 %. Die genauen Prozentsätze der Flächenanteile sind der Tabelle 3.6 zu entnehmen.

Tabelle 3.6 Auflistung der Landbedeckungsklassen und deren prozentuale Anteile am Pilotgebiet Schwertberg



Die in der Simulation verwendeten ManningsN-Werte beschreiben die Rauheit der einzelnen Landbedeckungskategorien und sind als hydraulisches Widerstandsmaß zu verstehen. Wie in Kapitel 2.6 im Detail erläutert, besteht eine Abhängigkeit des Rauheitsbeiwertes von der Überflutungstiefe. Auf Grund dessen wurden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Hangwassersimulationen höhenabhängige Rauheitsbeiwerte zugrunde gelegt. In JFlow können für die Berücksichtigung von höhenabhängigen Rauheitsbeiwerten zwei ManningN-Werte angegeben werden, welche die Strömungstiefen unterhalb und oberhalb eines Schwellenwerts definieren. Der Schwellenwert wird in dieser Arbeit mit 2 cm angenommen. Bei den in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommenden höhenabhängigen Rauheitsbeiwerten handelt es sich um die von Baden Württemberg im März 2020 in Form einer Empfehlung veröffentlichten Wertetabelle [LUBW, 2020].

Tabelle 3.7 Übersicht der Rauheitsbeiwerte für die im Pilotgebiet Schwertberg ausgewiesenen Landbedeckungsklassen

Beschreibung	Rauheit nach Gauckler-Manning-Strickler			
	Stricklerbeiwert kSt [$m^{1/3}/s$]		ManningN [$1/kSt$]	
	Dünnsfilm bis 2 cm	Normalabfluss über 2cm	Dünnsfilm bis 2 cm	Normalabfluss über 2cm
Acker Wiese Weide	10	22,5	0,100	0,044
Grünland	7,5	27,5	0,133	0,036
Gewässer	-	37,5	-	0,027
Garten	4,5	10	0,222	0,100
Gebäude/Dachflächen	-	55	-	0,018
versiegelte Fläche	-	50	-	0,020
Wald	4,5	12,5	0,222	0,080
Feldweg	-	30	-	0,033
Mauern offen	-	50	-	0,020
Expanded Area (Acker)	10	22,5	0,100	0,044

Die Tabelle 3.7 zeigt für die in Schwertberg ausgewiesenen Landbedeckungskategorien

die im Modell angewendeten ManningsN-Werte sowie der Vollständigkeitshalber die jeweiligen entsprechenden Stricklerbeiwerte. Bei der Kategorie Expanded Area handelt es sich um eine Kategorie, die den Flächen außerhalb der Einzugsgebietsgrenze einen Rauigkeitsbeiwert zuweist. Grund für die Notwendigkeit dieser Kategorie ist, dass die Einzugsgebietsgrenzen, wie zum Beispiel der im Nordosten des Einzugsgebiets befindliche Auslass der Aist als durchlässig (Transmissive) im Modell angenommen wurde, was so viel bedeutet als, dass Oberflächenwasser das Einzugsgebiet verlassen kann, wodurch für die Berechnung ebenfalls ein Rauigkeitsbeiwert hinter den Einzugsgebietsgrenzen definiert werden muss. Für die hinter der Einzugsgebietsgrenze liegenden Fläche der Kategorie Expanded Area wurde der höhenabhängige Rauigkeitsbeiwert von Acker definiert. Für die Nutzungsarten bzw. Landbedeckungskategorien wo keine höhenabhängigen Rauigkeitsbeiwerte angegeben sind ist kein Dünnfilmabfluss anzusetzen [LUBW, 2020].

3.4.6 Abflussbeiwertkarte

Der Abflussbeiwert stellt eine wesentliche Einflussgröße bei der Ermittlung der Gebietsabflüsse dar. Aus diesem Grund ist es von großer Notwendigkeit die Bestimmung des Abflussbeiwertes sehr sorgfältig zu treffen [PielerBüro, 2014].

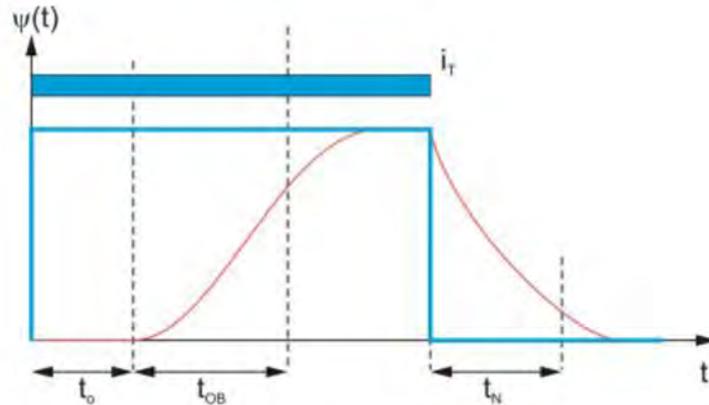


Abbildung 3.17 schematische Darstellung des Abflussbeiwertes in Abflusskonstanz (ψ_{const}) ohne Initialabstraktion (t_o) [Achleitner et al., 2020], Initialabstraktionszeit (t_o), Oberflächenlaufzeit (t_{OB}), Nachlaufzeit (t_N), Niederschlagsintensität (i_T), Abflussbeiwert ($\psi(t)$)

Die Abbildung 3.17 zeigt die schematische Darstellung des in dieser Arbeit angewendeten Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}). Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz beschreibt hierbei einen Gleichgewichtszustand zwischen Zufluss und Abfluss, wodurch sich eine Abflusskonstanz einstellt [Sifalda, 1996]. Die in der Realität zu beobachtende Initialabstraktion (t_o) und Oberflächenlaufzeit (t_{OB}), die sich als Anfangsverlust zusammenfassen lassen, wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Grund dafür ist, dass es weiteren Untersuchungen bedarf um für gegebene Teilflächen auf Grundlage des ausgewiesenen Abflussbeiwertes einen mittleren Anfangsverlust (Initialabstraktionszeit) zu definieren [Kohl und Achleitner, 2019]. Der Boden wurde mit dem Simulationsstart im Modell als gesättigt angenommen, wodurch der Abflussbeiwert nur noch durch Gravitation getriebene Infiltration abgemindert wird und es sich somit um ein Worst-Case Szenario in Bezug auf die Vorfeuchte des Bodens handelt. Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) wurde somit von Niederschlagsbeginn bis Niederschlagsende ohne anfängliche Verluste angenommen. Diese vereinfachende Annahme resultiert in einem konservativen Simulationsergebnis, wodurch die angenommene Vereinfachung in Bezug auf die Gefährdung durch Hangwasser eher überschätzt als unterschätzt wird.

Identifikation der Abflussbeiwertflächen

Wie in Kapitel 2.7.6 erläutert wurden die in Niederösterreich in der HydroBod im Detail ermittelten Abflussbeiwerte auf der Grundlage der Corine-Land-Cover CLC Klassen und der geologischen Einheiten aus GK200 sowie aus einer Kombination aus beiden klassifiziert [Kohl und Achleitner, 2019].

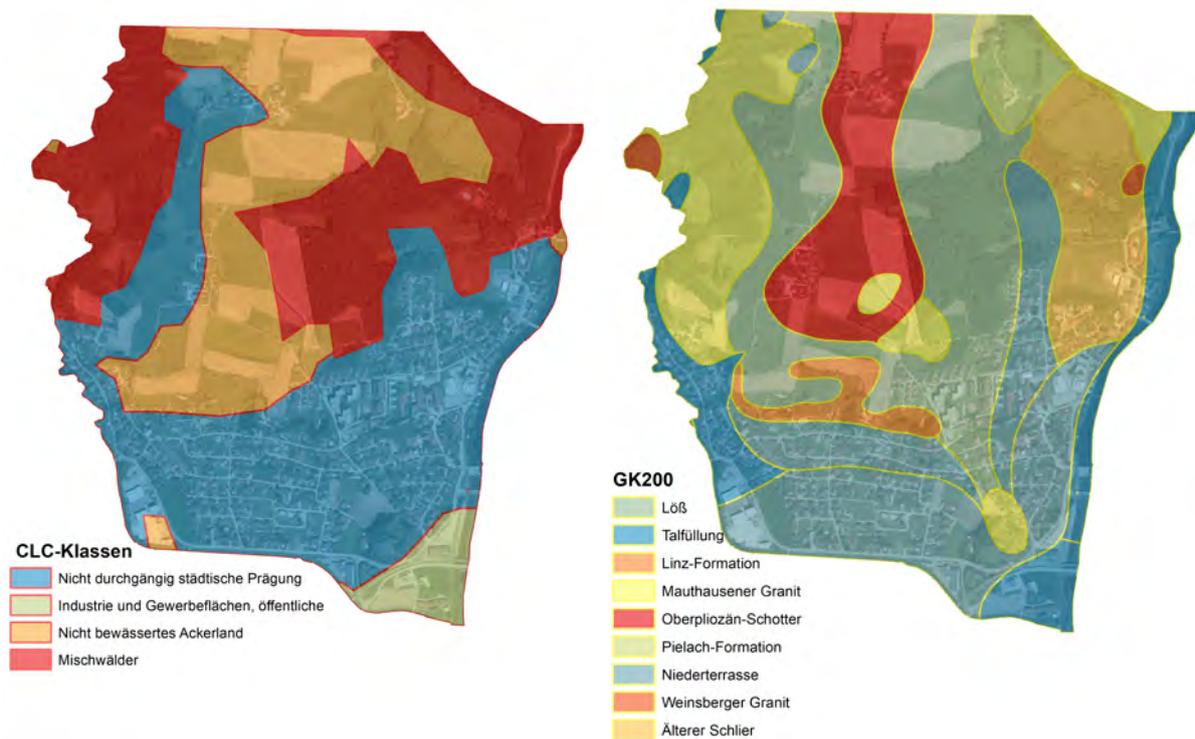


Abbildung 3.18 Geologische Karte (GK_{200}) (links); Corine Land Cover (CLC_{2012}) (rechts)

Die Abbildung 3.18 zeigt auf der linken Seite die 4 für Schwertberg ausgewiesenen CLC-Klassen die da wären, nicht durchgängig städtische Prägung, Industrie und Gewerbeflächen, nicht bewässertes Ackerland und Mischwälder. Auf der rechten Seite sind die für Schwertberg ausgewiesenen Flächen der geologischen Karte (GK_{200}) mit den Einheit Löß, Talfüllung, Mauthausner Granit, Oberpliozän-Schotter, Pielach-Formation, Niederterrasse, Weinsberger Granit und Älterer Schlier.

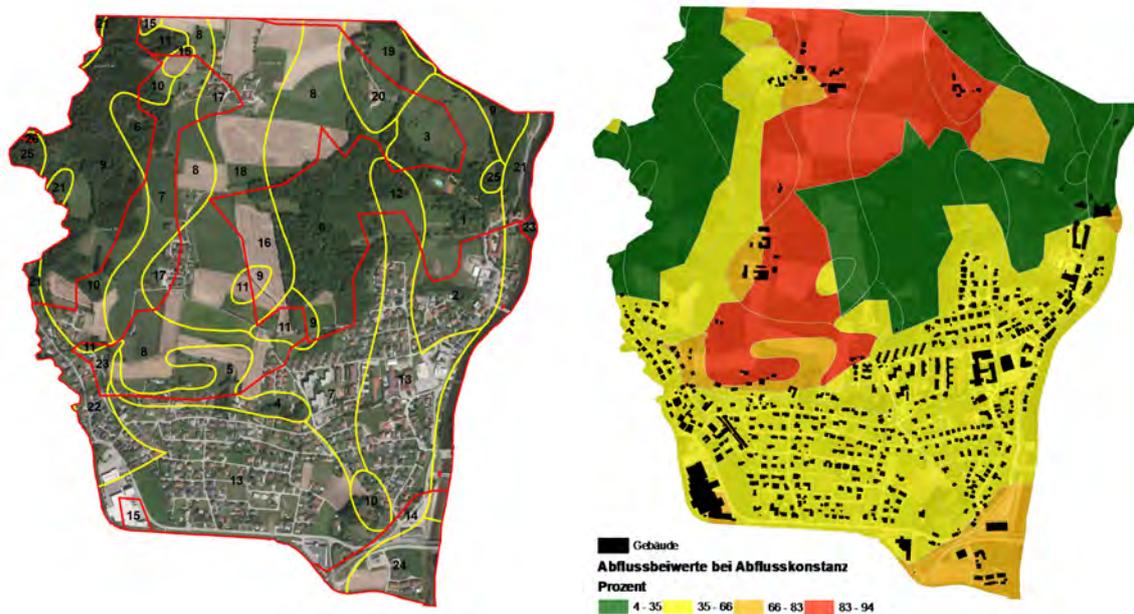


Abbildung 3.19 Verschneidung der GK_{200} (gelbe Linien) mit CLC_{2012} (rote Linien)(links); Die aus der Verschneidung der GK_{200} mit CLC_{2012} resultierenden 26 Flächen mit deren Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz ψ_{const})

Die Abbildung 3.19 zeigt die in Abbildung 3.18 dargestellten Flächen der CLC_{2012} und GK_{200} in überlagerter Form. Die auf den einzelnen Flächen in schwarzen ausgewiesenen Ziffern (Flächen-ID's) zeigen die sich aus der Verschneidung ergebenden unterschiedlichen Kombinationen aus den einzelnen Kategorien und werden in der Tabelle 3.8 mit den jeweiligen CLC_{2012} und GK_{200} Kategorien sowie dem Referenz Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz bei einer Niederschlagssumme von 100 mm/h (ψ_{100}) angegeben. Aus der Verschneidung ergeben sich für Schwertberg 26 Kategorien mit jeweils unterschiedlichen Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz. Durch die grobe Struktur der Ausgangsdaten der (CLC_{2012} und GK_{200}) und den sich aus den Verschneidungen, teilweise sehr kleinen ergebenden Flächen, wurde der Datensatz für Polygone kleiner als 1000 m² bereinigt [Kohl und Achleitner, 2019]. Die rechte Abbildung zeigt nochmals die Verschneidung der CLC_{2012} und GK_{200} und deren Abflussbeiwertklassen in 4 Intervalle untergliedert, wobei der Verlauf von Grün nach Rot einen Anstieg des Oberflächenabflusses darstellt. Den in der Grafik in schwarz dargestellten Gebäuden wurde ein Abflussbeiwert von 100 % zugewiesen und durch die in Kapitel 3.4.4 erläuterte prozentuale Abminderung des Dachwassers berücksichtigt.

Tabelle 3.8 Flächen-ID's der Abflussbeiwertklassen des Pilotgebiets Schwertberg mit den dazugehörigen Flächen der GK_{200} und CLC_{2012} sowie den ausgewiesenen Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz ($\psi_{const,100}$)

Flächen-ID	GK200	CLC2012	Abflussbeiwert ($\Psi_{const,100}$)
1	Älterer Schlier	Mischwälder	18%
2	Älterer Schlier	Nicht durchgängig städtische Prägung	65%
3	Älterer Schlier	Nicht bewässertes Ackerland	80%
4	Linz-Formation	Nicht durchgängig städtische Prägung	57%
5	Linz-Formation	Nicht bewässertes Ackerland	71%
6	Löss	Mischwälder	14%
7	Löss	Nicht durchgängig städtische Prägung	63%
8	Löss	Nicht bewässertes Ackerland	92%
9	Mauthausener Granit	Mischwälder	4%
10	Mauthausener Granit	Nicht durchgängig städtische Prägung	55%
11	Mauthausener Granit	Nicht bewässertes Ackerland	62%
12	Niederterrasse	Mischwälder	19%
13	Niederterrasse	Nicht durchgängig städtische Prägung	55%
14	Niederterrasse	Industrie und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	79%
15	Niederterrasse	Nicht bewässertes Ackerland	83%
16	Oberpliozen-Schotter	Mischwälder	22%
17	Oberpliozen-Schotter	Nicht durchgängig städtische Prägung	70%
18	Oberpliozen-Schotter	Nicht bewässertes Ackerland	93%
19	Pielach-Formation	Mischwälder	35%
20	Pielach-Formation	Nicht bewässertes Ackerland	90%
21	Talfüllung	Mischwälder	21%
22	Talfüllung	Nicht durchgängig städtische Prägung	57%
23	Talfüllung	Nicht bewässertes Ackerland	78%
24	Talfüllung	Industrie und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	78%
25	Weinsberger Granit	Mischwälder	7%
26	Weinsberger Granit	Nicht bewässertes Ackerland	66%

Die Tabelle 3.8 zeigt, wie bereits erwähnt die in der Abbildung 3.19, dargestellten Flächen-ID's, die sich aus der Verschneidung der CLC_{2012} und GK_{200} ergeben und 26 Kombinationen umfassen. Des Weiteren weist die Tabelle 3.8 den 26 unterschiedlichen Flächen-ID's Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{100}) zu. Die angeführten Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{100}) wurden vom BFW– Institut für Naturgefahren und dem Arbeitsbereich Wasserbau der Universität Innsbruck aus der Überführung der HydroBod NÖ auf die Fläche Oberösterreichs erhoben.

Ermittlung der Niederschlagsintensitätsabhängigen Abflussbeiwerte

Wie in Kapitel 2.7.4 bereits ausführlich erläutert, weisen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz eine Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität auf [Kohl, 2011]. Aus einer Vielzahl von Beregnungsversuchen durchgeführt am BFW– Institut für Naturgefahren konnte ein empirischer Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Abflussbeiwert ψ_{const} aufgezeigt werden. Die daraus abgeleitete Funktion beschreibt den statistischen Zusammenhang des Abflussbeiwerts bei Abflusskonstanz mit der Niederschlagsintensität. Die Funktion 2.6 ermöglicht es durch einsetzen der Intensität des zu betrachtenden Ereignisses den Referenzabflussbeiwert der Niederschlagssumme 100 mm/h (ψ_{100}) in den Abflussbeiwert (ψ_{const}) der betrachteten Niederschlagsintensität zu überführen.

Die in Kapitel 2.7.4 vorgestellte Gleichung 2.6 wurde in dieser Arbeit für die Bestimmung der Abflussbeiwerte ψ_{const} herangezogen. Es wurden für die in Schwertberg ausgewiesenen 26 unterschiedlichen Abflussbeiwertflächen (siehe Kapitel 3.4.6) die jeweiligen intensitätsabhängigen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz bestimmt. Hierfür wurde für den im Modell berücksichtigten Blockregen (Simulations-ID: Run163) mit einer konstanten Intensität von 0,815 mm/min ($\psi_{const48,9}=48,9/60$) der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ($\psi_{const48,9}$) ermittelt. Des Weiteren wurde das Konzept des intensitätsabhängigen Abflussbeiwerts bei Abflusskonstanz für die entwickelte Normganglinie (Simulations-ID: Run162) angewendet (siehe Kapitel 3.3.4). Hierzu wurden die auf Grundlage der Normganglinie erhaltenen minütigen Niederschlagsintensitäten unter Verwendung der Gleichung 2.6 die intensitätsabhängigen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ($\psi_{const48,9}$) für das in Schwertberg betrachtete 100 jährliche 60 minütige (T100D60) Ereignis mit einer Niederschlagssumme von 48,9 mm angewendet.

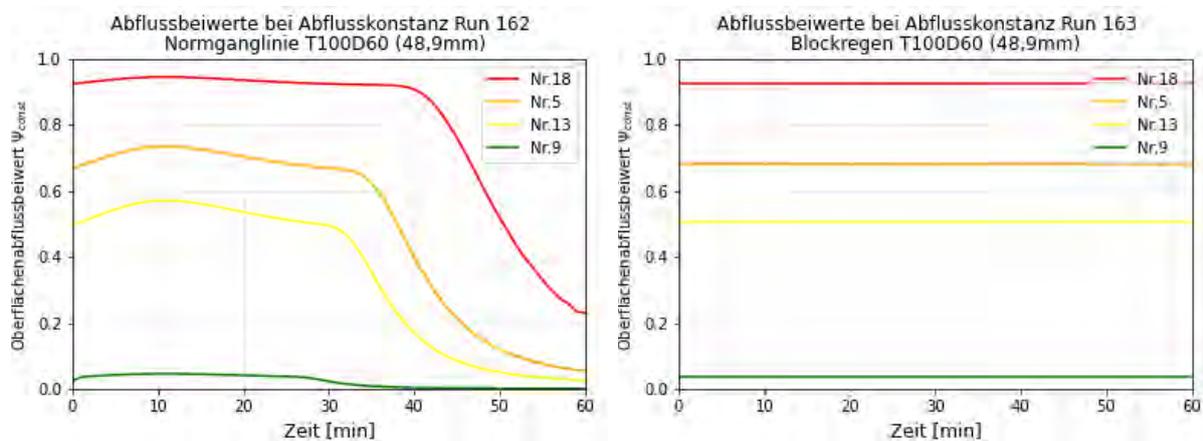


Abbildung 3.20 Repräsentative Abflussbeiwertkurven aus dem Pilotgebiet Schwertberg: Abflussbeiwerte ($\psi_{const48,9}$) auf der Grundlage der Normganglinie (Run162) (links), Abflussbeiwerte ($\psi_{const48,9}$) auf der Grundlage des Blockregens (Run163) (rechts)

Die Abbildung 3.20 zeigt 4 repräsentative Abflussbeiwertkurven aus dem Pilotgebiet Schwertberg (Flächen-ID 18 (max. $\psi_{const48,9}$), 5, 13 und 19 (min. $\psi_{const48,9}$)). Wobei in der linken Abbildung die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ($\psi_{const48,9}$) bei einer Niederschlagsganglinie (Normganglinie) und in der rechten Abbildung bei konstanter Niederschlagsintensität (Blockregen) angeführt sind.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass das zur Bestimmung der Abflussbeiwerte ($\psi_{const48,9}$) verwendete Niederschlagsereignis bei der angewendeten Normganglinie und dem Blockregen dieselbe Niederschlagssumme sowie Dauerstufe aufweist. Die Unterschiede in den Abflussbeiwerten ergeben sich einzig dadurch, dass einmal eine Intensitätsverteilung des Niederschlags und zum anderen eine konstante Niederschlagsintensität angewendet wurde. Auf Grund der gleichbleibenden Intensität bei einem Blockregen weisen die Abflussbeiwerte ($\psi_{const48,9}$) wie in Abbildung 3.20 deutlich zu sehen ist ebenfalls eine Rechteckverteilung auf und sind deshalb über die gesamte Niederschlagsdauer kon-

stant. Die auf Grundlage der entwickelten Normganglinie (minütige Intervalle) erhobenen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz weisen hingegen einen in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität variablen Abflussbeiwert ($\psi_{const_{48,9}}$) auf. Auf Grundlage der angewendeten anfangsbetonten Niederschlagsverteilung weisen die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ebenfalls die maximalen Oberflächenabflüsse zu Beginn des Ereignisses auf. Mit abnehmender Niederschlagsintensität der angewendeten Normganglinie ist ebenfalls eine Abnahme der Abflussbeiwerte ($\psi_{const_{48,9}}$) zu beobachten. Wie aus Abbildung 3.20 des Weiteren hervorgeht und in Tabelle 3.9 näher aufgezeigt wird, sind die Flächen unter den Abflussbeiwertkurven bei einem Vergleich der intensitätsverteilten und rechteckverteilten Abflussbeiwerte ($\psi_{const_{48,9}}$) nicht gleich groß. Demnach ist ebenfalls die Menge des zum Abfluss kommenden Niederschlagswassers bei der Normganglinie und Blockregen nicht dieselbe.

Tabelle 3.9 Gegenüberstellung repräsentativer mittlerer Oberflächenabflüsse und Dränung der Normganglinie (Run162) und des Blockregens (Run163) aus dem Pilotgebiet Schwertberg

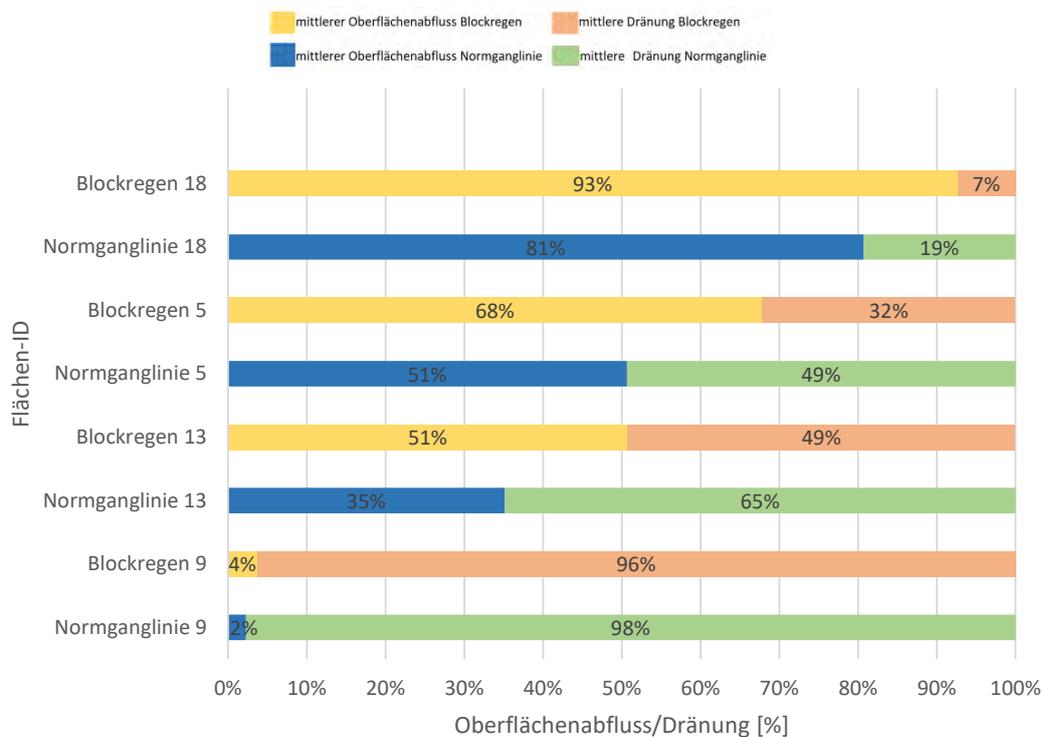


Tabelle 3.9 zeigt die Gegenüberstellung der mittleren Oberflächenabflüsse und deren Dränung. Als Dränung ($1 - \psi_{const}$) wird in dieser Arbeit der Anteil verstanden, der auf Grund von Infiltration aus dem Modell entzogen wird. Bei den gegenübergestellten Abflussbeiwertkurven handelt es sich um die in Abbildung 3.20 aufgezeigten Abflussbeiwertverteilungen der Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen). Die vollständige Auflistung aller 26 Abflussbeiwertflächen in Schwertberg ist dem Anhang (6.5) zu entnehmen. Vergleicht man jeweils die Prozentsätze des mittleren Oberflächenabflusses bzw. der mittleren Dränung der gegenübergestellten Intensitätsverteilung (z.B. Flächen-ID Normganglinie 18) und der Rechteckverteilung (zb. Flächen-ID Blockregen

18) so wird deutlich, dass bei einer Anwendung des Blockregens im Vergleich zur Normganglinie stets ein höherer Oberflächenabfluss bzw. eine geringere Dränung (Infiltration) erreicht wird. Am Beispiel der Flächen-ID Blockregen 18 kommen 93 % des auf der Fläche auftreffenden Niederschlags zum Oberflächenabfluss und 7 % werden dem System als Dränung entzogen. Bei der Flächen-ID Normganglinie 18 fließen jedoch lediglich 81 % des Niederschlags oberflächlich ab, wonach 19 % auf Grund von Infiltration aus dem System entnommen werden. Der höhere mittlere Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz ($\psi_{const_{48,9}}$) bei Blockregen im Gegensatz zur Ganglinie ist auf allen in Schwertberg gegebenen Abflussbeiwertflächen gegeben.

Umsetzung der Niederschlagsintensitätsabhängigen Abflussbeiwerte im Modell

Der nachstehende Abschnitt erläutert die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Ermittlung der Niederschlagsintensitätsabhängigen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ($\psi_{const_{48,9}}$) für den in dieser Arbeit durchgeführten Vergleich zwischen Normganglinie und Blockregen. Wie in Kapitel 2.7 erläutert, beschreibt der Abflussbeiwert den Anteil des Niederschlags der direkt zum Abfluss kommt. Aufgrund dessen kann anhand von Abflussbeiwerten ein Effektivniederschlag (N_{eff}) bestimmt werden, der direkt als Eingangsgröße in ein Modell eingegeben werden kann. Dabei handelt es sich um einen einfachen wie auch effizienten Weg bei dem von der verwendeten Software nicht die Fähigkeit vorausgesetzt wird zeit- und flächenspezifische Verluste während einer Simulation zu berücksichtigen. Auf Grund dessen wurde in der vorliegenden Arbeit nicht wie ebenfalls möglich der Effektivniederschlag als Eingangsgröße im Modell genutzt, sondern die Abflussbeiwerte bzw. die Dränung ($1 - \psi_{const_{48,9}}$) in der Form von zeit- und flächenspezifischen Verlustraten im Modell eingebaut. Hierfür wurde der Niederschlag (Normganglinie/Blockregen) in seiner ursprünglichen Form in das Modell als Eingangsgröße implementiert. Auf der Grundlage der in JFlow implementierten Funktion Drainage wurden minütige Verlustraten auf Basis der ermittelten Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ($\psi_{const_{48,9}}$) für die in Schwertberg anhand des 0,5 x 0,5 m digitalen Geländemodells erhobenen Abflussbeiwertflächen definiert. Die zeit- und flächenspezifischen Verlustraten wurden einmal für die intensitätsverteilte Normganglinie sowie für den rechteckverteilten Blockregen im Modell umgesetzt.

3.5 Starkregenmodellierung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich auf der Grundlage der in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführten Eingangsgrößen mit der Erläuterung und Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten zweidimensionalen hydrodynamischen und hochaufgelösten Simulationen mit dem Oberflächenabflussmodell JFlow.

Die nachstehende Tabelle 3.10 zeigt die wichtigsten Eckdaten der in den nachstehenden Simulationen eingegangenen Parameter.

Tabelle 3.10 Übersicht über die Eingangsparameter der durchgeführten Niederschlag-Abfluss-Simulationen mittels JFlow

Bezeichnung	NS.int.	BN [mm]	Verteilung	DGM	Rauheitsbeiwerte	Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz	Initialabstraktion	Mauern/Gebäude [m]	Simulationsdauer [h]	Regenintervalle
Run 162	T100D60	48,9	Anfangsbetont	0,5mx0,5m	ja (höhenabhängig)	ja	keine	offen +0,15m/+6m	2	1min
Run 163	T100D60	48,9	Blockregen	0,5mx0,5m	ja (höhenabhängig)	ja	keine	offen +0,15m/+6m	2	1min
Run 164	T100D60	48,9	Anfangsbetont	0,5mx0,5m	ja (höhenabhängig)	nein	keine	offen +0,15m/+6m	2	1min
Run 165	T100D60	48,9	Blockregen	0,5mx0,5m	ja (höhenabhängig)	nein	keine	offen +0,15m/+6m	2	1min

3.5.1 Hangwasserhinweiskarten verschiedener Modellszenarien

Das Ergebnis der in dieser Arbeit durchgeführten Niederschlags-Abfluss-Modellierung sind Hangwassergefahrenkarten, die nachstehend angeführt sind. Die mittels 2d hydraulischen Modell JFlow berechneten Hangwassergefahrenkarten zeigen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten auf der Basis des im Modell angewendeten 0,5 x 0,5 m Rasters des digitalen Geländemodells. Bei den in den Karten dargestellten Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten handelt es sich um die während der Simulationsdauer von zwei Stunden auftretenden maximalen modellierten Werte im untersuchten Einzugsgebiet von Schwertberg. Anders ausgedrückt werden in Hangwassergefahrenkarten die max. Abflusstiefen sowie Fließgeschwindigkeiten an jedem Punkt des betrachteten Gebiets als zeitlich kumuliertes Maximum ausgewiesen. Auf Grund der in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung angewendeten flächigen Überregung kommt es während der Simulationsdauer auf allen Zellen des zugrunde gelegten digitalen Geländemodells zu einer Benetzung und dadurch zu Wasserständen >0 m sowie zu Fließgeschwindigkeiten >0 m/s. Auf Grund dessen haben sich in der Praxis Grenzwerte für die Wassertiefe (h_{max}) bzw. für die Fließgeschwindigkeit (v_{max}) etabliert unter diesen die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten in den Hangwasserkarten nicht dargestellt werden. Diese Grenzwerte können je nach Anwender bzw. zu beurteilender topographischer Lage und Fragestellung variieren. Der in dieser Arbeit angewendete Grenzwert für die Wassertiefe (h_{max}) wurde mit 2 cm bzw. in einzelnen Fällen mit 5 cm definiert. Der angewendete Grenzwert der Fließgeschwindigkeit (v_{max}) wurde mit 0,2 m/s festgelegt.

Die mittels Geoinformationssystem (ArcMap) erstellten Hangwassergefahrenkarten sollen

durch die Gegenüberstellung der im Modell angewendeten Intensitätsverteilung (anfangsbetonte Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) sowie die Berücksichtigung bzw. nicht Berücksichtigung von Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) einen ersten Eindruck über die Unterschiede in den Modellergebnissen der maximalen Wasserstände und maximalen Fließgeschwindigkeiten vermitteln.

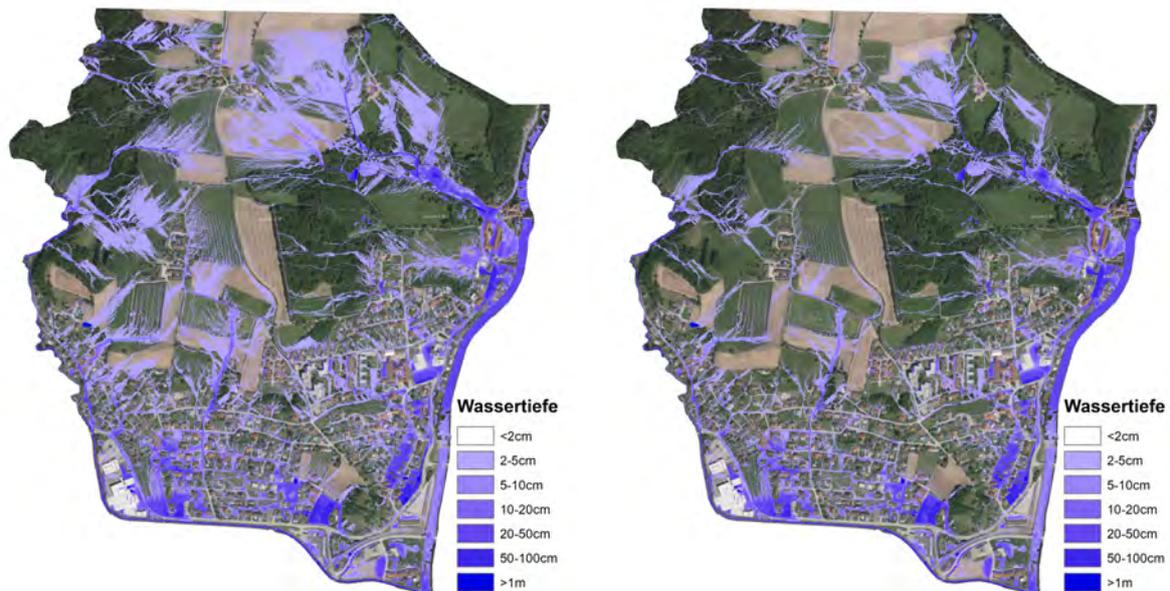


Abbildung 3.21 Maximale Wasserstände: Normganglinie mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run162 (links), Blockregen mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 163 (rechts)

Abbildung 3.21 zeigt das Ergebnis der maximalen Wassertiefen aus der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit den Simulations-ID's Run162 und Run163 (siehe Tabelle 3.10). Bei den zu vergleichenden Eingangsparametern bei Run162 und Run163 handelt es sich um die Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) bei ansonsten gleichen Modellaufbau. Anders ausgedrückt wurde für den gleichen Modellaufbau in der Simulation einmal die in dieser Arbeit erarbeitete Niederschlagsganglinie und einmal der Blockregen eingesetzt. Wichtig ist, dass die angewendete Normganglinie und der Blockregen dieselbe Niederschlagssumme von 48,9 mm besitzen und sich somit lediglich in der Verteilung des Niederschlags unterscheiden (siehe Abbildung 3.15). Bei einem rein optischen Vergleich zwischen Normganglinie (Run162) und Blockregen (Run163) mit angewendeten Abflussbeiwerten (ψ_{const}) auf Grundlage der Oberflächenabflusskarten sind Unterschiede in den Simulationsergebnissen zu erkennen. Die Modellergebnisse aus Run162 (Normganglinie) weisen im Gegensatz zum Blockregen (Run163) einen flächigeren Abfluss im Vorland in der Wassertiefe 2-5 cm auf.

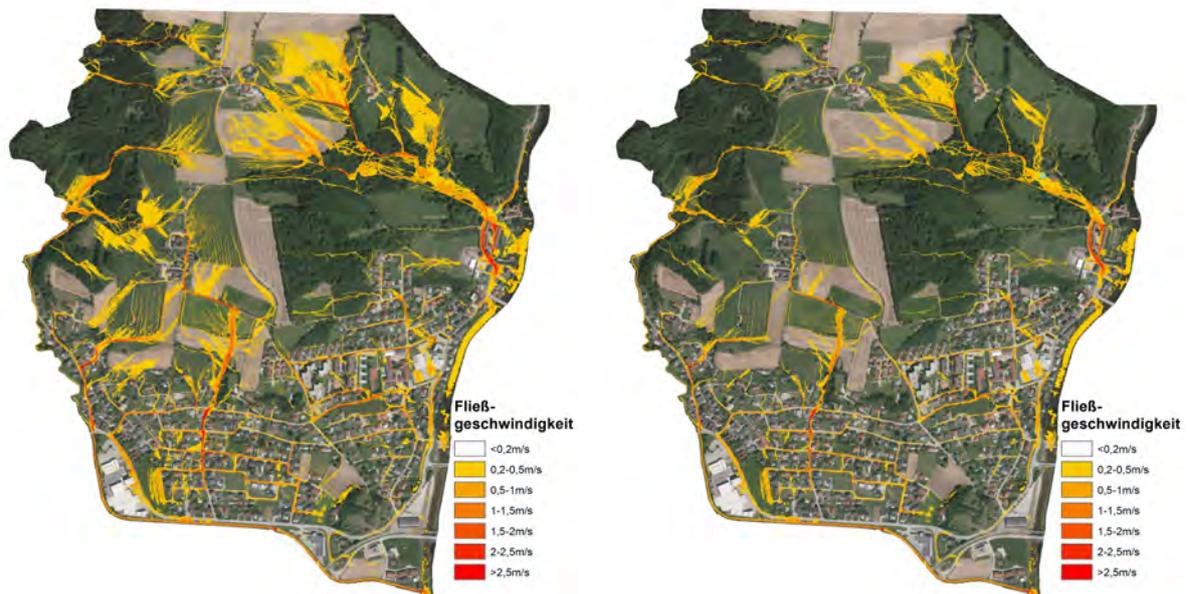


Abbildung 3.22 Maximale Fließgeschwindigkeiten: Normganglinie mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run162 (links), Blockregen mit Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 163 (rechts)

Abbildung 3.22 zeigt die Gegenüberstellung der maximalen Fließgeschwindigkeiten aus der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit den Simulations-ID's Run162 und Run163 (siehe Tabelle 3.10). Bei den zu vergleichenden Eingangsparametern handelt es sich um die Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) mit angewendeten Abflussbeiwerten (ψ_{const}) bei ansonsten gleichen im Modell angewendeten Parametern. Die angewendete Normganglinie und der Blockregen besitzen die selbe Niederschlagssumme und unterscheiden sich lediglich in der Verteilung des Niederschlags (siehe Abbildung 3.15). Unterzieht man die Hangwasserkarten mit den ausgewiesenen maximalen Fließgeschwindigkeiten einem rein visuellen Vergleich zwischen Normganglinie (Run162) und Blockregen (Run183), so lassen sich wie schon bei den maximalen Wassertiefen aus Abbildung 3.21 flächigere sowie in vereinzelden Bereichen höhere maximale Fließgeschwindigkeiten feststellen.

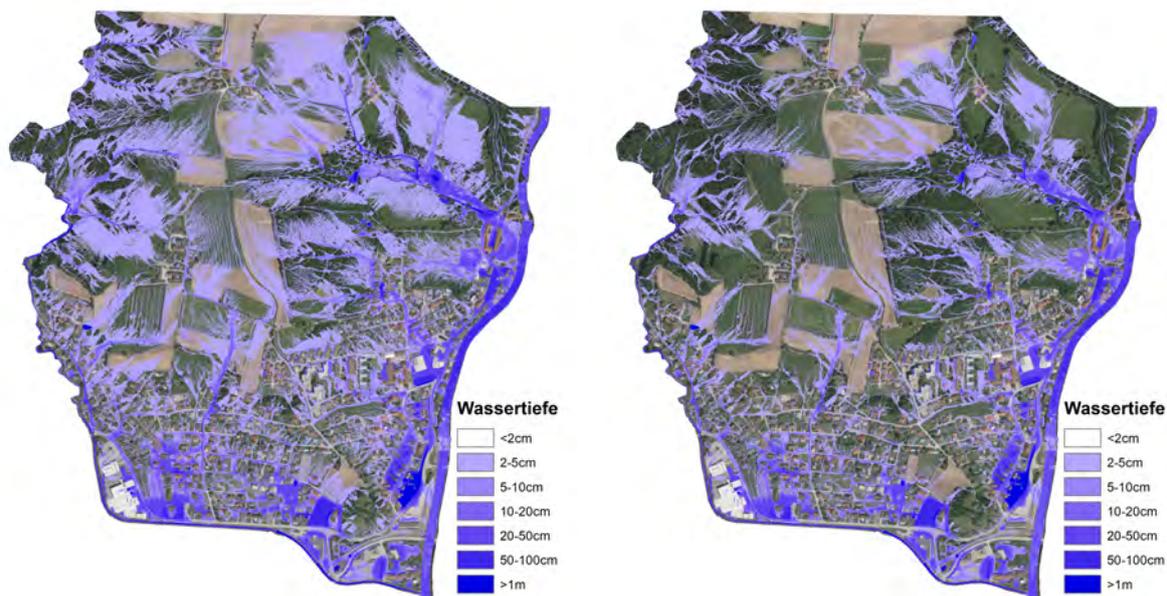


Abbildung 3.23 Maximale Wasserstände: Normganglinie ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run164 (links), Blockregen ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 165 (rechts)

Abbildung 3.23 zeigt das Ergebnis der maximalen Wassertiefen aus der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit den Simulations-ID's Run164 und Run165 (siehe Tabelle 3.10). Bei den Simulationen Run164 und Run165 wurde einmal die Intensitätsverteilung (Normganglinie) und einmal die Rechteckverteilung (Blockregen) ins Modell eingebaut, mit dem Unterschied zu den vorausgegangenen Simulationen, dass keine Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz im Modell berücksichtigt wurden. Da keine Abflussbeiwerte (ψ_{const}) zur Anwendung kommen fließt die gesamte Menge die als Niederschlag homogen auf die gesamte Fläche des Einzugsgebiets trifft oberflächlich ab. Der eingesetzte Niederschlag der Normganglinie und des Blockregens besitzen die selbe Niederschlagssumme von 48,9 mm und unterscheiden sich wiederum lediglich in der Verteilung des Niederschlags (siehe Abbildung 3.15). Stellt man abermals einen rein optischen Vergleich der zwischen Normganglinie (Run164) und Blockregen (Run165) ohne im Modell berücksichtigte Verluste an sind abermals ausgeprägte Unterschiede im Abflussbild zu erkennen. Die von Hangwasser beaufschlagten Flächen aus Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte) übersteigen die Überschwemmungsflächen im Vergleich zu Run162, Run163 und Run165. Die überaus flächig ausgeprägten Überflutungsflächen bei Run164 liegen vermehrt im Bereich von 2-10 cm.

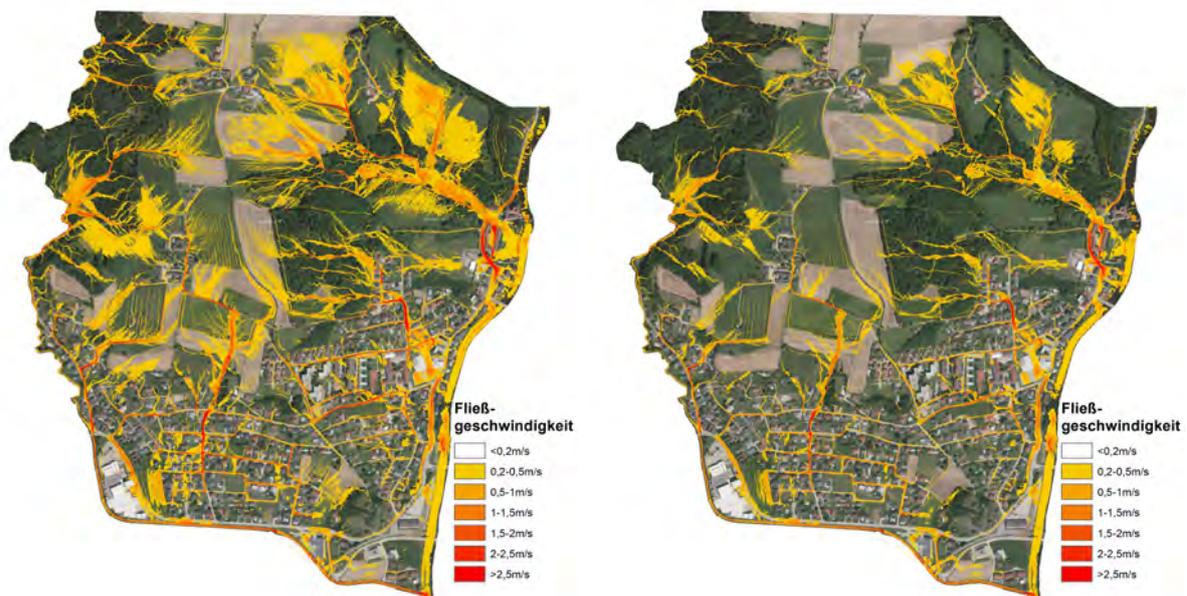


Abbildung 3.24 Maximale Fließgeschwindigkeit: Normganglinie ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run164 (links), Blockregen ohne Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) aus Run 165 (rechts)

Abbildung 3.24 zeigt die Gegenüberstellung der maximalen Fließgeschwindigkeiten aus der Niederschlags-Abfluss-Modellierung mit den Simulations-ID's Run164 und Run165 (siehe Tabelle 3.10). Bei den zu vergleichenden Eingangsparametern handelt es sich um die Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) ohne angewandte Abflussbeiwerte (ψ_{const}) bei ansonsten gleichen im Modell angewendeten Parametern. Die angewendete Normganglinie und der Blockregen besitzen wie bei den vorangegangenen Simulationen dieselbe Niederschlagssumme (siehe Abbildung 3.15). Bei einer Betrachtung der Hangwasserkarten mit den ausgewiesenen maximalen Fließgeschwindigkeiten zeichnet sich ein ähnliches Bild, wie bei den Wasserständen aus Run164 und Run165. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte) weisen ein weitaus flächigeres Muster auf als die maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Run162, Run163 und Run165. Des Weiteren sind auch die maximalen erreichten Fließgeschwindigkeiten aus Run164 vielerorts höher als in Run165.

FAZIT:

Aus einem Vergleich der Simulationsergebnisse auf der Grundlage der Hangwasserabflusskarten aus den Simulationen Run162 (Normganglinie) und Run163 (Blockregen) sind Unterschiede in den maximalen Wassertiefen sowie in den maximalen Fließgeschwindigkeiten deutlich erkennbar. Bei einem rein optischen Vergleich der Hangwasserabflusskarten sind die höheren und flächiger ausgeprägten maximalen Wassertiefen sowie maximalen Fließgeschwindigkeiten bei der angewandten Intensitätsverteilung (anfangsbetonte Norm-

ganglinie) im Vergleich zu der Rechteckverteilung (Blockregen) auffallend, obwohl, wie in Kapitel 3.4.6 erläutert, die auf Grundlage der minütigen Intensität der Normganglinie erhobenen mittleren Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz geringer ausfallen als die auf Grundlage des Blockregens ermittelte Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz.

Bei nicht berücksichtigten Abflussbeiwerten (ψ_{const}) im Modell weisen die Simulationen Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwert) und Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwert) flächig höhere maximale Wassertiefen und maximale Fließgeschwindigkeiten auf als Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwert) und Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwert).

3.5.2 Differenzrechnung: Normganglinie und Blockregen

Der nachstehende Abschnitt beschreibt die durchgeführten Differenzrechnungen zwischen Intensitätsverteilung (anfangsbetonter Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) sowie die daraus erhaltenen Resultate. Die Differenzrechnung wurde anhand der Simulationen Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwert) und Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwert) durchgeführt. Hierzu wurden einmal die maximalen Wassertiefen aus Run162 von den maximalen Wassertiefen aus Run163 subtrahiert ($Run162h_{max} - Run163h_{max}$). Des Weiteren wurden ebenfalls die maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Run162 von den maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Run163 abgezogen ($Run162v_{max} - Run163v_{max}$). Das Resultat ist in der nachstehenden Abbildung 3.25 in Form eines Differenzenplots dargestellt.

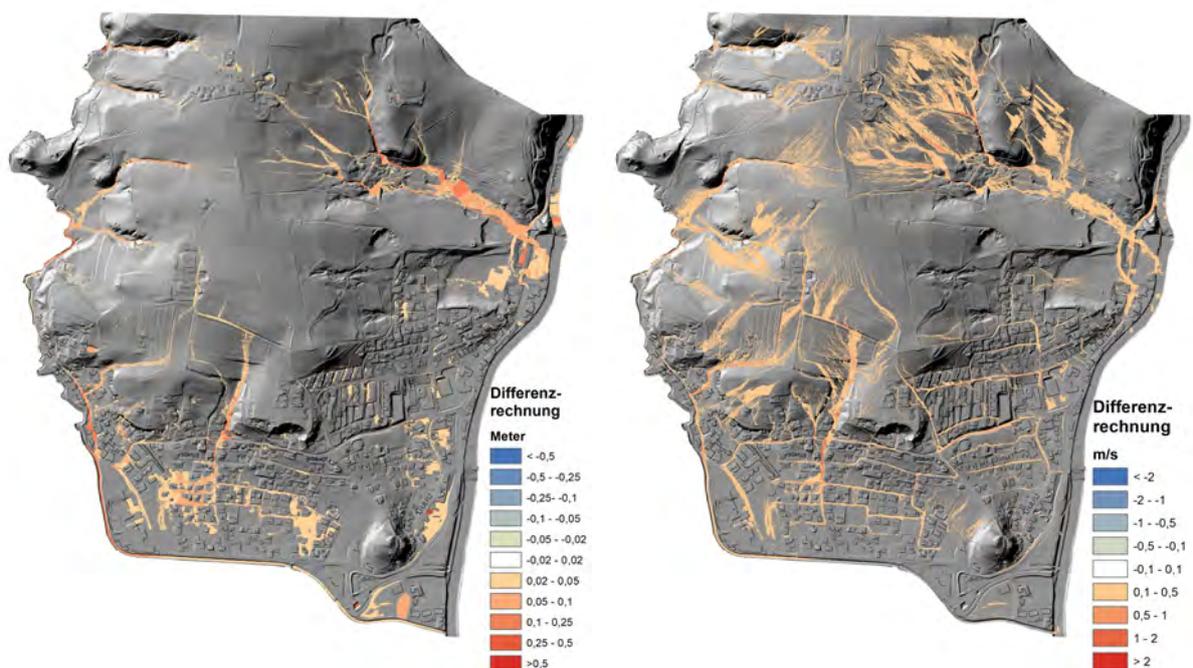


Abbildung 3.25 Differenzrechnung: Subtraktion der maximalen Wassertiefen aus Normganglinie und Blockregen ($Run162h_{max} - Run163h_{max}$) (links), Subtraktion der maximalen Fließgeschwindigkeiten aus Normganglinie und Blockregen ($Run162v_{max} - Run163v_{max}$) (rechts)

Die Abbildung 3.25 zeigt in dem linken Differenzenplot die Subtraktion der maximalen Wassertiefen aus den Simulationen Run162 (Normganglinie) und Run163 (Blockregen). Die Differenzen die sich im Bereich ± 2 cm befinden wurden in der Differenzkarte nicht dargestellt. Die Flächen mit Färbung zeigen je nach Schattierung eine in einem bestimmten Intervall befindliche Differenz (siehe Legende Abbildung 3.25). Bei einer Betrachtung des Differenzenplots der maximalen Wasserstände weisen die Farbschattierungen weitestgehend einen lachsfarbenen bis rötlich Farbton auf. Auf Grund dessen liegen die Differenzen der maximalen Wasserstände im positiven Bereich, wodurch die höheren maximalen Wassertiefen der Normganglinie im Vergleich zum Blockregen belegt sind. Differenzen der maximalen Fließgeschwindigkeiten (rechte Abbildung) die sich im Bereich $\pm 0,1$ m/s befinden wurden in der Differenzkarte nicht dargestellt (siehe Legende Abbildung 3.25). Betrachtet man den Differenzenplot der maximalen Fließgeschwindigkeit, so weisen die maximalen Fließgeschwindigkeiten auf Grund der sich nahezu vollständig im positiven Bereich befindlichen Differenzen ebenfalls höhere maximal Werte bei der Normganglinie als bei dem im Modell berücksichtigten Blockregen auf.

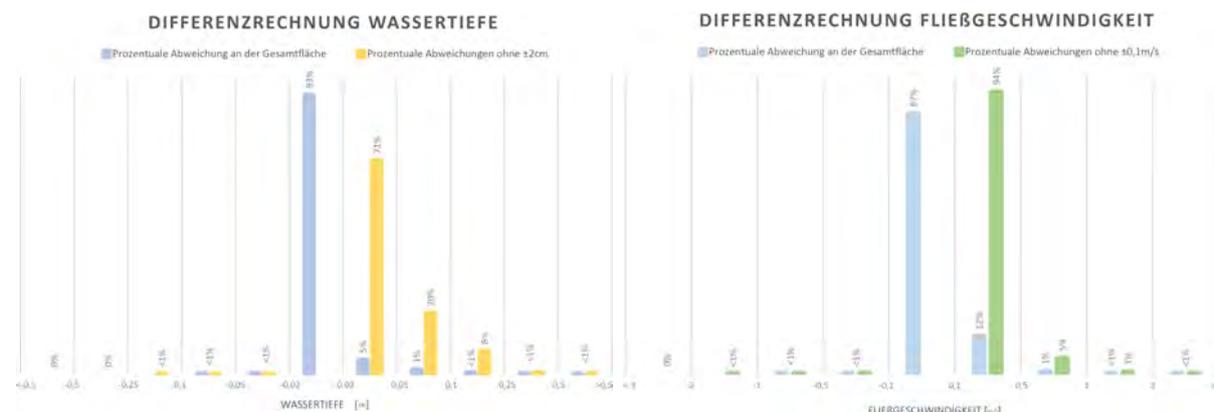


Abbildung 3.26 Prozentuale Auswertung der Differenzrechnungen auf Basis des $0,5 \times 0,5$ m Rasters: Prozentanteile der Differenzen an den Differenzbereichen ($\text{Run162}h_{max} - \text{Run163}h_{max}$) für die gesamte Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Differenzbereichs von ± 2 cm (links), Prozentanteile der Differenzen an den Differenzbereichen ($\text{Run162}v_{max} - \text{Run163}v_{max}$) für die gesamte Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Differenzbereichs von $\pm 0,1$ m/s (rechts)

Die linke Abbildung 3.26 zeigt die prozentuale Auswertung der Differenzrechnung der maximalen Wassertiefen. Hierbei weisen 93 % der Zellen eine prozentuale Abweichung an der Gesamtfläche im Bereich ± 2 cm auf (in Abbildung 3.25 als keine bzw. nicht farbige markierte Differenz dargestellt). Demnach zeigen 7 % der Zellen eine Differenz von größer ± 2 cm. 5 % der Abweichungen liegen dabei bei +2 cm bis +5 cm. 1 % der Zellen liegen im Differenzbereich von +5 cm bis +10 cm und das fehlende 1 % verteilt sich auf die restlichen Intervalle.

Betrachtet man in der prozentualen Auswertung ausschließlich die Zellen mit Differenzen größer ± 2 cm, so weist das Intervall +2 cm bis +5 cm 71 % der in diesem Bereich liegenden Differenzen der maximalen Wasserstände auf. 20 % der Zellen befinden sich im Differenzbereich von +5 cm bis +10 cm. Das Intervall der Abweichungen von +10 cm bis

+25 cm beinhaltet 8 % der Zellen. Die Zellen die eine negative Differenz (-0,02 m bis <-5 m) aufweisen, umfassen in Summe weniger als 1 % der Zellen sowohl bei einer prozentualen Betrachtung der gesamten Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Differenzbereichs von $\pm 0,02$ m. Diese Tatsache, dass sich im negativen Bereich weniger als 1 % der Differenzen befinden belegt, dass sich bei der im Modell zur Anwendung kommenden Normganglinie höheren maximale Wasserstände im Gegensatz zum Blockregen einstellen.

Die rechte Abbildung 3.26 zeigt die prozentuale Auswertung der Differenzrechnung der maximalen Fließgeschwindigkeiten. Dabei zeigen 87 % der Zellen eine prozentuale Abweichung an der Gesamtfläche im Bereich von $\pm 0,1$ m/s (in Abbildung 3.25 als keine bzw. nicht farbig markierte Differenz dargestellt). Demnach weisen 13 % der Flächen eine Differenz von größer $\pm 0,1$ m/s auf. 12 % der Abweichungen liegen dabei im Bereich von +0,1 m/s bis +0,5 m/s und 1 % im Intervall von +0,5 m/s bis +1 m/s. Die Differenzbereiche +1 m/s bis >2 m/s beinhalten weniger als 1 % der Werte.

Betrachtet man in der prozentualen Auswertung ausschließlich die Flächen mit Differenzen größer $\pm 0,1$ m/s, so weist das Intervall +0,1 m/s bis +0,5 m/s 94 % der in diesem Differenzbereich liegenden Zellen der abweichenden Fließgeschwindigkeiten auf. 5 % weist das Intervall +0,5 m/s bis +1 m/s und 1 % Anteil besitzen die Zellen mit Abweichungen +1 m/s bis +2 m/s. Die Zellen die eine negative Differenz (-0,1 m/s bis <-2 m/s) aufweisen umfassen weniger als 1 % der Zellen sowohl bei einer Betrachtung der gesamten Einzugsgebietsfläche sowie ohne Berücksichtigung des Differenzbereichs von $\pm 0,1$ m/s. Auf Grund dieser Tatsache, dass sich im negativen Differenzbereich weniger als 1 % der Zellen befinden weist die Normganglinie höhere maximale Fließgeschwindigkeiten als das Simulationsergebnis des Blockregens auf.

3.5.3 Monitoringlines

Der nachstehende Abschnitt befasst sich mit der Analyse von Monitoringlines (Kontrollquerschnitten), die im Rahmen der durchgeführten Niederschlag-Abfluss-Modellierung für das Einzugsgebiet in Schwertberg im Modell eingebaut wurden. Die Monitoringlines auch als Kontrollquerschnitte bezeichnet, wurden in Hauptabflussbereichen, die auf der Grundlage der Hangwassersimulationsergebnisse identifiziert wurden, platziert. Die Hauptabflussbereiche stellen dabei in den meisten Fällen die im Einzugsgebiet gegebenen Tiefenlinien da. Die Monitoringlines beschreiben dabei den Volumenstrom/Durchfluss, während der gesamten Simulationsdauer (2 Stunden), über die in gelb in Abbildung 3.27 eingezeichneten Kontrollquerschnitte. Der Durchfluss wird hierbei auf der Basis von minutigen Intervallen aus der Fließgeschwindigkeit und dem Messquerschnitt, der sich aus den mittleren Wassertiefen im Modell sowie dem der Simulation zugrunde gelegtem 0,5 x 0,5 m digitalen Geländemodell ergibt berechnet.

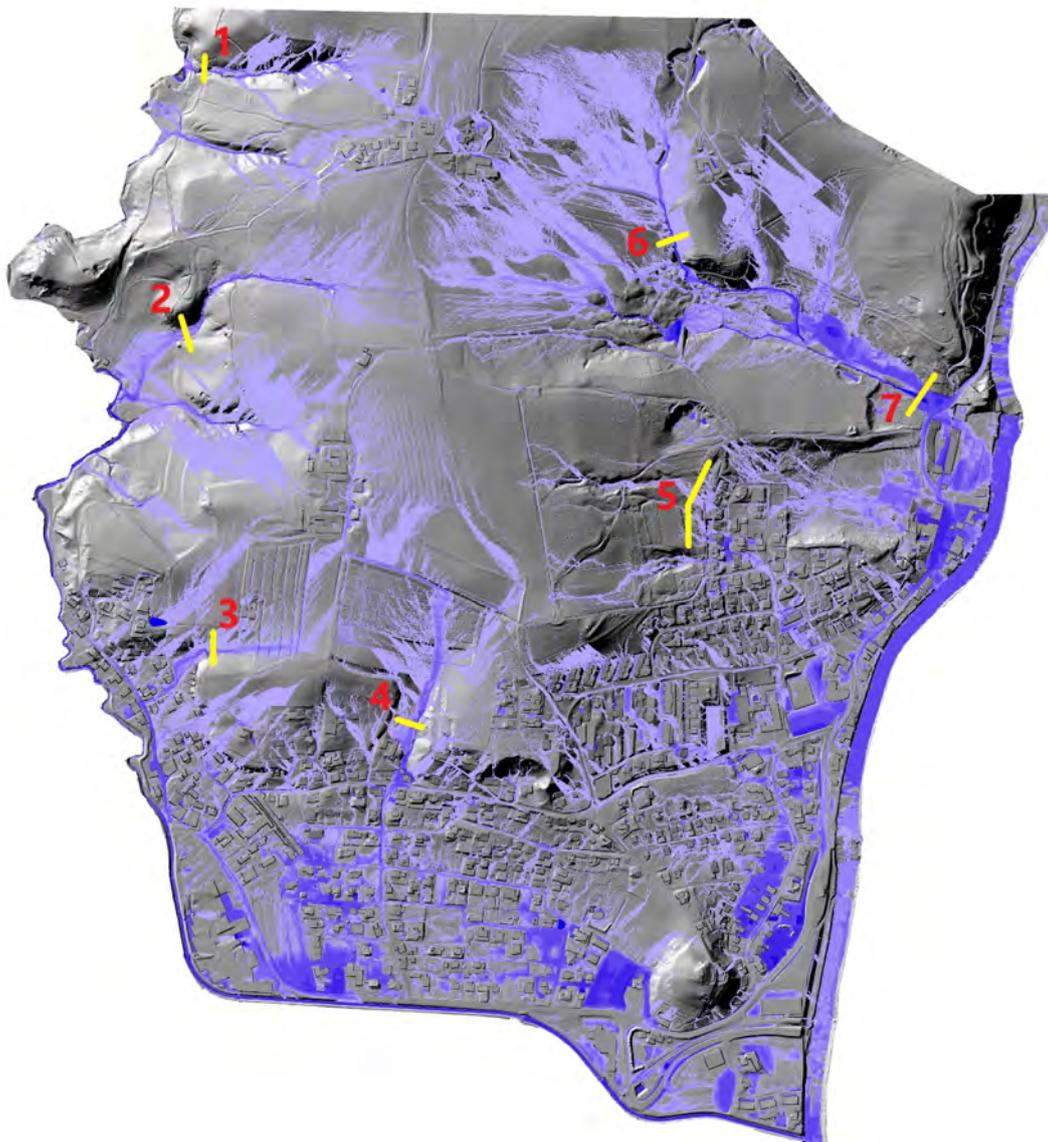


Abbildung 3.27 Übersicht über die im Modell umgesetzten Monitoringlines/Kontrollquerschnitte für das betrachtete Einzugsgebiet in Schwertberg

Abbildung 3.27 zeigt die 7 für Schwertberg im Modell umgesetzten Monitoringlines. Die nachstehende Auflistung gibt eine Übersicht über die Größe der zufließenden Fläche an den einzelnen Monitoringlines. Einzugsgebietsgröße an den untersuchten Monitoringlines:

- EZG Monitoringline Nr.1: 7 ha
- EZG Monitoringline Nr.2: 7,5 ha
- EZG Monitoringline Nr.3: 3,7 ha
- EZG Monitoringline Nr.4: 11 ha
- EZG Monitoringline Nr.5: 5,8 ha
- EZG Monitoringline Nr.6: 11,3 ha
- EZG Monitoringline Nr.7: 44 ha

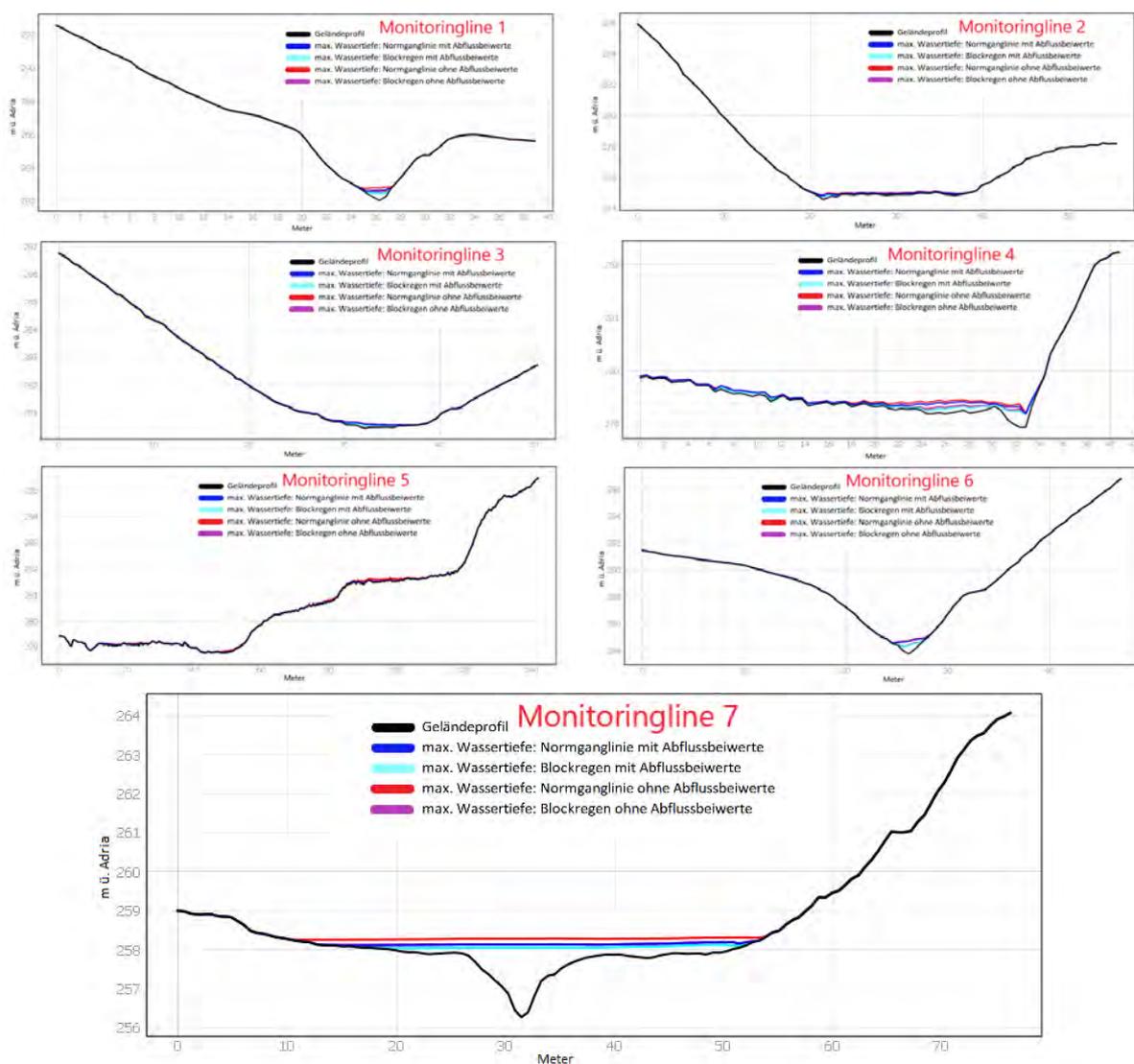


Abbildung 3.28 Geländequerschnitte der untersuchten Monitoringlines mit eingezeichneten maximalen Wasserständen der Simulationen Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})), Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})), Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte (ψ_{const})), Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwerte (ψ_{const}))

Abbildung 3.28 zeigt die für Schwertberg untersuchten Monitoringlines im Geländequerschnitt, wodurch ein besseres Verständnis über die vor Ort gegebenen Topographie sowie Oberflächenabflussthematik gegeben werden soll. Des Weiteren werden neben dem Geländeprofil die maximalen Abflusshöhen aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Niederschlags-Abfluss-Simulationen dargestellt (siehe Tabelle 3.10). Bei der Betrachtung der maximalen Wasserstände aus den durchgeführten Simulationen ist deutlich erkennbar, dass Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte) die höchsten maximalen Wasserstände aufweist. Die maximalen Wasserstände aus Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte) und Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwerte) überlagern sich in vielen Fällen, wobei Run162 an den Stellen, wo keine Überlagerung gegeben ist, höhere maximale Wasserstände als Run165 aufweist. Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte) zeigt an den untersuchten Kontrollquerschnitten an allen Stellen die geringsten maximalen Wasserstände im Vergleich mit den durchgeführten Simulationen aus Run162,164,165.

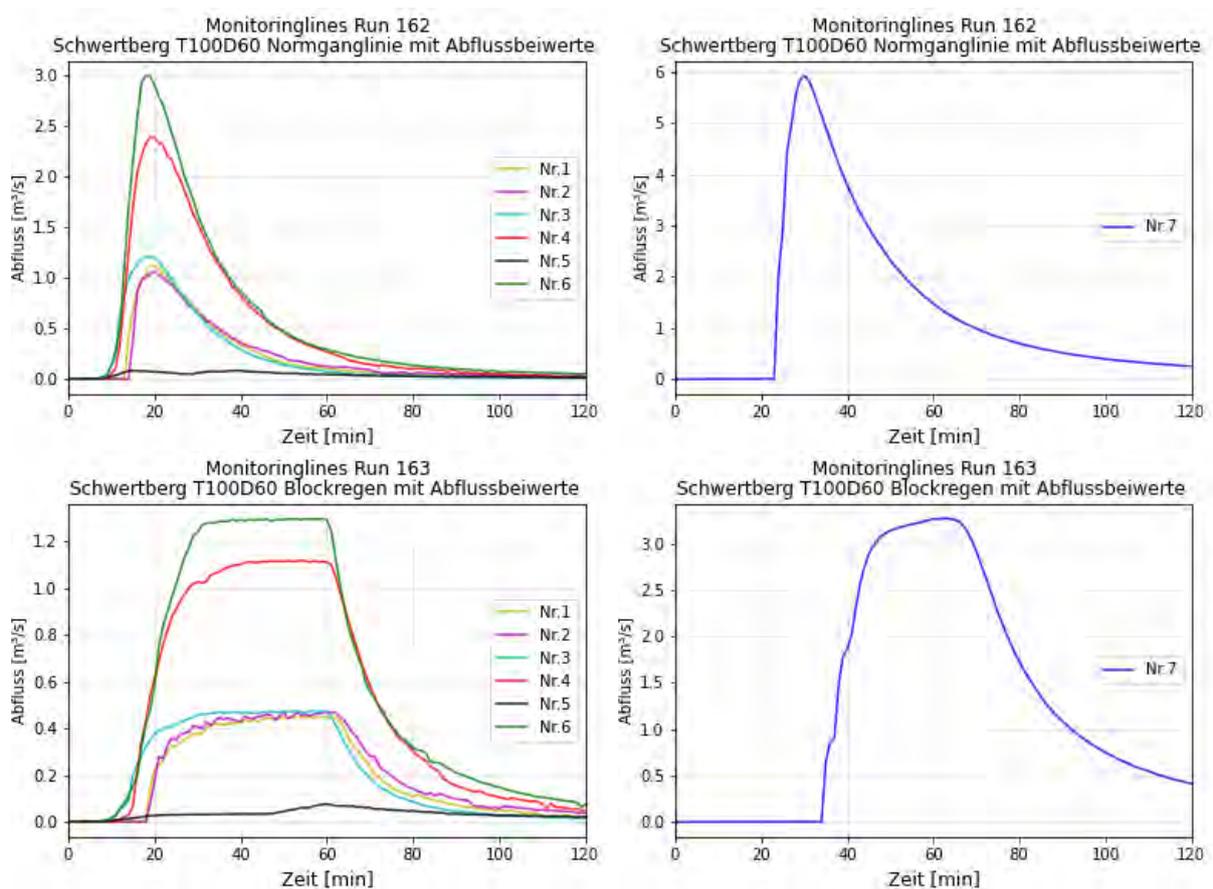


Abbildung 3.29 Darstellung der Abflüsse an den untersuchten Monitoringlines der Simulationen Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte (ψ_{const}) (oben) und Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte (ψ_{const}) (unten)

Die Abbildungen 3.29 zeigen die Volumenströme der Simulationen Run162 (oben) und Run163 (unten) während der zweistündigen Simulationsdauer an den in Abbildung 3.27 für Schwertberg dargestellten Monitoringlines. Dabei wurden die Monitoringlines 1 bis 6

jeweils auf der linken Seite abgebildet und die Monitoringline Nr.7, auf Grund deren sehr viel höheren Abflusses in der auf der rechten Seite befindlichen Grafik dargestellt.

Betrachtet man die Abflussganglinien 1 bis 7 der Simulation 162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte), so fallen deren unterschiedliche maximalen Abflüsse auf. Setzt man die maximalen Abflüsse der einzelnen Monitoringlines in Zusammenhang mit den jeweiligen Einzugsgebietsflächen, so lässt sich eine Abhängigkeit der Größe der zufließenden Fläche und dem daraus resultierenden maximalen Abfluss erkennen. So weist die Monitoringline Nr. 2 ein EZG von 7 ha, die Monitoringline Nr. 4 11 ha und die Monitoringline Nr.7 44 ha auf. Der Abfluss wird jedoch neben der Einzugsgebietsgröße stark von den im Einzugsgebiet angesetzten Abflussbeiwerte beeinflusst. So weist die Monitoringline Nr. 3 ein verhältnismäßig geringes EZG von 3,7 ha auf. Der sich jedoch einstellende Abfluss übersteigt die Monitoringline Nr.1 und Nr. 2 mit jeweils einem EZG von 7 ha und 7,5 ha. Grund dafür ist das aus vorwiegend landwirtschaftlichen Flächen bestehende EZG der Monitoringline Nr. 3, welche auf Grund der angenommen Verschlammung sehr hohe Abflussbeiwerte aufweisen (siehe Abbildung 3.19). Als weiteres Beispiel ist die Monitoringline Nr. 5 zu nennen, die ein im Vergleich zu den in Schwertberg untersuchten Monitoringlines ein mittleres Einzugsgebiet von 5,6 ha aufweist, jedoch mit Abstand den geringsten Abfluss besitzt. Der Grund für den auffallenden geringen Abfluss bei Monitoringline Nr. 5 bei einem EZG von 5,8 ha ist das forstwirtschaftlich geprägte EZG welches geringe Oberflächenabflussbeiwerte aufweist (siehe Abbildung 3.19). Die Aussagen die in Bezug auf die unterschiedlichen maximalen Abflüsse für Run162 gemacht wurden, zeigen bei einer Betrachtung von Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte) ebenfalls Gültigkeit.

Vergleicht man die maximalen Abflüsse der Monitoringlines aus Run162 und Run163, so zeigt sich ein gravierender Unterschied in den Abflussspitzen. Die Abflussspitzen der Simulationsergebnisse bei dem im Modell angewendetem Blockregen weisen im Mittel nur die Hälfte der Spitzenabflüsse bei einer Anwendung der anfangsbetonten Normganglinie auf. So zeigt die Monitoringline Nr. 6 beispielsweise bei einer Anwendung der Normganglinie im Maximum $3\text{ m}^3/\text{s}$, wohingegen der Blockregen einen maximalen Abfluss von lediglich $1,3\text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Betrachtet man die Monitoringline Nr. 7 so erreicht der Spitzenabfluss bei der Normganglinie (Run162) $6\text{ m}^3/\text{s}$ wohingegen der Blockregen (Run163) sein Maximum bei $3,3\text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Bei der Betrachtung der restlichen Monitoringlines ergibt sich ein sehr ähnliches Bild, bei dem die Normganglinie im Mittel einen doppelt so großen Spitzenabfluss aufweist als der Blockregen bei ansonsten gleichen Eingangsparametern im Niederschlags-Abfluss-Modell.

Vergleicht man des Weiteren den Verlauf der Abflussganglinie von Run162 mit Run16, so zeigen sich klare unterscheide in der Form sowie im Verlauf der Abflüsse, bei im Modell implementierten selber Niederschlagssummen. Ein Vergleich innerhalb der Simulationen

(Run162 und Run163) zeigt sich ein durchwegs ähnlicher Verlauf der Ganglinien bei unterschiedlich ausgeprägten Abflussspitzen. Die Abflussganglinien in Run162 weisen auf Grund der zugrunde gelegten anfangsbetonten Normganglinie einen zum Intensitätsmaximum der Niederschlagsganglinie (max. Intensität nach 10 min) verzögerten Verlauf mit raschem Anstieg sowie schnellen Abfall der Abflussganglinien auf. Das Abflussmaximum bei den Monitoringlines Nr. 1 bis Nr. 6 liegt ungefähr bei 15 min. Monitoringline Nr. 7 erreicht ihr Maximum nach 30 min, was durch das größere EZG sowie der Tieflage und dem damit verbunden längeren Fließweg und einer dadurch bedingten höheren Konzentrationszeit erklärt werden kann (siehe Kapitel 3.4.3). Die Abflussganglinien in Run163 weisen durch die Anwendung des Blockregens einen sich deutlich von den Abflussganglinien der Normganglinie unterscheidenden Verlauf auf. Die Abflussspitzen werden bei Run163 bei Monitoringline Nr. 1 bis Nr. 6 im Schnitt nach 30 min erreicht wohingegen die Monitoringline Nr. 7 das Maximum erst im Bereich von 60 min aufweist. Des Weiteren ist die abgeflachte Abflusskurve auffallend, die sich auf Grund der konstanten Intensität (Blockregen) nach dem Erreichen der Konzentrationszeit (siehe Kapitel 3.4.3) einstellt und bis zum Niederschlagsende nach 60 min konstant mit gleichem Abflussvolumen andauert. Nach dem Ende des Niederschlagsereignisses, welches in der Simulation auf der Grundlage des angewendeten 100 jährlichen 60 minütigen Ereignisses (T100D60) nach 60 min stoppt ist ebenfalls ein Bruch sowie ein schneller Abfall der Abflussganglinie zu beobachten. Des Weiteren ist zu beobachten, dass nach 120 min Simulationszeit vor allem bei Monitoringline Nr.7 und hier bei Run163 der Abfluss aus dem Einzugsgebiet noch nicht wieder den Ausgangswert von $0 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht hat. Da zu diesem Zeitpunkt im gesamten Einzugsgebiet keine für die Hangwassermodellierung und hier im speziellen für die Erstellung von Hangwassergefahrenkarten essentiellen maximalen Wasserstände und maximalen Fließgeschwindigkeiten mehr zu erwarten sind, stellt dies keine Fehlerquelle da. Grundsätzlich führt eine zu kurz gewählte Simulationsdauer bei der Niederschlags-Abfluss-Modellierung sehr wohl zu Fehlern bei den maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten, worauf bei der Oberflächenabflussmodellierung bedacht zu nehmen ist. Die Simulationsdauer ist in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße zu wählen.

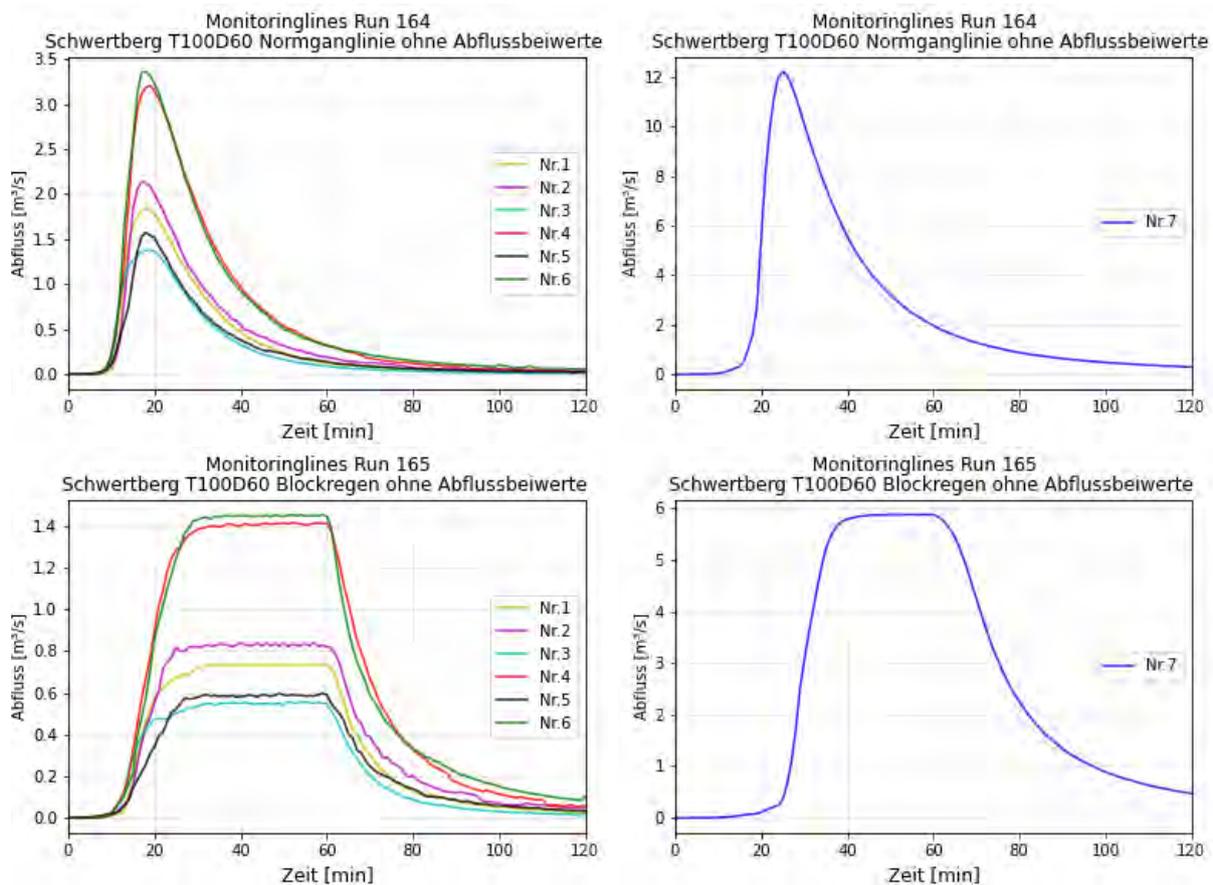


Abbildung 3.30 Darstellung der Abflüsse an den untersuchten Monitoringlines der Simulationen Run164 (Normganglinie ohne Abflussbeiwerte (oben) und Run165 (Blockregen ohne Abflussbeiwerte (unten)

Die Abbildungen 3.30 zeigen die Volumenströme der Simulationen Run164 (oben) und Run165 (unten) während der zweistündigen Simulationsdauer an den in Abbildung 3.27 für Schwertberg dargestellten Monitoringlines. Dabei wurden die Monitoringlines 1 bis 6 jeweils auf der linken Seite abgebildet und die Monitoringline Nr.7, auf Grund deren sehr viel höheren Abflusses in der auf der rechten Seite befindlichen Grafik dargestellt.

Die bereits für die Abflussganglinien aus Run162 und Run163 (siehe 3.29) getroffenen Aussagen haben ebenfalls Gültigkeit für die Abflussganglinien aus Run164 und Run165. Unterschiede ergeben sich auf Grund der in Run162 und Run163 im Modell berücksichtigten Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz bzw. die in Run164 und Run165 im Modell nicht implementierten Abflussbeiwerte, wodurch die gesamte Niederschlagssumme im Einzugsgebiet als Oberflächenabfluss abfließt.

Vergleicht man die Abflussganglinie der Monitoringline Nr. 5 der Simulationen Run162/163 mit den Simulationen aus Run164/165, so fällt deren unterschiedliche Ausprägung auf. Monitoringline Nr. 5 von Run164/165 zeigen bei einer Gegenüberstellung mit Run162/163 einen deutlich ausgeprägteren Verlauf sowie einen deutlich höheren maximalen Spitzenabfluss. Grund dafür ist der in der Abflussbeiwertkarte Oberösterreich

ausgewiesene sehr geringe Abflussbeiwert für forstwirtschaftlich genutzte Flächen. Vergleicht man die Monitoringlines Nr.1 bis Nr.4 und Nr.6 der Simulationen Run162/163 mit den Simulationen Run164/165, so sind die höheren maximalen Abflussspitzen der Simulationen Run164/165 auffallend, wobei sich die Form der Kurven und deren Zeitpunkte der maximalen Abflüsse kaum verändern. Die Monitoringline Nr.7 zeigt bei einem Vergleich der Abflussganglinien aus Run162/163 und Run164/165, dass der maximale Abfluss bei der im Modell angewandten Normganglinien aus Run162 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ im Gegensatz zu $12 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Run164 ergibt. Bei einem Vergleich der Abflussspitzen der Monitoringline Nr. 7 bei dem angewendeten Blockregen aus Run163 ($3,3 \text{ m}^3/\text{s}$) und Run165 ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) zeigt sich ebenfalls ein deutlich höherer Abfluss der Simulationen, bei welchen keine Abflussbeiwerte berücksichtigt wurden. Auf Grund der in den Simulationen Run164/165 nicht berücksichtigten Abflussbeiwerte ist der maximale Abfluss lediglich von der Einzugsgebietsgröße abhängig. Desto größer ein Einzugsgebiet ist umso größer auch der sich aus dem Oberflächenabfluss ergebende Volumenstrom. Dieser Zusammenhang ist aus Abbildung 3.30 deutlich sichtbar.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der deutlich verzögerte eintretende Oberflächenabfluss bei der Monitoringline Nr. 7 bei einem Vergleich zwischen Run162/163 und Run164/165. Bei Run164 ist der erste Oberflächenabfluss nach 10 min und bei Run165 nach 20 min zu beobachten, wohingegen der Oberflächenabfluss bei Run162 erst nach 25 min und bei Run163 nach 35 min einsetzt. Der Oberflächenabfluss setzt deshalb an der Monitoringline Nr. 7 bei Run162/163 um 15 min später ein als bei Run164/165. Auf Grund der Tatsache, dass sich die Simulationen bis auf die Verwendung bzw. die nicht Verwendung der Abflussbeiwerte nicht unterscheiden muss hier auch der Grund für das verzögerte Eintreten des Oberflächenabflusses liegen.

3.5.4 Gegenüberstellung Realereignis und Simulation

Das nachstehende Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse der Intensitätsverteilung (anfangsbetonte Normganglinie) und Blockniederschlag (Rechteckverteilung) auf der Grundlage von Dokumentationen, welche durch Begehungen, Augenzeugenberichte sowie von Einsatzkräften aufgenommen wurden und nachfolgend mit Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen verglichen werden. Schwertberg wurde bereits mehrfach aus dem im Norden der Gemeinde liegenden und landwirtschaftlich intensiv genutztem Einzugsgebiet von Oberflächenabfluss beaufschlagt. Die nachstehenden Bilddokumente stammen von 8. bis 11. Juni 2011, wo Poneggen ein Ortsteil in Schwertberg überschwemmt wurde, sowie von 24. Juli 2016 wo das gesamte Gemeindegebiet Schwertbergs von Hangwasser betroffen war. An dieser Stelle sei ausdrücklich festgehalten, dass es sich bei den im Modell angewendeten Parametern um keine Nachrechnung der auf den Fotos zu sehenden Realereignissen handelt. Wobei Schwertberg 2016 von einem einzelnen starken Unwetter mit einem Wiederkehrintervall von hundert Jahren beaufschlagt wurde und im Modell der für

Schwertberg ausgewiesene 100 jährliche 60 minütige Bemessungsniederschlag zur Anwendung gekommen ist.

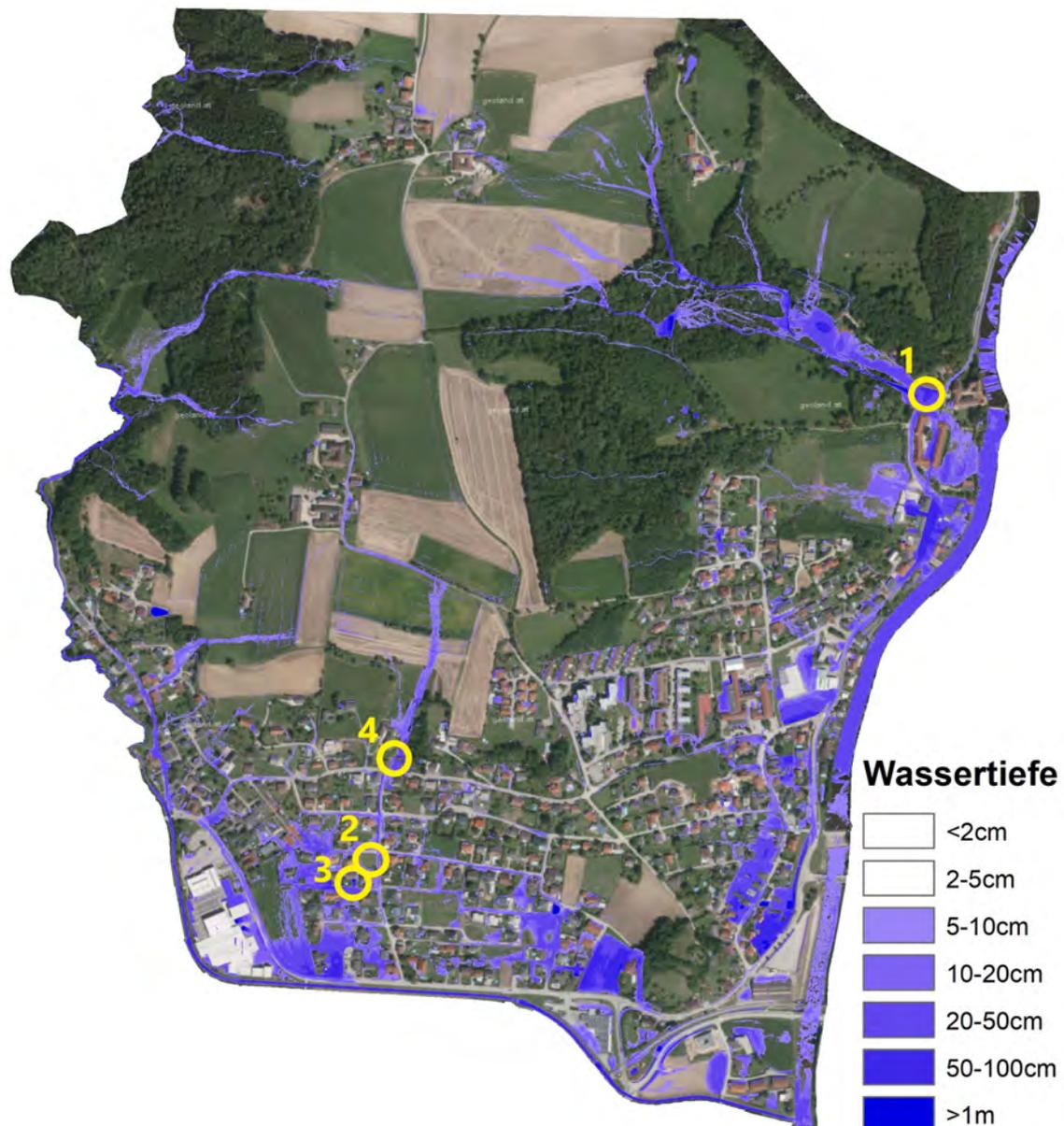


Abbildung 3.31 Übersicht über die Standorte bei denen eine Gegenüberstellung der Realereignisse und der Simulationsergebnisse von Normganglinie und Blockregen durchgeführt wurde

Die Abbildung 3.31 zeigt die Standorte der in weiterer Folge gegenübergestellten Simulationsergebnisse aus Run162 (Normganglinie mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})) und Run163 (Blockregen mit Abflussbeiwerte (ψ_{const})) mit Bilddokumente von Realereignissen auf deren Grundlage versucht wurde Anschlagmarken der maximalen Wasserstände zu bestimmen. Für den Vergleich der Fließgeschwindigkeiten aus den Simulationsergebnissen mit der Realität sind keine Echtzeitmessdaten vorhanden, diese können daher nur qualitativ anhand der Bilder abgeschätzt und zugeordnet werden.

Standort 1



Abbildung 3.32 STANADORT1 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2016 aus Schwertberg (links) Der gelbe Kegel markiert die Anschlagmarke des Wasserstands dargestellt am Bild rechts [Achleitner et al., 2017]

Abbildung 3.32 zeigt einmal eine Ereignisaufnahme aus der Hangwasserüberflutung vom 24. Juli 2016 aus Schwertberg, wo das gesamte Gemeindegebiet überflutet wurde. Der Oberflächenabfluss beaufschlagte Schwertberg aus den Hügeln im Norden des Gemeindegebiets welche einer intensiven landwirtschaftlichen sowie forstwirtschaftlichen Nutzung unterliegen. Das rechte Bild zeigt eine Anschlagmarke von 88 cm aus dem Realereignis.

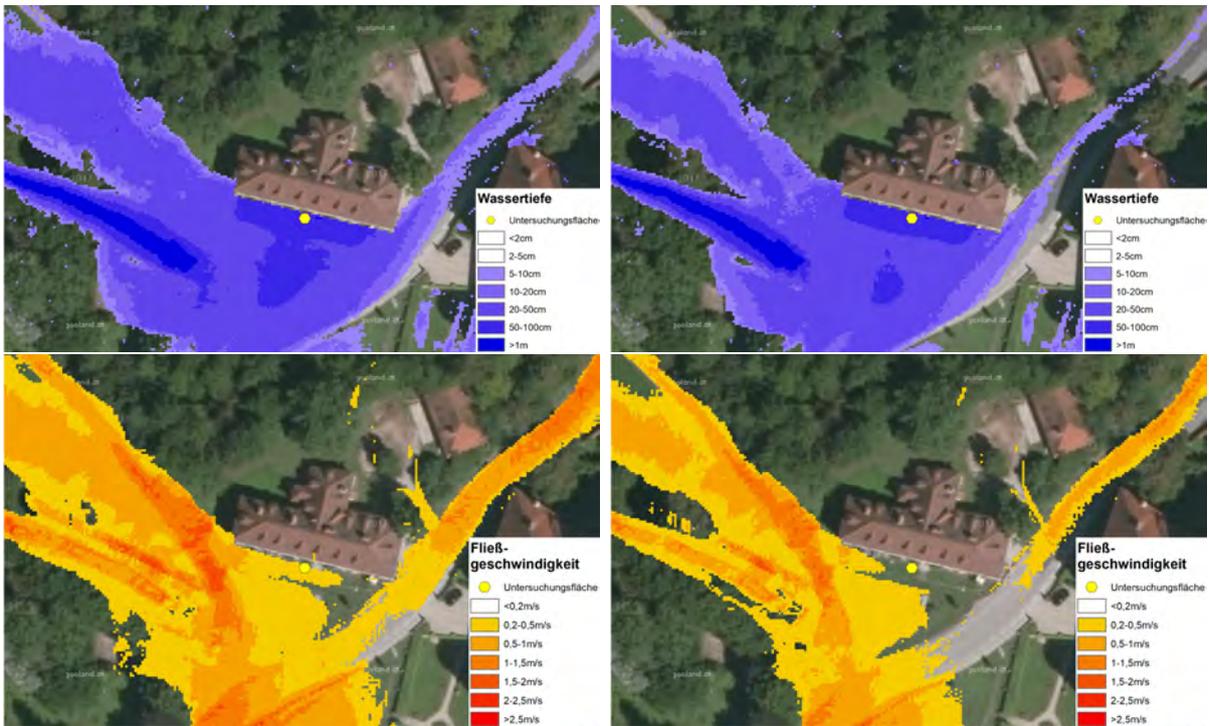


Abbildung 3.33 STANADORT1 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.32

Abbildung 3.33 zeigt die maximalen Wasserstände sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten aus den Simulationen Run162 und Run163 anhand eines Detailausschnitts. Der

gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.32. Auf der Grundlage eines rein visuellen Vergleichs zwischen der Normganglinie (Run162) und Blockregen (Run163) lässt sich eine ausgeprägtere Überflutungsfläche bei Run162 erkennen. Der sich in Run162 einstellende See vor dem am Kartenausschnitt sichtbaren Gebäude weist ebenfalls eine flächigere Ausbreitung sowie höhere maximale Wasserstände als Run163 auf. Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich bei einem Vergleich der maximalen Fließgeschwindigkeiten. Die Simulation Run162 bei angewendeter Intensitätsverteilung (Normganglinie) zeigt höhere wie auch flächigere ausgeprägte maximale Fließgeschwindigkeiten als die Simulation Run163 der Rechteckverteilung (Blockregen). Die maximalen Wassertiefen wie auch die maximalen Fließgeschwindigkeiten der angewendeten Normganglinie zeigen in Summe ein differenzierteres Bild der vor Ort gegebenen Hangwassersituation als die Rechteckverteilung des angewendeten Blockregens.

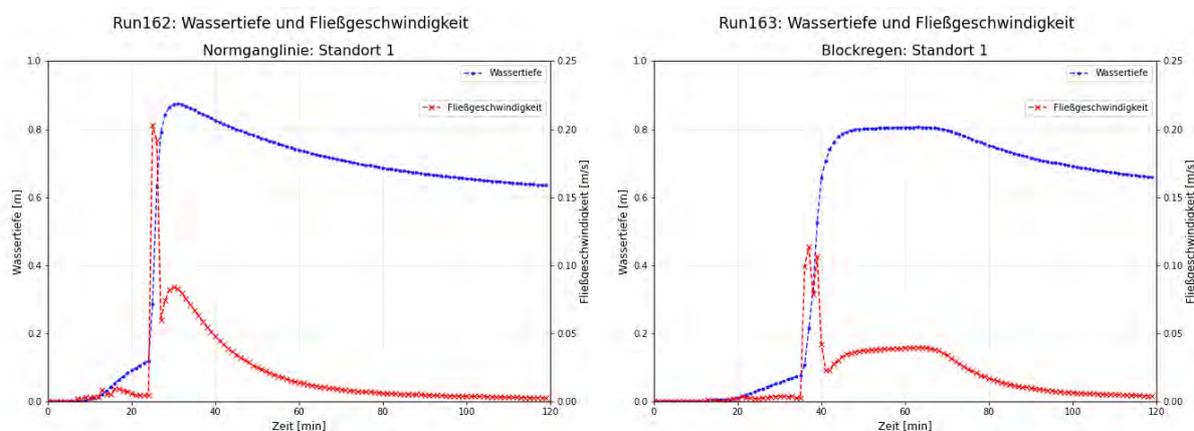


Abbildung 3.34 STANADORT1 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)

In den Hangwassergefahrenkarten werden, wie bereits beschrieben, die maximalen Abflusstiefen sowie Fließgeschwindigkeiten als zeitlich kumuliertes Maximum ausgewiesen. Diese Darstellung lässt daher keine Rückschlüsse auf den zeitlichen Verlauf der Wasserstandhöhen und Fließgeschwindigkeiten während der Simulationsdauer zu. Der Simulationsgraph 3.34 zeigt deshalb die zeitliche Entwicklung auf der Grundlage von minütig aus dem Modell extrahierten Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten an den in Abbildung 3.32 und 3.33 gelb ausgewiesenen Punkten. Der Graph zeigt hierfür auf der x-Achse die Zeit in [min], auf der linken y-Achse die zugehörigen Werte der Abflusstiefen in [m] sowie auf der rechten y-Achse die errechneten Abflussgeschwindigkeiten in [m/s]. Der Wert t_0 auf der x-Achse stellt des Weiteren den Startpunkt des Niederschlags dar, der bis zur Minute 60 andauert. Die gesamte Simulationsdauer beträgt 2 Stunden (120 min).

Die Abbildung 3.34 zeigt den zeitlichen Verlauf der Abflusstiefen und Abflussgeschwindigkeiten für die simulierte Normganglinie (links) und für den im Modell berücksichtigten Blockregen (rechts), an dem selben im Gelände befindlichen Punkt (gelber Kegel und

Punkt aus Abbildung 3.32 und 3.33). Bei einem Vergleich der Graphen fällt deren unterschiedlicher Verlauf sowie deren abweichende Maxima auf. Die Wassertiefe von Run162 (links) besitzt ein ausgeprägtes Maximum von 87 cm wohingegen Run163 (rechts) einen langgezogenen Verlauf mit der maximalen Wassertiefe von 81 cm aufweist. Beide Verläufe der minutigen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten zeigen nach einem verzögertem eintreten von Oberflächenabfluss einen abrupten Anstieg der Abflusstiefe und Fließgeschwindigkeit. Wobei der Verlauf der Fließgeschwindigkeit in Run162 (Normganglinie) mit einem Maximum von 0,2 m/s deutlich höher ausfällt als bei Run163 (Blockregen) mit 0,11 m/s. Run162 wie auch Run163 zeigen bei einer Betrachtung der Fließgeschwindigkeit ein deutlich ausgeprägtes Maximum gefolgt von einer zweiten geringer ausfallenden Spitze. Das schlagartig eintretende Maximums der Fließgeschwindigkeit sowie der gleichzeitig steile Anstieg der Wassertiefe markieren das Auftreffen der Flutwelle aus dem Einzugsgebiet auf der Untersuchungsfläche. Wie bereits beschrieben ist die auftreffende Welle sowohl in der Simulation der Normganglinie (162) sowie in der des Blockregens (163) sichtbar. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich jedoch beim Zeitpunkt des Eintretens. Bei Run162 tritt der abrupte Anstieg von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit nach 25 min nach Beginn der Simulation, welche ebenfalls den Niederschlagsbeginn darstellt auf. Run163 zeigt jedoch einen deutlich später eintretenden Anstieg von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit nach rund 35 min. Bei einem Vergleich des Zeitpunkts der maximalen Wassertiefe und maximalen Fließgeschwindigkeit mit dem Spitzenabfluss der Monitoringline Nr. 7 aus Abbildung 3.29, die sich räumlich unweit voneinander befinden, zeigt sich ein sehr ähnliches und gut übereinstimmendes Bild betreffend Eintrittszeitpunkt der Flutwelle mit dem maximalen Abfluss. Die maximale Wassertiefe tritt bei Run162 in Minute 32 und in Run163 in Minute 64 auf. Die Fließgeschwindigkeit erreicht bei Run162 nach 26 min und bei Run163 nach 38 min ihr Maximum.

Vergleicht man die Modellergebnisse mit der Anschlagmarke von dem Ereignis aus 2016 so ist eine sehr gute Übereinstimmung sowohl von Run162 (Normganglinie) wie auch von Run163 (Blockregen) festzustellen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die im Modell angewendete Niederschlagssumme des Bemessungsniederschlags (T100D60) nur in der Theorie der Niederschlagssumme bei dem in Schwertberg niedergegangenen konvektiven Gewitters mit ebenfalls einer statistischen Auftretenswahrscheinlichkeit von 100 Jahren entspricht. Die mit der Simulation Run162 (Normganglinie) erzielte Realitätsnähe mag verblüffen ist jedoch hinsichtlich dessen Ergebnis unumstritten.

Standort 2



Abbildung 3.35 STANADORT2 Ereignisaufnahmen aus dem Jahr 2011 aus Schwertberg/Poneggen, Der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle

Abbildung 3.35 zeigt während und nach dem Ereignis aufgenommene Aufnahmen aus der Hangwasserüberflutung vom 9. bis 11. Juni 2011 bei dem Poneggen ein Ortsteil in Schwertberg überflutet wurde. Bei der Oberflächenabfluss generierenden Fläche handelt es sich um die im Norden des Gemeindegebiets befindlichen Hügeln, welche intensiv landwirtschaftlich genutzt werden. Im linken unteren Bild ist durch einen gelben Kegel die im weiteren untersuchte Fläche (0,5 x 0,5 m Zelle) gekennzeichnet. Das rechte untere Bild zeigt eine auf Grund des Oberflächenabflusses entstandene Verschmutzung an der Hauswand. Die Verschmutzung an der Hauswand weist ungefähr 40 cm auf und kann als Anschlagmarke bzw. für einen Vergleich zwischen Modell und Realität verwendet werden. Die Verwendung solcher Anschlagmarken sollte jedoch kritisch hinterfragt werden. Grund dafür ist, dass Anschlagmarken die im Nachgang von Ereignissen auf Grundlage von Anhaltspunkten wie in diesem Beispiel anhand von Schmutzablagerungen gesetzt werden oftmals Irrtümern unterliegen. Ein Beispiel hierfür wäre, dass die Schmutzablagerungen nicht zwingend den wirklichen Wasserstand anzeigen, sondern durch möglichen Wellenschlag diese vermeintliche 40 cm erreicht haben. Nichtsdestotrotz sind solche Anschlagmarken wichtige und oft auch die einzigen Indikatoren um Modelle auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Denn anders wie bei Flusshochwässern (fluviale Überflutung) hat man bei Überschwemmungen aus Starkregen (pluviale Überflutung) aufgrund des hoch dynamischen zeitlichen

und räumlichen Auftretens mit verhältnismäßig geringen Abflusstiefen keine bis wenige Anschlagsmarken zur Verfügung.

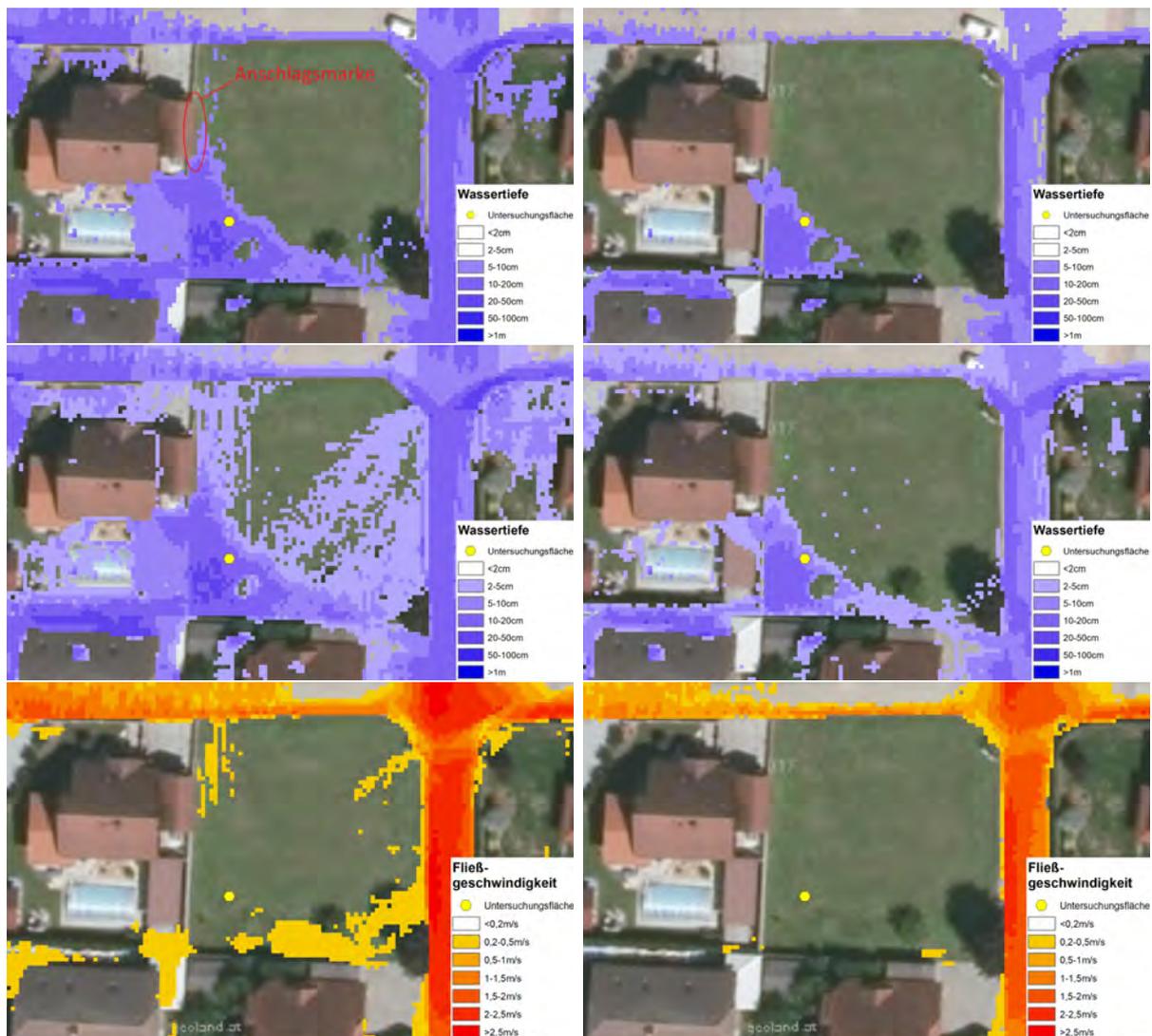


Abbildung 3.36 STANADORT2 Run162: Maximale Wassertiefen >5 cm (oben links), Maximale Wassertiefen >2 cm (Mitte links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen >5 cm (oben rechts), Maximale Wassertiefen >2 cm (Mitte rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.35

Abbildung 3.36 zeigt die maximalen Wasserstände sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten aus den Simulationen Run162 und Run163 anhand eines Detailausschnitts. Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.35. Die oberen beiden Abbildungen zeigen die Wassertiefen ab einer Wassertiefe bzw. Wasserstandhöhe von >5 cm (siehe Legende Detailkarten oben) wohingegen die sich in der Mitte befindenden zwei Detailkarten die Wasserstände bereits ab einer Wassertiefe von 2 cm einblenden. Hierbei handelt es sich lediglich um eine abweichende Symbolisierung wonach die der Kartenerstellung zugrunde gelegten Simulationsergebnisse dieselben sind. Wie bereits erläutert kommt es in der Regel bei der Niederschlags-Abfluss-Modellierung zu einer flächigen Überregung des zu betrachtenden Einzugsgebiets, wodurch die gesamte Betrachtungsfläche durch Nie-

derschlag benetzt wird und es dadurch zu Wasserständen >0 m kommt. Dadurch ist es in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung zwingend notwendig eine unter einem bestimmten Schwellenwert liegende Wassertiefe bei der Erstellung von Hangwasserkarten auszublenden. Für diesen Schwellenwert gibt es unterschiedliche Umsetzungen ab welcher Wassertiefe ein- bzw. ausgeblendet werden. Gängige Schwellenwerte sind 2 cm bzw. 5 cm, welche je nach Fragestellung und Topographie geändert werden können.

Vergleicht man die Detailkarten der maximalen Wassertiefen mit dem in Abbildung 3.35 gezeigten Abflussgeschehen, so fällt die klare Unterschätzung der Simulation Run163 (Blockregen), zu sehen in der rechten Spalte der Abbildung 3.36 auf. Des weiteren zeigt die Detailkarte mit ausgeblendeten Wassertiefen bis 5 cm aus Run162 (Normganglinie) oben links in der Abbildung 3.36 zu sehen, dass das in der Realität auftretende Abflussbild nur bedingt der Realität entspricht. Betrachtet man die Detailkarte (Mitte links) bei der Wasserstände bereits ab einer Wassertiefe von 2 cm einblendet sind, so besteht hier die größte Übereinstimmung mit der Realität sowie die am besten nachzuvollziehende Abflusssituation. Vergleicht man die maximalen Fließgeschwindigkeiten der Simulationen Run162 (unten links) und Run163 (unten rechts) so sind deutliche Unterschiede in den Simulationen zu erkennen. Bei einer Betrachtung des Südlichen Grundstückbereichs zeigt Run163 (Blockregen) maximale Abflussgeschwindigkeiten von $<0,2$ m/s (Schwellenwert der in der Hangwasserkarte ausgeblendeten Fließgeschwindigkeit). Bei Run162 zeigen sich deutlich höhere maximale Fließgeschwindigkeiten, die ebenfalls in der Abbildung 3.35 auf dem Ereignisbild zu beobachten sind.

Vergleicht man die in Abbildung 3.35 eingezeichnete Anschlagmarke mit den vorliegenden Simulationsergebnissen aus Run162/163, so ist eine tendenzielle Unterschätzung der Modellergebnisse mit der Anschlagmarke zu beobachten. Während die Anschlagmarke einen maximalen Wasserstand von ungefähr 40 cm ergibt zeigt Run163 (Blockregen) eine Wassertiefe im Bereich der Anschlagmarke von weniger als 2 cm. Run162 (Normganglinie) weist an der Hauswand der Anschlagmarke Wassertiefen von 2 cm bis 20 cm aus.

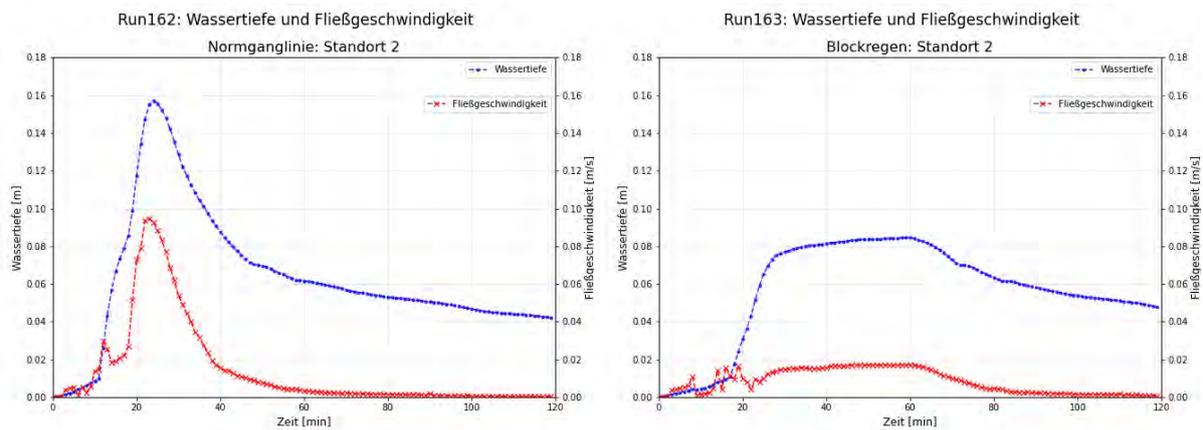


Abbildung 3.37 STANADORT2 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)

Die Abbildung 3.37 stellt den zeitlichen Verlauf der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit während der Simulationsdauer dar. Dadurch ist nicht, wie bei den Hangwasserkarten die maximale Wassertiefe und maximale Fließgeschwindigkeit und dadurch eine Momentaufnahme dargestellt, sondern eine Interpretation des zeitlichen Verlaufs von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit. Die beiden dargestellten Graphen zeigen die Simulationen Run162 (Normganglinie) (links) und die Simulation Run163 (Blockregen) (rechts) an demselben im Gelände befindlichen Punkt (gelber Kegel und Punkt aus Abbildung 3.35 und 3.36).

Bei einem Vergleich der Graphen fällt deren unterschiedlicher Verlauf sowie deren abweichende Maxima auf. Die Wassertiefe von Run162 (links) besitzt ein ausgeprägtes Maximum von 16 cm wohingegen Run163 (rechts) einen langgezogenen Verlauf mit der maximalen Wassertiefe von 8 cm aufweist. Die Fließgeschwindigkeit ist mit 0,11 m/s bei Run162 und mit 0,02 m/s bei Run163 sehr gering. Nach der anfänglich linear ansteigenden Wassertiefe und Sprüngen im Bereich sehr geringer Fließgeschwindigkeiten, setzt bei Run162 nach 10 min ein steiler Anstieg der Wassertiefe sowie bei der Fließgeschwindigkeit nach einem neuerlichen Sprung bei Minute 15 nach Ereignisbeginn ein. Run163 verhält sich dabei sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass die Sprünge der Fließgeschwindigkeiten etwas ausgeprägter sind und die Wassertiefe erst nach 17 min und die Fließgeschwindigkeit nach 22 min einen abrupten Anstieg aufweist. Dabei zeigt Run163 wie bereits angesprochen deutlich geringere Maxima bei Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit. Die maximale Wassertiefe tritt bei Run162 in Minute 25 und in Run163 in Minute 60 auf. Die Fließgeschwindigkeit erreicht bei Run162 nach 24 min und bei Run163 nach 60 min ihr Maximum.

Vergleicht man die Modellergebnisse aus Run162/163 mit dem während des Ereignis in 2011 aufgenommenen Bild (siehe Abbildung 3.35), so lässt sich die tatsächliche Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit am Untersuchungsort nur schwer abschätzen. Dazu kommt, dass

es sich bei dem Aufnahmezeitpunkt nicht zwangsläufig um den Zeitpunkt der maximalen Wasserstände bzw. Fließgeschwindigkeiten handeln muss. Ein plausibles sowie realitätsnahes Abflussgeschehen kann bei den Simulationen Run162/163 dennoch festgestellt werden.

Standort 3



Abbildung 3.38 STANADORT3 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2011 aus Schwertberg/Poneggen, der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle

Abbildung 3.38 zeigt ein während und eines nach dem Ereignis aufgenommenes Bild aus der Hangwasserüberflutung vom 9. bis 11. Juni 2011 aus Poneggen/Schwertberg. Bei der Oberflächenabfluss generierenden Fläche handelt es sich auf Grund der Nähe zum bereits untersuchten Standort 2 um das selbe im Norden des Gemeindegebiets gelegenen und intensiv landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet.

Der im rechten Bild eingezeichnete gelbe Kegel markiert die nachstehende durchgeführte Untersuchungsfläche. Des Weiteren ist eine durch Oberflächenabfluss entstandene Schmutzablagerung an der rechten Wand der Garagenabfahrt zu erkennen. Diese Anschlagmarke dient als Grundlage für eine Plausibilitätskontrolle bei einem Vergleich zwischen Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen) aus dem angewendeten Niederschlags-Abfluss-Modell und der Realität. Die Verschmutzung an der Garagenabfahrt weist eine ungefähre Höhe von 1m auf.

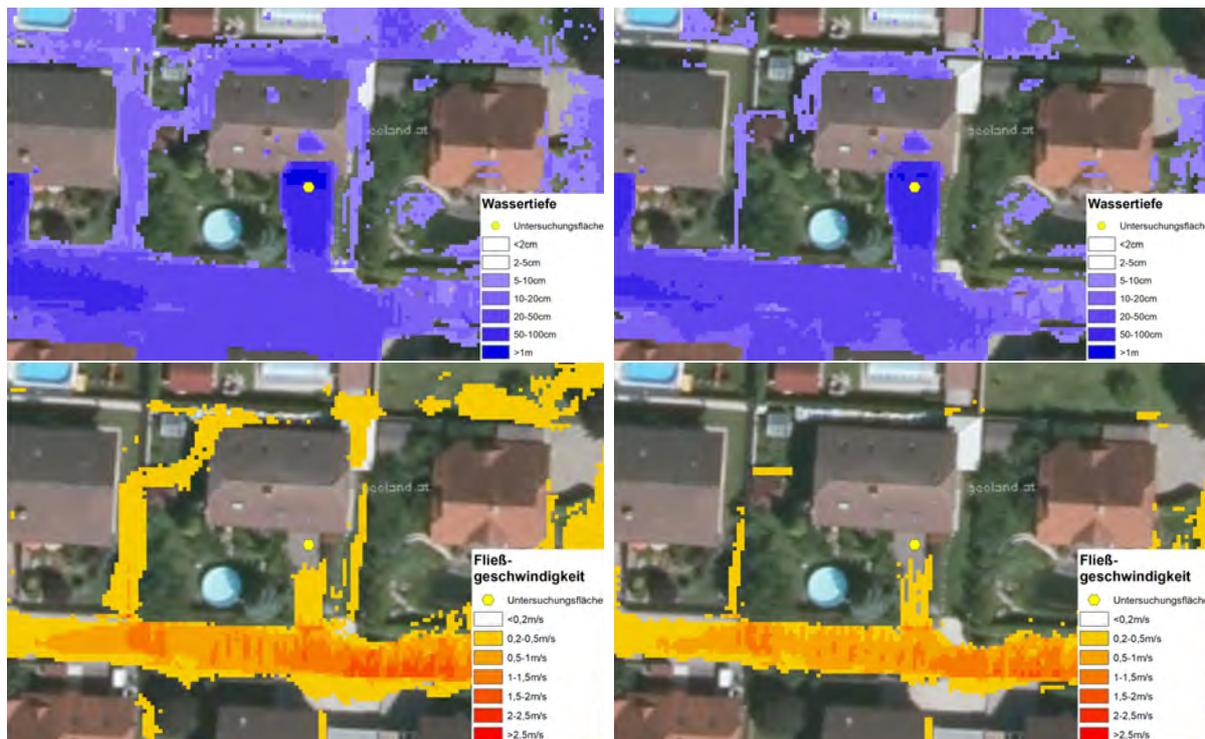


Abbildung 3.39 STANADORT3 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.38

Abbildung 3.39 zeigt einen Detailausschnitt der Hangwassergefahrenkarte mit maximalen Wasserständen sowie den maximalen Fließgeschwindigkeiten aus den Simulationen Run162 (Normganglinie) und Run163 (Blockregen). Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.38.

Vergleicht man die Detailkarten der maximalen Wassertiefen mit der in Abbildung 3.38 gezeigten Aufnahme des Realereignisses aus dem Jahr 2011, so ist eine sehr gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit der Realität festzustellen. Bei einem rein optischen Vergleich der Detailkarten von Ran162 und Ran163 zeigt sich zumindest im näheren Umfeld der Untersuchungsfläche (gelber Punkt) nahezu identische Wassertiefen und Überflutungsflächen. Einzig die Fläche in der Garagenabfahrt mit ausgewiesenen Wassertiefen >1 m besitzt in der Simulation der Normganglinie (Run162) eine flächigere Ausbreitung als bei dem im Modell angewendeten Blockregen (Run163). Bei einem Betrachten der ausgewiesenen maximalen Fließgeschwindigkeiten auf der Untersuchungsfläche ($0,5 \times 0,5$ m) zeigt sich, dass in beiden Simulationen (Run162/163) Fließgeschwindigkeiten $<0,2$ m/s auftreten und somit aufgrund des gewählten Schwellenwerts keine Fließgeschwindigkeiten in der Hangwassergefahrenkarte angegeben sind. Lediglich im Zufahrtsbereich der Garage sind im Modell Fließgeschwindigkeiten $>0,2$ m/s gegeben und dadurch in der Karte farblich hinterlegt. Bei einem Vergleich dieses Bereichs zwischen Normganglinie (Run162) und Blockregen (Run163) zeigen sich sehr ähnliche maximale Fließgeschwindigkeiten von $0,2$ m/s bis $0,5$ m/s, wobei eine leicht abgeänderte Flächenausbreitung zu kennen ist.

Vergleicht man die in Abbildung 3.38 eingezeichnete Anschlagmarke mit den vorliegenden Simulationsergebnissen aus Run162/163 so ist eine sehr gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit der Realität zu beobachten. Während die Anschlagmarke einen maximalen Wasserstand von ungefähr 100 cm ausweist, zeigt Run162 (Normganglinie) und Run163 (Blockregen) eine Wassertiefe im Intervall von 50 cm bis 100 cm im Bereich der Untersuchungsfläche.

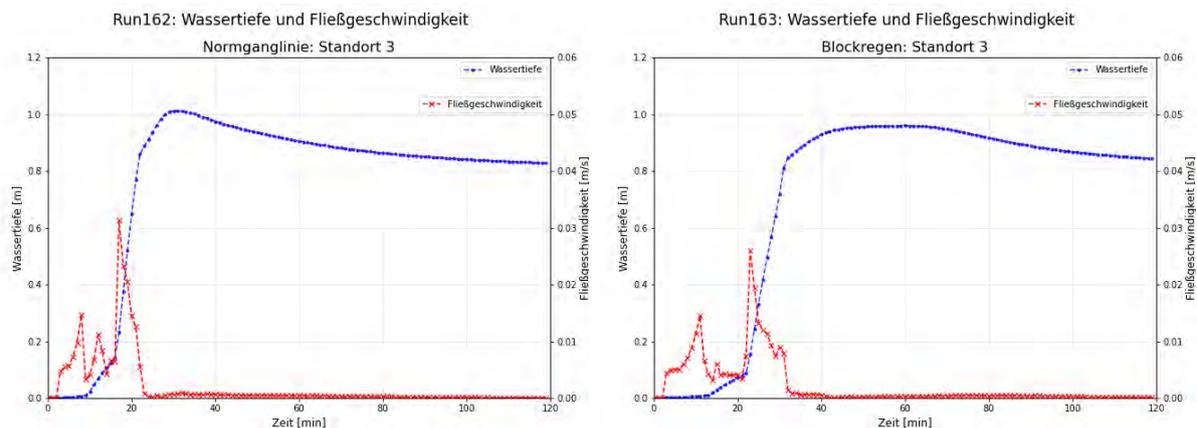


Abbildung 3.40 STANADORT3 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)

Die Abbildung 3.40 stellt den zeitlichen Verlauf der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit an dem im Gelände befindlichen gelben Kegel (siehe Abbildung 3.38) bzw. gelben Punkt (siehe Abbildung 3.39) während der Simulationsdauer, dar.

Bei einem Vergleich der Graphen fällt deren sehr ähnlicher Verlauf sowie deren kaum abweichende Maxima von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit auf. Die Wassertiefe von Run162 (links) besitzt ein Maximum von 100 cm wohingegen Run163 (rechts) eine maximale Wassertiefe von 96 cm aufweist. Die Fließgeschwindigkeit ist mit 0,03 m/s bei Run162 und mit 0,026 m/s bei Run163 sehr gering bzw. kaum existent. Beide Graphen der minütigen aufgezeichneten Wassertiefen zeigen nach einem verzögertem Eintreten von Oberflächenabfluss eine kurzzeitig lineare ansteigende Wassertiefe gefolgt von einem steilen Anstieg der Wassertiefen. Die Fließgeschwindigkeiten der Simulationen zeigen von Beginn an Sprünge in deren Verlauf und nach dem Erreichen des Maximums einen stark abfallenden gegen null gehende Entwicklung auf. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf so tritt der steile Anstieg der Wassertiefe bei Run162 (Normganglinie) nach 15 min und bei Run163 (Blockregen) etwas später nach 22 min auf. Die maximale Wassertiefe wird bei Run162 in Minute 32 und in Run163 in Minute 60 auf. Die Fließgeschwindigkeit erreicht bei Run162 nach 18 min und bei Run163 nach 24 min ihr Maximum und ist nahezu null nach 23 min (Run162) und bei Run163 nach 34 min.

Vergleicht man die Modellergebnisse aus Run162/163 mit dem während des Ereignis in 2011 aufgenommenen Bild (siehe Abbildung 3.38), so lässt sich die tatsächliche Wassertiefe am Untersuchungsort mit ungefähr 100 cm abschätzen. Die Fließgeschwindigkeit ist in der Realität nach einer anfänglich leichten Erhöhung auf Grund der Verfüllung der Garagenabfahrt als sehr gering bzw. am Untersuchungspunkt als nahezu null einzustufen. Der Vergleich zwischen Wirklichkeit und Modell zeigt ein überaus plausibles sowie realitätsnahes Abflussgeschehen von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit bei den Simulationen Run162/163.

Standort 4



Abbildung 3.41 STANADORT4 Ereignisaufnahme aus dem Jahr 2016 aus Schwertberg, Der gelbe Kegel markiert die Untersuchungsstelle

Abbildung 3.41 zeigt Aufnahmen während und nach der Hangwasserüberflutung vom 8. Juni 2011 in Poneggen einem Ortsteil von Schwertberg. Bei der Hangwasser generierenden Fläche handelt es sich um die im Norden des Gemeindegebiets befindlichen landwirtschaftlich intensiv genutzten Hänge. Das die Untersuchungsfläche beaufschlagende Einzugsgebiet umfasst 11 ha.

Im rechten Bild ist durch einen gelben Kegel die untersuchte Fläche (0,5 x 0,5 m Zelle) gekennzeichnet. Das linke untere Bild zeigt durch Oberflächenabfluss entstandene Verschmutzungen an der Gebäuderückseite. Die Verschmutzung an der Gebäudewand weist ungefähr an der niedrigsten Stelle 50 cm auf. Das Gebäude befindet sich direkt in der vor

Ort gegebenen Tiefenlinie und stellt dadurch im Ereignisfall ein Abflusshindernis dar. Die Verschmutzung weist auf Grund des Wellenschlags des anprallenden Hangwassers keine einheitliche Höhe auf und ist daher als Anschlagmarke nur bedingt verwendbar. Für eine grundsätzliche Überprüfung der Plausibilität des Modells mit der Wirklichkeit kann die erhobene Anschlagmarke dennoch verwendet werden.

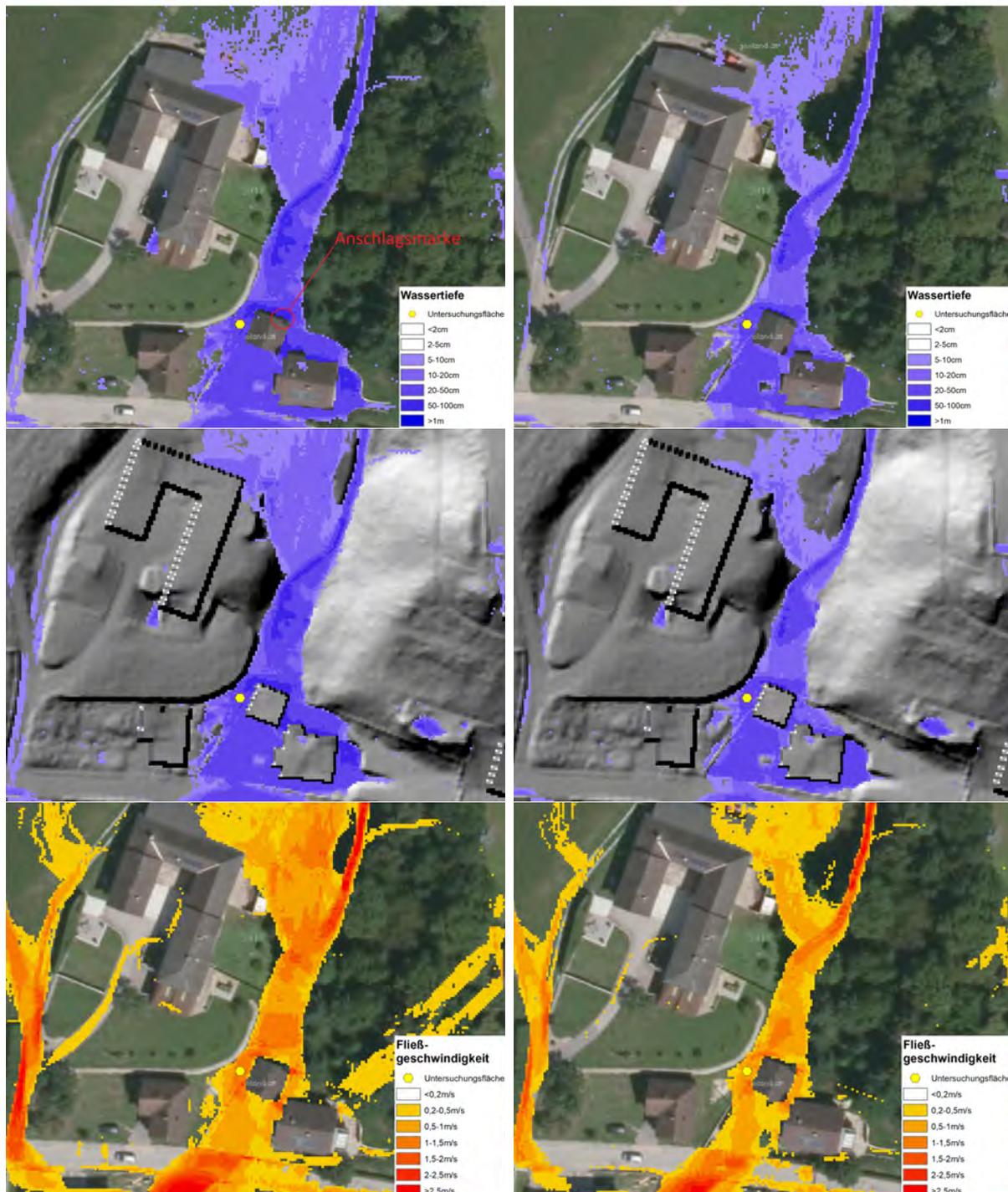


Abbildung 3.42 STANADORT4 Run162: Maximale Wassertiefen (oben links), Maximale Wassertiefen plus Hillshade (Mitte links), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten links); Run163: Maximale Wassertiefen (oben rechts), Maximale Wassertiefen plus Hillshade (Mitte rechts), maximale Fließgeschwindigkeiten (unten rechts); Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.41

Abbildung 3.42 zeigt die maximalen Wasserstände sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten eines Detailausschnittes aus den Simulationen Run162 und Run163. Der gelbe Punkt markiert den gelben Kegel aus Abbildung 3.41.

Die oberen beiden Abbildungen zeigen die Wassertiefen ab einem Wasserstand von >5 cm. Die sich in der Mitte befindenden zwei Detailausschnitte zeigen den selben Bereich sowie dieselben Wasserstände aus den beiden oberen Abbildungen, mit dem Unterschied, dass der Hangwassergefahrenkarte nicht wie gehabt das Orthofoto, sondern das den Simulationen zu Grunde liegende digitale Geländemodell als Abgeleitetes Hillshade bzw. auch Schummerung genannt, zugrunde gelegt ist. Auf Grund der vor Ort gegebenen komplexen Topographie, die auf Grundlage des Orthofotos nur unzureichend erkennbar ist, wurden die Oberflächenabflüsse ebenfalls mit dem Hillshade dargestellt und hierdurch zu einem besseren Verständnis des Geländes beitragen soll. Die unteren beiden Abbildungen zeigen die während der Simulationsdauer von zwei Stunden maximal auftretenden Fließgeschwindigkeiten.

Vergleicht man die Detailkarten der maximalen Wassertiefen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten rein visuell mit dem in Abbildung 3.41 gezeigten Abflussgeschehens, so ist eine gute Übereinstimmung der Simulationen mit der Realität festzustellen.

Bei einem Vergleich der maximalen Wassertiefen der Simulationen Run162 (oben, mitte links) und Run163 (oben, mitte rechts) so lässt sich eine ähnliche Ausbreitung der Überschwemmungsflächen feststellen, wobei Run162 einen etwas flächigeren Abfluss aufweist. Die größten Unterschiede bei einem Vergleich der beiden Simulationen zeigen die maximalen Wassertiefen, die bei der angewendeten Normganglinie höher als bei dem im Modell angewendeten Blockregen ausfallen. Das beschriebene Abflussgeschehen auf Grundlage der Normganglinie zeigt sowohl bei den maximalen Wasserständen wie auch bei den maximalen Fließgeschwindigkeiten ein differenzierteres Bild des Oberflächenabflusses.

Vergleicht man die in Abbildung 3.41 eingezeichnete Anschlagmarke mit einer ausgewiesenen Wassertiefe von ungefähr 50 cm, mit den vorliegenden Simulationsergebnissen aus Run162/163, so weist die Simulation an der Stelle der Anschlagmarke bei der angewendeten Normganglinie eine maximale Wassertiefe von 60 cm und die des Blockregens 43 cm auf. Die am Punkt der Anschlagmarke auftretende maximale Fließgeschwindigkeit bei Run162 (Normganglinie) beträgt 0,34 m/s und bei Run163 (Blockregen) 0,18 m/s. Beide Simulationsergebnisse zeigen, somit eine plausible maximale Wassertiefe wohingegen keine fundierte Aussage über die in der Realität auftretenden maximalen Fließgeschwindigkeiten auf Grund fehlender Anhaltspunkte getroffen werden kann.

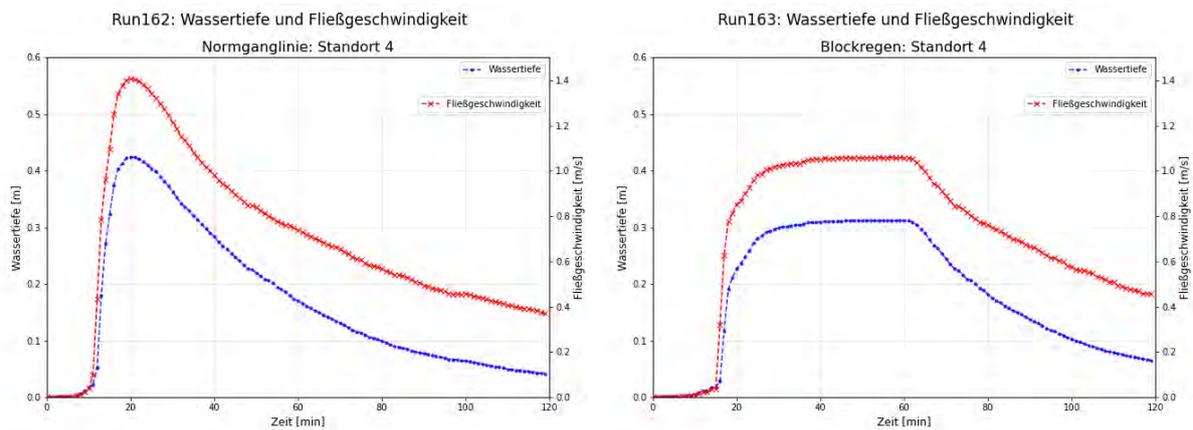


Abbildung 3.43 STANADORT4 Normganglinie(Run162): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (links), Blockregen(Run163): zeitlicher Verlauf der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten (rechts)

Die Abbildung 3.43 stellt den zeitlichen Verlauf der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit während der Simulationsdauer dar. Die dargestellten Graphen zeigen die Simulationen der angewendeten Normganglinie (Run162) und die Simulation des im Modells ebenfalls implementierten Blockregens (Run163). Die Untersuchungsfläche (0,5 x 0,5 m Zelle) in den Simulationen ist dieselbe und in Abbildung 3.41 als gelber Kegel sowie in den Abbildungen 3.42 als gelber Punkt dargestellt.

Bei einem Vergleich der Graphen fällt deren stark unterschiedlicher Verlauf sowie deren abweichende Maxima und zeitlichen Verläufe auf. Die Wassertiefe von Run162 (links) besitzt ein ausgeprägtes Maximum von 42 cm wohingegen Run163 (rechts) einen langgezogenen Verlauf mit der maximalen Wassertiefe von 31 cm aufweist. Die Fließgeschwindigkeit auf der Untersuchungsfläche beträgt 1,4 m/s bei Run162 und 1 m/s bei Run163. Die Graphen der minutiigen aufgezeichneten Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten zeigen nach einer geringen Verzögerung des eintretenden Oberflächenabflusses, einen abrupten und steilen Anstieg. Dabei weist Run162 (Normganglinie) den abrupten Anstieg der Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit nach 10 min und Run163 (Blockregen) nach 15 min nach Ereignisbeginn auf. Die maximale Wassertiefe wird bei Run162 in Minute 21 min und in Run163 in Minute 55 auf. Die Fließgeschwindigkeit erreicht bei Run162 nach 21 min und bei Run163 nach 55 min ihr Maximum. Auffallend ist, dass zum selben Zeitpunkt auftretende Maximum von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit sowie die sehr ähnliche Kurvenform innerhalb von Run162 und Run163.

Vergleicht man die Modellergebnisse aus Run162/163 mit dem während des Ereignisses in 2011 aufgenommenen Bild (siehe Abbildung 3.41) so lassen sich die tatsächlichen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten am Untersuchungsort nur schwer abschätzen. Dazu kommt, dass es sich bei dem Aufnahmezeitpunkt nicht zwangsläufig um den Zeitpunkt der maximalen Wasserstände bzw. Fließgeschwindigkeiten handeln muss. Dessen ungeachtet

lässt sich dennoch ein plausibles sowie realitätsnahes Abflussgeschehen bei den Simulationen Run162/163, bei einem Vergleich mit der Ereignisaufnahme, festgestellt. Tendenziell scheint der Blockregen jedoch das Abflussgeschehen der Ereignisaufnahme in Bezug auf die Wassertiefe und vor allem die Fließgeschwindigkeit etwas zu unterschätzen.

Kapitel 4

Diskussion

"Für die praktische Anwendung in der Niederschlagsabflussmodellierung stellt der Inputparameter Niederschlag die größte Unbekannte dar." [Kohl, 2011] Die daraus für die vorliegende Arbeit abgeleitete Forschungsfrage lautet wie folgt: Lässt sich anhand von Auswertungen realer Starkregenereignisse eine typische Verteilung von Starkniederschlägen in Bezug auf deren Kurvenbetontheit (anfangs-, mitten-, endbetont bzw. Blockregen) feststellen? Um ein Starkregenereignis als solches identifizieren zu können ist es zunächst wichtig sich über die Definition eines Starkniederschlags im Klaren zu sein. Die Tatsache, dass die Literatur nicht nur eine Definition kennt, ab wann ein Niederschlagsereignis als Starkregen zu werten ist und sich diese Definitionen nicht selten konterkarieren, war es daher notwendig sich für ein Kriterium der Identifikation von Starkniederschlägen zu entscheiden. Die in dieser Arbeit angewendete Definition des DWD besagt, dass Niederschläge mit einer Niederschlagsmenge von 10 mm/h als Starkregen zu werten sind [DWD, o.j.]. Hierbei handelt es sich aus Sicht des Autors um einen sehr tief angesetzten Schwellenwert der dementsprechend als Kriterium leicht zu erfüllen ist. In der Starkregenmodellierung auf der Grundlage der vorgegebenen Bemessungsniederschläge kommen deutlich höhere Niederschlagssummen zur Anwendung. Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten 5 stärksten Niederschläge der Dauer 10 Minuten, 30 Minuten und 60 Minuten von 8 Wetterstationen in minütlicher Auflösung (insgesamt 52 Starkregenereignisse), sind laut der Starkregendefinition des DWD als Starkregenereignis zu werten.

Die 8 ausgewerteten Wetterstationen wurden auf Grund ihrer repräsentativen Lage und Topographie in Bezug auf das untersuchte Pilotgebiet in Schwertberg, sowie für die Fläche Oberösterreichs gewählt. Dabei wurden 6 der 8 Wetterstationen (Freistadt, Bad Zell, Enns, Linz/Stadt, Hörsching und Wels) im Nahbereich des Untersuchungsgebiets ausgewählt und 2 weitere Wetterstationen (Gmunden/Altmünster und Bad Ischl) im nördlichen Voralpenland für die Starkregenanalyse herangezogen. Bei der Auswertung der insgesamt 52 analysierten Starkregenereignisse sind vor allem die Niederschlagsganglinien der Wetterstation Gmunden/Altmünster auffallend (siehe Abbildung 3.10), da sich diese im Vergleich zu den anderen Wetterstationen, die sowohl anfangs- und mittenbetonte Intensitätsver-

teilungen aufweisen, klar unterscheidet. Die Wetterstation in Gmunden besitzt hierbei ausschließlich mittenbetonte Niederschlagsverteilungen. Eine mögliche Erklärung für diese Ausprägung ist die geographische Lage der Wetterstation in Altmünster am Traunsee (Station läuft unter der Ortsbezeichnung Gmunden bei der ZAMG). Die Wetterstation befindet sich am Westufer des Traunsees in unmittelbarer Nähe zu hügeligem/bergigem Gebiet. Von einer Einflussnahme der lokalen Begebenheiten aus Topographie und Seenähe auf die Intensitätsverteilung erscheint durchaus plausibel und widerspiegelt den vermuteten Einfluss der vor Ort gegebenen Topographie auf die Niederschlagsverteilung.

Bei der Analyse aller 8 untersuchten Wetterstationen konnte eine typische Verteilung von Starkniederschlägen in Bezug auf deren Kurvenbetontheit festgestellt werden. Durch die Tatsache begründet, dass die Kurvenbetontheit der Intensitätsverteilungen von Niederschlagsganglinien in erster Linie von der Wahl des Start- und Endpunktes des Ereignisses abhängen wurden im Rahmen dieser Arbeit einmal das gesamte Ereignis (Start: ab erstem Einsetzen von Regen, Ende: so, dass mindestens 2 min kein Regen fällt und danach nur noch zeitweise Niederschlag an der Messgrenze von 0,1 mm auftritt) und einmal der Beginn und das Ende bei einer erstmaligen Überschreitung bzw. letztmaligen Unterschreitung einer Intensität von 0,2 mm/min gewählt. Die Intensität von 0,2 mm/min wurde nach dem Kriterium für Starkregen des DWD gewählt, welches einer Intensität von 0,16 mm/min entspricht und gerundet auf die untersuchte Messgenauigkeit der Daten 0,2 mm/min ergibt. Das Kriterium mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min gewährleistet, dass ausschließlich Niederschlagsintensitäten die per Definition Starkregen darstellen in die Analyse der Kurvenbetontheit (anfangs-, mitten-, endbetont) eingehen. Durch die Anwendung des Kriteriums Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min wird es den Niederschlagsganglinien durch die Beschneidung geringer Anfangs- und Endintensitäten erschwert eine anfangs- bzw. endbetonte Kurvenausprägung anzunehmen. Auf Grund dessen ermöglicht die Betrachtung der gesamten Ereignisse in Verbindung mit den adaptierten Ereignissen mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min ein unabhängiges Bild in Bezug auf die Wahl des Start- und Endpunktes eines Ereignisses, wodurch Rückschlüsse auf die tatsächliche Verteilung der Niederschlagsganglinien möglich sind.

Die Auswertungen ergaben, dass 87 % der Ereignisse gesamt, die Hälfte der Niederschlagssumme vor der Hälfte der Ereignisdauer erreichten. Mit anderen Worten weisen 87 % der Ereignisse 50 % der Niederschlagssumme vor dem 0,5 fachen der Ereignisdauer auf. 79 % der Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min erreichen 50 % der Niederschlagssumme vor der Hälfte der Ereignisdauer. Des Weiteren besitzen alle diese Ereignisse ihre maximale Intensität in der ersten Hälfte des Ereignisses.

Auf Grund der Beschneidung der geringen Intensitäten der Ereignisse mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min im Vergleich zu den Niederschlagsereignissen gesamt, wodurch erstere Niederschlagsganglinien mehr in die Länge gezogen werden, was sich wiederum in einem

flacheren Verlauf der Intensitätsverteilungen widerspiegelt und bei der Kurvenanpassung mittels Gumbel-Verteilung zu einer geringeren Ausprägung des Maximums führt (siehe Abbildung 3.12). Mit anderen Worten kommt es durch das vorne und hinten abschneiden von geringen Intensitäten zu einer breiteren Intensitätsverteilung und damit zu einem schwächer ausgeprägten Peak. Bei einem Vergleich der Lage des Maximums auf der X-Achse der Niederschlagsereignisse gesamt ($\mu = 0,18$) und der Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min ($\mu = 0,17$) wird das etwas früher eintretende Maximum der Kurve Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min deutlich (siehe Abbildung 3.12). Auf Grund der Tatsache, dass es den Niederschlagsganglinien durch die Beschneidung geringer 0,2 mm/min erschwert wird eine Anfangs- bzw. Endbetontheit der Kurvenausprägung zu erreichen, hätte der Autor hier ein abweichendes Ergebnis erwartet. Aufgrund der vorwiegend am Ende der Ereignisse auftretenden niedrigen Intensitäten $\leq 0,2$ mm/min und deren Beschneidung wurde mit einem deutlich späteren Auftreten des Maximums der Kurve mit Start und Ende $\geq 0,2$ mm/min gerechnet. Der Grund warum die Kurve Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min dennoch ein früheres Erreichen des Maximums als die Kurve gesamt aufweist, konnte nicht zur Gänze geklärt werden, jedoch wird der Grund in der Kurvenanpassung der Gumbel-Verteilung mit der Methode der kleinsten Quadrate (Abstandsquadrate) vermutet. Nichtsdestotrotz zeigen die Auswertungen des verschärften Kriteriums mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min eine deutliche Anfangsbetontheit der analysierten Niederschlagsereignisse.

Das der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte Kriterium, dass die Hälfte der Niederschlagssumme im ersten Drittel der Ereignisdauer gefallen sein muss um als anfangsbetontes Niederschlags Ereignis gewertet zu werden erfüllen 46 % der Ereignisse gesamt sowie 23 % der Ereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min. Keines der untersuchten Ereignisse erreicht 50 % des Niederschlags im letzten Drittel der Ereignisdauer. Dadurch konnte bei keinem der 52 Ereignisse eine entbetonte Niederschlagsverteilung festgestellt werden. Demnach sind auf Grundlage des Kriteriums, dass 50 % der Niederschlagssumme zwischen dem 0,33 fachen und 0,66 fachen der Ereignisdauer gefallen sein müssen, 54 % der Ereignisse gesamt bzw. 77 % der Ereignisse mit Start und Ende bei $\geq 0,2$ mm/min als mittenbetont zu werten. Das gewählte Kriterium mit den festgelegten Intervallen für anfangsbetonte ($\leq 0,33$), mittenbetonte (0,33 - 0,66) und endbetonte ($\geq 0,66$) Ereignisse erwiesen sich als sehr harte Grenzen. Eine etwas weitere Wahl der Intervallgrenzen für anfangs- und endbetonte Ereignisse und gleichzeitig ein engeres Intervall für mittenbetonte Ereignisse wäre aus Sicht des Autors sinnvoll gewesen. Auf Grund der Tatsache, dass dies das Gesamtbild der durchgeführten Auswertung nicht verändert hätte bzw. für die Entwicklung der anfangsbetonten Normganglinie als Sinnvoll erachtet wurde, hat man sich dafür entschieden die frei gewählten harten Grenzen beizubehalten.

Auf Grundlage der Erkenntnis, dass nahezu 90 % der beobachteten Starkregenereignisse die Hälfte des Niederschlags in der ersten Hälfte der Ereignisdauer erreichen, hat man sich dafür entschieden eine Intensitätsverteilung für anfangsbetonte Niederschlagsereignisse auf der Grundlage des Kriteriums, dass 50 % des Niederschlags im ersten Drittel der Ereignisdauer gefallen sein müssen zu erarbeiten. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ereignissen mit unterschiedlicher Dauerstufe und Niederschlagssumme zu gewährleisten wurden im Rahmen dieser Arbeit alle Ereignisganglinien zum einen Zeitnormiert und zum anderen Flächennormiert. Die Normierung bewirkte, dass alle betrachteten Ereignisse dieselbe Dauer sowie die selbe Fläche unter den einzelnen Niederschlagsganglinien aufweisen und es dadurch möglich ist die Gumbel-Verteilung anzuwenden. Die Gumbel-Verteilung beschreibt auf der Grundlage der durchgeführten Kurvenanpassung die mittlere Intensitätsverteilung der untersuchten Starkregenereignisse bestmöglich und wird nicht zuletzt auch deshalb zur Analyse von Starkregenereignissen vorgegebener Dauer in der Literatur explizit empfohlen. Ein Nachteil der Gumbel-Verteilung ergibt sich durch die Tatsache, dass diese aufgrund ihrer festen Schiefe nur Niederschlagsereignisse mit einer Anfangsbetontheit im Stande ist zu beschreiben. Für eine Auswertung von abweichenden Niederschlagsganglinien von der einer Anfangsbetontheit wäre eine Generalisierte Extremwertverteilung kurz GEV anzuwenden. Hierin sieht der Autor einen weiteren Forschungsbedarf vor allem in Bezug auf die Auswirkungen verschiedener Kurvenbetontheit (anfangs-, mitten-, endbetont) auf die maximalen Wasserstände und maximalen Fließgeschwindigkeiten als Resultat der Niederschlags-Abfluss-Modellierung.

Der Literatur zufolge bewirken endbetonte Niederschlagsereignisse im Vergleich zu anfangs- und mittenbetonte Ereignissen die höchsten Wasserstände im Modell. Einer der hierfür angeführten Gründe ist, dass sich der Boden zu Beginn des Ereignisses mit relativ geringen Intensitäten sättigt und zum Ereignissende, wo die maximalen Intensitäten einer endbetonten Kurve auftreten, nur noch einen geringen Niederschlagsanteil aufnehmen kann. Aufgrund der Tatsache, dass in der vorliegenden Arbeit keine Initialverluste berücksichtigt wurden, ist aufgrund von theoretischen Überlegungen anzunehmen, dass die Niederschlagsverteilungen von anfangsbetonten und endbetonten Intensitätsganglinien, sofern diese dieselben maximalen Intensitäten sowie dieselbe integrale Niederschlagsmenge besitzen ebenfalls dieselben maximalen Wassertiefen in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung aufweisen. Die Aussage, dass endbetonte Niederschlagsverteilungen in der Realität zu den maximal möglichen Wasserständen führen ist aus Sicht des Autors als durchaus plausibel anzusehen, mit dem Einwand, dass diese endbetonte Intensitätsverteilung, wie anhand der Starkregenauswertungen sichtbar, bei den analysierten Ereignissen gar nicht und in der Realität dementsprechend selten eintreten. Des Weiteren stellt das endbetonte Niederschlagsereignis mit seinen maximalen Wasserständen aus Sicht des Autors nicht zwingend das Worst-Case-Szenario in Bezug auf die Gebäude schädigende Wirkung sowie das Gefahrenpotential für Menschenleben dar. Der Grund dafür ist, dass

abweichende zeitliche Erreichen des maximalen Abflusses bei anfangs- mitten und endbetonten Niederschlagsverteilungen, bedingt durch die verschiedenen Auftretenszeitpunkte der maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten im Modell. Hierbei zeigt sich, dass die Spitzenabflüsse bei einer anfangsbetonten Intensitätsverteilung, aufgrund der zu Beginn des Niederschlagsereignisses auftretenden maximalen Intensitäten, je nach Größe und Beschaffenheit des Einzugsgebiets sich mit einer verhältnismäßig geringen Verzögerung nach Ereignisbeginn einstellen. Endbetonte Niederschlagsverteilungen hingegen besitzen aufgrund der maximalen Niederschlagsintensität am Ende des Ereignisses ihren Spitzenabfluss sehr spät im Ereignisverlauf. Dadurch ist bei anfangsbetonten Intensitätsverteilungen, die bei Starkregenereignissen ohnehin sehr kurze Vorwarnzeit zusätzlich verkürzt, wodurch die Möglichkeit für Schutzmaßnahmen an Gebäuden bzw. das in Sicherheit bringen von Personen erschwert wird und deshalb höhere Gebäudeschäden sowie Personenschäden bei anfangsbetonten Niederschlagsereignissen zu erwarten sind.

Ein weiteres sehr eindrückliches Ergebnis der untersuchten Starkregenereignisse, bei denen es sich wie bereits beschrieben um die 5 stärksten Ereignisse der 10 minütigen, 30 minütigen und 60 minütigen Niederschläge der 8 analysierten Wetterstationen handelt, ist, dass sich alle diese Starkniederschläge im Sommerhalbjahr zwischen Mai und Juli ereigneten. Grund dafür sind die sich in Österreich auf die Sommermonate beschränkenden konvektiven Gewitterzellen, die in den meisten Fällen den Auslöser für Starkregenereignisse darstellen. Aufgrund der Tatsache, dass konvektive Gewitter eine sehr lokale Ausprägung mit geringer Zellgröße aufweisen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls der Fragestellung nachgegangen, ob eine homogene und vor allem flächige Beregnung einzelner Einzugsgebiete in Oberösterreich gerechtfertigt ist oder damit ein unverhältnismäßig großer Fehler der Überschätzung einhergeht. Auf Grund der Tatsache, dass die in Oberösterreich ausgewiesenen Detaileinzugsgebiete mit einer mittleren Einzugsgebietsgröße von ca. $2,2 \text{ km}^2$ von der Flächenausdehnung konvektiver Zellen übertroffen werden (siehe [Kohl, 2011] und [Pistotnik, 2009]) ist eine flächige wie auch homogene Beregnung zulässig. Es sei an dieser Stelle jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei der Erstellung von flächendeckenden Hangwasserhinweiskarten und einer möglichen gleichzeitigen Beregnung von mehreren Detaileinzugsgebieten Flüsse die einen ausgewiesenen Gefahrenzonenplan der WLV bzw. HQ-Zone besitzen als hydraulisch unwirksam zu berücksichtigen sind, da es sonst je nach Einzugsgebietsgröße zu unrealistischen Ausuferungen der Fließgewässer kommen kann. Eine gängige Methode Gewässer als hydraulisch unwirksam zu berücksichtigen ist diese im Modell einzutiefen, wodurch Überflutungsszenarien aus Flusshochwasser (fluvialen Überflutungen) von vornherein verhindert werden.

Der nachfolgende Abschnitt wird sich mit der zweiten in dieser Arbeit untersuchten Fragestellung befassen. Die Forschungsfrage lautet wie folgt: Kann die Intensitätsverteilung eines Starkniederschlagsereignisses als Eingangsparameter in die Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Grund von marginalen Auswirkungen eines näherungsweise Modells vernachlässigt werden, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist? Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Normganglinie beschreibt die mittlere Intensitätsverteilung der als anfangsbetonte Niederschlagsereignisse identifizierten Starkregenereignisse. Die entwickelte Normganglinie wurde an den in Schwertberg ausgewiesenen Bemessungsniederschlag angewendet und somit durch eine Intensitätsverteilung beschrieben. Des Weiteren wurde der Bemessungsniederschlag anhand einer Rechteckverteilung (Blockregen) umgesetzt. Sowohl die Intensitätsganglinie (Normganglinie) wie auch die Rechteckverteilung (Blockregen) besitzen die selbe integrale Niederschlagsmenge, wodurch ein Vergleich der Modellergebnisse möglich ist. Sowohl die Normganglinie als auch der Blockregen wurden bei ansonsten gleichen Eingangsparametern in das Niederschlags-Abfluss-Modell implementiert. Es zeigen sich Unterschiede zwischen der Intensitätsverteilung (Normganglinie) und der Rechteckverteilung (Blockregen) in den Modellergebnissen. Sowohl die vom Modell ausgegebenen maximalen Wassertiefen als auch die maximalen Fließgeschwindigkeiten weisen Unterschiede bei einer Gegenüberstellung der für das Pilotgebiet in Schwertberg umgesetzten Simulationen auf. Die durchgeführte Differenzrechnung (siehe Abbildung 3.25) zwischen Normganglinie und Blockregen weist höhere maximale Wassertiefen sowie maximale Fließgeschwindigkeiten bei der angewendeten Intensitätsverteilung auf. Die Differenzrechnung zeigt, dass 93 % der maximalen Wasserstände eine Abweichung im Bereich von ± 2 cm aufweisen. 5 % der Einzugsgebietsfläche weisen Abweichungen im Intervall von +2 cm bis +5 cm auf und 2 % besitzen eine Differenz von >5 cm. Die größten Differenzen bei einem Vergleich der Normganglinie mit dem Blockregen treten in den im Einzugsgebiet befindlichen Tiefenlinien auf. Bei der Differenzrechnung der maximalen Fließgeschwindigkeiten zeigt sich ein ähnliches Bild wonach 87 % der Einzugsgebietsfläche Abweichungen von $\pm 0,1$ m/s aufweisen. 12 % der Flächen ergeben Unterschiede im Bereich von +0,1 m/s bis +0,5 m/s und das verbleibende 1 % weist Differenzen im Intervall von $>0,5$ m/s auf. Das Ergebnis des Vergleichs zeigt eine flächigere Ausprägung der maximalen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sowie ein differenzierteres Gesamtbild der in der Simulation angewendeten Normganglinie gegenüber dem Blockregen. Die Abweichungen der Modellergebnisse der angewendeten Intensitätsverteilung und die der Rechteckverteilung sind auf die unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten bzw. die abweichenden Intensitätsspitzen zurückzuführen. Es konnte festgestellt werden, dass für die bestmögliche Beschreibung von Niederschlagsereignissen die Übereinstimmung der Intensitätsspitzen zwischen realem und im Modell angewendetem Starkregenereignis optimal übereinstimmen müssen und einen mindestens gleich großen Einfluss auf das Modellergebnis besitzen wie das zusammenstimmen der Niederschlagssumme zwischen Realität und Modell. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass für die

Gefahrenbewertung sowie für die Hangwassergefahrenkarten die maximalen Wasserstände und maximalen Fließgeschwindigkeiten während der Simulationsdauer zur Anwendung kommen und diese wie in dieser Arbeit aufgezeigt von den maximalen Intensitäten des Niederschlagsereignisses bestimmt werden.

Die in dieser Arbeit untersuchte anfangsbetonte Intensitätsverteilung weist zu Beginn des Niederschlagsereignisses eine maximale Niederschlagsintensität von 2,2 mm/min auf, wohingegen der Blockregen seiner naturgemäß eine konstante Intensität von 0,815 mm/min besitzt. Die Differenzen der maximalen Wassertiefe und maximalen Fließgeschwindigkeit mögen fälschlicherweise als marginal interpretiert werden. Die Unterschiede bei der angewendeten Normganglinie zum Blockregen zeigen sich bei einer Betrachtung der im Modell implementierten Monitoringlines, die den Abfluss über die gesamte Simulationsdauer beschreiben. Die Abflussspitzen bzw. die Volumenströme ergeben sich durch die maximalen Fließgeschwindigkeiten multipliziert mit der Querschnittsfläche (maximale Wassertiefe mal überflossener Zellweite) und weisen erhebliche Unterschiede zwischen Intensitätsverteilung und Rechteckverteilung auf. So zeigt sich anhand der untersuchten Monitoringlines, dass die Abflussspitzen der Normganglinie im Schnitt doppelt so groß sind als die des Blockregens bei gleichem Gesamtabfluss über die Simulationsdauer. Des Weiteren ergeben sich deutliche Abweichungen der Vorlaufzeiten. Die anfangsbetonte Normganglinie weist ein früheres Einsetzen des Abflusses sowie ein früheres Erreichen des maximalen Abflusses im Gegensatz zum Blockregen auf. Die anfangsbetonte Intensitätsverteilung weist einen deutlichen Maximalwert des Abflusses auf wohingegen der Blockregen nach Erreichen der Konzentrationszeit einen gleich bleibenden und langgezogenen Kurvenverlauf bis zum Niederschlagsende nach 60 Minuten aufweist. Für die Bestimmung des maximalen Abflusses sowie für die Abschätzung von Vorwahnzeiten bei anfangsbetonten Niederschlägen ist die Anwendung einer Niederschlagsganglinie notwendig. Wonach die Beantwortung der Forschungsfrage wie folgt lautet: Die Intensitätsverteilung von Starkniederschlägen kann nicht vernachlässigt werden. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Intensitätsverteilung (Normganglinie) und der Rechteckverteilung (Blockregen) in den Modellergebnissen wodurch sich ebenfalls Unterschiede in der Gebäudeschädigenden Wirkung ergeben.

Bei dem in dieser Arbeit angewendeten Bemessungsniederschlag handelt es sich um ein 100-jährliches 60 minütiges Ereignis (T100D60). Das Ereignis wurde aufgrund des für Überschwemmungen geltenden Schutzziels von 100-jährlichen Ereignissen sowie auf Grundlage der berechneten Konzentrationszeit für das Pilotgebiet in Schwertberg gewählt. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass es die entwickelte Normganglinie aufgrund ihrer Beschreibung der mittleren Verteilung von Starkniederschlägen erlaubt beliebige Niederschlagssummen mit vorgegebener Dauer einer zeitlich qualitativen Intensitätsverteilung zuzuführen. Wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, werden die maximalen Wassertiefen sowie die maximalen Fließgeschwindigkeiten durch die während eines

Ereignis auftretenden maximalen Niederschlagsintensitäten bestimmt. Dadurch ist ein Ereignis der Bemessungsniederschläge gleicher Jährlichkeit mit kürzerer Dauer Extremere in Bezug auf die vom Modell ausgegebenen maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten unabhängig davon, ob auf die Niederschlagssumme des Bemessungsniederschlags eine Intensitätsverteilung bzw. eine Rechteckverteilung angewendet wird. Diese Ausprägungen sind auf die ausgewiesenen Niederschlagssummen der Bemessungsregen zurückzuführen. Bei einem Vergleich eines 100-jährlichen 60 minütigen (T100D60) Ereignis mit einem 100-jährlichen 30 minütigen (T100D30) Ereignis der eHYD Bemessungsniederschläge zeigt das T100D60 keinesfalls eine doppelt so große Niederschlagssumme als das T100D30. Am Beispiel von Schwertberg umfasst das T100D60 Ereignis eine Niederschlagssumme von 48,9 mm, wohingegen das T100D30 Ereignis eine Niederschlagssumme von 40 mm besitzt. Das T100D30 Ereignis ist dadurch lediglich um 8,9 mm geringer als das T100D60 Ereignis bei der halben Ereignisdauer. Auf Grund dessen ergibt sich bei dem T100D30 Ereignis eine extremere Ausprägung der maximalen Niederschlagsintensität und dadurch bedingt maximalere Wassertiefen sowie Fließgeschwindigkeiten, davon abgesehen ob eine Intensitätsverteilung oder ein Blockregen zu Anwendung kommt.

Die erreichte Realitätsnähe bei der Anwendung der erarbeiteten Normganglinie bei dem Vergleich mit den Bilddokumentationen bzw. den abgeschätzten Anschlagmarken ist erstaunlich. Jedoch ist dabei zu berücksichtigen, dass die entwickelte Normganglinie hauptsächlich anhand von Niederschlagsaufzeichnungen im Umfeld des Pilotgebiets Schwertbergs erstellt wurde und diese dadurch die mittlere Intensitätsverteilung in diesem Gebiet bestmöglich beschreibt. Auf Grund dieser Tatsache erscheint die Übereinstimmung mit der Realität trotz des angewendeten Bemessungsniederschlags, wodurch es sich um keine direkte Nachrechnung eines einzelnen Realereignisses handelt, als durchaus plausibel. Nicht zuletzt da es sich bei den Ereignissen in Schwertberg annähernd um 100-Jährliche Ereignisse handelte. Die Plausibilitätsprüfung mittels für Schwertberg abgeschätzten Anschlagmarken auf der Grundlage von Schmutzablagerungen ist jedoch stets kritisch zu hinterfragen, da es durch Wellenschlag des Oberflächenabflusses zu einer im Nachhinein nur schwer nachzuvollziehenden Verfälschung der tatsächlichen Abflusstiefen kommen kann. Da diese Schmutzablagerungen in vielen Fällen die einzigen Anhaltspunkte für die Plausibilitätsprüfung von Niederschlags-Abfluss-Modellen darstellen, denn anders als bei Flusshochwässern (fluvialen Überflutungen) hat man bei Überschwemmungen aus Starkniederschlägen (pluviale Überflutungen) keine Pegelmessungen zur Verfügung, sollten diese wenn auch mit Vorsicht in der Plausibilisierung bzw. zur Kalibrierung von Niederschlags-Abfluss-Modellen verwendet werden.

An dieser Stelle wird konkret auf die Gegenüberstellung des Realereignisses und der Simulationsergebnisse von Standort 2 eingegangen (siehe Abbildung 3.35). An diesem Standort wurden die größten Abweichungen der Normganglinie und des Blockregens mit der An-

schlagsmarke verzeichnet. Während die Anschlagmarke einen maximalen Wasserstand von ungefähr 40 cm ergibt, zeigt der in der Simulation angewendete Blockregen eine Wassertiefe im Bereich der Anschlagmarke von weniger als 2 cm. Die Simulation der Normganglinie weist an der Hauswand der Anschlagmarke Wassertiefen von 2 cm bis 20 cm auf. Die Abweichung der Anschlagmarke mit den Modellergebnissen können viele Ursachen besitzen, wobei an dieser Stelle die am prägendsten Ursachen beschrieben werden. Wie bereits ausgefüllt wurden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls offene Mauern mit einer Höhe von 15 cm im Siedlungsbereich manuell in der Form von Modifikationen des digitalen Geländemodells implementiert um die vielerorts in Schwertberg bestehenden Gartenmauern sowie Bordsteinkanten zu beschreiben (siehe im Anhang Abbildung 6.5). Dabei wurden ebenfalls Mauern um das in Standort 2 betrachtete Grundstück im Modell eingebaut wobei diese in der Realität nicht vorhanden sind (siehe Abbildung 3.36). Dies führt unweigerlich zu niedrigeren Wasserständen in den Modellergebnissen, da Oberflächenabfluss erst mit einer Wassertiefe von >15 cm, auf Grund der fälschlicherweise um das Grundstück eingebauten Mauern, zufließen kann. Im Modell ist dies ebenfalls anhand der geraden Linien der maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten zu erkennen. Ein weiteres in der Hangwassermodellierung nicht zu vernachlässigendes Erschwernis ist, dass Gebäude sowie Kleinstrukturen wie sie im Siedlungsgebiet sehr häufig auftreten als Abflusshindernisse zu werten sind. Auf Grund dessen besteht oftmals das Problem, dass die Aussagekraft von Hangwasserhinweiskarten mit jeder Gebäudereihe in Richtung Ortsmitte abnimmt. Weitere Gründe dafür sind neben den Gebäuden und Kleinstrukturen die nur mit unverhältnismäßigem Mehraufwand vor Ort erhoben werden können, die Auflösung und Messgenauigkeit von ± 10 cm des digitalen Geländemodells sowie dessen nur periodisch stattfindende Befliegung. Ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Wirkung können Verrohrungen bzw. Kanalsysteme im Siedlungsbereich auf den Oberflächenabfluss besitzen.

Zusammenfassend lässt sich die Notwendigkeit der Anwendung einer Intensitätsverteilung bzw. einer Rechteckverteilung wie folgt beschreiben: „Es gibt keinen „wahren Bemessungswert“, der für alle Zwecke der Praxis universell Geltung hat, sondern je nach Auswertemodus und/oder Fragestellung aus der Praxis lässt sich ein mutmaßlicher spezifischer Extremwert nur innerhalb einer Bandbreite angeben. Die Auswahl des Verfahrens muss derzeit nach den Anforderungen im jeweiligen Anwendungsgebiet getroffen werden [Skoda et al., 2007]. Auf Grund dessen ist es notwendig sich je nach Fragestellung bzw. Aufgabenstellung über die Notwendigkeit der Anwendung einer Niederschlagsganglinie bzw. eines Blockregens im Klaren zu sein und sich dementsprechend für eine Niederschlagsverteilung zu entscheiden.

Die dritte dieser Arbeit zugrunde gelegten Forschungsfrage lautet wie folgt: Kann auf Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) als möglicher Verlustparameter in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung auf Grund von marginalen Auswirkungen eines näherungsweise Modells verzichtet werden, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist?

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen sowie in den Analysen der Abflussbeiwerte bei Abfluss Konstanz zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen der Verwendung bzw. einer nicht Verwendung von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz als möglichen Parameter zur Beschreibung der in der Realität auftretenden Verluste. Bei der Verwendung einer Niederschlagsganglinie in der Niederschlags-Abfluss-Modellierung, aufgrund der es zu höheren Spitzenintensitäten des Niederschlagsereignisses kommt, welche wiederum höhere maximale Wassertiefen sowie höhere maximale Fließgeschwindigkeiten im Modellergebnis bedingen, ist es aus Sicht des Autors notwendig bei der Verwendung einer Intensitätsverteilung ebenfalls eine Verlustgröße im Modell zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit der Berücksichtigung sind hier die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}), die einen Gleichgewichtszustand zwischen Zufluss und Abfluss beschreiben.

Der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) der unabhängig von Anfangsverlusten ist, stellt eine deutliche Verbesserung des Gesamtabflussbeiwerts (ψ_{tot}) dar, welcher die Gesamtheit der Verluste beschreibt. Aufgrund der Tatsache, dass die Vorfeuchte des Bodens einen starken Einfluss auf den Anfangsverlust hat und diese mit der Zeit starken Schwankungen unterliegt, was deren Bestimmung äußerst erschwert, so ist die getrennte Beurteilung von Initialverlusten und Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz von großem Vorteil. Da der Gesamtabflussbeiwert (ψ_{tot}) seiner Natur gemäß eine ganzheitliche Beschreibung des oberflächlich abfließenden Anteils des Niederschlags beschreibt und dadurch ebenfalls die initialen Verluste beinhaltet, unterliegt dieser je nach Vorfeuchtebedingungen großen Fehlern. Die Beschreibung der Initialverluste bzw. der Initialabstraktionszeit weist jedoch noch große Lücken auf, wodurch hierfür noch weitere Forschungsarbeit zu leisten ist und auf Grund dessen in dieser Arbeit keine Anwendung gefunden hat.

Der Abflussbeiwert stellt eine wesentliche Einflussgröße bei der Ermittlung der Gebietsabflüsse dar. Aus diesem Grund ist es von großer Notwendigkeit die Bestimmung des Abflussbeiwertes sehr sorgfältig zu treffen [PielerBüro, 2014]. Wie von Kohl 2011 beschrieben, unterliegt der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz einer Abhängigkeit der Niederschlagsintensität. Auf Grund dessen kommt es ebenfalls zu abweichenden mittleren Abflussbeiwerten bei einem Vergleich zwischen Intensitätsverteilung (Normganglinie) und Rechteckverteilung (Blockregen). Wobei bei einer Anwendung des Blockregens im Niederschlags-Abfluss-Modell in Summe mehr Niederschlag oberflächlich abfließt als bei der Anwendung des Intensitätsverteilten Starkregenereignisses. Der Grund für die höheren Abflussbeiwerte

te bei Abflusskonstanz ($\psi_{const48,9}$) im Fall von Blockregen im Vergleich zur Normganglinie ergibt sich, wie bereits erläutert, aus der Intensitätsabhängigkeit des Abflussbeiwerts (ψ_{const}). Anhand der in Kapitel 2.7.4 angeführten Abbildung 2.8 wird deutlich, dass der Abflussbeiwert (ψ_{const}) bei Intensitäten > 30 mm/h bzw. $0,5$ mm/min nur noch eine lineare Zunahme des Abflussbeiwerts von durchschnittlich 6% ($\%$ je $mm \cdot h^{-1}$) aufweist. Das der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte Niederschlagsereignis weist eine Niederschlagssumme von $48,9$ mm auf, was bei einem Blockregen einer Intensität von $0,815$ mm/min entspricht und dadurch über dem Schwellenwert $0,5$ mm/min liegt. Auf Grund dessen liegt der untersuchte Blockregen im Bereich der linearen Zunahme der durch hohe Abflussbeiwerte gekennzeichnet ist. Die in dieser Arbeit untersuchte anfangsbetonte Intensitätsverteilung weist zu Beginn des Niederschlagsereignisses eine maximale Niederschlagsintensität von $2,2$ mm/min auf und liegt somit weit über dem Schwellenwert von $0,5$ mm/min. Im Bereich der hohen Intensitäten fällt der Abflussbeiwert ψ_{const} der Normganglinie etwas höher als der des Blockregens aus. Aufgrund der geringen Zunahme von 6% ($\%$ je $mm \cdot h^{-1}$) bei Intensitäten > 30 mm/h bzw. $0,5$ mm/min ist die Ausprägung des erhöhten Abflussbeiwerts (ψ_{const}) jedoch gering (siehe Abbildung 3.20). Im Gegensatz zum Blockregen, dessen Niederschlagsintensität während des gesamten Niederschlagsereignisses über dem Schwellenwert ($>0,5$ mm/min) liegt, zeigt sich bei der Niederschlagsganglinie der Normkurve eine Unterschreitung des Schwellenwerts bei 30 min nach Ereignisbeginn (siehe Abbildung 3.15). Nachdem die anfänglichen hohen Intensitäten der anfangsbetonten Normganglinie unter den Schwellenwert von $0,5$ mm/min (<30 mm/h) abgefallen sind nimmt der Abflussbeiwert mit sinkender Niederschlagsintensität stark ab bzw. die Dränung stark zu. Durch die starke Abnahme des Abflussbeiwerts ($\psi_{const48,9}$) im Bereich von 30 min nach Ereignisbeginn bei der untersuchten anfangsbetonten Normganglinie ergeben sich die im Vergleich zum Blockregen geringeren mittleren Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz ($\psi_{const48,9}$) bzw. die höhere mittlere Dränung aller in Schwertberg bestehender Abflussbeiwertflächen.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der bei einem betrachten der in Schwertberg ausgewiesenen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) auffällt, sind die großen Unterschiede der Abflussbeiwerte zwischen den landwirtschaftlich genutzten Flächen und forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Die Ackerflächen weisen durchwegs sehr hohe Abflussbeiwerte auf wohingegen die Waldflächen ausnahmslos sehr geringe Werte aufzeigen. Der Grund hierfür liegt in dem Modellansatz des für die Übertragung genutzten HydroBod-Modells, bei welchem ein Worst-Case-Szenario mit extremer Verschlämmung an Ackerstandorten angenommen wurde. Für die forstwirtschaftlich genutzten Flächen hingegen wurde, da in der Natur nur sehr selten anzutreffen, keine Verschlämmung angenommen. Aufgrund dessen ergeben sich enorme Unterschiede in den Abflussbeiwerten zwischen Acker- und Waldflächen welche aus Sicht des Autors für Waldstandorte nur bedingt der Realität entsprechen.

Die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz wurden wie in Kapitel 2.7.6 beschrieben auf der Grundlage von Landbedeckungsklassen (CLC_{2012}) sowie geologischen Einheiten (GK_{200}) erhoben. Anhand von Vergleichen zwischen Waldstandorten und deren vor Ort gegebenen Geologie zeigte sich, dass Waldstandorte unabhängig ihrer geologischen Einheit stets einen sehr geringen Oberflächenabflussbeiwert bei Abflusskonstanz aufweisen. Dies konnte ebenfalls bei Vergleichen andere Landbedeckungsklassen mit deren geologischen Einheiten festgestellt werden. Der Autor geht deshalb davon aus, dass der Landbedeckungsklasse (CLC_{2012}) ein höherer Stellenwert bei der Identifikation der Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz im Verhältnis zu der geologischen Einheit (GK_{200}) zugeschrieben wurde. Des Weiteren sei auf die grobe Struktur der Ausgangsdaten der Landbedeckungsklassen (CLC_{2012}) hingewiesen. Diese weist mehrmals Flächen falsch aus (siehe 3.18). Zu besonders großen Fehlern führt dies, wenn wie es in Schwertberg mehrfach der Fall ist, Ackerflächen als Waldflächen ausgewiesen werden und umgekehrt, da sich auf diesen Flächen die Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz (ψ_{const}), wie bereits beschrieben, sehr stark voneinander unterscheiden.

Auch wenn bei der Übertragung der Abflussbeiwertkarte, die in Kapitel 2.7 im Detail erläutert wurde, Kompromisse in Bezug auf die räumliche Auflösung sowie den Informationsgehalt (grobe CLC sowie GK200 Klassen) gemacht wurden und dadurch die für Oberösterreich vorliegende Abflussbeiwertkarte nicht die Qualität der HydroBod-Karte Niederösterreichs aufweist, so ist sie dennoch der erste wichtige Schritt zur Schaffung einer Möglichkeit zur flächendeckenden Anwendung von Abflussbeiwerten (ψ_{const}) in der Hangwassermodellierung. Auf Grund dessen und dem Faktum, dass es flächendeckend keine besseren Abflussdaten für Oberösterreich gibt, wurden die von der HydroBod NÖ auf Oberösterreich übertragenen Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz als Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen genutzt.

Die Anwendung der flächendeckend für Oberösterreich vorhandenen Abflussbeiwertkarte für die großflächige Umsetzung von Hangwasserhinweiskarten bei einer Verwendung von Niederschlagsganglinien ist nach einer möglicherweise notwendigen Überarbeitung der sich stark unterscheidenden Abflussbeiwerte zwischen den Ackerflächen und Waldflächen sowie der zur Anwendung gekommenen nicht ausreichend genauen Landbedeckungsklassen (CLC_{2012}) sowie geologischen Einheiten (GK_{200}) grundsätzlich zu empfehlen.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnte anhand von Auswertungen realer Starkregenereignisse eine typische Verteilung von Starkniederschlägen in Bezug auf deren Kurvenbetontheit (anfangs-, mitten-, endbetont) festgestellt werden. Die Auswertungen ergaben, dass 87 % der Ereignisse gesamt, die Hälfte der Niederschlagssumme vor der Hälfte der Ereignisdauer erreichen. Mit anderen Worten weisen nahezu 90 % der Ereignisse 50 % der Niederschlagssumme vor dem 0,5 fachen der Ereignisdauer auf und besitzen des Weiteren ihre maximale Intensität in der ersten Hälfte des Ereignisses. Das der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte Kriterium, dass die Hälfte der Niederschlagssumme im ersten Drittel der Ereignisdauer gefallen sein muss um als anfangsbetontes Niederschlags Ereignis gewertet zu werden erfüllen 46 % der Ereignisse gesamt. Dadurch konnte anhand der im Rahmen dieser Arbeit analysierten 5 stärksten Niederschläge der Dauer 10 Minuten, 30 Minuten und 60 Minuten von 8 in Oberösterreich gelegener Wetterstationen in minütlicher Auflösung (insgesamt 52 Starkregenereignisse) eine deutliche Anfangsbetontheit festgestellt werden.

Anhand der in dieser Arbeit durchgeführten Starkregenauswertung wurde eine anfangsbetonte Normganglinie entwickelt. Unter der Bezeichnung Normganglinie wird in dieser Arbeit eine Niederschlagsganglinie verstanden, welche es erlaubt, beliebige Niederschlagssummen, wie zum Beispiel die der Bemessungsniederschläge, einer zeitlichen qualitativen Intensitätsverteilung zuzuführen. Bei Untersuchungen der Intensitätsverteilung (Normganglinie) im Vergleich zu der Rechteckverteilung (Blockregen) anhand von im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Niederschlags-Abfluss-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Anwendung einer Intensitätsverteilung beträchtliche Auswirkungen auf die maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten eines näherungsweise Modells ergeben, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist. Es zeigten sich daher deutliche Unterschiede zwischen der Intensitätsverteilung (Normganglinie) und der Rechteckverteilung (Blockregen) in den Modellergebnissen.

Des Weiteren wurden in der vorliegenden Arbeit Simulationen durchgeführt, die zum Ziel

hatten, die Unterschiede zwischen der Verwendung bzw. einer nicht Verwendung von Abflussbeiwerten bei Abflusskonstanz (ψ_{const}) als möglichen Parameter zur Beschreibung der in der Realität auftretenden Verluste näher zu untersuchen. Die Analysen zeigten deutliche Unterschiede der Modellergebnisse sowie eine verbesserte Realitätsbeschreibung durch das Modell bei einer Anwendung der Abflussbeiwerte bei Abflusskonstanz. Auf Grund dieser Tatsache sollte je nach zu beantwortender Fragestellung und Aufgabenstellung sowie vorhandener Datengrundlage nicht auf die Anwendung von Verlustgrößen im näherungsweisen Modell verzichtet werden, wenn der Maßstab ein für Gebäude schädigende Wirkung ist.

Literaturverzeichnis

- [Achleitner et al., 2020] Achleitner, S., Huber, A., Lumassegger, S., Kohl, B., Spira, Y., und Weingraber, F. (2020). Technischer Bericht: Pilotstudie Oberösterreich Modellierung von Starkregen-Oberflächenabfluss/Hangwasser. Technischer bericht, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.
- [Achleitner et al., 2017] Achleitner, S., Lumassegger, S., Kohl, B., Formayer, H., Einfalt, T., und Strehz, A. (2017). SAFFER - CC: Auswirkungen des Klimawandels auf Sturzfluten (Hangwasser). https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/Klimatag/Klimatag2017/Votr%C3%A4ge/V07_Achleitner.pdf.
- [Achleitner und Starl, 2019] Achleitner, S. und Starl, H. (2019). Regen bringt nicht immer Segen – kann aus Oberflächenwasserabfluss bei Gewitter Lebensgefahr entstehen? Vortrag: DCNA Konferenz - Graz, 14.10.2019.
- [Baumgartner und Liebscher, 1996] Baumgartner, A. und Liebscher, H. J. (1996). *Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie, Band 1; ISBN 9783443300029*. Verlag: Borntraeger Gebrueder.
- [Beffa, 2008] Beffa, C. (2008). 2D Flachwassergleichungen Grundlagen - Lösungen - Einsatz. Technischer bericht, beffa tognacca gmbh.
- [Berry, 2020] Berry, R. (2020). *JFlow Manual v9.4.0*.
- [Blöschl, 2009] Blöschl, G. (2009). Effects of scale and spatial process organization in hydrology with implications for predictability. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU 2009-12748, 1*.
- [BMLFUW, 2006] BMLFUW (2006). Bemessungsniederschläge in der Siedlungswasserwirtschaft. Forschungsprojekt Endbericht.
- [BMLRT, o.j.] BMLRT (o.j.). eHYD. <https://ehyd.gv.at/>. Accessed: 03.07.2020.
- [Bott, 2016] Bott, A. (2016). *Synoptische Meteorologie Methoden der Wetteranalyse und -prognose*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Bronstert et al., 2005] Bronstert, A., Wittenberg, H., und Niehoff, D. (2005). Abfluss von Urbanflächen (runoff from urban areas). *Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft A. Bronstert (ed.), Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele*.

- [Cauwenberghs et al., 2018] Cauwenberghs, K., Feyaerts, T., Hunter, N., Dewelde, J., Vansteenkiste, T., Huybrighs, M., Vaes, G., und Berry, R. (2018). Collaborative development of high resolution pluvial flood maps for flanders. *EPiC Series in Engineering, 13th International Conference on Hydroinformatics*.
- [Clebsch et al., 1928] Clebsch, A., Neumann, C., und Kein, F. (1928). *Mathematische Annalen*. Verlag von Julius Springer.
- [CLIMA-Daten, o.j.] CLIMA-Daten (o.j.). Daten und Graphen zum Klima und Wetter für Schwertberg. <https://de.climate-data.org/europa/oesterreich/oberoesterreich/schwertberg-101848/>. Accessed: 17.09.2020.
- [climate service center.de, 2012] climate service center.de (2012). Starkregen. [https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063152/index.php.de#:~:text=2001\),,die%20h%C3%A4ufig%20mit%20Bodenerosion%20einhergehen](https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063152/index.php.de#:~:text=2001),,die%20h%C3%A4ufig%20mit%20Bodenerosion%20einhergehen). Accessed: 2020-06-22.
- [Courant et al., 1967] Courant, R., Friedrichs, K., und Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal*, Seite S. 215–234.
- [DorisPlattform(GisLandOberösterreich), o.J.] DorisPlattform(GisLandOberösterreich) (o.J.). <https://www.doris.at/themen/basiskarten/orthofotos.aspx>. Accessed: 4.10.2020.
- [DorisPlattform(GisLandOberösterreich), o.j.] DorisPlattform(GisLandOberösterreich) (o.j.). Gefahrenzonen der WLW (Wildbach- und Lawinenverbauung). [https://www.doris.at/viewer/\(S\(0e3vnyzhq4zbobrarn4ocfk\)\)/init.aspx?karte=baugrundrisiko](https://www.doris.at/viewer/(S(0e3vnyzhq4zbobrarn4ocfk))/init.aspx?karte=baugrundrisiko). Accessed: 30.09.2020.
- [Dunne et al., 1975] Dunne, T., Moore, T. R., und Taylor, C. H. (1975). Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences- Bulletin - des Sciences Hydrologiques*, XX, 3.
- [DWD, o.j.] DWD (o.j.). Niederschlagsintensität. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906>. Accessed: 2020.06.23.
- [Eder et al., 2011] Eder, A., Sotier, B., Klebinder, K., Sturmlechner, R., Dorner, J., Markart, G., Schmid, G., und Strauss, P. (2011). Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (HydroBodNÖ). Technischer bericht, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt; Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren.
- [EuropäischeKommission, o.j.] EuropäischeKommission (o.j.). CORINE Land Cover. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>. Accessed: 17.09.2020.

- [Eybl et al., 2018] Eybl, J., Godina, R., und WeilgunI, V. (2018). eHYD Hydrographische Daten und Auswertungen. Technischer bericht, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- [Fachabteilung19A, 2008] Fachabteilung19A (2008). Gutachten: Bemessungsniederschläge Starkniederschlagsauswertung beim Hydrographischen Dienst. Technischer bericht, Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft, hydrographischen Dienst Steiermark.
- [Fohrer et al., 2016] Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A., und Weiler, M. (2016). *Hydrologie (ISBN 9783838545134)*. UTB Verlag.
- [Formayer, 2019] Formayer, H. (2019). Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsintensität bei geringen Dauerstufen. <https://www.dena.at/files/tao/img/veranstaltungen/adrd2019/praesentationen/Session%201A/Temperaturabh%C3%A4ngigkeit%20der%20Niederschlagsintensit%C3%A4t%20bei%20geringen%20Dauerstufen.pdf>. Accessed: 05.10.2020.
- [Frisch, 1986] Frisch, M. (1986). Der Mensch erscheint im Holozän. Eine Erzählung (Max Frisch, Gesammelte Werke in zeitlicher Reihenfolge 7) [erstmal erschienen als Einzeltitel Frankfurt am Main 1979, zitiert nach der Ausgabe 1986]. Frankfurt am Main 1986, S. 205-300.
- [Gattermayr, 2005] Gattermayr, W. (2005). Hochwasser und Muren Der Auslöser Niederschlag im Spannungsfeld zwischen Messung und Schätzung. Vortrag. Innsbrucker Hofburggespräche – BFW „Niederschlagsdaten in der Abflussbemessung – Mögliches und Unmögliches“.
- [Geologische Bundesanstalt, 2008] Geologische Bundesanstalt (2008). Geologie 1:20.000. <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/c3e1cdcf-5a43-403a-b33a-a8e8ee8bea80>. Accessed: 17.09.2020.
- [Gerhard, 2009] Gerhard, H. Lang, J. C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik*. Universitätsverlag Karlsruhe.
- [Gpptschalk und Weingartner, 1998] Gpptschalk, L. und Weingartner, R. (1998). Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. *Journal of Hydrology*, 208, pp. 148-162.
- [Hübl, 1998] Hübl, J. (1998). WLS REPORT 19 Wien, im Juli 1998 Projektleitung: Hübl Johannes Mitarbeiter: Schnetzer Ingo Holzinger Gerhard Dipl.-Ing. Geiwitsch Roland Dipl.-Ing. Brauner Michael Im Auftrag von: Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsbauleitung Osttirol Sektion Tirol Hydrologische Studie Wartschenbach Niederschlag-Abfluß-Simulation zur Dimensionierung der-

Rückhaltebecken am Zettlersfeld. Technischer bericht, Universität für Bodenkultur-Institut für Wildbach- und Lawinenschutz.

- [Horton, 1933] Horton, R. E. (1933). The Role of infiltration in the hydrologic cycle. [https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063152/index.php.de#:~:text=2001\).](https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063152/index.php.de#:~:text=2001).,die%20h%C3%A4ufig%20mit%20Bodenerosion%20einhergehen.), die%20h%C3%A4ufig%20mit%20Bodenerosion%20einhergehen. 1, 14, 446-460.
- [Kainz, 2007] Kainz, H. (2007). Niederschlagsdaten zur Anwendung der ÖWAV Regelblätter 11 und 19. *ÖWAV-Leitfaden*.
- [Kammerer et al., 2019] Kammerer, G., Stumpp, C., und Wildt, D. (2019). Hydraulik und Hydromechanik– Übungsteil. Technischer bericht, Universität für Bodenkultur Wien-Department für Wasser-Atmosphäre-UmweltInstitut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft.
- [Kipfer et al., 2018] Kipfer, A., Berger, C., und Mani, P. (2018). Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Technischer bericht, geo7 AG, geowissenschaftliches Büro.
- [Kneip, o.j.] Kneip, A. (o.j.). Die Methode der Kleinsten Quadrate. http://www.statistik.uni-bonn.de/fileadmin/Fachbereich_Wirtschaft/Einrichtungen/Statistik/ws0809/Zusatzmaterial-Regression.pdf. Accessed: 26.08.2020.
- [Koch et al., 2016] Koch, M., Hennegriff, W., Moser, M., und Groteklaes, M. (2016). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden Württemberg. *Verlagspublikation Umweltverwaltung Baden-Württemberg*.
- [Kohl, 2011] Kohl, B. (2011). *Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST: Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten*. Dissertation, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaftender Universität Innsbruck.
- [Kohl und Achleitner, 2019] Kohl, B. und Achleitner, S. (2019). Fachliche Stellungnahme: Untersuchung zur flächendeckenden Ableitung von abflussbildungsrelevanten Parametern für Oberösterreich Übertragbarkeit von Parametern des HydroBod NÖ II Modells auf Basis von Landnutzungseigenschaften und Geologie. Technischer bericht, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft. Fachliche Stellungnahme.
- [Kohl et al., 2008] Kohl, B., Klebinder, K., Markart, G., Perzl, F., Pirkl, H., Riedl, F., und Stepanek, L. (2008). Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005. *Conference Proceedings - Internationales Symposium Interprävent 2008, Dornbirn*.

- [Kohl und Markart, 2003] Kohl, B. und Markart, G. (2003). Surface roughness and its influence on overland flow. Technischer bericht, Book of abstracts: International Workshop on Mountain Hydrology.
- [Kohl et al., 2002] Kohl, B., Markart, G., Schauer, T., und Porzelt, M. (2002). Vergleich zweier Großregenanlagen zur Abschätzung des Abfluss- und Infiltrationsverhaltens von unterschiedlichen Boden-/Vegetationskomplexen. Technischer bericht, Beiträge zur Wildbachforschung. BFW-Berichte, 127.
- [Kohl et al., 2013] Kohl, B., Stepanek, I., Pirkl, H., Kirnbauer, R., Meyer, V., und Markart, G. (2013). Verbesserungspotentiale bei der prozessorientierten Ereignismodellierung Simulation hydrologischer Systeme - Wie nah kommen wir der Realität? *Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft*.
- [Kreps und Schimpf, 1965] Kreps, H. und Schimpf, H. (1965). Starkregen und Starkregenstatistik. Mit zahlreichen Beilagen und Karten. *Mitteilungen des Hydrographischen Dienstes in Österreich. Heft 42*, Seiten 1–44.
- [Kürmayr, 2016] Kürmayr, G. (2016). Freiwillige Feuerwehr Schwertberg, Große Schäden nach schwerem Unwetter. <https://www.ff-schwertberg.at/9-einsaetze/238-grosse-schaeden-nach-schwerem-unwetter>.
- [LARSIM, 2020] LARSIM (2020). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Technischer bericht, LARSIM-Entwicklergemeinschaft - Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG, BAFU.
- [Laudacher, 2020] Laudacher, K. (2020). Oberflächenabflussbildungsprozesse: Abfluss infolge Infiltrationsüberschuss (Horton'scher Oberflächenabfluss) Abfluss infolge Sättigungsüberschuss (Dunn'scher Oberflächenabfluss).
- [Lorenz und Skoda, 2001a] Lorenz, P. und Skoda, G. (2001a). Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. Wiener Mitteilungen Band 164. Seite: 179-200.
- [Lorenz und Skoda, 2001b] Lorenz, P. und Skoda, G. (2001b). Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. In *Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose*. Dieter Gutknecht Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft-Technische Universität Wien. https://hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/_migrated/content_uploads/vorwort_01.pdf.
- [LUBW, 2020] LUBW (2020). Anhänge 1 a, b, c zum Leitfaden Kommunales Starkregenisikomanagement in Baden-Württemberg Stand: März2020. *Verlagspublikation Umweltverwaltung Baden-Württemberg*. Rauigkeitsbeiwerte.

- [Maniak, 2010] Maniak, U. (2010). *Hydrologie und Wasserwirtschaft Eine Einführung für Ingenieure 6., neu bearbeitete Auflage 1* ISBN 978-3-642-05395-5. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Markart et al., 2006] Markart, G., Kohl, K., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., und Stern, R. (2006). GGeländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses bei Starkregen - Grundzüge und erste Erfahrungen. Technischer Bericht, Wiener Mitteilungen Band 197: Methoden der hydrologischen Regionalisierung.
- [Masson Delmotte et al., 2018] Masson Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., und Waterfield, T. (2018). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger; Summary for Policymakers. Technischer Bericht, IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [Nachtnebel, 2007] Nachtnebel, H. P. (2007). Hydrologie und Flussgebietsmanagement LVA-Nr. 816.101. Technischer Bericht, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau.
- [Néelz und Pender, 2013] Néelz, S. und Pender, G. (2013). Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages. Technischer Bericht, Environment Agency.
- [Petraschek, 1987] Petraschek, A. (1987). Die Berechnung des Oberflächenabflusses von Flächenelementen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Nr. 30, S. 65 - 72.*
- [PielerBüro, 2014] PielerBüro (2014). Leitfaden für die Einleitung von Oberflächenwässern in Vorfluter - 2. Auflage. Technischer Bericht, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung Gruppe Wasser, Büro Pieler ZT GmbH.
- [PielerBüro, 2016] PielerBüro (2016). Gefahrenhinweiskarte Hangwasser Technischer Bericht Hangwasser – hydrologische Abschätzung Methodensammlung. Technischer Bericht, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung Gruppe Wasser, Büro Pieler ZT GmbH.
- [Pistotnik, 2009] Pistotnik, G. (2009). Untersuchung von Starkniederschlagsereignissen in der Region Wechsel und Buckligen Welt. Technischer Bericht, Projektbericht der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG).
- [Rodriguez, 2017] Rodriguez, R. (2017). Klimprax Arbeitspaket 2.3: Überprüfung und Anpassung der hydraulischen Ansätze zur Berechnung des Oberflächenabflusses bei Starkregen/Sturzfluten an steilen Hängen. Technischer Bericht, Hochschule RheinMain – University of Applied Sciences – Wiesbaden Rüsselsheim.
- [Seibert und Auerwald, 2020] Seibert, S. und Auerwald, K. (2020). *Hochwasserminderung im ländlichen Raum Ein Handbuch zur quantitativen Planung.* Springer Spektrum.

- [Sifalda, 1996] Sifalda, V. (1996). Approximation der Konzentrationszeit der Abflüsse von kleinennatürlichen Einzugsgebieten. *Wasserwirtschaft* 86.
- [Skoda et al., 2007] Skoda, G., Weilguni, V., und Haiden, T. (2007). Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten. Technischer bericht, BMLFUW: HAÖ – Hydrologischer Atlas Österreichs – 3.
- [Sotier et al., 2017] Sotier, B., Klebinder, K., Bauer, T., Markart, G., und Strauss, P. (2017). Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreich – Hydrobod NÖ II, zweite Projektphase Endbericht inkl. Ergänzungen. Technischer bericht, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt; Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren.
- [Starl, 2020] Starl, H. (2020). Hangwassermodellierungen und deren Möglichkeit zur Abschätzung von potenziellen Gefährdungen für Gebäude – Eine Analyse anhand von Starkregenereignissen in Oberösterreich. *Bautechnik*. <https://doi.org/10.1002/bate.201900028>.
- [Universität Karlsruhe, 2003] Universität Karlsruhe (2003). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 3 - Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg*. Universität Karlsruhe (TH) Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- [Volz, 2002] Volz, C. (2002). Weiterentwicklung eines auf Finite Volumen Methode basierenden Modells für die Flachwassergleichung. Master's thesis, Universität Stuttgart.
- [Weilguni, 2009] Weilguni, V. (2009). eHyd Auswertungen Karte Bemessungsniederschlag. Technischer bericht, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- [Weilguni, 2015] Weilguni, V. (2015). eHyd Bemessungsniederschlag. Technischer bericht, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW).
- [Winkelhofer, 2016] Winkelhofer, M. (2016). Kinetische Energie und Erosivität von Niederschlägen. Master's thesis, Universität für Bodenkultur Wien Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU) Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW).
- [Wussow, 1922] Wussow, G. (1922). Untere Grenze dichter Regenfälle. *Meteorol. Z.* 39, 173.
- [ZAMG, 2020] ZAMG (2020). Informationsportal Klimawandel — ZAMG. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum/niederschlag>. Accessed: 17.09.2020.

- [ZAMG, o.J.] ZAMG (o.J.). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/messnetze/wetterstationen>. Accessed: 04.10.2020.
- [ZAMG, o.j.] ZAMG (o.j.). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell>. Accessed: 01.07.2020.
- [Zeller, 1974] Zeller, J. (1974). Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. Technischer bericht, Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, Bericht Nr. 126. 1. und 2. Auflage.
- [Zilch et al., 2012] Zilch, K., Katzenbach, R., Frics, D., und Beckmann, K. J. (2012). *Handbuch für Bauingenieure Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit 2., aktualisierte Auflage*. Springer-Verlag Heidelberg ISBN: 978-3-642-14449-3.

Kapitel 6

Anhang

Niederschlagsauswertungen der einzelnen Wetterstationen

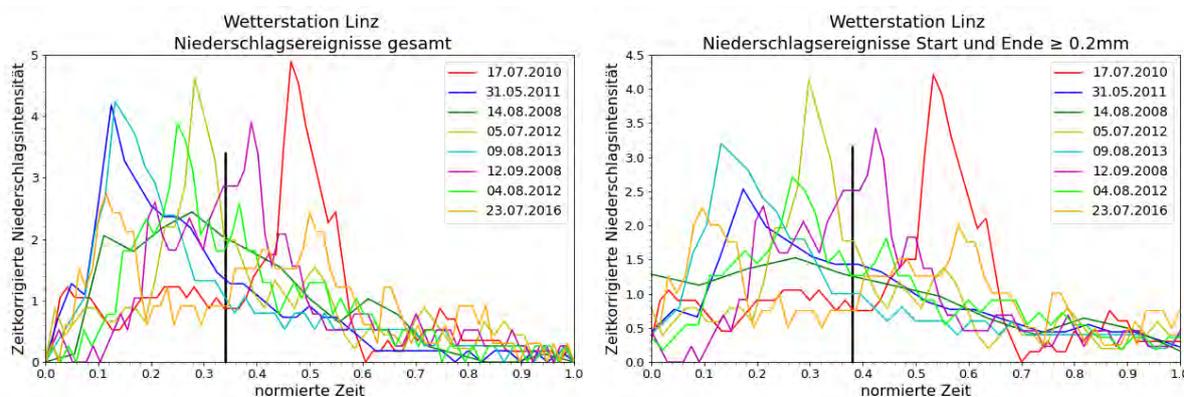


Abbildung 6.1 Linz: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 6.1 Linz: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Linz gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
17.07.2010	72	40,7	0,46	2,80
31.05.2011	41	22,0	0,23	2,30
14.08.2008	19	14,0	0,33	1,90
05.07.2012	54	24,1	0,33	2,10
09.08.2013	54	20,0	0,23	1,60
12.09.2008	78	29,6	0,37	1,50
04.08.2012	69	26,3	0,32	1,50
23.07.2016	79	25,7	0,42	0,90
gesamte Ereignisse gemittelt			0,34	

Linz Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
17.07.2010	61	39,9	0,52	2,80
31.05.2011	24	20,9	0,34	2,30
14.08.2008	12	13,7	0,35	1,90
05.07.2012	48	23,9	0,34	2,10
09.08.2013	39	19	0,26	1,60
12.09.2008	67	28,9	0,40	1,50
04.08.2012	46	24,9	0,36	1,50
23.07.2016	63	24,7	0,45	0,90
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,38	

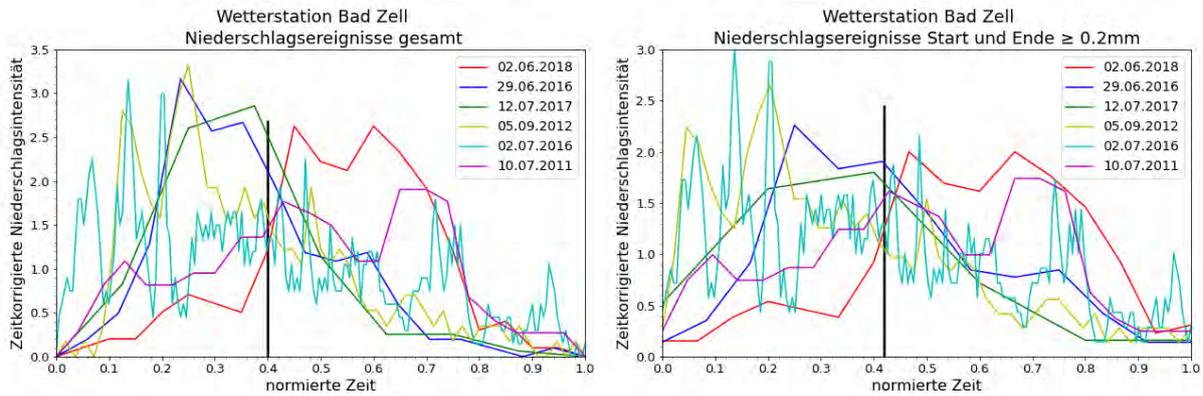


Abbildung 6.2 Bad Zell: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 6.2 Bad Zell: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Bad Zell gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
02.06.2018	21	19,8	0,55	2,60
29.06.2016	18	17,2	0,35	3,20
27.06.2019	Ungültig			
12.07.2017	9	12,6	0,36	4,50
05.09.2012	57	32,0	0,32	1,90
02.07.2016	192	127,5	0,36	2,10
10.07.2011	24	16,9	0,49	1,40
08.06.2015	Ungültig			
gesamte Ereignisse gemittelt			0,40	

Bad Zell Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
02.06.2018	16	19,5	0,59	2,60
29.06.2016	13	17,0	0,40	3,20
27.06.2019	Ungültig			
12.07.2017	6	12,5	0,36	4,50
05.09.2012	45	31,5	0,29	1,90
02.07.2016	184	127,2	0,36	2,10
10.07.2011	22	16,9	0,49	1,40
08.06.2015	Ungültig			
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,42	

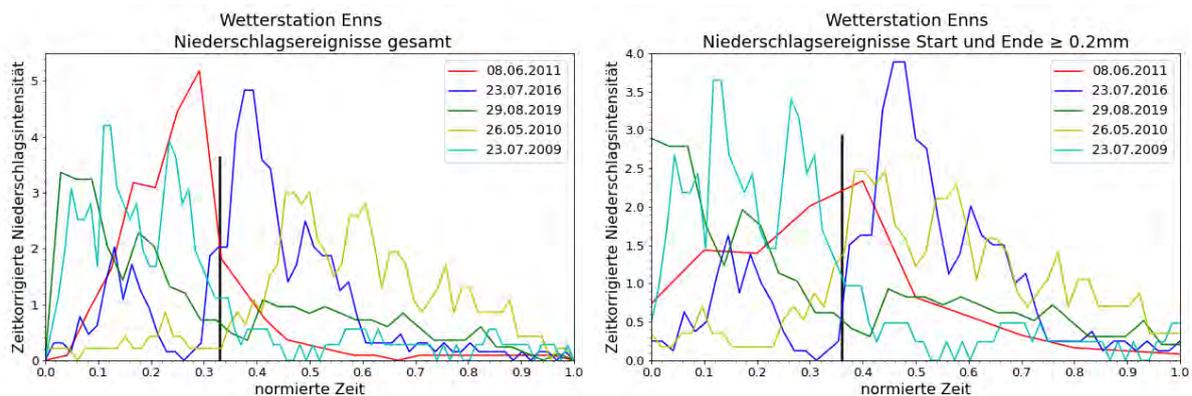


Abbildung 6.3 Enns: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 6.3 Enns: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Enns gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
08.06.2011	25	26,4	0,27	5,70
23.07.2016	62	39,1	0,40	3,10
29.08.2019	35	28,3	0,22	2,80
26.05.2010	67	30,7	0,57	1,40
23.07.2009	82	28,9	0,21	1,50
gesamte Ereignisse gemittelt			0,33	

Enns Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
08.06.2011	11	24,4	0,34	5,70
23.07.2016	49	38,3	0,49	3,10
29.08.2019	30	28,1	0,22	2,80
26.05.2010	53	29,6	0,53	1,40
23.07.2009	69	28,0	0,23	1,50
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,36	

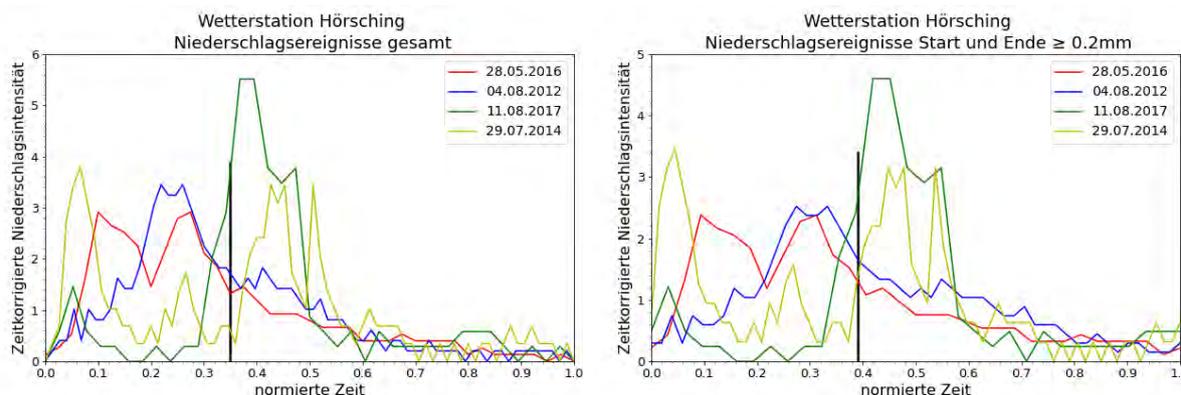


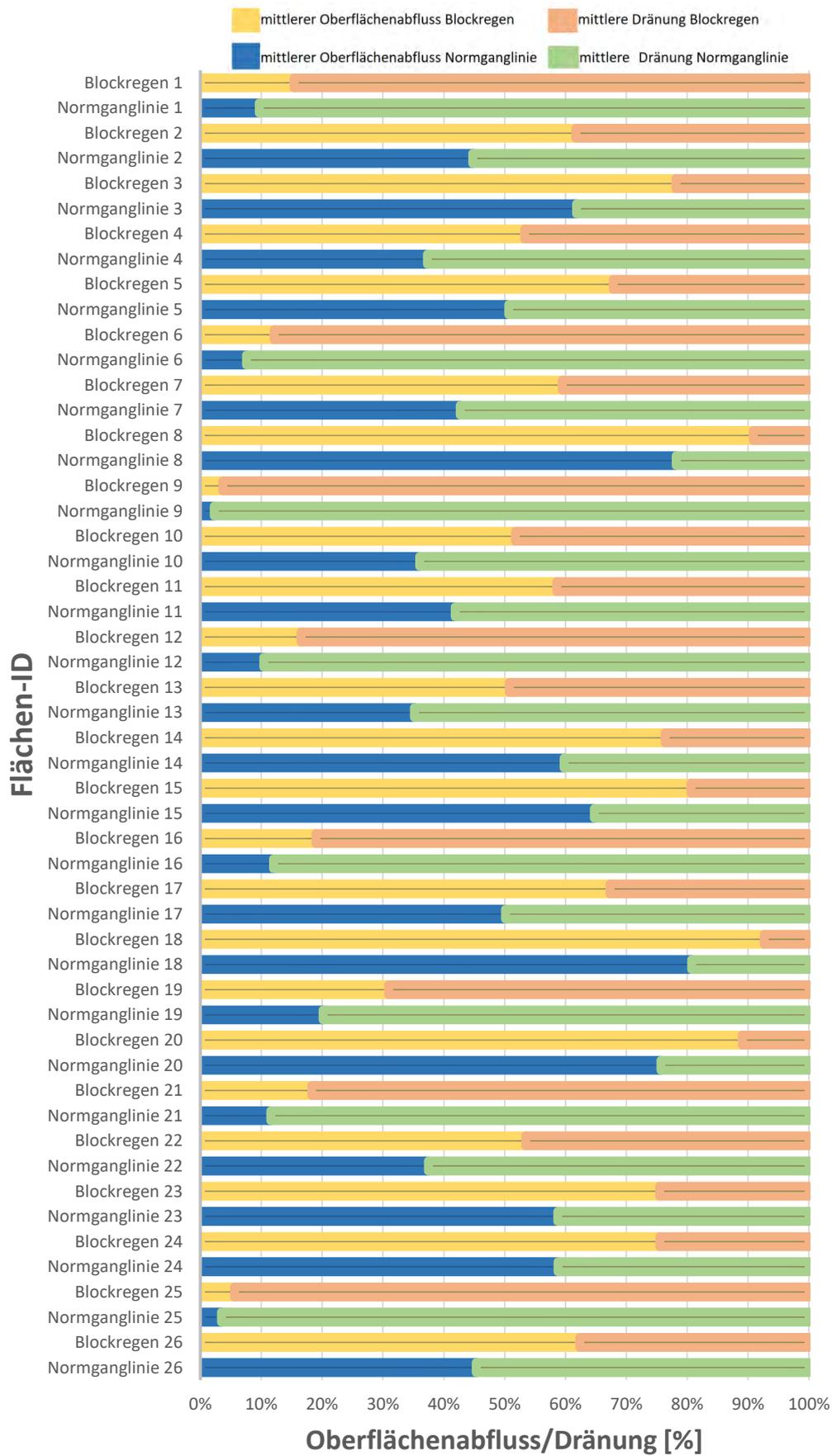
Abbildung 6.4 Hörsching: Die Abbildungen zeigen die zeit- und flächennormierten Niederschlagsganglinien für die gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts); Die vertikale, schwarze Linie markiert den gemittelten normierten Zeitpunkt bei dem 50 % der Niederschlagssumme gefallen sind

Tabelle 6.4 Hörsching: Gegenüberstellung von erhobenen Kennwerten der einzelnen Niederschlagsereignisse: gesamten Niederschlagsereignisse (links) sowie für die Niederschlagsereignisse mit Start und Ende bei 0,2 mm/min (rechts)

Hörsching gesamt	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
28.05.2016	41	30,2	0,27	2,20
04.08.2012	74	36,0	0,30	1,70
11.08.2017	39	13,1	0,41	1,90
29.07.2014	76	21,8	0,41	1,10
gesamte Ereignisse gemittelt			0,35	

Hörsching Start und Ende ≥ 0.2mm	Dauer [min]	Menge [mm]	50% des Niederschlags [normierte Zeit]	max. Intensität [mm/min]
28.05.2016	33	29,6	0,31	2,20
04.08.2012	52	34,4	0,37	1,70
11.08.2017	32	12,8	0,46	1,90
29.07.2014	68	21,3	0,42	1,10
Start und Ende ≥ 0.2mm Ereignisse gemittelt			0,39	

Tabelle 6.5 Gegenüberstellung aller mittlerer Oberflächenabflüsse und Dränung der Normganglinie (Run162) und des Blockregens (Run163) aus dem Pilotgebiet Schwertberg






Abbildung 6.5 zeigt die in Schwertberg in der Form von Modifikationen am digitalen Geländemodell um 15cm erhöhten offenen Mauern

Kontaktdaten:



EPZ – Elementarschadenpräventionszentrum:
Dipl.-Ing. Hans Starl
+43 (0)732 7617 874
h.starl@elementarschaden.at



Dipl.-Ing. Mathias Laudacher
+43 (0)66488171692
m.laudacher@elementarschaden.at