

Edith PETEK, BSc

Klassifizierung von hydrologischen Ereignissen als Grundlage eines Hochwasserwarnsystems

Pilotprojekt in der Weststeiermark – Einzugsgebiet Kainach

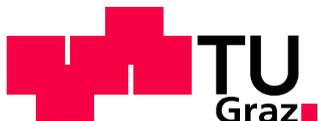
MASTERARBEIT

Vorgelegt zur Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin

der Studienrichtung
Bauingenieurwissenschaften – Umwelt und Verkehr
erreicht an der

Technischen Universität Graz

In Zusammenarbeit mit der Steiermärkischen Landesregierung



Graz, Mai 2011

Verfasst am
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
Technische Universität Graz



Betreuer der Diplomarbeit:
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Harald KAINZ

Mitbetreuende Assistentin:
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Evelyn KRALL

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, Mai 2011

.....
(Unterschrift)

PERSÖNLICHE DANKESWORTE

Als aller erstes möchte ich mich bei *allen* bedanken, die an der Entstehung meiner Masterarbeit maßgeblich beteiligt waren. Ich bedanke mich bei Dipl.-Ing. Dr. Robert Schatzl, stellvertretend für die Fachabteilung 19 A der Steiermärkischen Landesregierung, die mir diese Masterarbeit ermöglicht und tatkräftig unterstützt hat. Ein Dank gebührt auch Dr. Christophe Ruch vom Joanneum Research Graz, Institut für Wasser Ressourcen Management, für die Unterstützung in fachlichen Fragen.

Für die Begutachtung sowie die laufende perfekte Betreuung der Arbeit möchte ich mich bei Herrn. Univ. Prof. DDipl. Ing. Dr.techn. Harald Kainz und bei Frau Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Evelyn Krall bedanken.

Ganz besonderer Dank gebührt meiner Mutter, die mir durch ihre jahrelange finanzielle Unterstützung und auch Geduld mit meiner Person, die Ausbildung an der Technischen Universität Graz ermöglicht hat. Maßgebende Wegbegleiter in meinem Leben stellten ebenfalls mein Bruder sowie mein Lebensgefährte dar.

Schlussendlich bedanke ich mich noch bei all meinen Freunden und Studienkollegen sowie bei allen Verwandten und Bekannten für ihre fortwährende Unterstützung und ihr Verständnis.

KURZFASSUNG

Natur- und Umweltkatastrophen sind die Menschheit sehr gefährdende und von ihr gefürchtete Ereignisse – so auch Hochwasser. Durch die Vielzahl der abflussbeeinflussenden Parameter ist eine exakte Hochwasserwarnung, vor allem in kleinen Einzugsgebieten, schwierig. Das Amt der Steiermärkischen Landesregierung sieht Handlungsbedarf, ein Warnsystem in der Weststeiermark im Einzugsgebiet der Kainach sowie der Sulm zu erstellen, um qualitativ hochwertige Prognosen möglicher Hochwasserereignisse für diese Region liefern zu können. Die vorliegende Arbeit ist ein Teil eines von der Europäischen Union geförderten Projektes namens INARMA (Integrated Approach to Flood Risk Management) und beschäftigt sich mit der Erstellung eines „Katalogsystems“. Durch Klassifizierung von Hochwasserereignissen am Fluss Kainach wird ein vorgefertigter Szenarienkatalog erstellt, abhängig von den Vorbedingungen des Bodens. Darauf basierend soll ein effektiver Niederschlag prognostiziert und eine Erstabschätzung von Hochwasserereignissen ermöglicht werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Hochwasserereignisse anhand von hydrologischen Merkmalen zu klassifizieren, um in weiterer Folge durch prognostizierte Ereignisniederschläge Aussagen über zu erwartende Hochwasserspitzen zu machen.

ABSTRACT

Due to ecological disasters humans will always concentrate on nature and its impact and influence on human life. In the past environmental catastrophes led mankind to get a deeper understanding of natural processes. So the Styrian Government started various projects concerning rivers, especially flood situations in the western region of the province. INARMA - Integrated Approach to Flood Risk Management - is one of these transnational programs supported by the European Union. One of its targets is to analyze the river Kainach and its flooding situation.

This master thesis deals with the assessment and evaluation of floods that occurred in the past ten years at the river Kainach. All flood-influencing factors, such as the precipitation, the discharge or surface runoff of the Kainach and its environment were explored. By comparing these parameters all feasible floods can be classified in the future. This classifications should make it possible to predict floods and alert the population in the region of western Styria in time.

INHALTSVERZEICHNIS

Eidesstattliche Erklärung.....	i
Persönliche Dankesworte.....	ii
Kurzfassung.....	iii
Abstract.....	iii
Inhaltsverzeichnis.....	iv
1. Motivation und Ziel der Arbeit.....	1.1
1.1 Einleitung.....	1.1
2. Grundlagen, Theorie.....	2.3
2.1 Niederschlag.....	2.3
2.1.1 Entstehung von Niederschlag.....	2.3
2.1.2 Einteilung von Niederschlag.....	2.3
2.1.3 Erscheinungsformen des fallenden Niederschlags.....	2.4
2.1.4 Die Niederschlagsmessung.....	2.6
2.1.5 Kennwerte und Charakteristika des Niederschlages.....	2.9
2.1.6 Der Gebietsniederschlag.....	2.10
2.2 Abfluss.....	2.11
2.2.1 Abflussentstehung – Abflusskomponenten.....	2.12
2.2.2 Begriffe des Abflusses – Wasserführung, Gang- und Dauerlinie.....	2.14
2.2.3 Messung des Abflusses.....	2.16
2.3 Hochwasser.....	2.17
2.3.1 Definition und Ursachen.....	2.17
2.3.2 Wiederkehrzeit/ Jährlichkeit eines Hochwassers.....	2.18
2.3.3 Abflussanteile von Hochwasserganglinien.....	2.19
3. Untersuchungsgebiet in der Weststeiermark.....	3.20
3.1 Die Kainach.....	3.21
3.2 Niederschlag im Einzugsgebiet.....	3.22
3.3 Abflusspegel.....	3.26
4. Datengrundlage – Datenaufbereitung.....	4.29
4.1 Selektion der hydrologischen Daten.....	4.29
4.1.1 Niederschlagsdaten.....	4.29
4.1.2 Abflussdaten.....	4.30
4.2 Ermittlung des Gebietsniederschlags.....	4.35
5. Datenauswertung.....	5.40

5.1	Abtrennung des effektiven Niederschlags	5.40
5.2	Klassifizierung der Ereignisse	5.41
5.2.1	Klasse: Vorregensituation	5.41
5.2.2	Klasse: Niederschlagsdauer	5.42
6.	Analyse und Schlussfolgerung	6.43
6.1	Interpretation der Ereignisse am Pegel Lieboch	6.44
6.2	Auswertung der Ereignisse an den Pegeln Voitsberg und Hitzendorf	6.50
6.2.1	Pegeleinzugsgebiet Voitsberg	6.50
6.2.2	Pegeleinzugsgebiet Hitzendorf:	6.52
6.3	Schlussfolgerung	6.53
	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	IV
	Anlagenverzeichnis	V
	Anlagen	VII

1. MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Schon seit jeher ist das Element Wasser ein notwendiger, aber auch bedrohlicher Bestandteil des menschlichen Lebensraumes. Flussläufe und deren Ufer stellten schon seit Jahrhunderten die Grundlage der menschlichen Siedlungsgebiete dar. Die Gefahren des Wassers waren bekannt aber der Mensch war dennoch mit seinem Umfeld der Natur im Einklang. Ungeachtet frühzeitiger Veränderungen der natürlichen Flusslandschaften, um weitreichende Flächen landschaftlich bewirtschaften zu können, wusste der Mensch mit dem Wasser umzugehen. Heute wird die Energie des Wassers immer mehr genutzt und spielt in der gegenwärtigen Situation der alternativen Energiequellen eine bedeutsame Rolle. Flüsse werden durch technische Maßnahmen begradigt und Dämme, Talsperren und Flusskraftwerke errichtet. Der Mensch ist bestrebt die Natur für seine eigenen Vorteile zu nützen. Trotz aller modernen Konstruktionstechniken oder mathematischen bzw. physikalischen Modellen ist die Gesellschaft aber nicht in der Lage sie zu lenken. Hinsichtlich Überflutungen von Siedlungsgebieten ist Hochwasserschutz demnach nur ein Versuch das Schadensrisiko zu minimieren denn völlig ausgeschlossen kann ein Hochwasser nie werden. Die Wissenschaft lenkt bereits seit einigen Jahren in die richtige Richtung bezüglich des Hochwasserschutzes und so werden vorhandene Verbauungen oder Versiegelungen rückgebaut um dem Gewässer mehr Raum zu bieten. Auch wird den Bereichen des aktiven und passiven Hochwasserschutzes immer mehr Bedeutung zugeschrieben. Um mögliche Gefahren vorhersagen und Risiken einschätzen zu können müssen Prognosen erstellt und Warnsysteme installiert werden. Diese basieren auf dem gegenwärtigen Ist-Zustand des jeweiligen Gewässers. Hochwasserprognosemodelle oder sogenannten ICTs (Informations- und Kommunikationstechnologien) werden meist nur für Hauptflüsse mit großen Einzugsgebieten angewandt. Die Vorhersage von Hochwasserereignissen in Klein- bis Mitteleinzugsgebieten ist aufgrund der kleinen Zeit/ Raum Skala von meteorologischen Prozessen sehr schwierig. Darauf aufbauend entstand die Idee, ein Hochwasserwarnsystem für kleine Einzugsgebiete in der Steiermark zu entwickeln. Prognosen bereits bestehender Warnsysteme großer Flüsse (Mur, Enns und Raab) sollen dadurch qualitativ verbessert und aussagekräftigere Vorhersagen getroffen werden können. Als Muster bereits verwendeter Methoden hatte sich bisher das „Katalogsystem“ des Landes Kärnten bewährt. Auch für die Betrachtung des Einzugsgebietes in der Weststeiermark dient ein Ereigniskatalog als Grundlage des Warnsystems.

1.1 EINLEITUNG

Der hydrographische Dienst der Fachabteilung 19 A der Steiermärkischen Landesregierung betreibt ein dichtes Messnetz an Abfluss- sowie Niederschlagsmessstationen in der Steiermark. An mehreren Onlinestationen werden Wasserstands.- und Niederschlagsdaten gemessen, welche in der zentralen HyDams-Datenbank der Steiermärkischen Landesregierung gespeichert werden. Diese Datensammlung ist die Grundlage für diverse wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen und den Katastrophenschutz: Möglichst aktuelle und vor allem

auch korrekte Daten der verschiedenen Oberflächengewässer erleichtern das Katastrophenmanagement und lassen aussagekräftige Prognosen zu. Damit Hochwasserereignisse nun im Vorhinein prognostiziert werden können, bedarf es einer möglichst fehlerfreien und vor allem aktuellen Datengrundlage sowie einer fundierten Datenaufbereitung.

Die vorliegende Arbeit soll eine Art Black-Box-Modell des Abflussregimes des Flusses Kainach darstellen. Black-Box in jenem Sinne, da nicht alle der abflussbeeinflussende Parameter in die Überlegungen der Auswertung einfließen. Durch Reduzierung der Faktoren wurden vor allem vorhandene Niederschlagsdaten als Input des Modells angesetzt. Detektierte Hochwasserereignisse bezeichnen den Output in diesem Blockschema. Nach Selektion der vorhandenen Aufzeichnungen aus der digitalen Datenbank der Steiermärkischen Landesregierung werden diese beiden Datensätze, Abfluss- und Niederschlagsaufzeichnungen, gegenübergestellt und verglichen und darauf aufbauend ein Szenarienkatalog der Hochwasserereignisse erstellt.

2. GRUNDLAGEN, THEORIE

Im folgenden Kapitel werden die hydrologischen Grundlagen erläutert und wird auf die verschiedenen Erscheinungsformen des Niederschlags eingegangen. Auch die Zusammensetzung des Abflusses sowie die Entstehung von Hochwässern werden näher betrachtet. Da der Zusammenhang von Niederschlag, Abfluss und Hochwasser von großer Bedeutung ist und diese drei Komponenten, abgesehen vom Niederschlag, unabdingbar miteinander in Verbindung stehen, ist es sehr wichtig, grundsätzliche Überlegungen darüber anzustellen und die Theorie dahinter zu erklären.

2.1 NIEDERSCHLAG

2.1.1 Entstehung von Niederschlag

„Das Niederschlagsereignis ist ein durch meteorologische Voraussetzungen ausgelöster, zeitlicher und räumlicher mehr oder minder stark variabler Naturvorgang...“ (Richtig, 1995)

Niederschlagsereignisse entstehen, wenn feuchte Luft unter ihren Taupunkt abkühlt und anschließend Kondensation einsetzt. Die Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre bewirkt eine Hebung der Luftmassen und bildet Wolken. Durch diese Hebungen und Senkungen ist eine automatische Abkühlung der Luftmassen gegeben und der relative Feuchtegehalt in der Atmosphäre nimmt zu. Es kommt zum Ausregnen in fester oder flüssiger Form. Von Niederschlag spricht man jedoch erst dann, wenn das Wasser, egal in welcher Erscheinungsform, den Erdboden erreicht d.h. Pflanzen, Gebäude, Wasser- und Eisflächen berührt. Der Begriff der Interzeption ist für die Aufstellung von Wasser.- bzw. Gebietsbilanzen von großer Bedeutung und sollte nicht außer Acht gelassen werden. Unter Interzeption versteht man jenen Anteil an Niederschlag, welcher von der Vegetationsdecke abgefangen wird. Verdunstet das Wasser oder wird es von den Pflanzen aufgenommen, so stellt dies für den unter der Vegetation liegenden Erdboden eine Niederschlagsverminderung dar. Jedoch kann der von den Pflanzen als Wasser oder Raureif abgefangene und später abrinne oder abtropfende Niederschlag für den Boden auch als Niederschlagsvermehrung angesehen werden (Maniak, 1997).

2.1.2 Einteilung von Niederschlag

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen *fallendem*, *abgesetztem*, oder *abgefangenem* Niederschlag, wobei der Großteil aller Niederschlagsmessstationen nur den fallenden Niederschlag aufzeichnet. Folgende Klassifizierungen und Beschreibungen der Niederschlagsereignisse sind dem Klimaatlas Steiermark entnommen (ZAMG):

Fallender Niederschlag

Das ist jene Wassermenge, welche ohne Hindernis auf die Bodenoberfläche fällt und somit auch direkt in die Wasserbilanz eingeht: Fallender Niederschlag wird unterteilt in flüssigen und festen Niederschlag.

Bei flüssigem Niederschlag handelt es sich um Regen. Zu dieser Form des Niederschlags werden sehr oft noch Zusatzangaben gemacht, um die Ursache, Dauer oder das Erscheinungsbild des Ereignisses besser beschreiben zu können. Diese können z.B. sein: *Nieselregen* (feine Tropfen), *Regenschauer* (kurzfristig, konvektiver Niederschlag), *Schlagregen* (begleitet von starkem Wind) oder etwa *Platzregen* (heftiges Ereignis).

Die Bildung von festem Niederschlag wird hauptsächlich von den Temperaturen der Luftmassen in der Atmosphäre bestimmt. Schnee ist wahrscheinlich die bekannteste feste Erscheinungsform, jedoch auch Hagel, Graupel oder Eisregen fallen in diese Klassifizierung.

Abgesetzter Niederschlag

Unter abgesetzten Niederschlag versteht man eine direkte Kondensation von atmosphärischem Wasserdampf auf festen Flächen – man spricht von Tau. Dies geschieht nur, wenn diese Oberflächen eine Temperaturabkühlung unter den Taupunkt der Luft erfahren. Klare Nächte mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit im Sommer- und Frühherbst sind die beste Voraussetzung für die Bildung von Tau. Spricht man jedoch von einer Resublimation von Wasserdampf auf festen Oberflächen, so handelt es sich um Reif. Durch die Abhängigkeit des Wasserdampfgehaltes der Luft von der Temperatur ist die Entstehung von Reif allerdings geringer als die Taubildung bei positiven Temperaturen.

Abgesetzter Niederschlag wird bei Niederschlagsmessungen meist nicht erfasst und außer Acht gelassen. Welchen Anteil an Niederschlagshöhe im Jahr Tau und Reif zugesprochen werden kann, ist dadurch unbekannt. Glaubt man diverser Fachliteratur so können Tau, Nebel sowie Reif einen beachtlichen Anteil von bis zu 30 mm Niederschlagshöhe im Jahr ausmachen (Maniak, 1997).

Abgefangener Niederschlag

Aus sehr kalten Wassertröpfchen entstehen Eisablagerungen, welche je nach Bildungsbedingungen und Konsistenz als Raureif, Raufrost oder Raueis bezeichnet werden. Dies geschieht nur bei entsprechender Luftbewegung, wenn in der Luft schwebende Wassertröpfchen durch feste Oberflächen „ausgekämmt“ werden – sogenannter abgefangener Niederschlag (ZAMG). Bei dichtem Nebel und starkem Wind ist die Entwicklung von abgefangenem Niederschlag am wahrscheinlichsten. Auch diese Form des Niederschlags wird messtechnisch nicht erfasst.

2.1.3 Erscheinungsformen des fallenden Niederschlags

Im Wesentlichen unterscheidet man in der mitteleuropäischen Klimazone zwischen advektivem und konvektivem Niederschlag – folgende Erläuterungen der Erscheinungsformen des Niederschlags sind den Autoren (Maniak, 1997) und (Richtig, 1995) entnommen:

Durch das Aufsteigen warmer, feuchter Luftmassen vor allem an Flanken von Gebirgszügen kommt es zur Bildung advektiver Niederschlagsereignisse. Der Bewegungsanteil der Luftmasse in die Horizontale ist dabei größer als in die Vertikale und es kommt zum Ausregnen in großflächigen Niederschlagsgebieten.

In der Meteorologie unterscheidet man prinzipiell zwischen Warm- und Kaltfronten: in Warmfronten gleitet feuchte Luft über schwere Kaltluft und schiebt diese langsam vor

sich her. Bei Kaltfronten hingegen hebt die kältere die wärmere, darüber liegende Luft an.

Bei advektiven Niederschlagsereignissen sind die Regenintensitäten meist nur gering bis mäßig, das Ereignis selbst aber von langanhaltender Dauer.

Konvektion hingegen ist der Transport von Luft in vertikaler Richtung: die Vertikalbewegung der Luftmassen ist aufgrund der warmen, aufsteigenden Luft größer als jene Komponente in die Horizontale. Durch die Erwärmung der Erdoberfläche, vor allem in den Sommermonaten, entstehen Wolkentürme durch einen extremen Aufstieg feuchter und warmer Luft. Konvektion ist die Ursache für die Ausbildung von Wärmegewittern. Kleine, scharf abgegrenzte Regenzellen bilden sich und im Falle eines Ausregnens kommt es zu Starkregenereignissen, oft auch in Verbindung mit Gewitter und Hagel. Diese Form des Niederschlags weist meist sehr hohe Niederschlagsintensitäten und -summen auf, ist jedoch auf eine kürzere Regendauer beschränkt.

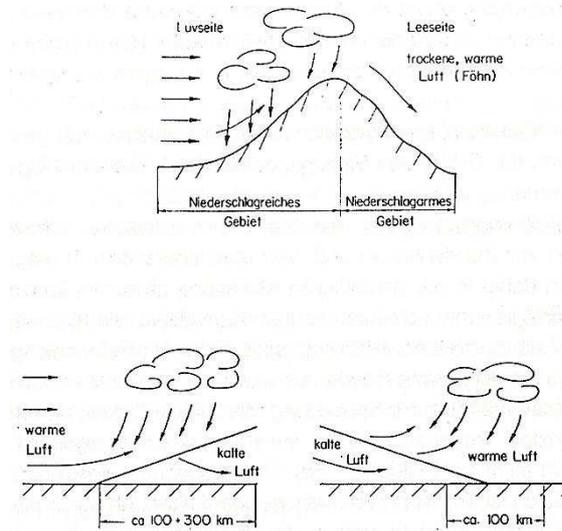


Abb. 2.1 Schematische Darstellung zur Entstehung advektiver Niederschläge (Richtig, 1995)

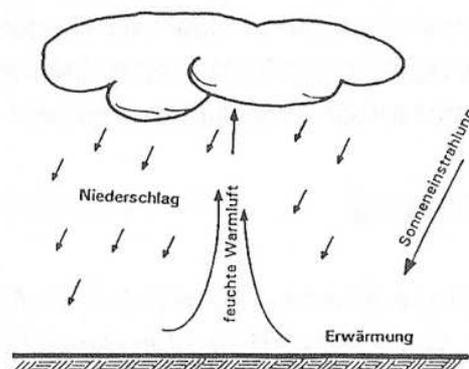


Abb. 2.2 Schematische Darstellung zur Entstehung konvektiver Niederschläge (Richtig, 1995)

2.1.4 Die Niederschlagsmessung

Der Großteil der Niederschlagsmessstationen zeichnet vorwiegend den flüssigen Niederschlag in *Millimeter Wasserhöhe* auf, wobei 1 mm Wasserhöhe einem Liter Wasser pro Quadratmeter entspricht. Aus der genannten Einheit lässt sich erkennen, dass Niederschlagsereignisse im Gegensatz zu Abflüssen immer flächenhaft auftreten, jedoch nur punktuell gemessen werden. Durch das zeitliche und räumliche Variieren von Gewitterzellen und Wolkentürmen können Niederschlagsintensitäten erschwert flächenhaft erfasst werden.

Ziel der Niederschlagsmessung ist es, repräsentative und in ihrer Darstellung sinnvolle Messwerte und -daten zu erhalten. Demzufolge sind wichtige Aspekte wie die Wahl des Niederschlagsmessgeräts, der Aufstellungsort sowie die Vermeidung möglicher Verluste in zukünftige Niederschlagsmessungen mit ein zu beziehen. Für die Qualität und auch die Aussagekraft der Niederschlagsdaten ist vor allem der Aufstellungsort der Messstation von großer Bedeutung. Zum Beispiel darf das von Bäumen herunterfallende Laub das Auffanggefäß nicht verstopfen oder die Messungen anderwärtig negativ beeinflussen. Eine freie Aufstellfläche ist demnach erforderlich. Auch dürfen gewisse Verfälschungen der Messungen nicht außer Acht gelassen werden. Zahlreiche Fehlerquellen beeinflussen die Niederschlagshöhen und führen folglich zu falschem Datenmaterial. Es muss davon ausgegangen werden, dass der gemessene Niederschlag immer um einen gewissen Betrag kleiner ist als der tatsächlich fallende Niederschlag. Zu den möglichen Fehlerquellen der Messungen zählen (Dyck, et al., 1995):

- Das Herausspringen von Hagelkörnern oder das Verblasen von Regen- und Schneeflocken wodurch nicht der gesamte Niederschlag erfasst wird
- Die Bildung eines Schneewulstes an der Öffnung des Sammelgefäßes und eine daraus resultierende Querschnittsverkleinerung
- Die Benetzung der Gefäßwände vor allem durch schwache Niederschlagsereignisse oder aber auch Laub, welches das Auffanggefäß verstopft

Die Vergangenheit zeigte immer wieder nichtlineare Abweichungen zwischen gemessenen und tatsächliche aufgetretenen Niederschlagsintensitäten. Vor allem Niederschlagswippen verzeichnen durch die Bewegung der Wippe einen Wasserverlust. Demzufolge wird versucht, diese Abweichungen mit Hilfe eines mobilen Kalibriergeräts zu kompensieren. Durch statische oder dynamische Kalibrierung werden die gemessenen Werte anhand einer Kalibrierkurve korrigiert und eine Qualitätssteigerung der Messdaten erlangt (Vasvári, et al., 2005).

Regen ist jene, uns geläufigste flüssige Form des fallenden Niederschlags. Auch Schnee ist eine Erscheinungsform des fallenden Niederschlags, verlangt jedoch andere Methoden und Messgrößen, um gemessen zu werden. In weiterer Folge wird die Messung des Regens erläutert und nur kurz auf Schneemessungen eingegangen. Um Niederschlag punktuell zu messen, werden grundsätzlich zwei Methoden angewandt. Die beiden Verfahren ähneln sich in der Art ihrer Aufstellung der Messgeräte, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer zeitlichen Auflösung.

Man unterscheidet zwischen (Dyck, et al., 1995)

- Niederschlagsmesser (Niederschlagsbeobachter) und
- Registrierende Messgeräte (Niederschlagsschreiber)

2.1.4.1 Niederschlagsmesser

Niederschlagsmesser eignen sich nur für Messungen von kurzer Dauer, da die Auffanggefäße regelmäßig entleert werden müssen. In der Steiermark findet diese Entleerung täglich um 7:00 Uhr statt. Das Ergebnis eines Niederschlagsmessers ist eine Niederschlagshöhe h_N , welche zwischen zwei Ablesezeitpunkten mit dem zeitlichen Abstand T_N gefallen ist. Niederschlagsmesser, wie das in Österreich sehr gebräuchliche Ombrometer nach *Hellmann*, ist ein zylindrisches Auffanggefäß mit einer genormten oberen Querschnittsfläche von 200 cm^2 (etwa 16 cm im Durchmesser) und wird in einer bestimmten Höhe, meist genau ein Meter, über der Erdoberfläche angebracht. Der Niederschlag wird durch einen Trichter in ein darunterliegendes Sammelgefäß geleitet und an festgelegten Zeitpunkten mit Hilfe einer Messkanne gemessen. Die minimalste Niederschlagshöhe in Millimeter – der unterste Grenzwert – beträgt 0,1 mm. Die Messungen werden als tägliche Niederschlagssummen dem Vortag zugeschrieben, da davon ausgegangen werden kann, dass der Großteil des Niederschlages bereits vor Mitternacht gefallen ist (ZAMG).

Auch das Messen von festem Niederschlag ist mittels Niederschlagsmesser durchführbar. Durch das Schmelzen des aufgefangenen Schnees kann eine Wasserhöhe gemessen werden. Es handelt sich um eine *Wasserhöhe des geschmolzenen Schnees* und nicht um eine Schneehöhe (Dyck, et al., 1995).

Um Niederschlagsmengen in gebirgigem oder unwegsamem Gelände messen zu können, bedient man sich an *Totalisatoren*. Diese sind ähnlich aufgebaut wie Ombrometer, weisen jedoch eine größere obere Querschnittsfläche sowie ein erhöhtes Fassungsvermögen des Sammelgefäßes auf. Dadurch werden Langzeitmessungen ermöglicht. Da Entleerungen in längeren Zeitabständen erfolgen, ist besonders auf einen Temperatureinfluss zu achten: Im Winter muss ein Frieren des gesammelten Niederschlagswassers im Sommer hingegen ein Verdunsten der Niederschlagshöhe verhindert werden. Auch muss eine mögliche, temperaturbedingte Volumsänderung berücksichtigt werden. Siehe auch (Dyck, et al., 1995) und (Maniak, 1997).

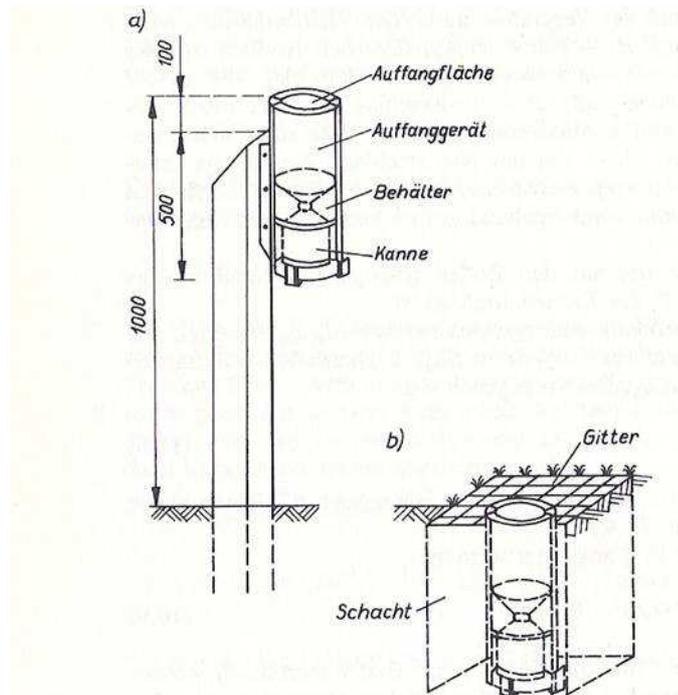


Abb. 2.3: Modell eines Niederschlagsmessers nach Hellmann
 a) Standardaufstellung b) Aufstellung im Niveau der Geländeoberfläche
 (Dyck, et al., 1995)

2.1.4.2 Registrierende Messgeräte

Ein *Niederschlagsschreiber* ist ein selbstregistrierendes Regenmessgerät, welches den fallenden Niederschlag kontinuierlich aufzeichnet. Das Resultat eines Niederschlagsschreibers ist somit die Aufzeichnung einer Niederschlagshöhen-Summenlinie. Aus dieser graphischen Darstellung lassen sich niederschlagsfreie Zeiten, sowie Dauer und Intensität von Niederschlagsereignissen sehr leicht ablesen. Die Erfassung des Niederschlags als Funktion der Zeit kann über verschiedene Messsysteme erfolgen: Wasserstand, Gewicht oder Tropfenzahl.

Die Entleerung von Niederschlagsschreibern erfolgt meist automatisch entweder nach dem Schwimmer-, dem Waage-, dem Wippenprinzip oder mittels Auslaufrohr – folgende Erläuterungen sind dem Autor (Maniak, 1997) entnommen.

Regenschreiber mit Wippe: Der Regen wird gesammelt und ab dem Erreichen eines bestimmten Volumens aufgezeichnet. Das Niederschlagswasser wird dabei in einer von zwei Schalen aufgefangen und ab einer gewissen Menge durch einen Wippschlag entleert. Daraufhin wird die gegenüberliegende Schale gefüllt. Der Zeitpunkt dieser Wippschläge wird elektronisch aufgezeichnet und ist ein Maß für die gefallene Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit. Der exakte Beginn sowie das Ende eines Niederschlagsereignisses kann jedoch nicht registriert werden.

Regenschreiber mit Waagen: Bei diesem Verfahren der Niederschlagsregistrierung erfolgt die Messung des Wassers durch Wägung des Sammelgefäßes: ist ein definiertes Gewicht der Auffangschale erreicht, so wird der Niederschlag sofort elektronisch erfasst. Eine zeitliche Verzögerung der Aufzeichnung ist dabei nicht gegeben und durch den Wegfall einer Kippbewegung sind Fehlfunktionen auch seltener zu erwarten.

Regenschreiber mit Schwimmer: Niederschlagschreiber mit Entleerung nach dem Heberprinzip ist eine häufig angewandte Methode der registrierenden Niederschlagsaufzeichnung. Die sich verändernde Wasserstandshöhe im Sammelgefäß wird durch einen Schwimmer registriert und auf eine Schreibtrommel übertragen. Ist das Sammelgefäß voll, so wird es über ein Heberrohr automatisch entleert. Anschließend geht der Schwimmer wieder in seine Ausgangslage zurück und die Registrierung beginnt wieder bei 0 mm.

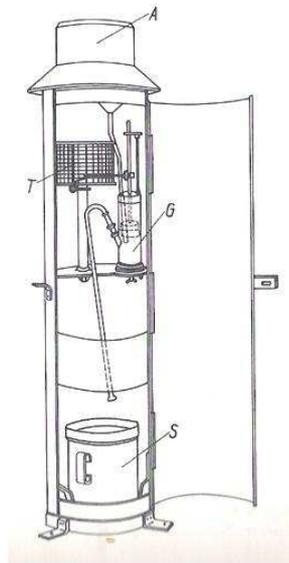


Abb. 2.4: Regenschreiber mit Schwimmer
(A Auffanggefäß, G Schwimmgefäß mit Heberrohr, T Schreibtrommel, S Sammelkanne)
(Dyck, et al., 1995)

Obwohl das Ombrometer noch immer verbreitet zum Einsatz kommt, gibt es eine Vielzahl anderer, modernerer Methoden der Niederschlagsregistrierung. Ein sehr fortschrittliches Verfahren ist das Messen des Niederschlags mittels Infrarot-Geräten. Es handelt sich dabei um zwei parallel aufgebaute Lichtschranken. Fallen Tropfen durch diese Infrarot-Schranke, werden sie gezählt und auch ihre Größe detektiert. Aus der Anzahl und der Größe der Wassertropfen lässt sich die Niederschlagshöhe ermitteln. Infrarot-Geräte eignen sich besonders gut für eine elektronische Datenerfassung und Übertragung (Maniak, 1997).

2.1.5 Kennwerte und Charakteristika des Niederschlages

Um ein Niederschlagsereignis beschreiben zu können, bedarf es nur weniger Kennwerte (OENORM B 2400, 2004):

Die Niederschlagshöhe h_N sowie die Dauer des Ereignisses T_N sind die wichtigsten und aussagekräftigsten Kennwerte: Niederschlag, welcher in fester oder flüssiger Form und unter Annahme gleichmäßiger Verteilung auf eine Fläche während eines Zeitabschnittes fällt, ausgedrückt als Höhe einer Wassersäule.

Die Niederschlagsintensität $i_N(t)$ ist die Niederschlagshöhe h_N , geteilt durch die Niederschlagsdauer T_N . Sie ist ein Maß für die Heftigkeit eines Niederschlags und wird in mm/min angegeben. Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten sind meist nur von kurzer Dauer.

Das Volumen eines Niederschlags, welcher auf ein bestimmtes Gebiet innerhalb eines Zeitabschnittes fällt, nennt man Niederschlagsfracht V_N .

Unter Niederschlagsspende r_N versteht man die Niederschlagsfracht, dividiert durch das Produkt aus dieser Zeitspanne und Fläche.

Tab.: 2.1: Kennwerte eines Niederschlagsereignisses (OENORM B 2400, 2004)

Niederschlagshöhe	h_N	[mm]
Niederschlagsdauer	T_N	[min], [h]
Niederschlagsintensität	i_N	[mm/min], [mm/h]
Niederschlagsfracht	V_N	[m ³]
Niederschlagsspende	r_N	[m ³ / (s.km ²)], [l / (s.ha)]

2.1.6 Der Gebietsniederschlag

Niederschlagsmessungen werden vorwiegend, abgesehen von flächenhafter Radarmessung, punktuell an einzelnen Messstationen durchgeführt. Dies ist vor allem auf die rasche Verlagerung der Regenwolken und Gewitterzellen zurückzuführen. Zur weiteren Bearbeitung der Daten sind jedoch Flächenwerte des Niederschlagsereignisses notwendig. Die gemessenen Werte jeder einzelnen Messstation werden dabei als Niederschlag für ein abgegrenztes Gebiet angesetzt. Verschiedene Methoden finden ihre Anwendung um eine, für das gesamte Gebiet gültige Niederschlagshöhe h_N zu bestimmen.

Die einfachste Art der Bestimmung des Niederschlags in kleineren Gebieten ist die Ermittlung des arithmetischen Mittels (Richtig, 1995).

Betrachtet man größere Einzugsgebiete, so ist die Polygonmethode nach *Thiessen* das gebräuchlichste Verfahren. Jeder Messstation wird ein zugehöriger Einflussbereich zugeordnet und mit einem Flächengewicht versehen (Abb. 2.5). Das Isohyeten-Verfahren, das Erstellen Linien gleicher Niederschlagshöhen, ist eine weitere, jedoch aufwändigere Methode. Es können allerdings genauere Ergebnisse erwartet werden. Auch durch das Erstellen von Dreiecksnetzen, oder die Anwendung des Rasterverfahrens kann der Gebietsniederschlag bestimmt werden (Maniak, 1997).

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Qualität der Gebietsniederschlagsermittlung mit der Anzahl der Messstationen zunimmt. Sind nur wenige Messstationen vorhanden, sind Fehler bei der Interpolation der Niederschlagsverteilung, vor allem bei weit voneinander entfernten Messstellen, zu erwarten. Aber nicht nur die Dichte der Messstationen, sondern auch die zeitliche Auflösung der Niederschlagsaufzeichnungen wirken sich sehr beeinflussend auf die Ermittlung des Gebietsniederschlags aus. Um eine räumliche Verteilung von z.B. sehr kleinen Gewitterzellen zu bestimmen, ist ein herkömmliches Netz aus Messstellen praktisch nie ausreichend.

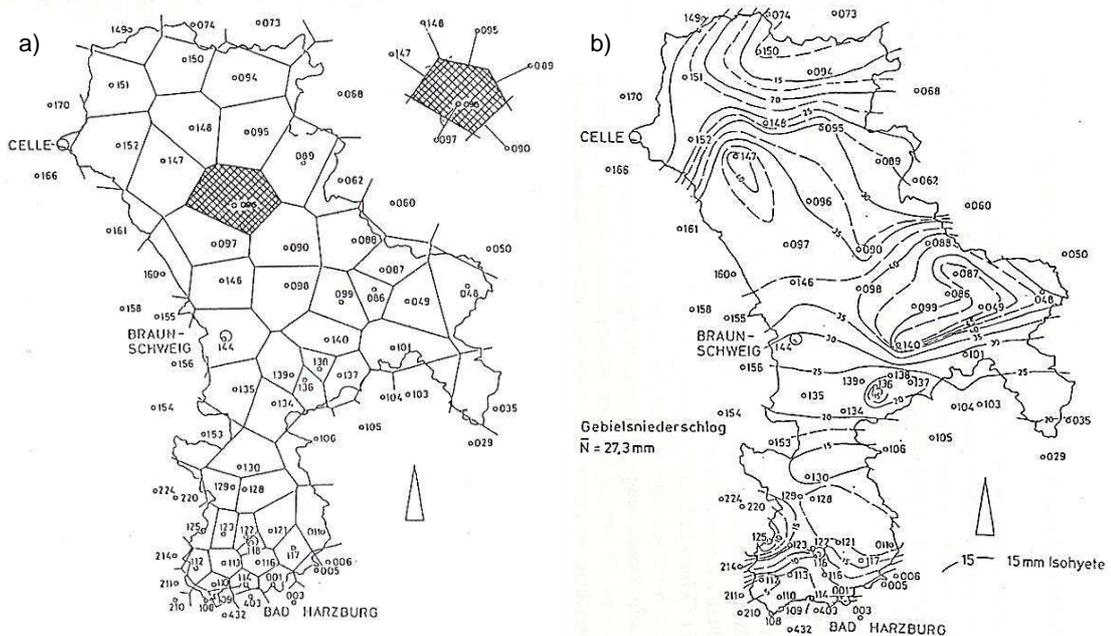


Abb. 2.5: Bestimmung des Gebietsniederschlags für das Oker/ Allergebiet in Deutschland

a) Polygonmethode, b) Isohyethenmethode

(Maniak, 1997)

2.2 ABFLUSS

In der Wissenschaft der Hydrologie versteht man unter dem Begriff *Abfluss* jenen Volumenfluss je Zeiteinheit, welcher ober- oder unterirdisch durch einen bestimmten Querschnitt eines Oberflächengewässers fließt (Dyck, et al., 1995).

Der Begriff des Einzugsgebietes spielt bei der Betrachtung des Abflusses eine erhebliche Rolle, da die Bildung des Abflusses wesentlich von diesem bestimmt wird:

Ein Einzugsgebiet ist jene, in der Horizontalprojektion gemessene Fläche eines Gebietes, von der aus Wasser aus verschiedenen Orten zufließt. Die Grenzen zwischen Einzugsgebieten sind von Wasserscheiden begrenzt. Man unterscheidet ober- und unterirdische Wasserscheide (oberirdisch: A_{EO} , unterirdisch: A_{EU}). Ober- und unterirdische Wasserscheiden müssen jedoch nicht ident sein. Ein Gebiet, begrenzt durch oberirdische Wasserscheiden, bezeichnet man als orographisches Einzugsgebiet. Ein Einzugsgebiet, dem der Abfluss an einer bestimmten Stelle eines Gewässers aufgrund natürlicher Verhältnisse tatsächlich entstammt, nennt man hydrographisches Einzugsgebiet (OENORM B 2400, 2004).

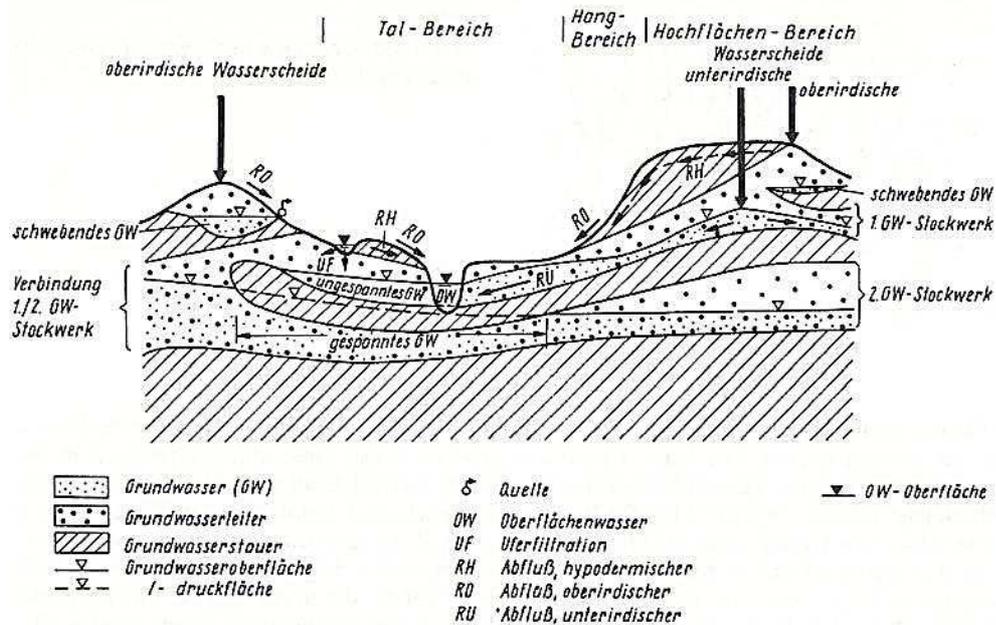


Abb. 2.6: Querschnitt durch ein Einzugsgebietes mit ober- und unterirdischen Wasserscheiden (Dyck, et al., 1995)

2.2.1 Abflusentstehung – Abflusskomponenten

Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Niederschläge ist eine genaue Definition der Abflusentstehung sehr schwierig. Die Entstehung der Abflusskomponenten ist örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterlegen, nicht zuletzt wegen verschiedener bodenphysikalischer Eigenschaften des betrachteten Gebietes. Allgemeine gültige Aussagen können deshalb nur erschwert getroffen werden. In der Hydrologie und im konstruktiven Wasserbau sind Abflussmessungen deshalb von fundamentaler Bedeutung. Die Erstellung diverser Computermodelle ist heute bereits Stand der Technik, jedoch können auch diese keine gut verwaltete Ansammlung von hydrologischen Abfluss- sowie Niederschlagsdaten ersetzen.

Die verschiedenen Abflusskomponenten können nach folgenden Merkmalen und Eigenschaften unterteilt werden (Sackl, 1987):

(1) *Nach dem Abflussursprung*

- Oberirdischer Abfluss: Oberflächenabfluss
- Unterirdischer Abfluss: Zwischenabfluss (Interflow) und Grundwasserabfluss

(2) *Nach dem Fließweg und der Eintreffzeit im Vorfluter*

- Direkter Abfluss: Landoberflächenabfluss und unmittelbarer Interflow
- Basisabfluss: Grundwasserabfluss und verzögerter Interflow

Add 1)

Jener Abfluss, welcher oberirdisch dem Vorfluter zufließt und nicht in den Erdboden eindringt, nennt man Oberflächenabfluss. Dies ist jenes Wasser, welches direkt nach einem Niederschlagsereignis zum Abfluss gelangt und sich langsam mit dem Bodenwasser vermischt. Der anstehende Boden lässt eine Versickerung nicht zu, weil die Infiltrationskapazität bereits überschritten worden ist oder eine Versickerung aufgrund von versiegelten Flächen ohnehin nicht möglich ist. Das Infiltrationsvermögen

eines Erdbodens ist von dessen Oberflächenbeschaffenheit sowie vom Bewuchs abhängig. Jede Form von Vegetation knapp über dem Erdboden verzögert den Oberflächenabfluss und erhöht die Möglichkeit zur Infiltration. In stark versiegelten Siedlungsgebieten ist eine Infiltration kaum möglich und erhöht infolgedessen den Oberflächenabfluss.

Der Interflow (Zwischenabfluss) besteht aus jenem Anteil des Niederschlags, welcher sich nach der Versickerung in den oberen Erdbodenschichten befindet und unterirdisch, verzögert dem Vorfluter zufließt. Der Interflow befindet sich, im Gegensatz zum Grundwasser selbst, noch oberhalb des Grundwasserspiegels und ist sehr von den Eigenschaften des anstehenden Bodens abhängig.

Der Grundwasserabfluss ist, ähnlich wie der Interflow, ein zeitlich sehr verzögerter Abfluss. Jedoch fließt das Niederschlagswasser direkt dem Grundwasser zu, ohne als Zwischenabfluss an die Oberfläche zu treten, zu verdunsten oder von der Vegetation aufgenommen zu werden. Es handelt sich um eine künstliche oder auch natürlich geschaffene Versickerung des Wassers in vertikaler Richtung bis zum Grundwasserkörper. Vermengt mit dem Grundwasser, ist die Fließrichtung des unterirdischen Abflusses anschließend nahezu horizontal und tritt nur mehr an entsprechenden Stellen oberirdisch als Quellwasser zu Tage.

Add 2)

Der Direktabfluss, in der Literatur oft mit Q_d beschrieben (Direktabflussspitze Q_D), ist jener Anteil des Wasser, welcher mit nur geringer Zeitverzögerung dem Vorfluter zufließt. Er entspricht der Summe aus Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss (Interflow) und dem Niederschlag auf das Fließgewässer. Der Basisabfluss Q_B setzt sich aus dem Grundwasserabfluss und dem verzögerten Interflow zusammen und erreicht erst mit erheblicher Zeitverzögerung den Vorfluter.

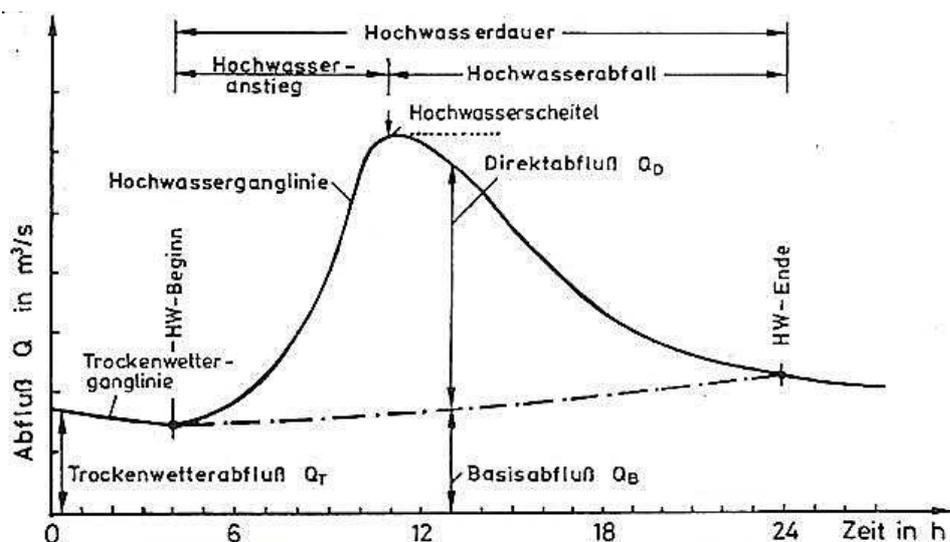


Abb. 2.7: Schematische Darstellung eines Hochwasserereignisses (Maniak, 1997)

Für viele Fragestellungen im Bereich der Hydrologie ist es notwendig, den Basis- vom Direktabfluss zu trennen. Beide Abflusskomponenten werden hinsichtlich der Analyse einer Hochwasserganglinie separat betrachtet (siehe Kapitel 4.1.2).

2.2.2 Begriffe des Abflusses – Wasserführung, Gang- und Dauerlinie

Aufgrund der zeitlichen und lokalen Änderungen des Niederschlages und in Folge der Schwankungen des Abflusses ist es notwendig, den Abfluss anhand der unterschiedlichen Wasserführungen zu definieren. Tab.: 2.2 zeigt eine Unterteilung in Nieder-, Mittel-, und Hochwasserführung eines Oberflächengewässers.

Tab.: 2.2: Verschiedene Wasserführungen eines Fließgewässers (Maniak, 1997)

Niederwasserführung	<i>NNQ</i>	Niedrigster beobachteter Abfluss seit Beobachtungsbeginn
	<i>NQ</i>	Unterster Grenzwert einer Jahresreihe
	<i>MNQ</i>	Arithmetisches Mittel der unteren Grenzwerte
Mittelwasserführung	<i>MQ</i>	Arithmetisches Mittelwert einer Jahresreihe
Hochwasserabfluss	<i>MHQ</i>	Arithmetisches Mittel der oberen Grenzwerte
	<i>HQ</i>	Oberer Grenzwert einer Jahresreihe
	<i>HHQ</i>	Höchster bisher beobachteter Hochwasserabfluss

Schwankungen der Wasserführung werden vor allem in graphischen Darstellungen des Abflussverhaltens sichtbar. Gang-, und Dauerlinien sind dabei nicht mehr weg zu denkende Darstellungsformen für Zeitreihen. (OENORM B 2400, 2004)

Die Ganglinie ist die Darstellung von beobachteten oder berechneten Merkmalswerten in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens. Die verstrichene Zeit des Beobachtungszeitraumes wird immer an der Abszisse und die beobachteten oder gemessenen Werte auf der Ordinate aufgetragen. Sind ausreichend viele Merkmalswerte vorhanden, so wird die Ganglinie als kontinuierliche Linie dargestellt (Pegelschrieb). Werden die Merkmalswerte über eine Zeitspanne gemittelt, so wird die Ganglinie in Form von einer Treppenlinie abgebildet. Aus der Darstellung der Ganglinie können alle weiteren Verfahren der graphischen Abflussbeschreibung abgeleitet werden (OENORM B 2400, 2004).

Die Dauerlinie zeigt, zum Unterschied der Ganglinie, eine Anordnung der Merkmalswerte in der Reihenfolge ihrer Größe.

Gang- sowie Dauerlinien können für kürzere Zeitabschnitte von nur einigen Wochen oder aber für die gesamte Dauer einer ganzen Beobachtungsperiode von mehreren Jahren ermittelt werden. Neben einer Abbildung der Gang- und Dauerlinie ist häufig auch eine Darstellung der Häufigkeitsverteilung zu finden (Abb. 2.8).

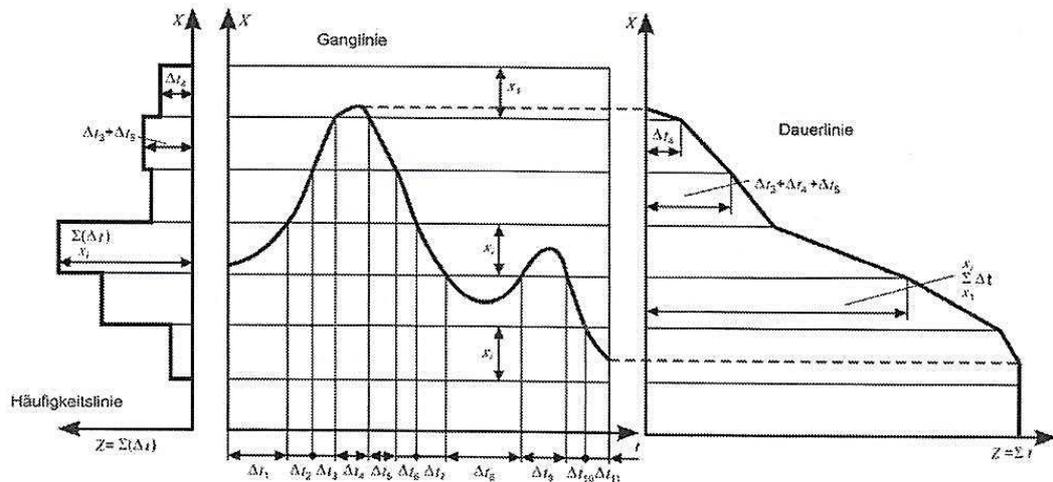


Abb. 2.8: Häufigkeits-, Gang- und Dauerlinie des Abflusses Q in Abhängigkeit von der Zeit (OENORM B 2400, 2004)

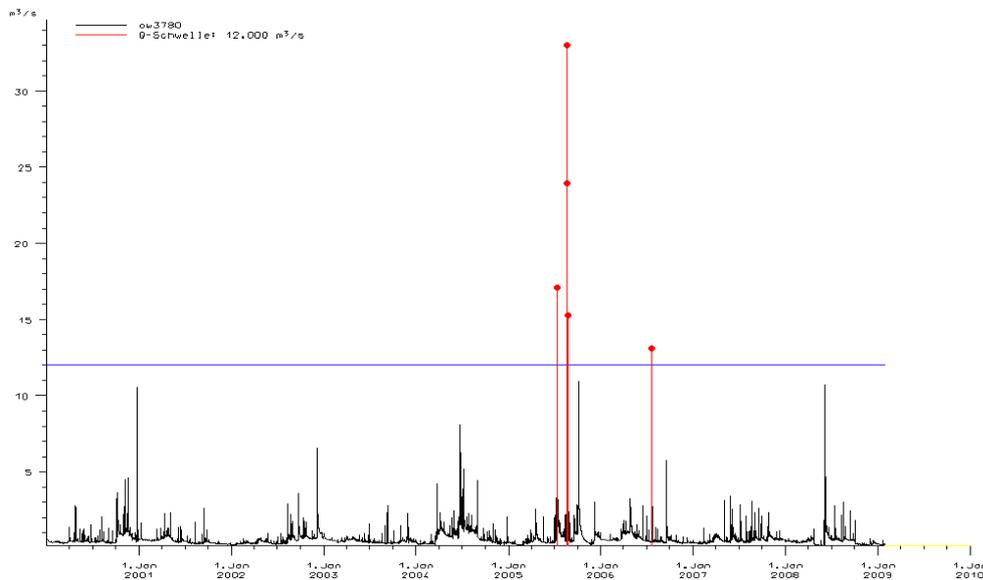


Abb. 2.9: Abflussganglinie aus der Software HyDams
 Pegel OW3780 Wernersdorf I; Zeitraum: 1.1.2000 – 1.1.2010; Q-Schwelle: $HQ1 = 12,0 \text{ m}^3/\text{s}$
 (HyDams Software der Steiermärkischen Landesregierung, entnommen am 30.12.2010)

Um eine Beziehung zwischen dem Wasserstand und dem zugehörigen Durchfluss zu erhalten, werden Schlüsselkurven erstellt. Diese sind graphische Abbildungen, welche Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen, sogenannte Pegelschlüssel, wiedergeben. Der Durchfluss wird mehrmals im Jahr bei unterschiedlicher Wasserführung gemessen und in einer mathematischen Funktion in der Form einer ansteigenden, gekrümmten Linie ausgedrückt. Der errechnete Pegelschlüssel ist nur an einem definierten Gewässerquerschnitt gültig und wird umso genauer, je mehr Abflussmessungen bei der Erstellung der Funktion vorhanden sind (Maniak, 1997). Ermittelte Schlüsselkurven reagieren sehr empfindlich auf Veränderungen des Flussquerschnitts. Durch Auflandungen oder Erosionen ändert sich die Wasserstands-Durchfluss-Beziehung und die Schlüsselkurve verliert ihre Gültigkeit und muss korrigiert werden. Voraussetzung der Erstellung eines Pegelschlüssels ist ein stationärer Durchfluss (OENORM B 2400, 2004).

2.2.3 Messung des Abflusses

Im Gegensatz zu Niederschlagsmessungen, welche punktuell durchgeführt, jedoch flächenhaft aufgerechnet werden, ist die Messung des Abflusses immer nur auf einen bestimmten Querschnitt des betrachteten Fließgewässers bezogen. Die Erfassung ist sehr aufwendig, da eine direkte Messung des durchströmenden Wassers meist nicht möglich ist und folglich mehrere Einzelmessungen erforderlich sind. Die Ermittlung des Abflusses erfolgt vorwiegend über eine Messung der Fließgeschwindigkeit v_{gem} [m/s] und der Durchflussfläche A [m²] und wird durch die allgemein gültige Kontinuitätsgleichung beschrieben [2.1].

Der gemessene Abfluss Q wird in [l/s] oder in [m³/s] angegeben und ist die Summe aller Regenwässer des im Vorhinein definierten Einzugsgebietes A_E (Haas, 2005).

$$Q = v_{gem} * A \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad [2.1]$$

Die heute am häufigsten verwendete Methode die Abflussmenge zu ermitteln, ist die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit mittels Messflügel. In einem drehbaren, propellerartigen Flügel, welcher in das Gewässer eingetaucht wird, ist ein Zählwerk integriert, welches die Anzahl der Umdrehungen des Propellers aufzeichnet. Durch die Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde und eine vom Hersteller gefertigte Eichkurve kann daraus die Geschwindigkeit errechnet werden. An jenen Stellen im Gewässer, an denen die Fließgeschwindigkeit gemessen wird, muss ebenfalls die Wassertiefe mittels Peilstange bestimmt werden (Messlotrechte). Anhand der gemessenen Geschwindigkeiten, der zugehörigen Wassertiefen und der Distanz zum Ufer kann nun jener Teilabfluss ermittelt werden, welcher einer Messlotrechten zugeordnet ist. Um korrekte Daten der Abflussuntersuchung zu erhalten, müssen mehrere Messlotrechte, alle normal auf das Ufer, gesetzt werden (Abb. 2.10) (Maniak, 1997).

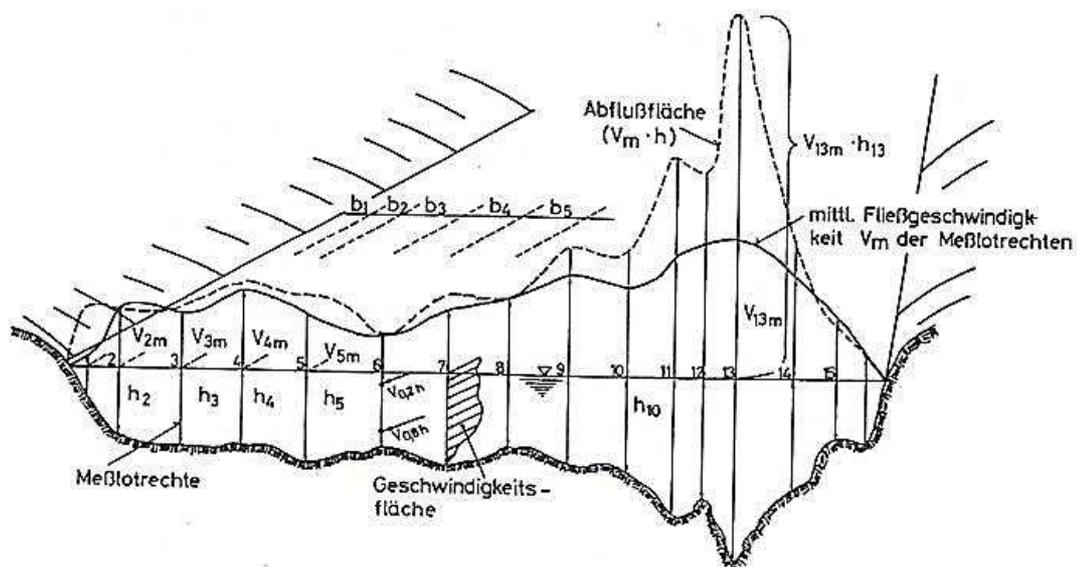


Abb. 2.10: Graphische Auswertung einer Abflussmessung mit Geschwindigkeits- und Abflussflächen (Maniak, 1997)

Eine weitere Methode der Abflussbestimmung ist die Magnetisch Induktive Durchflussmessung, kurz MID, welche auf dem Prinzip des Faraday'schen Induktionsgesetzes beruht. Dieses besagt, dass in einem Leiter, bewegt durch ein Magnetfeld, eine elektrische Spannung induziert wird. Aus der gemessenen Spannung U lässt sich die mittlere Geschwindigkeit und folglich aus der Kontinuitätsgleichung wiederum die Wassermenge ermitteln (Haas, 2005).

Durch den Einsatz von Ultraschallmessgeräten kann ebenfalls die Fließgeschwindigkeit, und der daraus resultierende Abfluss errechnet werden. Mittels der Impulse eines Schwingers werden Schallwellen erzeugt und ausgesendet. Aufgrund des Doppler-Effektes kann die Frequenzverschiebung des an einem Schwebstoffteilchen reflektierten Ultraschallsignals gemessen werden. Voraussetzung für die Verwendung dieser Methode ist natürlich das Vorhandensein von Feststoffen im Wasser, welche sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen wie die Flüssigkeit selbst. Eine einfachere Methode um die Fließgeschwindigkeit, und daraus resultierend den Durchfluss, zu bestimmen ist die Tracer-Methode. Verschiedene Farbstoffe oder Minerale, zum Beispiel Salze, werden dem Abfluss oberhalb der Messstelle beigemischt. An der Messstelle selbst erfasst anschließend ein Tracer-Gerät die Konzentration des beigemischten Materials. Durch die verstrichene Zeit, welche der Tracer benötigt, um die Fließstrecke zurückzulegen, kann die Geschwindigkeit errechnet werden (Haas, 2005).

2.3 HOCHWASSER

2.3.1 Definition und Ursachen

In der Fachliteratur ist eine Vielzahl von Definitionen zum Thema Hochwasser zu finden:

Hochwasser ist jener „Wasserstand oder Abfluss, der eine zu bestimmende Grenze – im Allgemeinen das niederste (kleinste) Jahreshochwasser – überschreitet. Dieser Grenzwert wird aus den Wasserstands- bzw. Durchflusswerten oder den örtlichen topographischen Gegebenheiten bestimmt. In der hydrographischen Statistik auch Bezeichnung für den Scheitelwert einer Hochwasserganglinie“ (OENORM B 2400, 2004)

„Ein Hochwasser (HW) ist die zeitlich begrenzte Anschwellung des Durchflusses über den Basisdurchfluss, die eine für jeden Durchflussquerschnitt aus der Statistik oder den örtlichen Gegebenheiten zu bestimmende Grenze (z.B. Ausuferungsdurchfluss) überschreitet, als Folgeerscheinung meteorologischer oder durch Katastrophen hervorgerufener Ereignisse.“ (Dyck, et al., 1995)

Verschiedene, natürliche Einflussparameter können ein Anschwellen des Abflusses und infolgedessen ein Hochwasserereignis hervorrufen. Der Niederschlag selbst gilt als eine der Hauptursachen eines Hochwassers. Jedoch dürfen Einflussgrößen wie zum Beispiel die Topographie oder die Vegetation des Einzugsgebietes nicht außer Acht gelassen werden. Einzelne Komponenten oder auch Kombinationen aus mehreren Einflussparametern sind in Tab.: 2.3 aufgelistet:

Tab.: 2.3: Künstliche und natürliche Ursachen von Hochwasserereignissen
(Sackl, 1987)

Niederschlagsereignisse: Dauer und Intensität
Schnee, Schneeschmelze
Beschaffenheit des Einzugsgebietes hinsichtlich Topographie, Vegetation und Eigenschaften des anstehenden Bodens
Größe und Ausbildung des Vorfluters, das Vorhandensein von Grundwasserkörpern
Versiegelungs- Bebauungsflächen, Künstlich erbaute Absperrbauten

Zur Bemessung von Bauwerken in hochwassergefährdeten Gebieten ist der Hochwasserscheitelabfluss sowie die Hochwasserabflusssumme maßgebend (siehe Abb. 2.7, Seite 2.13).

Eine Einteilung der Hochwässer kann hinsichtlich der Jahreszeiten erfolgen. Man unterscheidet zwischen Sommer- und Winterhochwasser. Auftretende Hochwasserereignisse in den Sommermonaten sind meist auf Starkniederschläge zurückzuführen (Sommerhochwasser); Winterhochwasser hingegen werden durch das Einsetzen der Schneeschmelze hervorgerufen und treten demnach in jenen Monaten auf, in denen die Schneeschmelze stattfindet (Schönberger, 2010).

2.3.2 Wiederkehrzeit/ Jährlichkeit eines Hochwassers

Hochwasserereignisse werden mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsstatistik interpretiert. Ein wichtiger und zentraler Begriff der Hochwasserbeobachtungen ist die *Überschreitungswahrscheinlichkeit* $P_{\bar{U}}$. Sie gibt jene Wahrscheinlichkeit an, mit der ein im Vorhinein definierter Merkmalswert (z.B. die Wasserstandshöhe oder der Abfluss) in einem gegebenen Zeitintervall überschritten wird. Der Wert dieser Wahrscheinlichkeit liegt in einem Bereich zwischen 0 und 1. Die *Unterschreitungswahrscheinlichkeit* P_U bildet das Gegenstück dazu (Merz, 2006).

Der Begriff der *Jährlichkeit* T bezeichnet den Zeitraum, in dem der Merkmalswert erreicht oder überschritten wird (hier bei einem Hochwasserereignis) (OENORM B 2400, 2004):

$$T_N = \frac{1}{P_{\bar{U}}} \quad [2.2]$$

Ein n -jährliches Hochwasser ist ein Ereignis, dessen Überschreitungswahrscheinlichkeit gleich dem Reziprokwert von n ist. Es handelt sich um einen Wiederkehrintervall einer Wiederholungszeitspanne von genau n Jahren.

„In einer unendlich lang gedachten Reihe von Beobachtungsjahren wird das n -jährliche Hochwasser im Durchschnitt alle n Jahre erreicht oder überschritten.“ (OENORM B 2400, 2004)

2.3.3 Abflussanteile von Hochwasserganglinien

Für Problemstellungen in der Hydrologie ist es häufig erforderlich, nicht nur Ganglinien als solche, sondern auch einzelne Abflusskomponenten zu betrachten. Niederschlagsereignisse sind zwar vermehrt die Hauptursache von Hochwasserereignissen, abhängig von der Beschaffenheit des Einzugsgebietes kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die gesamte Abflussfracht eines Hochwasserereignisses ausschließlich auf das verursachende Niederschlagsereignis zurückzuführen ist. Die Abflussganglinie im Hochwasserfall besteht aus zumindest zwei sich überlagernden Ganglinien besteht. Dies ist einerseits der Basis- und andererseits der Direktabfluss (Richtig, 1995).

Zahlreiche Autoren beschäftigen sich mit dem Thema der Basisabflusstrennung, eine einheitliche Betrachtungsweise ist in der Literatur jedoch nicht zu finden. Denn der exakte Verlauf des Basisabflusses ist nicht ermittelbar. Das am häufigsten angewandte Verfahren zur Trennung der Abflusskomponenten ist das Einzeichnen einer leicht ansteigenden Geraden – dies zeigt einen Anstieg des Basisabflusses während eines Hochwasserereignisses. $Q_{B,0}$ ist der Anfangsbasisabfluss vor Eintreten eines Hochwasserereignisses; $Q_{B,E}$ jener Abfluss am Ende des Ereignisses. (Sackl, 1987). In der Fachliteratur sind jedoch auch andere Bezeichnungen des Beginns und Endes einer Hochwasserwelle zu finden.

Die Basisabflusstrennung kann auch durch eine Kurve zweiten bzw. dritten Grades oder einer Horizontalen erfolgen. Diese verschiedenen Verfahren müssen teilweise mathematisch belegt werden und eignen sich nicht immer für die vorliegende Problemstellung (Richtig, 1995).

3. UNTERSUCHUNGSGEBIET IN DER WESTSTEIERMARK

Das zu untersuchende Gebiet liegt im westlichen Teil der Südweststeiermark und entspricht zum Großteil dem Einzugsgebiet der Kainach.

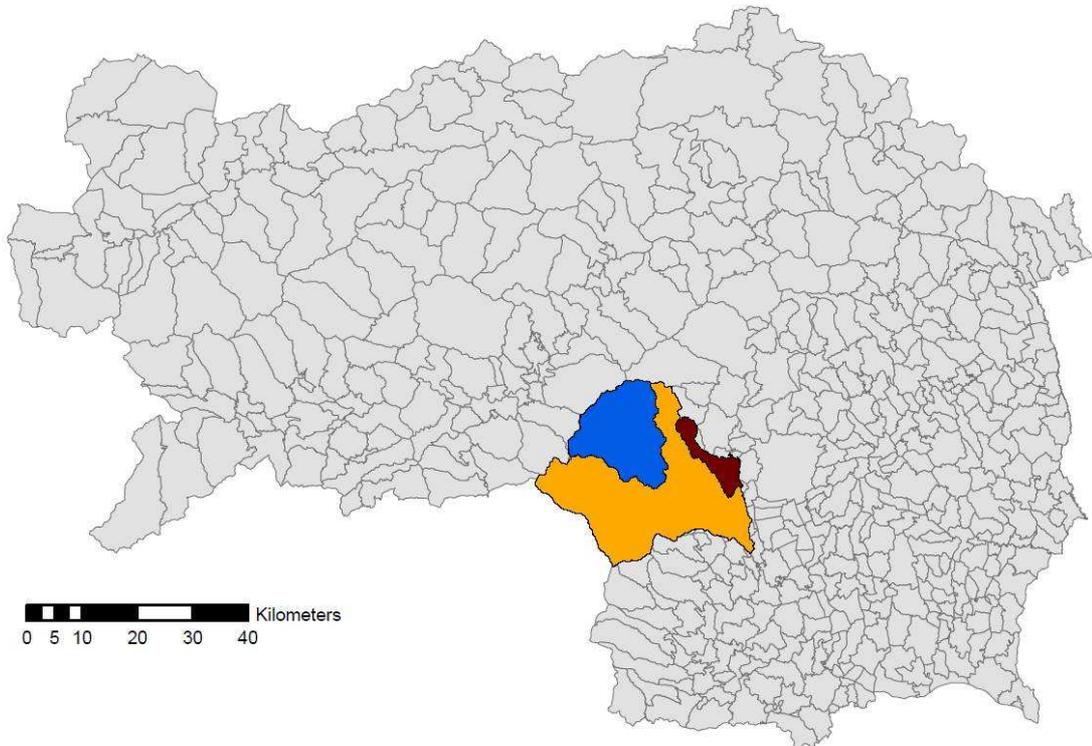


Abb. 3.1: Darstellung der Einzugsgebiete
(Auszug aus GIS, 25.03.2011)

An der westlichen Seite des betrachteten Gebietes ragen die Gebirge der Koralpe sowie der Packalm hervor und bildet die Grenze zu Kärnten. Im Norden wird die Weststeiermark von der Stubalm und der Gleinalm zur Obersteiermark abgegrenzt, hier entspringt der Quellbach die Kainach. Im Osten bildet die Mur die Grenze zur restlichen Region der Steiermark.

Die Kainach entspringt im politischen Bezirk Voitsberg, durchfließt anschließend den Bezirk Graz-Umgebung ehe sie bei Wildon (Bezirk Leibnitz) in den größten und wasserreichsten Fluss der Steiermark, die Mur, münden.

Temperaturen und das allgemein herrschende Klima sind entscheidende Faktoren in der Niederschlagsbildung und folglich auch in der Entstehung des Abflusses von Oberflächengewässern. Die Weststeiermark ist in mehrere Klimazonen unterteilt, es überwiegt die Zone des ostalpinen Klimabereiches welche, die Temperaturen des südöstlichen Vorlandes bestimmt. Die Ausläufer der Alpen beeinflussen die Intensitäten der Niederschläge, eine leicht erhöhte Anzahl von Gewittertagen und Starkregenereignissen kann dadurch verzeichnet werden und die Niederschlagsmengen nehmen von Norden nach Süden her ab (Schönberger, 2010).

Nicht nur die Regionen entlang des betrachteten Oberflächengewässers, sondern fast die gesamte Weststeiermark wird intensiv forstwirtschaftlich genutzt. Eine prozentuelle Aufteilung der Landnutzung ist in Tab.: 3.1 abzulesen.

Tab.: 3.1: Landnutzung im Einzugsgebiet Lieboch
(Daten der Steiermärkischen Landesregierung)

Landnutzung des Einzugsgebietes Lieboch:		
Typ	Anteil [%]	Fläche [km²]
Mischwald	21,4	165,754
Wiese/ Weiden	12,5	96,310
Natürliche Grünflächen	2,1	16,017
Nicht durchgängige städtische Prägung	0,8	6,320
Wasserflächen	0,1	0,595
Nicht bewässertes Ackerland	4,3	33,472
Nadelwälder	41,9	323,883
Überwiegend landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation	0,4	3,340
Abbauflächen	0,4	3,456
Komplexe Parzellenstrukturen	16,0	123,439
Durchgehend städtische Prägung	0,1	0,651

Im Untersuchungsgebiet befinden sich mehrere Abfluss- und Niederschlagsmessstationen. Diese werden vom Hydrographischen Dienst der Steiermärkischen Landesregierung bzw. der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) betreut. Die Daten der Messstationen werden in einer zentralen Datenbank der Landesregierung gesammelt und gespeichert.

3.1 DIE KAINACH

Die Quelle der Kainach, der Oswaldgrabenbach, entspringt am Fuße der Gleinalpe auf etwa 1965 m. ü. A. und fließt fortwährend Richtung Südosten. Kainach bei Voitsberg, Bärnbach und Voitsberg selbst sind die ersten Orte, welche vom 59 km langen Fluss durchflossen werden (Steiermärkische Landesregierung). Bei Krottendorf mündet die Teigitsch (rechter Nebenfluss), und südlich von Lieboch der Liebochbach (linker Nebenfluss) in die Kainach. Bei Wildon (315 m. ü. A.) mündet die Kainach in die Mur.

Das Einzugsgebiet der Kainach beträgt 849,1 km². Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird das Einzugsgebiet bis zum Pegel Lieboch betrachtet. Das zu analysierende Einzugsgebiet setzt sich aus drei Teileinzugsgebieten der Abflusspegel Voitsberg, Hitzendorf und Lieboch zusammen. Tab.: 3.2 zeigt eine Auflistung der Flächeninhalte der in die Kainach mündenden Flüsse.

Tab.: 3.2: Einzugsgebiet der Kainach
(Hydrographischer Dienst in Österreich, 1961)

Gebiet	Flächeninhalt in km ² des Gebietes*
Kainach bis zur Teigitsch	234,1
Kainach einschließlich Teigitsch	515,9
Kainach bis zum Södingbach	579,2
Kainach einschließlich Södingbach	676,5
Kainach bis zum Liebochbach	688,0
Kainach einschließlich Liebochbach	755,0
Kainach einschließlich Lahnbach (entspricht dem betrachteten Einzugsgebiet)	<u>773,2</u>
Gesamteinzugsgebiet der Kainach (einschließlich Doblach)	849,1

* gerundete Werte aus dem „Flächenverzeichnis der Österreichischen Flußgebiete“

Das Geländere relief des Einzugsgebietes Kainach, einschließlich Lahnbach, weist eine maximale Höhe von 1965,88 m.ü.A. und eine minimale von 320,0 m.ü.A. auf. Die mittlere Geländehöhe liegt bei etwa 806 m.ü.A. und die mittlere Neigung des Gebietes bei rund 16°.

Alle erwähnten geländespezifischen Charakteristika sind der Datenbank HyDams, Steiermärkische Landesregierung, entnommen.

3.2 NIEDERSCHLAG IM EINZUGSGEBIET

Der Niederschlag wird punktuell entweder mit Niederschlagsmesser (Totalisator) oder Niederschlagsschreiber ermittelt und in Millimeter Wasserhöhe angegeben (siehe Kap.2.1.4).

Folgende Beschreibungen des Versuchsgebietes hinsichtlich des Niederschlags sind dem Klimaatlas Steiermark (ZAMG) entnommen:

In der Vergangenheit zeigten Beobachtungen einen Zusammenhang zwischen der Anzahl an Niederschlagstagen im Jahr und ansteigender Seehöhe. So liegt der durchschnittliche Wert am Fuße der Koralpe und der Gleinalpe zwischen 110 - 120 Tagen im Jahr. Im Mündungsgebiet des Flusses, im südöstlichen Vorland, sinkt die Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 1,0$ mm mit zunehmender Entfernung vom Randgebirge auf Werte zwischen 90 und 100 Tage (Abb. 3.2).

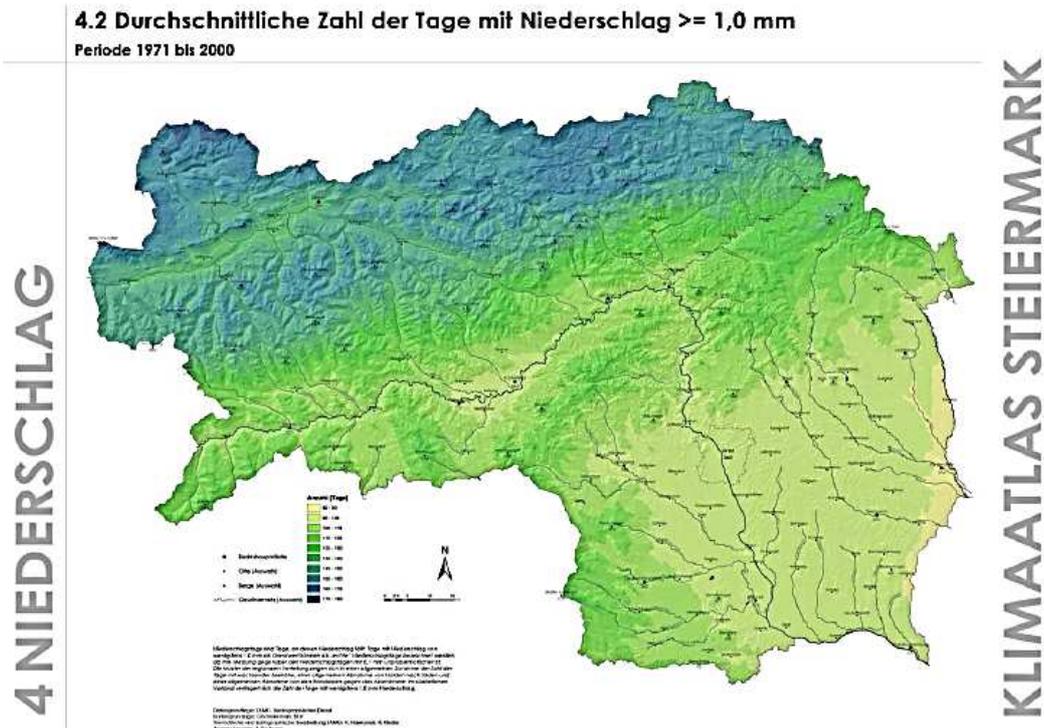


Abb. 3.2: Durchschnittliche Zahl der Tage mit Niederschlag $\geq 1,0$ mm (ZAMG)

Im Quellgebiet der Kainach liegt die Summe der Niederschlagsmenge bei rund 1.600 - 1.800 mm pro Jahr und nimmt mit der Fließstrecke auf etwa 800 - 1.000 mm Niederschlag ab. Die Abnahme der durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge ist, ebenfalls wie die Abnahme der durchschnittliche Zahl der Tage mit Niederschlag $\geq 1,0$ mm, durch die topographischen Gegebenheiten der Weststeiermark bedingt, da das Gelände bis hin zum Leibnitzer Becken abfallende Seehöhen aufweist. Um den Einfluss der Topographie weitgehend bei der Berechnung von Gebietsniederschlägen eliminieren zu können, werden gemessene Niederschlagshöhen auf einen Vergleichshorizont bezogen. Dieser Vergleichshorizont kann die mittlere Seehöhe [m.ü.A.] einer Station oder eines gesamten Gebiets sein. Annähernd kann von einer 2-prozentigen Niederschlagszu- bzw. -abnahme bei Änderungen der Geländehöhen von +/- 200 m ausgegangen werden (Kreps, 1975).

Alle erwähnten Niederschlagstage und -mengen beziehen sich auf einen Beobachtungszeitraum von 1971 - 2000 und sind dem Klima Atlas Steiermark entnommen.

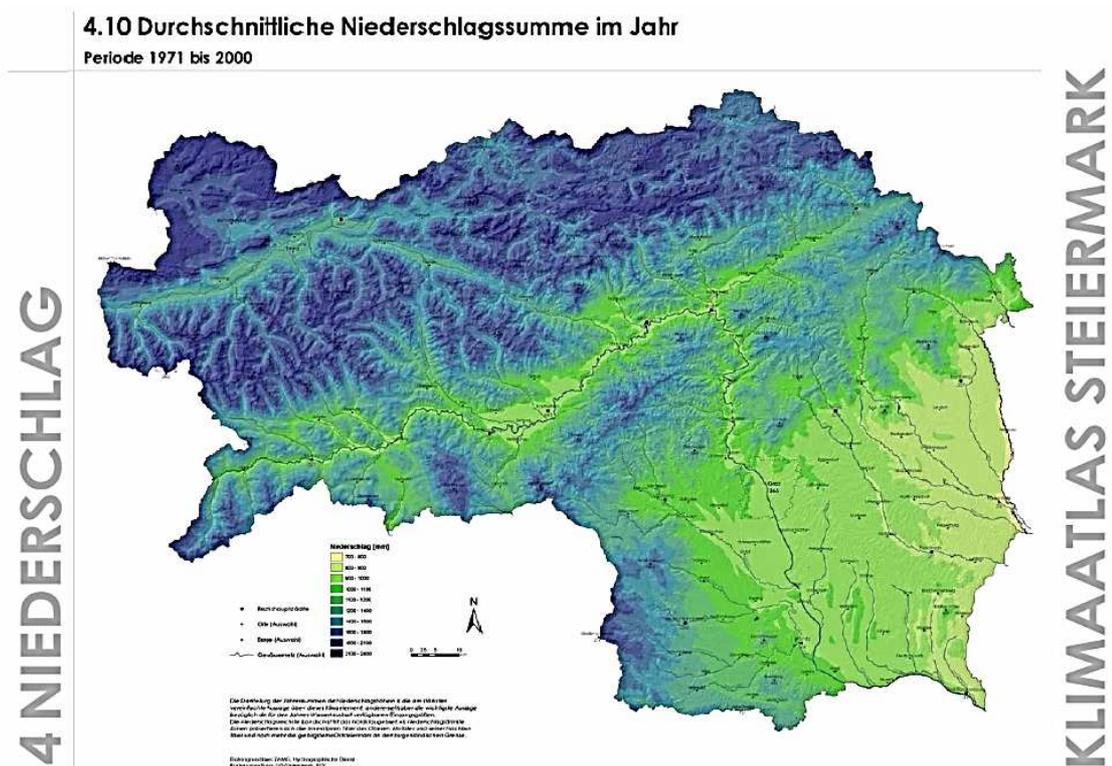


Abb. 3.3: Durchschnittliche Niederschlagssummen In Jahr (ZAMG)

In der Weststeiermark, und insbesondere auch im betrachteten Einzugsgebiet der Kainach, wird seit Beginn der Niederschlagsaufzeichnungen ein flächendeckendes Messnetz an Niederschlagsstationen aufgebaut. Für die Untersuchungen wurde eine Auswahl an Messstationen getroffen. Es handelt sich dabei um gebräuchliche Niederschlagsstationen in Form von Regenmessern, aber auch um Messstationen, welche mit kontinuierlichen Niederschlagsschreibern ausgerüstet sind., wodurch auch eine Kombination von beiden möglich ist. Dies erklärt ein wiederholtes Erscheinen einzelner Messstationen in den Tab.: 3.3 und Tab.: 3.4.

Die Niederschlagsmessstationen wurden nach alphabetischer Reihenfolge aufgelistet.

Tab.: 3.3: Niederschlagsmessstationen- Beobachter

Niederschlagsbeobachter			
Messstellen-Nr.¹	HD-Nr.²	Name	Höhe [m.ü.A.]
112490	NL3520	Bärnbach	420
112896	NL3665	Gaberl	1160
112862	NL3410	Gedersberg	390
112334	NL3800	Hebalpe	1310
112656	NL3645	Hirschegg	1158
112763	NL3805	Klosterwinkel	1162
112185	NL3690	Ligist	370
112177	NL3670	Maria Lankowitz	530
112219	NL3705	Sajach	340
112649	NL3700	Södingberg	480

¹ Auflistung anhand des Hydrographischen Jahrbuches Österreich 2006

² Nummerierungen des Hydrographischen Dienstes Land Steiermark

Tab.: 3.4: Niederschlagsmessstationen- Schreiber

Niederschlagsschreiber			
Messstellen-Nr.¹	HD-Nr.²	Name	Höhe [m.ü.A.]
196051	NL3807	Absetzwirt	128
123034	NL3510	Breitenbach	880
112896	NL3665	Gaberl	1160
123190	NL3703	Hitzendorf_I	370
196050	NL3801	Kloster-Rettenbach	1150
112060	NL3385	Pleschkogel	910
105007	NL3642	Salzstiegel	1340
196034	NL3680	Steinberg	710
123208	NL3672	Voitsberg_I	392

¹ Auflistung anhand des Hydrographischen Jahrbuches Österreich 2006

² Nummerierungen des Hydrographischen Dienstes Land Steiermark

3.3 ABFLUSSPEGEL

Wie schon erwähnt, befinden sich im betrachteten Versuchsgebiet mehrere Abflussmessstationen. Es handelt sich zum Großteil um Schreibpegel mit digitaler Wasserstandserfassung. An einigen Messstationen wird überdies hinaus auch die Wassertemperatur gemessen.

In Tab.: 3.5 sind ausgewählte Pegel der Kainach aufgelistet. Um in weiterer Folge einzelne Hochwasserereignisse analysieren zu können, wurde ein Grenzwert der Wasserführung festgelegt – dieser Schwellenwert entspricht dem HQ_1 -Wert der betrachteten Gewässer. Das Hauptauswahlkriterium der HQ_1 -Schwelle war vor allem, eine handhabbare und repräsentative Anzahl an Stichproben für die weiterführende Analyse vorweisen zu können.

Eigenschaften und Merkmale der Pegel, wie etwa die Größe des Einzugsgebietes oder die Höhe des Pegelnullpunktes, wurden dem österreichischen, hydrographischen Jahrbuch 2006 sowie aus dem Digitalen Atlas Steiermark oder der digitalen Datensammlung der Steiermärkischen Landesregierung entnommen und in der unten angeführten Tabelle ergänzt.

Tab.: 3.5: Ausgewählte Pegel im Einzugsgebiet der Kainach

Pegel im Einzugsgebiet Kainach									
Messstellen Nr. ¹	HLA-Nr. ²	Einzugsgebiet Ae [km ²]	Pegelnullpunkt [m.ü.A.]	Mittlere Geländehöhe [m]	Pegel	Gewässer	MQ [m ³ /s]	HQ ₁ [m ³ /s]	Art der Abflussmessung
211334	3670	222,909	391,19	892,252	Voitsberg	Kainach	2,79	30,0	*
211953	3690	51,004	358,73	537,685	Hitzendorf	Liebochbach	0,33	8,00	*
211342	3701	773,237	319,46	806,672	Lieboch	Kainach	9,60	105,0	*

¹ Auflistung anhand des Hydrographischen Jahrbuches Österreich 2006

² Nummerierungen des Hydrographischen Dienstes Land Steiermark

* Schreibpegel mit Abflussangabe

Abb. 3.4 und Abb. 3.5 veranschaulichen die geographische Lage der Messstationen sowie die Lage der Pegel Einzugsgebiete.

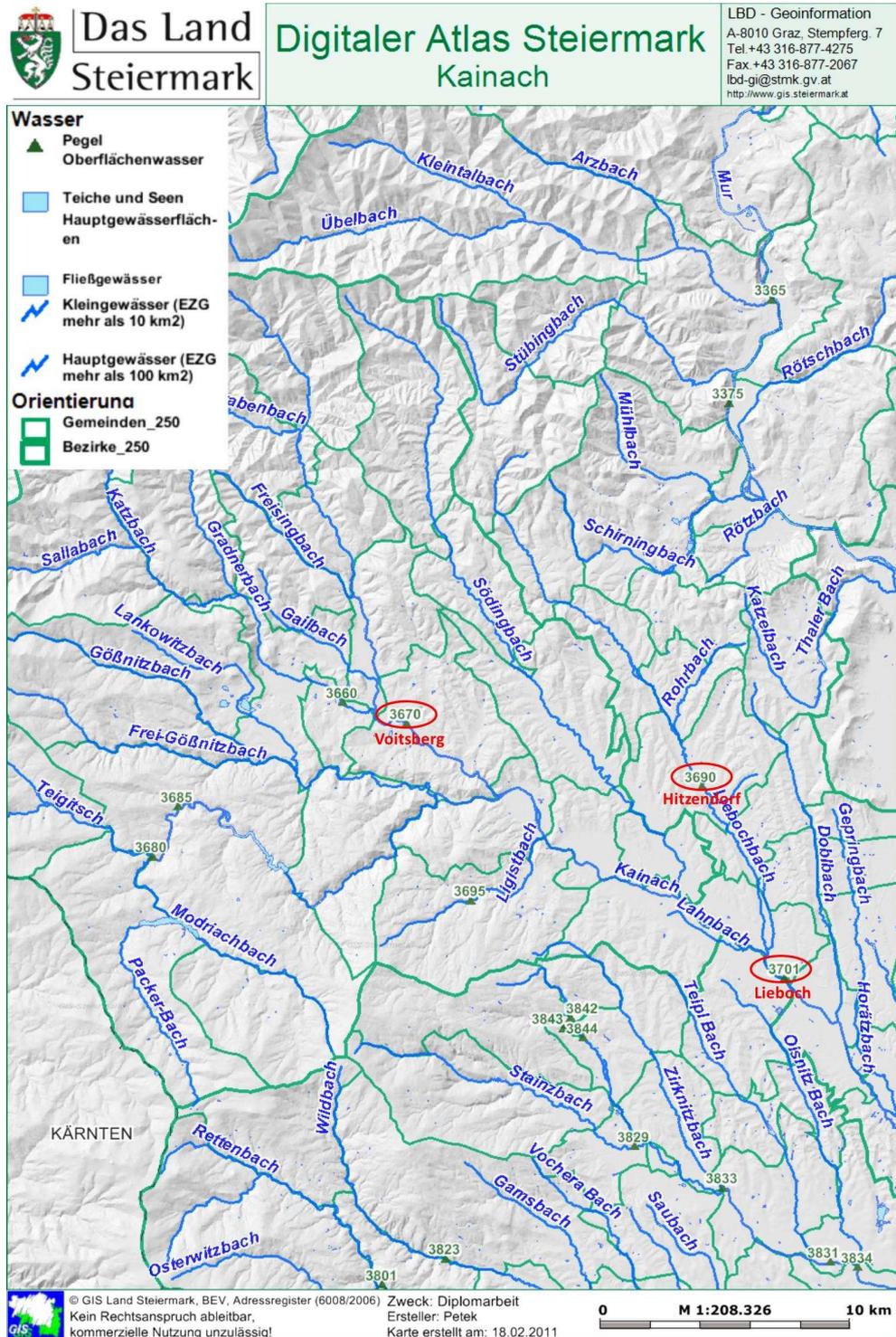


Abb. 3.4: Ausgewählte Abflusspegel im Versuchsgebiet (Auszug aus dem Digitalen Atlas STMK, 18.02.2011)

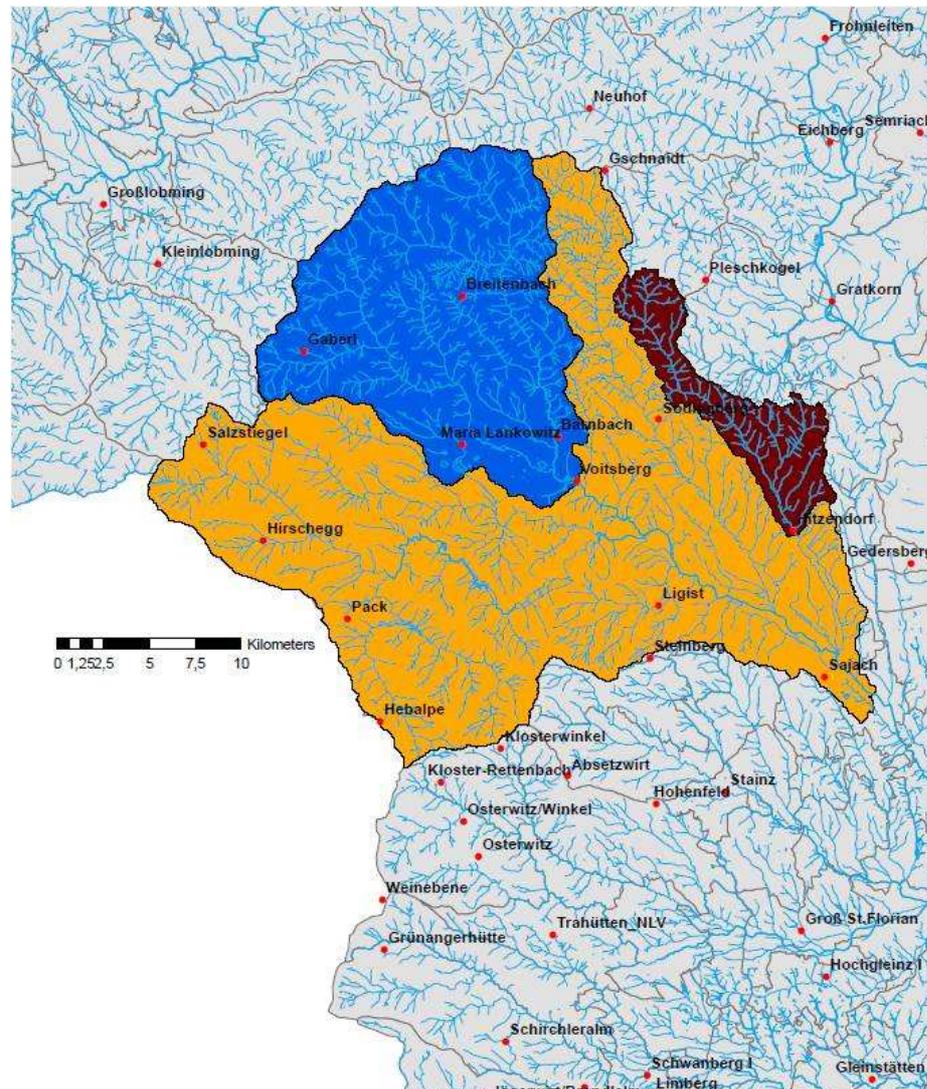


Abb. 3.5: Pegelzugsgebiete und Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet
Blau: Voitsberg, Rot.: Hitzendorf, Orange: Lieboch (Auszug aus GIS, 25.03.2011)

4. DATENGRUNDLAGE – DATENAUFBEREITUNG

Alle hydrologischen Daten der Hochwasser- sowie Niederschlagsereignisse wurden dem digitalen Datenarchiv der FA 19a der Steiermärkischen Landesregierung entnommen. Hierzu wurde die Software HyDams der Firma AQUAPLAN verwendet. Um die weiterfolgende Analyse der Ereignisse zeitlich eingrenzen zu können, wurde eine Zeitspanne vom 01.01.2000 bis 01.01.2010 definiert. Alle Hochwasser- und Niederschlagsereignisse, welche in diesem Zeitraum auftraten, wurden selektiert und herausgefiltert.

4.1 SELEKTION DER HYDROLOGISCHEN DATEN

4.1.1 Niederschlagsdaten

Wie in Kapitel 3 erwähnt, wurden nur ausgewählte Niederschlagsmessstationen im Einzugsgebiet der Kainach zur weiterführenden Analyse verwendet. Davon sind neun Stationen mit digitaler Datenerfassung ausgestattet welche die Niederschlagsereignisse kontinuierlich aufzeichnen. Zehn Messstationen sind nur Totalisatoren, d.h. die Werte der Niederschläge werden täglich um 7:00 Uhr von Beobachtern abgelesen; eine kontinuierliche Aufzeichnung existiert nicht.

Die Niederschlagsereignisse wurden mit dem Modul ASCII-Zeitreihen-Export von HyDams exportiert. Dabei wurden folgende Daten, abhängig von der Aufzeichnungsart jeder Messstation, sowie von der Verfügbarkeit der erwünschten Daten, ausgelesen:

Tab.: 4.1: Ausgewählter Zeitreihen-Export von Niederschlagsereignissen

Art der Messstation	Gemessene Daten	Daten ausgelesen in:
Niederschlagsschreiber	Niederschlag NS	15-min Werte
		1-h Werte
		Tageswerte
	Lufttemperatur LT	15-min Werte
		1h- Werte
	Schneehöhe SH	Tageswerte
Totalisatoren	Niederschlag NS	Tageswerte
	Lufttemperatur LT	Tageswerte
	Schneehöhe SH	Tageswerte

Ziel der Arbeit ist es sein, vor allem die 15-min-Aufzeichnungen der Niederschlagsschreiber zu analysieren und mit den bereits bekannten Hochwasserereignissen gegenüberzustellen. Aufgrund des außerordentlich großen Umfangs der 15-min-Aufzeichnungen und folglich eines extrem großen Datenvolumens erfolgte die Einigung, die Untersuchung der Niederschlagsdaten auf 1-h-Werte zu reduzieren. Tageswerte der Totalisatoren wurden nicht berücksichtigt, da eine Umrechnung der Tages- in Stundenwerte sehr aufwendig wäre.

Die stündlichen Aufzeichnungen über den genannten Zeitraum von zehn Jahren aller Niederschlagsstationen wurden in einem Excel-File zusammengefasst. Eine Aufteilung

der Daten hinsichtlich der Jahre wurde aufgrund des hohen Datenvolumens vorgenommen. Dabei ist zu beachten, dass einige Niederschlagsschreiber erst nach dem 01.01.2000 in Betrieb gingen und aufgrund dessen keine vollständige, jährliche Datenreihe der Niederschlagswerte vorhanden ist (Tab.: 4.2).

Tab.: 4.2: Niederschlagsschreiber späterem Aufzeichnungsbeginn als 1.1.2000

Niederschlagsschreiber				
Messstellen Nr.	HD-Nr.	Name	konst. NS-Aufzeichnungen vorhanden seit:	
			1.1.2000	später
196051	NL3807	Absetzwirt	✓	
123034	NL3510	Breitenbach	✓	
112896	NL3665	Gaberl	✓	(02.01.200
123190	NL3703	Hitzendorf_I	✓	
196050	NL3801	Kloster-	☒	01.07.2000
112060	NL3385	Pleschkogel	☒	01.08.2000
105007	NL3642	Salzstiegel	✓	
196034	NL3680	Steinberg	☒	01.01.2002
123208	NL3672	Voitsberg_I	✓	

Eine visuelle Überprüfung der Niederschlagsdaten wurde hinsichtlich auftretender Lücken in den konstanten Aufzeichnungen durchgeführt. Da die Daten schon im Vorhinein vom Land Steiermark korrigiert wurden (Abgleichen der Daten und somit Eliminieren von Lücken) konnten Lücken ausgeschlossen werden.

Der Niederschlagsschreiber der Station Breitenbach weist im Jahr 2005 dennoch fehlerhafte Aufzeichnungen auf; es handelt sich nicht um Lücken, da der Schreiber weiterhin eine Niederschlagshöhe registriert. Alle aufgezeichneten Daten haben aber den Wert Null. Dies ist natürlich ein Fehler und beeinflusste in weiterer Folge alle mit dieser Niederschlagshöhe berechneten Werte negativ. Deshalb wurde die Station Breitenbach im Jahr 2005 in der Betrachtung der Hochwasserereignisse eliminiert. Der Gebietsniederschlag wurde neu, ebenfalls ohne der genannten Station, ermittelt.

4.1.2 Abflussdaten

4.1.2.1 Allgemein

Um das Abflussregime generell interpretieren zu können, wurden in konstanten Zeitabschnitten Abflussaufzeichnung der drei Pegelmessstationen aus dem Zeitreihenexport ausgelesen. Da diese Aufzeichnungen ein annehmbares Volumen aufwiesen, wurden neben den Stunden-Werten auch 15-min.-Werte in MS Excel exportiert.

Bei dem betrachteten Gebiet der Weststeiermark handelt es sich annähernd um das gesamte Einzugsgebiet der Kainach. Die Kainach ist mit einer durchschnittlichen Wasserführung von 9,60 m³/s (am Pegel Lieboch) jedoch kein Hauptfluss des Bundeslandes wie etwa die Mur.

Um eine korrekte und aussagekräftige Analyse der hydrologischen Ereignisse machen zu können, darf grundsätzlich nicht nur der fallende Niederschlag als Haupteingangsgröße zur Entstehung von Hochwasserwellen angesetzt werden. Abhängig vom betrachteten Gebiet kann dies vereinfachend der Fall sein, jedoch

sollten weitere Parameter nicht außer Acht gelassen werden. So müssten vor allem Schneehöhen und deren Anteil am Abflussregime in die Analyse der Ereignisse mit einbezogen werden. Auch sind Faktoren wie die Vegetation und Bewuchs, größere Wasseroberflächen und Versiegelungsflächen von nicht unbedeutender Relevanz bei der Bildung von Hochwasserwellen.

In weiterer Folge wird kurz erläutert, warum einige der genannten Parameter im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

Schnee, Schneehöhe

Schnee ist eine Form des Niederschlags und hat unter bestimmten Randbedingungen die Fähigkeit, beachtlich viel Wasser zu speichern. Diese Eigenschaft des extrem hohen Speichervermögens und des daraus folgenden erhöhten Wasseranteils der Schneeschmelze, dürfte man bei der Betrachtung von Hochwasserereignissen nicht außer Acht lassen. Durch das Einsetzen der Schneeschmelze fließt das im Schnee gespeicherte Wasser sowie das Wasser des geschmolzenen Schnees selbst dem Grundwasserkörper zu und/oder erhöht den Abfluss in Oberflächengewässer. Der Zeitraum der einsetzenden Schneeschmelze sowie die Schneehöhe sind von Region zu Region unterschiedlich und werden von der Seehöhe bestimmt. Im Allgemeinen kann von einem Auftreten der Schneeschmelze in den Frühlingsmonaten ausgegangen werden.

Bei der Datenerhebung wurden ebenfalls Tagesaufzeichnungen der Schneehöhen ausgelesen. Es ist aber nicht jede Niederschlagsmessstation für die Schneehöhenmessung ausgestattet. Folglich liegen keine vollständigen Datensätze gemessener Schneehöhen im Gebiet der Kainach vor.

Betrachtet man alle Hochwasserereignisse der letzten zehn Jahre im genannten Einzugsgebiet und ordnet diese nach monatlicher Reihung, so ist auffallend, dass nur ein einziges Hochwasserereignis in den Frühlingsmonaten auftrat (Abb. 4.1). Da sonst alle Ereignisse in den Sommer- und Herbstmonaten stattfanden, wurde auf eine genauere Betrachtung der Schneehöhen verzichtet.

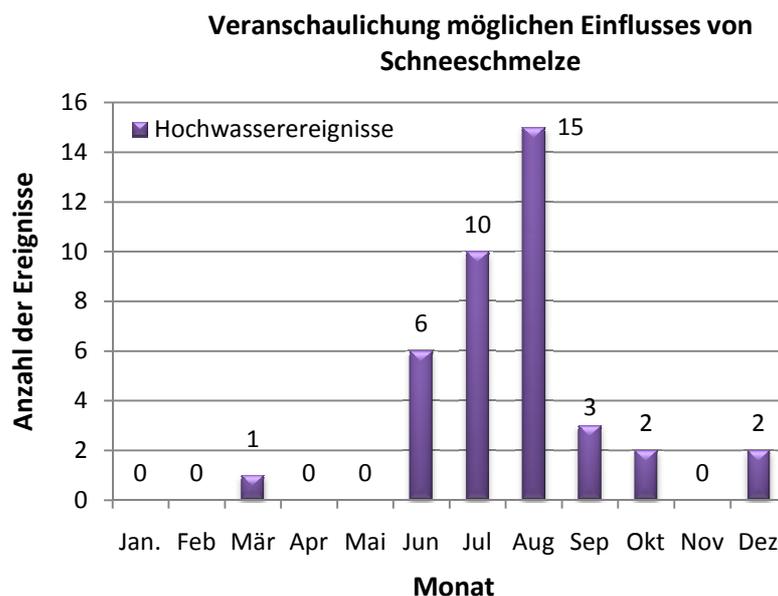


Abb. 4.1: Anzahl der Hochwasserereignisse 2000 - 2010 nach monatlicher Reihenfolge

Versiegelungs- und Bebauungsflächen

Wird durch Versiegelungs- und Bebauungsflächen aufgefangenes Regenwasser direkt und ohne Umwege in die Kanalisation eingeleitet, so wirken sich diese Flächen hemmend auf den Abflussvorgang aus. Andererseits können größere verbaute Flächen auch zum Entstehen einer Hochwasserwelle beitragen, da eine natürliche Versickerung des Niederschlagswassers nicht mehr gegeben ist und das Regenwasser geradewegs dem Vorfluter zufließt.

Tab.: 3.1 (Kapitel 3, Seite 3.21) zeigt eine Auflistung der Landnutzung im Einzugsgebiet Lieboch: der Anteil an Misch- und Nadelwälder nimmt mit über 60% der Gesamtfläche einen Großteil des Einzugsgebietes in Anspruch. Versiegelungs- und Bebauungsflächen, angeführt als durchgehende und nicht durchgehende städtische Prägung, weisen zusammen nur etwa 1% der Gesamtfläche auf. Aufgrund des geringen Prozentanteiles versiegelter Flächen erwies es sich als nicht sinnvoll, diese in die Analyse der hydrologischen Ereignisse einfließen zu lassen. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil der städtischen Prägung der Stadt Voitsberg zugeordnet werden kann.

4.1.2.2 Daten der Hochwasserereignisse

Mit Hilfe des bereits genannten Programms HyDams wurden alle Hochwasserwellen an den drei ausgewählten Pegel mit einem höheren Abfluss als HQ_1 ausgelesen. Wiederum wurde ein Zeitrahmen von zehn Jahren 2000 - 2010 gewählt.

Tab.: 4.3: HQ_1 -Schwellen der drei Abflusspegel

Messstellen Nr.	HLA-Nr.	Pegel	Ae [km ²]	HQ_1 [m ³ /s]
211334	3670	Voitsberg	222,909	30,0
211953	3690	Hitzendorf	51,004	8,00
211342	3701	Lieboch	773,237	105,0

Mit Hilfe der Software wurde von jedem der 39 Hochwasserereignisse separat der Basis- vom Direktabfluss getrennt. Die Trennung erfolgte anhand eines Abtrennungskriteriums - einer leicht ansteigenden Geraden mit der Steigung 8:1, einer Vorgabe der verwendeten Software HyDams. Dafür musste der Beginn jedes Ereignisses zeitlich begrenzt werden. Dies geschah durch manuelle Festlegung des Beginns der Hochwasserwelle ($Q_{B,0}$). Der Endpunkt des Hochwasserereignisses wurde automatisch von der Software definiert.

Abb. 4.2 zeigt ein ausgewähltes, eingipfeliges Hochwasserereignis am Pegel Voitsberg mit einer überschrittenen HQ_1 -Schwelle von 30 m³/s.

Durch visuelle Überprüfung der Hochwasserereignisse wurden starke Sprünge des Abflussregimes am Pegel Lieboch sichtbar. Diese sind auf die Kraftwerksgruppe an der Teigitsch zurückzuführen. Im weiteren Verlauf der Analyse wurde der Einfluss der Kraftwerke jedoch nicht berücksichtigt.

Die Ausgabe der einzelnen Hochwasserereignisse erfolgte separat in pdf-Dateien. Die kontinuierlichen Abflussaufzeichnungen wurden in Microsoft Excel importiert.

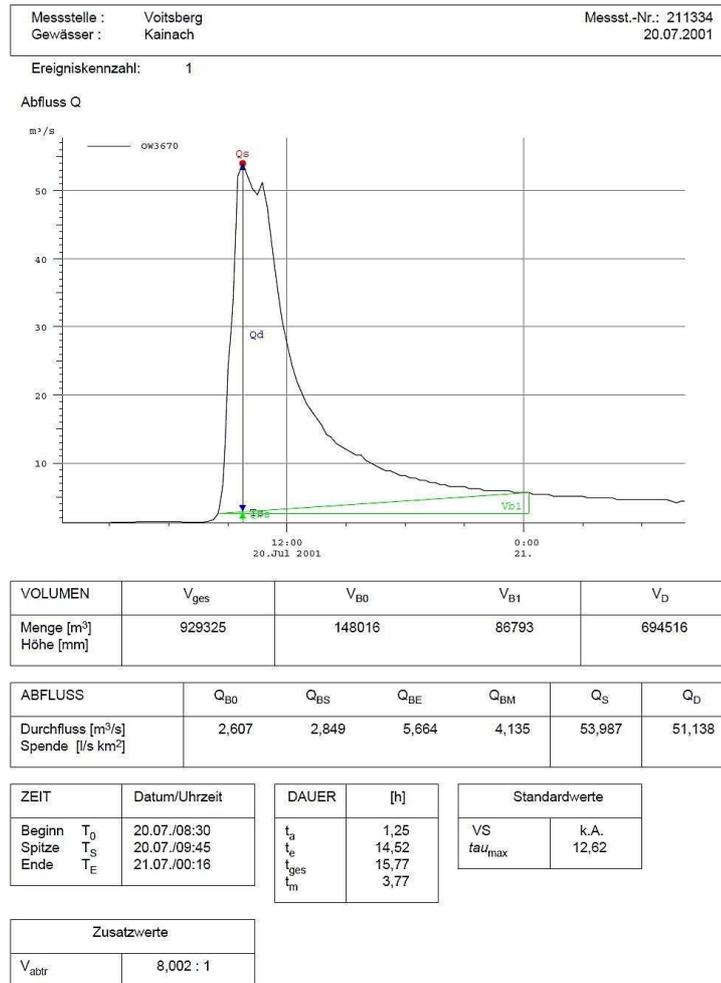


Abb. 4.2: Beispiel eines Hochwasserereignisses am Pegel Voitsberg (Auszug aus der Software HyDams; 28.12.2010)

Problemstellung

Da die Software eine manuelle Abtrennung des Endes eines Hochwasserereignisses ($Q_{B,E}$) nicht zulässt, wirft die automatische Berechnung der Basisabflusstrennung Probleme auf. Durch das Abtrennungskriterium mit der Steigung 1:8 vergrößert sich das - hier in Abb. 4.2 grün eingezeichnete - Dreieck des Basisabflusses. Dadurch wird das Direktabflussvolumen unter der Hochwasserganglinie verfälscht. In weiterer Folge werden dadurch auch die Werte der Direktabflusshöhe beeinträchtigt (Vergleich siehe Abb. 4.3 und 4.4). Um diesem Problem entgegen zu wirken, musste bei der Festlegung des Beginns eines Hochwasserereignisses besondere Sorgfalt geleistet werden. Auch bei nicht eindeutig definierten Hochwasserereignissen wie z.B. mehrgipfeligen Ereignissen aufgrund von Vorregen ist dies der Fall. Aus diesem Grund wurden einige Ereignisse mehrmals aus der Datenbank ausgelesen- immer mit einem anderen Beginn der Hochwasserwelle.

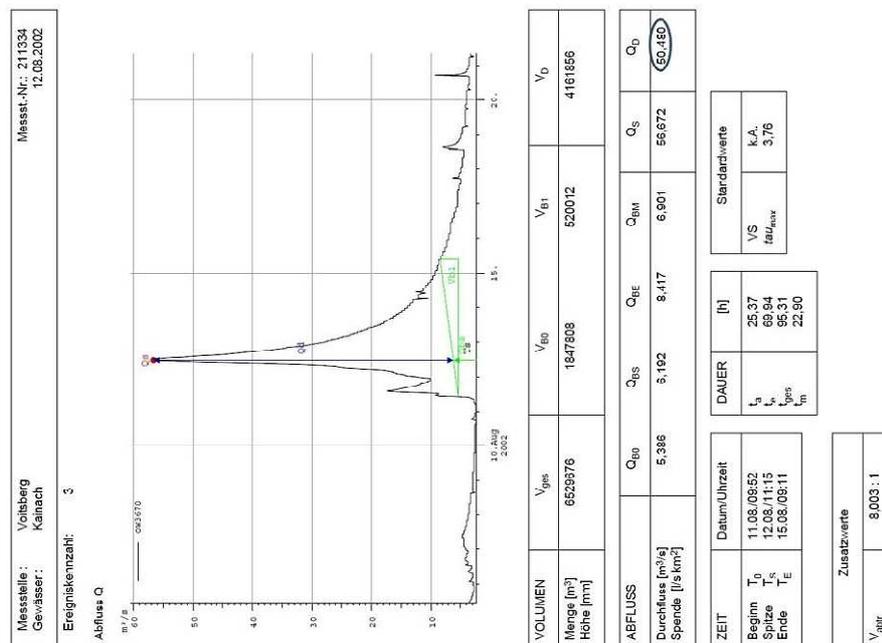
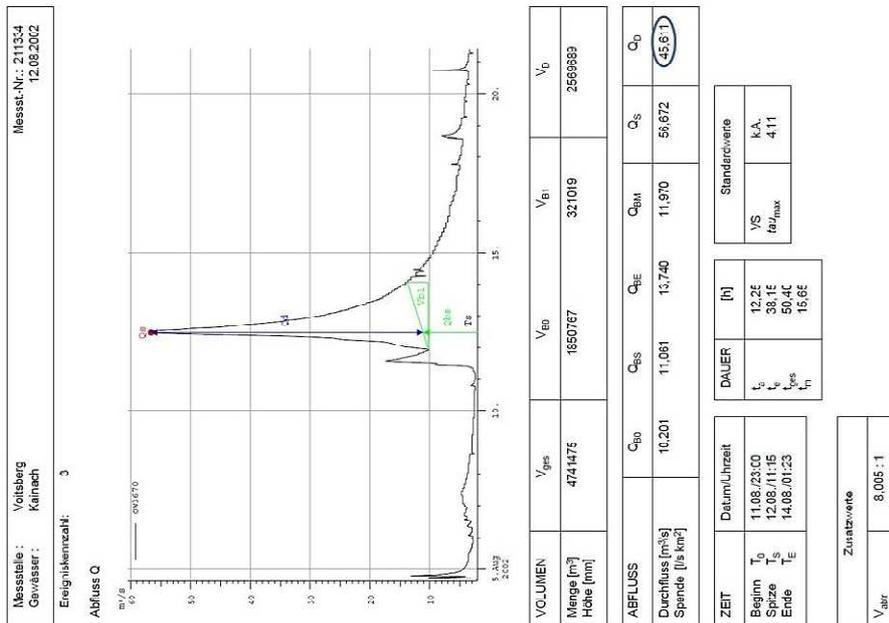


Abb. 4.3 und Abb. 4.4: Hochwasserereignis am Pegel Voitsberg – Vergleich der Basisabflusstrennung mit unterschiedlichen Ergebnissen (Auszug aus der Software HyDams; 23.02.2011)

4.2 ERMITTLUNG DES GEBIETSNIEDERSCHLAGS

Um auf einfachem, aber dennoch zuverlässigem Weg den erforderlichen Gebietsniederschlag zu ermitteln, wurde die Polygonmethode nach Thiessen gewählt. Das Einzeichnen der Polygone anhand der Schwerelinien der Dreiecke, Verbindungen zwischen den einzelnen Niederschlagsmessstationen, sowie die Berechnung der Flächen, erfolgte mit dem Programm AutoCAD. Die Flächen wurden dabei aus vorhandenen GIS-Daten entnommen. Um den fallenden Niederschlag exakt mit jedem aufgezeichneten Hochwasserereignis vergleichen zu können, war es notwendig, jeder Niederschlagsstation eine bestimmte Gewichtungsfäche des Pegelzugsgebietes zuzuordnen. Die Auflistung aller Flächenanteile ist in Abb. 4.7 angeführt.

Diverse Fehler und Abweichungen, hervorgerufen durch das Übertragen der Flächenwerte der GIS-Daten in AutoCAD, wurden durch Assimilation an die wahren Flächenwerte eliminiert.

In weiterer Folge wurden die geographischen Höhen aller Messstationen auf eine definierte Geländehöhe normiert. Der Grund dafür ist, wie in Kapitel 3.2 erwähnt, die Annahme einer Niederschlagszu- bzw. -abnahme von 2% auf je 100 m Höhenunterschied (siehe Kapitel 3.2). Die Höhen der Niederschlagsmessstationen wurden jeweils auf die mittlere Geländehöhe des betrachteten Pegelzugsgebietes bezogen. Einige Stationen mussten auf zwei oder sogar alle drei mittlere Höhen der Pegelzugsgebiete bezogen werden, da sie sich im Grenzbereich der Einzugsgebiete befinden und folglich auch auf mehrere Bereiche einen prozentuellen Einfluss haben (Abb. 4.6).

Die Berechnung des Gebietsniederschlags erfolgte nach folgender Formel (Strobl, et al., 2006):

$$h_{GN} = \frac{1}{A_G} \sum_{i=1}^n h_{pNi} * A_i \quad [4.1]$$

Mit: A_i Gewichtete Polygonfläche des Pegelzugsgebietes
 A_G Summe der Polygonflächen aller zugehörigen Pegelzugsgebiete
 h_{pni} Niederschlagshöhe [mm]

Ergebnis dieser Berechnung sind stündliche Niederschlagshöhen, welche aufgrund der Flächengewichtung direkt einem Pegelzugsgebiet zugewiesen sind. Für den Zeitraum jedes Hochwasserereignisses wurde der Gebietsniederschlag in Form eines Balkendiagrammes separat dargestellt (siehe Abb. 4.5).

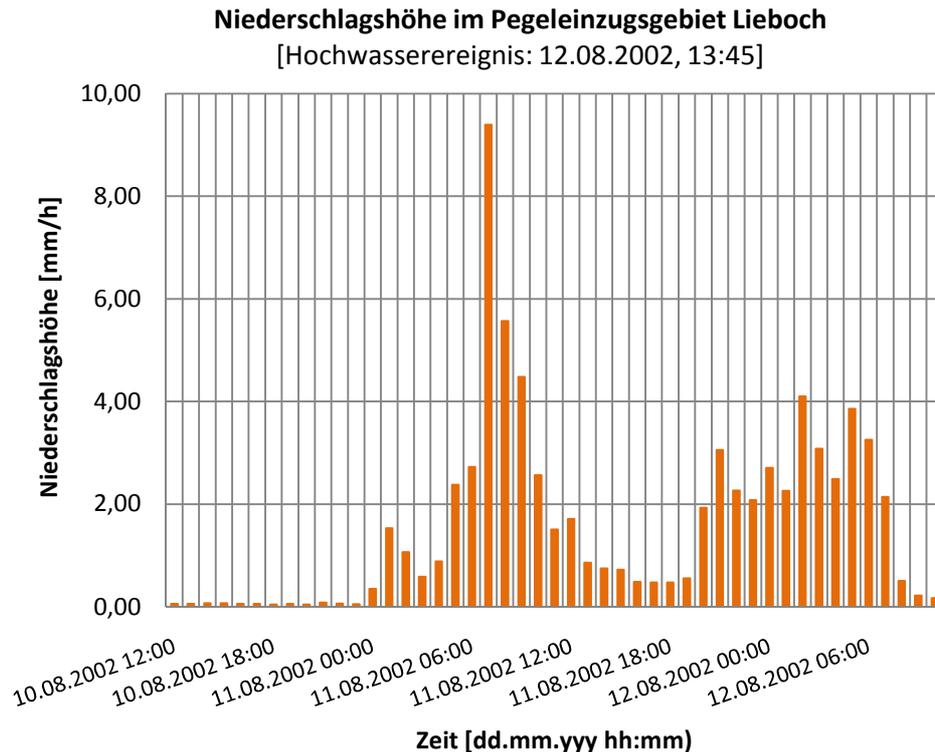


Abb. 4.5: Darstellung des Gebietsniederschlags für ein Hochwasserereignis am Pegel Lieboch

Auch wenn es sich in dieser Arbeit um die Betrachtung verhältnismäßig kleiner Einzugsgebiete handelt, werden lokale Starkregen und vor allem kurze Gewitter durch die Berechnung des Gebietsniederschlags stark verwischt. Dies ist durch die Bewegung der Gewitterzellen über die einzelnen Niederschlagsstationen zu begründen – infolgedessen ist die Dauer eines Niederschlagsereignisses oftmals sehr lange. Insbesondere werden einzelne, an manchen Messstationen sehr hohe Niederschlagshöhen verzerrt und über das gesamte Pegel Einzugsgebiet verschmiert. Eine eindeutige Darstellung solcher Starkregenereignisse ist in weiteren Darstellungen nicht mehr eindeutig sichtbar und wirft bei der weiteren Analyse Probleme auf. Ebenfalls ist anzumerken, dass möglicherweise sehr kleinräumige Ereignisse durch das Niederschlagsmessnetz gar nicht oder nur zum Teil erfasst werden.

Thiessen-Polygone im Einzugsgebiet der Kainach – Niederschlagschreiber

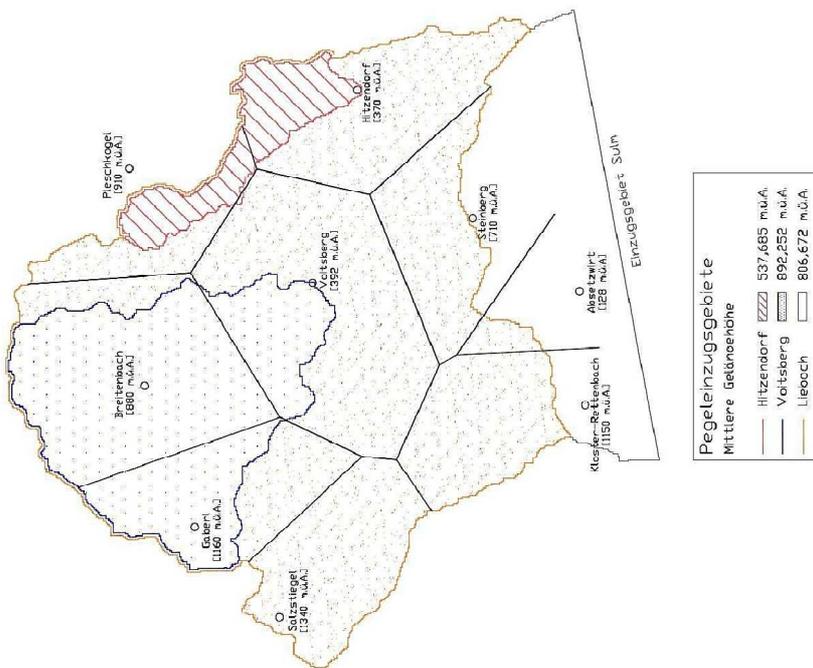


Abb. 4.7.Thiessen-Polygone zur Berechnung des Gebietsniederschlags

Flächenberechnung der Thiessen-Polygone
(mit Gewichtung der Pegelinzugsgebiete)

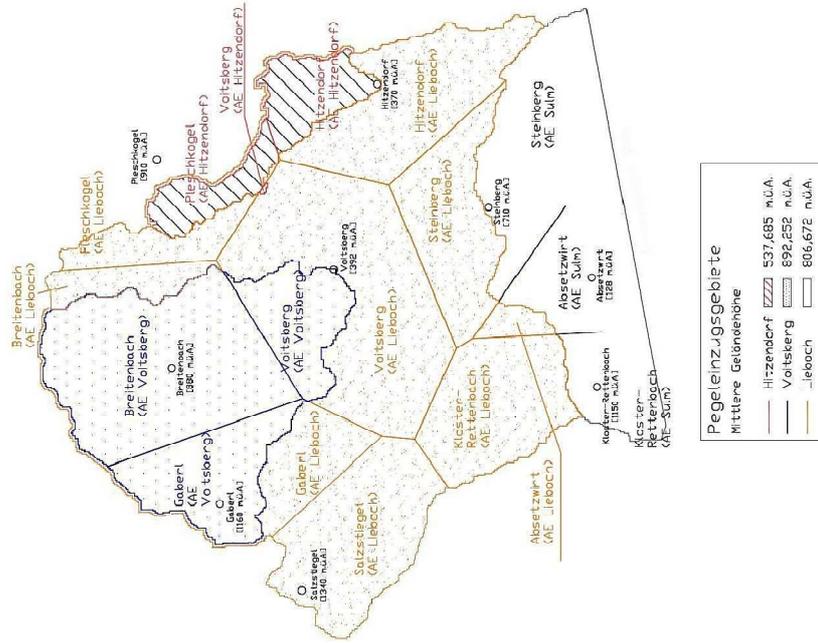


Abb. 4.6: Thiessen-Polygone mit Gewichtung der Pegelinzugsgebiete

Tab.: 4.4: Berechnung des Gebietsniederschlags

Berechnung des Gebietsniederschlags anhand von Thiessen-Polygonen					
Messstelle	Höhe der Messstation [m.ü.A.]	Zugehöriges Pegelinzugsgebiet	Mittlere Höhe des Pegelinzugsgebietes [m.ü.A.]	Fläche [km²] (aus CAD bzw. GIS)	+ 1,5 % Assimilation
Absetzwirt	1238,0	AE Lieboch	806,672	7,45	7,56
		AE Sulm	-	-	-
Breitenbach	880,0	AE Lieboch	806,672	18,27	18,55
		AE Voitsberg	892,252	120,83	122,64
Gaberl	1160,0	AE Lieboch	806,672	32,11	32,59
		AE Voitsberg	892,252	50,34	51,10
Hitzendorf_I	370,0	AE Hitzendorf	537,685	29,06	29,49
		AE Lieboch	806,672	80,54	81,74
Kloster-Rettenbach	1150,0	AE Lieboch	806,672	68,01	69,03
		AE Sulm	-	-	-
Pleschkogel	910,0	AE Hitzendorf	537,685	19,88	20,18
		AE Lieboch	806,672	24,82	25,19
Salzstiegel	1340,0	AE Lieboch	806,672	84,05	85,31
Steinberg	710,0	AE Lieboch	806,672	58,70	59,58
		AE Sulm	-	-	-
Voitsberg_I	392,0	AE Hitzendorf	537,685	0,31	0,31
		AE Lieboch	806,672	131,31	133,28
		AE Voitsberg	892,252	36,14	36,68
				Σ 761,81	773,23

Differenz zum Soll-Wert:	0,00
--------------------------	------

Tab.: 4.5: Gewichtung der Flächenanteile, Berechnung des Gebietsniederschlags

Prozentuelle Aufteilung der Flächenanteile										
		Höhenberechnung				Flächenberechnung				
Pegeleinzugsgebiet	mittlere Geländehöhe	Niederschlags- messstation	Höhe der Messstation [m.ü.A.]	Δh zur mittleren Geländehöhe des Pegeleinzugsgebietes	+/- 2 % Zu- bzw. Abnahme von h_N auf 100 m Höhenunterschied	Flächen [km ²]	Summe der Flächen [km ²]	Soll-Wert [km ²]	Differenz [km ²]	Anteil [%]
AE Hitzendorf	537,685 [m.ü.A.]	Hitzendorf_I	370,00	-167,685	-3,35	29,49	49,98	50,00	0,02	59,01%
		Pleschkogl	910,00	372,315	7,45	20,18				40,37%
		Voitsberg	392,00	-145,685	-2,91	0,31				0,63%
AE Voitsberg	892,252 [m.ü.A.]	Breitenbach	880,00	-12,252	-0,25	122,64	210,42	210,50	0,08	58,28%
		Gaberl	1160,00	267,748	5,35	51,10				24,28%
		Voitsberg	392,00	-500,252	-10,01	36,68				17,43%
AE Lieboch (exkl. Voitsberg/ Hitzendorf)	806,672 [m.ü.A.]	Absetzwirt	1238,00	431,328	8,63	7,56	512,83	773,24	0,00	1,47%
		Breitenbach	880,00	73,328	1,47	18,55				3,62%
		Gaberl	1160,00	353,328	7,07	32,59				6,35%
		Hitzendorf_I	370,00	-436,672	-8,73	81,74				15,94%
		Kloster- Rettenbach	1150,00	343,328	6,87	69,03				13,46%
		Pleschkogl	910,00	103,328	2,07	25,19				4,91%
		Salzstiegel	1340,00	533,328	10,67	85,31				16,63%
		Steinberg	710,00	-96,672	-1,93	59,58				11,62%
Voitsberg	392,00	-414,672	-8,29	133,28	25,99%					
AE Sulm	-	Absetzwirt	1238,00	-	-	-	-	-	-	-
		Kloster- Rettenbach	1150,00	-	-	-				-
		Steinberg	710,00	-	-	-				-

5. DATENAUSWERTUNG

5.1 ABTRENNUNG DES EFFEKTIVEN NIEDERSCHLAGS

Nach vorangegangener Selektion und Auswahl der hydrologischen Ereignisse wurden zur weiteren Analyse alle Daten in Microsoft Excel importiert.

Jedem einzelnen Hochwasserereignis wurde ein zugehöriger, sogenannter effektiver Niederschlag zugewiesen. Diese Zuweisung erfolgte mittels der Anstiegszeit t_a jeder Hochwasserwelle separat. Die Anstiegszeit wurde bei der Selektion der Hochwasserwelle mittels der Software HyDams automatisch ausgelesen. Die Anstiegszeit t_a ist jene Zeitspanne vom Anstieg des Basisabflusses $Q_{B,A}$ bis zur detektierten Hochwasserspitze Q_s .

Herangehensweise zu Abtrennung des Niederschlags:

Beginn des effektiven Niederschlags:

Ausgehend vom Zeitpunkt T_s der auftretenden Hochwasserwelle Q_s wurde jener genannte Zeitraum t_a nach vor, vor das Auftreten des maximal gemessenen Hochwasserabflusses, vergelegt. Dies entspricht einem Zeitraum von $t(T_s - t_a)$ und es wird davon ausgegangen, dass der abflusswirksame Niederschlag zum Zeitpunkt t_a eingesetzt hat. Wenn sich der Zeitpunkt t_a jedoch in einem Niederschlagsereignis befindet, ist dies jedoch nicht der Fall. Darum musste der Zeitpunkt des Beginns des effektiven Niederschlags weiter nach vorne gesetzt werden, da auch jener gefallene Niederschlag vor dem Zeitpunkt t_a Einfluss auf das Hochwasserereignis hatte.

Ende des effektiven Niederschlags:

Das Ende des abflusswirksamen Niederschlags wurde ähnlich wie dessen Beginn gewählt. Wiederum wurde die Anstiegszeit t_a von der Abflussspitze Q_s , hier jedoch nach hinten, angenommen: $t(T_s + t_a)$. Befindet sich dieser Zeitraum wiederum in einem Niederschlagsereignis, so wurde das Ende weiter nach hinten verschoben – maximal jedoch bis zum Zeitpunkt t_E ; dem Ende des abgetrennten Basisabflusses $Q_{B,E}$ welcher durch die Software automatisch festgelegt wurde.

Durch Definieren von Beginn und Ende des effektiven Niederschlags wurde überdies die Dauer d der Ereignisse festgelegt.

Die angeführte Grafik (Abb. 5.1) erklärt die Herangehensweise der Abtrennung des effektiven Niederschlags.

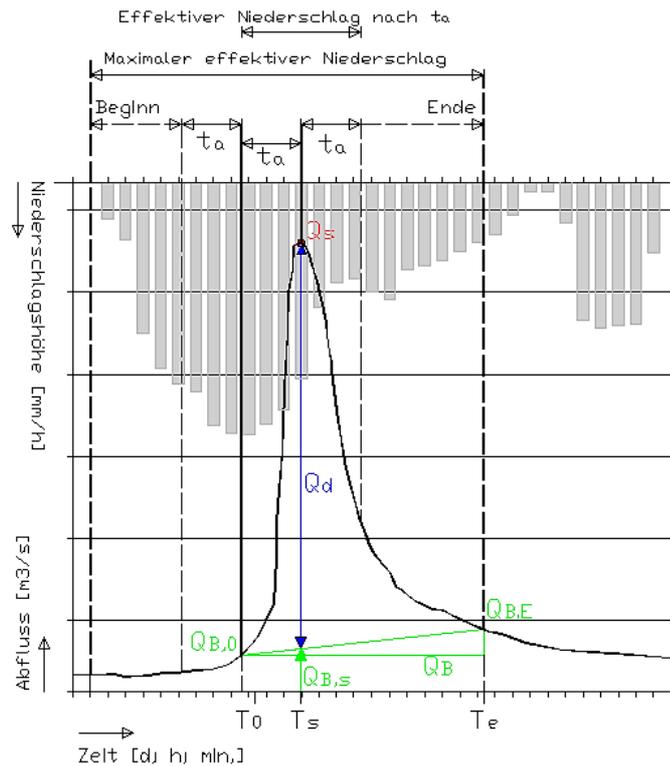


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Abtrennung des effektiven Niederschlags

5.2 KLASSIFIZIERUNG DER EREIGNISSE

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Hochwasserereignisse anhand von hydrologischen Merkmalen, insbesondere anhand des gefallenen Niederschlags, zu klassifizieren – erwünscht ist eine Gegenüberstellung der Direktabflusshöhen von Hochwasserwellen mit den zugehörigen effektiven Niederschlagshöhen jedes einzelnen Hochwasserereignisses. Um aussagekräftige Ergebnisse der Analyse zu bekommen, ist jene erwähnte Gegenüberstellung oder eine einfache Unterteilung z.B. nach der Niederschlagshöhe, nicht ausreichend. Eine Klassifizierung fand aus diesem Grund hinsichtlich zweier Aspekte statt: Einerseits wurden Ereignisse anhand ihrer Niederschlagsdauer geordnet und gruppiert. Andererseits wurden die hydrologischen Bedingungen vor Eintreten eines Hochwassers untersucht.

5.2.1 Klasse: Vorregensituation

Um den Einfluss des anstehenden Bodens auf das Abflussregime in den Analysen mitzubetrachten und vor allem bewerten zu können, wurden die herrschenden Regenbedingungen vor Eintreten einer Hochwasserwelle begutachtet. Dies erfolgte durch Betrachtung der Niederschlagsaufzeichnungen. Über einen Zeitraum von 14, 21, bzw. 28 Tagen vor einem detektierten Hochwasserereignis bis zum Ereignis selbst wurden Summenlinien über den Gebietsniederschlag gebildet. Dadurch konnten anhand dieses gefallenen Vorregens Grenzen gebildet werden, welche den Boden in unterschiedliche Klassen einteilen. Diese Grenzen bilden Schranken für *trockenen*, *feuchten* sowie *sehr feuchten Zustand* des Bodens vor Eintreten des Hochwasserereignisses (siehe Tab.: 5.1). Nach näherer Betrachtung der Pegelbezugsgebiete fiel die Entscheidung, für alle drei Gebiete dieselben Grenzen anzusetzen um dadurch einen besseren Vergleich aufstellen zu können.

Tab.: 5.1: Grenzen der Klasseneinteilung anhand der Vorregensituation

Bezeichnung des Niederschlagsereignis	Summe der Niederschlagshöhen [mm] des Vorregens (21 Tage)
Trocken	< 75
Feucht	75 – 125
Sehr feucht	> 125

Die genannten Summenlinien über jene drei Zeiträume (14, 21 bzw. 28 Tage) wurden gebildet, um einen Bezug des fallenden Regens zur Hochwasserwelle herzustellen. Niederschläge, welche zeitlich gesehen weit vor einem Hochwasser fallen, haben weniger Einfluss auf dessen Bildung als Niederschläge, welche nur ein oder zwei Tage vor dem Entstehen einer Hochwasserwelle registriert werden. Durch Betrachtung der resultierenden Niederschlagshöhen über die drei Zeiträume wurde dies sichtbar. In weiterer Folge wurden nur mehr jene Ergebnisse mit einer ermittelten Vorregensituation von 21 Tagen, näher betrachtet.

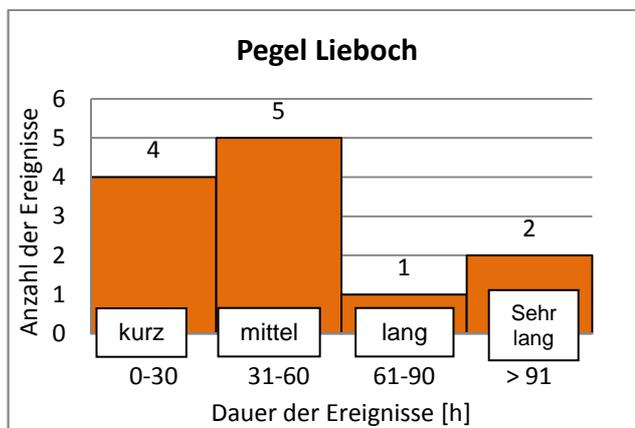
5.2.2 Klasse: Niederschlagsdauer

Nach vorangegangener Definition des abflusswirksamen Niederschlags wurden die Niederschlagsereignisse hinsichtlich ihrer Dauer bewertet, gruppiert und den Klassen *kurz*, *mittel*, *lang* oder *sehr lang* andauernde Ereignisse zugeordnet. Da ein Niederschlagsereignis einen zeitlich und räumlich stark veränderlichen Vorgang darstellt, musste die Größe des Pegelbezugsgebietes beachtet werden: Je größer die Fläche des Einzugsgebietes, desto länger ist auch der anhaltende Niederschlag, da es sich hierbei um den Gebietsniederschlag handelt. Eine einheitliche Klassifizierung aller drei Gebiete war insofern nicht möglich. Die Ereignisse wurden infolgedessen pegelzugeordnet untersucht. Auch variiert die Anzahl der Klassen von Pegel zu Pegel. Dies ist ebenfalls auf die Verteilung der Niederschlagsdauern und die Größe des Pegelbezugsgebietes zurückzuführen.

Das unten angeführte Histogramme zeigt beispielhaft die Klasseneinteilung der Niederschlagsereignisse anhand der Regendauer am Pegel Lieboch.

Dauer[h]	Anzahl	%
0-30	4	33,33
31-60	5	41,67
61-90	1	8,33
> 91	2	16,67
Summe	12	100%

Verteilung	[h]
Min.	6
Max.	152
Mittelwert	52,08



Ereignis:	Dauer [h]
1	6
2	11
3	24
4	30
5	31
6	31
7	36
8	50
9	55
10	75
11	130
12	152

Abb. 5.2: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer - Pegel Lieboch

6. ANALYSE UND SCHUSSFOLGERUNG

Nachdem alle charakteristischen Kenngrößen einer Hochwasserwelle sowie des effektiven Niederschlags ausgelesen und klassifiziert wurden, werden in diesem Kapitel die einzelnen Parameter, vor allem durch graphische Hilfsmittel, interpretiert und erläutert.

Einleitend, und um einen besseren Überblick über die Aufzeichnungen zu geben, werden alle wichtigen, bereits ausgelesenen Daten nochmals aufgelistet und zusammengefasst (Tab.: 6.1):

Tab.: 6.1: Wichtigste Parameter für die weiterfolgende Auswertung

Parameter		
Anstiegszeit t_a	[hh:mm]	Ausgelesen aus HyDams
Niederschlags- höhe h_n	[mm]	Ermittlung des Gebietsniederschlags je Pegeleinzugsgebiet anhand der Polygonmethode Definition von Beginn und Ende des effektiven Niederschlags einer Hochwasserwelle anhand von t_a
Dauer der Niederschlags- ereignisse d	[h]	Aufsummierung der Niederschlagshöhen über den definierten Zeitraum Ausgabe der effektiven Niederschlagshöhen und der Dauer der Ereignisse
Direktabflusshöhe	[mm]	Direktabflussvolumen (aus HyDams) bezogen auf die Fläche des jeweiligen Pegeleinzugsgebietes
Vorregen	[mm]	Bildung von Summenlinien des Gebietsniederschlags 21 Tage vor dem, zuvor definierten Beginn des effektiven Niederschlags eines Hochwasserereignisses

Bezüglich der beiden in Kapitel 5.2 erläuterten Klassifizierungen wurden die Direktabflusshöhen mit den Niederschlagshöhen jedes Ereignisses graphisch in Form von Punktdiagrammen gegenübergestellt (jedes Ereignis stellt einen Punkt im Diagramm dar). Die farbliche Zuordnung der Ereignisse lässt, abhängig von der Klassifikation, entweder auf die Dauer des Niederschlagsereignisses oder die herrschende Vorregensituation schließen. Jene, im Diagramm mit 45° Steigung eingezeichnete Gerade veranschaulicht das Verhältnis des gefallenen Niederschlags zum Direktabfluss (siehe Abb. 6.2). Eine Überschreitung dieser Geraden seitens der Niederschlagshöhe oder der Direktabflusshöhe ist verständlicherweise nicht erreichbar, denn dies würde bedeuten, dass der Abflussbeiwert einen Wert größer Eins annimmt also mehr Wasser abfließt als zuvor regnete. Folglich müssen sich alle tatsächlich aufgetretenen Ereignisse unterhalb dieser Geraden wiederfinden. In der vorliegenden Arbeit handelt es sich um ein Black-Box-Modell der Niederschlags-Abfluss-Betrachtung. Es handelt sich um eine generelle Betrachtung der Ereignisse im Versuchsgebiet, darum ist eine detaillierte Begutachtung dieses Parameters nicht notwendig.

In den unten angeführten Diagrammen und Gegenüberstellungen der Kennwerte aller einzelnen Ereignisse sind einige abgebildeten Punkte mit sehr geringer Direktabflusshöhe erkennbar. Dies lässt vorwiegend auf ein sehr kurzes, aber dennoch heftiges Niederschlagsereignis schließen, wodurch die definierte HQ₁-Schwelle nur knapp überschritten wurde.

6.1 INTERPRETATION DER EREIGNISSE AM PEGEL LIEBOCH

Das unten angeführte Beispiel zeigt solch eine graphische Darstellung der Ereignisse am Pegel Lieboch. In Abb. 6.1 werden die Niederschlagshöhen der Vorregensituationen (sog. Vorregen) mit den Direktabflusshöhen verglichen. Durch die Farbgebung der einzelnen Ereignisse ist eine Trennung in die verschiedenen Bereiche, hier anhand der Vorregensituation in die Gruppen *trocken* bis *sehr feucht*, leicht zu erkennen. In Abb. 6.2 sind dieselben Ereignisse anhand der Niederschlagshöhe und der Direktabflusshöhe abgebildet. Durch erneute Farbzuzuweisung ist auch hier die vorgenommene Klasseneinteilung der Vorregensituationen optisch rasch erkennbar. Betrachtet man das zweite Diagramm, so ist eine tendenzielle Gruppierung aller gleichfärbigen Ereignisse feststellbar und bis auf ein Ausreißer-Ereignis auch korrekt. Ereignisse mit sehr feuchten Vorbedingungen sollten sich im Bereich der sich schneidenden Achsen bzw. entlang der eingezeichneten 45°-Geraden befinden, wohingegen Ereignisse mit trockenen Vorbedingungen eine höhere Niederschlagshöhe aufweisen müssten. Abb. 6.3 zeigt eine theoretisch zu erwartende Verteilung der Ereignisse, kategorisiert anhand den Vorregensituationen.

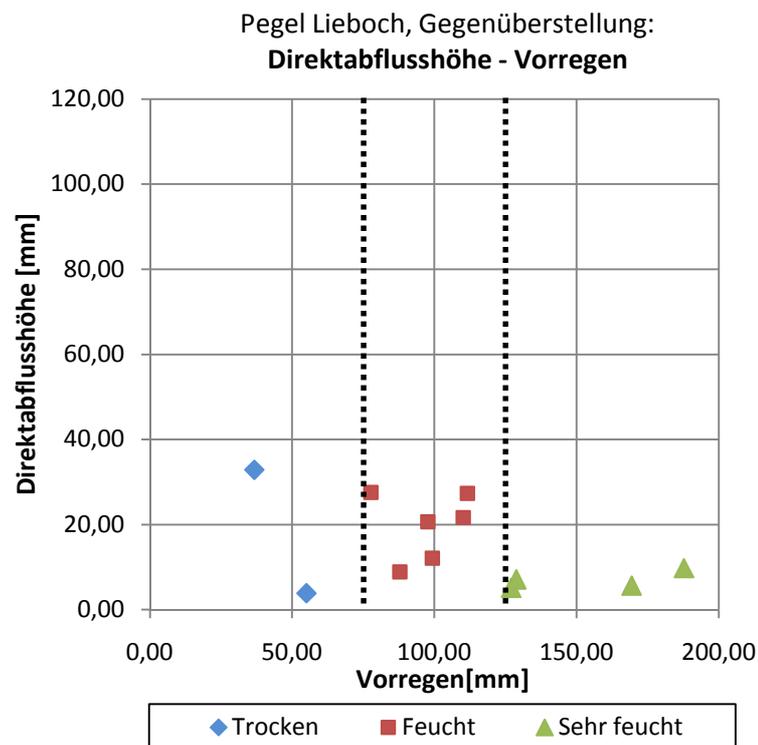


Abb. 6.1: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch

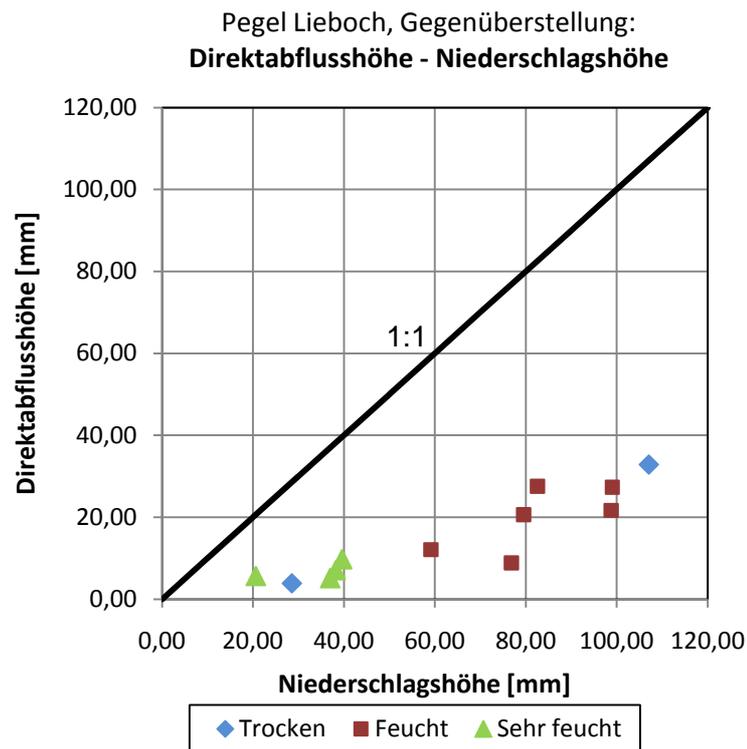


Abb. 6.2: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch

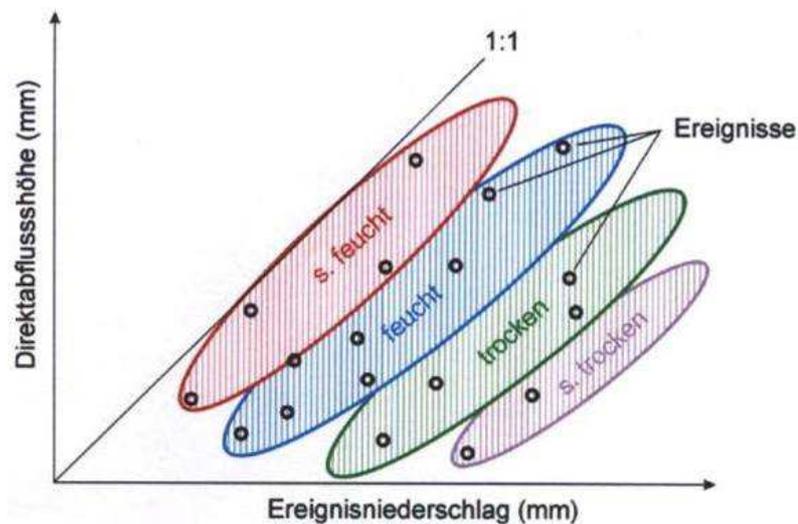


Abb. 6.3: Darstellung einer theoretisch zu erwartenden Ereignisverteilung

Wie zu erkennen ist, entspricht Abb. 6.2 annähernd der theoretisch zu erwartenden Ereignisverteilung. Nur eines der selektierten Ereignisse weicht von der idealen Vorgabe ab. Es handelt sich hierbei um ein Hochwasserereignis mit trockenen Vorbedingungen, folglich müsste der Punkt auch einen höheren Wert des Niederschlags aufweisen. Um diese Abweichung erläutern zu können, wurden die durchschnittlichen, monatlichen Niederschlagssummen bis ein Jahr vor dem Ereignis

überprüft. In Tab.: 6.3 wurden nur all jene Messstationen angeführt, welche über die Jahre hinweg durchgehend stabile und auch korrekte Werte lieferten.

Die Messstationen Kloster-Rettenbach und Steinberg weisen in den langjährigen Aufzeichnungen Lücken auf und wurden deshalb nicht angeführt.

Tab.: 6.2: Ausreißer-Ereignis am Pegel Lieboch

Datum	HQ ₁ = 105,0 m ³ /s	Direktabfluss- höhe [mm]	Niederschlags- dauer [h]	Niederschlags- höhe [mm]	Vorregen [mm]
	Q _s [m ³ /s]				
29.6.2006, 12:15 Uhr	128,006	3,90	24	28,59	54,99 < 75,00 →TROCKEN

Vor allem die mittleren Niederschlagshöhen der Messstationen Voitsberg und Breitenbach werden aufgrund des flächenanteiligen größten Einflusses auf das Pegeleinzugsgebiet Lieboch näher geprüft. An beiden Messstationen liegen die mittleren Niederschlagshöhen vom Juni 2006 unterhalb des langjährigen Durchschnittes – dieser Monat war demzufolge ein relativ trockenes. In den beiden Monate zuvor, April und Mai 2006, übersteigen die registrierten Niederschlagswerte den Durchschnitt jedoch extrem. Auch bei allen anderen Niederschlagsstationen ist dieser Zustand zu erkennen. Deswegen kann nicht eindeutig von trockenen oder extrem feuchten Vorbedingungen des Bodens ausgegangen werden. Betrachtet man die jährlichen Niederschlagssummen im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt, so war der Zeitraum vom Juni 2005 - Juni 2006 eher feucht. Eine Erklärung des Ausreißer-Ereignisses ist demnach anhand der monatlichen Niederschlagssummen nicht gegeben.

Eine weitere mögliche Erklärung der Abweichung des genannten Ereignisses im Juni 2006 liefert die separate Betrachtung der aufgezeichneten Niederschlagshöhen aller einzelner Messstationen. Der Gebietsniederschlag wurde bei diesem Schritt außer Acht gelassen und nur die Niederschlagshöhen einige Stunden vor dem detektierten Hochwasserereignis kontrolliert (Tab.: 6.4). Durch diese Auflistung wird deutlich, dass eine extrem starke, aber lokale Gewitterzelle dieses Hochwasserereignis hervorrief. In einer Zeitspanne von nur zwei Stunden wurden an den Messstationen Pleschkogl und Voitsberg extrem hohe Niederschlagswerte registriert. Der berechnete Gebietsniederschlag über das gesamte Einzugsgebiet dauerte dennoch nahezu 24 Stunden an. Durch das Weiterziehen oder vielmehr wahrscheinlich das Ausregnen der Gewitterzelle über den beiden genannten Niederschlagsstationen wurden die übrigen Stationen nur wenig überregnet. Überdies hinaus wurden die extremen Niederschlagshöhen durch die Berechnung des Gebietsniederschlags gedämpft und aufgrund der eher geringen Niederschlagshöhen aller anderen Stationen verwischt. Dies erklärt den allgemein niedrigen Gebietsniederschlag. Infolge dessen ist der dem Hochwasserereignis zugehörige effektive Niederschlag auch sehr gering und das Ereignis erscheint in Abb. 6.2 auf der linken Seite.

Tab.: 6.3: Auflistung der monatlichen Niederschlagssummen der Jahre 2005/2006 sowie der langjährigen Monatsmittelwerten

	Zeit- raum	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Absetzwirt	2005	10,7	45,2	39,1	78,1	64,3	125,2	203,9	264,7	131,4	91,9	55,3	71,8	1182
	2006	44,1	56,1	51,5	155,5	122,0	65,7	54,1	115,7	169,6	62,0	34,8	30,4	962
	2000- 2009	34,8	32,3	56,5	73,9	105,3	156,0	134,2	159,6	124,2	85,4	60,7	69,5	1093
Breitenbach	2005	11,8	50,5	28,8	65,9	45,9	79,0	197,0	227,0	95,6	81,3	46,3	51,4	981
	2006	27,4	46,8	52,5	108,0	125,3	101,9	59,9	108,3	111,3	69,7	29,8	31,9	873
	1994- 2010	24,9	25,5	44,3	59,4	95,6	128,1	132,2	151,3	103,1	74,3	55,7	49,0	944
Hitzendorf	2005	6,5	31,8	18,0	55,6	38,6	70,7	191,4	198,0	57,4	22,2	29,4	47,3	767
	2006	31,5	29,9	34,8	70,4	83,3	59,0	40,8	95,2	93,0	55,3	19,8	10,6	624
	2000- 2009	21,6	17,5	39,6	42,8	70,9	109,0	106,8	115,3	79,6	54,9	40,2	45,0	743
Pleschkogl	2005	6,5	52,5	33,0	63,1	63,1	78,5	212,5	231,9	88,3	37,1	33,5	48,6	949
	2006	39,3	40,0	48,8	87,8	132,4	147,1	80,1	124,3	112,8	78,7	31,0	19,1	941
	1971- 2010	29,5	34,1	54,6	61,0	109,9	153,7	151,5	138,2	105,3	79,8	59,1	41,1	1018
Salzstiegl	2005	29,3	59,0	35,0	95,6	69,6	97,8	310,4	309,6	120,4	132,0	74,5	78,5	1412
	2006	31,8	59,1	68,8	134,9	162,6	99,9	104,1	144,4	98,3	88,7	37,7	40,9	1071
	2000- 2009	42,1	35,2	70,9	79,2	117,9	145,9	159,8	162,3	107,2	96,0	67,4	65,7	1150
Voitsberg	2005	5,5	37,4	26,3	59,6	48,6	87,4	173,7	214,7	91,2	47,3	29,1	49,3	870
	2006	24,1	33,6	42,2	88,4	113,1	104,6	51,5	109,3	112,2	64,7	24,1	20,8	789
	2000- 2010	22,7	22,0	42,6	51,5	78,9	117,3	101,4	112,2	90,7	60,0	46,7	45,3	791

Tab.: 6.4: Betrachtung der registrierten Niederschlagshöhen zum Zeitpunkt des Hochwassers am 29.6.2006, Pegel Lieboch

Messstation	Registrierte Niederschlagshöhe [mm] an den einzelnen Messstationen				
	6:00 Uhr	7:00 Uhr	8:00 Uhr	9:00 Uhr	10:00 Uhr
Breitenbach	1,77	0,00	0,85	0,00	0,00
Pleschkogl	0,28	37,03	5,16	0,52	0,59
Voitsberg	0,00	20,60	16,00	0,00	0,00
Hitzendorf	0,00	7,10	0,00	0,00	0,00
Steinberg	0,00	0,10	7,00	0,00	0,00
Absetzwirt	0,00	0,00	4,20	0,00	0,00
Gaberl	4,60	4,48	0,52	0,00	0,00
Kloster-Rettenbach	0,00	0,82	0,82	0,82	0,82
Salzstiegl	0,70	3,4	0,80	0,00	0,00
Gebietsniederschlag	1,07	6,94	5,40	0,10	0,10

In Abb. 6.4 und Abb. 6.5 sind dieselben, oben näher erläuterten Ereignisse des Pegels Lieboch abgebildet. Diese Darstellungen zeigen jedoch eine Farbzueweisung anhand der Dauer der jeweiligen effektiven Niederschlagsereignisse, aufgeteilt in vier Klassen. Aus Abb. 6.4 geht hervor, dass durch ein länger andauerndes Regenereignis auch mit einer Zunahme der Niederschlagshöhe zu rechnen ist. Auch ein Vergleich der Direktabflusshöhe mit den Niederschlagshöhen aller Ereignisse (Abb. 6.5) zeigt einen Zusammenhang dieser beiden Größen in Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer. Die Merkmale sind, bis auf zwei erneute Ausreißer-Ereignisse, in aufsteigender Reihenfolge verteilt. Die beiden Ereignisse gehören der blau gefärbten Gruppe an und weisen eine Dauer des effektiven Niederschlags zwischen 31 - 60 Stunden auf. Normalerweise müssten diese Ereignisse eine geringere Niederschlagshöhe aufweisen und folglich weiter links in der Gegenüberstellung zu liegen kommen.

Diese Verteilung der Ereignisse, klassifiziert anhand der Dauer des effektiven Niederschlags, sagt wenig über zukünftige, mögliche Hochwasserwellen aus. Eine Steigerung der Niederschlagshöhen ist mit anhaltenden Dauer eines Regenereignisses ohnedies vorauszusetzen. Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels werden aufgrund dessen nur die Ereignisse der Klasse *Vorregensituation* an den Pegeln Voitsberg und Hitzendorf näher interpretiert.

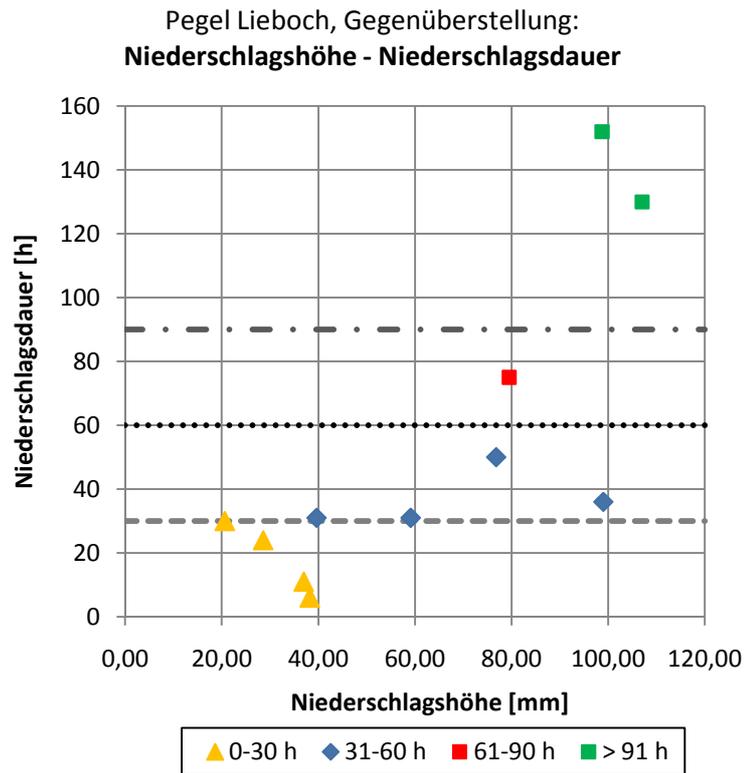


Abb. 6.4: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Niederschlagsdauer, Pegel Lieboch

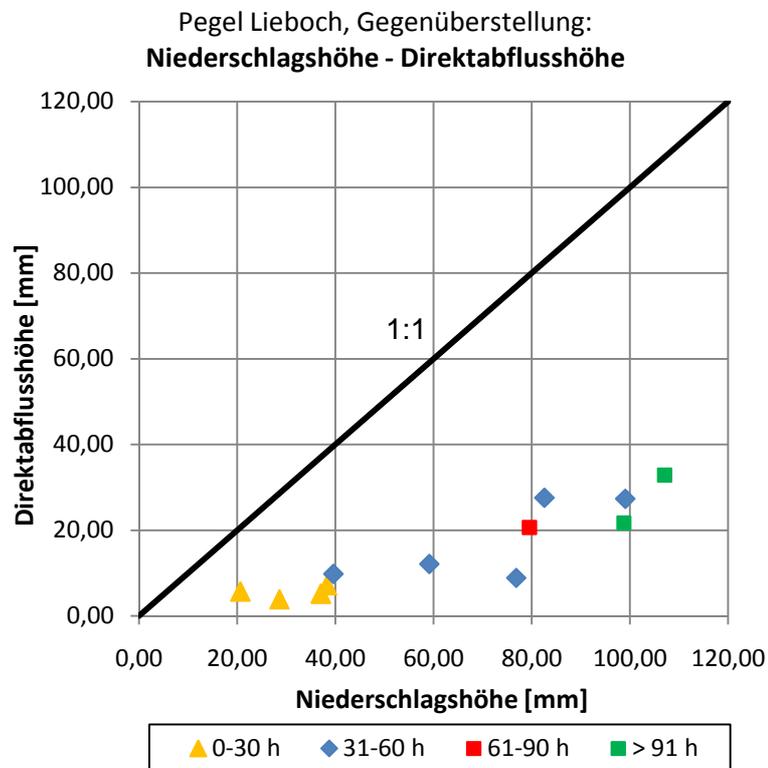


Abb. 6.5: Gegenüberstellung Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Niederschlagsdauer, Pegel Lieboch

6.2 AUSWERTUNG DER EREIGNISSE AN DEN PEGELN VOITSBERG UND HITZENDORF

Um einheitliche und vergleichbare Ergebnisse zu erlangen wurden die Hochwasserereignisse welche an den Pegeln Voitsberg und Hitzendorf auftraten, gleich aufbereitet wie jene des Pegels Lieboch. Die Vorgehensweise der Auswertung wurde beibehalten und alle hydrologischen Daten und Kennwerte wurden ebenfalls auf demselben Weg graphisch dargestellt. Auf Ereignisse, kategorisiert anhand der Niederschlagsdauer, wird nicht mehr eingegangen.

Durch Gegenüberstellung der Direktabflusshöhen zu den Niederschlagshöhen sind Abweichungen der Ereignisverteilungen an den Pegeln Voitsberg und Hitzendorf gegenüber der zu erwarteten Verteilung sichtbar. Die Verteilung der Ereignisse des Pegeleinzugsgebietes Voitsberg stimmt teilweise mit dieser überein und es ist ebenfalls eine Gruppierung der farblich dargestellten Punkte gegeben. Es sind aber auch zwei Ereignisse mit starken Abweichungen zu den Richtwerten abzulesen (Abb. 6.6). Betrachtet man die dargestellten Ereignisse des Gebiets Hitzendorf, so ist rasch erkennbar, dass keine farbliche Anhäufung der Punkte vorliegt und mehrere Ereignisse Abweichungen zur Idealverteilung aufweisen.

Durch genauere Betrachtung der Niederschlagswerte sowie der gemittelten und langjährigen Niederschlagshöhen wurde erneut versucht, die jeweiligen Abweichungen zu erklären.

6.2.1 Pegeleinzugsgebiet Voitsberg

In der unten angeführten Abbildung sind alle Ereignisse des Pegeleinzugsgebietes Voitsberg abgebildet. Die blau markierten Ereignisse, jene mit trockenen Vorbedingungen, sind als Ausreißer zu betrachten. Sie sollten im Vergleich zur Idealverteilung eine höhere Niederschlagshöhe aufweisen.

Um diese beiden Hochwasserereignisse und deren Abweichungen erläutern zu können wurden wiederum die gemittelten Niederschlagswerte sowie die langjährigen monatlichen Niederschlagshöhen näher betrachtet. Es wurden die Niederschlagsdaten der Niederschlagsmessstationen Voitsberg, Breitenbach und Gaberl untersucht.

Tab.: 6.5: Ausreißer-Ereignisse am Pegel Voitsberg

Datum	HQ ₁ = 30,0 m ³ /s	Direktabfluss- höhe [mm]	Niederschlags- dauer [h]	Niederschlags- höhe [mm]	Vorregen [mm]
	Q _s [m ³ /s]				
20.7.2001, 09:45 Uhr	53,987	3,30	25	43,98	50,20 < 75,00 →TROCKEN
29.06.2006, 09:00 Uhr	31,088	3,44	24	32,86	58,61 < 75,00 →TROCKEN

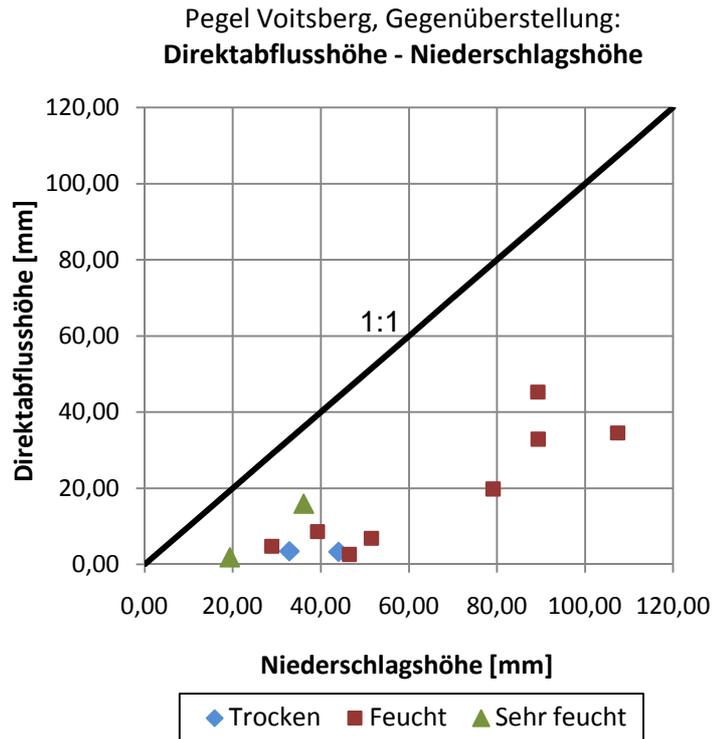


Abb. 6.6: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Voitsberg

Hochwasserereignis am 20.07.2001, 09:45

Betrachtet man in einem Zeitraum von Juli 2000 bis Juli 2001 die durchschnittlichen Monatesumme der drei Niederschlagsmessstationen Voitsberg, Breitenbach und Gaberl, und vergleicht diese mit den langjährigen Monatsmitteln, so ist feststellbar, dass es sich um ein durchschnittliches Regenjahr handelte. Auffallend ist aber, dass es zwei Monate vor dem genannten Hochwasser, demnach von Mai bis zum 20. Juli 2001, extrem wenig regnete und die registrierten Niederschlagssummen weit unterhalb des langjährigen Durchschnitts liegen. Abhängig von der betrachteten Niederschlagsstation unterschreiten die registrierten Monatsmittel die langjährigen Werte um etwa 10% bis sogar 50%. Diese extreme Trockenheit bewirkte ein Austrocknen des Bodens. Aus den Abflussaufzeichnungen geht hervor, dass der gesamte registrierte Niederschlag des Monats Juli fast ausschließlich diesem Niederschlagsereignis zuzuordnen ist.

Hochwasserereignis am: 29.06.2006, 09:00

Bei dieser detektierten Hochwasserwelle handelt es sich um das gleiche Niederschlagsereignis wie bei dem Hochwasserereignis am 29.06.2009, 12:15, am Pegel Lieboch. Eine lokale Gewitterzelle über der Messstation Voitsberg führte zu einem Ansteigen des Durchflusses. In nicht einmal zwei Stunden ($t_a = 1,75$ h) wurde der detektierte Spitzenabfluss erreicht. An den Stationen Breitenbach und Gaberl wurden ebenfalls erhöhte Stundenwerte des Niederschlags gemessen. Durch die Berechnung des Gebietsniederschlags ist eine Glättung dieser hohen Werte gegeben und ein extremer Ausschlag der Niederschlagshöhen nicht mehr erkennbar.

Wird das gesamte Jahr betrachtet, so kann die gleiche Aussage wie bei dem Ereignis am Pegel Lieboch gemacht werden: Der gemittelte Niederschlag der einzelnen Monate, betrachtet über das ganze Jahr, entspricht etwa den Werten der langjährigen Monatsmittel (siehe Tab.: 6.3).

6.2.2 Pegelinzugsgebiet Hitzendorf:

Mit einer Fläche von nur 50,00 km² handelt es sich beim Pegelinzugsgebiet Hitzendorf um das flächenmäßig kleinste in dem betrachteten Versuchsgebiet. Infolge dessen wird davon ausgegangen, dass die Verteilung der Ereignisse der Idealverteilung sehr nahe kommt. Wie aus der unten angeführten Darstellung hervorgeht ist dies nicht der Fall, denn klare Gruppierungen der Ereignisse der Klassen *feucht* und *sehr feucht* sind nicht gegeben. Auch entspricht ein Ereignis der Klasse *trocken* nicht der erwünschten Idealverteilung. Es wird versucht die Abweichungen dieser Ausreißer-Ereignisse zu erläutern (Abb. 6.7).

Es wurden erneut die monatlichen Niederschlagssummen mit den langjährigen Werten der Messstationen Hitzendorf und Pleschkogl verglichen.

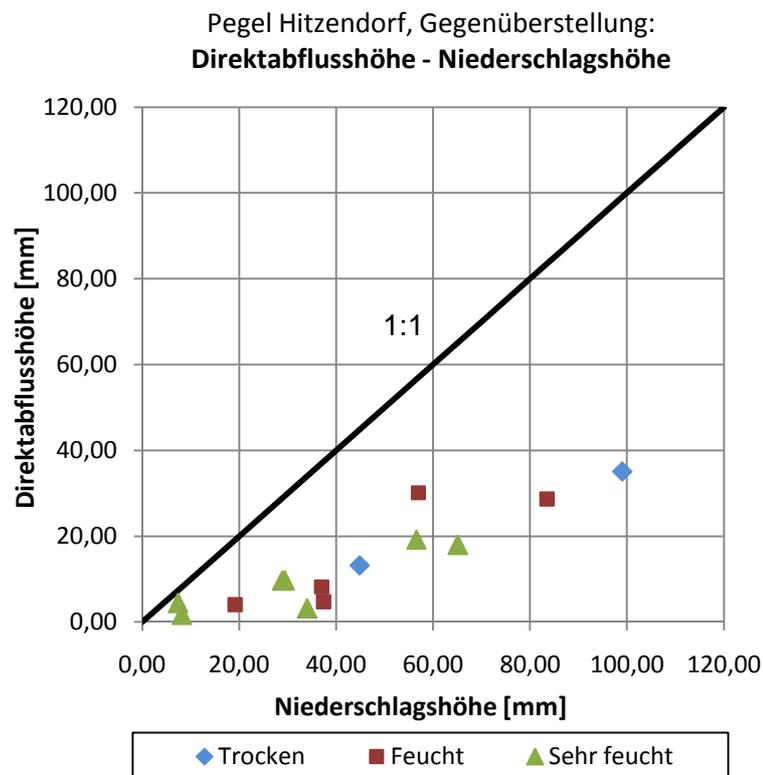


Abb. 6.7: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Hitzendorf

Hochwasserereignis am 24.03.2004, 21:00

Tab.: 6.6: Ausreißer-Ereignis am Pegel Hitzendorf

Datum	HQ ₁ = 8,0 m ³ /s	Direktabfluss- höhe [mm]	Niederschlags- dauer [h]	Niederschlags- höhe [mm]	Vorregen [mm]
	Q _s [m ³ /s]				
24.3.2004, 21:00 Uhr	8,844	13,20	70	44,85	20,04 < 75,00 →TROCKEN

Die genannte Hochwasserwelle im Frühling 2004 lag geringfügig über der definierten HQ₁-Schwelle von 8,0 m³/s. Im März weisen die Niederschlagssummen an den Messstationen Pleschkogl und Hitzendorf, verglichen mit den langjährigen Niederschlagssummen, leicht erhöhte Werte auf. Dessen ungeachtet kann zum Zeitpunkt des Hochwasserereignisses im März ein extremes Niederschlagsereignis durch die Betrachtung des Gebietsniederschlags oder anhand der einzeln detektierten Niederschlagshöhen an den Messstationen nicht abgeleitet werden. Da es sich bei diesem Hochwasserereignis jedoch um das einzige handelt, welches im Frühling auftrat (siehe Kapitel 4.1.2.1, Seite 4.30), weist dies auf den Einfluss der Schneeschmelze hin.

6.3 SCHLUSSFOLGERUNG

Anhand der gezeigten Darstellungen der Ereignisse an den Pegeln Voitsberg, Hitzendorf und Lieboch ist erkennbar, dass eine allgemeine Analyse der Hochwasserereignisse keinen eindeutigen Zusammenhang mit den Niederschlagsereignissen zeigt. Universelle Auswertungen bringen demnach keine zufriedenstellenden Ergebnisse mit sich. Aufgrund von Besonderheiten einzelner Ereignisse in vielerlei Hinsicht ist demzufolge auch keine einheitliche, die Ergebnisse der drei Pegel zusammenfassende Interpretation möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurde schrittweise versucht, jenes anfänglich aufgezeigte Ziel zu erreichen und es hinsichtlich der Prognosen zu erwartender Hochwasserspitzen auch erfüllen zu können. Demgemäß wurden die Ereignisse in zwei verschiedenen Klassen, einerseits anhand der Niederschlagsdauer und andererseits anhand der Vorregensituation, geteilt. Spezifische Kennwerte jeder Hochwasserwelle und jedes Hochwasser- bzw. Niederschlagsereignisses wurden einander gegenübergestellt. Durch verschiedene, farblich den Klassen zugeordnete Ereignisabbildungen konnten diese Gegenüberstellungen graphisch dargestellt werden. Jede einzelne Hochwasserwelle wurde hinsichtlich hochwasserspezifischer Merkmale eingehend betrachtet und der jeweils zugehörige effektive Niederschlag mit besonderer Sorgfalt abgegrenzt. Die Verteilung der Ereignisse am Pegel Lieboch lehnt sich sehr stark an die theoretisch zu erwartende Ereignisverteilung. An diesem Pegel wäre es demzufolge grundsätzlich möglich, Bereiche anhand der Vorbedingungen abzugrenzen und in den Diagrammen graphisch darzustellen (gemäß Abb. 6.3). Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen wurde aber keine Abgrenzung der Bereichswolken vorgenommen. Da eine allgemein sehr geringe Anzahl von Ereignissen, vor allem der Vorregensituation der Klasse *trocken*, vorliegt, wären solche Abgrenzungen sehr gewagt. In jene Gruppe *trocken* fallen lediglich zwei Hochwasserereignisse je Pegel. Dies ist eindeutig zu wenig, um eine Bereichsmenge mit aufgezeigten Grenzen

definieren zu können. Wissenschaftlich wäre solch eine Bereichsabgrenzung nur schwer nachvollziehbar. Auch spielt die individuelle Vorgehensweise beim Einzeichnen der Bereichswolken eine wichtige Rolle. Es sei auch erwähnt, dass nur am Pegel Lieboch solch eine passende Verteilung der Ereignisse vorliegt. Vor allem am Pegel Hitzendorf wäre eine Abgrenzung der Ereignisse anhand der Vorbedingungen nicht möglich oder diffizil da Abweichungen einzelner Ereignisse, verglichen mit der theoretisch zu erwartenden Ereignisverteilung, vorliegen. Dieser Aspekt könnte auf die Größe des Pegeleinzugsgebietes zurückzuführen sein. Im flächenmäßig größten Pegeleinzugsgebiet Lieboch befinden sich mehr Niederschlagsmessstationen als in Voitsberg oder Hitzendorf und die Ergebnisse der Ereignisverteilung weisen nur wenige Abweichungen zur erwarteten Verteilung auf. Mit der steigenden Anzahl an Messstationen erhöht sich der Datenumfang und eine Qualitätsverbesserung der daraus resultierenden Gebietsniederschlagsberechnungen sollte das Ergebnis sein. In Zukunft wäre es eine Möglichkeit, durch die Verwendung von Niederschlags- und Abflussaufzeichnungen höherer Auflösungen oder durch den Einsatz diverser Modellsoftware bessere Ergebnisse zu erzielen. Durch Modifikation des betrachteten Versuchsgebietes, aber auch durch Variieren des gewählten Zeitraumes, könnten Verbesserungen der Ergebnisdarstellung erreicht werden. In dieser Arbeit wurden alle Hochwasserereignisse, welche im Zeitraum von 2000 - 2010 auftraten, selektiert und analysiert. Vergrößerte man diesen Zeitraum von zehn auf zum Beispiel 20 Jahre, so erhöhte sich die Anzahl der Hochwasserereignisse. Dies bedeutete vermutlich aufgrund höherer Ereignisanzahlen je Pegeleinzugsgebiet eine Erleichterung der Bereichsabgrenzung. Allerdings ist die Wahl des Zeitraumes vom Bestand aller betrachteten hydrologischen Daten abhängig. Da zeitlich weiter in die Vergangenheit reichende Niederschlagsaufzeichnungen nur an vereinzelt Messstationen vorliegen, verringert sich dadurch im Gegenzug die Anzahl der zu betrachtenden Niederschlagsmessstationen.

Auf Basis der vorliegenden Ereignisverteilungen wurden wie erwähnt, keine Bereichswolken eingezeichnet. Eine exakte Unterteilung anhand der Vorregensituationen wäre zu ungenau. Um dennoch mögliche Hochwasserwellen aufgrund des effektiven Niederschlags prognostizieren zu können, wurde eine Hüllkurve des Niederschlags in Form einer linear-inhomogenen Geraden definiert. Diese Gerade ersetzt eine Bereichseinteilung jeder Klasse und wurde an die Verteilung der Ereignisse angepasst. Ausgehend von einer linearen Trendlinie der Ereignisverteilung wurde die Hüllkurve mit derselben Funktionsgleichung, nur um einen positiven Abstand d nach oben verschoben, gezeichnet. Sie gibt eine Obergrenze des theoretisch maximal fallenden Niederschlags an, welcher ein Hochwasserereignis auslöst. Abb. 6.8 zeigt beispielhaft die Ereignisverteilung am Pegel Lieboch einschließlich der Darstellung einer linearen Trendlinie (in grau dargestellt) sowie der Funktion der Hüllkurve (in schwarz eingezeichnet). Die mathematische Gleichung dieser linearen Hüllkurve ist ebenfalls in der Abbildungen der Ereignisverteilungen dargestellt.

Anhand der Verteilung der Ereignisse im Pegeleinzugsgebiet Voitsberg ist es ebenso möglich, eine theoretische Obergrenze des Niederschlags in Form einer Geraden zu definieren. Die vorliegende Ereignisverteilung am Pegel Hitzendorf lassen eine Definition einer Obergrenze aber nicht zu.

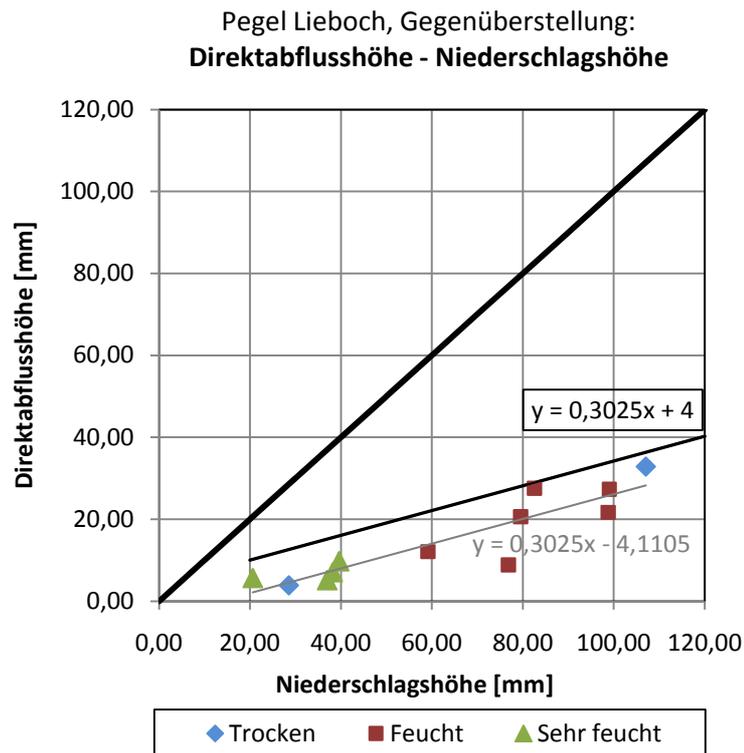


Abb. 6.8: Darstellung einer Hüllkurve des effektiven Niederschlags, Ereignisverteilung am Pegel Lieboch

Schlussendlich sei erwähnt, dass vor allem in naturwissenschaftlichen Fachbereichen wie es die Hydrologie ist, generelle Betrachtungsweisen sowie allgemeingültige Interpretationen auf die Gesamtheit sehr schwierig sind. Die Hydrologie ist jene Wissenschaft, die sich mit dem Wasser, seinen Erscheinungsformen und seinem Verhalten auf, unter und über der Erdoberfläche befasst (OENORM B 2400, 2004). Dieser Fachbereich beinhaltet sehr komplexe Themen und seine Aufgabe besteht häufig darin, Naturkenngößen wie den Abfluss exakt zu erfassen. Trotz hochtechnischer Geräte gelingt es nicht, Messfehler und Ungenauigkeiten völlig zu vermeiden und korrekte hydrologische Daten zu liefern. Naturvorgänge wie die Abflussbildung, sind für uns Menschen bis heute noch schwer nachvollziehbar oder modellierbar. Nur durch eine genaue und vor allem separate Betrachtung der vorhandenen Daten und durch Berechnung hochwasserspezifischer Kennwerte ist eine Charakterisierung von hydrologischen Ereignissen möglich. In Zukunft wird in der Hydrologie dem Verständnis der Prozesse in der Abflussbildung verstärkt Bedeutung zukommen. Vereinfachte Ansätze, wie in dieser Arbeit gewählt, werden aber in operationellen Warnsystemen weiterhin ihre Anwendung finden.

LITERATURVERZEICHNIS

Dyck, Siegfried und Peschke, Gerd. 1995. *Grundlagen der Hydrologie*. Berlin : Verlag für Bauwesen - Berlin, 1995.

Haas, Gregor. 2005. Diplomarbeit. *Vergleich und Kalibration von unterschiedlichen Durchflussmethoden*. Graz : TU Graz Verlag, 2005.

Hölting, Bernward und Coldewey, Wilhelm Georg. 2009. *Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2009.

Hydrographischer Dienst in Österreich. 1961. *Flächenverzeichnis der österreichischen Flußgebiete - Murgebiet*. Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1961.

—. **2009.** *Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2006*. Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 2009. Bd. 114.

INARMA. 2010. The INARMA Project. *INtegrated Approach to Flood Risk Management*. [Online] 2010. <http://www.inarma.eu/>.

Kreps, Harald. 1975. *Praktische Arbeit in der Hydrographie . 25 Jahre im Dienste der Hydrographischen Landesabteilung Steiermark*. Wien : Hydrographisches Zentralbüro, 1975.

Mangelsdorf, Joachim und Scheurmann, Karl. 1980. *Flussmorphologie - Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. München : Wien: Oldenbourg, 1980.

Maniak, Ulrich. 1997. *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*. Berlin Heidelberg : Springer - Verlag, 1997.

Merz, Bruno. 2006. *Hochwasserrisiken, Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung*. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), 2006.

OENORM B 2400. 2004. *Hydrologie - Hydrographische Fachausdrücke und Zeichen. Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772 und ÖNORM EN ISO 772/A1*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2004.

Richtig, Guido. 1995. Dissertation. *Untersuchungen zur Abflusentstehung bei Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten*. Graz : TU Graz Verlag, 1995.

Sackl, Bernhard. 1987. Dissertation. *Ermittlung von Hochwasser-Bemessungsganglinien in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten*. Graz : TU Verlag Graz, 1987.

Schatzl, Robert. 2002. Dissertation. *Skalenabhängiger Vergleich zwischen Wetterdaten und Niederschlagsmessungen*. Graz : TU Graz Verlag, 2002.

Schönberger, Kornelia. 2010. Diplomarbeit. *Hochwassergefährdete Gebiete an der Kainach und an der Sulm*. Graz : TU Graz Verlag, 2010.

Schröder, Wolfgang. 1999. *Grundlagen des Wasserbaus: Hydrologie, Hydraulik, Wasserrecht*. Düsseldorf : Werner Verlag, 1999.

Steiermärkische Landesregierung. Digitaler Atlas Steiermark 3.0. [Online] <http://www.gis.steiermark.at/cms/ziel/73679/DE/>.

—. www.steiermark.at. *Verwaltung Land Steiermark*. [Online] [Zitat vom: Sonntag, 20. Feb. 2011.] <http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/ziel/97821/DE/>].

Strobl, Theodor und Zunic, Franz. 2006. *Wasserbau - Aktuelle Grundlagen*. München : Springer, 2006.

Vasvári, Vilmos, Hochedlinger, Martin und Sprung, Werner. 2005. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 83. *Erfahrung mit der Kalibrierung von Wippengeräten am Beispiel des Grazer Versuchsgebietes*. Wien : Lebensministerium.at, 2005.

VDEW, Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke. 1992. Begriffsbestimmungen in der Energiewirtschaft, Teil 3: Wasserkraft. Frankfurt/ Main : VDEW-Verlag, 1992.

Wakonigg, Herwig. Klimaatlas Steiermark - Kapitel 4: Niederschlag. s.l. : ZAMG. Version 2.0.

ZAMG. www.umwelt.steiermark.at. *Klimaatlas Steiermark - Kapitel 4: Niederschlag*. [Online] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. [Zitat vom: Freitag, 4. Februar 2011.] http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10741599_16178332/56180d1d/4_NIEDERSCHLAG%20-%20Vers_2.0_.pdf.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1 Schematische Darstellung zur Entstehung advektiver Niederschläge	2.5
Abb. 2.2 Schematische Darstellung zur Entstehung konvektiver Niederschläge.....	2.5
Abb. 2.3: Modell eines Niederschlagsmessers nach Hellmann	2.8
Abb. 2.4: Regenschreiber mit Schwimmer.....	2.9
Abb. 2.5: Bestimmung des Gebietsniederschlags für das Oker/ Allergebiet in Deutschland	2.11
Abb. 2.6: Querschnitt durch ein Einzugsgebietes mit ober- und unterirdischen Wasserscheiden.....	2.12
Abb. 2.7: Schematische Darstellung eines Hochwasserereignisses	2.13
Abb. 2.8: Häufigkeits-, Gang- und Dauerlinie des Abflusses Q in Abhängigkeit von der Zeit	2.15
Abb. 2.9: Abflussganglinie aus der Software HyDams.....	2.15
Abb. 2.10: Graphische Auswertung einer Abflussmessung mit Geschwindigkeits- und Abflussflächen	2.16
Abb. 3.1: Darstellung der Einzugsgebiete.....	3.20
Abb. 3.2: Durchschnittliche Zahl der Tage mit Niederschlag $\geq 1,0$ mm	3.23
Abb. 3.3: Durchschnittliche Niederschlagssummen In Jahr	3.24
Abb. 3.4: Ausgewählte Abflusspegel im Versuchsgebiet	3.27
Abb. 3.5: Pegeleinzugsgebiete und Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet.....	3.28
Abb. 4.1: Anzahl der Hochwasserereignisse 2000 - 2010 nach monatlicher Reihenfolge.....	4.31
Abb. 4.2: Beispiel eines Hochwasserereignisses am Pegel Voitsberg.....	4.33
Abb. 4.3 und Abb. 4.4: Hochwasserereignis am Pegel Voitsberg	4.34
Abb. 4.5: Darstellung des Gebietsniederschlags für ein Hochwasserereignis am Pegel Lieboch	4.36
Abb. 4.7: Thiessen-Polygone mit Gewichtung der Pegeleinzugsgebiete	4.37
Abb. 4.6: Thiessen-Polygone zur Berechnung des Gebietsniederschlags.....	4.37
Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Abtrennung des effektiven Niederschlags	5.41
Abb. 5.2: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer – Pegel Lieboch	5.42
Abb. 6.1: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch.....	6.44
Abb. 6.2: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch.....	6.45
Abb. 6.3: Darstellung einer theoretisch zu erwartenden Ereignisverteilung	6.45
Abb. 6.4: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Niederschlagsdauer, Pegel Lieboch	6.49
Abb. 6.5: Gegenüberstellung Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Niederschlagsdauer, Pegel Lieboch	6.49
Abb. 6.6: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Voitsberg	6.51
Abb. 6.7: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Hitzendorf	6.52
Abb. 6.8: Darstellung einer Hüllkurve des effektiven Niederschlags, Ereignisverteilung am Pegel Lieboch	6.55

TABELLENVERZEICHNIS

Tab.: 2.1: Kennwerte eines Niederschlagsereignisses	2.10
Tab.: 2.2: Verschiedene Wasserführungen eines Fließgewässers	2.14
Tab.: 2.3: Künstliche und natürliche Ursachen von Hochwasserereignissen	2.18
Tab.: 3.1: Landnutzung im Einzugsgebiet Lieboch	3.21
Tab.: 3.2: Einzugsgebiet der Kainach.....	3.22
Tab.: 3.3: Niederschlagsmessstationen- Beobachter.....	3.25
Tab.: 3.4: Niederschlagsmessstationen- Schreiber	3.25
Tab.: 3.5: Ausgewählte Pegel im Einzugsgebiet der Kainach.....	3.26
Tab.: 4.1: Ausgewählter Zeitreihen-Export von Niederschlagsereignissen	4.29
Tab.: 4.2: Niederschlagsschreiber späterem Aufzeichnungsbeginn als 1.1.2000	4.30
Tab.: 4.3: HQ ₁ -Schwellen der drei Abflusspegel.....	4.32
Tab.: 4.4: Berechnung des Gebietsniederschlags	4.38
Tab.: 4.5: Gewichtung der Flächenanteile, Berechnung des Gebietsniederschlags..	4.39
Tab.: 5.1: Grenzen der Klasseneinteilung anhand der Vorregensituation	5.42
Tab.: 6.1: Wichtigste Parameter für die weiterfolgende Auswertung.....	6.43
Tab.: 6.2: Ausreißer-Ereignis am Pegel Lieboch	6.46
Tab.: 6.3: Auflistung der monatlichen Niederschlagssummen der Jahre 2005/2006 sowie der langjährigen Monatsmittelwerten	6.47
Tab.: 6.4: Betrachtung der registrierten Niederschlagshöhen zum Zeitpunkt des Hochwassers am 29.6.2006, Pegel Lieboch.....	6.48
Tab.: 6.5: Ausreißer-Ereignisse am Pegel Voitsberg	6.50
Tab.: 6.6: Ausreißer-Ereignis am Pegel Hitzendorf.....	6.53

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1: Auflistung aller hydrologischen Ereignisse nach jährlicher Reihenfolge.....	VII
Anlage 2: Fortsetzung - Auflistung aller hydraulischen Ereignisse nach jährlicher Reihenfolge.....	VIII
Anlage 3: Verteilung der Hochwasserereignisse	IX
Anlage 4: Anzahl der Hochwasserereignisse im Zeitraum 2000 – 2010	IX
Anlage 5: Anzahl der Hochwasserereignisse pro Pegel	IX
Anlage 6: Anzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2000 - 2010	X
Anlage 7: Anzahl der Hochwasserereignisse in den einzelnen Monaten	X
Anlage 8: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegeleinzugsgebiets Voitsberg	XI
Anlage 9: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegeleinzugsgebiet Voitsberg	XI
Anlage 10: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegeleinzugsgebiets Hitzendorf	XII
Anlage 11: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegeleinzugsgebiet Hitzendorf	XII
Anlage 12: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegeleinzugsgebiets Lieboch	XIII
Anlage 13: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegeleinzugsgebiet Lieboch	XIII
Anlage 14: Hochwasserereignisse am Pegel Voitsberg – kategorisiert anhand den Vorregensituation	XIV
Anlage 15: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Voitsberg	XIV
Anlage 16: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer Hüllkurve, Pegel Voitsberg	XV
Anlage 17: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer – Pegel Voitsberg	XV
Anlage 18: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Voitsberg	XVI
Anlage 19: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Voitsberg	XVI
Anlage 20: Hochwasserereignisse am Pegel Hitzendorf – kategorisiert anhand der Vorregensituation	XVII
Anlage 21: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Hitzendorf	XVII
Anlage 22: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer linearen Trendlinie, Pegel Hitzendorf	XVIII
Anlage 23: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer – Pegel Hitzendorf	XVIII
Anlage 24: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Hitzendorf	XIX
Anlage 25: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Hitzendorf	XIX

Anlage 26: Hochwasserereignisse am Pegel Lieboch – kategorisiert anhand der Vorregensituation	XX
Anlage 27: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch	XX
Anlage 28: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer Hüllkurve, Pegel Lieboch	XXI
Anlage 29: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer - Pegel Lieboch	XXI
Anlage 30: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Lieboch	XXII
Anlage 31: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Lieboch	XXII

ANLAGEN

Jahr	Anzahl der HVV-Ereignisse	Anzahl der NS-Ereignisse	Pegel	Ts	Qa [m³/s]	Qp [m³/s]	Vmax [m³]	Vmax [m³]	Vmin [m³]	Vhr [m³]	Vhr [m³]	Vh [m³]	Direktabflusshöhe [mm]	Beginn der Hochwasserstelle To	Ende der Hochwasserstelle Te	Anstiegszeit t [h]	Einzugsgebiet [km²]	Beginn der Niederschlagsaufsummlung (nach ta)	Gewählter Zeitraum der Niederschlagsaufsummlung	Niederschlagsdauer [h]	Niederschlagshöhe [mm]	Anmerkung	21 Tage Vorregen [mm]
2000	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	1	1	Vörsberg	20.07.2001	53,99	51,14	929,325	148,016	86,793	694,516	3,30	20.07.2001 08:30	23.07.2001 06:21	01:15	210,500	20.07.2001 07:15	20.07.2001 05:00 - 21.07.05:00	25	43,98	50,20		50,20	
2002	5	3	Vörsberg	16.07.2002	40,62	32,75	802,540	188,561	69,213	545,767	2,59	16.07.2002 05:48	17.07.2002 02:00	02:56	210,500	16.07.2002 02:52	16.07.2002 01:00 - 14:00	14	46,46	94,78		94,78	
			Vörsberg	12.08.2002	56,67	50,48	6,529,676	1,647,808	520,072	4,161,856	19,777	11,08.2002 09:52	15.08.2002 09:11	01:22	210,500	10.08.2002 08:30	11.08.2002 02:00 - 13.08.2002 06:00	53	79,13	98,78		98,78	
			Lieboch	12.08.2002	106,07	92,25	11,066,688	3,350,902	895,872	6,851,914	8,86	11.08.2002 12:57	14.08.2002 19:21	00:29	773,237	10.08.2002 12:28	11.08.2002 00:00 - 13.08.2002 06:00	55	76,82	87,91		87,91	
			Hitzendorf	05.12.2002	14,54	12,73	2,519,313	547,333	219,088	1,752,881	35,06	04.12.2002 08:27	08.12.2002 19:05	11:32	50,000	02.12.2002 20:55	02.12.2002 15:00 - 08.12.2002 02:00	131	99,00	38,56		38,56	
			Lieboch	05.12.2002	145,01	132,41	36,746,620	8,186,118	3,163,514	25,396,988	32,85	04.12.2002 11:36	12.12.2002 23:38	00:29	773,237	03.12.2002 11:07	02.12.2002 16:00 - 08.12.2002 01:00	130	107,06	36,70		36,70	
2003	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2004	4	3	Hitzendorf	24.03.2004	8,84	7,89	1,012,145	269,766	82,241	660,138	13,20	23.03.2004 05:45	27.03.2004 07:32	15:15	50,000	21.03.2004 14:30	22.03.2004 00:00 - 24.3.2004 21:00	70	44,85	20,04		20,04	
			Hitzendorf	20.06.2004	9,94	7,55	442,301	178,434	29,305	234,561	4,69	20.06.2004 12:50	21.06.2004 10:49	04:10	50,000	20.06.2004 08:40	20.06.2004 05:00 - 20:00	15	37,38	108,89		108,89	
			Lieboch	20.06.2004	143,01	126,28	29,202,068	10,350,300	2,092,844	16,758,924	21,67	20.06.2004 08:15	27.06.2004 15:55	09:45	773,237	19.06.2004 22:30	19.06.2004 22:00 - 26.06.2004 05:00	152	98,77	110,18		110,18	
			Lieboch	06.07.2004	136,90	113,46	9,640,938	4,698,814	547,413	4,394,770	5,68	06.07.2004 15:02	08.07.2004 23:38	103:57	773,237	06.07.2004 11:05	06.07.2004 07:00 - 07.07.2004 06:00	30	20,64	169,36		169,36	
2005	5	5	Hitzendorf	26.07.2005	63,01	59,60	565,143	23,813	60,114	481,215	9,62	26.07.2005 17:18	26.07.2005 22:09	01:27	50,000	26.07.2005 15:51	26.07.2005 16:00 - 17:00	2	28,87	134,85		134,85	
			Hitzendorf	21.08.2005	61,56	54,81	1,930,334	236,517	188,201	1,505,615	30,11	21.08.2005 09:00	22.08.2005 01:31	07:15	50,000	21.08.2005 01:45	21.08.2005 01:00 - 16:00	16	96,97	105,29		105,29	
			Lieboch	21.08.2005	225,14	202,58	30,306,474	6,530,355	2,641,469	21,134,650	27,33	21.08.2005 06:44	25.08.2005 00:24	12:46	773,237	20.08.2005 17:58	20.08.2005 18:00 - 22.08.2005 19:00	50	99,02	111,66		111,66	
			Vörsberg	22.08.2005	86,20	74,29	11,220,015	3,043,591	908,421	7,268,003	34,53	21.08.2005 09:38	24.08.2005 20:20	22:51	210,500	20.08.2005 10:47	20.08.2005 16:00 - 22.08.2005 16:00	49	107,41	109,15		109,15	
			Vörsberg	26.08.2005	53,27	43,40	7,468,015	3,687,443	419,872	3,360,701	15,97	26.08.2005 11:30	30.08.2005 20:39	06:30	210,500	26.08.2005 05:00	26.08.2005 05:00 - 18:00	10	36,09	185,45		185,45	
			Hitzendorf	26.08.2005	9,57	8,67	756,777	211,205	60,585	484,937	9,70	26.08.2005 13:58	29.08.2005 10:27	05:47	50,000	26.08.2005 08:11	26.08.2005 09:00 - 20:00	12	29,39	170,09		170,09	
			Lieboch	26.08.2005	122,58	100,06	15,209,149	6,698,311	944,615	7,566,223	9,79	26.08.2005 09:32	29.08.2005 23:12	11:13	773,237	25.08.2005 22:19	26.08.2005 09:00 - 27.08.2005 15:00	31	39,62	187,76		187,76	
			Vörsberg	05.10.2005	74,62	67,82	13,705,240	2,988,350	1,190,742	9,526,148	14,25	03.10.2005 19:42	09.10.2005 18:37	06:55	210,500	02.10.2005 12:47	03.10.2005 18:00 - 04.10.2005 18:00	34	89,27	118,54		118,54	
			Lieboch	05.10.2005	130,12	112,74	26,881,240	8,924,128	1,995,007	15,962,105	20,64	04.10.2005 07:17	10.10.2005 14:51	21:13	773,237	03.10.2005 10:04	03.10.2005 04:00 - 06.10.2005 06:00	75	79,53	97,71		97,71	
			Vörsberg	29.06.2006	31,09	27,60	1,353,979	538,448	90,589	724,942	3,44	28.06.2006 07:15	01.07.2006 02:40	01:45	210,500	28.06.2006 05:30	29.06.2006 02:00 - 30.06.2006 01:00	24	32,86	58,51		58,51	
Lieboch	29.06.2006	128,01	109,17	5,919,466	2,526,690	376,346	3,016,430	3,90	29.06.2006 08:10	30.06.2006 23:20	03:04	773,237	29.06.2006 06:06	29.06.2006 03:00 - 30.06.2006 02:00	24	28,59	54,99		54,99				
2007	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2008	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Anlage 1: Auflistung aller hydrologischen Ereignisse nach jährlicher Reihenfolge

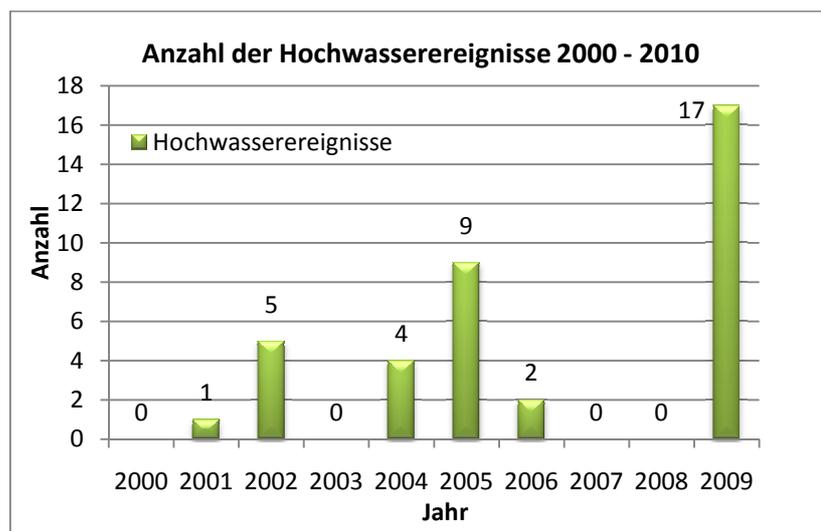
Jahr	Anzahl der HV-	Anzahl der NS-	Ereignisse	Pegel	Ts	Qs [m³/s]	Qo [m³/s]	Vges [m³]	Vab [m³]	Ver [m³]	Vb [m³]	Direktabflusshöhe [mm]	Beginn der Hochwasserwelle [t]	Ende der Hochwasserwelle [t]	Anstiegszeit t [h]	Einzugsgebiet [km²]	Beginn der Niederschlagsaufsummierung (nach ta)	Gewährer Zeitraum der Niederschlagsaufsummierung	Niederschlagsdauer [h]	Niederschlagshöhe [mm]	Anmerkung	Vorregen [mm]
2009				Hizenndorf	24.06.2009	8,91	7,01	418.178	190.130	25.336	202.712	4,05	24.06.2009 02:48	25.06.2009 07:55	05:41	50.000	23.06.2009 21:07	23.06.2009 21:00 - 25.06.2009 04:00	32	19,14		98,41
				Hizenndorf	30.06.2009	8,48	6,88	166.303	71.517	10.329	84.256	1,69	30.06.2009 12:21	30.06.2009 23:50	01:38	50.000	30.06.2009 10:43	30.06.2009 07:00 - 01.07.2009 03:00	18	8,17		164,32
				Hizenndorf	03.07.2009	33,48	31,18	308.335	59.053	27.685	221.597	4,43	03.07.2009 13:18	03.07.2009 21:46	01:41	50.000	03.07.2009 11:37	03.07.2009 07:00 - 21:00	10	7,40		197,11
				Hizenndorf	15.07.2009	9,97	8,96	240.190	62.577	19.732	157.882	3,16	15.07.2009 20:40	16.07.2009 15:25	02:49	50.000	15.07.2009 17:51	15.07.2009 18:00 - 21:00	4	34,04		141,70
				Vaisberg	18.07.2009	64,57	60,19	3.141.720	1.106.597	226.079	1.809.043	6,59	18.07.2009 09:10	21.07.2009 08:07	02:08	210.500	18.07.2009 07:02	18.07.2009 08:00 - 12:00	5	39,23		123,71
				Hizenndorf	18.07.2009	59,10	54,37	1.211.388	131.484	119.974	959.940	19,20	18.07.2009 10:15	18.07.2009 23:42	05:29	50.000	18.07.2009 04:46	18.07.2009 08:00 - 13:00	6	56,57		132,28
				Lieboch	18.07.2009	213,89	186,01	8.154.692	1.948.025	689.588	5.517.079	7,14	18.07.2009 10:56	19.07.2009 08:18	04:49	773.237	18.07.2009 06:07	18.07.2009 08:00 - 16:00	6	38,25		128,82
				Hizenndorf	30.07.2009	30,36	28,53	547.961	87.655	51.145	409.161	8,18	30.07.2009 17:50	31.07.2009 10:17	03:20	50.000	30.07.2009 14:30	30.07.2009 15:00 - 21:00	16	36,99		113,42
			11	Hizenndorf	04.08.2009	12,95	11,95	1.190.086	177.610	112.494	859.982	18,00	03.08.2009 19:52	06.08.2009 03:45	06:47	50.000	03.08.2009 14:05	03.08.2009 17:00 - 04.08.2009 18:00	26	65,11		147,82
				Lieboch	04.08.2009	107,47	92,66	16.221.016	5.700.588	1.167.760	9.352.668	12,10	03.08.2009 21:03	08.08.2009 14:59	18:11	773.237	03.08.2009 02:52	03.08.2009 07:00 - 04.08.2009 18:00	36	99,12		163,84
				Vaisberg	08.08.2009	30,76	24,28	1.003.389	564.285	48.781	390.323	1,85	08.08.2009 20:18	09.08.2009 20:43	01:24	210.500	08.08.2009 18:54	08.08.2009 16:00 - 09.08.2009 07:00	16	19,35		130,92
				Vaisberg	22.08.2009	47,43	41,07	2.592.335	935.264	179.666	1.437.405	6,83	22.08.2009 16:06	24.08.2009 09:23	10:05	210.500	22.08.2009 15:01	22.08.2009 13:00 - 20:00	8	51,47		107,53
				Lieboch	22.08.2009	152,58	135,56	7.585.670	3.081.491	499.194	4.004.984	5,18	22.08.2009 18:48	24.08.2009 21:53	02:26	773.237	22.08.2009 16:22	22.08.2009 13:00 - 23:00	11	37,01		127,05
				Vaisberg	29.08.2009	33,78	28,98	2.497.268	1.374.789	124.691	997.788	4,74	29.08.2009 01:13	01.09.2009 09:20	02:13	210.500	28.08.2009 23:00	28.08.2009 22:00 - 29.08.2009 16:00	19	28,85		109,45
				Vaisberg	04.09.2009	101,54	93,26	10.533.987	2.752.070	864.302	6.917.616	32,86	04.09.2009 09:07	08.09.2009 11:30	10:19	210.500	03.09.2009 22:48	04.09.2009 00:00 - 05.09.2009 04:00	29	89,36		89,32
				Hizenndorf	04.09.2009	32,28	30,50	1.773.172	199.110	179.212	1.434.850	28,70	04.09.2009 09:48	06.09.2009 01:35	10:37	50.000	03.09.2009 23:11	04.09.2009 00:00 - 05.09.2009 05:00	22	83,51		79,62
				Lieboch	04.09.2009	231,18	211,46	32.909.932	8.926.841	2.684.190	21.318.901	27,57	04.09.2009 09:39	09.09.2009 22:55	13:21	773.237	03.09.2009 20:18	04.09.2009 00:00 - 05.09.2009 06:00	31	82,58		77,71

Anlage 2: Fortsetzung - Auflistung aller hydraulischen Ereignisse nach jährlicher Reihenfolge

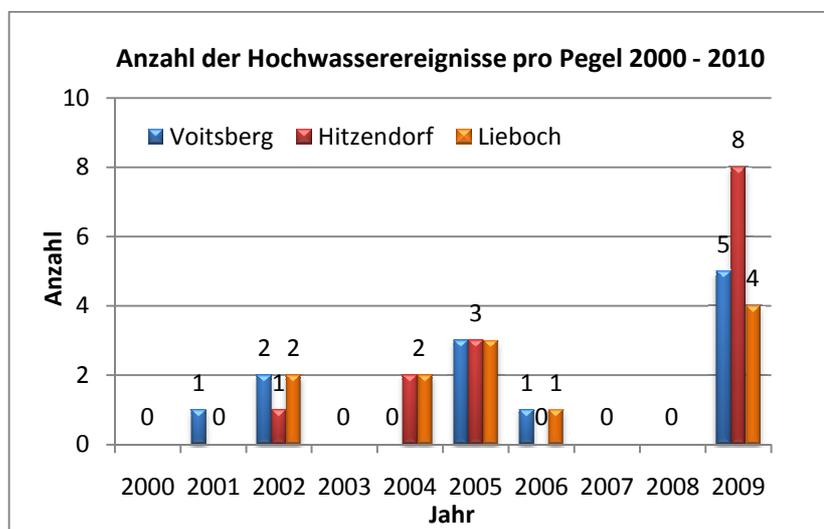
Verteilung der hydrologischen Ereignisse

Hochwasserereignisse		Niederschlags-Ereignisse	Aufteilung der Hochwasserereignisse in Pegelinzugsgebiete			Hochwasserereignisse pro Monat	
Jahr	Anzahl		Anzahl	Voitsberg	Hitzendorf	Lieboch	Jan.
2000	0	0	0	0	0	0	0
2001	1	1	1	0	0	0	0
2002	5	3	2	1	2	0	0
2003	0	0	0	0	0	6	0
2004	4	3	0	2	2	10	0
2005	9	5	3	3	3	15	0
2006	2	3	1	0	1	3	0
2007	0	0	0	0	0	2	0
2008	0	0	0	0	0	0	0
2009	18	11	5	9	4	2	0
Gesamt	39	26	12	15	12	Summe	38

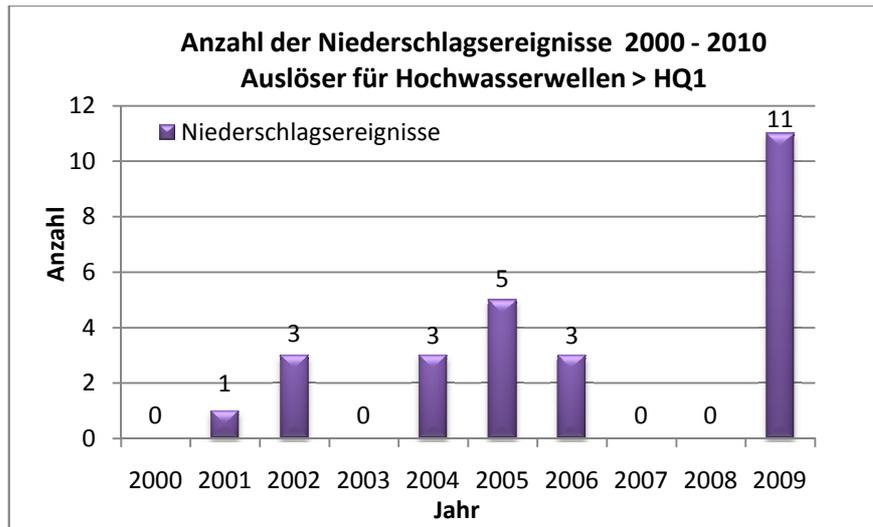
Anlage 3: Verteilung der Hochwasserereignisse



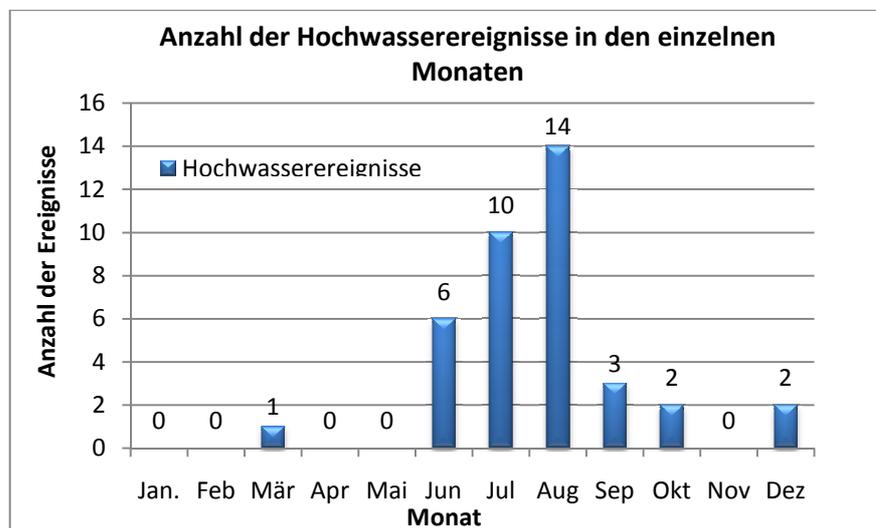
Anlage 4: Anzahl der Hochwasserereignisse im Zeitraum 2000 – 2010



Anlage 5: Anzahl der Hochwasserereignisse pro Pegel



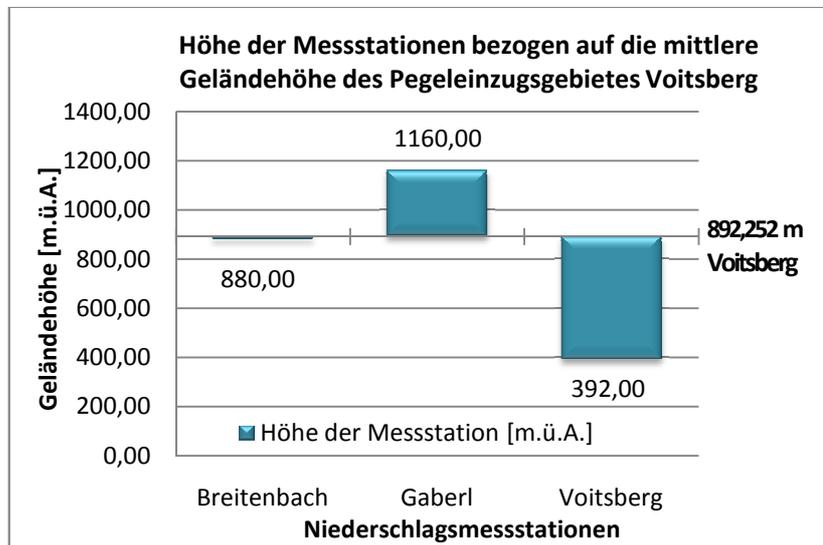
Anlage 6: Anzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2000 - 2010



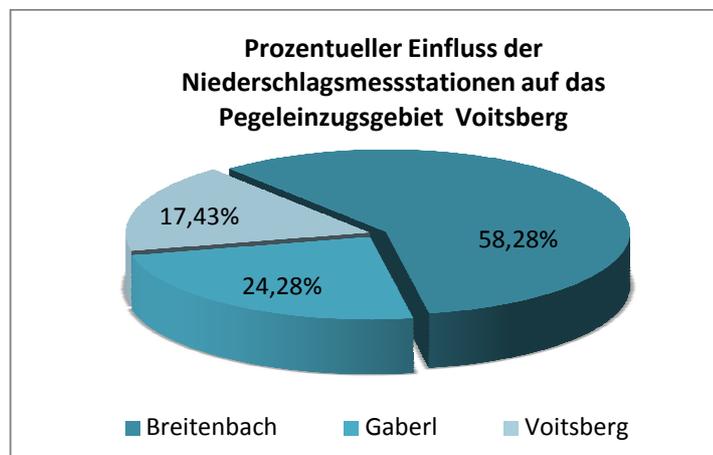
Anlage 7: Anzahl der Hochwasserereignisse in den einzelnen Monaten

Normierung und prozentueller Einfluss der Niederschlagsstationen auf die Pegel einzugsgebiete

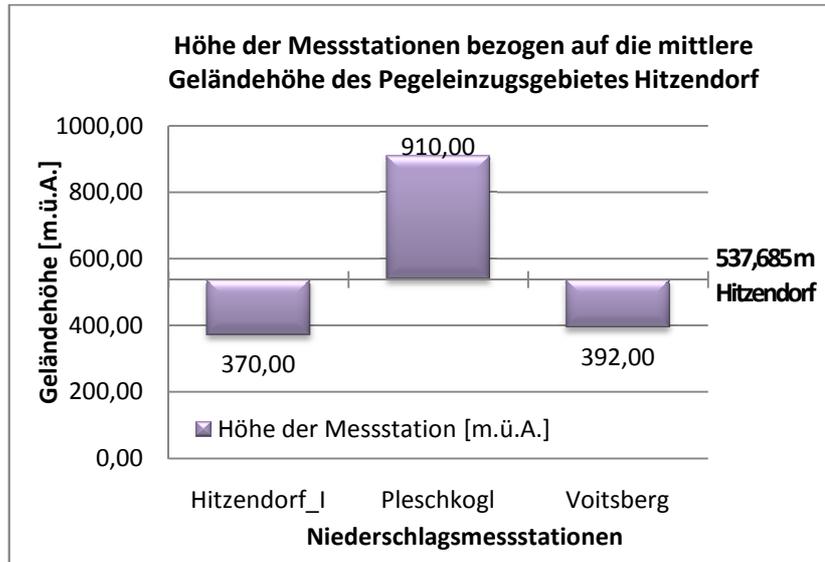
Pegel Voitsberg



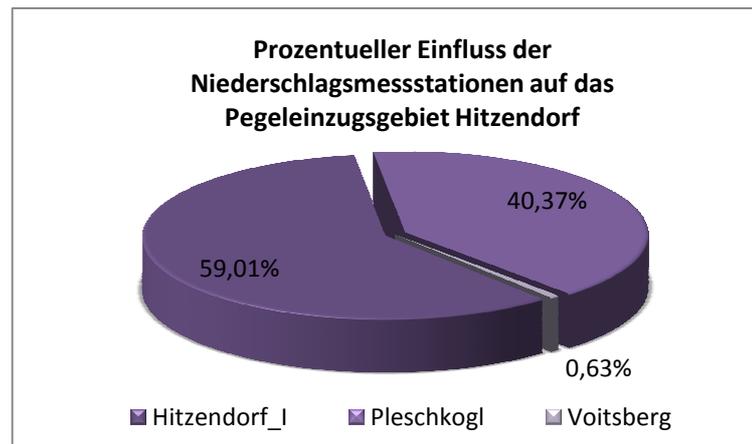
Anlage 8: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegel einzugsgebietes Voitsberg



Anlage 9: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegel einzugsgebiet Voitsberg

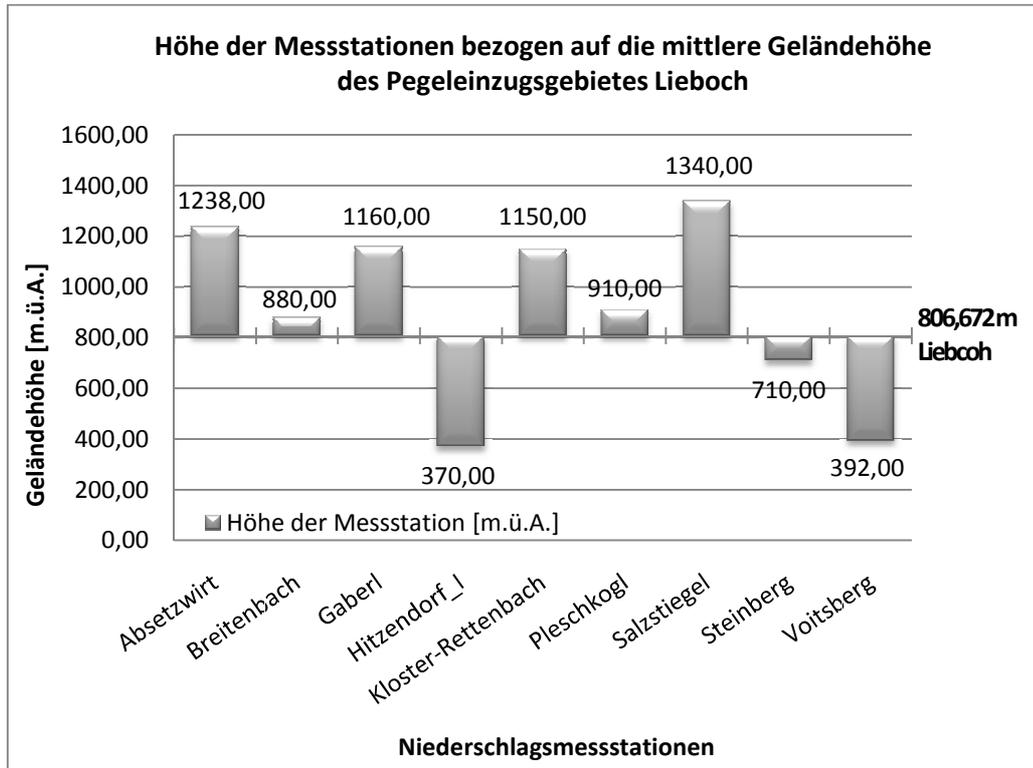
Pegel Hitzendorf

Anlage 10: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegeleinzugsgebietes Hitzendorf

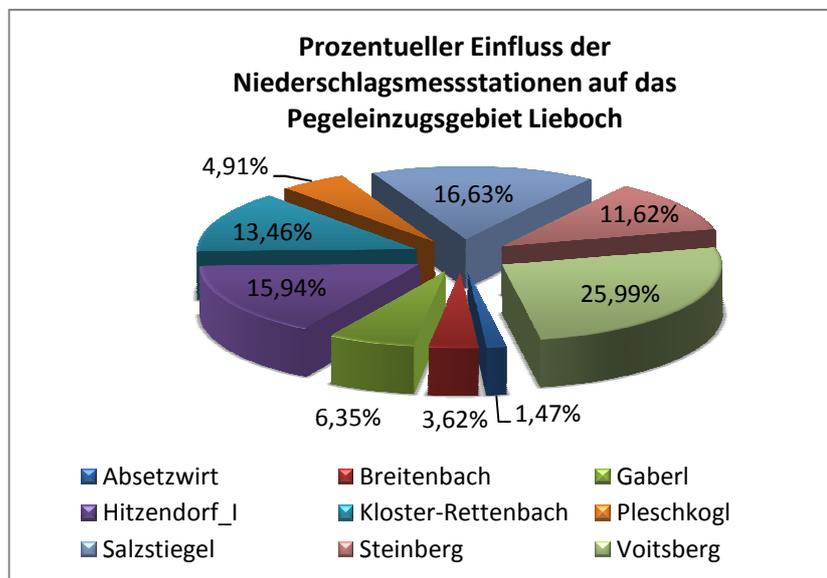


Anlage 11: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegeleinzugsgebiet Hitzendorf

Pegel Lieboch



Anlage 12: Normierung der Seehöhen der Niederschlagsstationen auf die mittlere Geländehöhe des Pegelinzugsgebietes Lieboch



Anlage 13: Prozentueller Einfluss der Niederschlagsmessstationen auf das Pegelinzugsgebiet Lieboch

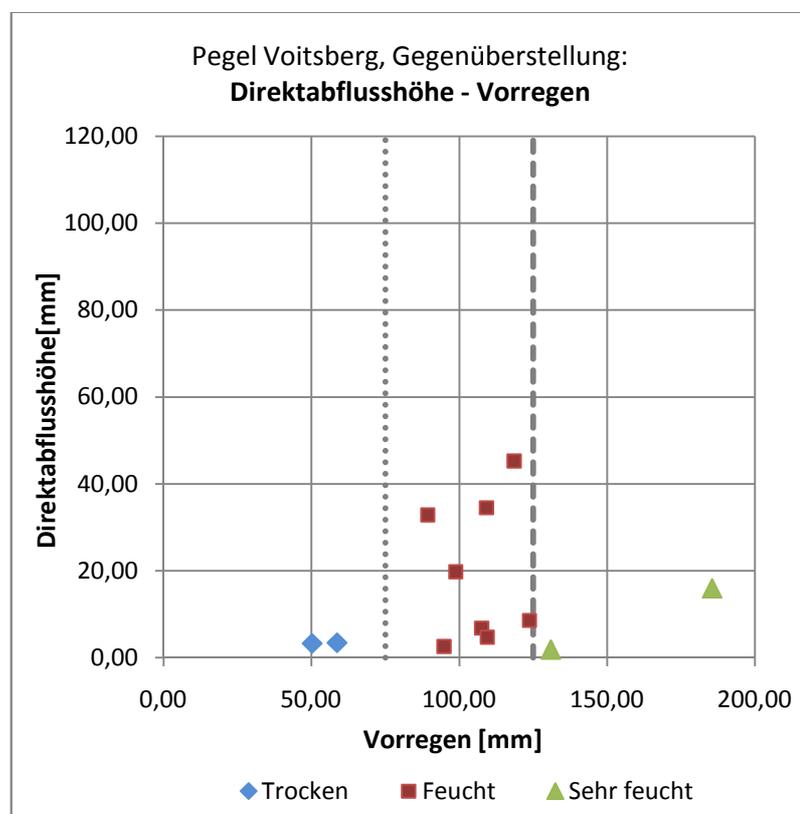
Klassifizierung der hydrologischen Ereignisse

Pegel Voitsberg

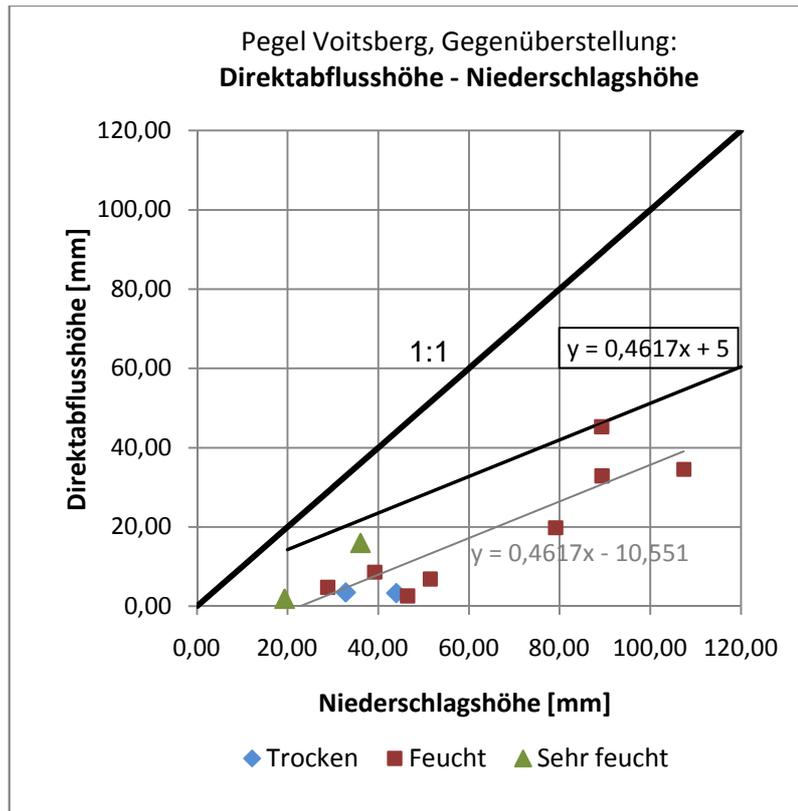
Klasse: Vorregensituation

Pegel	Zeitpunkt des Spitzenabflusses t_s	Direktabflusshöhe [mm]	Niederschlagsdauer [h]	Niederschlagshöhe [mm]	21 Tage Vorregen [mm]
VOITSBERG	Jul.01	3,30	25	43,98	50,20
	Jun.06	3,44	24	32,86	58,61
	Sep.09	32,86	29	89,36	89,32
	Jul.02	2,59	14	46,46	94,78
	Aug.02	19,77	53	79,13	98,78
	Aug.09	6,83	8	51,47	107,53
	Aug.05	34,53	49	107,41	109,15
	Aug.09	4,74	19	28,85	109,45
	Okt.05	45,25	34	89,27	118,54
	Jul.09	8,59	5	39,23	123,71
	Aug.09	1,85	16	19,35	130,92
	Aug.05	15,97	10	36,09	185,45

Anlage 14: Hochwasserereignisse am Pegel Voitsberg - kategorisiert anhand den Vorregensituation



Anlage 15: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Voitsberg

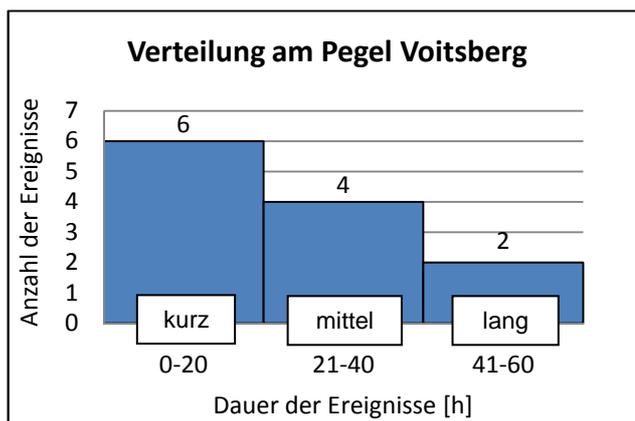


Anlage 16: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer Hüllkurve, Pegel Voitsberg

Klasse: Niederschlagsdauer

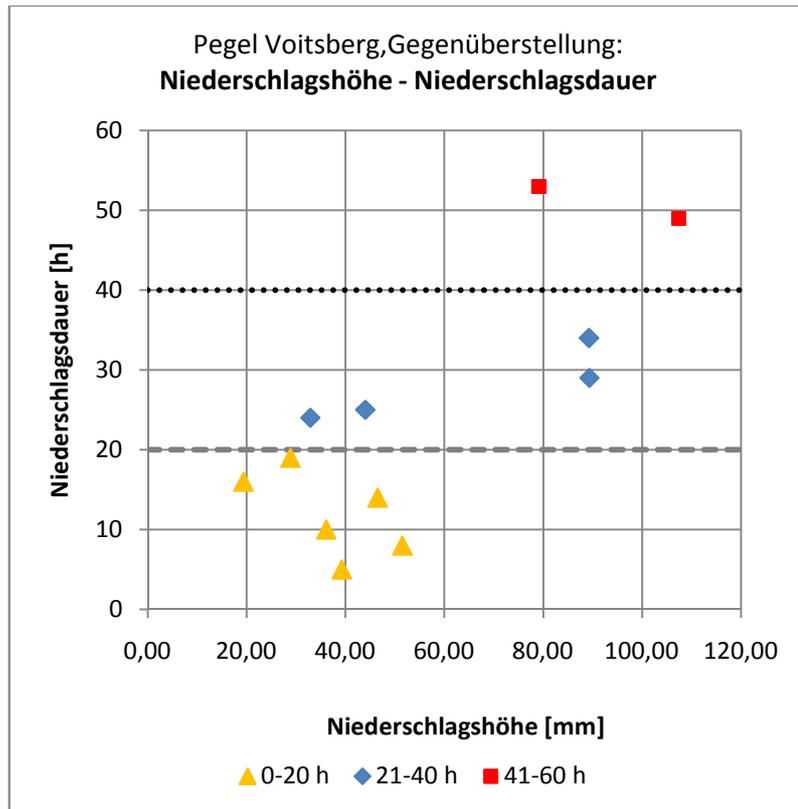
Pegel Voitsberg		
Dauer[h]	Anzahl	%
0-20	6	50,00
21-40	4	33,33
41-60	2	16,67
Summe	12	100%

Verteilung	[h]
Min.	5
Max.	53
Mittelwert	22,83

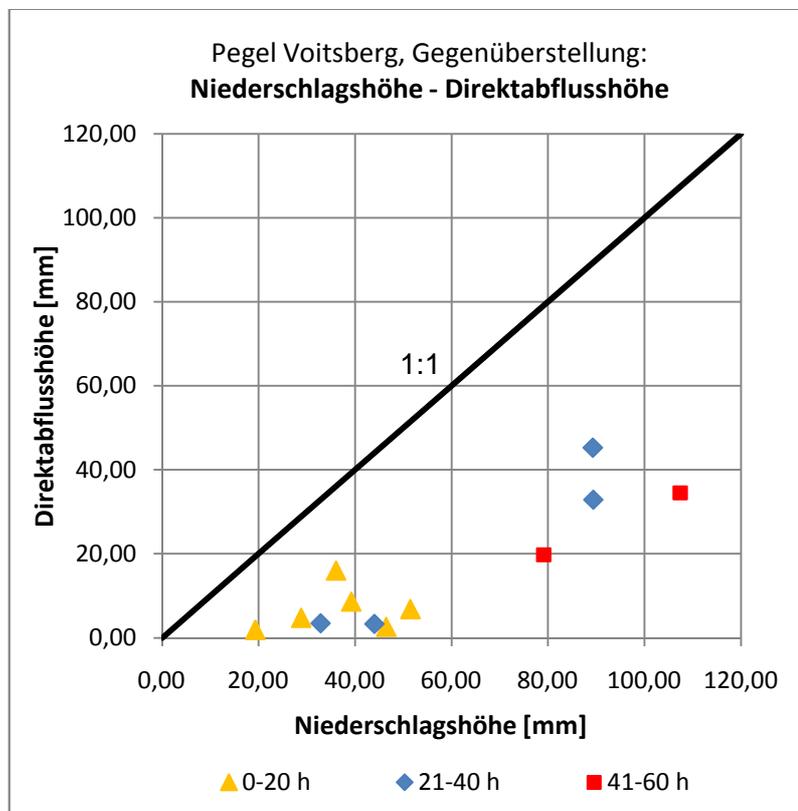


Ereignis:	Dauer [h]
1	5
2	8
3	10
4	14
5	16
6	19
7	24
8	25
9	29
10	34
11	49
12	53

Anlage 17: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer - Pegel Voitsberg



Anlage 18: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer - Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Voitsberg



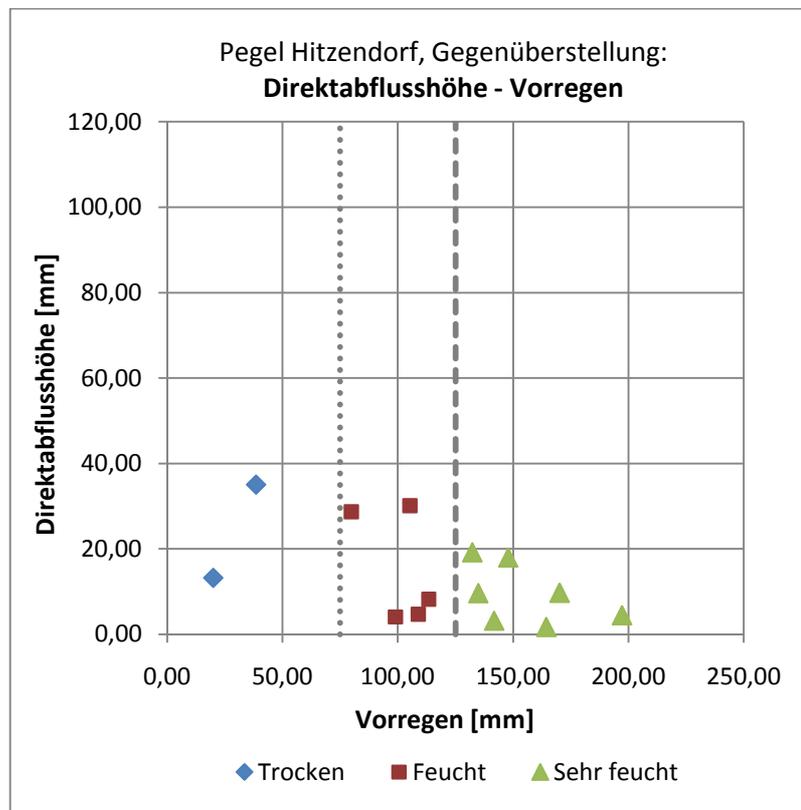
Anlage 19: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Voitsberg

Pegel Hitzendorf

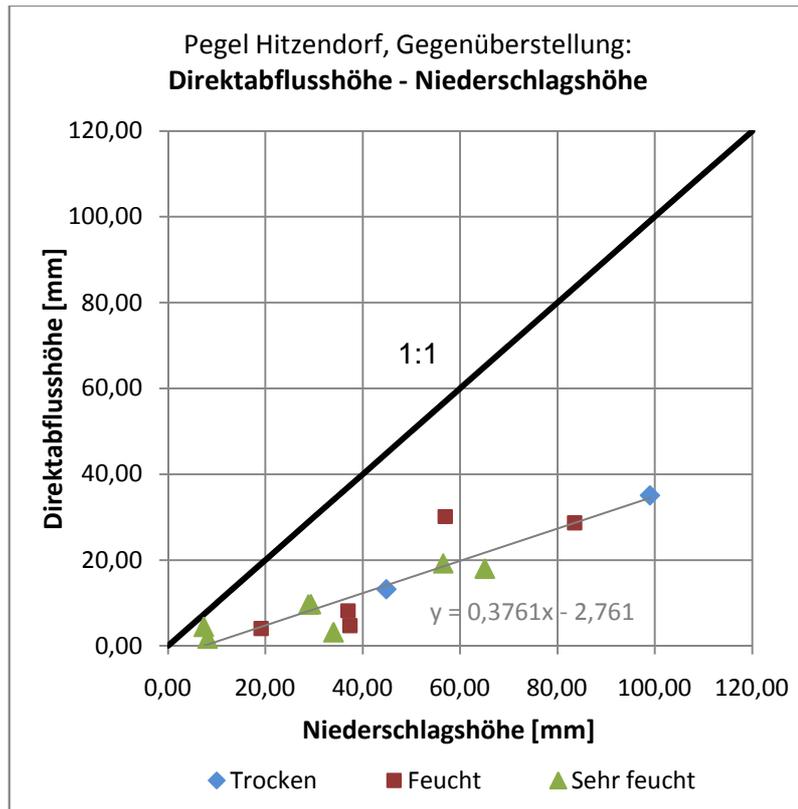
Klasse: Vorregensituation

Pegel	Zeitpunkt des Spitzenabflusses ts	Direktabflusshöhe [mm]	Niederschlagsdauer [h]	Niederschlagshöhe [mm]	21 Tage Vorregen [mm]
HITZENDORF	Mär.04	13,20	70	44,85	20,04
	Dez.02	35,06	131	99,00	38,56
	Sep.09	28,70	22	83,51	79,87
	Jun.09	4,05	32	19,14	98,97
	Aug.05	30,11	16	56,97	105,29
	Jun.04	4,69	16	37,38	108,89
	Jul.09	8,18	16	36,99	113,42
	Jul.09	19,20	6	56,57	132,28
	Jul.05	9,62	2	28,87	134,85
	Jul.09	3,16	4	34,04	141,70
	Aug.09	18,00	26	65,11	147,82
	Jun.09	1,69	18	8,17	164,32
	Aug.05	9,70	12	29,39	170,09
	Jul.09	4,43	10	7,40	197,11

Anlage 20: Hochwasserereignisse am Pegel Hitzendorf - kategorisiert anhand der Vorregensituation



Anlage 21: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Hitzendorf

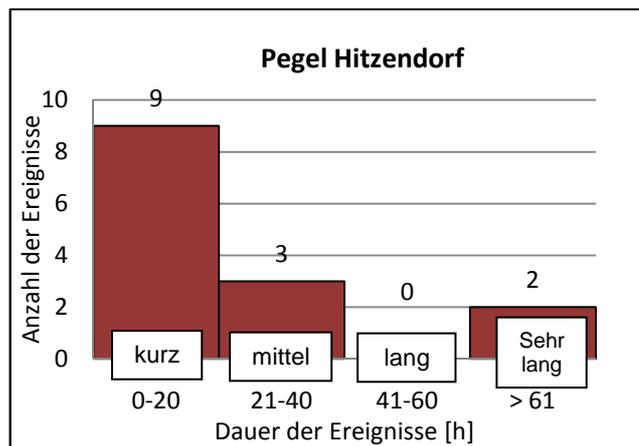


Anlage 22: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer linearen Trendlinie, Pegel Hitzendorf

Klasse: Niederschlagsdauer

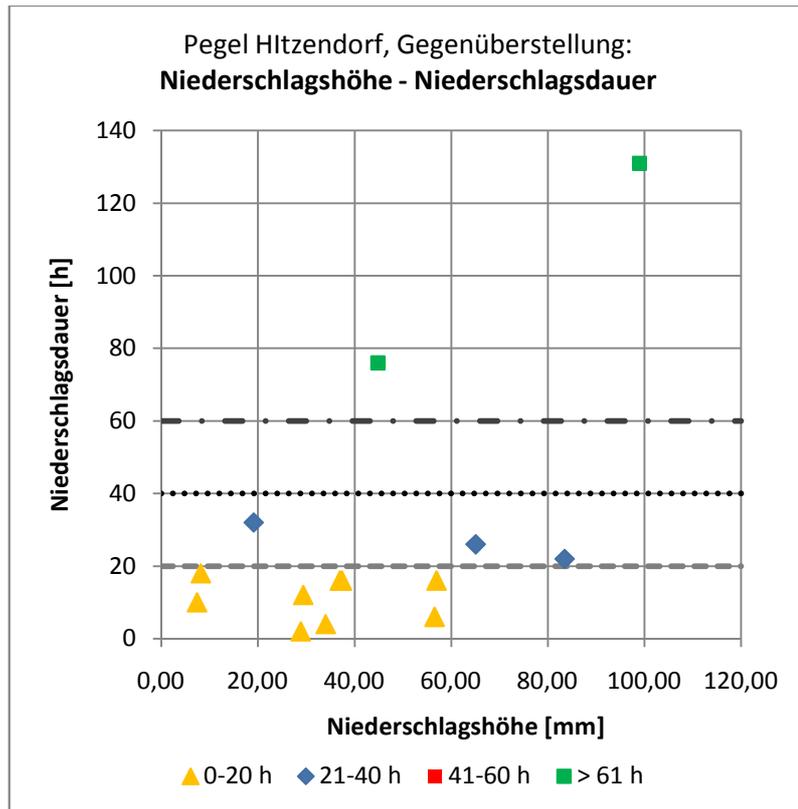
Pegel Hitzendorf		
Dauer[h]	Anzahl	%
0-20	9	64,29
21-40	3	21,43
41-60	0	0,00
> 60	2	14,29
Summe	14	100%

Verteilung	[h]
Min.	2
Max.	131
Mittelwert	27,36

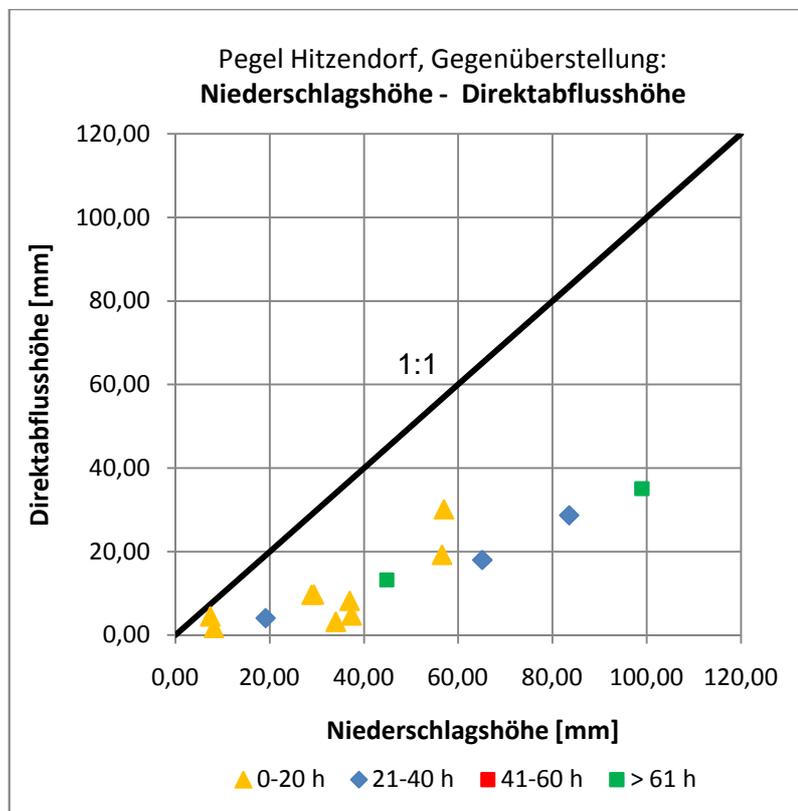


Ereignis:	Dauer [h]
1	2
2	4
3	6
4	10
5	12
6	16
7	16
8	16
9	18
10	22
11	26
12	32
13	76
14	131

Anlage 23: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer - Pegel Hitzendorf



Anlage 24: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Hitzendorf



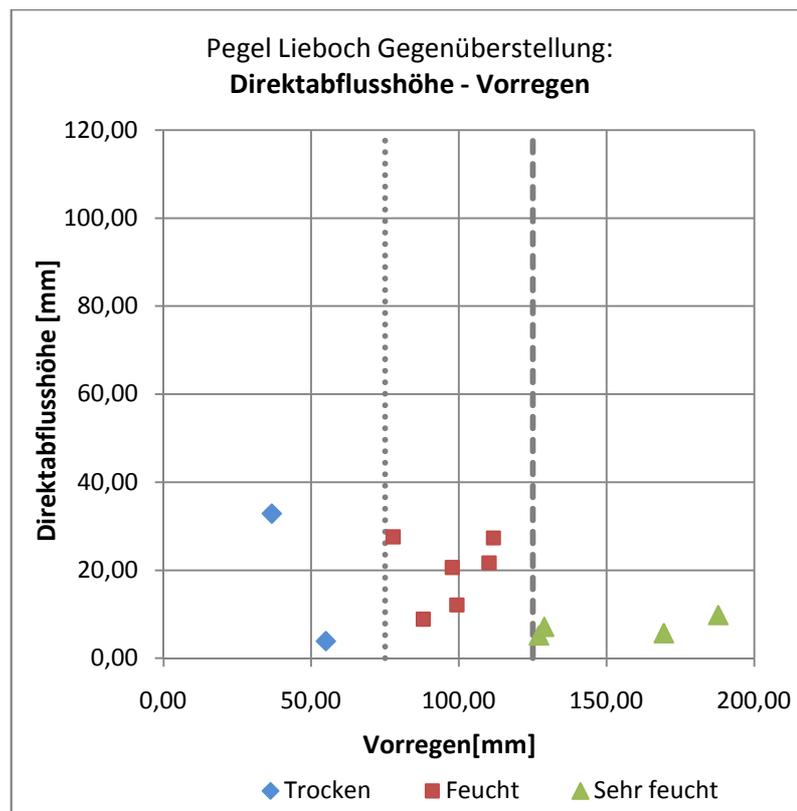
Anlage 25: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Niederschlagshöhe, kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Hitzendorf

Pegel Lieboch

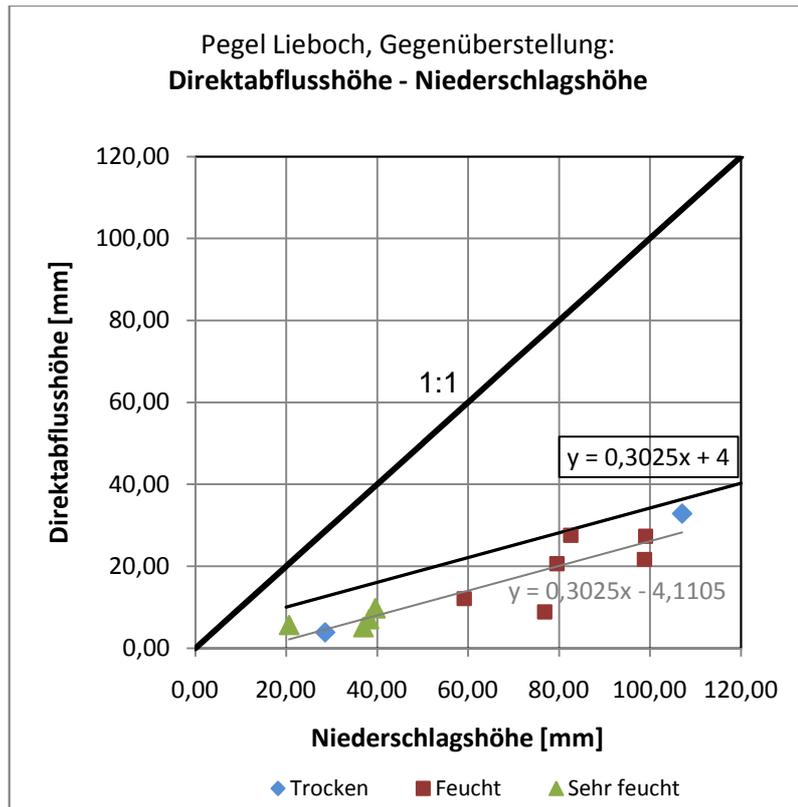
Klasse: Vorregensituation

Pegel	Zeitpunkt des Spitzenabflusses t_s	Direktabflusshöhe [mm]	Niederschlagsdauer [h]	Niederschlagshöhe [mm]	21 Tage Vorregen [mm]
LIEBOCH	Dez.02	32,85	130	107,06	36,70
	Jun.06	3,90	24	28,59	54,99
	Sep.09	27,57	31	82,56	77,71
	Aug.02	8,86	55	76,82	87,91
	Aug.09	12,10	36	59,12	99,30
	Okt.05	20,64	75	79,53	97,71
	Jun.04	21,67	152	98,77	110,18
	Aug.05	27,33	50	99,02	111,66
	Aug.09	5,18	11	37,01	127,05
	Jul.09	7,14	6	38,25	128,82
	Jul.04	5,68	30	20,64	169,36
	Aug.05	9,79	31	39,62	187,76

Anlage 26: Hochwasserereignisse am Pegel Lieboch - kategorisiert anhand der Vorregensituation



Anlage 27: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation, Pegel Lieboch

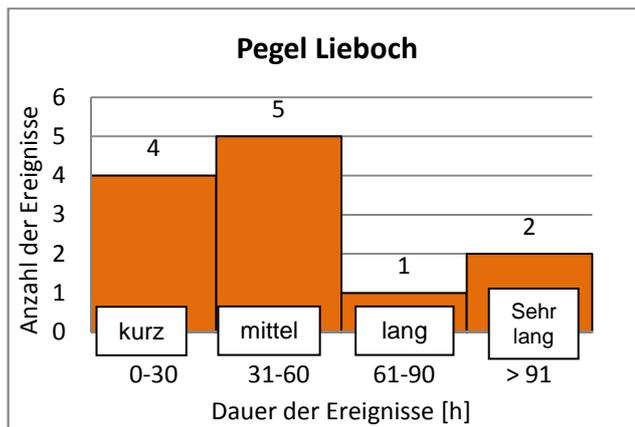


Anlage 28: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe - Vorregen kategorisiert anhand der Vorregensituation einschließlich einer Hüllkurve, Pegel Lieboch

Klasse: Niederschlagsdauer

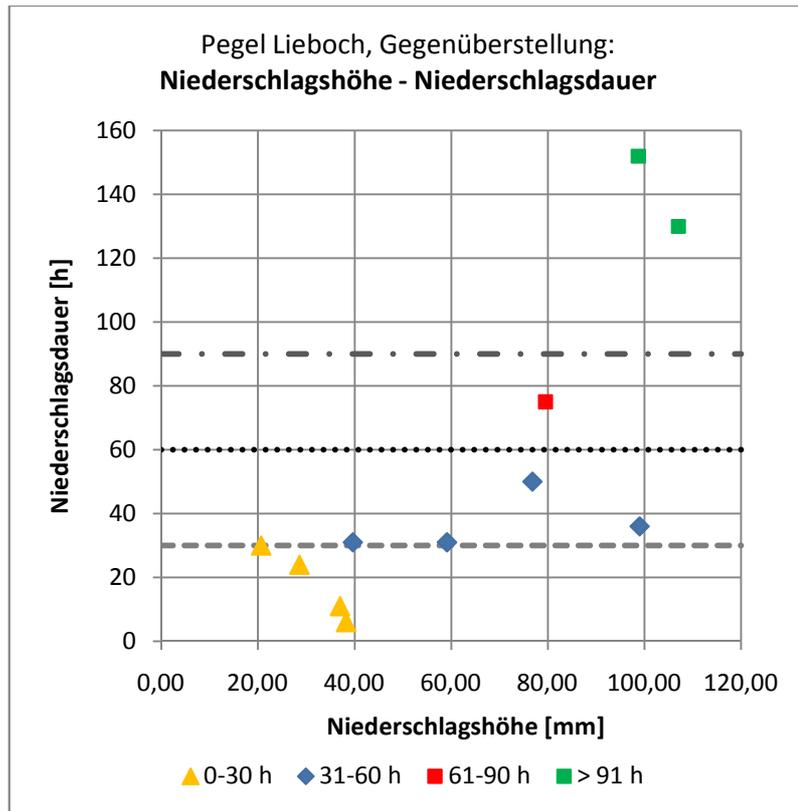
Pegel Lieboch		
Dauer[h]	Anzahl	%
0-30	4	33,33
31-60	5	41,67
61-90	1	8,33
> 91	2	16,67
Summe	12	100%

Verteilung	[h]
Min.	6
Max.	152
Mittelwert	52,08

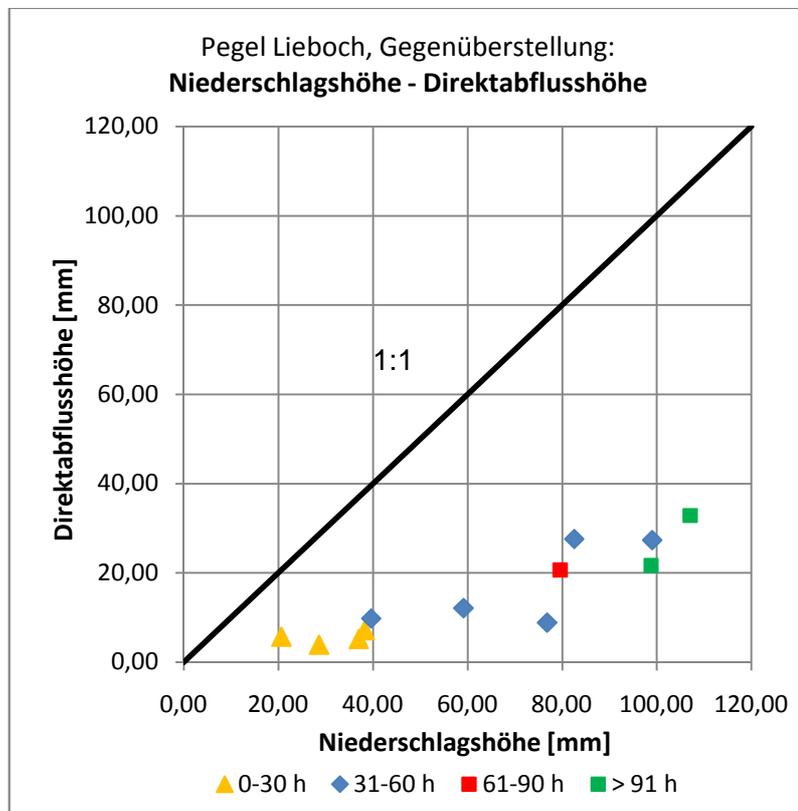


Ereignis:	Dauer [h]
1	6
2	11
3	24
4	30
5	31
6	31
7	36
8	50
9	55
10	75
11	130
12	152

Anlage 29: Klassifikation der Ereignisse anhand der Niederschlagsdauer - Pegel Lieboch



Anlage 30: Gegenüberstellung: Niederschlagsdauer – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Lieboch



Anlage 31: Gegenüberstellung: Direktabflusshöhe – Niederschlagshöhe kategorisiert anhand den Niederschlagsdauern, Pegel Lieboch

