

Grundlagen zur Hochwasserwarnung an der Kleinen Emme

Teilaspekt Niederschlag

Analyse der Niederschlagsereignisse bei Hochwasser im Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Masterarbeit

der philosophisch - naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern



vorgelegt von
Samuel Riedener
2010

Betreuer der Arbeit:
Prof. Dr. Rolf Weingartner
Leiter der Gruppe für Hydrologie
Geografisches Institut der Universität Bern

Titelbild: Niederschlagsmessung mit Niederschlagswippen "Rainwise" und "Young 52202" am Standort Schaftelenmoos im Einzugsgebiet der Kleinen Emme.

Vorwort und Danksagung

Die Untersuchungen an der Kleinen Emme sind in Zusammenarbeit mit der Masterstudentin Coralie Amiguet und dem Masterstudenten Pierre Masson durchgeführt worden. Aus diesem gemeinsamen Themengebiet sind drei Masterarbeiten entstanden. Die weiteren Arbeiten tragen folgende Titel:

Coralie Amiguet: Densification du réseau hydrométrique dans le bassin-versant de la Kleine Emme et étude de la réaction du débit de crue. Eléments de base pour un futur projet de système d'alarme de crues.

Pierre Masson: Grundlagen für ein Hochwasserwarnsystem im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Technische Umsetzung und Niederschlag-Abfluss-Modellierung.

Einzelne Kapitel dieser Arbeiten sind auch in der vorliegenden Arbeit enthalten. Dies ist der Grund für Textteile in französischer Sprache.

Während den letzten 18 Monaten und vor allem im Sommer 2009 waren wir oft im Einzugsgebiet der Kleinen Emme anzutreffen. Der Messnetzaufbau, die Betreuung der Stationen und die diversen Abflussmessungen waren mit einem enormen Zeitaufwand verbunden. Trotzdem waren die langen Tage im Feld auch bei kaltem Wetter stets eine Freude. Nicht zuletzt, weil am Abend die Fahrt vom Entlebuch nach Bern in Trubschachen vorbeiführt und in diesem Dorf ein Fabrikladen einer Guetziproduktionsstätte steht, der in regelmässigen Abständen besucht wurde. Diese Versüssung des Tages ist glücklicherweise nicht der Hauptgrund, weshalb die Masterarbeit als lehrreiche Zeit in Erinnerung bleibt. Die Planung, der Aufbau eines Messnetzes und die Analyse von Niederschlagsdaten verlangten nach verschiedenen Fähigkeiten die von handwerklichem Geschick bis zur Programmierung von Statistik-Software reichte. Diese vielseitigen Aufgabenbereiche und Herausforderungen forderten und motivierten mich bis zur Abgabe der Arbeit.

Ich möchte mich bei folgenden Personen und Institutionen bedanken, die mich in verschiedener Hinsicht unterstützt haben:

Rolf Weingartner für die Betreuung der Masterarbeit und wegweisende Ratschläge.

Jan Schwanbeck, der beim Aufbau vom Messnetz mitgeholfen hat und bei allgemeinen Fragen, wie auch bei spezifischen Fragen zur Datenanalyse sich immer Zeit nahm.

Jürg Schenk für die Konstruktion verschiedener Bauteile des Messnetzes.

MeteoSchweiz, für die Niederschlagsdaten und den Mitarbeitern des Kundendienstes für die Beantwortung meiner detaillierten Fragen.

Der **Dienststelle Umwelt und Energie (UWE) des Kantons Luzern** und insbesondere **Ernst Schnurrenberger** für die Niederschlagsdaten, die Informationen zu den Oberflächengewässern und dem Grundwasser des Einzugsgebietes der Kleinen Emme sowie zur Niederschlagsmessung.

Der **Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (VIF) des Kantons Luzern** und **Daniel Arnold** für die Unterstützung und das Interesse an den vorliegenden Arbeiten.

Coralie Amiguet und **Pierre Masson** für die gute Zusammenarbeit und amüsante Momente.

Christian Wüthrich für das kritische Gegenlesen der vorliegenden Arbeit.

Gabi und **meinen Eltern** für die Unterstützung in verschiedenen Bereichen.

Zusammenfassung

Im Rahmen von drei Masterarbeiten wird durch den Aufbau eines temporären Niederschlags- und Abflussmessnetzes im oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis Werthenstein und der Einbettung der Messungen in längere Datenreihen, die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge sowie die Niederschlag-Abfluss-Beziehung bei Hochwasserereignissen erfasst. Die Resultate sollen als Grundlage für ein Hochwasserwarnsystem dienen. In der vorliegenden Arbeit wird der Teilaspekt Niederschlag behandelt.

Durch die Verdichtung des Niederschlagsmessnetzes (17 zusätzliche Bodenmessstationen) und die Nutzung eines kombinierten Datensatzes (Radar + Bodenmessnetz) kann im Gegensatz zur Interpolation mittels des Bodenmessnetzes des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (Meteo-Schweiz) die räumliche Variabilität des Niederschlags innerhalb des Einzugsgebietes eines Ereignisses aufgezeigt werden.

45% der analysierten Hochwasserereignisse und auch das grösste Hochwasser von 2005 wurden durch lang andauernde Regenfälle ausgelöst. Diese Dauerregenereignisse weisen im Mittel relativ zu Hochwasser, die durch kurz andauernde Regenfälle verursacht werden, grössere Niederschlagsmengen, höhere Vorregenindizes und tiefere Niederschlagsintensitäten auf.

Bei den untersuchten Ereignissen treten mit wenigen Ausnahmen die grössten Niederschlagsmengen, die grössten Vorregenindizes, die maximalen Niederschlagsintensitäten und die kleinsten Bodenfeuchtespeicherkapazitäten in den höhergelegenen Teileinzugsgebieten im Osten und Süden des Einzugsgebietes auf. Die kleinsten Niederschlagsmengen, Vorregenindizes, kleinere Niederschlagsintensitäten und grössere Bodenfeuchtespeicherkapazitäten sind auf die Gebiete im Nordwesten begrenzt.

Die Schlüsselteileinzugsgebiete bei Hochwasser, die anhand der Niederschlagscharakteristika und des maximalen spezifischen Abflusses in den entsprechenden Gebieten ausgeschieden werden, befinden sich in höheren Lagen im Osten und Süden.

Mit fünf der sechs bestehenden Abflussmessstationen innerhalb des Einzugsgebietes können die Abflüsse der Schlüsseleinzugsgebiete gemessen oder abgeschätzt werden und in ein Hochwasserwarnsystem integriert werden. Auf Grund der räumlichen und zeitlichen hohen Auflösung und der Möglichkeit des Nowcastings wird für ein zukünftiges Hochwasserwarnsystem die Niederschlagsmessung mit Radar empfohlen. Von der Niederschlagsmessung mit Hilfe der Strassenwetterstationen wird hinsichtlich der Unterschätzung der Niederschlagsmengen bei der Messung mit den optoelektrischen Sensoren (PWD11) abgeraten.

Die bei Vergleichsmessungen eingesetzte Rainwise-Regenwippe kann in Anbetracht diverser Mängel beim Gerätedesign und abweichender Messwerte im Vergleich zur bewährten Young 52202-Wippe, nicht empfohlen werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	III
Zusammenfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Untersuchungsrahmen	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Grundlagen zum Niederschlag	4
2.1 Relevante Definitionen	4
2.2 Die Niederschlagsmessung	4
2.2.1 Bodenmessnetze	5
2.2.1.a Punktniederschlag.....	5
2.2.1.b Gebietsniederschlag	5
2.2.1.c Messfehler.....	6
2.2.2 Radar	9
2.2.3 Kombiniertes Datensatz: Radar und Bodenmessnetz	11
3 Untersuchungsgebiet	13
3.1 Choix du bassin versant [Amiguet 2010].....	13
3.2 Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme [Masson 2010]	14
3.3 Geologie [Masson 2010]	16
3.4 Klima	17
3.5 Hydrologique [Amiguet 2010].....	21
4 Messnetz	30
4.1 Niederschlagsmessnetz	30
4.1.1 Bestehendes Niederschlagsmessnetz	30
4.1.1.a Bestehendes Niederschlagsmessnetz innerhalb des Einzugsgebietes	30
4.1.1.b Bestehendes Niederschlagsmessnetz ausserhalb des Einzugsgebietes	31
4.1.2 Temporäres Niederschlagsmessnetz.....	33
4.1.2.a Verteilung der Stationen im Einzugsgebiet	34
4.1.2.b Standortwahl der Niederschlagsmessstationen	36
4.1.2.c Niederschlagsmessgeräte.....	37
4.1.2.d Statische Kalibrierung der Messgeräte	39
4.1.2.e Aufbau und Befestigung der Stationen	40
4.1.3 Temporäres Niederschlagsmessnetz bei Strassenwetterstationen Februar-Mai 2010.....	42
4.2 Abflussmessnetz	45
4.2.1 Bestehendes Abflussmessnetz.....	45
4.2.2 Temporäres Abflussmessnetz.....	47
4.2.2.a Standortwahl der Abflussmessstationen	47
4.2.2.b Beschreibung der Abflussmessstationsstandorte GIUB	47
5 Datenmanagement	49
5.1 Datenverfügbarkeit.....	49
5.1.1 Datenverfügbarkeit 1984-2009.....	49
5.1.2 Datenverfügbarkeit 2009	49
5.2 EDV	51
5.3 Plausibilisierung der Niederschlagsdaten	53

6	Vergleichsmessungen Niederschlagsmessgeräte	55
6.1	Vergleichsmessungen Young 52202 vs. Rainwise	55
6.1.1	Vergleichsmessungen im Labor mit dynamischem Test	55
6.1.2	Vergleichsmessungen im Einzugsgebiet	56
6.2	Vergleichsmessungen Vaisala PWD11 vs. Young 52202	60
6.3	Bewertung der Niederschlagsmessgeräte	63
6.3.1	Young 52202	63
6.3.2	Rainwise	64
6.3.3	Vaisala PWD 11 - Strassenwetterstationen	65
7	Niederschlagsereignisse - Analysemethoden	66
7.1	Niederschlags-Datensätze	66
7.2	Auswahl der Ereignisse	66
7.2.1	Auswahl der Ereignisse von 2009 [Amiguet 2010]	67
7.2.2	Auswahl der Ereignisse von 1992 – 2006	67
7.2.3	Auswahl der Ereignisse von 1984 – 2009 [Amiguet 2010]	67
7.3	Einteilung in Teileinzugsgebiete	67
7.4	Kennwerte zur Analyse von Niederschlagsereignissen	68
7.4.1	Niederschlagsdauer	68
7.4.2	Niederschlagsintensität	69
7.4.2.a	Ereignisintensität	70
7.4.2.b	Maximale Intensität	70
7.4.2.c	Intensität Wussow	71
7.4.3	Niederschlagsmenge	71
7.4.4	Summenlinie	72
7.4.5	Vorregenindex VN 21	73
7.4.6	Bodenfeuchtespeicher [SSM]	74
7.4.7	Abfluss	76
7.4.7.b	Abflussende	76
7.4.7.c	Spitzenabfluss	77
7.4.7.e	Abflusskoeffizient	77
7.4.8	Hochwasserprozessstyp	77
8	Niederschlagsereignisse - Resultate	80
8.1	Analyse der Niederschlagssituation bei Hochwasserereignissen	80
8.1.1	Niederschlag-Abfluss Diagramm	80
8.1.2	Übersichtstabelle	81
8.1.3	Übersichtskarte	82
8.1.4	Vorregenindex VN21	83
8.1.5	Summenlinie	84
8.1.6	Ereignisniederschlag	84
8.1.7	Stündlicher Niederschlag	85
8.1.8	Beschreibung	86
8.2	Niederschlagsereignisse Zusammenstellung	87
8.2.1	Niederschläge der Abflussereignisse im Sommer 2009 [Messnetz 2009]	87
8.2.1.a	Hochwasserprozessstypen	88
8.2.1.b	Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität	89
8.2.1.c	VN 21 und SSM in den Teileinzugsgebieten	90
8.2.1.d	Summenlinie	92
8.2.1.e	Reaktionszeit	93
8.2.1.f	Abflusskoeffizient	94
8.2.1.g	Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag	95
8.2.1.h	Räumliche Auflösung mit unterschiedlichem Messnetz	97
8.2.2	Repräsentativität von Niederschlagsmessstationen	99
8.2.2.a	Niederschlagsmessstation Napf	99
8.2.2.b	Kantonale Niederschlagsmessstation Schüpfheim	100
8.2.2.c	Niederschlag-Abfluss-Beziehung an der Fontanne	101
8.2.3	Niederschlagsereignisse der Hochwasser 1992 – 2006 [Radar Mt.CH]	103
8.2.3.a	Hochwasserprozessstypen	103

8.2.3.b	Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität	104
8.2.3.c	VN 21 und SSM	106
8.2.3.d	Summenlinie	107
8.2.3.e	Reaktionszeit	108
8.2.3.f	Abflusskoeffizient	109
8.2.3.g	Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag	109
8.2.3.h	Räumliche Auflösung mit unterschiedlichem Messnetz	111
8.2.4	Niederschlagsereignisse der 20 grössten Hochwasser von 1984 – 2009	113
	[Stationen Mt.CH]	113
8.2.4.a	Hochwasserprozesstypen	114
8.2.4.b	Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität	115
8.2.4.c	VN 21 und SSM	115
8.2.4.d	Summenlinie	116
8.2.4.e	Reaktionszeit	117
8.2.4.f	Abflusskoeffizient	118
8.2.4.g	Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag	119
9	Synthese	121
9.1	Vergleichsmessung der Niederschlagsmessgeräte "Young 52202" und "Rainwise"	121
9.2	Gebietsniederschläge mit unterschiedlicher Datengrundlage	122
9.2.1	Sommer 2009	122
9.2.2	1992-2006	124
9.3	Niederschlagsverteilung und Reaktion des Einzugsgebietes bei Hochwasserereignissen	124
9.4	Schlüsselgebiete bei Hochwasserereignissen	127
9.5	Hochwasserwarnsystem Kleine Emme	128
9.5.1	Strassenwetterstationen	129
9.5.2	Niederschlags- und Abflussmessung bei einem Hochwasserwarnsystem	130
9.5.2.a	Abflussmessung	130
9.5.2.b	Niederschlagsmessung	132
10	Ausblick	133
11	Literaturverzeichnis	135
11.1	Zitierte Literatur	135
11.2	Weiterführende Literatur	139
12	Anhang	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1:	Einzugsgebiet der Kleinen Emme	14
Abb. 3-2:	Bodennutzungskarte des Einzugsgebietes	15
Abb. 3-3:	Molasseschichten im Entlebuch	16
Abb. 3-4:	Jahressummen des Niederschlags der MeteoSchweiz-Station Flüfli von 1901-2009	18
Abb. 3-5:	Niederschlagssummen der MeteoSchweiz-Station Flüfli der Monate Juli bis Oktober von 1901-2009	19
Abb. 3-6:	Anzahl Tage mit Starkniederschlag ≥ 70 mm während der Messperiode von 1901-1980	20
Abb. 3-7:	Mittlerer Jahresniederschlag während der Messperiode von 1971-1990	20
Abb. 3-8:	Niederschlagsintensitäts-Diagramm der Messstation Flüfli von 1901-1970	21
Abb. 3-9:	Hydrogrammes de crue des cours d'eau du bassin-versant de la Reuss	22
Abb. 3-10:	Evaluation du temps de retour des crues de 2005	23
Abb. 3-11:	Débites spécifiques de pointe [$m^3/s \cdot km^2$] pendant les crues d'août 2005	23
Abb. 3-12:	Carte des principaux affluents de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein	25
Abb. 3-13:	Courbe de régime à partir du coefficient de Pardé pour la période 1993-2009 pour la Kleine Emme	25
Abb. 3-14:	Répartition des débits mensuels moyens pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel moyen	26
Abb. 3-15:	Répartition des débits mensuels maximums pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel maximum	27
Abb. 3-16:	Temps de retour pour la Kleine Emme à Werthenstein	27
Abb. 3-17:	Forme de l'hydrogramme et type de crue	28
Abb. 3-18:	Hydrogramme à la station Werthenstein (moyenne horaire) pour la période du 26.6.2009 au 10.10.2009	29
Abb. 4-1:	Bestehende Niederschlagsstationen zu Beginn des Jahres 2009	31
Abb. 4-2:	Im Jahre 2009 bereits installierte Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes	32
Abb. 4-3:	Temporäres Niederschlagsmessnetz während dem Sommer 2009	33
Abb. 4-4:	Hypsografische Kurve des Einzugsgebietes der Kleinen Emme bis Werthenstein	35
Abb. 4-5:	Idealer Winkelabstand bei Niederschlagsstationen	37
Abb. 4-6:	Mindestabstand bei Messstandorten zu Einzelobjekten	37
Abb. 4-7:	Schema einer Niederschlagswippe	38
Abb. 4-8:	Young-Niederschlagswippe ohne Messtrichter (Station E: Grämse)	38
Abb. 4-9:	Niederschlagsstation (Station B: Ruchweid) mit Niederschlagsmessgerät Young und Loggerkasten	38
Abb. 4-10:	Rainwise-Niederschlagswippe ohne Messtrichter (Station M: Hintere Rotbach)	39
Abb. 4-11:	Niederschlagsstation Rainwise (Station F: Eisee) mit Umzäunung	39
Abb. 4-12:	Messaufbau bei der statischen Kalibrierung	39
Abb. 4-13:	Young-Niederschlagsstation B (Ruchweid)	41
Abb. 4-14:	Young-Niederschlagsstation A (Amischwand).	41
Abb. 4-15:	Strassenwetterstationen-Vaisala im Untersuchungsgebiet	43
Abb. 4-16:	Strassenwetterstation Lehn mit Young-Niederschlagswippe zur Vergleichsmessung.	44
Abb. 4-17:	Vaisala PWD 11 auf einer Höhe von 2.5 m über Boden bei der Strassenwetterstation Schwanderholz	44
Abb. 4-18:	Abflussmessnetz in der Region der Kleinen Emme	46
Abb. 4-19:	Temporäres Abflussmessnetz	48
Abb. 5-1:	Schema des Datenmanagements der Niederschlagsdaten des temporären und bestehenden Messnetzes	53
Abb. 6-1:	Messaufbau des dynamischen Tests im Labor	56
Abb. 6-2:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen C & P (5 min-Summe)	57
Abb. 6-3:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (5 min-Summe)	57
Abb. 6-4:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (1h-Summe)	58
Abb. 6-5:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (1h-Summe)	58
Abb. 6-6:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen C & P (1d-Summe)	58
Abb. 6-7:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (1d-Summe)	58
Abb. 6-8:	Vergleichsmessung der Niederschlagsstationen C (Fabrikat: Young) und P (Fabrikat: Rainwise)	59
Abb. 6-9:	Vergleichsmessung der Niederschlagsstationen D (Fabrikat: Young) und Q (Fabrikat: Rainwise)	59
Abb. 6-10:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Schwanderholzstutz Vaisala & Young (15 min-Summe)	61
Abb. 6-11:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Zinggen Vaisala & Young (15 min-Summe)	61
Abb. 6-12:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Schwanderholzstutz Vaisala & Young (1 d-Summe)	61
Abb. 6-13:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge Zinggen Vaisala & Young (1 d-Summe)	61
Abb. 6-14:	Vergleichsmessung bei der Strassenwetterstation Schwanderholzstutz (Fabrikat: Vaisala) mit einer Niederschlagswippe (Fabrikat: Young)	62
Abb. 6-15:	Vergleichsmessung bei der Strassenwetterstation Zinggen (Fabrikat: Vaisala) mit einer Niederschlagswippe (Fabrikat: Young)	62
Abb. 7-1:	Einteilung der 14 Teileinzugsgebiete. Jedes Einzugsgebiet ist definiert durch eine Identifikationsnummer und einen Namen	68
Abb. 7-2:	Die 4 Typen von Summenlinien von Niederschlagsereignissen. [DVWK 1984]	72
Abb. 7-3:	Schematische Darstellung der Struktur der einstellbaren Parameter, der Speichermodule und der Flüsse von PREVAH	75
Abb. 7-4:	Mittlere Grösse des Bodenfeuchtespeichers der Teileinzugsgebiete in Millimeter	76
Abb. 7-5:	Typisierungsdigramm von Hochwasserereignissen	78
Abb. 8-1:	Niederschlag-Abfluss Diagramm des oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis Werthenstein vom 15.07.2009 19:00 bis 20.07.2009 19:00	81
Abb. 8-2:	Ereignisniederschlag [mm] und Bodenfeuchtespeicher vom 17.07.2009 nach Teileinzugsgebieten unterteilt	83
Abb. 8-3:	Vorregenindex VN 21 zu Beginn des Ereignis 17.07.2009	84
Abb. 8-4:	Summenlinie des Niederschlagsereignis 17.07.2009	84
Abb. 8-5:	Ereignisniederschlag 17.07.2009	85
Abb. 8-6:	Stündliche Niederschlagssummen vom 17.07.2009 03:41 bis 05:40	86

Abb. 8-7:	Aufsummierte Niederschlagsmenge im Sommer 2009	88
Abb. 8-8:	Hochwasserprozessstypen bei den Abflussereignissen während dem Sommer 2009	89
Abb. 8-9:	Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe der Ereignisniederschläge im Sommer 2009	90
Abb. 8-10:	Teileinzugsgebiete mit max. Niederschlagsintensität während der 12 Ereignisse im Sommer 2009	90
Abb. 8-11:	Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe des VN21 der Niederschlagsereignisse im Sommer 2009	92
Abb. 8-12:	Rangierung der Bodenfeuchtespeicherkapazität [mm] der Teileinzugsgebiete im Sommer 2009	92
Abb. 8-13:	VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009	96
Abb. 8-14:	VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009	96
Abb. 8-15:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009	97
Abb. 8-16:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009	97
Abb. 8-17:	Gebietsniederschlag während dem Zeitraum vom 26.06.2009-12.10.2009	98
Abb. 8-18:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Napf & des Einzugsgebietes (1h-Summe)	100
Abb. 8-19:	Doppelsummenkurve: Niederschlagsmenge der Station Napf & des Einzugsgebietes	100
Abb. 8-20:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Schüpfheim & des Einzugsgebietes (1h-Summe)	101
Abb. 8-21:	Doppelsummenkurve: Niederschlagsmenge der Station Schüpfheim & des Einzugsgebietes	101
Abb. 8-22:	Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Napf & Schüpfheim (1h-Summe)	102
Abb. 8-23:	Kreuzkorrelation der 10 minütlichen Niederschlagsmenge der Stationen Napf & Grämse von -40 min bis +40 min	102
Abb. 8-24:	Hochwasserprozessstypen der 11 untersuchten Ereignisse während der Messperiode 1992-2006	103
Abb. 8-25:	Hochwasserprozessstypen der 11 untersuchten Ereignisse während der Messperiode 1992-2006. Einteilung der Ereignisse nach Monaten	104
Abb. 8-26:	Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe der Ereignisniederschläge während der Messperiode von 1992-2006	105
Abb. 8-27:	Teileinzugsgebiete mit max. Niederschlagsintensität während der 11 Ereignisse der Messperiode 1992-2006	105
Abb. 8-28:	Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe des VN21 der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1992-2006	107
Abb. 8-29:	Rangierung der Bodenfeuchtespeicher-kapazität [mm] der Teileinzugsgebiete	107
Abb. 8-30:	VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006	110
Abb. 8-31:	VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006	110
Abb. 8-32:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006	111
Abb. 8-33:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006	111
Abb. 8-34:	Gebietsniederschlag der 11 Ereignisse der Messperiode 1992-2006	112
Abb. 8-35:	Hochwasserprozessstypen der 20 untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe während der Messperiode 1984-2009	114
Abb. 8-36:	Hochwasserprozessstypen der 20 untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe während der Messperiode 1984-2009. Einteilung der Ereignisse nach Monaten	115
Abb. 8-37:	VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009	119
Abb. 8-38:	VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009	119
Abb. 8-39:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009	120
Abb. 8-40:	Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009	120
Abb. 9-1:	Maximal spezifischer Abfluss [$m^3/s \cdot km^2$] von TEZG zwischen 1984-2008. Homogene Niederschlagsverteilung	126
Abb. 9-2:	Rangierung des maximalen spezifischen Abflusses von 1984-2008 und der Niederschlagsmengen der Ereignisse im Sommer 2009	127
Abb. 9-3:	Rangierung des maximalen spezifischen Abflusses von 1984-2008 und der Niederschlagsmengen der untersuchten Ereignisse von 1992-2006	127
Abb. 9-4:	Schlüsselgebiete bei Hochwassereignissen. 1. bis 3. Klasse	128

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Caractéristiques générales du bassin versant de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein	22
Tab. 3-2:	Valeurs records enregistrées aux stations Kleine Emme - Werthenstein et Littau en 2005	22
Tab. 4-1:	Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen innerhalb des Einzugsgebietes	31
Tab. 4-2:	Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes	32
Tab. 4-3:	Beschreibung der Niederschlagsstationen des temporären Messnetzes innerhalb des Einzugsgebietes	34
Tab. 4-4:	Statische Kalibrierung der Niederschlagswippen	39
Tab. 4-5:	Beschreibung der Strassenwetterstationen und der Vergleichsstationen im Untersuchungsgebiet	43
Tab. 4-6 :	Aufgehobene Abflussmessstationen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme	46
Tab. 4-7:	Bestehende Abflussmessstationen (Stand 2009) im Einzugsgebiet der Kleinen Emme	46
Tab. 4-8:	Beschreibung der Abflussstationen des temporären Messnetzes innerhalb des Einzugsgebietes	48
Tab. 5-1:	Datenverfügbarkeit der Niederschlags- und Abflussdaten für das Einzugsgebiet der Kleinen Emme von 1984-2009	49
Tab. 5-2:	Verfügbare Messdaten pro Niederschlagsstation während der Messperiode von Juni bis Dezember 2009	50
Tab. 5-3:	Perioden im Sommer 2009 mit Datenausfall und ungenügender Datenqualität	51
Tab. 6-1:	Dynamischer Test mit den Niederschlagswippen Young und Rainwise	56
Tab. 7-1:	Niederschlagsdatensätze während des Zeitraumes 1984-2009	66
Tab. 8-1:	Die verwendeten Niederschlagsdatensätze zur Analyse der Ereignisse	80
Tab. 8-2:	Übersichtstabelle mit den wichtigsten Kenngrössen des Niederschlagsereignisses 17.07.2009.	82
Tab. 8-3:	Kennzahlen der 12 Niederschlagsereignisse vom Sommer 2009 (Messnetz 2009)	88
Tab. 8-4:	Mittelwerte der Niederschlagsmengen und Intensitäten der Ereignisse im Sommer 2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	89
Tab. 8-5:	Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse im Sommer aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	91
Tab. 8-6:	Übersicht der Summenlinien-Typen der Niederschlagsereignisse im Sommer 2009	93
Tab. 8-7:	Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen im Sommer 2009	93
Tab. 8-8:	Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlag-Abflussereignisse im Sommer 2009	94
Tab. 8-9:	Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse im Sommer 2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	94
Tab. 8-10:	Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse im Sommer 2009	95
Tab. 8-11:	Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse im Sommer 2009, aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	95
Tab. 8-12:	Kennzahlen der Gebietsniederschläge von 26.06.2009-12.10.2009	98
Tab. 8-13:	Kennzahlen zu den Niederschlagsereignissen im Sommer 2009 (Stationen Mt.CH)	99
Tab. 8-14:	Kennzahlen der 11 Niederschlagsereignisse der partiellen Serie während des Zeitraums von 1992-2006 (Radar Mt.CH)	103
Tab. 8-15:	Mittelwerte der Niederschlagsmengen und Intensitäten der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	104
Tab. 8-16:	Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse während der Messperiode 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	106
Tab. 8-17:	Übersicht der Summenlinien-Typen der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1992-2006	107
Tab. 8-18:	Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen während der Messperiode von 1992-2006	107
Tab. 8-19:	Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1992-2006	108
Tab. 8-20:	Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	108
Tab. 8-21:	Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1992-2006	109
Tab. 8-22:	Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	109
Tab. 8-23:	Kennzahlen der Gebietsniederschläge der 11 Ereignisse zwischen 1992-2006	112
Tab. 8-24:	Kennzahlen zu den Niederschlagsereignissen während der Messperiode 1992-2006 (Stationen Mt.CH)	113
Tab. 8-25:	Kennzahlen der 11 Niederschlagsereignisse der partiellen Serie während des Zeitraums von 1984-2009 (Stationen Mt.CH)	114
Tab. 8-26:	Mittelwerte der Niederschlagsmengen und der Niederschlagsintensität der Ereignisse während der Messperiode 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	115
Tab. 8-27:	Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse während der Messperiode 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	116
Tab. 8-28:	Übersicht der Summenlinien-Typen der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1984-2009	116
Tab. 8-29:	Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen während der Messperiode von 1984-2009	116
Tab. 8-30:	Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlags-Abflussereignisse während der Messperiode von 1984-2009	117
Tab. 8-31:	Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	117
Tab. 8-32:	Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1984-2009	118
Tab. 8-33:	Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse der Messperiode von 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp	118

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CKW	Centralschweizerische Kraftwerke AG
d	Tag
EZG	Einzugsgebiet
GIS	Geographical Information System
h	Stunde
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
Kap.	Kapitel
LU	Luzern
min	Minute
MeteoSchweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
N	Niederschlag
PREVAH	Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model
SG	Schlüsselgebiet
SSM	Soil Moisture Storage (Bodenfeuchtespeicher) von PREVAH
Tab.	Tabelle
TEZG	Teileinzugsgebiet
UWE	Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern
VIF	Dienststelle Verkehr und Infrastruktur des Kantons Luzern
VN21	Vorregensumme 21 Tage
WMO	World Meteorological Organization

1 Einleitung

1.1 Untersuchungsrahmen

Das Hochwasser von 2005 verursachte an Bauten, Industrieanlagen und Verkehrswegen nahe der Kleinen Emme Schäden in der Höhe von über 200 Millionen Schweizer Franken [BAUMANN 2010]. Ein Grossteil der Schäden trat im Unterlauf, ab der Ortschaft Wolhusen, auf. Das Hochwasserereignis hat deutlich aufgezeigt, dass der Hochwasserschutz an der Kleinen Emme verbessert werden muss [BAUMANN 2010]. Der Kanton Luzern hat als Reaktion auf das Ereignis ein Hochwasserschutz- und Renaturierungsprojekt an der Kleinen Emme initiiert. Die Dienststelle Verkehr und Infrastruktur des Kantons Luzern (VIF) ist, nebst dem konstruktiven Hochwasserschutz, auch an einem System zur Hochwasserwarnung an der Kleinen Emme interessiert. Eine kurzfristige Hochwasserwarnung kann einen Beitrag dazu leisten, die Schäden bei zukünftigen Ereignissen zu verringern. Die zuständigen Einsatzkräfte können sich auf die eintretende Situation vorbereiten, die Bevölkerung informieren und schützenswerte Objekte durch temporäre Dämme sichern.

Die vorhandenen Niederschlagsmessungen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) liefern nur ein unvollständiges Bild der realen Niederschlagsverteilung. Trotz des dichten Messnetzes der Niederschlagsstationen in der Schweiz, werden feinskalige Niederschlagszellen nur unvollständig erfasst [BEZZOLA & HEGG 2008]. Durch ein temporäres Niederschlagsmessnetz soll die Stationsdichte erhöht werden.

Im Rahmen von drei Masterarbeiten des Geografischen Instituts der Universität Bern wird die räumliche und zeitliche Niederschlag-Abfluss-Beziehung im oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis Werthenstein untersucht. In der Masterarbeit von AMIGUET [2010] steht der Abfluss bei Hochwasser im Mittelpunkt und bei MASSON [2010] ist es die technische Umsetzung und die Niederschlag-Abfluss-Modellierung. In der vorliegenden Arbeit wird der Teilaspekt Niederschlag behandelt.

Die Resultate sollen als Grundlage für den Aufbau eines operationellen Systems zur Hochwasserwarnung dienen. Die Daten von Niederschlags- und Abflussmessungen im Einzugsgebiet (EZG) können zur Kalibrierung eines hydrologischen Modells verwendet werden. Mit diesem Modell können anhand der Niederschlagsdaten Spitzenabflüsse abgeschätzt und die Abflussdaten zusätzlich direkt zur Hochwasserwarnung genutzt werden.

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel der drei Masterarbeiten ist es, durch den Aufbau eines temporären Niederschlags- und Abflussmessnetzes im oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis Werthenstein und der Einbettung der Messungen in längere Datenreihen, die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge sowie die Niederschlag-Abfluss-Beziehung bei Hochwasserereignissen zu analysieren und darzustellen. Das so gewonnene Wissen soll als Grundlage für den Aufbau eines Hochwasserwarnsystems dienen. Folgende Ziele werden mit der vorliegenden Arbeit für den Teilaspekt Niederschlag verfolgt:

Die **Niederschlagsituation bei Hochwasserereignissen** wird anhand verschiedener **Kennwerte** analysiert. Dies beinhaltet die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Niederschlags im EZG.

Bei der Betrachtung aller untersuchten Ereignisse soll ermittelt werden, ob **räumliche Muster der Niederschlagsverteilung** ereignisübergreifend existieren. Das Ziel ist es, die Resultate vom Teilaspekt Niederschlag mit jenen vom Teilaspekt Abfluss [AMIGUET 2010] zu verknüpfen und somit zu definieren, welche **Teileinzugsgebiete (TEZG) als Schlüsselgebiete bei Hochwasserereignissen** bezeichnet werden können.

Ein Ziel ist es, die **geeignetste Methode zur Niederschlagsmessung für eine Hochwasserwarnung** an der Kleinen Emme zu definieren. Zudem sollen **mögliche Abflussmessstandorte** auf Grundlage der Wahl der Schlüsselgebiete eruiert werden.

Es soll untersucht werden, ob mit der **Verdichtung des Niederschlagsmessnetzes** die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung realistischer abgebildet werden kann. Die Gebietsniederschläge, berechnet auf Grundlage des temporären Messnetzes, des Bodenmessnetzes der MeteoSchweiz und eines kombinierten Datensatzes (Radar + Bodenmessung) sollen analysiert und allfällige Unterschiede beschrieben werden.

Ein **Vergleich des Niederschlagsmessgeräts Young 52202** mit dem Gerät der Marke **Rainwise** soll die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des erstmals vom Geografischen Institut der Universität Bern eingesetzten Rainwise-Fabrikats aufzeigen.

Ebenfalls werden die optoelektrischen Sensoren von Vaisala, die den Niederschlag an den **Strassenwetterstationen** des Strasseninspektorats des Kantons Luzern messen, mit den Niederschlagsmessgeräten von Young verglichen. Mit Hilfe der Vergleichsmessungen soll eine Aussage zur Qualität

der Messungen ermöglicht und die Tauglichkeit der Strassenwetterstationen für die **Integration in ein Hochwasservorwarnsystem** überprüft werden.

2 Grundlagen zum Niederschlag

Dieses Kapitel führt wichtige Begriffe ein und weist auf wichtige Methoden zur Niederschlagsmessung sowie häufig vorkommende Fehlerquellen hin. Die in der Ereignisanalyse verwendeten Kenngrößen zur Charakterisierung von Niederschlagsereignissen, werden in Kap. 7 "Niederschlagsereignisse – Analysemethoden" näher erläutert. Auf die detaillierte Beschreibung der theoretischen Grundlagen der Niederschlagsbildung und Niederschlagsarten wird verzichtet und auf die zahlreich vorhandene Literatur verwiesen. Zu empfehlen sind unter anderem BAUMGARTNER & LIEBSCHER [1990], GREBNER [1996], STRANGWAYS [2007] und WARNECKE [1997].

2.1 Relevante Definitionen

„Der Niederschlag ist eine Gesamtbezeichnung für das aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche gelangende Wasser. Der flüssige Niederschlag fällt als Regen oder schlägt sich als Tau oder Nebel nieder. Der feste Niederschlag gelangt in Form von Schnee, Graupel oder Hagel sowie Reif auf die Erde“ [DIERCKE 2005].

Niederschläge können nach ihrer Entstehung in zyklonale, konvektive und orographische Niederschläge eingeteilt werden. Beim Durchzug von Tiefdruckgebieten tritt meist eine Abfolge von Warm- und Kaltfronten auf. Bei Warmfrontniederschlag gleitet warme Luft relativ langsam auf eine stationäre Kaltluftmasse auf. Es entstehen weniger intensive jedoch länger andauernde Niederschläge. Eine Kaltfront ist die Vorderseite einer sich bewegenden Kaltluftmasse, die eine Warmluftmasse zum schnellen Aufsteigen bringt. Es entstehen dabei intensive, kurz andauernde linienartige Schauer [KOCH 2003]. Konvektive Niederschläge werden durch Oberflächenerwärmung ausgelöst. Diese sind von kurzer Dauer und können eine hohe Niederschlagsintensität erreichen. Die orographischen Niederschläge werden durch Erhebungen der Erdoberfläche verursacht. Der Hauptwindrichtung zugewandten Luv-Seite von Erhebungen fällt der Niederschlag aus und ruft ein Niederschlagsdefizit auf der abgewandten Lee-Seite hervor [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

Der Niederschlag kann auch auf Grundlage der Niederschlagshöhe und Intensität eingeteilt werden. Diese beiden Kriterien werden, nebst weiteren Charakteristika, zur Klassifizierung der Hochwasserprozessstypen verwendet (siehe Kap. 7.4.8).

2.2 Die Niederschlagsmessung

Eine akkurate Niederschlagsmessung ist Grundlage für quantitative hydrologische Analysen. Bei der vorliegenden Untersuchung interessiert der Niederschlag im EZG der Kleinen Emme. Der Niederschlag

kann mit verschiedenen Gerätetypen am Boden gemessen werden (siehe Kap. 4.1.2.c). Durch eine geeignete Interpolation ist eine Schätzung des Gebietsniederschlags möglich (siehe Kap. 2.2.1.b). Andererseits kann der Niederschlag auch mit Hilfe von Radarmessungen berechnet werden (siehe Kap. 2.2.2).

2.2.1 Bodenmessnetze

Um die temporale und räumliche Variabilität des Wasserdargebots festzustellen, werden Niederschlagsmessnetze betrieben. Dabei wird an diversen Standorten die Höhe des Niederschlags in Millimetern gemessen. Ein Millimeter entspricht einem Liter pro Quadratmeter horizontaler Fläche [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990]. Bodenmessnetze haben den Vorteil, dass sie an Stationsstandorten eine hohe absolute Genauigkeit des Niederschlags angeben können. Zudem ist ein grosser Teil der Aufzeichnungen der Niederschlagsmessstationen der MeteoSchweiz über klimatologische Zeiträume verfügbar [FREI ET AL. 2008].

2.2.1.a Punktniederschlag

Der Punktniederschlag entspricht dem Niederschlag, der mit Hilfe eines Gefässes punktuell gemessen wird. Die Punktmessungen werden in Niederschlagsmessnetze eingebunden. Bei der vorliegenden Arbeit werden Daten der Messnetze der MeteoSchweiz, des Kantons Luzern und des temporären Messnetzes des Geografischen Instituts der Universität Bern genutzt.

2.2.1.b Gebietsniederschlag

Der Gebietsniederschlag kann nach SPREAFICO & WEINGARTNER [2005] anhand von Abminderungsfaktoren, der Wasserbilanz oder einer Interpolation geschätzt werden.

Für hydrologische Studien werden die Punktmessungen auf eine Gebietsfläche bezogen betrachtet. Die Tiefe der bedeckenden Wasserschicht der horizontalen Projektion der Erdoberfläche definiert den Gebietsniederschlag [SEVRUK 2004]. Es handelt sich um ein Flächenmittel des Niederschlags, der während eines bestimmten Zeitraums auf ein Gebiet gefallen ist [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990]. Ist ein Bodenmessnetz als Grundlage für die Berechnung des Gebietsniederschlags vorhanden, wird versucht, die relativen Anteile der Gebietsfläche so zu gewichten, dass die Summe des realen Gebietsniederschlags möglichst wiedergegeben wird [SEVRUK 2004].

Bei der verwendeten Software "winmet" (siehe Kap. 5.2) werden zur Interpolation des Niederschlags die IDW (Inverse Distance Weighted) und die Kriging Methode empfohlen [VIVIROLI ET AL. 2007]. SOENARJO &

SLUITER [2010] kommen zum Schluss, dass die Ordinary Kriging Methode der IDW Interpolation vorgezogen werden soll, da bei dieser Interpolation nicht nur eine einfache Funktion, sondern ein Variogramm zur Distanzgewichtung genutzt wird. Neben der verschiedenartigen Berechnung der Gebietsniederschläge bestehe der augenscheinlich grösste Unterschied von Kriging und IDW darin, dass bei IDW Interpolationen "bull's-eye pattern" auftreten können. Dieses Phänomen tritt bei allein stehenden Punktmessungen auf, deren Messwerte stark von der Umgebung abweichen. Die Punkt-Kriging Methode kommt zudem in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung, da nach einer Evaluation verschiedener Interpolationsmethoden von Starkniederschlagskarten bei GEIGER ET AL. [1991], diese als geeignet befunden wurde.

Bei der Kriging Methode wird die räumliche Variabilität durch eine stochastische Funktion beschrieben [BURROUGH & McDONNELL 1998]. Hierbei wird ein Variogramm verwendet, um räumliche Korrelationen zu charakterisieren. Ein Variogramm beschreibt in Bezug auf Varianzen, wie sich räumliche Variabilität als eine Funktion von Distanz und Richtung ändert [ISAAKS & SRIVASTAVA 1989]. Eine ausführliche Beschreibung der Kriging Methode findet sich z.B. in HENGL T. [2009] und ISAAKS & SRIVASTAVA [1989]

Der Messfehler bei der Bestimmung des Gebietsniederschlags ist von den Anzahl Messstationen und der Dauer des zu untersuchenden Zeitabschnitts abhängig. Die Güte einer Punktmessung bezüglich des Gebietsniederschlags wird zusätzlich von der lokalen und regionalen Topografie, den atmosphärischen Prozessen und der Positionierung der Messpunkte beeinflusst [SEVRUK 2004].

2.2.1.c Messfehler

Die folgenden Messfehler beziehen sich auf die Niederschlagsmessung mit einem Bodenmessnetz. Die Genauigkeit der verschiedenen Niederschlagsmessgeräte, die im Untersuchungsgebiet eingesetzt werden, werden in Kap. 4.1.2.c näher beschrieben und in Kap. 6 bewertet.

Systematische Abweichungen

Alle Niederschlagsmessungen mit Bodenmessstationen sind systematischen Messfehlern unterworfen. Diese entstehen hauptsächlich durch Störung des Windfeldes, Haftwasser- und Benetzungsverluste und durch Spritzwasser [SEVRUK 2005]. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Fehlerquellen kurz beschrieben.

Wind:

Ein Niederschlagsmessgerät auf einer beliebigen Höhe über dem Boden verändert das Windfeld um den Messzylinder und erhöht die Windgeschwindigkeit über der Öffnung, sodass ein Teil der Nieder-

schlagspartikel nicht aufgefangen wird. Dieses Phänomen ist auch bekannt als Blockwirkung. Leichtere Niederschlagspartikel werden dabei vor dem Erreichen des Trichters vom Wind verfrachtet. Die durch Wind verursachte Unterschätzung des Niederschlags wird grösser bei höheren Windgeschwindigkeiten, tiefen Niederschlagsintensitäten, Installation der Stationen in grosser Höhe über dem Boden und an exponierten Standorten [SEVRUK 2005]. Der Verlust durch Windeffekte beträgt im Durchschnitt rund 2-10 % des gemessenen Regenniederschlags und kann sich bei Schneefall bis auf 60 % erhöhen [WMO 1998]. Bei MANIAK [2005] wird der Fehleranteil durch Windeinfluss auf ca. 5 % geschätzt.

Haftwasser- und Benetzungsverluste:

Adhäsive Kräfte und Verdunstung wirken auf das Wasser im Messtrichter. Daraus ergeben sich Haftwasser- und Verdunstungsverluste [SEVRUK 2004]. Das an der Wand und dem Boden haftende Wasser ist ebenfalls als Verlust zu bezeichnen. Dieser Effekt tritt verstärkt bei Kunststofftrichtern auf [DINGMAN 2001]. Dieser Fehler wird bei MANIAK [2005] mit 2 bis 5 % angegeben. Bei starker Sonneneinstrahlung können die Haftwasserverluste bis zu 10 % betragen [SEVRUK 2004].

Spritzwasser:

Spritzwasserüberschüsse treten vor allem bei bodenebenen Niederschlagsmessgeräten auf. Hohe Intensitäten und Tropfengrössen, die grosse Rückprallhöhen verursachen und die Niederschlagsmessung auf der Standardhöhe von 1.5 m beeinflussen könnten, sind in Mitteleuropa sehr unwahrscheinlich [SEVRUK 2004]. Der Aufbau des Niederschlagsmessgerätes sollte auch vor Spritzwasserverlusten schützen. Dies kann erreicht werden, wenn die vertikale Seitenwand oberhalb des Trichters genügend hoch ist und die Neigung des Trichters mindestens 45° überschreitet [WMO 2008].

Messung in Schräglagen:

Fehler entstehen auch bei der Niederschlagsmessung in Schräglagen. Die tatsächlich berechnete Fläche entspricht nur bei vertikalem Niederschlag der horizontalen Projektion. Andernfalls ist die Grösse der berechneten Fläche eine Funktion der Hangneigung und des Fallwinkels des Niederschlags [SEVRUK 2004].

Nicht-repräsentative Verteilung der Niederschlagsmessstationen:

Systematische Fehler können auch durch die nicht-repräsentative Verteilung der Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet auftreten. Ein Beispiel für eine nicht-repräsentativen Verteilung ist in der Schweiz die Untervertretung von Niederschlagsmessstationen in gebirgigen Lagen gegenüber Niederschlagsmessstationen in Tallagen [FREI ET AL. 2008].

Die systematischen Fehler ergeben in der Summe eine Unterschätzung von wenigen Prozenten. Im Vergleich mit den zufälligen Abweichungen sind sie unbedeutend [FREI ET AL. 2008]. Der systematische Messfehler unterscheidet sich je nach Region, Höhenlage und Jahreszeit. Er beträgt im Durchschnitt im Winter 15 %. Im Sommer liegt er, auf Grund der häufigen konvektiven Niederschlägen mit grossen und schweren Regentropfen, zwischen 5 % und 15 % [SEVRUK 2004].

Korrekturverfahren von systematischen Messfehlern:

Die gemessenen Niederschläge werden auf Grund des vorhandenen systematischen Messfehlers zum Teil korrigiert. Das Korrekturverfahren richtet sich nach dem Typ des Niederschlagsmessgerätes, der Windgeschwindigkeit und der Exposition. Für das EZG der Kleinen Emme werden mittlere Korrekturen von 100 bis 300 mm pro Jahr berechnet [SEVRUK & KIRCHHOFER 1991].¹ Für die höheren Lagen des Untersuchungsgebietes werden grössere Korrekturen empfohlen.

Die Grösse des Messfehlers ist von verschiedenen Faktoren abhängig, unter anderem vom Gerätetyp. Die Korrekturen werden für die von der MeteoSchweiz verwendeten Hellmann-Pluviometer durchgeführt [KIRCHHOFER & SEVRUK 1991]. Eine Korrektur mit demselben Verfahren ist für die verwendeten Young- und Rainwise-Wippen nicht zulässig.

Das von SEVRUK [1985] entwickelte Verfahren, welches im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) angewandt wird, bezieht sich auf Monatsmittelwerte. Die Korrektur des systematischen Messfehlers ist laut SEVRUK [1985] in der Schweiz für die mehrjährigen Monatsmittel möglich. Korrekturverfahren für Messintervalle von Stunden oder Tagen sind keine vorhanden. Bedingt durch die oben genannten Gründe, sind die verwendeten Niederschlagsmesswerte in dieser Arbeit nicht korrigiert.

Zufällige Abweichungen

Neben den erwähnten systematischen Messfehlern, treten auch zufällige Abweichungen auf. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Die Fläche der Öffnung des Messtrichters sollte der vom Hersteller definierten Form entsprechen. Diese muss vor dem Einsatz im Feld überprüft werden. Die Öffnung des Auffangtrichters sollte sich in waagrechter Position befinden, weil die Niederschlagshöhe, die auf eine horizontale Fläche auftrifft, den hydrologischen Input repräsentiert [DINGMAN 2001].

Es können Messfehler oder Messdatenausfälle durch den Einfluss des Beobachters und durch technische Störungen auftreten. Hier zu erwähnen sind falscher Zeitpunkt bei der Ablesung der Tages-

¹ Die Korrekturen beziehen sich auf die Messperiode von 1951-1980 [SEVRUK & KIRCHHOFER 1991].

sammler oder ungenügende Wartung der Geräte [WMO 2008]. Die Messfehler und die Datenausfälle während des Betriebs des temporären Messnetzes werden in Kap. 5.1.2 beschrieben.

Ein Bodenmessnetz generiert nur beschränkte Informationen über die tatsächliche Niederschlagsverteilung. Niederschlagsfelder enthalten feinskalige Zellen, die auch mit dem relativ dichten Messnetz der MeteoSchweiz nur unvollständig aufgezeichnet werden. Ein Hinweis auf die grosse Variabilität sind die teilweise grossen Differenzen in der Niederschlagsmessung von benachbarten Stationen [FREI ET AL. 2008]. Die Fehler bei den Bodenmessstationen treten vor allem im Gebirge auf, wo eine höhere räumliche Variabilität herrscht und die Anzahl der Stationen kleiner ist. Eine hohe Unsicherheit bei den Bodenstationen ist ebenfalls bei kleinräumigen konvektiven Niederschlägen zu verzeichnen [BEZZOLA & HEGG 2008].

2.2.2 Radar

Die Radarmessung (**R**adio **D**etection and **R**ange) wird bei der Wetterprognose verwendet, um Bewegung von Wolken und Niederschlagszellen zu identifizieren. Bei der Niederschlagsmessung wird die Stärke der von den Niederschlagsteilchen zurückgestreuten elektromagnetischen Wellen gemessen. Die empfangenen Wellen werden mit Hilfe der Radargleichung und des Radarreflektivitätsfaktors in eine Niederschlagsintensität umgerechnet. Es kann anhand der Echointensität auf die Grösse und den Typ der Niederschlagsteilchen und somit indirekt auf die Niederschlagsintensität geschlossen werden [SEVRUK 2004]. Eine detaillierte Beschreibung zur Niederschlagsmessung mit Radar in der Schweiz ist in JOSS & GERMANN [2000] und JOSS ET AL. [1998] zu finden. Das MeteoSchweiz-Radarnetz besteht aus drei Stationen (La Dôle, Albis, Monte Lema) und liefert im 5 min-Intervall Niederschlagskarten für die ganze Schweiz. Hierbei wird zusätzlich ein robustes statistisches Verfahren verwendet, um die Radarwerte an die Werte des Bodenmessnetzes anzueichen [METEOSCHWEIZ 2006].

Die Radardaten haben den Vorteil, dass sie in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verfügbar sind. Somit lassen sich bei Niederschlagsereignissen zeitliche Entwicklungen analysieren. Die nominelle Auflösung der Radardaten beträgt 1 km und 1 h und die effektive Auflösung weicht nur geringfügig von dieser Abweichung ab. Der Unterschied in der räumlichen Auflösung der Radarinformation (1 km²) und der Daten vom Bodenmessnetz (200 cm²) ist enorm, deshalb sind Niederschlagsmessungen erst ab einer genügend langen Zeitperiode vergleichbar. Dieser Zeitraum der Aufsummierung der Niederschlagswerte sollte die Dauer von 12 h übersteigen [BEZZOLA & HEGG 2008].

Messfehler

Ein grosser Nachteil der Radarmessung besteht in der grossen Unsicherheit der absoluten Niederschlagsmengen. Der systematische Fehler der Radaranalyse liegt unter 10 %. Der zufällige Messfehler mit einer räumlichen Auflösung von 1 km während 24 h liegt in der Schweiz durchschnittlich bei einem Faktor von 1.6. Der Faktor ist mit 1.6 bis 2 in den Alpen am höchsten und nimmt im Mittelland einen Wert von 1.4 an [BEZZOLA & HEGG 2008].

Die Alpen stellen eine grosse Herausforderung für diese indirekte Niederschlagsmessung dar. Auf Grund der Abschattung des Radarstrahls durch die Berge, ist die bodennahe Schicht der Atmosphäre nur in der Nähe der Radarstationen erkennbar. Da in den Alpen 2 bis 3 km der Atmosphäre zum Teil nicht sichtbar sind, werden in diesen Regionen Messwerte aus höher liegenden Schichten auf den Boden extrapoliert. Diese Korrektur des vertikalen Radarprofils trägt einen grossen Teil zu den oben genannten Unsicherheitsfaktoren bei [GERMANN ET AL. 2006].

Die Faktoren werden durch Vergleichsmessungen zwischen den Echtzeit-Radar-Niederschlagsschätzungen und den Messungen des Bodenmessnetzes eruiert. Diese Zahl stellt den Erwartungswert der zufälligen Fehler dar und kann im Einzelfall über- oder unterschritten werden. Die Unsicherheiten dürften in Realität etwas tiefer liegen, da die Unsicherheiten der Radarinformation gegenüber der Bodenmessung nicht nur durch Fehler in der Radarmessung entstehen, sondern auch durch Fehler bei den direkt messenden Niederschlagsmessgeräten. Die Radarmessung erfolgt über eine grössere Fläche als dies bei den Niederschlagsmessstationen der Fall ist. Somit besteht die Möglichkeit, dass die Bodenmessstation eine kleinere Niederschlagsmenge aufzeichnet, weil sie sich in einer gewissen Distanz zum Niederschlagszentrum befindet. In einer solchen Situation ist die Messung der Station für dieses Gebiet nicht repräsentativ: die Niederschlagsmenge wird unterschätzt.

Eine Echtzeit-Kalibrierung von Niederschlagsfeldern, die vom Radar detektiert werden, mit einer Bodenmessung ist nicht zu empfehlen und ergibt zum Teil schlechtere Resultate. Um eine höhere Genauigkeit der Niederschlagsmessung zu erzielen, werden die Radardaten den Bodenmessnetzdaten angeeicht. Für jede Radarstation wird ein Faktor benutzt. Der Faktor wird durch eine Überschneidung von Daten der Radar- und der Bodenstationen über ein langes Zeitintervall und einen grossen Raum berechnet. Bei diesem Vorgang werden die Werte von Bodenstationen und des Radars über sechs Monate integriert betrachtet [GERMANN ET AL. 2006].

Zusätzlich zu den oben genannten Fehlerquellen in der quantitativen Niederschlagsmessung mit Radar, werden Unsicherheiten auch verursacht durch Instabilität der Hardware, Bodenechos, Signalabschwächung bei starken Regenfällen, Signalabschwächung durch Wasser auf der Radarkuppel und

durch die Variation in der Regentropfengrößenverteilung. Eine vollständige Aufzählung und Erklärungen der Unsicherheiten der quantitativen Niederschlagsmessung mittels Radar finden sich in GERMANN ET AL. [2006], JOSS & GERMANN [2000] und JOSS ET AL. [1998].

2.2.3 Kombierter Datensatz: Radar und Bodenmessnetz

Durch die Niederschlagsmessung mit konventionellen Niederschlagsmessgeräten erhält man relativ genaue Punktwerte, die mit der Radarmessung nicht erreicht werden können. Die Radardaten haben aber den Vorteil, dass sie eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung wiedergeben. Die Daten der beiden Messmethoden werden im Datensatz von WÜEST ET AL. [2009] zusammengeführt. Der Datensatz wird in den folgenden Kapiteln mit "Radar Mt.CH" abgekürzt.

Dieser Rasterdatensatz basiert auf einer gegitterten Niederschlagsanalyse von täglichen Niederschlagssummen des Bodenmessnetzes von MeteoSchweiz. Die Interpolation wird mit einer modifizierten Variante des SYMAP-Algorithmus von SHEPARD [1984] durchgeführt. Ein lokaler Gebietsniederschlag wird durch Gewichtung von Niederschlagsmessungen eines festgelegten Radius um einen Gitterpunkt bestimmt. Die Gewichtung bezieht die Entfernung zum Standort der Messung und die Isolation der Stationen mit ein. Den Ansammlungen von Niederschlagsmessungen in einer Richtung des Gitterpunktes werden weniger Gewicht beigemessen. Ebenfalls wird der Radius an die Dichte des örtlichen Niederschlagsmessnetzes angepasst [FREI & SCHÄR 1998]. Nähere Angaben zur Analyse der Daten des Bodenmessnetzes und des SYMAP-Algorithmus können unter FREI ET AL. [2006] und FREI & SCHÄR [1998] gefunden werden.

Der Rasterdatensatz der Tagesniederschläge wird anhand stündlicher Sequenzen der Radaranalyse disaggregiert. In dem so erstellten Datensatz "Radar Mt.CH" ist somit die hohe zeitliche und räumliche Auflösung des Radars und die hinsichtlich der Niederschlagsmengen zuverlässigen Informationen des Bodenmessnetzes der Niederschlagsstationen enthalten. Die räumliche Auflösung des Datensatzes, welcher die Jahre 1992-2006 umfasst, beträgt 2 km. Die Daten werden in dieser Arbeit in einer grafischen Auflösung von 100 x 100 m dargestellt.

Zur Evaluierung wurden die automatischen Niederschlagsmessgeräte der MeteoSchweiz genutzt. Wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, ist ein Rasterpunkt nicht direkt mit einer Datenreihe einer Station vergleichbar. Das primäre Ziel des Vergleichs ist es, Informationen zur Zuverlässigkeit der Daten in Hinsicht auf die zeitliche Verteilung zu erhalten. Diese zeitlichen Variationen werden von den Radardaten eingebracht. Die Unsicherheit ist in den alpinen Tälern höher als im Mittelland. Für die automatische Messstation Napf, die sich in unmittelbarer Nähe des Einzugsgebiets der Kleinen Emme befindet, wur-

den im Vergleich des stündlichen Niederschlags für die Periode von 1992-2003 im Sommer eine durchschnittliche Differenz von 10 bis 15 % und im Winter eine Differenz von 15 bis 20 % errechnet [WÜEST 2009].

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Choix du bassin versant [Amiguet 2010]

Trois bassins-versants ont fait l'objet d'une courte étude afin de déterminer lequel est le plus adapté pour la densification du réseau de mesures en vue d'un système de prévention contre les crues. Ces trois bassins sont la Sense à Thörishaus, l'Emme à Eggiswil et la Kleine Emme à Werthenstein. Le réseau de stations et leurs périodes de mesures, ainsi que le temps de concentration, le débit moyen, la surface et le régime sont documentés pour chacun des trois bassins. A ceci s'ajoute un commentaire sur les éventuelles études déjà parues, les systèmes d'alarmes en fonction et les avantages et inconvénients du bassin pour notre étude.

Les bassins-versants de la Sense et de l'Emme sont déjà équipés d'un système d'alarme. Ces deux bassins disposent moins de stations de mesure en service que celui de la Kleine Emme. C'est entre autre les raisons pour lesquelles le bassin-versant de la Kleine Emme est favori. De plus, il bénéficie d'un réseau de stations pluviométriques relativement dense avec six stations en fonction et une station supprimée. En plus de la station de Werthenstein, le débit est aussi mesuré sur la Waldemme à Sörenberg par le Canton de Lucerne.

Suite aux événements de 2005 qui ont causé beaucoup de dégâts, un projet de renaturalisation est mis en place. Dans le cadre de ce projet, un système d'alarme contre les crues doit être installé. Pour l'instant les démarches pour la création de ce système n'ont pas encore été entamées. Le Service Transport et Infrastructure (Verkehr und Infrastruktur (vif)) du Canton de Lucerne est intéressé par une collaboration avec notre projet. Le Service Environnement et Energie (Umwelt und Energie (uwe)), qui gère les stations pluviométriques et du débit dans le Canton de Lucerne est prêt à mettre à notre disposition les données mesurées. Le temps de concentration calculé à l'aide de la formule de KIRPICH [1940] est de 3.71 heures pour le bassin-versant de la Kleine Emme, il est un peu plus long que les deux autres bassins et permet une plus grande marge de manœuvre en cas de crue. La formule de KIRPICH [1940] est plus robuste que celles de DYCK & PESCHKE. [1989], DIEZIG [2006] ou Kreps dans HELBLING ET AL. [2006], car elle tient compte de la longueur du cours d'eau et de la différence d'altitude qu'il parcourt et pas seulement de la surface du bassin-versant.

Finalement, la Kleine Emme s'écoule dans une région qui est souvent menacée par des orages qui provoquent des montées rapides du débit.

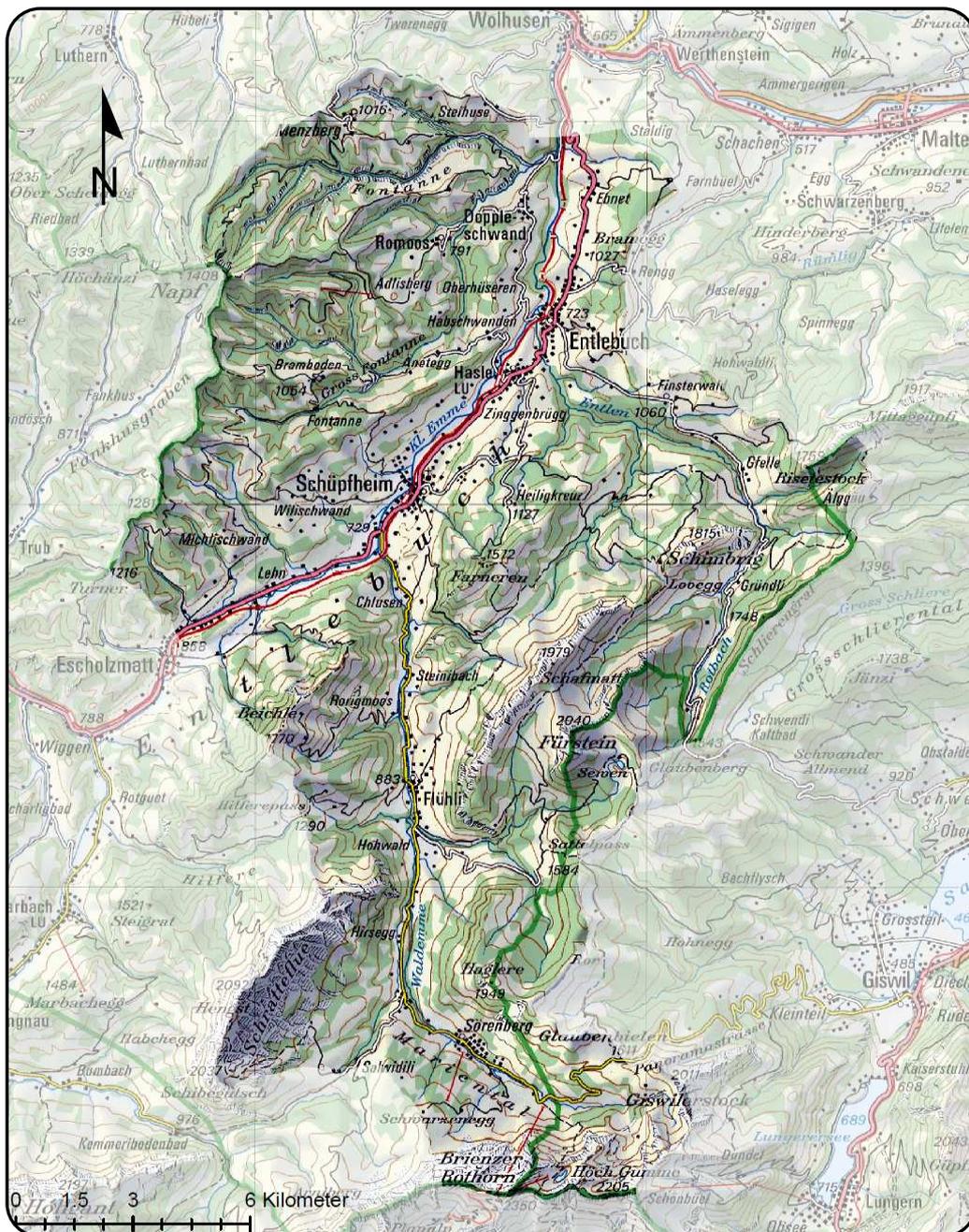
Les éventuelles difficultés relevées sont :

- a) la région karstique dans la partie nord-ouest du bassin

- b) la période de mesure des stations cantonales relativement courte
- c) le fait que la station de mesure du débit de Sörenberg n'est pas validée pour des grands débits.

3.2 Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme [Masson 2010]

Als Untersuchungsgebiet für die vorliegende Arbeit dient das Einzugsgebiet der Kleinen Emme bis zum Pegel Werthenstein. Diese Forschungsregion erstreckt sich über eine Fläche von rund 311 km², wes-



3-1: Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Kartengrundlage: swisSTOPO [2010].

halb diese Landschaft als mittelgrosses EZG klassiert wird [SCHÄDLER 1991]. Das Quellgebiet der Waldemme liegt am Nordhang des Briener Rothorns oberhalb von Sörenberg.

Mit einer mittleren Höhe von 1173 m.ü.M liegt dieses Einzugsgebiet in der Übergangszone von Mittelland und Voralpen. Im Süden begrenzt die Bergkette um das Briener Rothorn (2350 m.ü.M.) das EZG und im Westen stellt der Napf (1410 m.ü.M.) einen markanten Punkt der EZG-Grenze dar. Im Osten verläuft die Wasserscheide über den Giswiler Stock (2011 m.ü.M.) [UWE 2010]. Die Hauptwasserläufe lassen sich wie folgt beschreiben (Abb. 3-1): Im Quellgebiet, beim sogenannten Emmensprung auf 1467 m.ü.M, entspringt die Waldemme, die flussabwärts durch die Einmündung des Südelgrabens ergänzt wird. Mit der Einmündung der Wiss Emme in die Waldemme kurz vor Schüpfheim ändert sich der Name des Flusses. So entsteht der für das Einzugsgebiet bestimmende Name der Kleinen Emme. Bei der Abflussmessstation Werthenstein verlässt die Kleine Emme das Untersuchungsgebiet und mündet schlussendlich bei Luzern in die Reuss.

Für hydrologische Forschungsarbeiten, ist unter anderem die Bodenbedeckung eines Einzugsgebietes von grosser Relevanz. In der Abb. 3-2 sind die vier Hauptkategorien der Arealstatistik dargestellt [BFS 2001]. Die Anteile an bestockten Flächen (42.48%) und Landwirtschaftsflächen (46.92 %) fallen im vorliegenden Einzugsgebiet jeweils um 10 % höher aus, als im Schweizer Durchschnitt. Die Siedlungsfläche hingegen umfasst gerade mal 3.02 %, was knapp der Hälfte des eidgenössischen Durchschnittes entspricht. Diese Verteilung der Bodennutzung zeigt ein typisches Bild einer voralpinen Region auf. Auch das dominierende

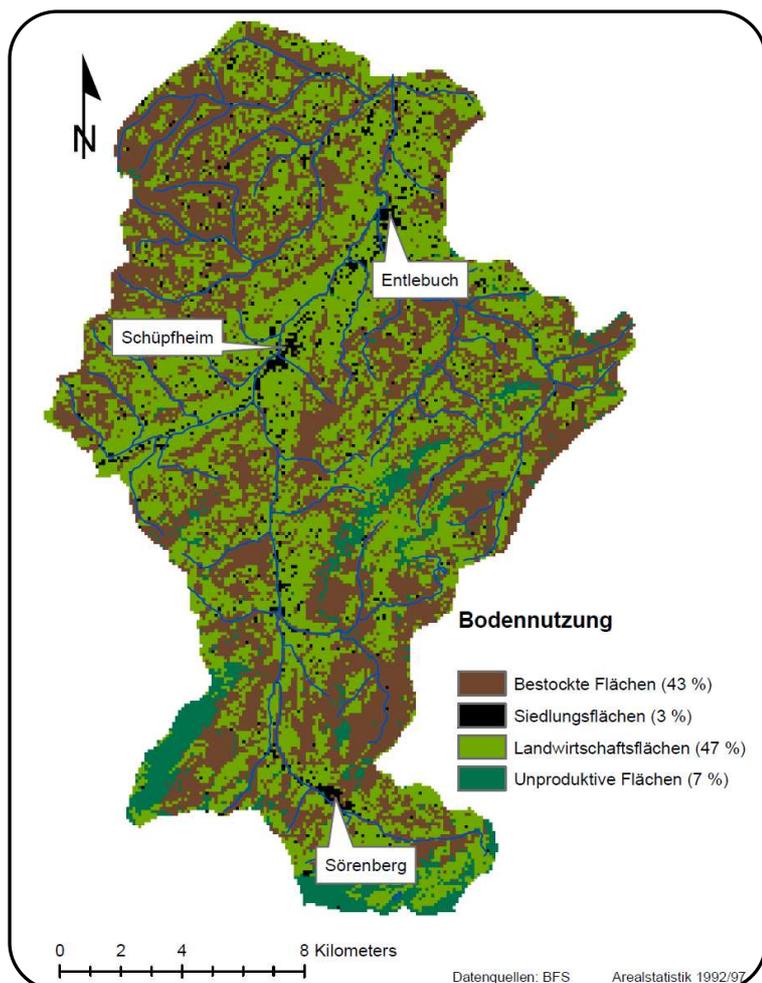


Abb. 3-2: Bodennutzungskarte des Einzugsgebietes der Kleinen Emme.

Quelle: BFS [2001].

Landschaftsbild der Landwirtschaftsflächen verdeutlicht den ländlich geprägten Charakter dieser Landschaft in der Zentralschweiz. Der Anteil von 7.57 % unproduktiver Fläche (Schweiz: 25.5 %) beschränkt sich auf die Höhenzüge im Einzugsgebiet der Kleinen Emme.

3.3 Geologie und Geomorphologie [Masson 2010]

Betrachtet man den geologischen Untergrund der Region Entlebuch, lassen sich unterschiedliche Molasseschichten erkennen und zeitlich einordnen. Der Begriff der Molasse beschreibt geologische Ablagerungen im Vorland eines Gebirges während dessen Entstehung [LABHART 2009]. Die Untere Meeresmolasse (UMM) entstand vor 35 bis 30 Millionen Jahren. Schlammströme und Murgänge führten zu Ablagerungen von Sandstein auf dem Grund des Restmeeres im Mittelland. Zudem führten ruhige Zeitphasen zur Sedimentation von feinen Mergelschichten. Durch das schnellere Heben der Alpen vor 30 Mio. Jahren, wurde mehr Gestein an der Oberfläche abgetragen und im nördlichen Molassegebiet wieder akkumuliert. Durch die Verlandung des Meeres entstand eine Flusslandschaft. Die daraus entstandene Untere Süsswassermolasse (USM) ist aus grobkörnigem Material aufgebaut. Noch heute sind Nagelfluhbänke dieser Molasseschicht an der Beichlen zu sehen (Abb. 3-3). Die Tatsache, dass die USM an der Erdoberfläche zu sehen ist, kann mit dem weiteren Vorrücken der Alpen erklärt werden. Heutzutage kann nachgewiesen werden, dass durch Stauchung und Verschiebung der geologischen Strukturen Molasseschichten bis zu 4000 m herausgehoben wurden [ZEMP 2005]. 20 bis 18 Mio. Jahre vor der heutigen Zeit, wurde die USM von einem, durch die fortschreitende Hebung der

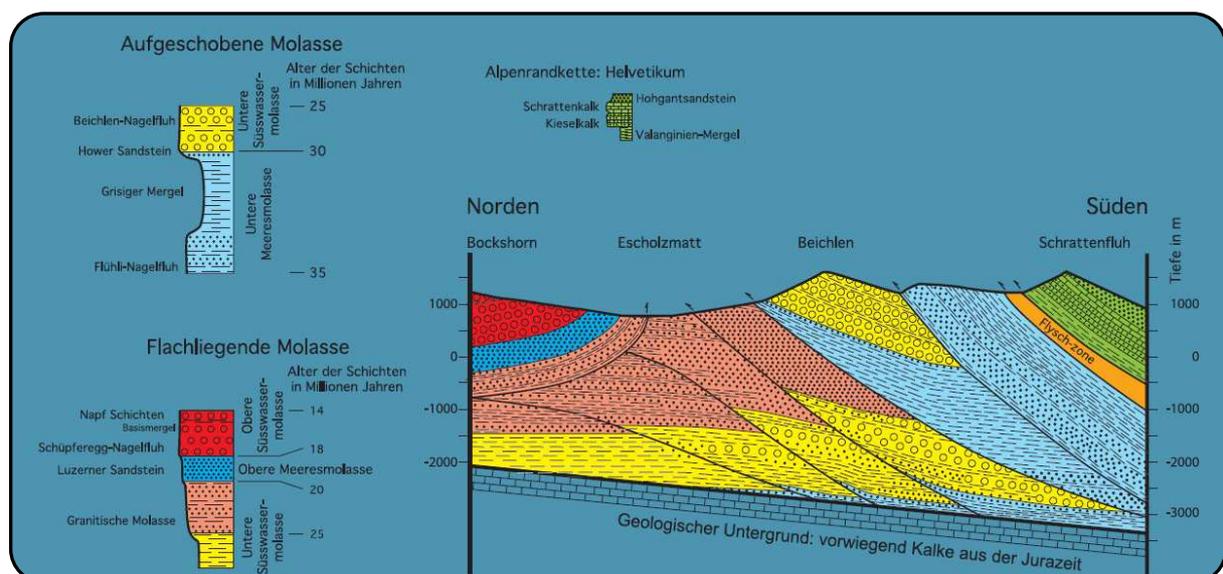


Abb. 3-3: Molasseschichten im Entlebuch. Quelle: Schlunegger [2006].

Beichlen-Schichten gebildeten Meer überflutet. Wiederum kam es in der Folge zu Ablagerungen von feinen Sandsteinen. Diese, durch brandende Wellen und Gezeitenströme umgelagerte Molasseschicht,

nennt man Obere Meeresmolasse (OMM). Als Folge der fortschreitenden Alpenfaltung, wurde das Meer wieder mit Schutt gefüllt. In dieser Zeit (vor 18 bis 14 Mio. Jahren) bildeten sich die Obere Süswassermolasse (OSM) und auch wieder Nagelfluhbänke. Auch die Bildung des Napfschuttfächers als Ablagerungsort des Napfflusses (Uraare) lässt sich in diese Zeit einordnen [ZEMP 2005]. Ein weiterer Vorschub der helvetischen Decke löste ein Überfahren der bereits abgelagerten Molasseschichten aus. Durch das Überschieben wurden am nördlichen Alpenrand die Molasseschichten verfaltet oder in Späne und Schuppen aufgetrennt. Die so entstandene subalpine Molasse prägt mit „langgestreckten Höhenzügen, in denen [sich] kahle, schiefgestellte Nagelfluhrippen mit bewachsenen Mergellagen abwechseln“ das charakteristische Landschaftsbild im Entlebuch [LABHART 2009].

Während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), 28'000 bis 10'000 Jahre vor heute, war das Entlebuch von einer Eisschicht bedeckt. Der Waldemmegletscher bedeckte grosse Teile des Tales und teilte sich nach der Lammschlucht in zwei Zungen auf. Eine Gletscherzunge bewegte sich in Richtung Entlebuch, während der andere Ausläufer auf das heutige Wiggen zufluss. Die geglättete Geomorphologie, aber auch Moränenwälle zeugen noch heute von diesen formbildenden Prozessen. Ein Kontrast zu diesen Landschaftsformen bildet die Napfregion. Da dieses Gebiet während des LGM nur teilweise von Eis bedeckt war, konnten die Fliessgewässer um den Napf durch Erosion tiefe Schluchten bilden (z.B. Fontanne) [SCHLUNEGGER 2006].

Für hydrologische Untersuchungen relevant ist das Vorkommen von Karst. Gerade in der Frontzone der helvetischen Decke entstehen oft Karstgebiete. Die Karstmorphologie stellt ein Teilgebiet der Geomorphologie dar, wobei der Begriff Karst einen Landschaftstyp mit folgenden Charakteristiken beschreibt. Karstgebiete weisen lösliche Gesteine auf, die mit Wasser oder wässriger Lösung reagieren und es zu Lösungsformen kommen kann. Zu diesen Gesteinen gehören der Kalkstein und der Gips. Für hydrologische Untersuchungen solcher Regionen ist die unterirdische Entwässerung ein wesentlicher Punkt. Spezifische Oberflächenformen wie zum Beispiel Dolinen oder Höhlen lassen auf das Vorhandensein von Karst schliessen [FUB 2007]. Die meisten Karstlandschaften entstanden in einem feuchten Klima. Das Wasser verwitterte über Jahrtausende das Gestein und schuf so die typischen Karren und Schratzen der Karstgebiete. Die Schratzenfluh im Westen des Untersuchungsgebiets zählt zu den grösseren Karstgebieten der Schweiz [LABHART 2009].

3.4 Klima

Das Klima ist „die für einen Ort, eine Landschaft oder einen grösseren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsbedingungen während eines längeren Zeitraumes von charakteristischer Verteilung der

häufigsten, der mittleren und der extremen Werte“ [BLÜTHGEN 1980]. In diesem Kapitel wird vorwiegend der Parameter Niederschlag betrachtet.

Temperatur

Die mittlere jährliche Temperatur variiert von rund 8.5 °C beim tiefstgelegenen Bereich in der Nähe der Abflussmessstation Werthenstein bis zu -0.5 °C auf dem Briener Rothorn. Die geschätzte mittlere Temperatur in Entlebuch beträgt 8 °C und in Flüfli 7 °C [ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 2004].²

Jahresniederschlag

Der mittlere Jahresniederschlag während der Messperiode von 1901 bis 2009 beträgt bei der Station Flüfli 1646 mm (Abb. 3-4) und bei der Station Entlebuch 1426 mm. Die genannten Niederschlagstagesammler sind die einzigen Messgeräte im Untersuchungsgebiet mit langjährigen Aufzeichnungen. Im ATLAS DER SCHWEIZ [2004] ist eine Karte mit mittlerem Jahresniederschlag während der Messperiode von 1971 bis 1990 in digitaler Form präsentiert (Abb. 3-7). Der mittlere Jahresniederschlag betrug während der Messperiode von 1971 bis 1990 zwischen 1300 und 2000 mm. Die niederschlagsärmsten Gebiete mit 1300 mm Niederschlag befinden sich im tiefer gelegenen nördlichen Randgebiet und im Haupttal von Entlebuch nach Escholzmatt. Generell lässt sich in höheren Lagen eine Zunahme des Jahresniederschlags feststellen. Beim höchsten Punkt im Kanton Luzern, dem Briener Rothorn, wird eine Niederschlagsmenge von rund 1800 mm angenommen. Die höchsten Niederschlagsmengen treten im Südwesten am Osthang der Schratzenfluh und in der Umgebung der südöstlichen Erhebung rund um den Fürstein auf. In diesen Regionen beträgt der Jahresniederschlag rund 2000 mm.

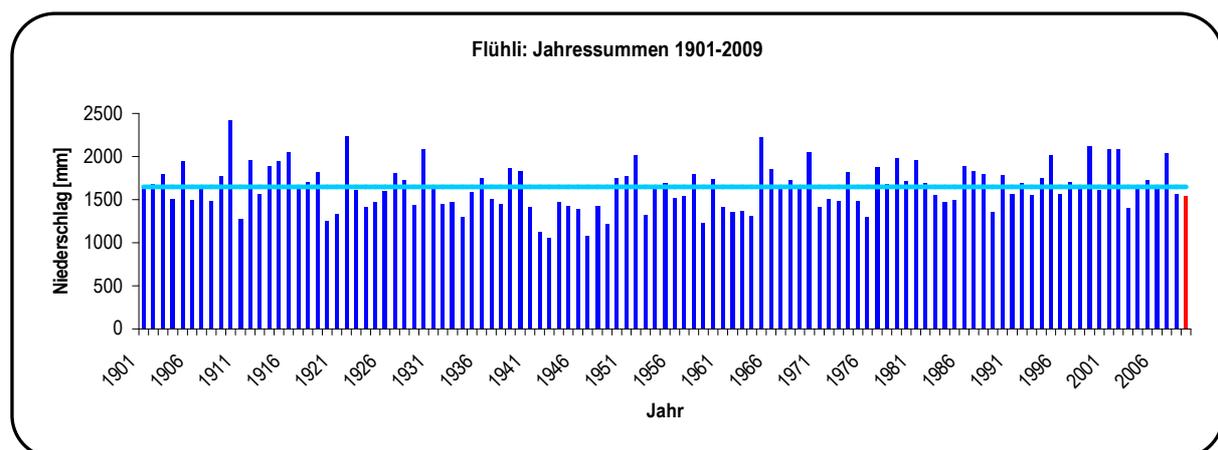


Abb. 3-4: Jahressummen des Niederschlags der MeteoSchweiz-Station Flüfli von 1901-2009. Das Jahr 2009 ist als roter Balken dargestellt. Die hellblaue horizontale Linie stellt den langjährigen Mittelwert dar. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ.

² Die mittleren jährlichen Temperaturen beziehen sich auf den Zeitraum von 1961-1990 [ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 2004].

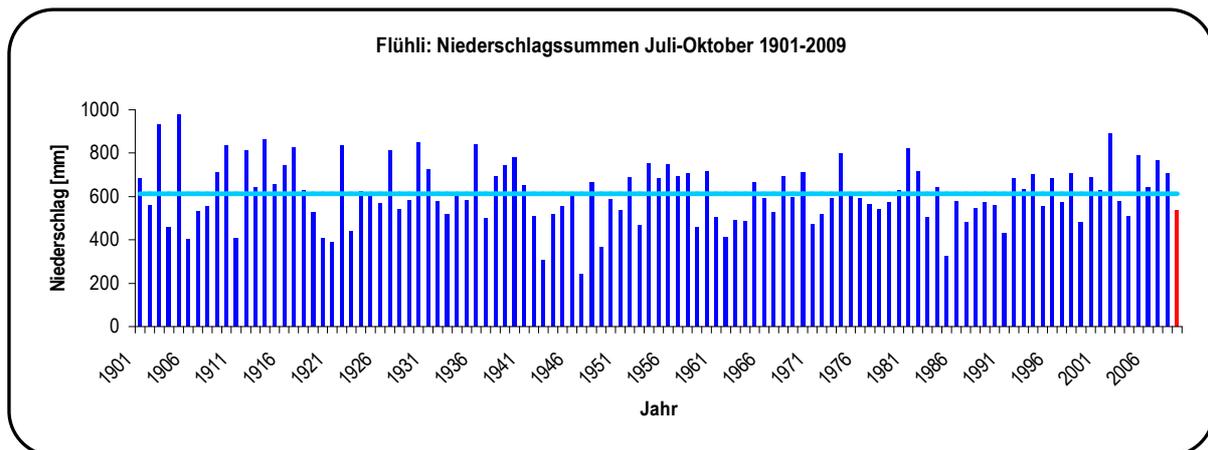


Abb. 3-5: Niederschlagssummen der MeteoSchweiz-Station Flühli der Monate Juli bis Oktober von 1901-2009. Das Jahr 2009 ist als roter Balken dargestellt. Die hellblaue horizontale Linie stellt den langjährigen Mittelwert dar. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ.

Die Niederschlagssumme während der Betriebsperiode des temporären Messnetzes von Juli bis Oktober 2009 beträgt 539 mm in Flühli³ (Abb. 3-5) und 503 mm in Entlebuch. Somit liegt die Niederschlagssumme der Messperiode vom Juli bis Oktober 2009 rund 12 % [Station Flühli] bzw. 7 % [Station Entlebuch] unter dem langjährigen Mittelwert. Die Niederschlagsstation in Flühli liegt auf einer Höhe von 928 m.ü.M. und somit rund 200 m höher als die Station Entlebuch.

Starkniederschläge

Die Verteilung der Niederschläge und insbesondere der Starkniederschläge werden im ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 [2004] publiziert. Auf der Karte sind die Anzahl Starkniederschläge dargestellt, die 70 mm innerhalb eines Tages überschreiten (Abb. 3-6). Als Grundlage der Niederschlagskarte dienen die Tagesmessungen der Niederschlagsstationen der MeteoSchweiz von 1901 bis 1980. Die Karte wurde anhand von interpolierten Niederschlagsdaten angefertigt und stellt somit nicht die reale Anzahl Ereignisse über die Fläche verteilt dar, sondern ist als eine Annäherung an die Wirklichkeit zu verstehen. Das Untersuchungsgebiet lässt sich somit in drei Teilregionen unterteilen. In der Region 1, dem nördlichsten und tiefstgelegenen Teilgebiet, wurden während der Untersuchungsperiode fünf bis zehn Starkniederschlagsereignisse aufgezeichnet. Im Teilgebiet 2 wurden zwischen 10 und 20 Ereignisse gemessen. In der dritten Region waren mehrheitlich 20 bis 30 Starkniederschlagsereignisse zu verzeichnen. Im östlichsten Teil der Region 3, im Oberlauf der Grossen Entle, wurden 30 bis 50 Ereignisse geschätzt. Die unterschiedliche Häufigkeit des Auftretens von Extremereignissen lässt auf eine grosse räumliche Variabilität des Niederschlags im EZG der Kleinen Emme schliessen.

³ Es sind keine Messwerte vom 1.8.2009-15.8.2009 der Niederschlagsstation Flühli vorhanden. Die Werte dieser Periode wurden anhand von interpolierten Niederschlagsdaten (Datensatz: "Messnetz 2009") ergänzt und mit den Daten der nahe gelegenen Messstation Salzbüel (G) verglichen.

Gewitterhäufigkeit

Im Untersuchungsgebiet ist die Häufigkeit der Gewitter mit 30 bis 35 Tagen pro Jahr grösser als im schweizerischen Durchschnitt [20-30 Tage]. Insbesondere im Sommer kann eine erhöhte Anzahl Gewitter im EZG [20-25 Tage] im Vergleich zum Mittelland [15-20 Tage] beobachtet werden [ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 2004].⁴

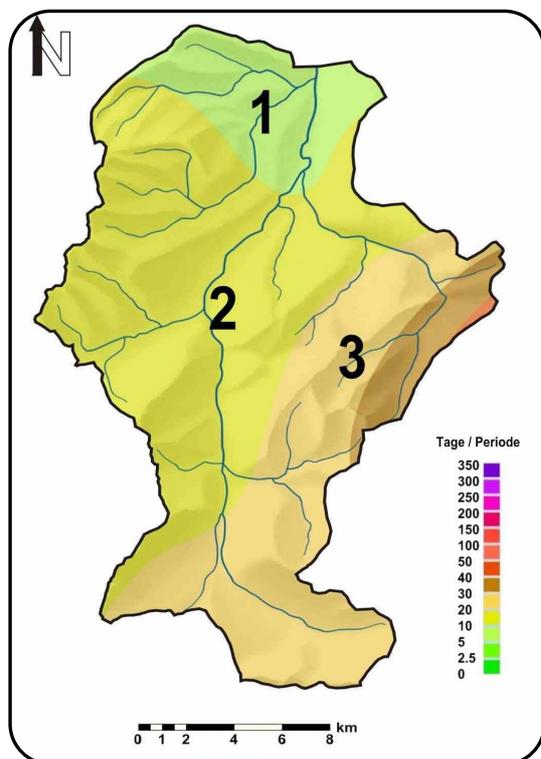


Abb. 3-6: Anzahl Tage mit Starkniederschlag ≥ 70 mm während der Messperiode von 1901-1980. Kartengrundlage: ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 [2004].

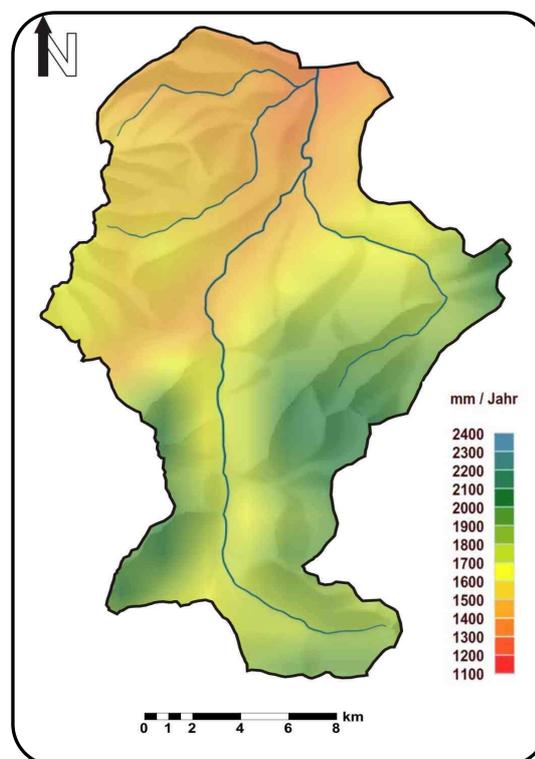


Abb. 3-7: Mittlerer Jahresniederschlag während der Messperiode von 1971-1990. Kartengrundlage: ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 [2004].

Wiederkehrperiode Niederschlagsintensität

Im Niederschlagsintensitäts-Diagramm sind die Niederschlagsintensitäten in Abhängigkeit von Wiederkehrperioden und Messintervall dargestellt (Abb. 3-8). Das Diagramm, welches auf Daten der Niederschlagsmessstation Flühli der Periode 1901 bis 1970 basiert, zeigt, dass die Intensität des Niederschlags mit zunehmender Dauer abnimmt. Zu beachten ist, dass sich die Wiederkehrperioden auf Punktniederschläge beziehen und nicht auf Gebietsniederschläge angewendet werden können, da gemäss GREBNER ET AL. [1999] die Niederschlagsmenge mit zunehmender Distanz zum Niederschlagszentrum abnimmt. Dies hat zur Folge, dass ein Gebietsniederschlag kaum die maximale Intensität eines Punktniederschlags annehmen kann. Ein Tagesniederschlag in Flühli mit 2.33 jähriger Wiederkehrperiode hatte während der Periode 1901 bis 1970 eine Intensität von 2.8 mm/h, was rund 67 mm

⁴ Gewitter der Periode 1931-1980 im Untersuchungsgebiet: an 30 bis 35 Tagen pro Jahr. Im Sommer werden durchschnittlich an 20 bis 25 Tagen Gewitter beobachtet [ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 2004].

pro Tag entspricht. Bei einem hundertjährigen Ereignis wurde eine Intensität von 5.3 mm/h festgestellt, die einen Tagesniederschlag von 127 mm ergeben. In Entlebuch entsprach ein Tagesniederschlag mit 2.33 jähriger Wiederkehrperiode einer Intensität von 2.7 mm/h und einer Summe von rund 65 mm. Bei einem hundertjährigen Ereignis wurde mit einer Intensität von 5.0 mm/h und einem Tagesniederschlag von 120 mm gerechnet.

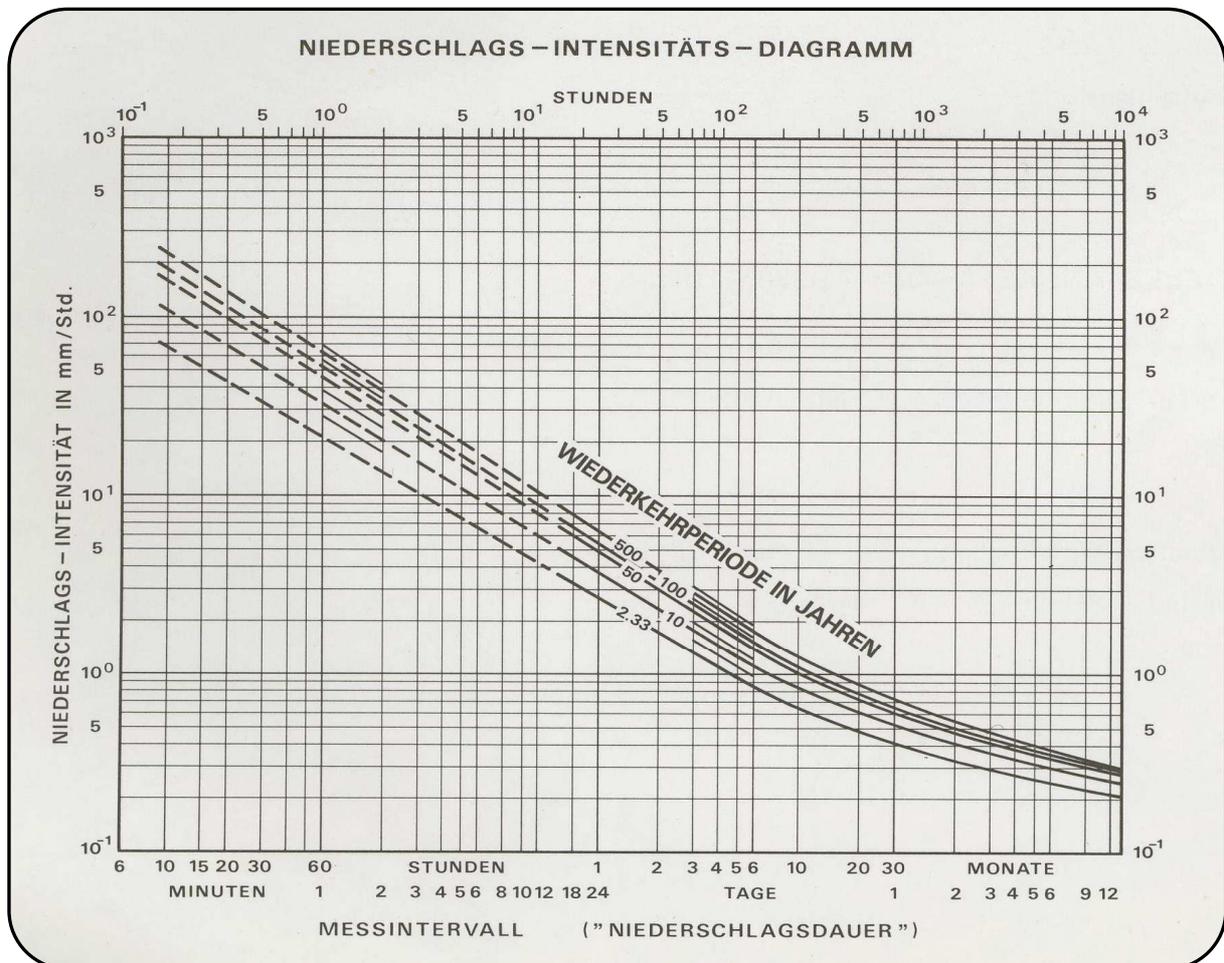


Abb. 3-8: Niederschlagsintensitäts-Diagramm der Messstation Flüeli von 1901-1970. Quelle: GEIGER ET AL. [1978].

3.5 Hydrologique [Amiguet 2010]

Ce chapitre décrit les caractéristiques hydrologiques du bassin-versant de la Kleine Emme en amont de la station LH2487 Werthenstein, Chappelboden.

Fiche technique du bassin-versant

Dans le Tab. 3-1 nous considérons le bassin-versant topographique. Le bassin-versant hydrogéologique est un peu différent à cause de la partie karstique en amont du bassin-versant. Une partie des

précipitations tombées sur le bassin-versant topographique est drainée par la roche poreuse jusqu'au lac de Thoune [SCHÄDLER & WEINGARTNER 1992] et n'atteint donc jamais l'exutoire à la station de la Kleine Emme.

Tab. 3-1: Caractéristiques générales du bassin versant de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein. [OFEV 2010].

Coordonnées de la station	647 870 / 209 510
Altitude de la station [müM]	540
Surface [km ²]	311
Périmètre [km]	97
Altitude moyenne du bassin versant [müM]	1173
Altitude max [müM]	2349
Surface occupée par les glaciers [%]	0
Longueur du cours d'eau principal (avec Waldemme) [km]	37

Réaction du bassin-versant de la Kleine Emme aux crues de 2005

Pour un grand nombre de stations du réseau hydrométrique suisse, un nouveau record a été enregistré au mois d'août 2005. C'est le cas de la station LH2487 Werthenstein, Chappelboden (Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Valeurs records enregistrées aux stations Kleine Emme - Werthenstein et Littau en 2005 [OFEG 2005].

	Événement août 2005			Plus grands valeurs jusqu'à lors		
	Debit de pointe	Date	Temps de retour	mesure	Debit de pointe	Date
	[m ³ /s]		[Annees]		[m ³ /s]	
Werthenstein	644	21.08.2005	50-100	1985	400	16.07.2002
Littau,	764	22.08.2005	100-200	1978	570	16.07.2002

La station de la Kleine Emme à Werthenstein est la première à avoir enregistré un pic de crue remarquable le 21 août 2005 au soir. La grande quantité d'eau que la Kleine Emme a transféré jusqu'à la Reuss est en partie responsable du pic à la station Mühlau le 22 août 2005 au matin (Abb. 3-9).

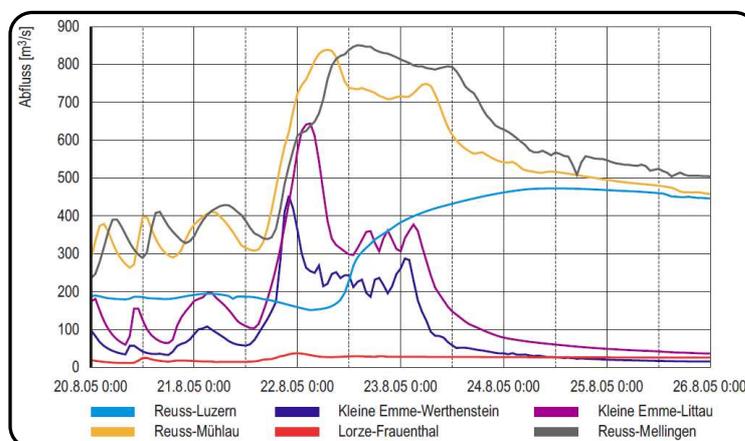


Abb. 3-9: Hydrogrammes de crue des cours d'eau du bassin-versant de la Reuss [BEZZOLA & HEGG 2007]

Temps de retour de la crue de 2005

Selon l'OFEV [2009b] la Kleine Emme a réagi aux intempéries du mois d'août 2005 avec une crue d'un temps de retour estimé entre 20 et 50 ans (Abb. 3-10). En 2005, le rapport sur les crues de 2005 de l'OFEG [2005] estimait ce temps de retour entre 50 et 100 ans, il a donc été revu à la baisse.

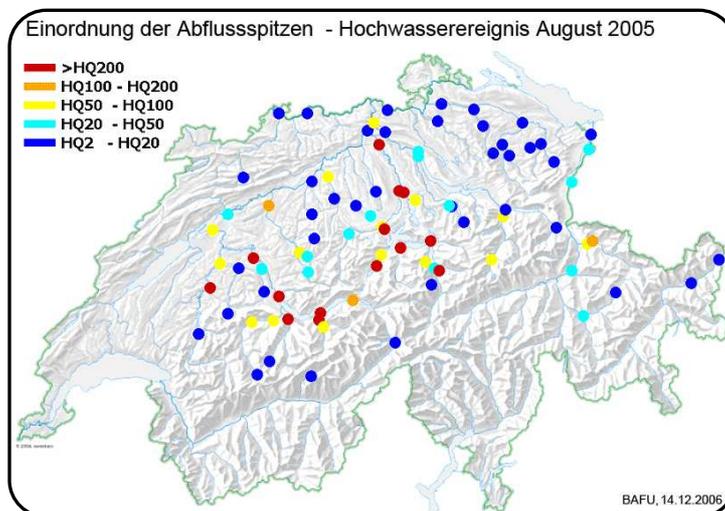


Abb. 3-10: Evaluation du temps de retour des crues de 2005. [OFEV 2009].

Débit spécifique et volume de débit

Beaucoup de bassins-versants avec des précipitations extrêmes montrent un très haut débit spécifique. Un débit spécifique de 1.51 [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$] a été mesuré pour le bassin-versant en amont de la Kleine Emme lors de la crue de 2005 (Abb. 3-11). On peut expliquer cette valeur élevée par les précipitations extrêmes tombées sur ce bassin (281 mm du 18.08.2005 à 12:00 au 23.08.2005 à 12:00) [BEZZOLA & HEGG 2007].

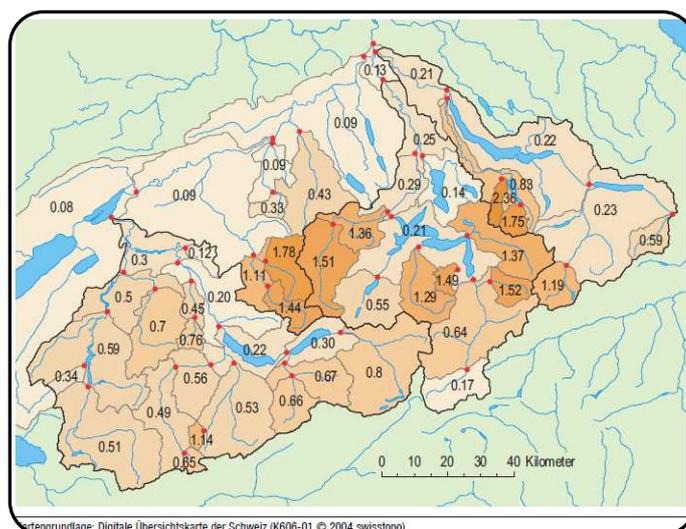


Abb. 3-11: Débits spécifiques de pointe [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$] pendant les crues d'août 2005 [BEZZOLA & HEGG 2007]

Le volume de débit du bassin de la Kleine Emme est par contre étonnamment faible (157 mm) par rapport aux autres bassins qui ont reçu des précipitations comparables. Il en va de même pour le coef-

ficient de volume de débit (0.56). Ces deux faibles valeurs ne sont pas expliquées de façon plausible, ce qui rend la probabilité de fausses valeurs de précipitations ou de débits grande (Bezzola, et al., 2007 p. 68).

Dégâts

Le Canton de Lucerne a affiché des dégâts pour un montant d'environ 590 Mio. CHF. Les industries qui ont subi des dégâts le long de la Kleine Emme en sont la raison principale. Dans plusieurs bâtiments, les chambres du sous-sol et du rez-de-chaussée se sont fait saccager par les débris et la boue. Des réservoirs de mazout ont encore augmentés les dégâts. Plus de 900 personnes ont dû être évacuées le long de la Kleine Emme. Les communes d'Emmen (180 Mio. CHF) et de Littau (110 Mio. CHF) sont les plus touchées pour le Canton de Lucerne. Il y a eu beaucoup d'érosion de berges, de brisement de digues, quelques glissements de terrain et de laves torrentielles, beaucoup de transport de matériel et de bois flottants dans les cours d'eau. A Entlebuch, une lave torrentielle a causé la mort de deux personnes.

Une érosion latérale prononcée a été observée sur la Kleine Emme, plus de 10 m ont été érodés sur des tronçons de 100 m ou plus

Processus dans le lit

Dans le bassin-versant de la Kleine Emme, les glissements étaient nombreux. L'érosion des berges est le processus principal responsable des $\frac{3}{4}$ du bois flottant. L'érosion latérale était particulièrement importante à Entlebuch. Les zones d'érosion qui s'écartent jusqu'à 30 m ont touché aussi bien les forêts des plaines alluviales que les forêts mixtes avec des arbres de 25 m [BEZZOLA & HEGG 2008].

Indice de compacité de Gravelius

Pour la Kleine Emme nous avons un indice de Gravelius de 1.55 ce qui représente un bassin-versant relativement allongé, car il est supérieur à 1 (Siehe [AMIGUET 2010]).

Les principaux affluents

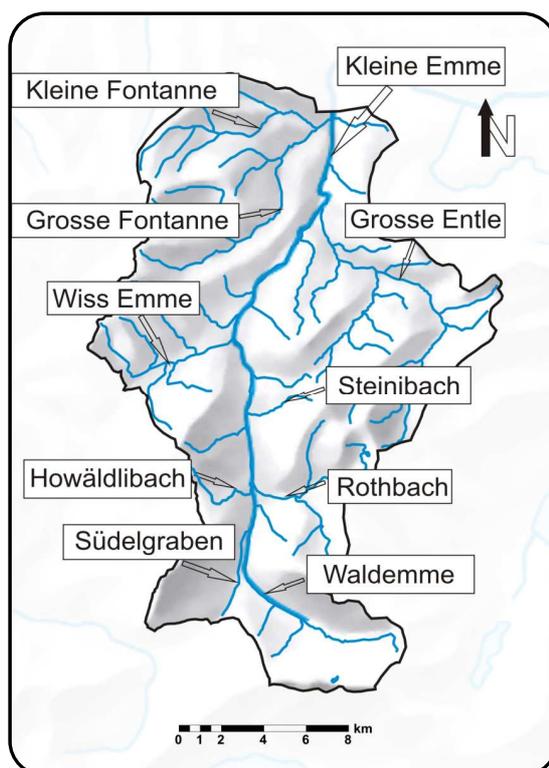


Abb. 3-12: Carte des principaux affluents de la Kleine Emme en amont de la station Werthenstein.

Régime

D'après WEINGARTNER & ASCHWANDEN [1992], la Kleine Emme a un régime de type nival de transition.

Le coefficient de Pardé, décrit par la formule suivante, est utilisé pour définir la courbe de régime:

$$PK_i = \frac{MQ(\text{Monat})}{MQ(\text{Jahr})}; i=1,2,\dots,12$$

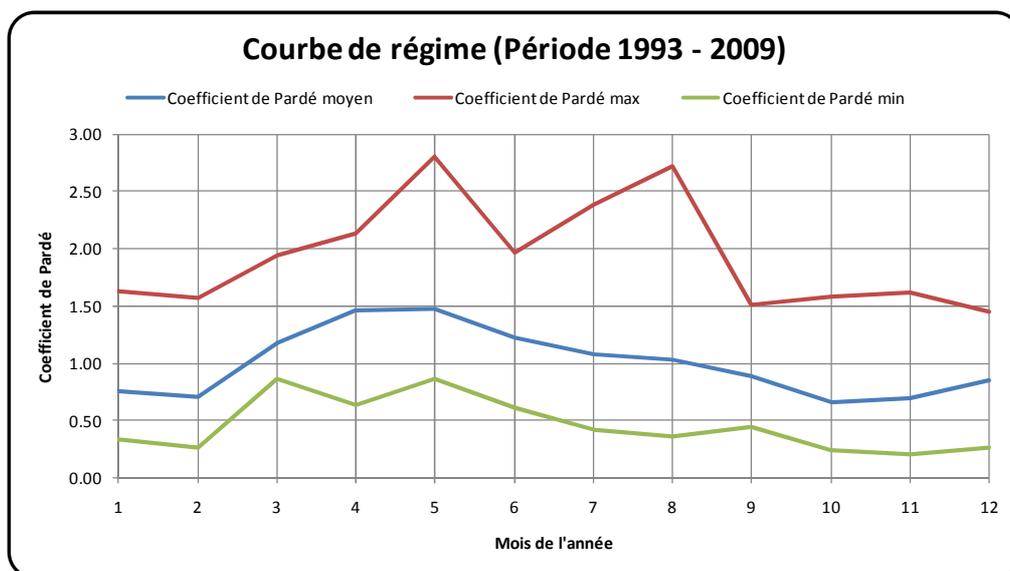


Abb. 3-13: Courbe de régime à partir du coefficient de Pardé pour la période 1993-2009 pour la Kleine Emme ainsi que les coefficients max (rouge) et min (vert). Source des données: OFEV.

On rencontre le **régime nival de transition** sur les bassins-versants d'altitude moyenne comprise entre 1200 et 1600 mètres (l'altitude moyenne du bassin-versant de la Kleine Emme, Werthenstein est de 1173 m). Le régime nival de transition se rapproche d'un type complexe dans ce sens qu'il présente quatre saisons hydrologiques. Ses caractéristiques sont les suivantes [MUSY & HIGY 2009]:

- a) Courbe des coefficients mensuels des débits montrant deux maxima et deux minima.
- b) Coefficient de Pardé minimum, en janvier, de l'ordre de 0.2 à 0.5.
- c) Après un étiage relatif en octobre, on observe en novembre une légère hausse due à la pluie, induisant un maximum secondaire de coefficient de Pardé inférieur à 1.
- d) Ces descriptions générales de régime ne correspondent pas entièrement au régime de la Kleine Emme à Werthenstein car les débits moyens mensuels et annuels varient beaucoup selon les années comme on peut le remarquer à l'aide des coefficients de Pardé moyen, maximum et minimum (Abb. 3-13).

Statistique des débits et des crues

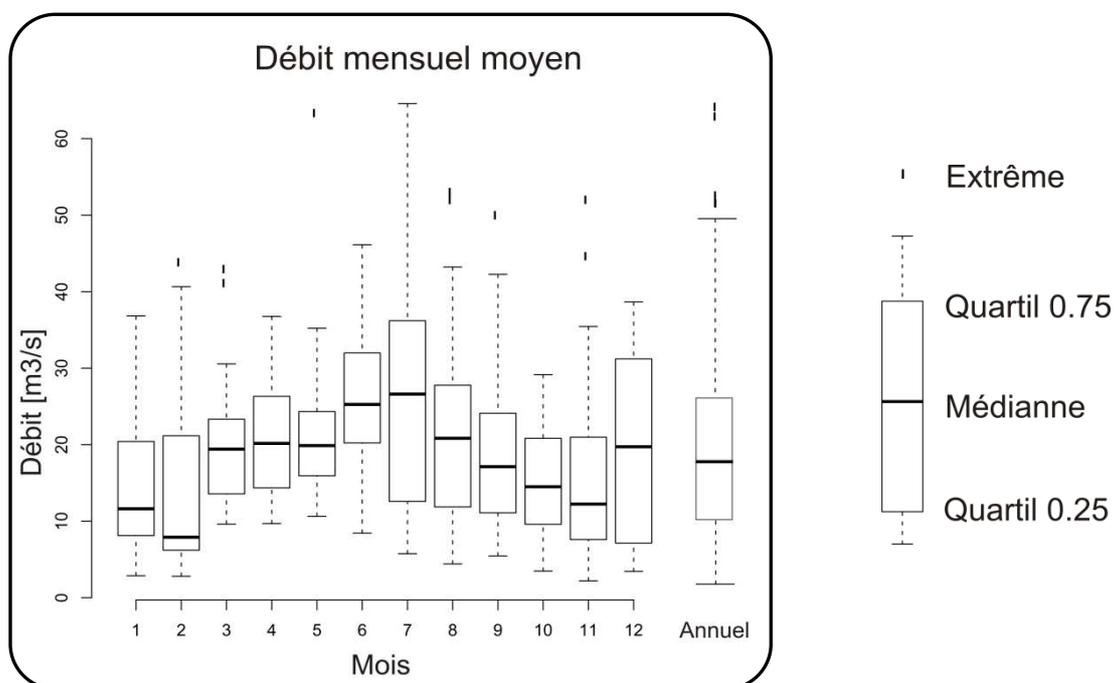


Abb. 3-14: Répartition des débits mensuels moyens pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel moyen. Source des données : OFEV.

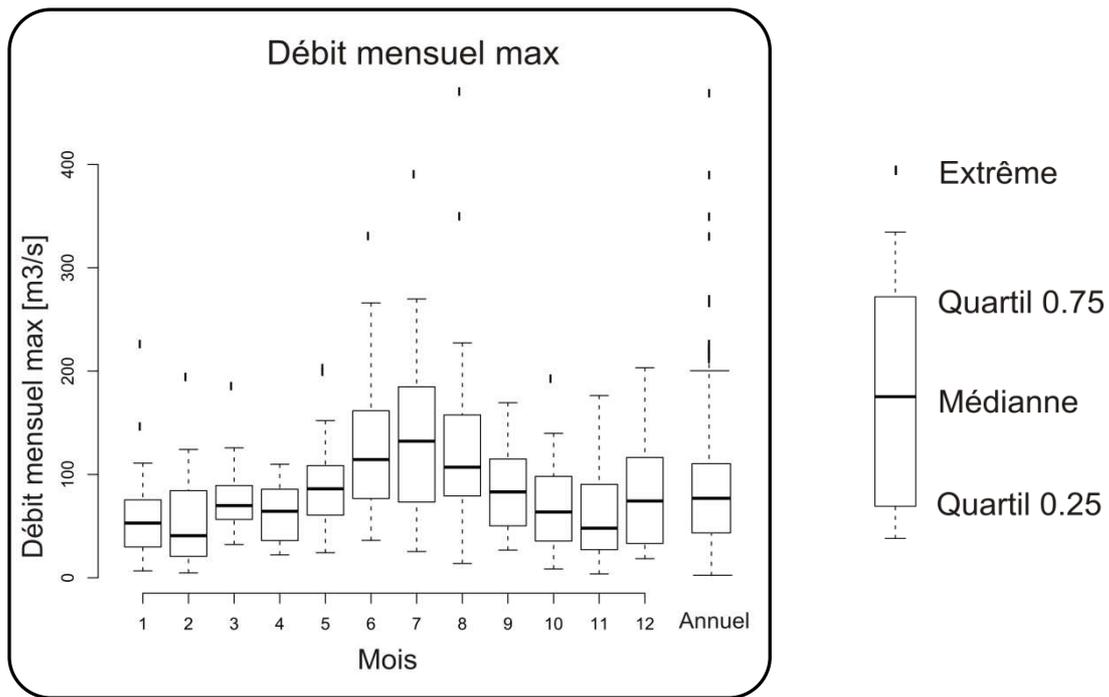


Abb. 3-15: Répartition des débits mensuels maximums pour la période 1984-2009 et comparaison avec le débit annuel maximum. Source des données : OFEV.

Sur les Abb. 3-14 et Abb. 3-15, on observe en moyenne aussi bien le plus grand débit mensuel moyen que maximum au mois de juillet. La fonte des neiges fait augmenter le débit mensuelle moyen dès le mois de mars. Le maximum absolu mesuré s'est produit en août (2005).

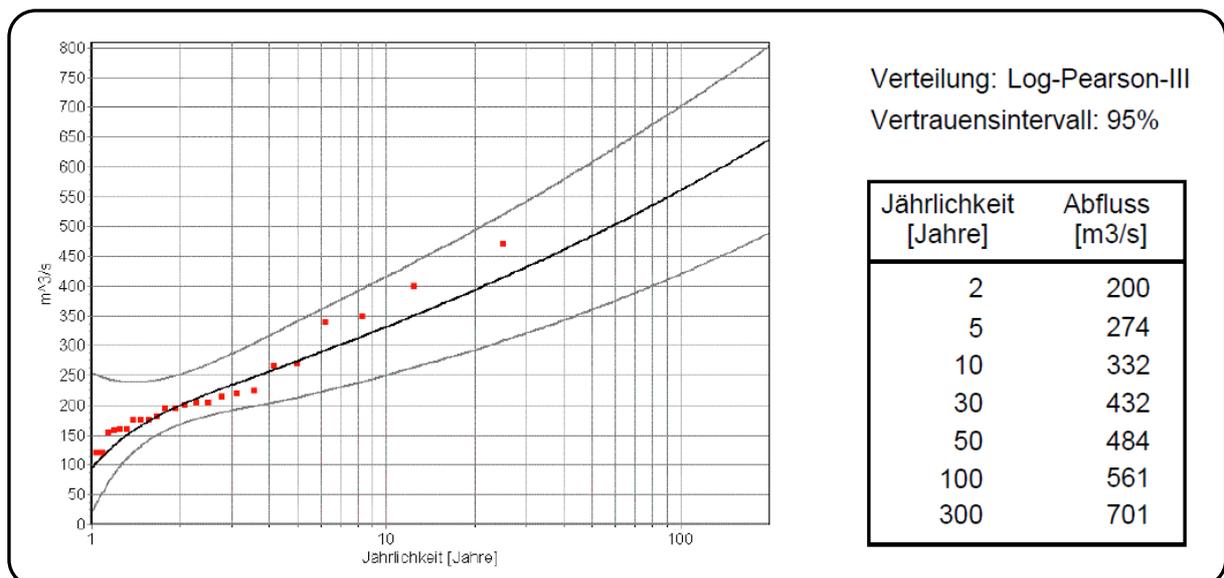


Abb. 3-16: Temps de retour pour la Kleine Emme à Werthenstein [OFEV 2009a].

Sur la Abb. 3-16, on remarque que le pic de crue maximum correspond à un temps de retour d'environ 45 ans.

Hydrogramme de crue, réponse hydrologique

La Kleine Emme a un hydrogramme de crue en général très pointu. Le débit augmente très rapidement et redescend rapidement. On observe souvent une courbe aplatie après le pic de crue (Abb. 3-17). Les couleurs correspondant aux types de crues dans la Abb. 3-17 sont expliquées au chapitre Méthode, Partie 2.

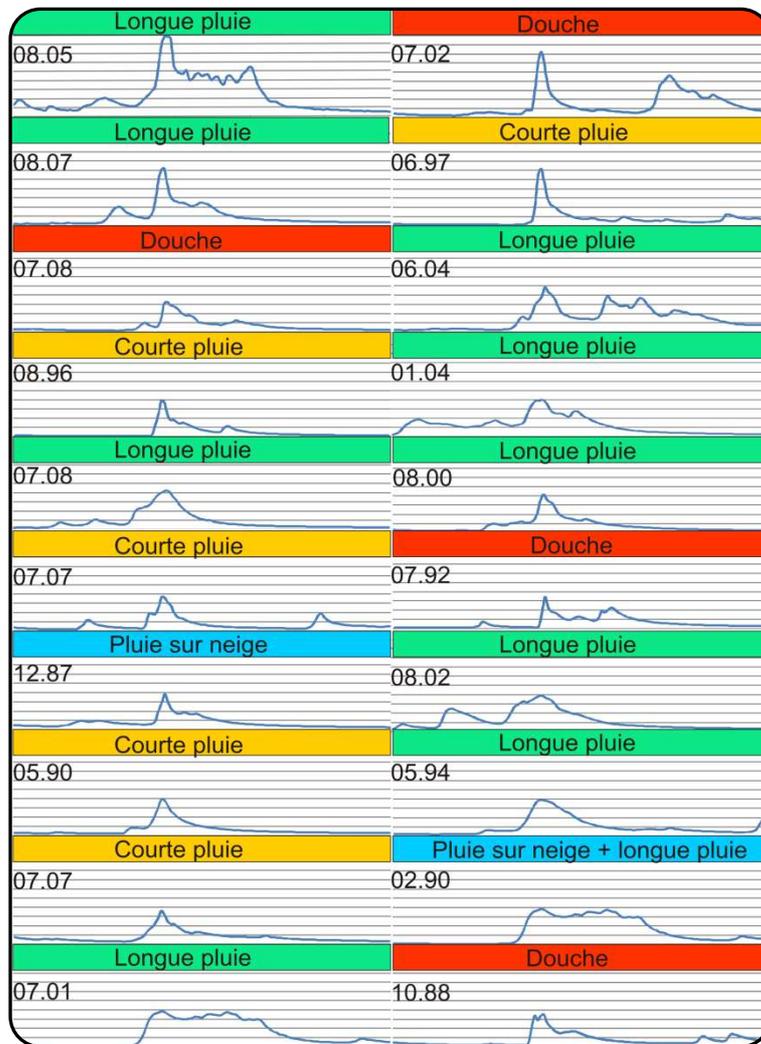


Abb. 3-17: Forme de l'hydrogramme et type de crue. Source des données : OFEV.

Une crue avec un temps de retour estimé à un peu moins de 2 ans a été mesurée le 17 juillet 2009 (Abb. 3-18). On remarque également sur ce graphe que le mois de septembre était relativement sec.

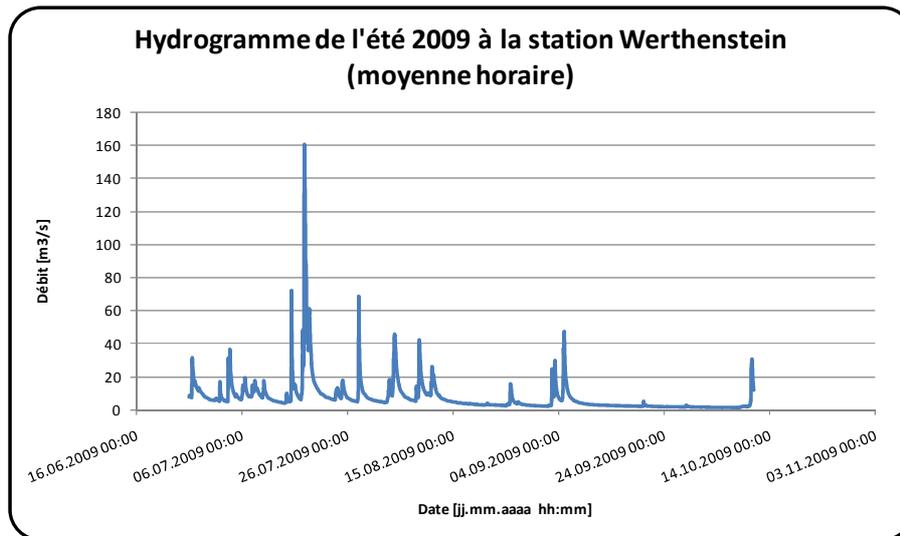


Abb. 3-18: Hydrogramme à la station Werthenstein (moyenne horaire) pour la période du 26.6.2009 au 10.10.2009. Source des données : OFEV.

Ecogéomorphologie

Malgré quelques interventions anthropiques visibles, la Kleine Emme garde un état relativement naturel. Une grande plaine alluviale protégée est située dans les environs d'Entlebuch. 76.1% des cours d'eau du bassin versant entier de la Kleine Emme sont jugés comme « proche de la nature » ou « peu influencé » [UWE 2010].

Les macro-invertébrés sont des indicateurs de la qualité de l'eau. Lors du camp de terrain d'hydrologie avec l'Université de Berne, nous avons pu constater nous-mêmes par l'observation des macro-invertébrés que la Kleine Emme a une eau de très bonne qualité à Entlebuch. La qualité est jugée « bonne » à « très bonne » par le Service Environnement et Energie (Umwelt-Energie) du Canton de Lucerne [UWE 2010].

4 Messnetz

Die Niederschlags- und Abflussmessungen sind die grundlegenden Grössen um Hochwasserereignisse abzuschätzen und zu charakterisieren.

4.1 Niederschlagsmessnetz

Um die Messreihen und Daten der Messnetze zu beurteilen, werden die Charakteristiken der Niederschlagsstationen und des Messnetzes in den folgenden Kapiteln betrachtet. Die Kapitel beinhalten die Beschreibung der Gerätetypen, die zeitliche und mengenmässige Auflösung der Messung, die Höhenverteilung der Messstationen und die Konzeption des temporären Messnetzes.

4.1.1 Bestehendes Niederschlagsmessnetz

Um einen adäquaten Gebietsniederschlag der 20 grössten Hochwasserereignisse seit Beginn der Abflussmessung 1984 darzustellen, wurden nebst den Messstationen im EZG auch jene in der näheren Umgebung ausserhalb des EZG miteinbezogen.

4.1.1.a Bestehendes Niederschlagsmessnetz innerhalb des Einzugsgebietes

Die drei bestehenden Niederschlagsstationen im EZG befinden sich alle im Haupttal, in der Nähe der Kleinen Emme oder der Waldemme (*Abb. 4-1*). Die zwei Niederschlagsmessstationen der Meteo-Schweiz haben eine zeitliche Auflösung von einem Tag. Sie bestehen schon seit über 100 Jahren. Die Messreihe der kantonalen Station ist hingegen nur zehn Jahre lang, weist aber eine hohe zeitliche Auflösung von einer Minute auf (*Tab. 4-1*). Es werden während des Beobachtungszeitraums des Abflusses in Werthenstein (1984 -2009) nur zwei Niederschlagsstationen im EZG betrieben. Damit ergibt sich eine mittlere Messnetzdicke von 1 Station auf 156 km².

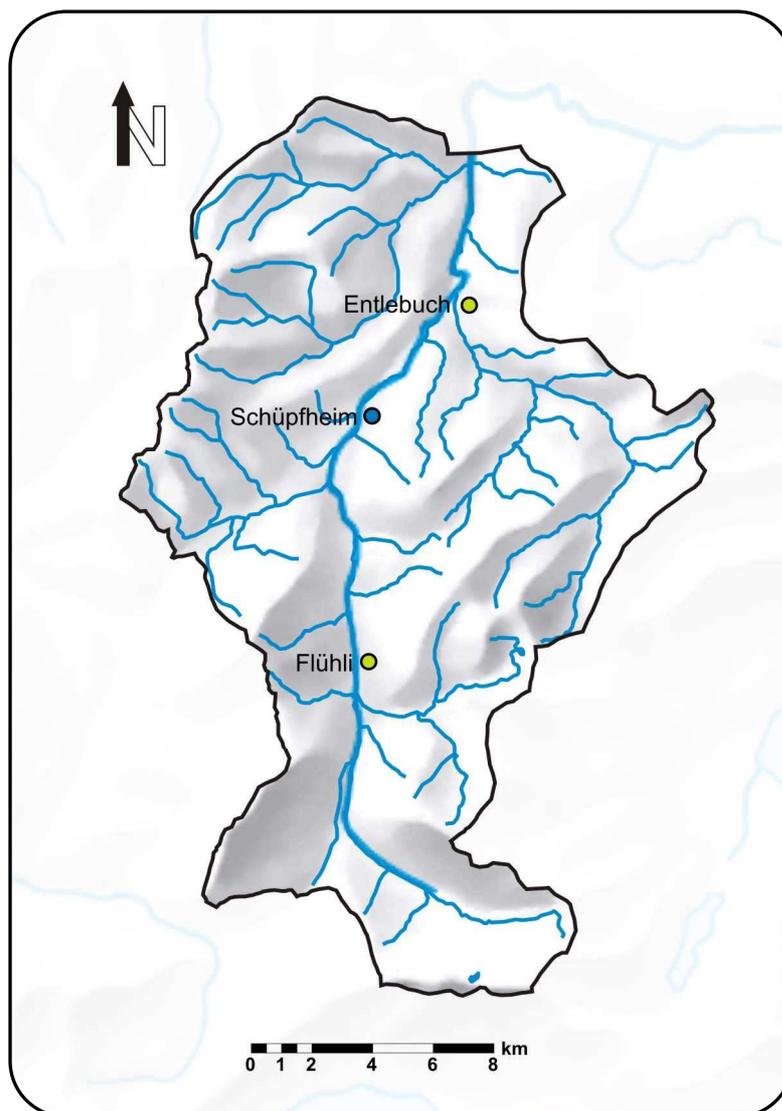


Abb. 4-1: Bestehende Niederschlagsstationen zu Beginn des Jahres 2009.

Tab. 4-1: Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen innerhalb des Einzugsgebietes. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ (4620, 4650) und UWE (LU10).

ID	Standort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M]	Stationstyp	Betreiber	Auflösung [min]	Auflösung [mm]	Messperiode
4620	Flüfli	644.240/192.910	928	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1890-
4650	Entlebuch	647.690/204.780	765	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1883-
LU10	Schüpfheim	644.500/200.940	760	Ott Pluvio	Kanton Luzern	1	0.01	1999-

4.1.1.b Bestehendes Niederschlagsmessnetz ausserhalb des Einzugsgebietes

Um den Gebietsniederschlag nicht auf Basis von zwei Stationen berechnen zu müssen und um eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung zu erlangen, werden alle Tagessammler im Umkreis von 10 km und alle automatischen Niederschlagsmessstationen mit 10 min Auflösung im Umkreis von 30 km

miteinbezogen (Abb. 4-2). Mit Ausnahme der kantonalen Station in Wolhusen decken alle Messreihen den ganzen Zeitraum der Abflussmessungen in Werthenstein ab (Tab. 4-2).

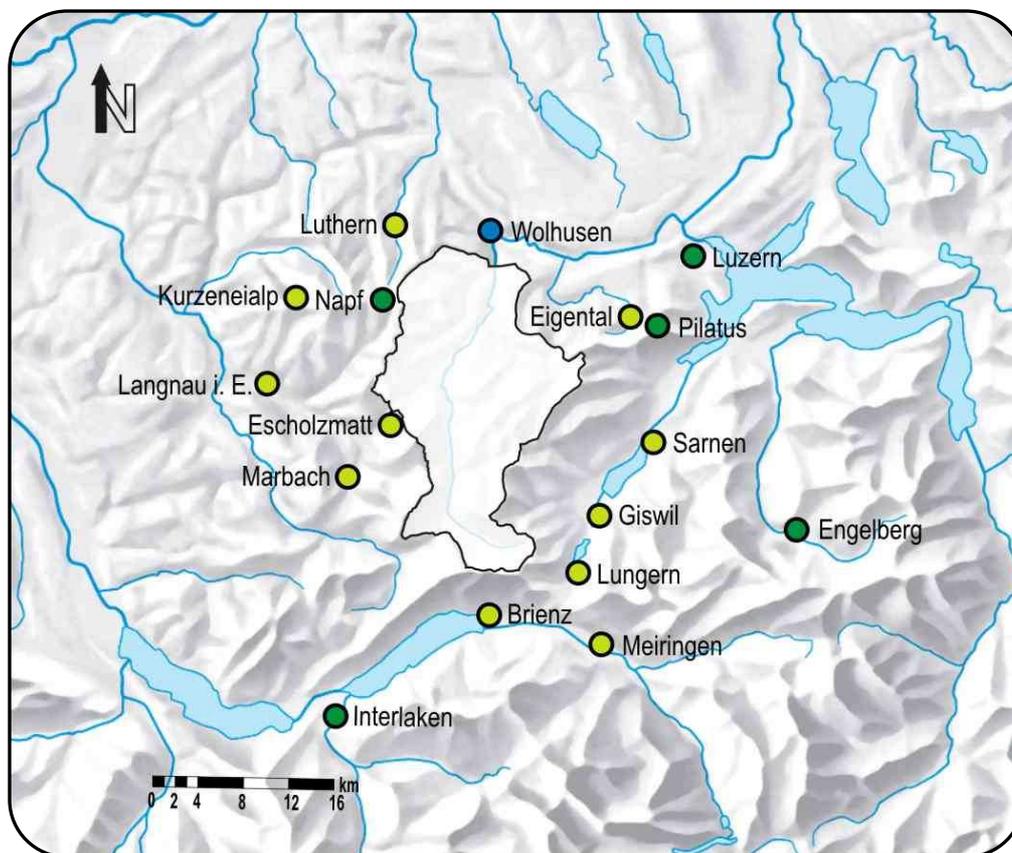


Abb. 4-2: Im Jahre 2009 bereits installierte Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes.

Tab. 4-2: Beschreibung der im Jahre 2009 bereits bestehenden Niederschlagsstationen ausserhalb des Einzugsgebietes. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ (4410-6630) und UWE (LU09).

ID	Standort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M]	Stationstyp	Betreiber	Auflösung [min]	Auflösung [mm]	Messperiode
LU09	Wolhusen	648.090/212.490	610	Ott Pluvio	Kanton Luzern	1	0.01	1999-
4410	Engelberg	674.150/186.060	1035	Lambrecht	MeteoSchweiz	10	0.1	1983-
4590	Luzern	665.520/209.860	456	Lambrecht	MeteoSchweiz	10	0.1	1978-
4600	Pilatus	661.910/203.410	2106	Lambrecht	MeteoSchweiz	10	0.1	1981-
5190	Interlaken	633.070/ 169.120	580	Lambrecht	MeteoSchweiz	10	0.1	1978-
6475	Napf	638.138/206.075	1406	Lambrecht	MeteoSchweiz	10	0.1	1978-
4500	Lungern	655.275/181.800	740	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1968-
4510	Giswil	656.120/186.000	489	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1978-
4560	Sarnen	661.570/193.640	475	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1895-
4680	Eigenthal	659.340/203.880	1114	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1899-
5070	Meiringen	656.460/ 175.400	595	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1890-
5090	Brienz	647.120/177.490	575	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1900-
6450	Marbach	635.290/ 190.170	847	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1900-
6470	Escholzmatt	638.120/195.100	910	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1882-
6480	Langnau i. E.	628.070/198.830	755	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1910-
6500	Kurzeneialp	630.575/207.010	894	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1901-
6630	Luthern	636.465/ 212.020	767	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1	1900-

4.1.2 Temporäres Niederschlagsmessnetz

Um das grobmaschige Niederschlagsmessnetz innerhalb des Einzugsgebietes zu ergänzen und somit die räumliche Verteilung der Niederschläge besser zu erfassen, wurde von Juni bis November 2009 ein temporäres Messnetz installiert. Während dieser Periode wurde an 15 zusätzlichen Standorten der Niederschlag mit Niederschlagswippen aufgezeichnet (Abb. 4-3 und Tab. 4-3). Dies ergibt eine mittlere Messnetzdicke von einer Messstelle auf 17 km². Gemäss der WMO [1994] ist die Niederschlagsmessung für hydrologische Studien normalerweise unzureichend, wenn die Fläche des Einzugsgebietes mehr als 25 km² beträgt und der Niederschlag an nur einem Punkt innerhalb dieses Gebietes gemessen wird.

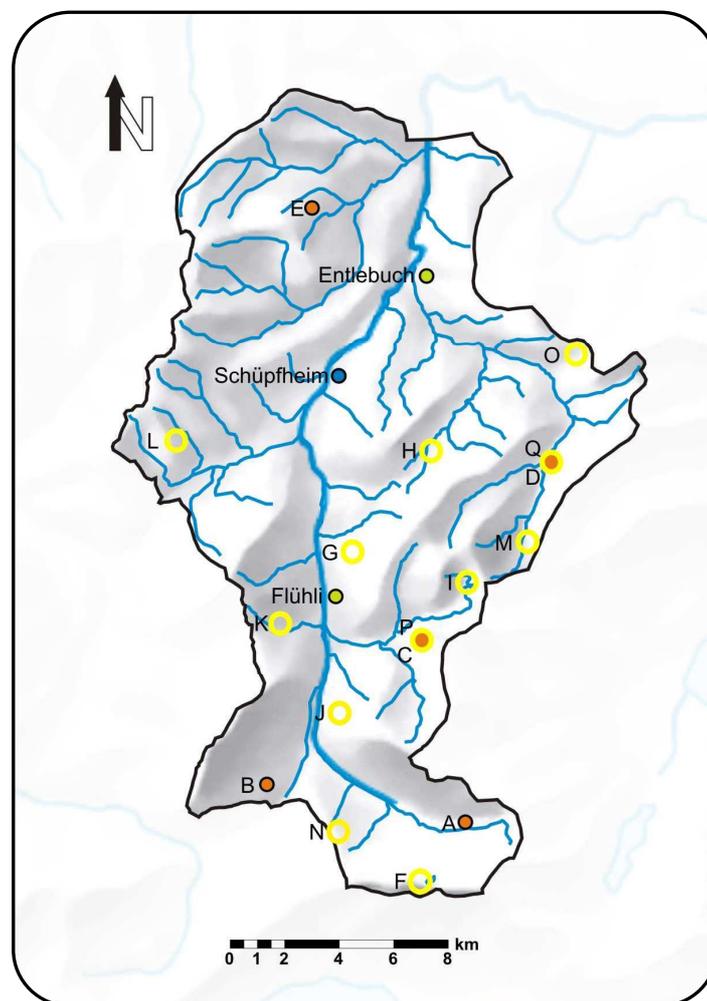


Abb. 4-3: Temporäres Niederschlagsmessnetz während dem Sommer 2009.

Tab. 4-3: Beschreibung der Niederschlagsstationen des temporären Messnetzes innerhalb des Einzugsgebietes. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ (4620, 4650), UWE (LU10).

ID	Standort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M]	Stationstyp	Betreiber	Auflösung [min]	Auflösung [mm]
4620	Flühli	644.240/192.910	928	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1
4650	Entlebuch	647.690/204.780	725	Hellmann-Pluviometer	MeteoSchweiz	1440	1
LU10	Schüpfheim	644.500/200.940	760	Ott Pluvio	Kanton Luzern	1	0.01
A	Amischwand	649.120/184.515	1377	Young 52202	GIUB	5	0.1
B	Ruchweid	641.885/185.900	1382	Young 52202	GIUB	5	0.1
C	Schaftelemoos	647.535/191.240	1407	Young 52202	GIUB	5	0.1
D	Gründli	652.260/197.775	1196	Young 52202	GIUB	5	0.1
E	Grämse	643.535/207.125	959	Young 52202	GIUB	5	0.1
F	Eisee	647.480/182.345	1955	Rainwise	GIUB	1	0.25
G	Salzbüel	645.015/194.480	1120	Rainwise	GIUB	1	0.25
H	Hintere Angst	647.875/198.175	1174	Rainwise	GIUB	1	0.25
I	Sewenseeli	649.230/193.355	1710	Rainwise	GIUB	1	0.25
J	Junkholz	644.540/188.525	1195	Rainwise	GIUB	1	0.25
K	Schwändi	642.375/191.845	1148	Rainwise	GIUB	1	0.25
L	Multigschwändli	638.575/198.555	970	Rainwise	GIUB	1	0.25
M	Hintere Rotbach	651.390/194.845	1423	Rainwise	GIUB	1	0.25
N	Schwarzenegg	644.485/184.165	1521	Rainwise	GIUB	1	0.25
O	Heuboden	653.160/201.730	1233	Rainwise	GIUB	1	0.25
P	Schaftelemoos	647.535/191.240	1407	Rainwise	GIUB	1	0.25
Q	Gründli	652.260/197.775	1196	Rainwise	GIUB	1	0.25

Zufällige Messfehler werden reduziert, da differenzierte Informationen zur Niederschlagsverteilung durch die höhere Messnetzdicke vorhanden sind und die verwendeten Daten weniger von der tatsächlichen Niederschlagsverteilung abweichen. Feinskalige Niederschlagszellen können mit dem temporären Messnetz genauer erfasst werden. Systematische Abweichungen entstehen auch durch nicht-repräsentative Verteilung der Messstationen im Gelände. So gibt es in der Schweiz eine Untervertretung von Hang- und Bergstationen im Vergleich zu den Talstationen [FREI ET AL. 2008]. Dieser Fehler kann durch die repräsentative Verteilung der Messstationen im Gelände ebenfalls verringert werden.

4.1.2.a Verteilung der Stationen im Einzugsgebiet

Die Anzahl und die Verteilung der Niederschlagsmessstellen in einem Untersuchungsgebiet sind abhängig von der erwarteten Variabilität der Niederschlagsverteilung. Zwei wichtige Einflussgrößen für die zu erwartende Niederschlagsvariabilität sind die Topografie und die Klimacharakteristika der Region. So sind in Gebieten mit hügeligem Gelände und lokalem konvektiven Niederschlag mehr Niederschlagsstationen nötig als in einem flachen Terrain wo vorwiegend grossflächige Frontsysteme auftreten. Der Verwendungszweck der Daten hat ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Ausgestaltung des Messnetzes. Für Niederschlagsmessungen die zur Hochwasserforschung verwendet werden, sollten die Stationen in Teilgebieten mit grossem Abflussbeitrag installiert werden. Bei der

Hochwasserwarnung sind zeitlich hochaufgelöste Daten nötig. Je länger die berücksichtigte Zeitperiode und die Grösse der Fläche, desto homogener wird die Verteilung des Niederschlags. Für kleinere Flächen und kurze Zeitintervalle wird ein dichtes Messnetz benötigt [ROBINSON 2005]. Die Niederschlagsmessung zur Hochwasserwarnung in der voralpinen Region des Entlebachs verlangt nach einem engmaschigen Messnetz. Alle grösseren TEZG, insbesondere diejenigen mit einer Abflussmessstelle, sollten mit mindestens einer Niederschlagsstation bestückt werden. Zudem werden die Gebiete mit vermehrtem Auftreten von Starkniederschlagsereignissen im 20. Jahrhundert⁵ berücksichtigt.

Eine Warnung muss in nützlicher Frist vor einem Hochwasserereignis erfolgen. Um überhaupt eine Warnung zu ermöglichen und die Vorwarnzeit zu maximieren, werden die Niederschlagsstationen mit einer Ausnahme der Station E nicht im Bereich der Abflussstation Werthenstein, einem möglichen Bezugspunkt für ein künftiges Warnsystem, aufgebaut.

Alle drei Stationen des bestehenden Messnetzes befinden sich in Tallagen zwischen 700 und 1000 m.ü.M.. Nur rund 15 % der Fläche des Untersuchungsgebietes befinden sich in diesen Höhenlagen. Oberhalb von 1000 m.ü.M. wird kein Niederschlag gemessen. Um alle Höhenlagen des Gebiets zu repräsentieren, werden die 17 Niederschlagsstationen auf den gesamten Höhenbereich verteilt. Dabei wird berücksichtigt, dass 45 % der Fläche des EZG in mittlerer Höhe von 1000-1500 m.ü.M. liegt, weshalb dieser Höhenbereich mit einer höheren Anzahl Stationen ausgerüstet wird, als Flächen oberhalb von 1500 m.ü.M (Abb. 4-4).

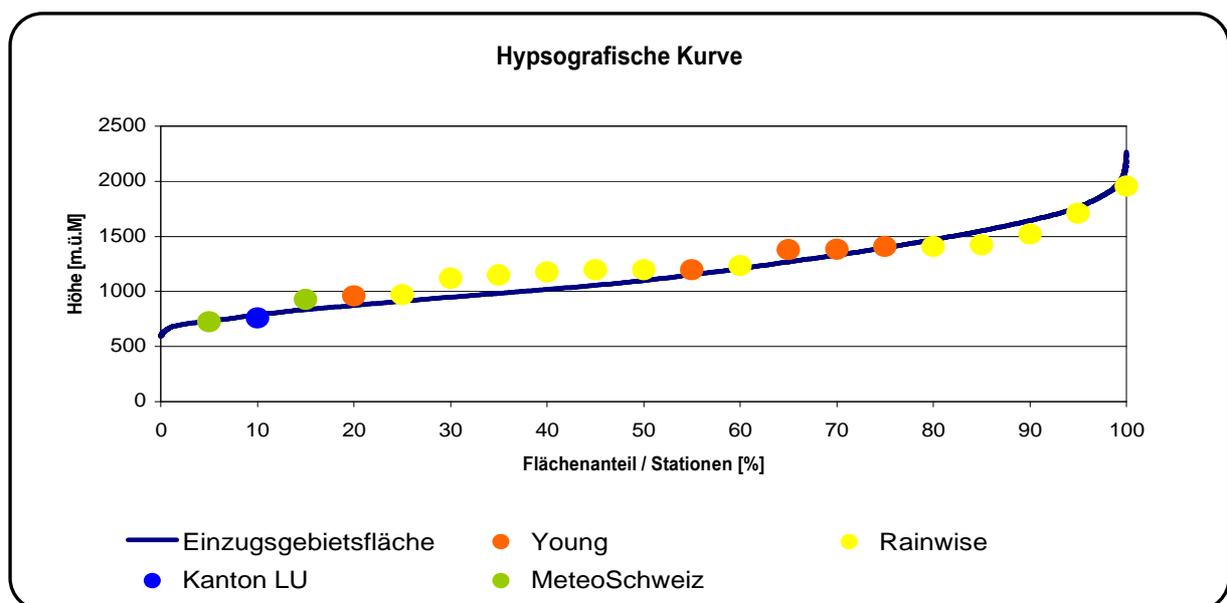


Abb. 4-4: Hypsografische Kurve des Einzugsgebietes der Kleinen Emme bis Werthenstein

⁵ Anzahl Starkniederschläge > 70 mm/Tag (Periode 1901-1980) [ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 2004].

Bei einer perfekten Verteilung würden alle Punkte auf der hypsometrischen Kurve liegen [SPREAFICO & WEINGARTNER 2005].

Bei der Konzeption des Messnetzes ist ebenfalls zu beachten, dass genügend finanzielle und personelle Ressourcen vorhanden sind, um das Messnetz aufzubauen und zu betreiben.

Die aufgeführten Kriterien werden mit dem vorhandenen Wissen über das EZG geschätzt, beurteilt und wenn möglich bei der Messnetzplanung miteinbezogen.

4.1.2.b Standortwahl der Niederschlagsmessstationen

Die Wahl eines optimalen Standortes hängt von diversen Kriterien ab, die nicht immer miteinander vereinbar sind. Die bevorzugten Gebiete und die Erschliessung können im Vorfeld mit Hilfe von Landeskarten eruiert werden. Im Feld kann dann innerhalb des projektierten Gebietes der Standort mit Hilfe von verschiedenen Kriterien ausgewählt werden.

Als ein Kriterium mit hoher Priorität werden die Vorgaben der WMO eingestuft. An einem perfekten Standort würde der gemessene Niederschlag den gefallenen Niederschlag in der Umgebung repräsentieren. In der Praxis besteht die Schwierigkeit dieses Ziel auf Grund des Windeffekts zu erreichen. Der Einfluss des Windes wird in Kap. 2.2.1.c näher beschrieben. Die Windgeschwindigkeit sollte auf der Höhe des Niederschlagsmessgerätes möglichst klein sein, aber der Niederschlag darf nicht durch andere Objekte in der näheren Umgebung abgeschirmt werden. Idealerweise ergibt sich zwischen dem Messzylinder und dem höchsten Punkt der umliegenden Objekte und der Horizontalen einen Winkel zwischen 30 und 45° (*Abb. 4.5*). Einzelne Baumreihen oder isolierte Objekte sollten als Windschutz von Niederschlagsmessstandorten gemieden werden, da sie die Turbulenzen beim Messgerät oftmals verstärken oder nicht einen vorhersagbaren Einfluss auf die gemessene Niederschlagsmenge haben [WMO 1994].

Wenn kein ausreichender, gleichmässiger Windschutz möglich ist, sollten allein stehende Objekte mindestens in einer Distanz vom Niederschlagsmessgerät entfernt sein, die der doppelten Höhe zwischen der Messzylinderöffnung und der Höhe der Objekte entspricht (*Abb. 4-6*) [WMO 2001].

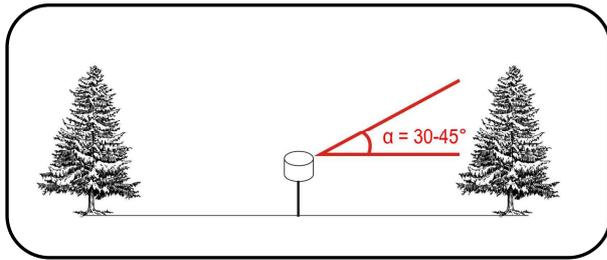


Abb. 4-5: Idealer Winkelabstand bei Niederschlagsstationen.

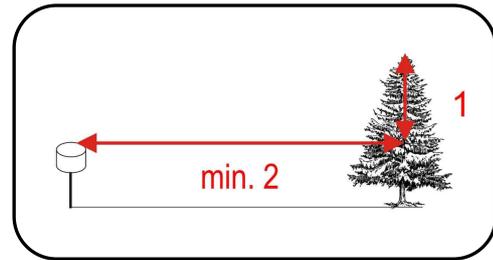


Abb. 4-6: Mindestabstand bei Messstandorten zu Einzelobjekten.

Messstandorte in Hängen oder auf Anhöhen sollten gemieden werden. Dies ist besonders zu beachten, falls die vorherrschende Windrichtung dem Hang entlang verläuft [WMO 1994]. Die Richtlinien der WMO zur Niederschlagsmessung werden als die Beschreibung eines optimalen Standortes miteinbezogen, können aber auf Grund des hügeligen, bewaldeten und zum Teil landwirtschaftlich genutzten Terrains nicht bei allen der Stationsstandorten berücksichtigt werden.

Um den Aufbau und die Betreuung von 17 Stationen zu bewältigen, werden Orte gewählt, die mit Individualverkehr erreicht werden können. Ansonsten sind der Materialtransport zum Aufbau der Stationen und die regelmässige Kontrolle zu aufwändig.

Alle Messstationen befinden sich auf oder in der Nähe von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Nach Möglichkeit werden die Stationen auf Wiesenflächen installiert. Wenige Stationen werden im Weideland aufgebaut und dort zum Schutz vor Grossvieh eingezäunt.

Das Konzept der WMO und die oben genannten zusätzlichen Kriterien eines Standortes müssen schlussendlich auch mit den Bedürfnissen und Nutzungsansprüchen der Landbesitzer vereinbar sein, um deren Zustimmung zur Installation der Niederschlagsmessstation zu erhalten.

4.1.2.c Niederschlagsmessgeräte

Die direkte Messung von Niederschlag erfolgt immer durch Bodenstationen. Dazu wird oft ein zylindrisches Auffanggefäss verwendet. Das gemessene Wasservolumen wird durch die Fläche der Öffnung geteilt und als Niederschlagshöhe [mm] aufgezeichnet. Es existieren einfache Sammelbehälter, die in regelmässigen Abständen manuell entleert werden. Niederschlagswaagen messen nicht, wie bei herkömmlichen Geräten üblich, das Volumen des Niederschlags, sondern dessen Gewicht [Kanton Luzern: Ott Pluvio]. Bei Niederschlagswippen wird das aufgefangene Wasser auf eine Wippe geleitet, die auf beiden Seiten einen Behälter mit bekannter Kapazität besitzt. Wenn ein Behälter gefüllt ist, kippt die Wippe um und das Kippereignis wird aufgezeichnet. Beim Kippen des einen Behälters wird der Zweite in Position gebracht und wiederum gefüllt [GIUB: Rainwise, Young 52202; MeteoSchweiz: Lambrecht 1518 H3, Lambrecht 15188](Abb 4-7).

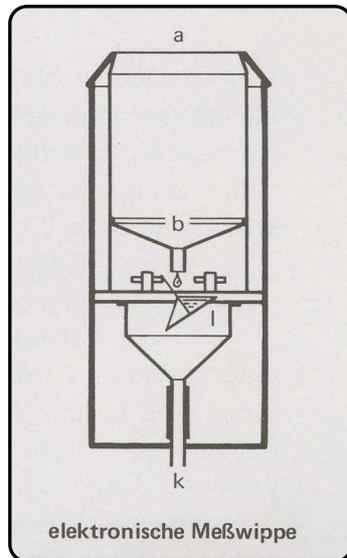


Abb. 4-7: Schema einer Niederschlagswippe mit a) Auffangöffnung, b) Auffangtrichter, l) Wippe mit zwei Messschalen und Kontaktgeber, k) Überlauf. Quelle: GEIGER ET AL. [1991].

Beim temporären Messnetz 2009 wurden Niederschlagswippen von Rainwise und Young eingesetzt, die im Folgenden beschrieben werden.

Niederschlagsmessgerät Young 52202

Die Niederschlagswippe von Young (Abb. 4-8 und Abb. 4-9) zeichnet sich durch eine Auffangfläche von 200 cm² und eine Messgenauigkeit von 0.1 mm pro Kippbewegung aus. Bei Intensitäten bis 25 mm/h kann die gemessene Niederschlagsmenge 2 % abweichen. Intensitäten bis 50 mm/h können den Messfehler auf bis zu 3 % erhöhen. Die Wippe kann bei vorhandener Stromversorgung beheizt werden und somit auch festen Niederschlag messen. Diese Möglichkeit konnte an keinem der Standorte genutzt werden [TIPPING BUCKET RAIN GAUGE 2008].

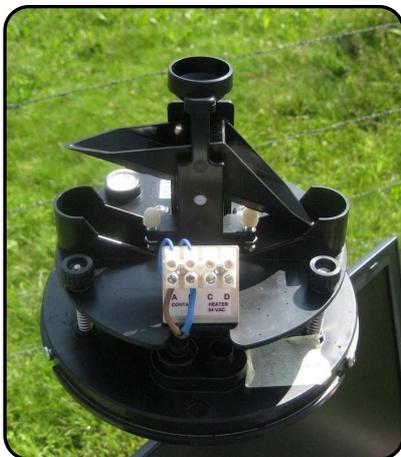


Abb. 4-8: Young-Niederschlagswippe ohne Messtrichter (Station E: Grämse).



Abb. 4-9: Niederschlagsstation (Station B: Ruchweid) mit Niederschlagsmessgerät Young und Loggerkasten.

Niederschlagsmessgerät Rainwise

Die Auffangfläche bei der Regenwippe von Rainwise (Abb. 4-10 und Abb. 4-11) beträgt 333 cm² und pro Kippbewegung werden bei diesem Fabrikat 0.25 mm Niederschlag gemessen [RAINWISE INC. 2007]. Die Höhe der möglichen Messfehler wird vom Hersteller nicht angegeben. Ein Heizungseinbau zur Schneemessung ist bei diesen Geräten nicht möglich. Es handelt sich deshalb bei diesem Fabrikat um eine reine Regenmessstation.



Abb. 4-10: Rainwise-Niederschlagswippe ohne Messtrichter (Station M: Hintere Rotbach).



Abb. 4-11: Niederschlagsstation Rainwise (Station F: Eisee) mit Umzäunung.

4.1.2.d Statische Kalibrierung der Messgeräte

Vor dem Messbeginn im Sommer 2009 wurden die fünf Niederschlagswippen der Firma Young und die 12 Niederschlagswippen von Rainwise kalibriert.

Tab. 4-4: Statische Kalibrierung der Niederschlagswippen.

	Fläche [cm ²]	Niederschlagshöhe / tip [1 mm]	Niederschlagsmenge / tip [ml]
Young	200	0.1	2
Rainwise	333	0.25	8.5

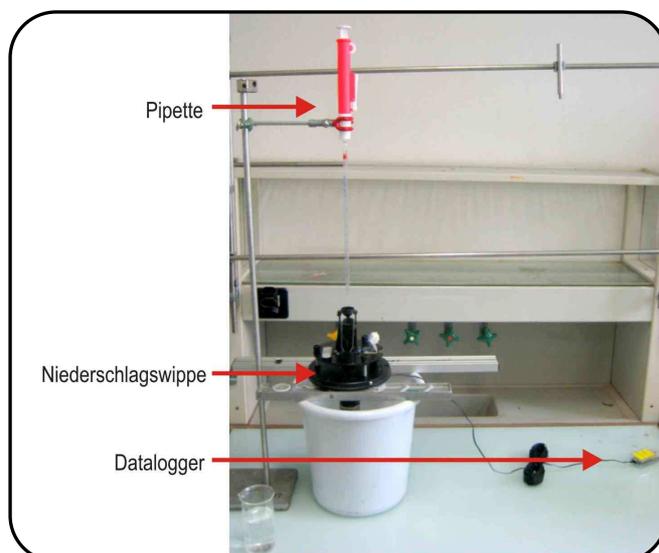


Abb. 4-12: Messaufbau bei der statischen Kalibrierung.

Vor der Durchführung der Kalibrierung muss sichergestellt werden, dass die Niederschlagswippe waagrecht ausgerichtet ist. Die Wippschalen müssen zu Beginn und bei jeder Wiederholung des Vorgangs getrocknet und gereinigt werden. Bei der statischen Kalibrierung wird eine Pipette mit 2 ml bzw. 8.5 ml Wasser gefüllt (Tab. 4-4 und Abb. 4-12). Diese wird langsam auf eine der Wippschalen entleert. Die Kippbewegung

sollte genau beim Auftreffen des letzten Tropfens erfolgen [THALER 2004]. Bei zu frühem oder spätem Umschlag wird die Schraube unterhalb der gegenüberliegenden Wippschale erhöht oder abgesenkt. Somit erfolgt das Kippen nach einer kleineren oder grösseren Wassermenge. Dieser Vorgang wird wiederholt bis beide Waagschalen bei exakt 2 bzw. 8.5 ml umschlagen.

Bei der Kalibrierung wird zudem die Funktionsfähigkeit der Elektronik und der Aufzeichnung der Datalogger getestet. Die Anzahl ausgeführter Wippbewegungen muss mit der Anzahl aufgezeichneter Bewegungen übereinstimmen.

4.1.2.e Aufbau und Befestigung der Stationen

Ein Niederschlagsmessgerät besteht nur aus der Messeinheit. Die Befestigung der Messeinheit muss zuerst geplant und konstruiert werden. Es ist zu beachten, dass die Oberkante des Niederschlagsmessgerätes auf einer Höhe von 1.5 m und in horizontaler Lage zu liegen kommen soll. In den meisten Fällen wird ein Stahlrohr verwendet, welches einige Zentimeter in den Boden geschlagen wird, bis die Gesamthöhe der Station (Stahlrohr und Messzylinder) von 1.5 m erreicht ist. Eine Bodenplatte und ein Armierungseisen, das durch eine Öffnung beim Stahlrohr eingeführt wurde, verhindert ein weiteres Absenken der Station. Der Mast wird mit drei Spannseilen und entsprechenden Heringen in eine stabile vertikale Lage gebracht (*Abb. 4-13*). Der Datalogger und die Batterie sind in einem Kasten untergebracht, der mit Klemmen am Mast montiert ist. Der Kasten wird als Bausatz geliefert und muss zusammengestellt werden. Der Zusammenbau, die Isolation zum Schutz vor extremen Temperatureinflüssen und die elektrischen Installationen wurden mit Hilfe des Technikers vom Geografischen Institut, Jürg Schenk, ausgeführt.

Bei der Station A ist der Mast mit Aluminiumschellen an einer Betonwand befestigt, was eine Abspannvorrichtung erübrigt (*Abb. 4-14*). Die temporären Niederschlagsmessgeräte bei den Strassenwetterstationen (*Abb. 4-16*) sind mit einem Auslegerarm an den Hauptmast der kantonalen Station befestigt.



Abb. 4-13: Young-Niederschlagsstation B (Ruchweid).



Abb. 4-14: Young-Niederschlagsstation A (Arnischwand).

Betreuung der Niederschlagsmessgeräte

Nach der statischen Kalibrierung im Labor, der Programmierung der Datalogger im Feld⁶ und einem Funktionstest der Messstation werden die Geräte alle zwei bis drei Wochen überprüft. Störungen, Reparaturen, Witterung und die Uhrzeit der Betreuung wurden in einem Protokoll festgehalten, um die Datenfehler zu einem späteren Zeitpunkt am Computer erkennen und gegebenenfalls korrigieren zu können. Ausgelöste Wippbewegungen während der Reparatur können ebenfalls erkannt und gelöscht werden. Die Betreuung der Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet beinhaltet folgende Arbeiten:

- a) Kontrolle und Einstellung der Uhrzeit bei Loggern
- b) Kontrolle und Auswechslung der Batterien der Datalogger
- c) Horizontale Lage der Trichteroberkante überprüfen und bei Bedarf ausrichten
- d) Zugkraft der Spannseile testen und nachspannen
- e) Sicherung der Daten auf einem zweiten Datenträger
- f) Verstopfungen erkennen, protokollieren und beseitigen
- g) Reinigung des Trichters, der Wippen und Beseitigung von Ungeziefer im Innenraum

⁶ Informationen zur Programmierung der Datalogger finden sich in der Masterarbeit von Pierre Masson.

- h) Funktionstest der Wippschalen
- i) Dokumentation der durchgeführten Arbeiten

4.1.3 Temporäres Niederschlagsmessnetz bei Strassenwetterstationen Februar-Mai 2010

Im EZG befinden sich acht Strassenwetterstationen, die vom Kantonalen Strasseninspektorat betrieben werden. Diese messen die aktuellen Temperaturen⁷, die Luftfeuchtigkeit, die Niederschlagsintensität sowie die Art des Niederschlags, die Windgeschwindigkeit- und die Windrichtung, den Strassenzustand⁸ und die Wasserfilmdicke. Diese in Echtzeit erhobenen Werte werden mit Wetterprognosen verglichen. Anhand der gemessenen Werte und der Prognose werden vordefinierte Alarme ausgelöst und Einsatzkräfte des Winterdienstes informiert. Der Leiter des Winterdienstes des Kantons Luzern kann mit Hilfe dieses Systems die Koordination der Räumfahrzeuge vornehmen und die zu streuende Salzmenge definieren [ICE WEB 2009].

Die aktuellsten Daten der Stationen im EZG und von weiteren Stationen im Kanton Luzern werden alle 15 min auf einer Homepage publiziert. Da eine Echtzeitdatenlieferung bereits aufgebaut ist und 8 Stationen über das Untersuchungsgebiet verteilt sind, ist zu prüfen, ob die Genauigkeit der Niederschlagsmessungen ausreicht, um diese Stationen in ein Hochwasserwarnsystem zu integrieren. Zu diesem Zweck wurden im Frühjahr 2010 an drei Strassenwetterstationen Niederschlagswippen Young angebracht, um eine Vergleichsmessung zu ermöglichen (*Abb. 4-15 und Tab. 4-5*). Die Sensoren von Vaisala sind auf einer Höhe von rund 2.5 m angebracht. Da die Masten der Stationen nicht für schwere Lasten ausgelegt sind, konnten die Niederschlagswippen nicht auf selber Höhe angebracht werden. Die Niederschlagsmessgeräte wurden auf einer Höhe von 1.5 m am Mast installiert (*Abb.4-16*). Der Niederschlag in 2.5 m Höhe wird mit optoelektrischen Sensoren detektiert und nicht wie bei der Niederschlagswippe in 1.5 m Höhe volumetrisch gemessen.

⁷ Temperaturmessung: Luft, Fahrbahnoberflächen, in 7 cm Tiefe im Asphalt, in 30 cm im Boden.

⁸ Strassenzustände: trocken, feucht, nass, nass gesalzen, Frost, Schnee, Eis.

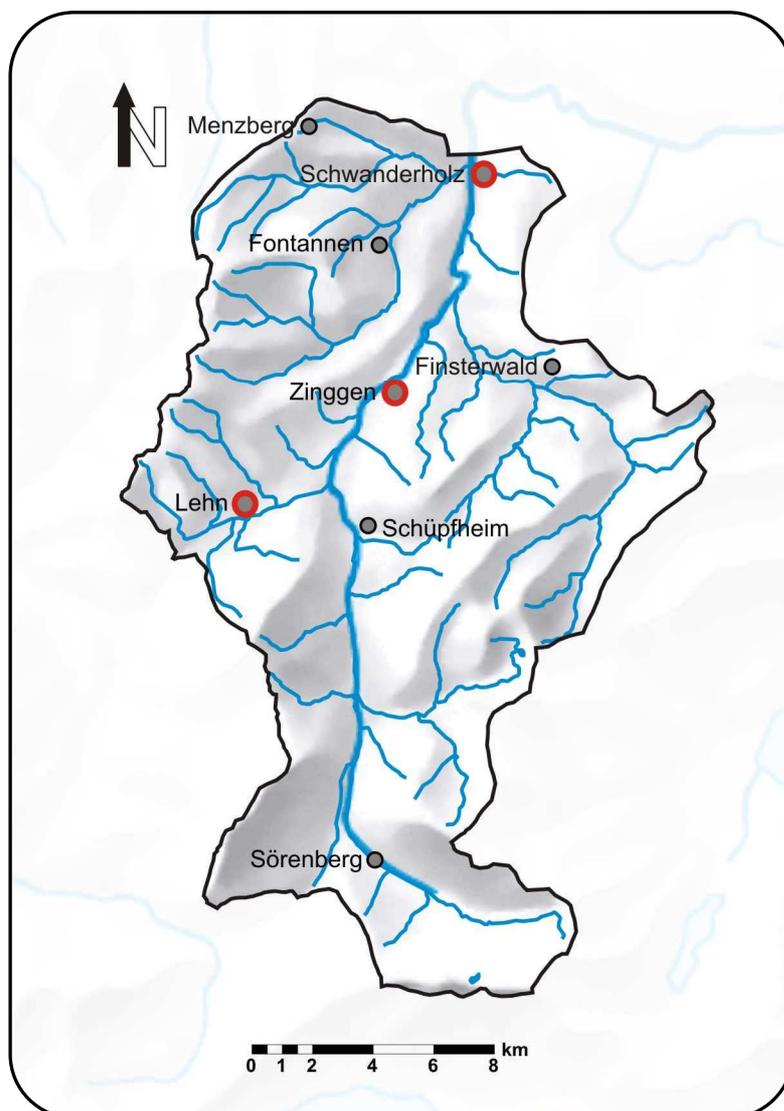


Abb. 4-15: Strassenwetterstationen-Vaisala im Untersuchungsgebiet (grau). Vergleichsstationen-Young (rot).

Tab. 4-5: Beschreibung der Strassenwetterstationen und der Vergleichsstationen im Untersuchungsgebiet. Datengrundlage: Strasseninspektorat Kanton Luzern (Schwanderholz – Menzberg).

Standort	Koordinaten	Höhe [m.ü.M]	Stationstyp	Betreiber	Auflösung [min]	Auflösung [mm]
Schwanderholz	648.438/208.987	681	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Fontannen	645.527/207.445	680	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Zinggen	645.418/202.080	698	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Schüpheim	643.955/197.613	764	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Lehn	641.325/198.074	762	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Finsterwald	650.999/201.880	1024	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Soerenberg	644.744/186.214	1123	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
Menzberg	642.482/211.213	985	Vaisala PWD 11	Kanton Luzern	15	0.1
1/Lehn	641.325/198.074	762	Young 52202	GIUB	1	0.1
2/Zinggen	645.418/202.080	698	Young 52202	GIUB	1	0.1
3/Schwanderholz	648.438/208.987	681	Young 52202	GIUB	1	0.1

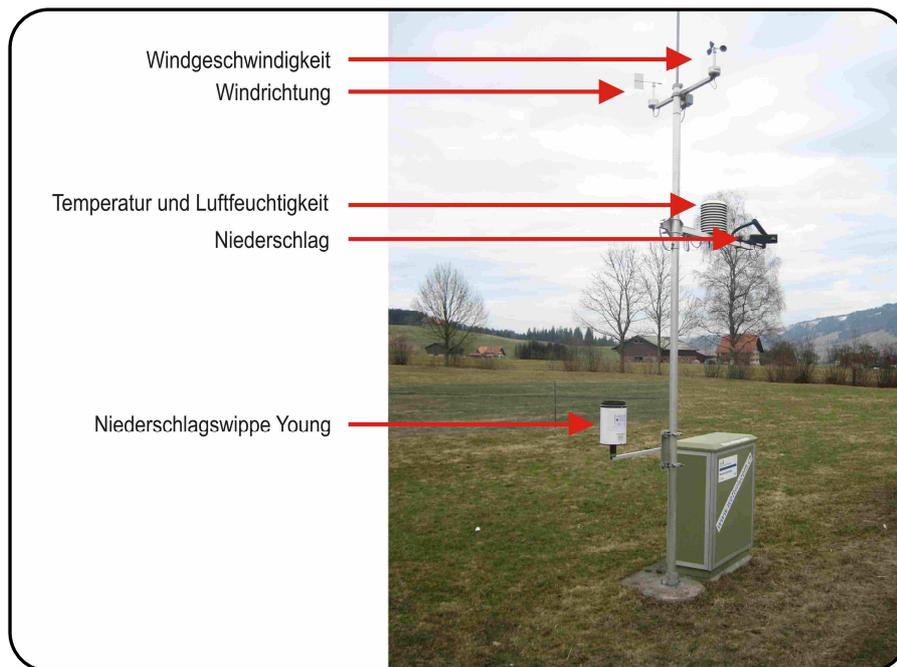


Abb. 4-16: Strassenwetterstation Lehn mit Young-Niederschlagswippe zur Vergleichsmessung.

Niederschlagsmessgeräte

Im Frühjahr 2010 kamen bei Vergleichsmessungen von Strassenwetterstationen [Vaisala PWD11] die Young-Niederschlagswippe zum Einsatz. Im folgenden Abschnitt werden die technischen Einzelheiten der optoelektrischen Messung erläutert. Das zur Vergleichsmessung verwendete Niederschlagsmessgerät Young wird in Kap. 4.1.2.c beschrieben.

Niederschlagsmessgerät Vaisala PWD 11

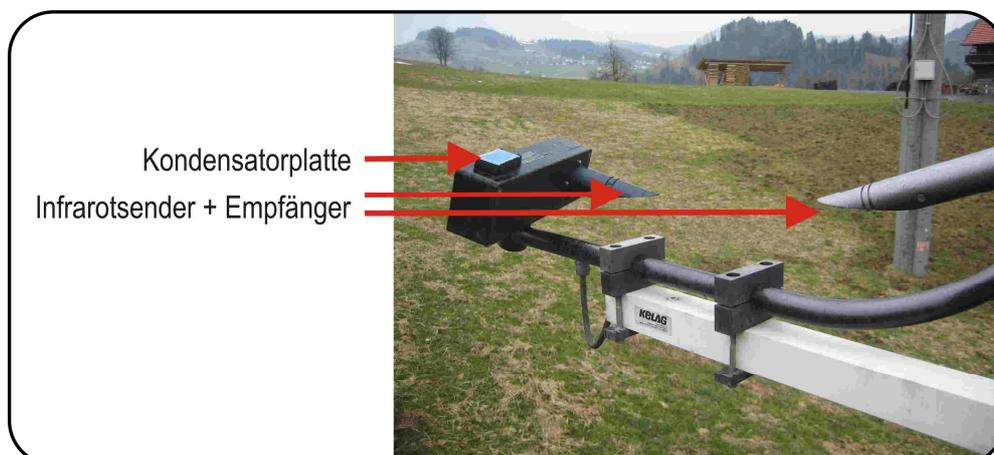


Abb. 4-17: Vaisala PWD 11 auf einer Höhe von 2.5 m über Boden bei der Strassenwetterstation Schwanderholz.

Der optoelektrische Sensor von Vaisala (*Abb. 4-17*) dient zur Messung der Sichtweite und zur Niederschlagsmessung. Hierzu wird ein bestimmtes Volumen Atmosphäre durch eine Lichtquelle im Infrarotbereich beleuchtet. Wenn sich in diesem Bereich Aerosole befinden, wird das Licht teilweise gestreut und trifft auf einen Empfänger der in einem Winkel von 45 Grad gegenüber dem Sender angebracht ist. Die Messsignale können nach Art des Niederschlags (Schnee, Regen, Gemischt) aufgeschlüsselt und quantifiziert werden. Das Resultat der optischen Messung ist abhängig von der Grösse der Tropfen. Zusätzlich zur optischen Methode werden bei den Strassenwetterstationen Niederschlagsflächensensoren eingesetzt. Dabei werden die Tropfen oder Schneeflocken mit Hilfe der Kapazitätsänderung von Kondensatorenplatten unterschieden [PWD-11]. Ein geschützter Draht, der sich unter einer Glasfläche befindet, bildet einen Kondensator. Die Kapazität ändert sich bei Wasser auf der Glasoberfläche. Diese Änderung ist proportional zu der Wassermenge auf der Oberfläche [VAISALA PWD SENSOR SERIES]. Somit wird der Niederschlag erkannt und die Intensität bestimmt. Die Geräte haben gemäss Hersteller eine Empfindlichkeit von 0.1 mm/h. Bei leichtem Regen können aber Unter- bzw. Überschätzungen von bis zu 30 % aufgezeichnet werden [PWD-11]. Der Niederschlag wird bei dieser Messstation im Unterschied zu den Stationen der MeteoSchweiz (1.5 m) und des temporären Messnetzes in rund 2.5 m Höhe gemessen. Gemäss SEVRUK [2005] führt die Niederschlagsmessung mit Messzylinder mit zunehmender Höhe zu grösseren Unterschätzungen des tatsächlich gefallenen Niederschlags. Dies ist auf den stärkeren Windeffekt mit zunehmender Höhe zurückzuführen. Bei der Messung mit der optoelektrischen Methode kann dieser Messfehler ausgeschlossen werden.

4.2 Abflussmessnetz

Abflussstationen erlauben es, die Reaktion des EZG auf den gefallenen Niederschlag zu beobachten.

4.2.1 Bestehendes Abflussmessnetz

Während dem 20. Jahrhundert wurde an diversen Standorten an der Kleinen Emme der Abfluss gemessen. Einige Stationen wurden nur während wenigen Jahren betrieben. In der *Abb. 4-18* und den *Tab. 4-6* und *Tab. 4-7* sind alle genutzten Abflussstationen aufgeführt [AMIGUET 2010].

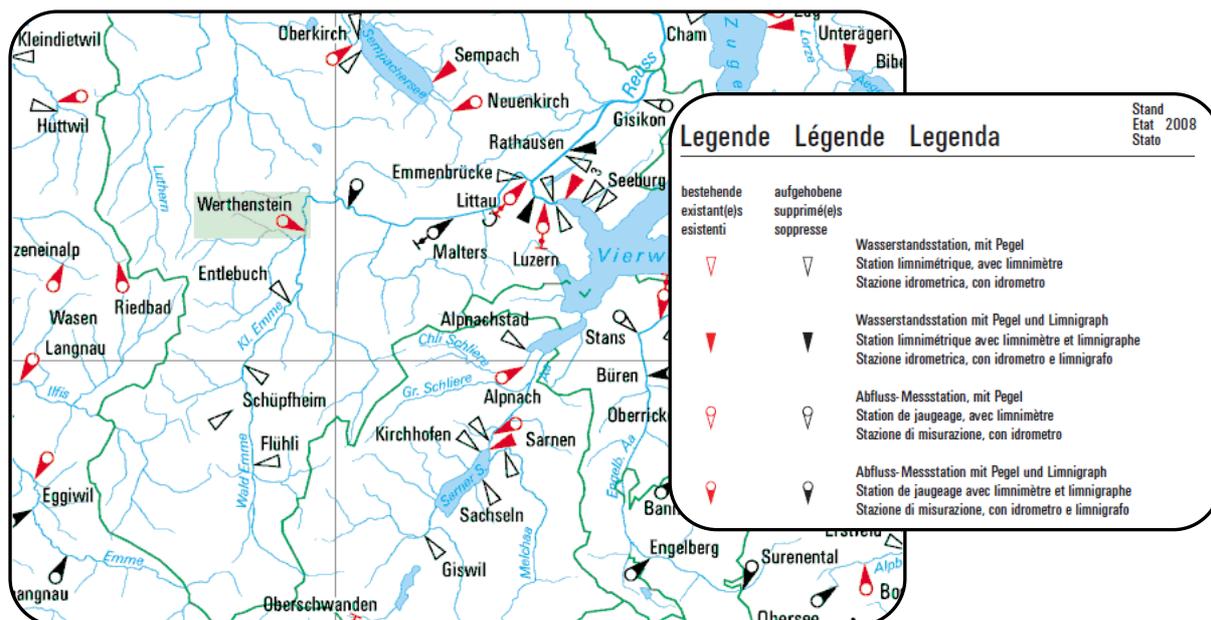


Abb. 4-18: Abflussmessnetz in der Region der Kleinen Emme. Quelle: BAFU [2009A].

Tab. 4-6 : Aufgehobene Abflussmessstationen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Datengrundlage: BAFU [2009A].

Standort	Messperiode	Betreiber
Waldemme, Flühli	1905 – 1920	BAFU
Waldemme, Schüpfheim	1906 – 1927	BAFU
Kleine Emme, Schüpfheim	1907 – 1921	BAFU
Kleine Emme, Entlebuch	1904 – 1913	BAFU
Kleine Emme, Werthenstein	1906 – 1935	BAFU
Kleine Emme, Malters	1931 – 1977	BAFU
Kleine Emme, Emmenbrücke	1866 – 1949	BAFU

Tab. 4-7: Bestehende Abflussmessstationen (Stand 2009) im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Datengrundlage: BAFU [2009A].

ID	Standort	Koordinaten	Stationstyp	Messperiode	Betreiber
2487	Kleine Emme, Werthenstein, Chappelboden	647.870/209.510	Abflussmessstation	1984 -	BAFU
LU14	Waldemme, Sörenberg	645.510/185.640	Abflussmessstation	1994 -	Kanton Luzern (UWE)
	Waldemme, Flühli	643.710/194.570	Grenzwertpegel	1988 -	BAFU
	Kleine Fontanne, Romoos, Stägplatz	647.020/208.840	Grenzwertpegel	1988 -	BAFU

Die Station Werthenstein, beim Gebietsauslass des Untersuchungsgebietes, ist seit 25 Jahren in Betrieb. Die Station Sörenberg ist seit 1994 in Betrieb und sendet seit 2009 die Abflussdaten direkt an die Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern. Die Daten der Hochwassergrenzwertpegel an der Waldemme und der Kleinen Fontanne zeichnen den höchsten Wasserstand bei einem Hochwasser auf. Diese Information kann bei einer Hochwasserwarnung nicht miteinbezogen werden.

4.2.2 Temporäres Abflussmessnetz

Im Sommer 2009 wurden zusätzlich zu den genannten bestehenden Stationen an vier weiteren Standorten Pegelmessstationen installiert [AMIGUET 2010].

4.2.2.a Standortwahl der Abflussmessstationen

Es gibt eine Vielzahl von Kriterien, die bei der Auswahl von Standorten für Abflussmessstation in einem EZG beachtet werden müssen. Durch das Studium von topografischen Karten erhält man einen ersten Eindruck über die Ausdehnung der TEZG und das Fließgewässernetz. Eine Feldbegehung aller TEZG ist aber unerlässlich. Das Flussbett sollte bei der Messstelle stabil sein und der Wasserstand nicht durch einen Rückstau beeinflusst werden. Eine enge Stelle ist generell einer Breiten vorzuziehen, da die Wasserspiegelschwankungen genauer aufgezeichnet werden können. Grosse Fluktuationen des Wasserstandes während eines Ereignisses können die Messung aber auch erschweren [DYCK & PESCHKE 1989]. Das Ziel ist es zu ermitteln, wie hoch ein Abfluss an einer Messstation im EZG sein muss, damit ein gewisser Grenzpegel in Werthenstein erreicht wird. Zudem muss die Station ohne Gefahr zu erreichen sein. Eine Brücke ist ein idealer Messpunkt, da der Fluss einfach überquert werden kann und Abflussmessungen durchgeführt werden können. Um die Daten per GSM übertragen zu können, muss ein Mobilfunknetz verfügbar sein [AMIGUET 2010]. Weitere Informationen zum Abflussmessnetz und der Datenübertragung finden sich in AMIGUET [2010] und MASSON [2010].

4.2.2.b Beschreibung der Abflussmessstationsstandorte GIUB

Nach Begutachtung aller grösseren Fließgewässer wurden an vier Standorten Pegelmessstationen installiert (*Abb. 4-19 und Tab. 4-8*). Diese Stationen ermöglichen Informationen zu den Abflüssen aller grösseren Zuflüsse der Kleinen Emme zu erhalten.

Die Station GIUB 1 misst den Abfluss aus dem TEZG Südgraben. Die Station CKW liefert indirekte Informationen zu den Zuflüssen Rotbach und Seebebach, da oberhalb im EZG der Abfluss im Südgraben und in Sörenberg gemessen wird und es keine weiteren Zuflüsse auf der Zwischenstrecke gibt. Der Zufluss der Wiss Emme wird durch GIUB 2 in Schüpfheim gemessen, da zusätzlich zur Wiss Emme nur kleine Zuflüsse zwischen der Station CKW und GIUB 2 in die Waldemme münden. Die Stationen GIUB 3 und GIUB 4 messen die Wasserstände der Grossen Entle und der Fontanne. Die Station GIUB 4 ist zu nahe beim Gebietsauslass in Werthenstein, um ihre Messwerte direkt zur Hochwasserwarnung zu verwenden. Die Station wurde installiert, um ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss im TEZG der Fontanne zu erhalten und somit eine Warnung auf

Grundlage der Niederschlagsmessung zu ermöglichen. Die folgende Karte repräsentiert das temporäre Messnetz von 2009, das auch im Jahre 2010 in dieser Form betrieben wird [AMIGUET 2010].

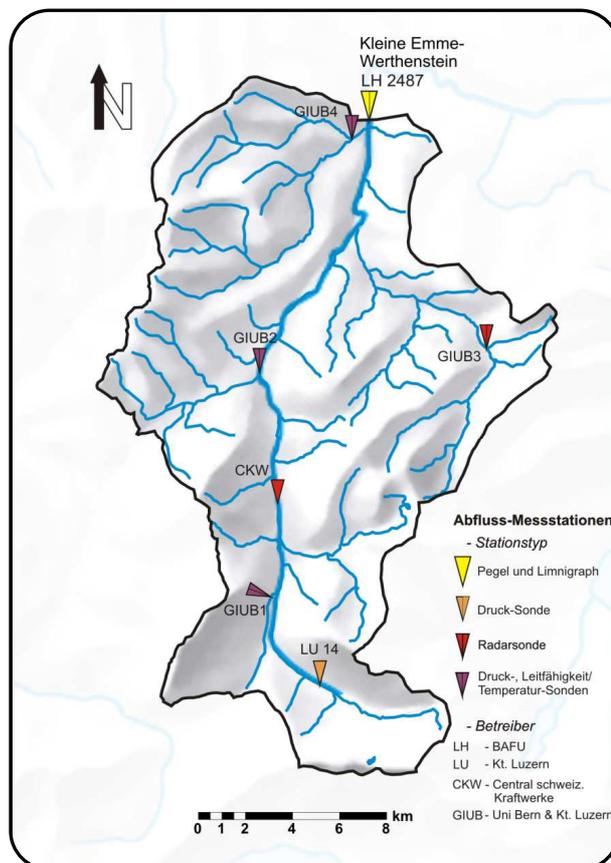


Abb. 4-19: Temporäres Abflussmessnetz mit Stationen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), des Kantons Luzern (UWE) und vom Geografischen Institut (GIUB). Quelle: AMIGUET [2010].

Tab. 4-8: Beschreibung der Abflussstationen des temporären Messnetzes innerhalb des Einzugsgebietes. Datengrundlage: Amiguet [2010].

ID	Standort	Koordinaten	Stationstyp	Betreiber	Auflösung [min]	Messperiode
LH2487	Kleine Emme, Werthenstein, Chappelboden	647.870/209.510	Abflussmessstation, Pneumatik	BAFU		1984-
LU14	Waldemme, Sörenberg, Hinder Schönisei	645.550/185.600	Abflussmessstation, Drucksonde	Kt. LU (UWE)	10	1994-
CKW	Waldemme, Flühli, Spierbärgli	643.550/193.850	Abflussmessstation, Radar	CKW		
GIUB 1	Südelgraben, Flühli, Hirseggbrügg	643.900/189.480	Pegelmessstation, Drucksonde	GIUB	5	2009
GIUB 2	Kleine Emme, Schüpheim, Landbrügg	643.250/199.250	Pegelmessstation, Drucksonde	GIUB	5	2009
GIUB 3	Grosse Entle, Gfelle, Stilaub	652.600/199.900	Pegelmessstation, Radar	GIUB	5	2009
GIUB 4	Fontannen, Wolhusen, Müliacher	647.150/208.850	Pegelmessstation, Drucksonde	GIUB	5	2009

5 Datenmanagement

Niederschlags- und Abflussdaten im EZG stehen in unterschiedlicher Qualität und nur während begrenzten Messperioden zur Verfügung (siehe Kap. 5.1). Entsprechend der Datenverfügbarkeit beziehen sich die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen auf unterschiedlich lange Zeiträume.

Beim Betrieb eines temporären Messnetzes mit 17 Niederschlagsmessstationen fällt eine enorme Menge an Daten an. Zusätzlich werden Niederschlagsdaten vom Kanton Luzern und der MeteoSchweiz miteinbezogen. Vom Auslesen eines Dataloggers bis z.B. zur Erstellung einer Übersichtskarte mit einem Gebietsniederschlag eines Ereignisses werden diverse Arbeitsschritte durchlaufen, die im Kap. 5.2 erläutert werden (Abb. 5-1).

5.1 Datenverfügbarkeit

5.1.1 Datenverfügbarkeit 1984-2009

Die Niederschlagsdaten der automatischen Niederschlagsmessgeräte und der Tagessammler der MeteoSchweiz, stehen schon vor 1984 zur Verfügung (siehe Kap. 4.1). Die Daten der Abflussmessung der BAFU-Messstelle in Werthenstein liegen aber erst seit 1.4.1984 vor (Tab 5-1). Deshalb wird die Analyse der Hochwasser auslösenden Niederschlagsereignisse während der Periode von 1.4.1984 bis 31.12.2009 vorgenommen. Der Datensatz "Radar Mt.CH" (siehe Kap. 2.2.3) ist für den Zeitraum von 1992 bis 2006 vorhanden. Die zwei kantonalen Stationen in Wolhusen und Schüpfheim werden seit dem Jahr 2000 betrieben. Die Daten des temporären Messnetzes sind für die Messperiode vom 26.06.2009 bis am 12.10.2009 verfügbar.

Tab. 5-1: Datenverfügbarkeit der Niederschlags- und Abflussdaten für das Einzugsgebiet der Kleinen Emme von 1984-2009. Blau: Abfluss, Rot: Niederschlag.

Messdaten	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Abfluss Werthenstein	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Automatische N-Stationen MeteoSchweiz	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tagessammler MeteoSchweiz	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Datensatz "Radar Mt.CH"									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Kantonale Niederschlagsstationen																					■	■	■	■	■	■
Temporäres Messnetz																										■

5.1.2 Datenverfügbarkeit 2009

Es werden bei der Analyse der Niederschläge Ereignisse zwischen dem 26.6.2009 und dem 12.10.2009 berücksichtigt. Die Datenverfügbarkeit während der Betriebszeit des temporären Messnetzes wird durch verschiedene Ereignisse eingeschränkt:

- a) Das **Anfangsdatum** dieser Messperiode ergibt sich durch die **Erstinstallation** von vier Niederschlagsmessgeräten am 26.6.2009
- b) Das **Enddatum** wird auf Grund von mehreren **Schneefällen** ab dem 13.10.2009 festgelegt.
- c) Die Niederschlagswippen von Young (A –E) wurden während dem 26.06.2009 und dem 2.7.2009 installiert. Die Rainwise-Niederschlagswippen (F-Q) konnten auf Grund von Lieferschwierigkeiten erst ab dem 16.7.2009 im Untersuchungsgebiet eingesetzt werden (Tab 5-2).
- d) Die kantonale Station in Schüpfheim, der Tagessammler in Entlebuch und die genutzten automatischen Niederschlagsstationen der MeteoSchweiz und Tagessammler ausserhalb des Einzugsgebietes haben während der ganzen Periode keine Datenausfälle. Die **Datenausfälle** aller Stationen sind in der Tab. 5-3 dokumentiert.

Tab. 5-2: Verfügbare Messdaten pro Niederschlagsstation während der Messperiode von Juni bis Dezember 2009. Schwarz: keine Daten, Grau: ungenügende Datenlage, Dunkelgrün: tägliche Auflösung, Orange: 5-minütliche Auflösung, Gelb/Blau: 1 minütliche Auflösung, Hellgrüne Linien: Anfang und Ende der Auswerteperiode (26.06.2009-12.10.2009).

ID	Standort	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
A	Arnischwand	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
B	Ruchweid	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
C	Schaftelenmoos	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
D	Gründli	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
E	Grämse	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
F	Eisee	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
G	Salzbüel	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
H	Hintere Angst	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
I	Sewenseeli	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
J	Junkholz	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
K	Schwändi	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
L	Multigschwändili	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
M	Hintere Rotbach	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
N	Schwarzenegg	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
O	Heuboden	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
P	Schaftelenmoos	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Q	Gründli	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
LU10	Schüpfheim	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
4620	Flühli	Light Green					
4650	Entlebuch	Light Green					

Tab. 5-3: Perioden im Sommer 2009 mit Datenausfall und ungenügender Datenqualität.

Station	Fehlerquelle	Datum
A	Softwareinstallation fehlerhaft	7.7-9.7, 27.7-31.7, 31.8-2.9
B	Messgerät verstopft	26.6.-17.8, 5.10.-12.10
C	Messgerät verstopft	27.7-19.8
D	Messgerät aus dem Lot geraten	27.7.-19.8
E	Messgerät verstopft, Softwareinstallation fehlerhaft	2.7-27.7, 27.07.-31.08
I	Verspätete Installation auf Grund von Bewilligungsverfahren	16.7-12.8
Q	Batterieversorgung fehlerhaft, Messgerät aus dem Lot geraten	16.7-17.8, 23.9-4.10
Flühli	Fehlerquelle unbekannt	1.8-15.8

5.2 EDV

Um die verschiedenen Arbeitsschritte von der Auslesung der Daten im Feld bis zur Darstellung der Gebietsniederschläge zu bewerkstelligen (Abb. 5-1), wird diverse Software benötigt. Die Arbeitsschritte und die entsprechende Software werden im Folgenden beschrieben.

Auslesen im Feld und Übertragung mit GPS

Die Programmierung und das Auslesen der Logger der Niederschlagswippen werden mit den mitgelieferten Programmen vorgenommen. Bei der Rainwise-Wippe wird das Programm "RL-Loader" verwendet und bei der Young-Wippe kommt die Software "Loggernet" zum Einsatz.

Plausibilisierung und Datenvalidierung

Mit "AquaZis" kann der Niederschlagsverlauf von benachbarten Stationen des temporären und des bestehenden Messnetzes verglichen werden (siehe MASSON [2010]). Bei Fehlaufzeichnungen oder Datenlücken werden die Rohdaten mit dem Open-Source-Editor "Notepad++" bearbeitet. Die Plausibilisierung wird in Kap. 5.3 näher erläutert.

Datenformatierung

Die Niederschlagsaufzeichnungen werden auf Grund der verschiedenen Messnetzbetreiber in diversen Datenformaten geliefert. Das Datum wird einheitlich auf das Format "DD/MM/JJJJ_hh:mm_Niederschlagswert" angepasst. Den Daten liegen zudem unterschiedliche Zeiteinstellungen zu Grunde. Dies reicht von UTC (Universal Time Coordinated) über UTC+1(Winterzeit CH) und UTC+2(Sommerzeit CH). Mit Hilfe der freizugänglichen Statistiksoftware "R 2.10.0" und "Notepad++" werden alle Nieder-

schlagsmessungen einheitlich mit Winterzeit (UTC+1) in einer Datenbank gespeichert. Entsprechende R-Skripte zur Datenformatierung von Niederschlagsdaten ("R 2.10.0") sind im Anhang zu finden.

Datenaggregation

Die Niederschlagsdaten werden von den Messstationen der verschiedenen Datenzulieferer mit unterschiedlichen Zeitintervallen aufgezeichnet. Zum Teil werden die Werte unabhängig vom gefallenem Niederschlag in gleichmässigen Abständen gespeichert oder Speicherplatz sparend nur bei Niederschlagsereignissen aufgezeichnet. Um die Daten vergleichen zu können und diese in weiteren Analysen zu untersuchen, muss die zeitliche Genauigkeit einheitlich festgelegt werden. Die Daten werden also in gleicher zeitlicher Auflösung gesichert. Auf Grund der grossen Datenmenge ist eine manuelle Handhabung der Daten nicht möglich. "R 2.10.0" ermöglicht diese zu bearbeiten.

Interpolation von Niederschlagsmengen

Bei der Analyse des Niederschlags bei einem Hochwasser interessiert in erster Linie der Gebietsniederschlag und nicht der Niederschlagswert, der an einer Messstation gemessen wird. Da der Niederschlag mit einem Bodenmessnetz nur punktuell gemessen werden kann, werden die Niederschlagswerte zwischen den Stationen mit Hilfe der "winmet"-Software interpoliert. "winmet" ist ein Dienstprogramm des hydrologischen Modellierungssystem "PREVAH" [VIVIROLI ET AL. 2007]. Der Gebietsniederschlag kann mit der genutzten Version von "winmet" nur in stündlicher Auflösung berechnet werden. Die Daten vom Datensatz "Radar Mt.CH" werden mit dem Hilfsprogramm "RADAR IMPORT" aus NetCDF-Dateien extrahiert. Letzteres ist ebenfalls eine Dienstsoftware für "PREVAH". Zur Bestimmung der Bodenfeuchte vor dem Ereignis wird der Bodenfeuchtespeicher SSM (Soil Moisture Storage) mit "PREVAH" ermittelt (siehe Kapitel 7.3.6). Detaillierte Informationen zu "PREVAH" sind in VIVIROLI ET AL. [2007] zu finden.

Darstellung

Die berechneten Gebietsniederschläge und Kennwerte der Niederschlagsereignisse wurden mit "CoreIDRAW X4", "ArcGIS 9.2", "R 2.10.0" und "Excel 2003" visuell aufbereitet. Entsprechende R-Skripte zur Darstellung von Gebietsniederschlägen ("R 2.10.0") sind im Anhang zu finden.

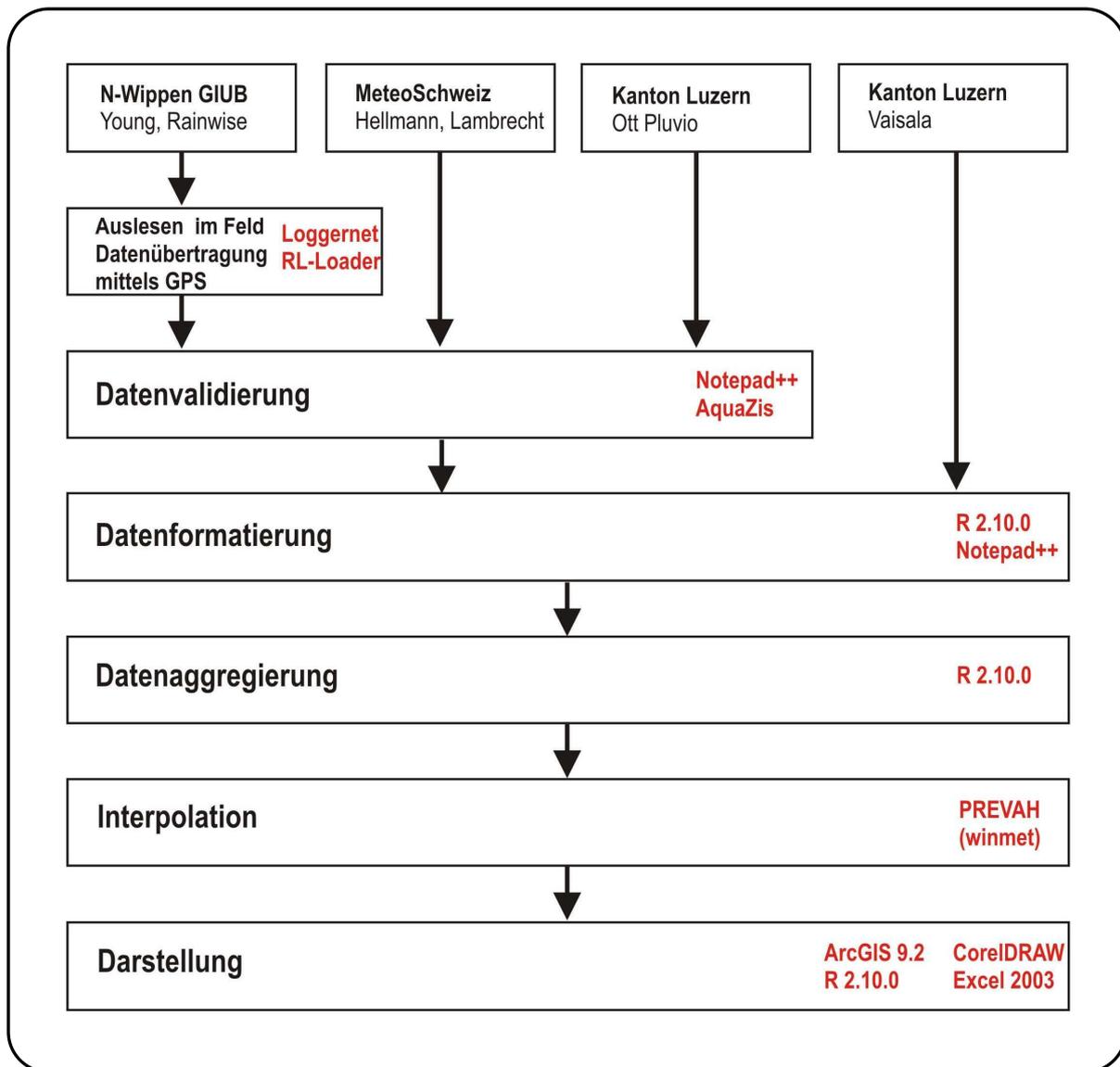


Abb. 5-1: Schema des Datenmanagements der Niederschlagsdaten des temporären und bestehenden Messnetzes. Mit roter Farbe markiert ist die zum entsprechenden Arbeitsschritt verwendete Software.

5.3 Plausibilisierung der Niederschlagsdaten

Anhand der Betreuungsprotokolle jeder Station werden in erster Linie die anthropogenen Wippbewegungen und die Perioden mit fehlerhaften Niederschlagsmessungen⁹ eliminiert. Die beim temporären Messnetz eingesetzten Niederschlagsgeräte sind nicht für die Schneemessung geeignet. Mit dem ersten flächendeckenden Schneefall im EZG im Winter 2009/2010 am 12. Oktober 2009 werden die Niederschlagsmessungen nicht mehr berücksichtigt. Bis zum Abbau im Dezember 2009 kann keine wärmere Phase mehr mit intensiven Regenereignissen beobachtet werden.

⁹ Perioden mit verstopften Niederschlagsmessgerät oder nicht horizontaler Ausrichtung der Wippe wurden gelöscht.

Um die grössten Fehler des Datensatzes zu beheben, wird ein Schwellenwert-Test und eine räumliche Konsistenzprüfung angewendet [FREI & SCHÄR 1998]. Alle Messwerte mit einer Regenmenge von über 50 mm/h werden herausgefiltert und in einer Detailanalyse beurteilt. Bei der räumlichen Konsistenzprüfung werden die Niederschläge von nahe liegenden Stationen der Messperiode zusammen betrachtet. Bei grossen Abweichungen der Tagessummen oder isolierten Niederschlagsereignissen bei einzelnen Stationen werden Radarbilder¹⁰ beigezogen, um die räumliche Verteilung des Niederschlags im EZG an einem bestimmten Tag zu beobachten und die Niederschlagswerte auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

¹⁰ Die Radarbilder für die Plausibilitätsüberprüfung in Einzelfällen stammen von Christophe Lienert. Weiterführende Informationen sind unter LIENERT ET AL. [2010] zu finden.

6 Vergleichsmessungen Niederschlagsmessgeräte

6.1 Vergleichsmessungen Young 52202 vs. Rainwise

Die Rainwise-Regenwippe wird 2009 zum ersten Mal vom Geografischen Institut der Universität Bern eingesetzt. Sie soll in Vergleichsmessungen unter Laborbedingungen und im Feld mit der sich schon länger im Einsatz befindenden Young-Niederschlagswippe verglichen werden.

6.1.1 Vergleichsmessungen im Labor mit dynamischem Test

Der Vergleich der Niederschlagswippen wird unter Laborbedingungen ausgeführt, um die jeweils registrierte Niederschlagsmenge und -intensität genau zu bestimmen. Die Vergleichsmessungen können unter diesen Umständen bei jeder Wippe unter identischen Bedingungen mehrere Male durchgeführt werden. Beim dynamischen Test wird ein Messzylinder mit 200 ml Wasser gefüllt und der Durchflussregler so eingestellt, dass ein Niederschlagsereignis mit einer Intensität von 40 mm/h¹¹ simuliert wird (Abb. 6-1). Um die gleiche Intensität bei beiden Wippen zu erreichen, wird der Durchfluss bei den Tests mit der Rainwise-Wippe erhöht.¹² Die Niederschlagsintensität von 40 mm/h entsprechen einem Starkniederschlag der unter realen Bedingungen vorkommen kann. Die 200 ml werden gewählt, um beim Rainwise-Fabrikat mindestens 20 Wippbewegungen pro Versuch zu erzeugen.

Vor dem dynamischen Test werden die Wippen gereinigt und getrocknet. Die Niederschlagsmessgeräte sollten vor der Durchführung des Tests die statische Kalibrierung erfolgreich durchlaufen haben. Es werden je drei Wippen von Young und Rainwise getestet. Bei jeder dieser Wippen wird der Test mit dreimaliger Wiederholung durchgeführt.

Sowohl die Niederschlagswippen von Young als auch jene von Rainwise unterschätzen die tatsächliche Niederschlagsmenge, die mit einem gläsernen¹³ Messzylinder vor dem Versuch abgemessen wird (Tab. 6-1). Im Mittel zeichnet die Young-Wippe 97 % der 200 ml Wasser auf. Im Gegensatz dazu wird mit der Rainwise-Wippe nur 91 % des Inputs gemessen. Zudem kann bei den Resultaten eine grössere Streuung der gemessenen Werte bei der Rainwise-Wippe festgestellt werden. Diese bewegen sich bei Young zwischen 96 bis 98 % und bei Rainwise von 89 bis 93 %.

¹¹ Die 40 mm/h entsprechen der mittleren Niederschlagsintensität. Zu Beginn des Versuchs ist die Intensität höher und sinkt bis zum Ende des Versuchs unter 40 mm/h. Diese Unterschiede treten durch die unterschiedliche Druckhöhe des Wassers im Messzylinder auf.

¹² Rainwise: 200 ml ergeben 6 mm, 6 mm x 9 min = 40 mm/h. Young: 200 ml ergeben 10 mm, 10 mm x 15 min = 40 mm/h

¹³ Zur Messung sollte kein Kunststoffzylinder verwendet werden, da beim Entleeren von Plastikgefässen eine grössere Menge an Wasser im Zylinder zurückbleibt.

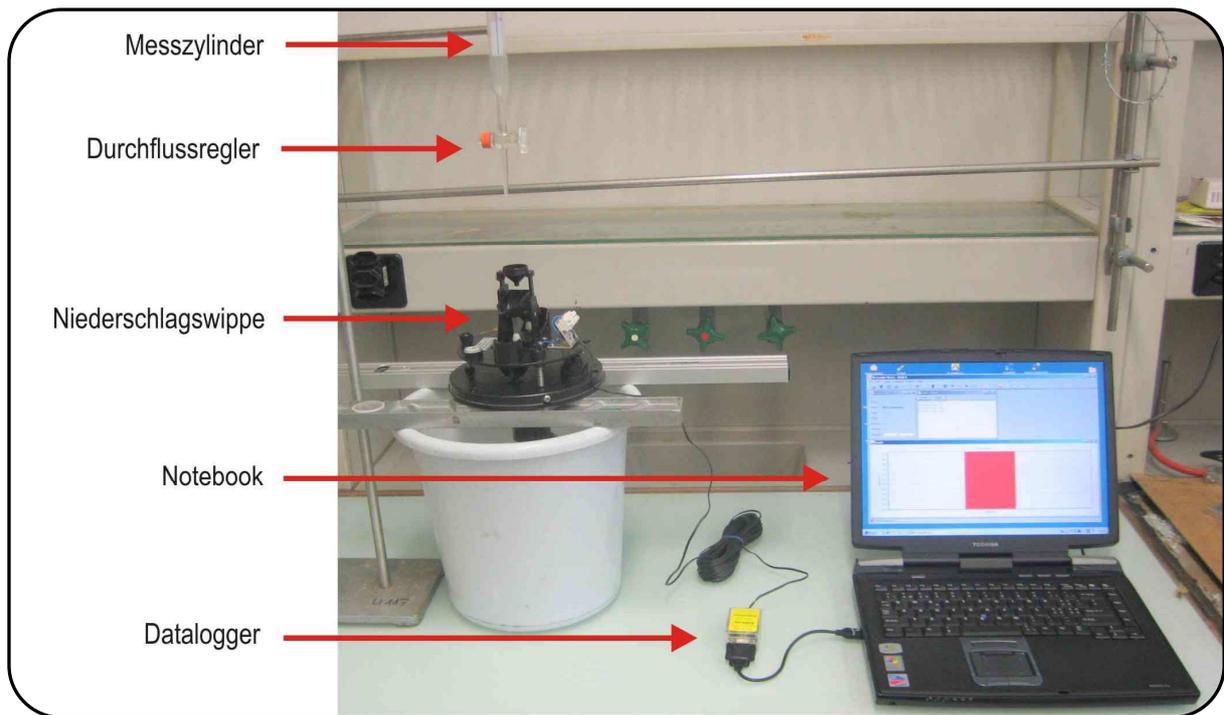


Abb. 6-1: Messaufbau des dynamischen Tests im Labor.

Tab. 6-1: Dynamischer Test mit den Niederschlagswippen Young und Rainwise. Gemessene Wassermenge in Prozent der tatsächlich zugegebenen Wassermenge.

	Young 52202	Rainwise
Mittelwert	97%	91%
Minimum	96%	89%
Maximum	98%	93%

6.1.2 Vergleichsmessungen im Einzugsgebiet

Nach den Testmessungen im Labor werden an zwei Standorten im EZG Vergleichsmessungen durchgeführt. Bei den Stationen Schaftelenmoos (C) und Gründli (D) wird neben der Young-Wippe im Abstand von rund 3 m eine Rainwise-Wippe installiert. Auf Grund der ungenügenden Datenlage bei der Station C und D bis am 21.8.2009 (siehe Kap. 5.1.2) wird der Untersuchungszeitraum vom 22.8.2009 bis 12.10.2009 gewählt. Es werden ausschliesslich Zeiträume analysiert, bei welchen mindestens ein Gerät (Rainwise oder Young) Niederschlag aufgezeichnet hat.

In den sechs Streudiagrammen (Abb. 6-2 ff.) ist die Regensumme unterschiedlicher Dauer der Rainwise-Geräte auf der Abszisse und diejenige der Young-Geräte auf der Ordinate aufgetragen, womit ein linearer Zusammenhang erkennbar werden sollte.

Die Niederschläge in Millimeter beziehen sich auf die Dauer von 5 min (Abb. 6-2 und Abb. 6-3), 1 h (Abb. 6-4 und Abb. 6-5) und 1 d (Abb. 6-6 und Abb. 6-7). Je geringer die zeitliche Auflösung der Parallelmessungen, desto grösser ist der lineare Zusammenhang. Bei der 5 min-Summe ist die Punktwolke diffus und nur eine marginale Korrelation feststellbar. Der Korrelationskoeffizient¹⁴ ist bei den stündlichen Summen mit 0.95 bei den Stationen C und P und mit 0.78 bei D und Q deutlich höher. Bei den täglichen Regensummen nimmt der Koeffizient bei beiden Stationen den Wert 0.99 an, was auf einen beinahe idealen linearen Zusammenhang hinweist.

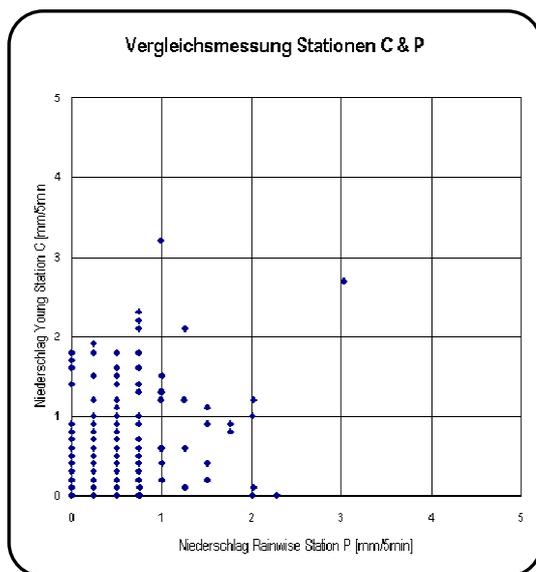


Abb. 6-2: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen C & P (5 min-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.65, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

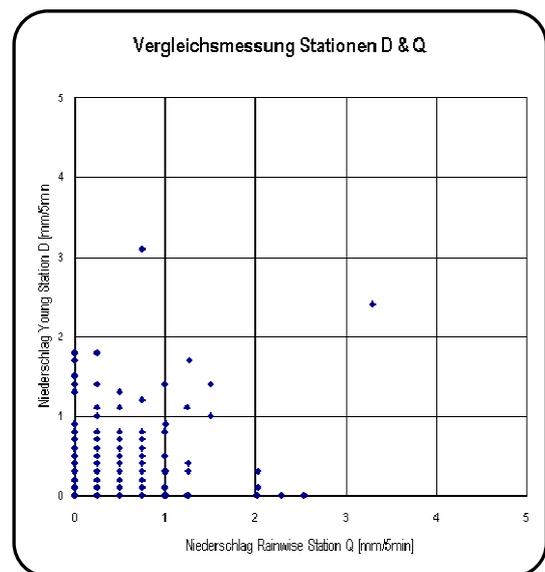


Abb. 6-3: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (5 min-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.4, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

¹⁴ Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ist ein Mass für lineare Assoziation. Bei starker Korrelation liegen die meisten Punkte nahe an der Kurve (im Falle eines linearen Zusammenhangs an einer Geraden). Er nimmt den Wert 0 an, wenn keine lineare Beziehung besteht. Bei einem Wert von 1 besteht ein vollständig positiver und bei einem Wert von -1 ein vollständig negativer Zusammenhang [REGRESSION UND KORRELATION 2010].

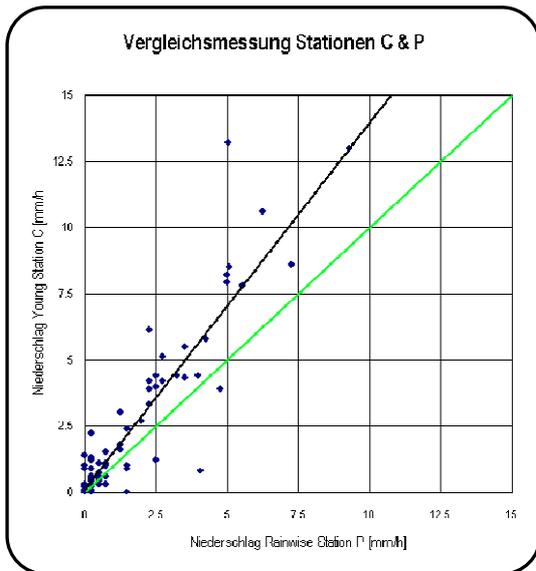


Abb. 6-4: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen C & P (1h-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.95, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

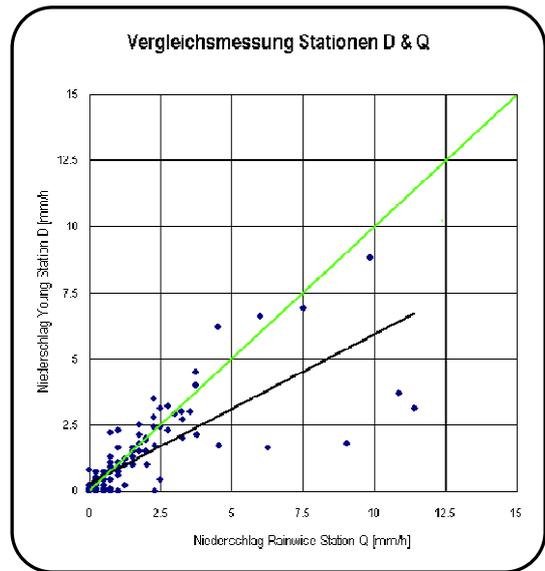


Abb. 6-5: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (1h-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.78, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

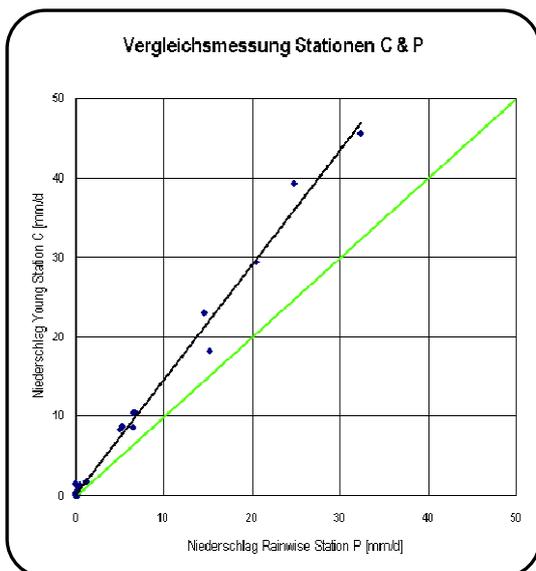


Abb. 6-6: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen C & P (1d-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.99, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

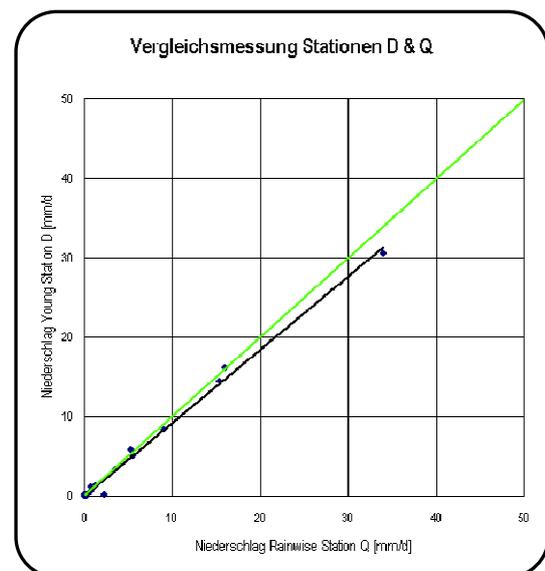


Abb. 6-7: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Stationen D & Q (1d-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.99, Zeitraum: 22.8.2009-12.10.2009.

Die Werte der Vergleichsstationen sollten im Idealfall nicht nur einen vollständig linearen Zusammenhang aufzeigen, sondern auch als absolute Beträge dasselbe Resultat ergeben, weil die 3 m

voneinander entfernt liegenden Vergleichsstationen identische Niederschlagsmengen aufzeichnen sollten. Die absolute Vergleichbarkeit der Geräte wird mittels eines Faktors¹⁵ bestimmt.

$$\text{Faktor} = \frac{\text{Niederschlagssumme Young [mm/d]}}{\text{Niederschlagssumme Rainwise [mm/d]}}$$

Der Faktor kann nur berechnet werden, wenn der Divisor $\neq 0$ ist. Da dies bei 5 minütlichen und stündlichen Summen nicht bei allen analysierten Werten zutrifft, werden nur die täglichen Summen begutachtet (Abb. 6-8 und Abb. 6-9). Der Median der Faktoren bei der Vergleichsmessung Station C und Station P liegt bei 1.58 und bei Station D und Station Q bei 0.93.

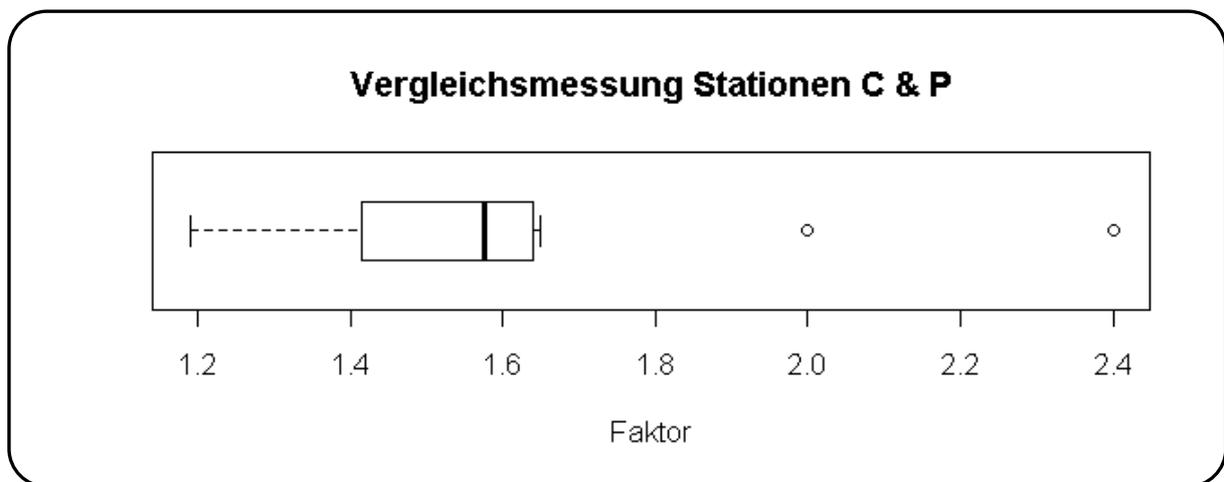


Abb. 6-8: Vergleichsmessung der Niederschlagsstationen C (Fabrikat: Young) und P (Fabrikat: Rainwise). Der Faktor wird wie folgt berechnet: $\text{Faktor} = \text{C Tagessumme} / \text{P Tagessumme}$. Beim Vergleich werden nur Tage mit Niederschlag einbezogen. Der Median ist mit der schwarzen breiten Linie gekennzeichnet.

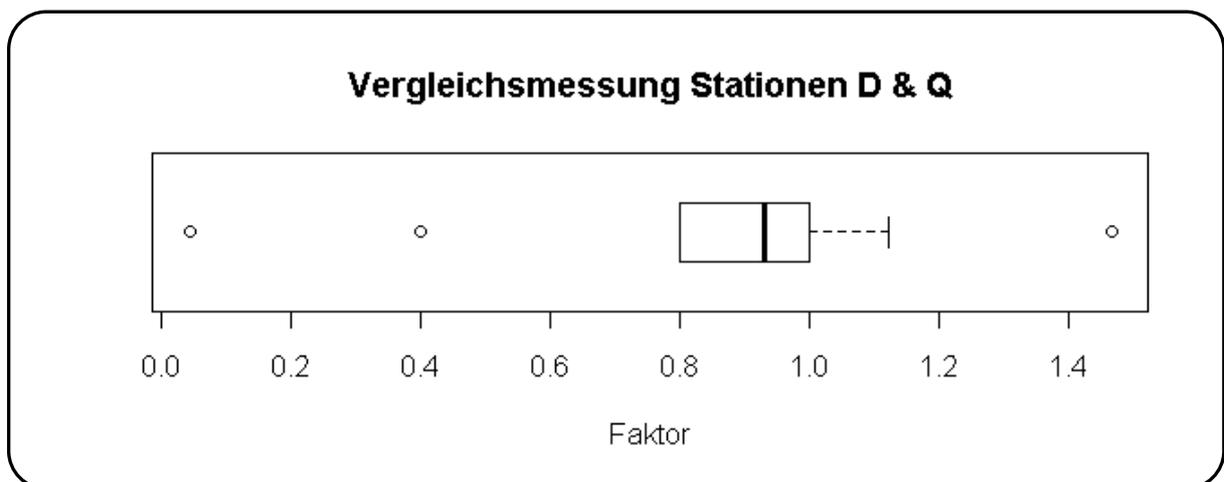


Abb. 6-9: Vergleichsmessung der Niederschlagsstationen D (Fabrikat: Young) und Q (Fabrikat: Rainwise). Der Faktor wird wie folgt berechnet: $\text{Faktor} = \text{D Tagessumme} / \text{Q Tagessumme}$. Beim Vergleich werden nur Tage mit Niederschlag einbezogen. Der Median ist mit der schwarzen breiten Linie gekennzeichnet.

¹⁵ Der Faktor bewertet den Unterschied der absoluten Messwerte über einen beliebigen Zeitraum. Ist der Faktor 1, sind die Messwerte identisch. Ist der Faktor < 1 , werden bei der Rainwise-Wippe grössere Niederschlagsmengen als bei der Young-Wippe aufgezeichnet. Ist der Faktor > 1 , werden bei der Young-Wippe grössere Mengen als bei der Rainwise-Wippe aufgezeichnet.

Kommentar

Neben den Differenzen in der Genauigkeit der Messung (siehe Kap. 6.1.1) ist die schwache Korrelation bei den 5 min-Daten darauf zurückzuführen, dass die Rainwise-Wippe (0.25 mm/tip) und die Young-Wippe (0.1 mm/tip) eine unterschiedliche Auflösung haben. Dies wirkt sich insbesondere bei schwachem Niederschlag und kurzen Zeiträumen auf die Vergleichbarkeit aus. Zudem spielt die Zeiteinstellung bzw. das asynchrone Laufen der Loggeruhren eine wichtige Rolle. Wie auch REBER [2005] feststellen musste, können starke Unterschiede zwischen der internen Loggeruhr und der Uhr des Notebooks auftreten. Anhand der Notebook-Uhr werden die Geräte im Feld bei den Kontrollen gerichtet. Der Unterschied kann sich im Extremfall auf bis zu 2 min belaufen. Die Unterschiede der Korrelationen und der Faktoren zwischen den beiden Vergleichstandorten sind auf die unterschiedlich hohe Niederschlagsmenge und -intensität und der individuellen Messgenauigkeiten der eingesetzten Geräte zurückzuführen. Die stark unterschiedlichen Mittelwerte der Faktoren der beiden Vergleichsmessungen lassen keine allgemeingültige Korrektur der Werte der Rainwise-Wippen im Vergleich zur Young-Wippe zu.

6.2 Vergleichsmessungen Vaisala PWD11 vs. Young 52202

Bei drei von acht Strassenwetterstationen im EZG wurden im Frühling 2010 Niederschlagsmessgeräte installiert. Mit der temporär installierten Young Wippe, soll die Güte der Messwerte der optoelektrischen Regenmessung mit dem Vaisala PWD11-Sensor eingeordnet werden.

Aufgrund von zweimaliger Verstopfung des Trichters der Niederschlagswippe bei der Strassenwetterstation bei Lehn, werden ausschliesslich Resultate der Vergleichsmessung der Strassenwetterstation Schwanderholzstutz und Zinggen über den Zeitraum vom 21.3 bis 21.5 präsentiert. Die aktuellen Niederschlagsmesswerte der jeweils letzten 24 h sind im 15 min Intervall in Lokalzeit auf den Websites www.wetterluzern.ch (Zugriff: 25.8.2010) publiziert. Die Messwerte der Strassenwetterstationen zur Vergleichsmessung werden diesen Websites entnommen. Durch Publikationslücken sind an einzelnen Tagen Unterbrüche von wenigen Stunden in der Datenreihe aufgetreten.

In den vier Streudiagrammen (*Abb. 6-10 ff.*) beziehen sich die Niederschläge in Millimeter auf die Dauer von 15 min¹⁶ (*Abb. 6-10 und Abb. 6-11*) und 1 d¹⁷ (*Abb. 6-12 und Abb. 6-13*). Es werden nur Zeiträume analysiert, bei welchen mindestens ein Gerät Niederschlag aufgezeichnet hat. Der Kor-

¹⁶ Die 15 minütliche Niederschlagssumme der Vaisala-Sensoren wird anhand der Intensitätsangabe [mm/h], die im Zeitintervall von 15 Minuten auf den Websites präsentiert werden, berechnet. Der Wert beruht auf einem Mittelwert der vergangenen 15 Minuten. Dieser Mittelwert setzt sich durch ein laufendes Mittel der jeweils vergangenen 10 min zusammen, das sich jede Minute verschiebt.

¹⁷ Die Niederschlagssumme [mm] wird während 24 h aufsummiert und um 05:41 auf 0 gestellt.

relationskoeffizient nähert sich mit der Veränderung des Zeitintervalls von 15 min auf 1 d an 1 an. Die Werte der 15 minütlichen Niederschlagssumme sind stark gestreut. Ein starker linearer Zusammenhang ist nicht erkennbar (Schwanderholzstutz: 0.20 und Zinggen: 0.49). Bei täglichen Daten zeigt sich eine lineare Beziehung der beiden Messungen (Schwanderholzstutz: 0.80 und Zinggen: 0.88).

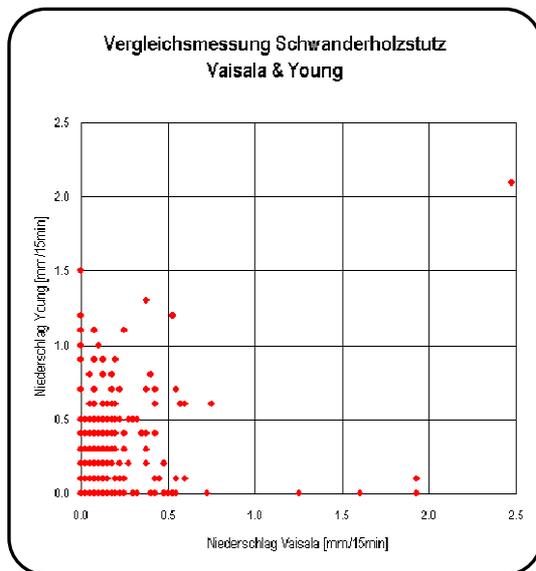


Abb. 6-10: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Schwanderholzstutz Vaisala & Young (15 min-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.20, Zeitraum: 21.3.2009-21.5.2009.

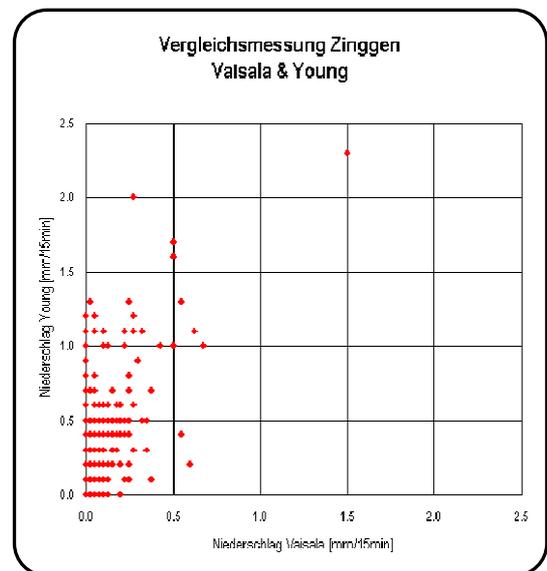


Abb. 6-11: Streudiagramm: Niederschlagsmenge Zinggen Vaisala & Young (15 min-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.49, Zeitraum: 21.3.2009-21.5.2009.

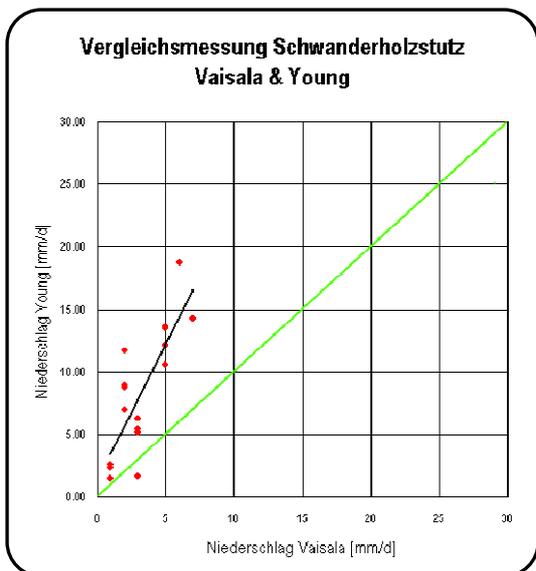


Abb. 6-12: Streudiagramm Niederschlagsmenge Schwanderholzstutz Vaisala & Young (1 d-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.8, Zeitraum: 21.03.2009-21.05.2009.

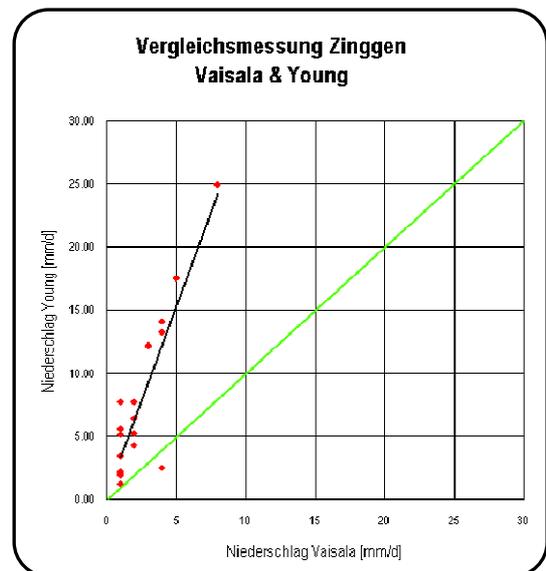


Abb. 6-13: Streudiagramm Niederschlagsmenge Zinggen Vaisala & Young (1 d-Summe), grüne Linie: vollständig lineare Korrelation (Soll-Zustand), schwarze Linie (Ist-Zustand), Korrelationskoeffizient: 0.88, Zeitraum: 21.03.2009-21.05.2009.

Um die absoluten Niederschlagsmengen vergleichen zu können, wird folgender Faktor¹⁸ berechnet.

$$\text{Faktor} = \frac{\text{Niederschlagssumme Young [mm/d]}}{\text{Niederschlagssumme Vaisala [mm/d]}}$$

Der Faktor kann nur berechnet werden, wenn der Divisor $\neq 0$ ist. Dieses Kriterium wird nur bei Tagessummen erfüllt, deshalb werden nur die täglichen Niederschlagssummen analysiert (Abb. 6-14 und Abb. 6-15). Der Median aller Faktoren beträgt bei der Vergleichsmessung Schwanderholzstutz 2.45 und bei Zinggen 3.30.

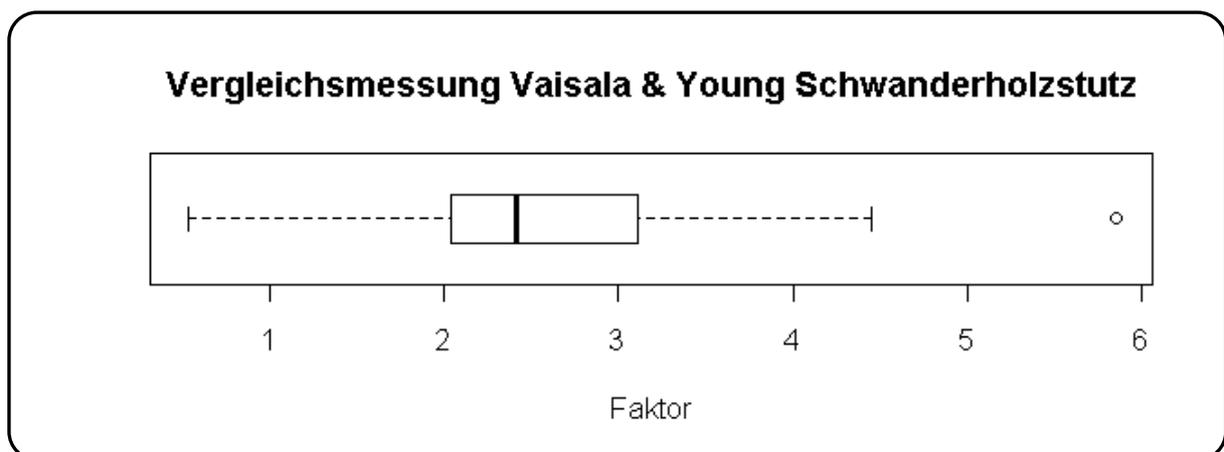


Abb. 6-14: Vergleichsmessung bei der Strassenwetterstation Schwanderholzstutz (Fabrikat: Vaisala) mit einer Niederschlagswippe (Fabrikat: Young). Der Faktor wird wie folgt berechnet: Faktor=Young Tagessumme/Vaisala Tagessumme. Beim Vergleich wurden nur Tage mit Niederschlag berücksichtigt.

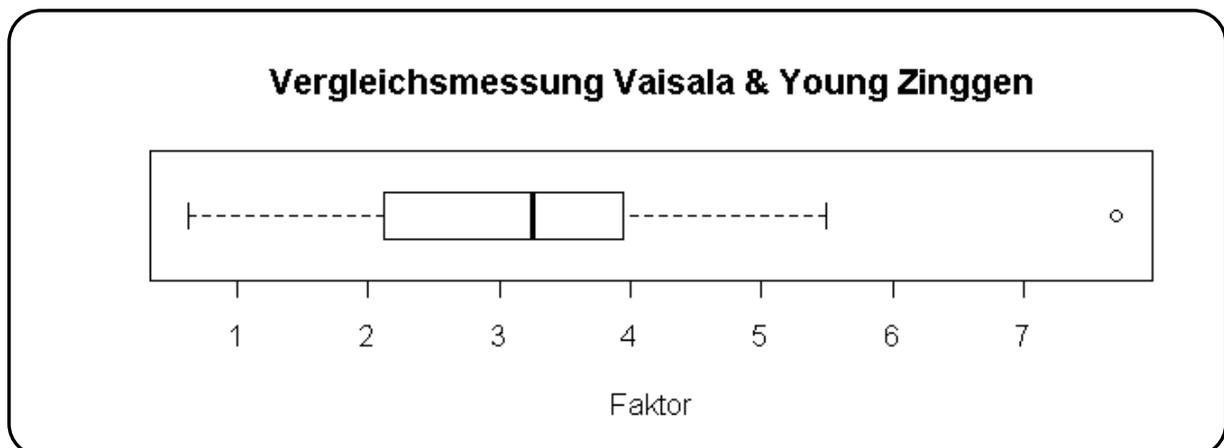


Abb. 6-15: Vergleichsmessung bei der Strassenwetterstation Zinggen (Fabrikat: Vaisala) mit einer Niederschlagswippe (Fabrikat: Young). Der Faktor wird wie folgt berechnet: Faktor=Young Tagessumme/Vaisala Tagessumme. Beim Vergleich wurden nur Tage mit Niederschlag berücksichtigt.

¹⁸ Der Faktor bewertet den Unterschied der absoluten Messwerte über einen beliebigen Zeitraum. Ist der Faktor 1, sind die Messwerte identisch. Ist der Faktor <1 , werden beim Messgerät von Vaisala grössere Niederschlagsmengen als bei der Young-Wippe aufgezeichnet. Ist der Faktor >1 , werden bei der Young-Wippe grössere Mengen als beim Messgerät von Vaisala aufgezeichnet.

Kommentar

Kleinere Unterschiede beim 15-min Intervall können damit begründet werden, dass mit dem optoelektrischen Sensor eine kontinuierliche Messung und mit der Niederschlagswippe eine Intervallmessung erfolgt. Zudem werden die Daten der 15 minütlichen Niederschlagsmessung anhand von Mittelwerten der Niederschlagsintensität berechnet, die nicht exakt dem 15 minütlichen Zeitintervall entsprechen. Der Vergleich mit 15 min-Daten ist somit mit Einschränkungen behaftet. Das asynchrone Laufen der Datalogger ist ebenfalls zu beachten. Insbesondere weil die Uhr der Datalogger von Vaisala von einer externen Firma eingestellt wird und nicht mit derselben Einstellung wie die Young-Wippe programmiert werden kann. Die Differenzen der Korrelationskoeffizienten und der Faktoren der zwei Vergleichsstandorte sind auf die Unterschiede der gefallenen Niederschlagsmenge und -intensität sowie auf die individuellen Messgenauigkeiten der Geräte zurückzuführen.

6.3 Bewertung der Niederschlagsmessgeräte

Während der Kalibrierung im Labor, dem Feldeinsatz im Sommer 2009 und Frühling 2010, der Analyse der Daten und der Konsultation von Fachliteratur, konnte eine Vielzahl von Informationen zu den eingesetzten Geräten zusammengetragen werden. Die Vor- und Nachteile der eingesetzten Niederschlagsmessgeräte werden in den Kapiteln 6.3.1 bis 6.3.4 erläutert. Die folgenden Bewertungen sind als zusätzliche Information zu den allgemein auftretenden Fehlern bei Niederschlagsmessungen in Kap. 2.2.1.c zu betrachten. Die Auflistung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und erfolgt nicht nach einem systematischen Raster. Es handelt sich mehrheitlich um Aspekte, die während der Feldarbeit beobachtet werden konnten. Eine umfassende Auflistung der Probleme der verschiedenen Niederschlagsmessungen ist in WMO [2008] zu finden. Die Frage der Praxistauglichkeit der Rainwise-Wippen und der optoelektrischen Sensoren wird in Kap. 9.1 bzw. Kap. 9.5.1 beantwortet.

6.3.1 Young 52202

Positive Aspekte:

- + Schneemessung mit Heizelementen ist möglich (wird aber auf Grund der Evaporation durch die Schneeschmelze von der WMO nicht empfohlen) [WMO 2008].
- + Messgenauigkeit pro Wippbewegung: 0.1 mm
- + Genaue manuelle Kalibrierung möglich: Der Messfehler beträgt max. ca. 0.05 ml bzw. 0.0025 mm.
- + Der Trichter ist in weisser Farbe gehalten. Dies minimiert die Evaporation.

Negative Aspekte:

- hoher Kaufpreis
- Ein grobmaschiges Sieb sollte Verstopfungen verhindern. Es steigert aber auch den Benetzungsverlust. Ein Test ergab, dass das Gewicht des Haftwassers am Sieb nach Eintauchen in Wasser 2.85 g beträgt. Dies entspricht rund einer Wippenfüllung [REBER 2005].
- Es besteht eine grosse Anfälligkeit auf Verstopfung des dünnen Trichterausflusses (Durchmesser: 2.5 mm). Das grobmaschige Sieb kann Verstopfungen durch Blütenstaub, Insekten und Vogelexkremete nicht verhindern. Die genannten Störungen sind auch bei anderen Niederschlagsmessungen mit Regenwippen häufig aufgetreten [vgl. SEVRUK 2005]. Diese Anfälligkeit auf Verstopfungen erhöhen die Unterhaltskosten [SEVRUK 2005].
- Unter der Wippe ist zwischen den Wippschalen ein Hohlraum zu finden, der verschmutzt werden kann oder von Insekten als Nistplatz genutzt wird. Dies beeinflusst den Zeitpunkt der Auslösung der Wippe.

6.3.2 Rainwise

Positive Aspekte:

- + Bei der Regenwippe kann der Einlass zur Messeinrichtung verstopfen [VGL. SEVRUK 2005]. Die Rainwise-Wippe ist relativ zur Young-Wippe auf Grund eines kleinmaschigen Löchersiebs direkt oberhalb des Ausflusses nicht anfällig für Verstopfungen.
- + niedriger Kaufpreis

Negative Aspekte:

- Der Trichter ist aus Kunststoff gefertigt, daher muss tendenziell von einer kurzen Lebensdauer ausgegangen werden. Während des Einsatzes im Sommer 2009 wurde ein Trichterboden bei Hagelniederschlag durchbrochen und bei zwei Geräten wurden Risse festgestellt.
- Der Trichter ist in schwarzer Farbe gehalten und wird durch Sonnenlicht in kurzer Zeit erhitzt. Dies erhöht die Evaporation des erstaufliegenden Niederschlags im Trichter.
- Die Trichterwand ist 5 cm hoch. Der Winkel der Schrägfläche des Trichters ist mit ca. 20° relativ flach. Ein Teil des Niederschlags spritzt aus dem Trichter. Zudem haften auf der flachen Schrägfläche Tropfen, die somit nicht gemessen werden.

- Haftwasserverluste sind laut DINGMAN [2001] bei Kunststofftrichtern gross.
- Mit jeder Wippbewegung wird 0.25 mm gemessen. Die Messgenauigkeit sollte laut WMO [2008] für Detailanalysen 0.2 mm nicht überschreiten. Das Risiko ist hoch, dass Wasser eines Niederschlagsereignisses in der Wippe bleibt und entweder verdunstet oder dem nächsten Ereignis zugeschrieben wird.
- Die Trichteröffnung hat eine Fläche von 333 cm² und ist somit 133 cm² grösser als bei der Young-Wippe. Haftwasserverluste sind bei grösserem Durchmesser höher.
- Ungenauere manuelle Kalibrierung: Der Messfehler beträgt maximal 0.2 ml bzw. 0.06 mm.
- grosse Abweichungen von den Messwerten der Young-Wippe

6.3.3 Vaisala PWD 11 - Strassenwetterstationen

Positive Aspekte:

- + Neben dem Niederschlag können auch andere Parameter gemessen werden (Sichtweite, Art des Niederschlags).
- + geringer Wartungsaufwand. Ein Ausfall durch Verstopfung ist nicht möglich.

Negative Aspekte:

- Der Niederschlag wird mit der optoelektrischen Methode nicht gemessen, sondern nur detektiert.
- Grosse Abweichung zu den Messergebnissen der Niederschlagswippe Young

7 Niederschlagsereignisse - Analysemethoden

Die Analyse bezieht sich auf jene Niederschlagsereignisse im EZG der Kleinen Emme, die zu einem hohen Abfluss an der Abflussmessstation in Werthenstein geführt haben. Um einen Überblick über das ganze Ereignis zu erhalten, werden Kennwerte verwendet, die das Niederschlagsereignis und den Anfangszustand des EZG vor dem Ereignis charakterisieren. Im Weiteren wird die räumliche und zeitliche Variabilität des Niederschlags im EZG anhand verschiedener Darstellungen aufgezeigt. Die Resultate der räumlichen und zeitlichen Analyse der Ereignisse der drei Untersuchungszeiträume (siehe Kap 7.1) werden in den Kap. 8.2.1 bis 8.2.4 zusammengefasst. Diese Zusammenfassungen erlauben es die für Hochwasserereignisse relevanten Schlüsselgebiete zu bestimmen.

7.1 Niederschlags-Datensätze

Auf Grundlage der Verfügbarkeit der Niederschlagsdaten (Kap. 5.1.1), können auf die gesamte Beobachtungsperiode von 1984-2009 drei Zeiträume ausgeschieden werden, die eine homogene Datengrundlage¹⁹ aufweisen (Tab. 7-1). Für jeden Datensatz wurde der Gebietsniederschlag in stündlicher Auflösung berechnet.

Tab. 7-1: Niederschlagsdatensätze während des Zeitraumes 1984-2009.

Name	Zeitraum	Grundlage	Interpolation
Messnetz 2009	Sommer 2009	MeteoSchweiz Bodenmessnetz und temporäres Bodenmessnetz	Ordinary Kriging
Radar Mt.CH	1992-2006	Kombinierter Datensatz: MeteoSchweiz Radar und Bodenmessnetz	SYMAP-Algorithmus
Stationen Mt.CH	1984-2009	MeteoSchweiz Bodenmessnetz: Tagessammler + automatische N-Stationen	Ordinary Kriging

Auf die Analyse der räumlichen Verteilung des Niederschlags innerhalb des Einzugsgebietes anhand des Datensatzes "Stationen Mt.CH" zwischen 1984 und 2009 wird verzichtet. Eine solche Analyse ist angesichts der geringen Niederschlagsmessnetzdicke nicht vertretbar (siehe Kap. 4.4.1.a). Somit wird bei diesem Datensatz das ganze EZG der Kleinen Emme bis Werthenstein als eine Gebietseinheit analysiert. Die räumliche Analyse der Niederschlagsereignisse erfolgt beim Datensatz "Radar Mt.CH", welcher zusätzliche Informationen aus Radarmessungen enthält und auch beim Datensatz "Messnetz 2009", wo zusätzliche Niederschlagsstationen die Messnetzdicke erhöhen.

7.2 Auswahl der Ereignisse

Die Ereignisse werden bei den drei Datensätzen nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Die Kriterien werden in den Kapiteln 7.2.1 bis 7.2.3 erwähnt.

¹⁹ Die Niederschlagsdaten stammen von METEOSCHWEIZ, von der Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern (UWE) und aus eigener Messung des Geografischen Instituts der Universität Bern.

7.2.1 Auswahl der Ereignisse von 2009 [Amiguet 2010]

Pour l'année 2009, les crues considérées sont celles qui dépassent 20 [m³/s] pour la période pendant laquelle au moins une partie des stations de jaugeage et des précipitations étaient installées, soit du 26.06.2009 au 12.10.2009. Le critère d'indépendance choisi est le suivant : il est nécessaire que le débit entre deux pics diminue de 2/3 par rapport au plus petit pic pour que les pics correspondent à des événements différents.

7.2.2 Auswahl der Ereignisse von 1992 – 2006

Mit dem Datensatz "Radar Mt.CH" werden Ereignisse der partiellen Serie von 1984 bis 2009 untersucht. Von den 20 grössten Hochwasserereignissen zwischen 1984 und 2009 befinden sich 11 Ereignisse in der entsprechenden Periode von 1992 bis 2006.

7.2.3 Auswahl der Ereignisse von 1984 – 2009 [Amiguet 2010]

A partir des données de l'hydrogramme des valeurs de la station Werthenstein entre 1984 et 2009, les valeurs sont agglomérées en une valeur par jour correspondant au maximum journalier. Cela permet de réduire considérablement le nombre de valeurs sans pour autant perdre l'information de la valeur maximale. Ces maximums journaliers sont ordonnés dans un ordre décroissant. Le nombre de crues pris en considération correspond à quatre fois le nombre d'années de mesure observé (25 ans de mesure entre 1984 et 2009 correspondent donc à une série partielle de 100 crues). Pour éviter de prendre plusieurs fois le même événement en compte, ou en d'autres termes, pour que chaque crue soit indépendante (voir plus bas), seules les pointes de crues séparées d'au moins sept jours sont retenues. Cette opération a réduit la série partielle à 70 crues, ce qui correspond aux critères de NACHTNEBEL [2008] qui dit que le nombre de valeurs correspond à environ 2 à 3 fois le nombre d'années observées. Sur les 70 crues de la série partielle, les 20 plus grandes sont étudiées.

7.3 Einteilung in Teileinzugsgebiete

Das ober- und unterirdische hydrologische EZG kann eine unterschiedliche Fläche repräsentieren. Das EZG wird mit einem digitalen Höhenmodell nach oberirdischen Faktoren definiert. Das Untersuchungsgebiet ist in 14 TEZG unterteilt (Abb 7-1). Die Unterteilung wurde auf Grundlage von oberirdischen Wasserscheiden der verschiedenen Regionen und der Standorte der Abflussmessstationen

vorgenommen. Diese Unterteilung ermöglicht die Analyse der räumlichen Variabilität verschiedener Kennwerte zwischen Ereignissen.

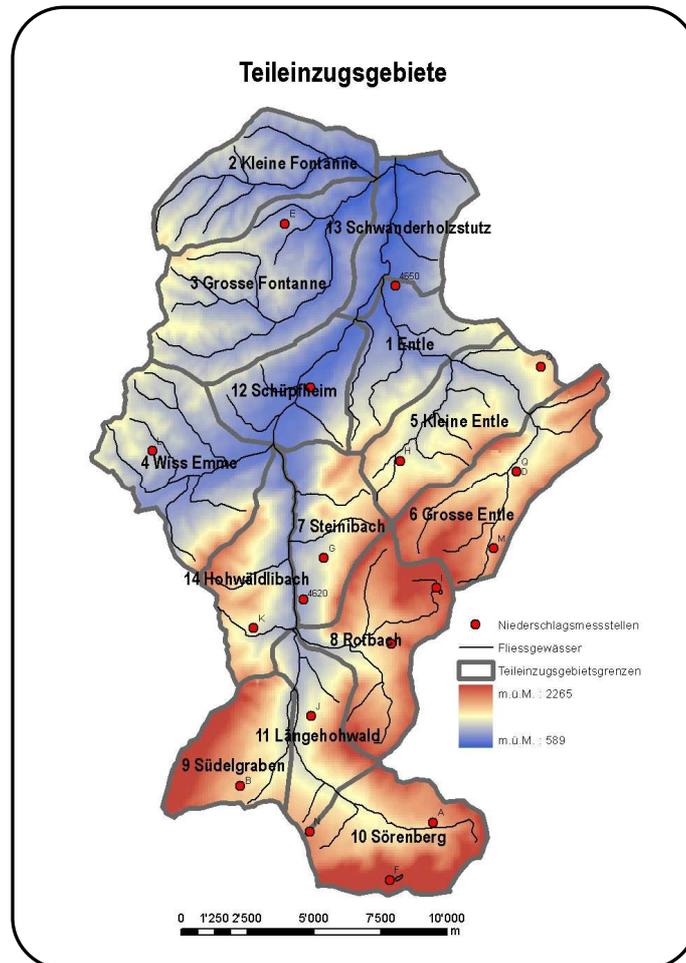


Abb. 7-1: Einteilung der 14 Teileinzugsgebiete. Jedes Einzugsgebiet ist definiert durch eine Identifikationsnummer und einen Namen.

7.4 Kennwerte zur Analyse von Niederschlagsereignissen

Mit Hilfe von Kennwerten lässt sich ein Niederschlagsereignis aus verschiedenen Perspektiven beschreiben. Die in der Ereignisanalyse (Kap. 8) verwendeten Kennwerte werden nachfolgend erläutert.

7.4.1 Niederschlagsdauer

Die Niederschlagsdauer hat einen grossen Einfluss auf die Abflussganglinie. Mit zunehmender Dauer wird der Anteil des effektiven Niederschlags²⁰, der auch als Direktabfluss bezeichnet wird, am Gesamtniederschlag grösser [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990]. Die Niederschlagsdauer wird definiert als die

²⁰ Der ohne Verzögerung zum Abfluss gelangende Niederschlag wird als abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag oder direkter Abfluss bezeichnet [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

Zeitspanne, welche vom Beginn des Niederschlagsereignisses bis zur nächsten niederschlagsfreien Periode andauert. Bei Niederschlägen über eine längere Zeitdauer werden kurze Unterbrechungen des Niederschlags nicht berücksichtigt [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990]. Es müssen laut GEIGER ET AL. [1991] mindestens 12 mm Niederschlag pro 24 h oder 6 mm pro 12 h fallen, um ein Niederschlagsereignis als ununterbrochen bezeichnen zu können. Die Bestimmung des Ereignisniederschlags in vorliegender Arbeit erfolgt in Anlehnung an die Methode von WEINGARTNER [1989]. Der Niederschlagsbeginn wird durch eine starke Intensitätszunahme des Niederschlags und einer Mindestmenge von 0.3 mm/h definiert. Das Niederschlagsende wird mit Hilfe der folgenden zwei Kriterien bestimmt:

- a) Niederschlagsintensität < 0.3 mm/h
- b) Bei mehrgipfligen Ereignissen wird das Ende zu dem Zeitpunkt festgelegt, bei welchem eine klare Zunahme der Niederschlagsintensität verbunden mit einem Anstieg des Abflusses festzustellen ist.

Trotz dieser Kriterien zur Bestimmung des Ereignisniederschlags, kann eine subjektive Komponente nicht ausgeschlossen werden.

Die Dauer des Gebietsniederschlags wird bei den Datensätzen "Stationen Mt.CH" und "Radar Mt.CH" in Stunden angegeben. Dies ist auf verschiedene Gründe zurückzuführen. Die verwendeten Versionen der Software "winmet" und "PREVAH" können interpolierte Gebietsniederschläge und Modellierungen nur im Stundenintervall erstellen. Der Datensatz "Radar Mt.CH" ist ebenfalls nur in stündlichen Intervallen vorhanden. Die Stunde orientiert sich an der von MeteoSchweiz verwendeten Stunde von der Minute 41 bis zur Minute 40 der darauffolgenden Stunde (Beispiel für 1 Uhr: 00:41 bis 01:40). Eine genauere Angabe ist auf Grund der Datenlage nicht möglich.

Der Anfang und das Ende der Niederschlagsereignisse kann beim Datensatz "Messnetz 2009" anhand des dichten Messnetzes und der gemessenen Punktniederschlägen in 5 minütlicher Auflösung, mit einer Genauigkeit von 5 min bestimmt werden.

7.4.2 Niederschlagsintensität

Neben der Ereignisdauer beeinflusst auch die Niederschlagsintensität die Abflussganglinie. Ist die Niederschlagsintensität grösser als die Infiltrationsrate²¹, bildet sich ein Wasserstau auf der Erdoberfläche und es kommt zu Oberflächenabfluss. Dieser gelangt schnell zum Vorfluter und es kann eine

²¹ Die Infiltrationsrate bezeichnet das Wasservolumen je Zeiteinheit das im Boden versickern kann. [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

kurze Konzentrationszeit²² beobachtet werden. Bei tieferen Intensitäten verlängert sich die Konzentrationszeit.

Mit zunehmender Dauer des Ereignisses sinkt die Niederschlagsintensität. Bei konvektiven Niederschlägen ist mit hoher Intensität und kurzer Dauer zu rechnen. Advektive Niederschläge sind meist von längerer Dauer und geringerer Intensität. Die Niederschlagsintensität gibt die Niederschlagshöhe während einer definierten Zeitperiode an. Die Angabe erfolgt in mm/min oder mm/h. [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

$$\text{Intensität} = \frac{\text{Niederschlagshöhe [mm]}}{\text{Dauer [h]}}$$

7.4.2.a Ereignisintensität

Bei der Ereignisanalyse wird die Intensität als mittlere Ereignisintensität angegeben:

$$\text{Ø Intensität} = \frac{\text{Niederschlagshöhe Ereignis [mm]}}{\text{Ereignisdauer [h]}}$$

7.4.2.b Maximale Intensität

Die Intensität bezieht sich auf die aufsummierte Niederschlagshöhe einer Stunde im EZG oder einem TEZG. Bei der Angabe zu den TEZG wird die Identifikationsnummer des Teileinzugsgebietes und die dazugehörige maximale stündliche Intensität genannt.

Max. Intensität = maximale stündliche Niederschlagshöhe [mm/h]

Datensätze: "Stationen Mt.CH", "Radar Mt.CH", "Messnetz 2009"

Die maximale Intensität wird für das ganze EZG angegeben.

Datensätze: "Radar Mt.CH", "Messnetz 2009"

Das TEZG mit der maximalen Intensität wird genannt.

²² Die Konzentrationszeit beschreibt die Zeitspanne zwischen Ende des Niederschlags und Ende des Direktabflusses. [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

7.4.2.c Intensität Wussow

Zur Definition von Starkniederschlägen wird die Gleichung von Wussow [1922] angewendet. Die Einteilung in Starkniederschläge wird zur Typisierung der Hochwasser nach der Methode DIEZIG [2006] benötigt.

Ein Niederschlagsereignis wird als Starkregen bezeichnet, falls:

$$N > \sqrt{5 \cdot t - \left(\frac{t}{24}\right)^2}$$

Mit N =Niederschlag [mm] und t =Niederschlagsdauer [min]

Die Gleichung ist zur Anwendung bei kurz andauernden Niederschlägen konzipiert und lässt sich maximal bis zu einer Ereignisdauer von 47 Stunden einsetzen.

7.4.3 Niederschlagsmenge

Bevor ein Niederschlag überhaupt abflusswirksam wird, muss der Bodenfeuchtegehalt des Bodens über der Feldkapazität liegen oder die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität überschreiten. Das bedeutet, dass es bei der Kombination von Niederschlag und einem hohen Bodenwasserdefizit nicht zwingend ein erhöhter Abfluss auftreten. Aus diesen Gründen tritt Abfluss erst ab einer bestimmten Niederschlagshöhe auf [BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1990].

Datensatz “Stationen Mt.CH“, “Radar Mt.CH“ und “Messnetz 2009“

Der mittlere Gebietsniederschlag eines Ereignisses in Millimeter wird als “Niederschlagsmenge EZG“ bezeichnet. Der Gebietsniederschlag wird mit der Ordinary Kriging-Methode berechnet. Dabei werden Punktniederschlagsdaten im stündlichen Intervall interpoliert. Die Daten der Tagessammler werden anhand dieser stündlichen Punktniederschlagsdaten auf die 24 h eines Tages aufgeteilt. Die Niederschlagssammler in Flühli und Entlebuch sind die einzigen Stationen im EZG, die während dem ganzen Untersuchungszeitraum von 1984 bis 2009 Niederschlagsdaten aufgezeichnet haben. Aus diesem Grund werden bei jedem Ereignis die gemessenen Niederschlagsmengen dieser Stationen aufgelistet. Der Ereignisniederschlag an diesen Stationen kann zu Vergleichszwecken und zur Plausibilisierung des Gebietsniederschlags verwendet werden. Es ist zu beachten, dass es sich bei den Stationen um Tagessammler handelt, die eine zeitliche Auflösung von 24 h haben.

Datensatz "Radar Mt.CH" und "Messnetz 2009"

Auf Grund der räumlich höher aufgelösten Niederschlagsdaten des Datensatzes "Radar Mt.CH" von 1992 bis 2006 und des temporären Messnetzes im Jahre 2009 wird die Niederschlagsmenge nach TEZG auf einer Übersichtskarte dargestellt.

Zusätzlich werden die Niederschlagsmenge und die Identifikationsnummer des TEZG mit dem grössten Ereignisniederschlag benannt.

7.4.4 Summenlinie

Die zeitliche Niederschlagsverteilung hat einen grossen Einfluss auf die Abflussganglinie. Es können vier Typen des Intensitätsverlaufs unterschieden werden:

1. **Blockregen** mit konstantem zeitlichen Intensitätsverlauf (0-100 %) ²³
2. Regen mit Intensitätsmaximum am **Anfang** des Niederschlagsereignisses (0-33 %)
3. Regen mit Intensitätsmaximum in der **Mitte** des Niederschlagsereignisses (33-66 %)
4. Regen mit Intensitätsmaximum am **Ende** des Niederschlagsereignisses (66-100 %)

Diesen Intensitätsverläufen können folgende Summenlinien zugeordnet werden (Abb. 7-2):

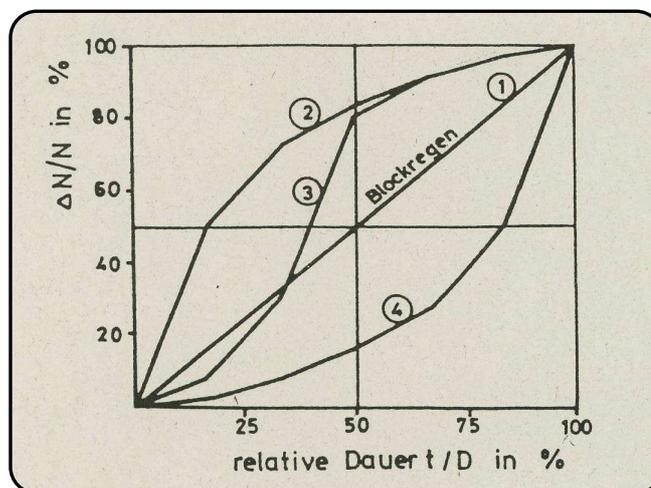


Abb. 7-2: Die 4 Typen von Summenlinien von Niederschlagsereignissen. [DVWK 1984].

Die vier Fälle widerspiegeln die Realität der Niederschlagsintensität nur schemenhaft. Die Intensität bei einem Niederschlagsereignis unterliegt in Wirklichkeit dauernder temporaler Schwankungen. Fallen die Niederschläge gleichmässig über die ganze Zeitspanne des Ereignisses (Blockregen), ergeben sich kleinere Spitzenabflüsse als bei unregelmässigen Intensitätsverläufen. Verschiedene Untersuchungen

²³ Die Prozentangaben werden vom Autor angenommen um eine nachvollziehbare Einteilung zu ermöglichen.

kamen zum Schluss, dass ein Intensitätsverlauf ähnlich der Kurve 3 zu den höchsten Abflussspitzen führt [DVWK 1984].

7.4.5 Vorregenindex VN 21

Die verschiedenen Reaktionsarten von EZG auf Starkregen, können mehrheitlich auf Unterschiede in der Speicherfähigkeit dieser Gebiete zurückgeführt werden [FAEH ET AL. 1999]. Zur Beschreibung der Anfangsbedingungen bei einem Niederschlagsereignis wird ein Vorregenindex verwendet. Dabei wird beim VN21 ein Zeitraum von 21 Tagen vor dem Niederschlagsereignis analysiert. Der Einfluss der Niederschläge auf den Index nimmt mit der temporalen Annäherung an das Ereignis zu [WEINGARTNER 1989]. Der verwendete Index berücksichtigt neben den Niederschlägen auch die Jahreszeit. Der VN21 wird aus den Niederschlägen der letzten 21 Tage vor Ereignisbeginn des Hochwassers, der hydrologischen Wochenzahl und einem Abminderungsfaktor berechnet [SARTOR 1999].

$$VN21 = \sum_{i=1}^{21} c^i \cdot h_{Nd,i}$$

mit $h_{Nd,i}$ = Niederschlagshöhe des i-ten Vortages

c = Abminderungsfaktor

i = Tag vor dem Hochwasserereignis

Der Koeffizient c berücksichtigt den Einfluss der Jahreszeit:

$$c = 0,0047 \cdot e^{0,0047 \cdot WZ}$$

Die Wochenzahl [WZ] wird durch die Kalenderwoche bestimmt:

31. Kalenderwoche: WZ = 1 (Ende Juli/Anfang August)

30./32. Kalenderwoche: WZ = 2

“ “ “ “ “ “

7./3. Kalenderwoche WZ = 25

4./6. Kalenderwoche WZ = 26

[SARTOR 1999]

Datensatz “Stationen Mt.CH“, “Radar Mt.CH“ und “Messnetz 2009“

Der Vorregenindex VN 21 wird anhand der Formel von SARTOR [1999] berechnet. Er wird für das Einzugsgebiet und für die Stationen Flühli und Entlebuch präsentiert.

Datensatz “Radar Mt.CH“ und “Messnetz 2009“

Bei den räumlich höher aufgelösten Daten wird der Vorregenindex jeweils auch für die TEZG ausgegeben.

7.4.6 Bodenfeuchtespeicher [SSM]

Die Feldkapazität (soil moisture storage capacity) ist eine wichtige Kenngrösse für die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens. Sie entspricht der Wassermenge, die von einem Boden gegen die Schwerkraft zurückgehalten werden kann [LESER 1997].

Die pflanzenverfügbare Feldkapazität ist definiert als die Menge an Wasser die durch Pflanzen aufgenommen werden können. Sie entspricht der Differenz im Bodenfeuchtegehalt zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt. Sie wird angegeben in Millimeter des pflanzenverfügbaren Wassers in der Wurzelzone. Ist der Anfangsbodenfeuchtegehalt gering, werden erst die Bodenwasservorräte gefüllt und der effektive Niederschlag ist zu Beginn des Ereignisses kleiner [Baumgartner & Liebscher 1990]. Beim hydrologischen Modellsystem “PREVAH“ wird angenommen, dass die maximale Bodenfeuchtespeicherung der pflanzenverfügbaren Bodenfeuchte entspricht [VIVROLI ET AL. 2007]. In *Abb. 7-3* ist die Struktur der Speichermodule des “PREVAH“ Modells dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Feldkapazität nicht mit der Bodensättigung gleichzusetzen ist. Bei Bodensättigung ist ein grösseres Volumen Wasser im Boden gespeichert als bei der Feldkapazität.

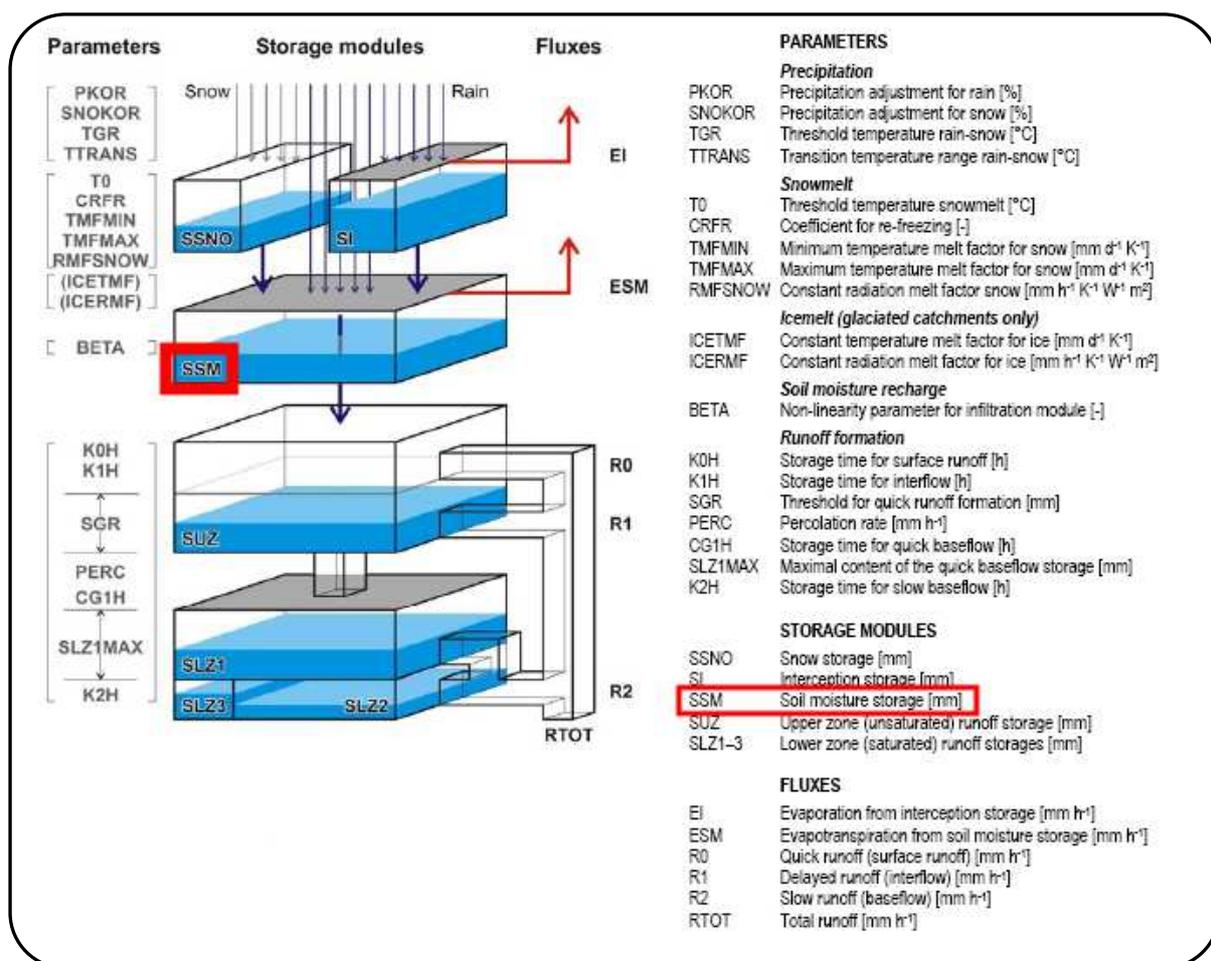


Abb. 7-3: Schematische Darstellung der Struktur der einstellbaren Parameter, der Speichermodul und der Flüsse von PREVAH. Quelle: VIVIROLI ET AL. [2007].

Um die maximale Bodenfeuchtespeicherung eines Bodens mit "PREVAH" zu bestimmen, muss eine Schätzung der pflanzenverfügbaren Feldkapazität verfügbar und Informationen zur Bodentiefe vorhanden sein [VIVIROLI ET AL. 2007].²⁴ Die maximale Bodenfeuchtespeicherung wird für das EZG mit einer räumlichen Auflösung von 500 x 500 m und einer temporalen Auflösung von einer Stunde berechnet. Aus diesen Rasterkarten werden die Mittelwerte für die die 14 TEZG ermittelt. Auf diese Weise wird auch bei Ereignissen, bei welchen räumlich hoch aufgelösten Daten vorhanden sind, die Situation der Bodenfeuchtespeicherung vor Beginn des Niederschlags in den TEZG dargestellt ("Radar Mt.CH" und "Messnetz 2009"). Bei allen dokumentierten Niederschlagsereignissen wird auch der Füllstand des Bodenfeuchtespeichers des ganzen EZG in Prozent angegeben ("Stationen Mt.CH", "Radar Mt.CH" und "Messnetz 2009"). Der Bodenfeuchtespeicher soll ähnlich dem Vorregenindex die Anfangsbedingungen des EZG bei einem Hochwasserereignis beschreiben. Er kann aber auch ohne Einbezug von Niederschlag Informationen, zur Fähigkeit eines Gebietes Wasser zurückzuhalten, liefern (Abb. 7-4). Für eine ausführliche Beschreibung von "PREVAH" wird auf VIVIROLI ET AL. [2007] verwiesen.

²⁴ Die Informationen zur Bodentiefe und zur pflanzenverfügbaren Feldkapazität werden aus der Bodeneignungskarte der Schweiz entnommen. [BfR 1980]

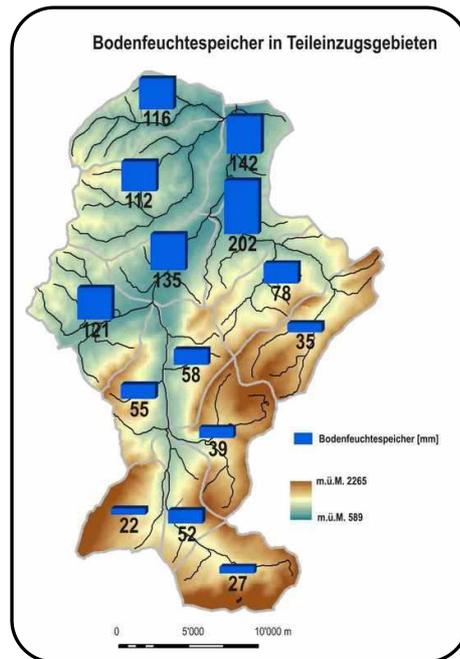


Abb. 7-4: Mittlere Grösse des Bodenfeuchte-speichers der Teileinzugsgebiete in Millimeter.

7.4.7 Abfluss

Die elementaren Kennwerte eines Abflussereignisses werden im Folgenden kurz definiert. Eine detaillierte Analyse der Abflussereignisse ist in AMIGUET [2010] zu finden.

7.4.7.a Abflussbeginn

Der Abflussbeginn wird definiert durch den Zeitpunkt, bei welchem der Direktabfluss relativ zum Basisabfluss bedeutend ansteigt. Mit Hilfe des Hydrogramms kann die Stelle ermittelt werden, wo die Trennung der Kurven des Basisabflusses und des Direktabflusses erfolgt [HINGRAY ET AL. 2009]. Der unmittelbar zum Abfluss gelangende Niederschlag wird als Direktabfluss bezeichnet. Der Basisabfluss besteht oft aus Abflüssen des Grundwasserspeichers [HINGRAY ET AL. 2009]. Der Abflussbeginn wird bei den Datensätzen "Radar Mt.CH" und "Stationen Mt.CH" mit stündlicher Genauigkeit angegeben. Beim Datensatz "Messnetz 2009" wird der Anfang auf wenige Minuten genau bestimmt.

7.4.7.b Abflussende

Das Abflussende wird durch die Angleichung der Kurve des Direktabflusses an jene des Basisabflusses bestimmt [MERZ ET AL. 2006]. Ist das Resultat nicht zufriedenstellend, wird das Ende visuell bestimmt. Das Abflussende wird bei den Datensätzen "Radar Mt.CH" und "Stationen Mt.CH" mit

stündlicher Genauigkeit angegeben. Beim Datensatz "Messnetz 2009" wird das Ende auf wenige Minuten genau bestimmt.

7.4.7.c Spitzenabfluss

Der Spitzenabfluss wird als der höchste gemessene Abfluss während eines Ereignisses definiert. Er ist somit stets grösser als das Maximum der Stundenmittelwerte, welche z.B. für die Niederschlags-Abfluss-Diagramme verwendet werden. In dieser Arbeit wird der Spitzenabfluss nur für die Abflussmessstation in Werthenstein in m³/s angegeben.

7.4.7.d Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist definiert als die Zeit zwischen dem Niederschlagsbeginn und der ersten Reaktion des Abflusses.

7.4.7.e Abflusskoeffizient

Der Koeffizient beschreibt die Beziehung zwischen dem Direktabfluss und der Niederschlagsmenge. Dieser spiegelt die Tatsache wider, dass nicht die Gesamtheit des Niederschlags, der im EZG fällt, beim Gebietsauslass als Abfluss gemessen wird. Die auftretenden Verluste können gemäss der Wasserbilanz-Gleichung der Interzeption, der Evaporation und der Infiltration zugeordnet werden [MUSY 2009]. Die mittlere Produktivität eines Einzugsgebietes ist bei gegebenem Klima im Besonderen abhängig von der Topografie, der Bodennutzung und weiteren Charakteristika [HINGRAY 2009].

$$\text{Abflusskoeffizient} = \frac{\text{Direktabfluss [m}^3\text{]} \times 1000}{\text{Gebietsfläche [m}^2\text{]} \times \text{Niederschlagsmenge [mm]}}$$

7.4.8 Hochwasserprozesstyp

Die Typisierung der Hochwasserereignisse an der Kleinen Emme wird nach der Methode von DIEZIG [2006] und die Klassifizierung der Prozesstypen nach MERZ [2002] durchgeführt. Die Prozesstypen beziehen sich mehrheitlich auf die Ganglinie des Abflusses und die Dauer und Intensität der Niederschläge im Einzugsgebiet. Die Gebietscharakteristik (Topografie, Geologie, Pedologie) wird nicht berücksichtigt.

Zur Hochwassertypisierung werden Indikatoren benutzt, um die Ereignisse den verschiedenen Prozessstypen zuzuordnen (Abb. 7-5). Durch die Erfüllung verschiedener Bedingungen soll eine klare Zuweisung mehrheitlich möglich sein. Falls die Daten zu einem Ereignis gegensätzliche Aussagen ergeben oder auf Grund von Datenlücken Bedingungen nicht getestet werden können, wird eine Detailanalyse nötig. Diese beinhaltet die Analyse sämtlicher Parameter und die Berücksichtigung von zusätzlichen Indikatoren die im Typisierungsdiagramm nicht enthalten sind [DIEZIG 2006].

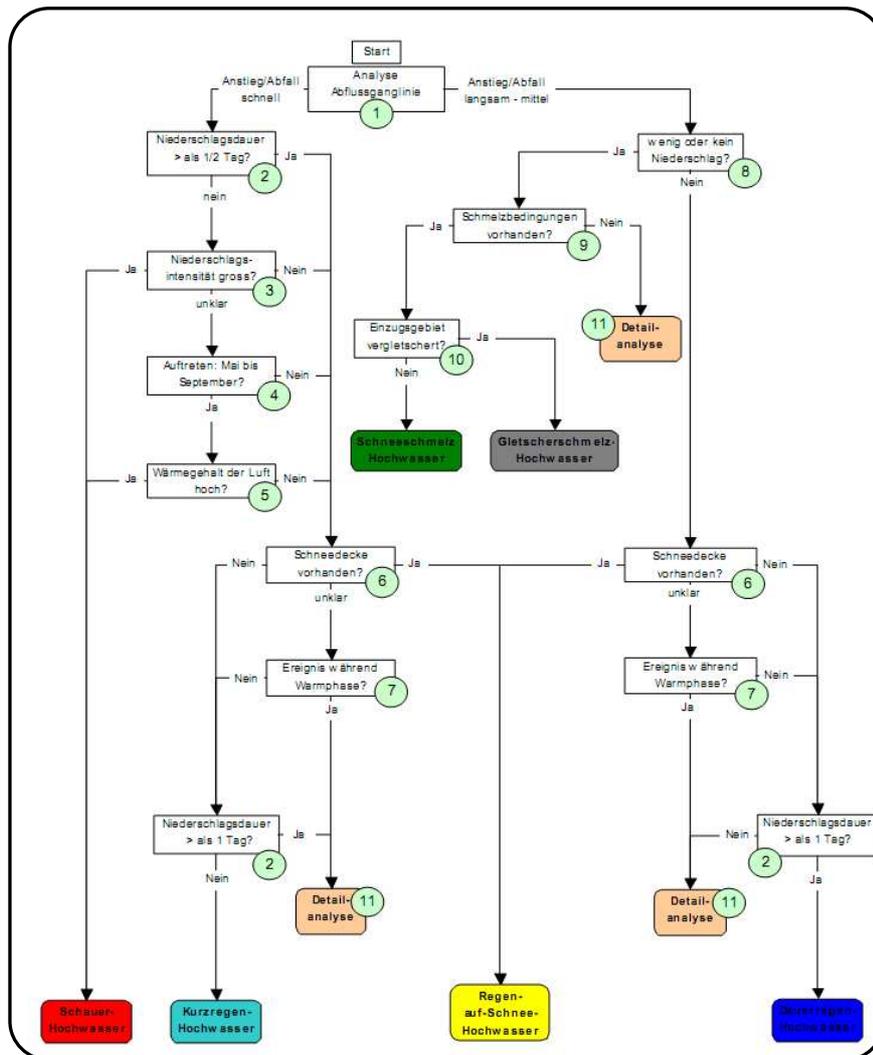


Abb. 7-5: Typisierungsdiagramm von Hochwasserereignissen. Quelle: Diezig [2006].

Es folgt eine kurze Beschreibung der Niederschlagscharakteristika der Hochwasserprozessstypen nach MERZ [2002]. Eine ausführliche Beschreibung ist in MERZ [2002] enthalten .

Schauer-Hochwasser

Auslöser für Hochwasser auch in ungesättigten Einzugsgebieten sind Regenfälle mit kurzer Dauer (maximal einige Stunden) mit hoher Intensität. Schauer sind den konvektiven Niederschlägen zuzuordnen.

Kurzregen-Hochwasser

Die Hochwasser sind verursacht durch Niederschläge mit kurzer Dauer (12 bis 24 h) und relativ hoher Intensität. Durch die Regengüsse können bereits Teile des Einzugsgebietes temporär gesättigt werden.

Dauerregen-Hochwasser

Dauerregen-Hochwasser werden durch lang andauernde zyklonale oder orographische Niederschläge ausgelöst. Diese Niederschläge von mindestens 24-stündiger Dauer, können aber über mehrere Tage und Wochen auftreten. Ein grosser Teil des Einzugsgebietes ist von Niederschlägen betroffen. Die Niederschlagsintensität variiert während des Ereignisses und kürzere Niederschlagsunterbrechungen sind durchaus möglich. Der Boden wird durch die lang andauernden Regenfälle gesättigt.

Regen-auf-Schnee-Hochwasser

Auslöser der Hochwasser sind Regenfälle, die auf die bestehende Schneedecke auftreffen. Schon mittlere Intensitäten können hohe Abflüsse verursachen. Zum gefallenem Niederschlag kommt durch die Schneeschmelze zusätzliches Wasser zum Abfluss. Der Boden kann durch vorhergehende Schmelzprozesse bereits gesättigt sein.

Schneeschnmelz-Hochwasser

Die Hochwasser werden durch lang andauernde Schneeschmelzperioden von ein bis zwei Wochen ausgelöst. Der Boden wird in dieser Zeit zunehmend gesättigt und somit nimmt der Abfluss täglich zu.

Gletscherschnmelz-Hochwasser

Die Gletscherschnmelzhochwasser werden ebenfalls durch lange Schmelzperioden verursacht. Sie treten im Gegensatz zu den Schneeschmelz-Hochwassern später im Jahr auf (Juli und August).

8 Niederschlagsereignisse - Resultate

8.1 Analyse der Niederschlagssituation bei Hochwasserereignissen

Bei jedem der untersuchten 20 Hochwasserereignisse der partiellen Reihe von 1984 bis 2009 wird die Niederschlagssituation im EZG dokumentiert. Zusätzlich werden auch die 12 grössten Abflussereignisse und die entsprechende Niederschlagssituation des Sommers 2009 untersucht. Die Analysen werden je nach Zeitpunkt der Ereignisse mit dem zur Verfügung stehenden Niederschlagsdatensatz durchgeführt (Tab 8-1). Die Messnetzdichte des Datensatzes "Stationen Mt. CH" liess auf Grund der unzureichenden Messnetzdichte der Niederschlagsstationen eine Analyse nur für das gesamte Untersuchungsgebiet, nicht aber für TEZG zu.

Tab. 8-1: Die verwendeten Niederschlagsdatensätze zur Analyse der Ereignisse.

Datensatz	Zeitraum	Anzahl Ereignisse	Unterteilung in TEZG
Messnetz 2009	Sommer 2009	12	X
Radar Mt.CH	1992-2006	11	X
Stationen Mt.CH	1984-2009	20	

Einige Kenngrössen können nicht für alle Datensätze berechnet werden. Wenn bestimmte Untersuchungen nicht oder zusätzlich durchgeführt werden, sind Informationen hierzu am Ende jedes Unterkapitels zu finden. Die diversen Komponenten einer Ereignisdokumentation werden auf den folgenden Seiten anhand des grössten Abflussereignisses des Sommers 2009 beschrieben. Die vollständige Beschreibung aller Ereignisse befindet sich im Anhang 2.a bis 2.c.

8.1.1 Niederschlag-Abfluss Diagramm

Das Niederschlag-Abfluss Diagramm ermöglicht einen ersten Überblick über das Ereignis (Abb. 8-1). Es zeigt das Abfluss- und Niederschlagsgeschehen vor, während und nach dem Abflussereignis. Die Niederschläge (rot) sind als Gebietsniederschlag in Millimeter in stündlicher Auflösung dargestellt. Der Abfluss in Werthenstein (blau) bezieht sich ebenfalls auf stündliche Mittelwerte und ist in Kubikmeter pro Sekunde angegeben. Der gemessene Spitzenabfluss ist in der Übersichtstabelle aufgeführt. Die Skalierung der Niederschläge auf der Primärachse und der Abflüsse auf der Sekundärachse variiert je nach Datensatz und Höhe der entsprechenden Parameter. Dies vermindert die Vergleichbarkeit zwischen den Ereignissen, verbessert aber die Übersicht über ein Ereignis, insbesondere wenn wie im

Folgenden, zwischen untersuchten Ereignissen grosse Variabilitäten der Niederschlags- und Abflusswerte zu beobachten sind.²⁵

Im Diagramm werden zwei Tage vor und drei Tage nach dem Abflussspitze dargestellt. Diese Dauer wird gewählt, um Abflussschwankungen und Niederschläge kurz vor dem eigentlichen Ereignis zu erkennen und um den Rückgang des Abflusses beschreiben zu können.

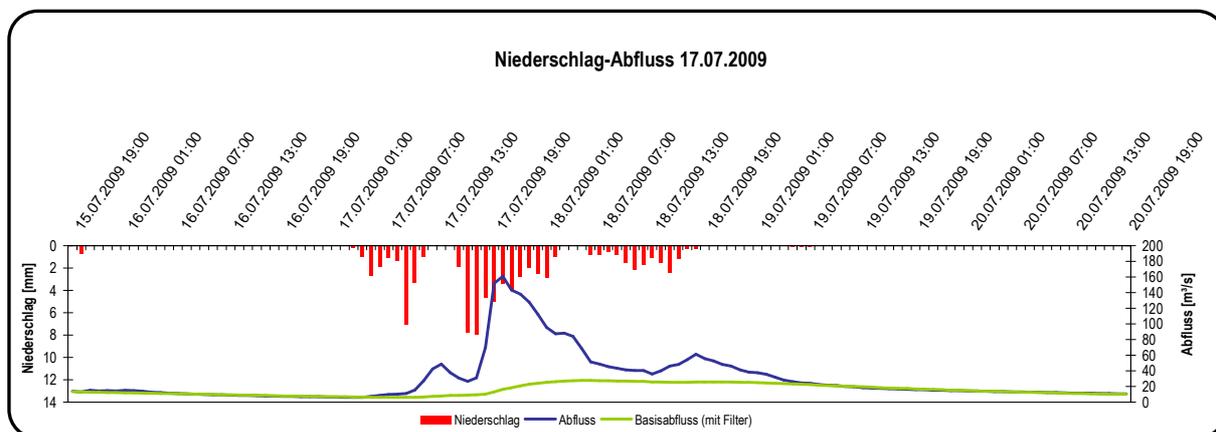


Abb. 8-1: Niederschlag-Abfluss Diagramm des oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis Werthenstein vom 15.07.2009 19:00 bis 20.07.2009 19:00.

8.1.2 Übersichtstabelle

Die Übersichtstabelle zeigt die wichtigsten Kenngrössen des Niederschlagsereignisses und die Eckpunkte des Abflussereignisses (Tab.8-2).²⁶ Wenn nicht mit "TEZG" oder einem Stationsnamen gekennzeichnet, beziehen sich die Kennzahlen auf den Gebietsniederschlag des ganzen EZG. Die Nummern, die nach der Bezeichnung TEZG bei maximaler Intensität und maximaler Menge folgen, beziehen sich auf die Teileinzugsgebietsnummern in Abb. 7-1. Diese beiden Kenngrössen werden in der Übersichtskarte (Abb. 8-2) ebenfalls dargestellt. Detaillierte Informationen und zusätzlicher Kennwerte der Abflussereignisse sind in AMIGUET [2010] zu finden.

Stationen Mt.CH: Das TEZG mit maximaler Niederschlagsintensität und maximaler Niederschlagsmenge wird nicht eruiert.

Messnetz 2009: Stationen, die zur Berechnung des Gebietsniederschlags verwendet werden, sind in einer Tabelle aufgeführt. Da einige Stationen erst in der Mitte des Sommers 2009 installiert werden

²⁵ Abflussereignis mit höchster Abflussspitze: 470 m³/s, Ereignisniederschlag: 189 mm. Abflussereignis mit kleinster Abflussspitze: 26 m³/s, Ereignisniederschlag: 12.5 mm.

²⁶ Alle Resultate sind auf eine Dezimalstelle gerundet.

konnten und Datenausfälle zu beklagen waren, weist die Grundlage zur Interpolation von Ereignis zu Ereignis kleinere Unterschiede auf.

Tab. 8-2: Übersichtstabelle mit den wichtigsten Kenngrößen des Niederschlagsereignisses 17.07.2009.

17.07.2009 [1]					
Niederschlag			Entlebuch (72 h)	[mm]	67.4
			VN 21		
Anfang		17.07.2009 04:05	EZG	[mm]	24.4
Ende		18.07.2009 17:00	Flühli	[mm]	30.4
Dauer	[hh:mm]	36:55	Entlebuch	[mm]	23.6
Ø Intensität	[mm/h]	2.1	SSM	[%]	87.4
Max. Intensität (EZG)	[mm/h]	8.0	Abfluss		
Max. Intensität (TEZG) [6]	[mm/h]	14.2			
Intensität Wussow		21.1	Anfang		17.07.2009 04:07
Summenlinie		Mitte	Ende		19.07.2009 08:57
Menge			Spitzenabfluss	[m ³ /s]	177.8
EZG	[mm]	80.6	Reaktionszeit	[hh:mm]	00:07
Max. TEZG [8]	[mm]	100.5	Abflusskoeffizient		0.2
Flühli(72 h)	[mm]	96.8	Hochwassertyp		Dauerregen

Messstationen					
Swissmetnet		5	Kantonale Stationen		2
Tagessammler		13	Temporäre Stationen		9

8.1.3 Übersichtskarte

In der Übersichtskarte vereinen sich Informationen zum Bodenfeuchtespeicher [SSM] zu Beginn des Ereignisses und zur Niederschlagsverteilung während dem Ereignis in den TEZG (Abb. 8-2). Die Säulen symbolisieren die Fähigkeit der TEZG, Wasser im Boden zu speichern. Die Höhe einer Säule repräsentiert die maximale Rückhaltekapazität des entsprechenden Teileinzugsgebietes. Diese Rückhaltekapazität ist ein Gebietsmittelwert einer Speichergrosse in dem konzeptionellen hydrologischen Modellsystem PREVAH. Sie repräsentiert die maximale Wassermenge, welche in der Phase der Abflussbildung im Boden zurückgehalten und zum Grossteil durch Evapotranspiration wieder ausgeschöpft werden kann. Der dunkelblaue Teil der Säule repräsentiert den Bodenfeuchtespeicher, der bereits voll ist. Der hellblaue Teil bezeichnet den noch zur Verfügung stehenden "leeren" Bodenfeuchtespeicher vor dem Ereignis.

Anhand der farblichen Ausprägung der TEZG und der Skala auf der rechten Seite der Abbildung, lässt sich die Höhe des Ereignisniederschlags pro TEZG ablesen. Die Verteilung des Niederschlags mit der Ordinary Kriging Interpolation ist in Abb. 8-5 dargestellt. Zwei Symbole weisen zudem auf das TEZG hin, wo die maximale Niederschlagsmenge und die maximale Niederschlagsintensität aufgetreten ist:

☉ = TEZG mit maximaler stündlicher Intensität während des Ereignisses [mm/h]

📄 = TEZG mit maximaler Niederschlagsmenge des ganzen Ereignisses [mm]

Stationen Mt.CH: Die Unterteilung und räumliche Analyse der Niederschläge nach Teileinzugsgebieten wird nicht vollzogen. (siehe Kap. 8.1)

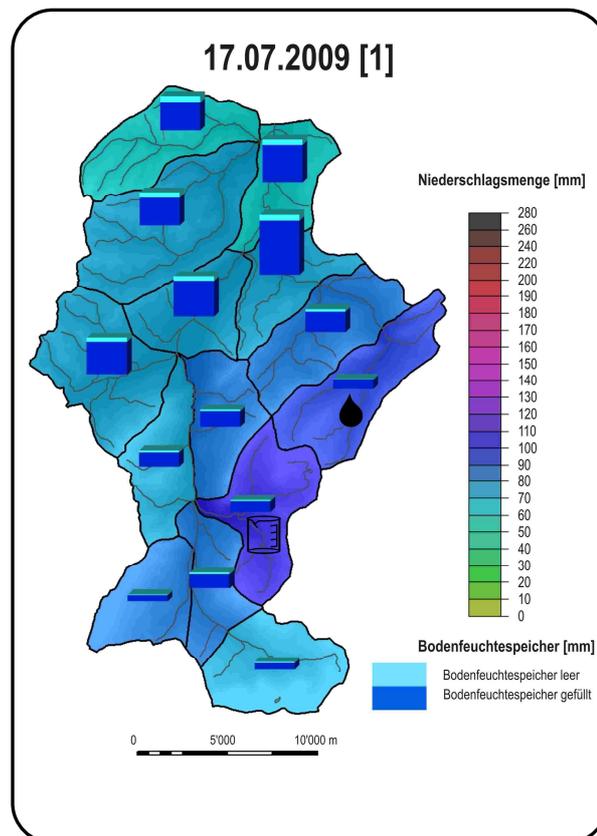


Abb. 8-2: Ereignisniederschlag [mm] und Bodenfeuchtespeicher vom 17.07.2009 nach Teileinzugsgebieten unterteilt. Datengrundlage: Messnetz 2009.

8.1.4 Vorregenindex VN21

Der Vorregenindex VN21 repräsentiert die Vorfeuchte in einem Gebiet, wobei hier im Gegensatz zum vorher erwähnten Modellansatz die Niederschläge der letzten 21 Tage vor Ereignisbeginn mit einbezogen werden (Abb. 8-3). Anhand der Skala auf der rechten Seite kann der Index für jedes TEZG bestimmt werden. Der Vorregenindex wird in Millimeter angegeben. Im Titel ist die Uhrzeit des Ereignisbeginns ersichtlich.

Stationen Mt.CH: Die Unterteilung nach TEZG wird nicht vollzogen (siehe Kap. 8.1). Somit kann der VN21 nach TEZG nicht berechnet werden.

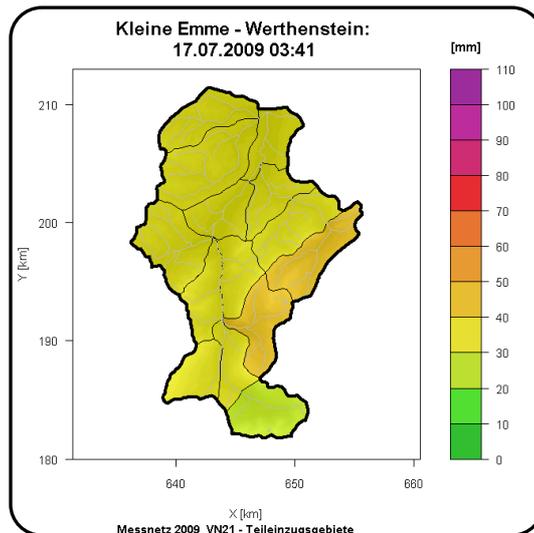


Abb. 8-3: Vorregenindex VN 21 zu Beginn des Ereignis 17.07.2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

8.1.5 Summenlinie

Für jedes Ereignis wird auf Grundlage des Gebietsniederschlags des ganzen EZG eine Summenlinie erstellt (Abb 8-4). Entsprechend des zeitlichen Auftretens der intensivsten Niederschläge erfolgt eine Klassierung der Summenlinien (siehe Kap. 7.4.4). Der für das Ereignis zutreffende Summenlinientyp ist in der Übersichtstabelle aufgeführt.

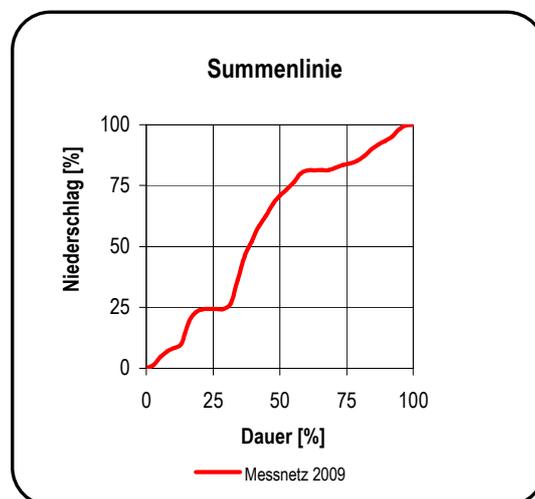


Abb. 8-4: Summenlinie des Niederschlagsereignis. Datengrundlage: Messnetz 2009

8.1.6 Ereignisniederschlag

In Abb. 8-5 Links ist der Gebietsniederschlag auf Grundlage vom Messnetz 2009 berechnet worden. Im Gegensatz dazu basiert der Gebietsniederschlag in Abb. 8-5 Mitte auf dem Datensatz "Stationen

Mt.CH“. In der *Abb. 8-5 Rechts* ist der Unterschied der beiden interpolierten Gebietsniederschläge erkennbar. Die dargestellte Differenz wird wie folgt berechnet:

Differenz = Gebietsniederschlag “Messnetz 2009” – Gebietsniederschlag “Stationen Mt.CH“

Eine blaue Färbung zeigt an, dass die Niederschlagsmenge des Datensatzes “Stationen Mt.CH“ jene des Datensatzes “Messnetz 2009“ unterschreitet. Wird mehr Niederschlag mit dem Datensatz „Stationen Mt.CH“ geschätzt, ist die Differenz in roter Farbe dargestellt.

Radar Mt.CH: Beim kombinierten Datensatz “Radar Mt.CH“ werden drei Darstellungen nach demselben Prinzip abgebildet. Anstatt dem Gebietsniederschlag vom Datensatz “Messnetz 2009“ wird in der *Abb. 8-5* der Gebietsniederschlag vom Datensatz “Radar Mt.CH“ eingefügt. Infolge dieser Veränderung berechnet sich die Differenz zwischen den beiden Datensätzen wie folgt:

Differenz = Gebietsniederschlag “Radar Mt.CH“ – Gebietsniederschlag “Stationen Mt.CH“

Stationen Mt.CH: Bei diesem Datensatz ist kein Vergleich mit einem anderen Datensatz möglich.

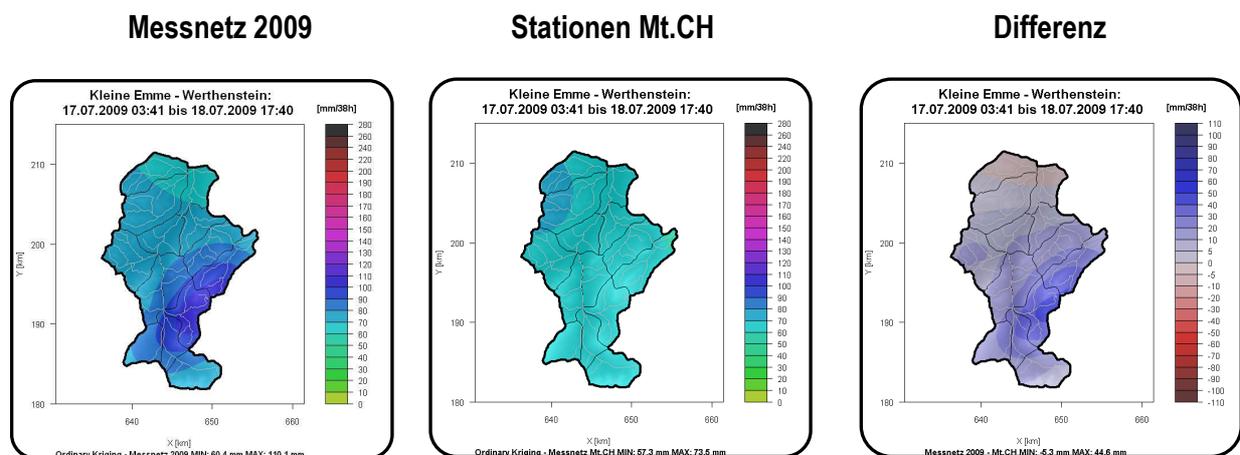


Abb. 8-5: Ereignisniederschlag vom 17.07.2009 03:41 bis 18.07.2009 17:40. Links: Ereignisniederschlag. Datengrundlage: Messnetz 2009 Mitte: Ereignisniederschlag Datengrundlage: Stationen Mt.CH [MeteoSchweiz 2010] Rechts: Differenz Ereignisniederschlag = Messnetz 2009-Stationen Mt.CH.

8.1.7 Stündlicher Niederschlag

Die Darstellung des stündlichen Niederschlags ist identisch zu den vorherigen Darstellungen zum Ereignisniederschlag. Im Unterschied zur Darstellung des Ereignisniederschlags (Kap. 8.1.6), werden für jede Stunde die drei Karten eingefügt, um die räumlichen und zeitlichen Unterschiede der Niederschlagsverteilung der verwendeten Datensätze aufzuzeigen (*Abb. 8-6*).

Radar Mt.CH + Stationen Mt.CH: Die stündlichen Daten sind nur für den Zeitraum vom Messnetz 2009 gefertigt worden, um den Unterschied im Gebietsniederschlag zwischen dem Datensatz "Messnetz 2009" und "Stationen Mt.CH" aufzuzeigen. Für die Perioden von "Stationen Mt.CH" (1984-2008) und "Radar Mt.CH" (1992-2006) sind keine stündlichen Darstellungen vorhanden.

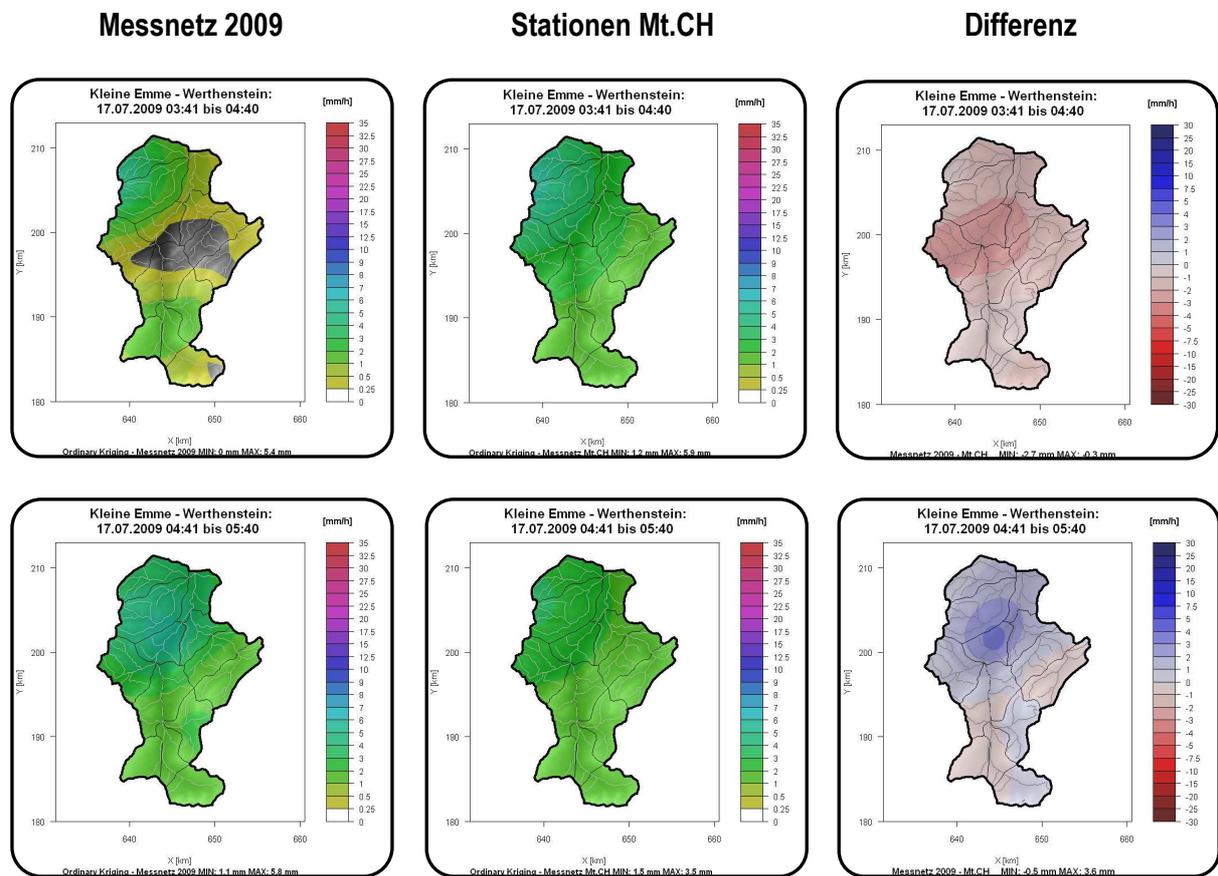


Abb. 8-8: Stündliche Niederschlagssummen vom 17.07.2009 03:41 bis 05:40. Die Darstellungen der restlichen 36 Stunden vom Ereignis sind im Anhang auf der CD zu finden. **Links:** stündliche Niederschlagssumme. Datengrundlage: Messnetz 2009 **Mitte:** stündliche Niederschlagssumme Datengrundlage: Stationen Mt.CH [MeteoSchweiz 2010] **Rechts:** Differenz = Messnetz 2009-Stationen Mt.CH.

8.1.8 Beschreibung

„Das Abflussereignis vom 17.07.2009 hat als einziger Spitzenabfluss im Jahr 2009 eine geschätzte Wiederkehrperiode grösser als ein Jahr.

Die erste hohe Intensität um 9 Uhr wird mit 10.6 mm/h bei der Station C im Rotbach-Einzugsgebiet erreicht. Der erste starke Niederschlag um 9 Uhr mit grossen Intensitäten im oberen Teil des Einzugsgebietes löst die erste kleine Abflussspitze um 10:10 im Südgraben und um 10:30 in Sörenberg aus. Im unteren Teil des Untersuchungsgebietes ist ein geringer Anstieg des Abflusses erst um 11:10 bei der Fontanne zu beobachten. Erst um 13:00 bildet sich eine erste Abflussspitze im Hauptgerinne in Werthenstein. Anschliessend ist eine kurze Niederschlagspause von 12 bis 14 Uhr zu erkennen. Die

höchste Intensität des Ereignisses ist zwischen 16 und 17 Uhr am 17.7. zu beobachten. Während dieses Zeitraums fallen die Niederschläge vorwiegend in den höheren Lagen im Osten des EZG. Die Hochwasserspitzen werden in folgender Reihenfolge aufgezeichnet: 18:04 CKW, 18:30 Fontanne, 19:03 Werthenstein 19:45 Südelgraben, 19:50 Sörenberg. Das Plateau in der Abflussganglinie zwischen 2 und 4 Uhr am 18.7. kommt durch die im ganzen Einzugsgebiet anhaltenden Niederschläge zwischen 18 Uhr 17.7. und 1 Uhr 18.7. zu Stande. Nach einer kurzen Unterbrechung fallen nochmals Niederschläge mit kleinerer Intensität, die einen dritten kleinen Peak in Werthenstein auslösten.“

Stationen Mt.CH: Es ist keine Beschreibung der Niederschlagsereignisse vorhanden, weil keine Analyse der räumlichen Variabilität der Niederschlagsereignisse innerhalb des EZG durchgeführt wird.

8.2 Niederschlagsereignisse Zusammenstellung

Die Ereignisbeschreibungen im Anhang 2.a bis 2.c geben eine Übersicht über einzelne Ereignisse. Im folgenden Kapitel sind die Resultate auf der Grundlage der drei verwendeten Datensätze "Messnetz 2009", "Radar Mt.CH" und "Stationen Mt.CH" unterteilt und zusammengefasst.

8.2.1 Niederschläge der Abflussereignisse im Sommer 2009 [Messnetz 2009]

Die zusammenfassende *Tab. 8-3* gibt eine Übersicht der wichtigsten Kennzahlen der Niederschlagsereignisse und den entsprechenden Abflussereignissen. Das Abflussereignis Nr. 1 hat als einziges Ereignis des Sommers 2009 am Pegel Werthenstein eine Wiederkehrperiode grösser als ein Jahr. Eingeordnet in die partielle Reihe von 1984 bis 2009, bei welchen nur die 20 grössten Ereignisse untersucht werden, würde das Ereignis vom 17.07.2009 den 27. Rang einnehmen. In der *Abb. 8-7* ist der Gebietsniederschlag der Messperiode vom 26.06.2009 bis 12.10.2009 dargestellt. Die höchste Niederschlagssumme (638 mm) wird an der Niederschlagsstation im TEZG des Rotbachs gemessen. Am wenigsten Regen (388 mm) während der Messperiode fällt beim Gebietsauslass in der Nähe der Abflussmessstation Werthenstein. Die erhöhten Niederschlagsmengen im TEZG der Wiss Emme sind auf zwei Schauerregenergebnisse mit hohen Niederschlagsmengen in der genannten Region zurückzuführen.

Tab. 8-3: Kennzahlen der 12 Niederschlagsereignisse vom Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Nr.	Datum	Spitzenabfluss [m³/s]	Hochwasserprozessstyp	N-Dauer [h]	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]	VN21 [mm]	SSM [mm]	Summenlinie	Abflusskoeffizient	Reaktionszeit [hh:mm]
1	17.07.2009	177.8	Dauerregen	36:55	80.6	2.1	24.4	87.4	Mitte	0.2	00:07
2	28.07.2009	106.0	Schauer	06:15	28.88	4.1	20.5	78.1	Ende	0.1	00:57
3	15.07.2009	93.6	Schauer	01:30	15.5	7.8	17.7	83.1	Anfang	0.3	00:31
4	05.09.2009	52.2	Schauer	11:20	20.4	1.7	23.7	74.1	Block	0.3	04:01
5	03.08.2009	52.1	Kurzregen	14:40	22.6	1.5	25.8	83.6	Block	0.4	03:10
6	08.08.2009	49.4	Schauer	07:50	22.4	2.8	20.5	81.8	Anfang	0.2	00:16
7	03.07.2009	43.1	Schauer	14:45	14	1	20.3	85.9	Mitte	0.3	02:50
8	10.10.2009	37.1	Schauer	04:00	28.8	3.4	17.2	92.5	Block	0.2	00:27
9	26.06.2009	31.5	Schauer	10:30	22.8	2.1	22.8	55.4	Block	0.1	02:00
10	03.09.2009	31.1	Schauer	04:25	11.6	1.9	18.2	66.4	Mitte	0.2	00:26
11	11.08.2009	27.0	Schauer	11:55	12.4	1	26.2	90.7	Mitte	0.2	04:08
12	02.09.2009	26.2	Schauer	02:45	12.5	3.1	8.8	55.9	Mitte	0.1	00:23

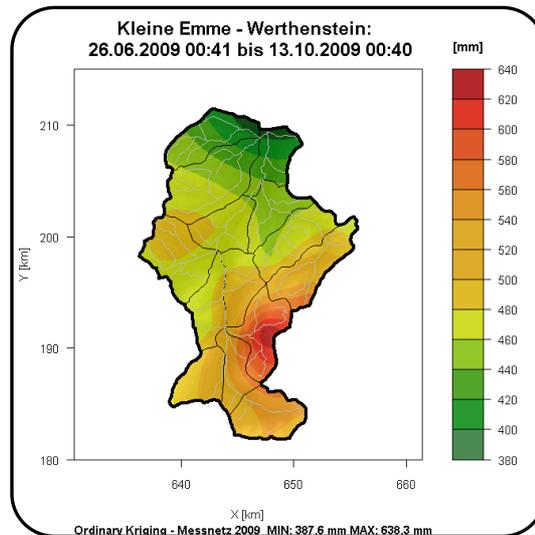


Abb. 8-7: Aufsummierte Niederschlagsmenge im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

8.2.1.a Hochwasserprozessstypen

Das grösste Abflussereignis mit einem Spitzenabfluss von 177.8 m³/s wird durch Dauerregen ausgelöst. Diesem Hochwassertyp Dauerregen gehören auch viele Hochwasser der untersuchten partiellen Serie von 1984 bis 2009 an. Nebst einem Kurzregenereignis sind alle übrigen Ereignisse der Kategorie Schauer zuzuordnen (Abb 8-8). Der Hochwasserprozessstyp "Gletscherschmelze" wird der Vollständigkeit wegen aufgeführt, kann aber auf Grund von fehlenden Gletschern im EZG nicht auftreten.

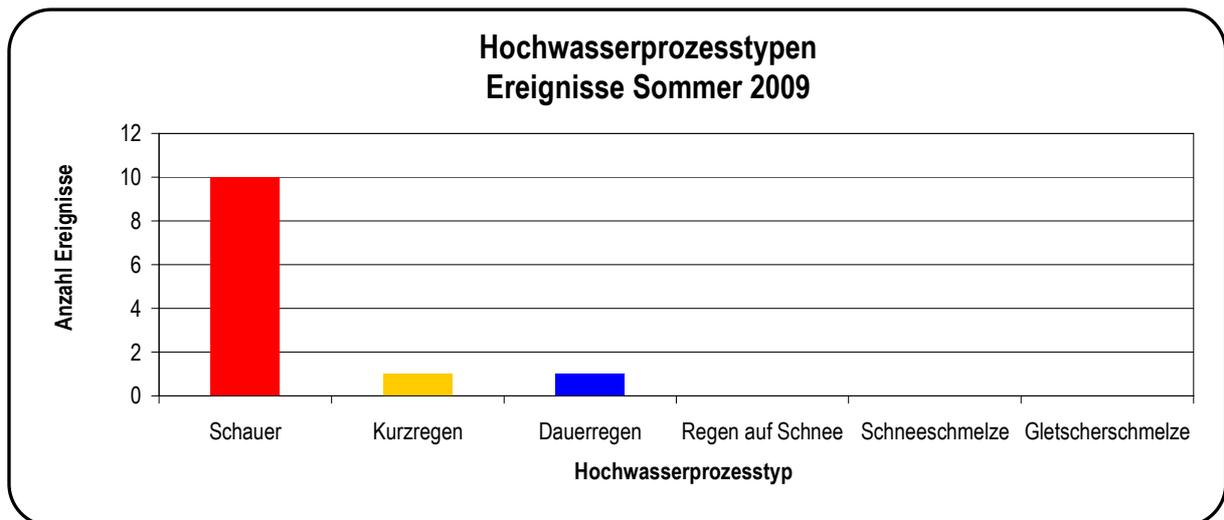


Abb. 8-8: Hochwasserprozesstypen bei den Abflussereignissen während des Sommers 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

8.2.1.b Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität

Bei den zehn Schauerereignissen beträgt der mittlere Gebietsniederschlag 19 mm. Die Niederschlagsmenge bei dem einen Kurzregenereignis ist um 3.6 mm grösser. Die grösste Niederschlagsmenge ist bei dem einzigen Dauerregenereignis gefallen. Die grössten Intensitäten sind bei den kurz andauernden Schauerereignissen zu beobachten (Tab. 8-4).

Tab. 8-4: Mittelwerte der Niederschlagsmengen und Intensitäten der Ereignisse im Sommer 2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozesstyp. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Hochwasserprozesstyp	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]
Schauer	19.0	2.9
Kurzregen	22.6	1.5
Dauerregen	80.6	2.1
Regen auf Schnee	-	-
Schneeschmelze	-	-
Gletscherschmelze	-	-
Mittelwert 2009	25.5	2.7

Die Rangierung der Ereignisniederschläge nach TEZG²⁷ zeigt die räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen der zwölf untersuchten Ereignisse des Sommers 2009 (Abb. 8-9). Im Mittel aller zwölf Ereignisse fällt im Bereich Rotbach relativ zu den anderen TEZG der meiste Niederschlag (Rang 1).

²⁷Die Teileinzugsgebiete sind bei jedem Ereignis nach der Höhe der gefallenen Niederschläge rangiert (1-14). Die Summe all dieser Rangierungen der Teileinzugsgebiete wird nochmals rangiert. Das Teileinzugsgebiet mit der tiefsten Summe der Rangierung ist mit Rang 1 markiert. Somit wird das Teileinzugsgebiet, das im Mittel von der höchsten Niederschlagsmenge betroffen ist, mit dem 1. Rang gekennzeichnet.

Bei der Kleinen Fontanne ist die Regensumme am Kleinsten (Rang 14). Im Allgemeinen kann eine Zweiteilung des Untersuchungsgebietes beobachtet werden. Die TEZG mit hohen Niederschlagsmengen (Rang 1-6) sind im Osten und Süden zu finden, währenddem die Gebiete mit tieferen Mengen (Rang 9-14) im Nordwesten liegen.

Jeder „Regentropfen“ in *Abb. 8-10* repräsentiert das TEZG mit der maximalen stündlichen Niederschlagsintensität bei einem Ereignis. Die maximale Intensität²⁸ tritt bei fünf von zwölf Ereignissen im TEZG Rotbach auf. Je zweimal liegt sie im TEZG der Grossen Entle und der Wiss Emme und je einmal in Sörenberg, bei der Grossen Fontanne und in Schüpfheim. Im südöstlichen Teil des EZG ist die maximale Niederschlagsintensität bei acht und im Nordwesten bei vier Ereignissen gemessen worden.

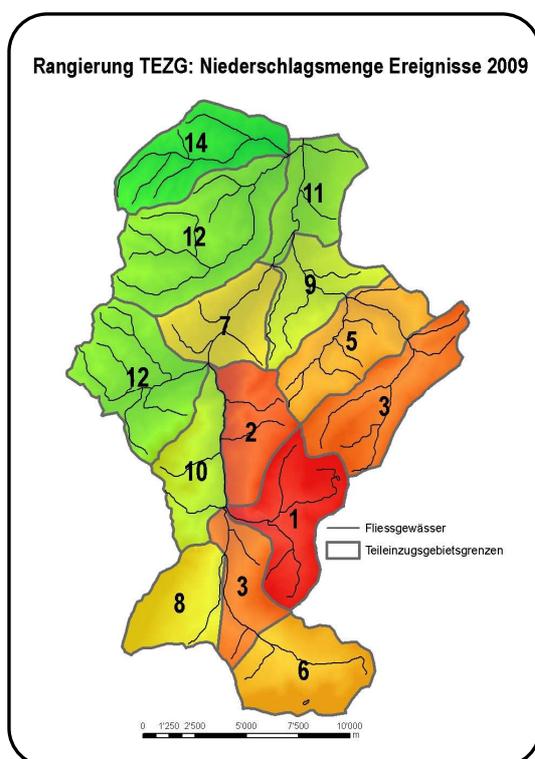


Abb. 8-9: Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe der Ereignisniederschläge im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

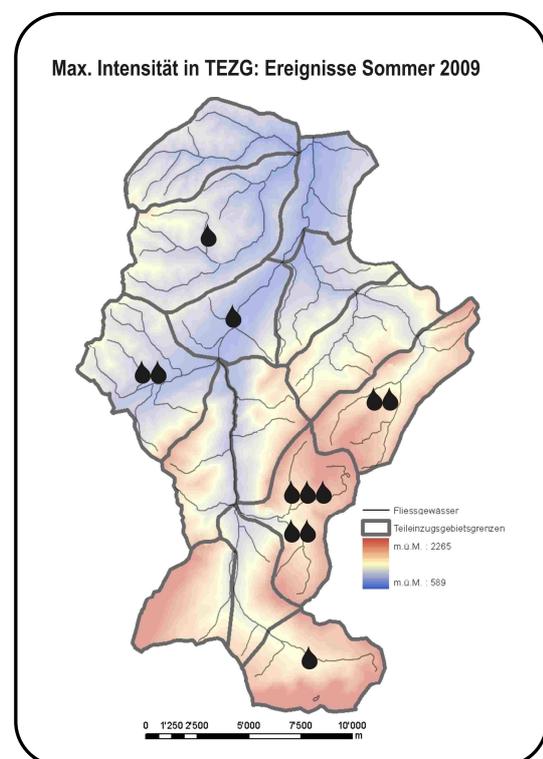


Abb. 8-10: Teileinzugsgebiete mit max. Niederschlagsintensität während der 12 Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

8.2.1.c VN 21 und SSM in den Teileinzugsgebieten

Der gemittelte Vorregenindex und der Füllstand des Bodenfeuchtespeichers ist bei den Schauerereignissen am kleinsten (*Tab. 8-5*). Der höchste Füllstand des Bodenfeuchtespeichers kann vor dem

²⁸ Das Teileinzugsgebiet mit max. Niederschlagsintensität anhand des beschriebenen Vorgehens von Kap. 7.4.2.b bestimmt worden.

Dauerregenereignis festgestellt werden. Der grösste Vorregenindex wird vor dem Kurzregenereignis beobachtet.

Tab. 8-5: Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse im Sommer aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Hochwasserprozessstyp	VN21	SSM
	[mm]	[mm]
Schauer	20.8	76.4
Kurzregen	25.8	83.6
Dauerregen	24.4	87.4
Regen auf Schnee	-	-
Schneesmelze	-	-
Gletschersmelze	-	-
Mittelwert 2009	20.5	77.9

Die höchsten Vorregenindizes VN21²⁹ sind im Mittel in den TEZG in den höheren Lagen im Osten auszumachen (Rang 1-4) (Abb. 8-11). Das TEZG Südelgraben, das ebenfalls zu den hochgelegenen TEZG zählt, aber westlich der Waldemme befindet., liegt mit Rang 8 im Mittelfeld. Die durchschnittlich tiefsten Vorregenindizes sind hingegen in den tieferen Regionen im Norden zu beobachten (Rang 11-14). Die Bodenfeuchtespeicherkapazität ist abhängig von der Bodentiefe. Die Bodentiefe ist in hohen Lagen klein und auf Felsflächen ist kaum eine Feuchtespeicherung möglich. Diese Tatsache widerspiegelt sich in der Rangierung der Bodenfeuchtespeicherung (Abb. 8-12).³⁰ TEZG in grosser Höhe und mit grösseren Felsflächen sind auf den Rängen 1 bis 4 angesiedelt. Es ist zu beachten, dass die Bodenfeuchtespeicherkapazität und den Einfluss auf das Abflussverhalten insbesondere im Teileinzugsgebiet Südelgraben (Rang 1) auf Grund der vorkommenden Karstformationen kaum abzuschätzen ist. Detaillierte Angaben hierzu finden sich in AMIGUET [2010].

²⁹ Die Teileinzugsgebiete sind bei jedem Ereignis nach der Höhe des VN21 rangiert (1-14). Die Summe all dieser Rangierungen der Teileinzugsgebiete wird nochmals rangiert. Das Teileinzugsgebiet mit der tiefsten Summe der Rangierung ist mit Rang 1 markiert. Somit wird das Teileinzugsgebiet, das im Mittel von den höchsten VN21, mit dem 1. Rang gekennzeichnet.

³⁰ Die Rangierung beruht auf der mittleren Bodenfeuchtespeicherung eines Einzugsgebietes (SSM). Diese ist mit Hilfe des PREVAH-Systems berechnet worden. Das Einzugsgebiet mit dem Rang 1 hat die kleinste Bodenfeuchtespeicherkapazität. Die Rangierung wurde unabhängig von Ereignissen vorgenommen.

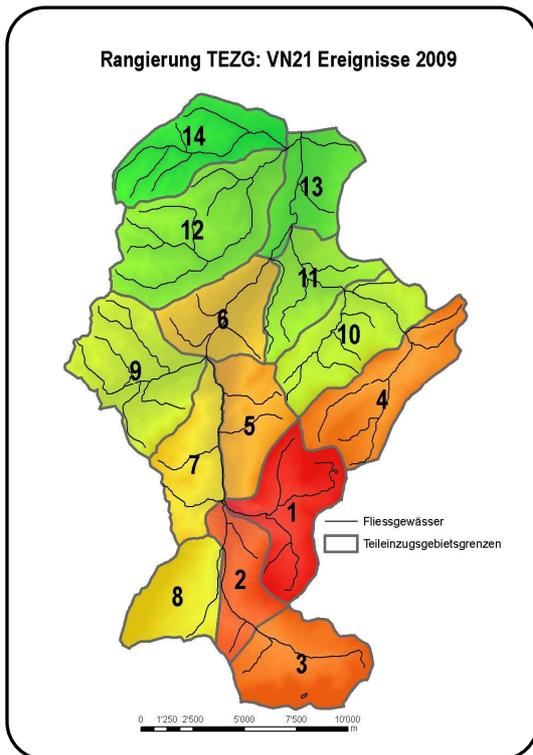


Abb. 8-11: Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe des VN21 der Niederschlagsereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009

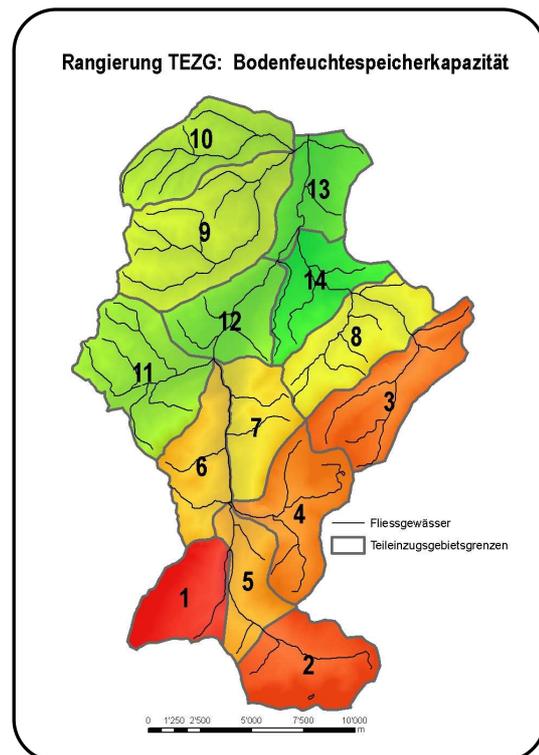


Abb. 8-12: Rangierung der Bodenfeuchtespeicherkapazität [mm] der Teileinzugsgebiete. Datengrundlage: Messnetz 2009

Das EZG lässt sich anhand der Rangierung in drei Teilregionen gliedern. Eine kleine Bodenfeuchtespeicherung in den höheren Regionen im Südosten (Rang 1-8), eine mittlere Kapazität im Einzugsgebiet der Fontanne (Rang 9-10) und eine grosse Speicherfähigkeit in tiefen Lagen im Haupttal von Escholzmatt bis Entlebuch (Rang 11-14). Bei den untersuchten Niederschlagsereignissen im Sommer 2009 ist mit Ausnahme des TEZG Südélgraben der Vorregenindex VN21 in den Gebieten im Südosten hoch (Rang 1-4), wo auch der Bodenfeuchtespeicher klein ist (Rang 2-5). Die Fähigkeit des Wasserrückhalts ist in denselben Teileinzugsgebieten klein, bei welchen im Vorfeld von Niederschlagsereignissen im Sommer 2009 relativ zu den restlichen TEZG viel Niederschlag fiel. Darüber hinaus ist in den benannten Gebieten die Niederschlagsmenge während den Ereignissen ebenfalls hoch (Rang 1-3 und 6).

8.2.1.d Summenlinie

In der Tab. 8-6 ist der Zeitpunkt des Niederschlagsintensitätsmaximums während eines Ereignisses beschrieben. Am häufigsten ist die höchste Intensität in der Mitte (5 Ereignisse) zu beobachten, oder es liegt ein gleichmässig gefallener Niederschlag vor (Block: 4 Ereignisse). Laut DVWK [1984] führt der Verlauf mit Intensitätsmaximum in der Mitte zum grössten Spitzenabfluss.

Tab. 8-6: Übersicht der Summenlinien-Typen der Niederschlagsereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessstyp	Summenlinie Messnetz 2009
1	17.07.2009	Dauerregen	Mitte
2	28.07.2009	Schauer	Ende
3	15.07.2009	Schauer	Anfang
4	05.09.2009	Schauer	Block
5	03.08.2009	Kurzregen	Block
6	08.08.2009	Schauer	Anfang
7	03.07.2009	Schauer	Mitte
8	10.10.2009	Schauer	Block
9	26.06.2009	Schauer	Block
10	03.09.2009	Schauer	Mitte
11	11.08.2009	Schauer	Mitte
12	02.09.2009	Schauer	Mitte

Tab. 8-7: Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Summenlinie Messnetz 2009	Anzahl Ereignisse
Anfang	2
Mitte	5
Ende	1
Block	4

8.2.1.e Reaktionszeit

Die Reaktionszeiten sind von grosser Variabilität gekennzeichnet. Die Reaktionszeiten reichen von wenigen Minuten bis zu 4 Stunden (Tab 8-8). Der Mittelwert aller untersuchten Ereignissen liegt bei rund 1½ Stunden (Tab. 8-9). Der unterschiedliche Anfangszustand des EZG kann die Variabilität der Reaktionszeiten nicht erklären. Der Vorregenindex liegt bei Ereignissen mit Reaktionszeiten grösser als eine Stunde, im Mittel bei 24 mm und somit höher als bei Ereignissen mit kürzeren Reaktionszeiten (19 mm). Der Bodenfeuchtespeicher im EZG ist im Mittel bei beiden Ereignis-Gruppen zu 78 % gefüllt. Ein hoher Füllgrad des Bodenfeuchtespeichers kann somit die kurzen Reaktionszeiten nicht begründen.

Die beiden Ereignisse (Nr. 3 und 6), mit der grössten Niederschlagsintensität am Anfang des Ereignisses (Tab. 8-6), weisen kurze Reaktionszeiten (16 und 31 min) auf. Die starken Niederschläge zu Beginn könnten die Reaktionszeit verkürzt haben.

Im Weiteren könnten räumliche Lage und Zugrichtung der Niederschlagsfelder einen Einfluss auf die Reaktionszeit haben. Regenfälle im Unterlauf führen nach kürzerer Zeitdauer an der Messstation Werthenstein zu einer Abflussreaktion, als Niederschläge die im Oberlauf fallen. Der räumlich-zeitliche Verlauf der Niederschläge im EZG während eines Ereignisses kann mit Hilfe der stündlich interpolierten Gebietsniederschlagskarte nur lückenhaft bestimmt werden. In den vorliegenden Datensätzen

ist kein Zusammenhang zwischen der räumlichen Lage der Schwerpunktniederschläge³¹ oder der Lage der Niederschläge während den ersten Stunden des Ereignisses und der Reaktionszeit zu erkennen.

Die Schätzung von Reaktionszeiten enthält immer auch eine subjektive Komponente. Der Beginn von Ereignisniederschlag und Direktabfluss wird anhand von im Voraus festgelegten Kriterien vorgenommen. Diese Kriterien können durchaus Merkmale enthalten, die von anderen Beobachtern vernachlässigt würden (siehe Kap. 7.4.1).

Tab. 8-8: Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlag-Abflussereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Nr.	Datum	Hochwasserprozess-typ	Reaktions-zeit
			[hh:mm]
1	17.07.2009	Dauerregen	00:07
2	28.07.2009	Schauer	00:57
3	15.07.2009	Schauer	00:31
4	05.09.2009	Schauer	04:01
5	03.08.2009	Kurzregen	03:10
6	08.08.2009	Schauer	00:16
7	03.07.2009	Schauer	02:50
8	10.10.2009	Schauer	00:27
9	26.06.2009	Schauer	02:00
10	03.09.2009	Schauer	00:26
11	11.08.2009	Schauer	04:08
12	02.09.2009	Schauer	00:23

Tab. 8-9: Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse im Sommer 2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozess-typ. Datengrundlage : Messnetz 2009.

Hochwasserprozess-typ	Reaktions-zeit
	[hh:mm]
Schauer	01:35
Kurzregen	03:05
Dauerregen	00:07
Regen auf Schnee	-
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 2009	01:36

8.2.1.f Abflusskoeffizient

Im Mittel nimmt der Abflusskoeffizient einen Wert von 0.2 an (Tab. 8-11). Das heisst, dass im Durchschnitt 20 % des Niederschlags während des Ereignisses zum Abfluss gelangt sind. Ein grösserer Teil der relativ geringen Niederschlagsmengen, im Vergleich zu den Mengen der partiellen Reihe von 1984-2009, infiltrieren, verdunsten und gehen als Benetzungsverlust verloren und treten deshalb nicht als Direktabfluss auf.

³¹ Ort mit höchster aufgezeichneter Niederschlagsmenge während eines Ereignisses. Schwerpunktniederschlag bei Ereignissen mit Reaktionszeiten < 1 h: Ereignis Nr. 1: TEZG Rotbach, Nr. 2: TEZG Grosse Fontanne, Nr. 3: TEZG Rotbach, Nr. 6: TEZG Wiss Emme, Nr. 8: TEZG Schüpfheim, Nr. 10: Grosse Entle, Nr. 12: TEZG Rotbach.

Tab. 8-10: Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessstyp	Abflusskoeffizient
1	17.07.2009	Dauerregen	0.2
2	28.07.2009	Schauer	0.1
3	15.07.2009	Schauer	0.3
4	05.09.2009	Schauer	0.3
5	03.08.2009	Kurzregen	0.4
6	08.08.2009	Schauer	0.2
7	03.07.2009	Schauer	0.3
8	10.10.2009	Schauer	0.2
9	26.06.2009	Schauer	0.1
10	03.09.2009	Schauer	0.2
11	11.08.2009	Schauer	0.2
12	02.09.2009	Schauer	0.1

Tab. 8-11: Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse im Sommer 2009, aufgeteilt nach Hochwasserprozessstypen. Datengrundlage: Messnetz 2009.

Hochwasserprozessstyp	Abflusskoeffizient
Schauer	0.2
Kurzregen	0.4
Dauerregen	0.2
Regen auf Schnee	-
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 2009	0.2

8.2.1.g Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag

In den *Diagrammen 8-13 ff.* werden der Spitzenabfluss, die Anfangsbedingungen und der Niederschlag der Ereignisse vom Sommer 2009 dargestellt. Der Spitzenabfluss bezieht sich auf die Abflussmessstation in Werthenstein. Die Grösse der Kreise repräsentiert die Grösse des Spitzenabflusses. Je grösser der Kreis, desto grösser der Spitzenabfluss des Ereignisses. Die Farbe der Kreise zeigt den entsprechenden Hochwasserprozessstyp an, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht. Auf der rechten Seite sind die Ereignisnummern aufgeführt. Die Nr. 1 ist das Ereignis mit dem grössten und die Nr. 12 mit dem kleinsten Spitzenabfluss. Als Anfangszustand des EZG werden bei den ersten Darstellungen der Vorregenindex VN21 (*Abb. 8-13 und Abb. 8-14*) und bei den darauffolgenden Abbildungen (*Abb. 8-15 und Abb. 8-16*) der Bodenfeuchtespeicher verwendet. Für den Niederschlag werden bei den Grafiken auf der linken Seite die mittlere Ereignisintensität und bei den Grafiken auf der rechten Seite der Ereignisniederschlag aufgetragen. Auf Grund der kleinen Stichprobenmenge wird auf eine statistische Auswertung verzichtet. Stattdessen folgt in den nächsten beiden Abschnitten eine deskriptive Interpretation der Diagramme.

VN 21 & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Die Ereignisse des Sommers (Abb. 8-13) weisen, mit Ausnahme vom Ereignis Nr. 3, ähnliche Vorregenindizes und relativ niedrige mittlere Niederschlagsintensitäten auf. Der Vorregenindex schwankt zwischen 10 und 20 mm und die Intensität zwischen 1 und 4 mm/h. Bei Ereignis Nr. 3 ist die Intensität mit rund 8 mm/h auffallend hoch. Wird die Intensität mit der Niederschlagsmenge ersetzt (Abb. 8-14), ballen sich die Ereignisse bei Niederschlagsmengen von 10 bis 30 mm. Das Ereignis mit dem grössten Abfluss weicht mit einer Niederschlagsmenge von 80 mm stark von den übrigen elf Ereignissen ab.

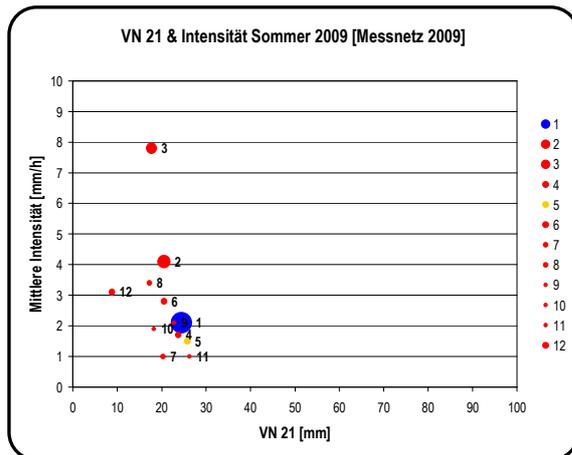


Abb. 8-13: VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozesstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

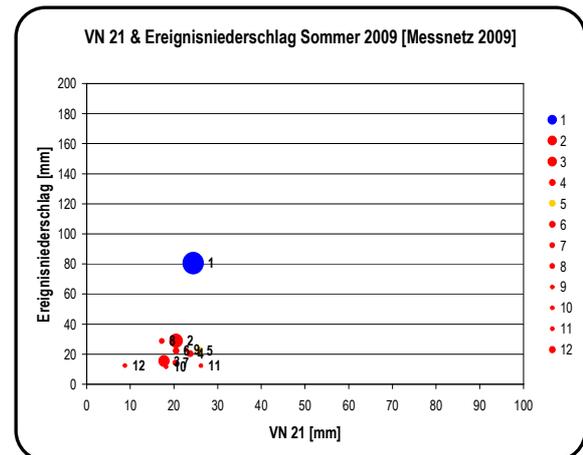


Abb. 8-14: VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozesstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

SSM & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Der Bodenspeicher ist vor den Ereignissen im Sommer 2009 zwischen 55 und 93 % gefüllt. Beim grössten Abfluss ist der Bodenspeicher zu 87 % gefüllt. Bei den Ereignissen acht und elf ist dieser sogar zu über 90 % gefüllt. Trotzdem ergeben sich bei den Ereignissen acht und elf keine grossen Spitzenabflüsse. Ereignis Nr. 3 weicht wiederum durch die hohe Intensität von 8 mm/h von den restlichen elf Ereignissen ab (Abb. 8-15). Der Ereignisniederschlag bewegt sich zwischen 10 und 30 mm und die prozentuale Füllung des Bodenfeuchtespeichers liegt zwischen 55 und 93 % (Abb. 8-16). Zwischen den drei Parametern ist kein eindeutiger Zusammenhang erkennbar.

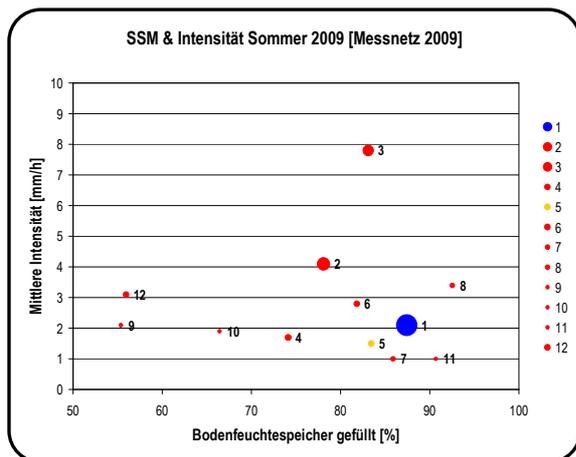


Abb. 8-15: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

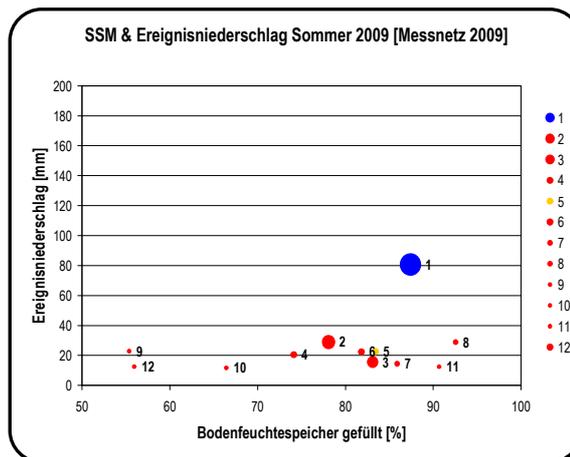


Abb. 8-16: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Messnetz 2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

8.2.1.h Räumliche Auflösung mit unterschiedlichem Messnetz

Der Gebietsniederschlag der Messperiode kann mit dem Datensatz "Messnetz 2009" wie auch mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" berechnet werden. In diesem Kapitel werden die Unterschiede des Gebietsniederschlags und ausgewählter Indizes untersucht. Während der Periode vom 26.06.2009 bis zum 12.10.2009 beträgt der Gebietsniederschlag gemessen mit dem Datensatz "Messnetz 2009" 490 mm und mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" 435 mm (Abb. 8-17 und Tab. 8-12). Mit der Interpolation der Daten des MeteoSchweiz-Niederschlagsmessnetzes werden 55 mm weniger Niederschlag geschätzt, als dies mit dem Datensatz "Messnetz 2009" der Fall ist. Besonders gross sind die Unterschiede im Gebiet des Rotbachs, wo mit dem "Messnetz 2009" die höchsten Werte gemessen werden. Der Unterschied kann bis zu 179 mm betragen. In den tiefsten Lagen im Norden wird mit der Interpolation vom "Messnetz 2009" bis zu 25 mm weniger Niederschlag geschätzt als mit "Stationen Mt.CH".

Auf den Gebietsniederschlagskarten (Abb. 8-19) ist zu erkennen, dass der Datensatz "Stationen Mt.CH" den Niederschlag gleichförmiger über das ganze Einzugsgebiet darstellt und geringe Unterschiede zwischen maximalen und minimalen Niederschlägen aufweist. Ebenfalls ist ein erhöhter Niederschlag im Umkreis der Station Napf sichtbar.

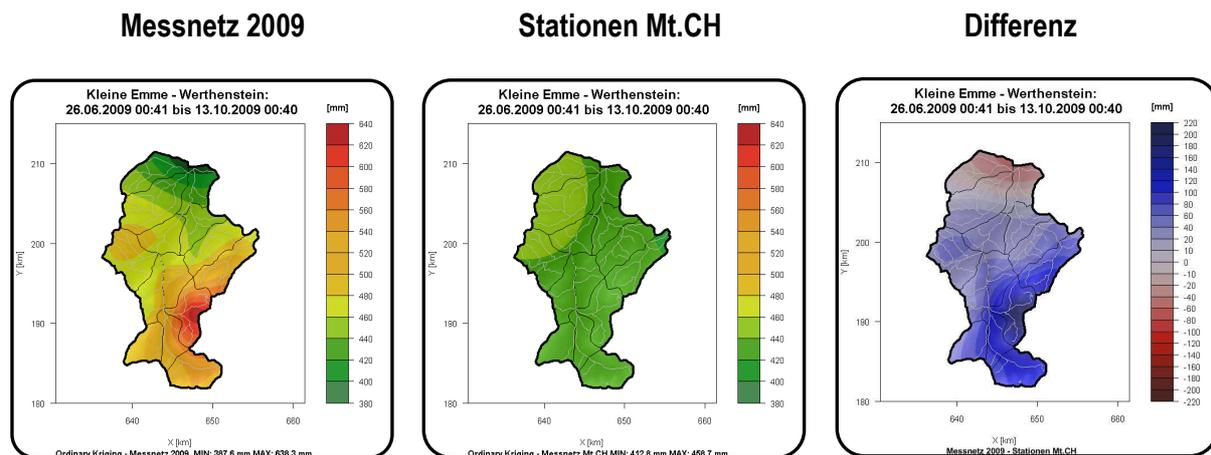


Abb. 8-17: Gebietsniederschlag während des Zeitraums vom 26.06.2009-12.10.2009. Interpolation mit Ordinary Kriging. **Links:** Messnetz 2009, **Mitte:** Stationen Mt.CH, **Rechts:** Differenz (Blau: Messnetz 2009 > Stationen Mt.CH, Rot: Messnetz 2009 < Stationen Mt.CH).

Tab. 8-12: Kennzahlen der Gebietsniederschläge von 26.06.2009-12.10.2009

	Messnetz 2009	Stationen Mt.CH	Differenz
	[mm]	[mm]	[mm]
Minimum	388	413	-25
Mittel	490	435	55
Maximum	638	459	179

In der Tab. 8-13 sind Kenngrößen der untersuchten Niederschlagsereignisse im Sommer 2009 aufgeführt. Die Werte werden auf Grundlage des Datensatzes "Stationen Mt.CH" berechnet. Die Farben rot und blau zeigen an, welcher der beiden Datensätze berechnet mit dem Datensatz "Messnetz 2009" (Tab. 8-3) oder "Stationen Mt.CH", die grössere Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität aufweist. Die Niederschlagsmenge und Intensität wird mit dem Datensatz „Messnetz 2009“, mit Ausnahme von Ereignis Nr. 2, höher geschätzt als mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH". Im Mittel über alle untersuchten Ereignisse des Sommers 2009 weist der Datensatz "Stationen Mt.CH" eine um 26 % geringere Niederschlagsmenge und um 24 % kleinere Intensitäten auf, als der Datensatz "Messnetz 2009". Bei der Bodenfeuchte (SSM) beträgt die Abweichung nur 2 % und die Summenlinientypen sind ohne Ausnahme bei beiden Datensätzen demselben Typ zugeordnet. Die von der Niederschlagsmenge abhängigen Abflusskoeffizienten werden mit "Stationen Mt.CH" 56 % höher geschätzt. Die Berechnungen der Abflusskoeffizienten mit dem Datensatz "Messnetz 2009" ergab bei keinem Ereignissen zweifelhafte Resultate mit Werten grösser als 1. Mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" ist der Koeffizient bei einem Ereignis gleich 1. Wenn der Abflusskoeffizient gleich bzw. grösser als 1 ist, wird der Niederschlag unterschätzt oder der Abfluss in Werthenstein überschätzt. Die punktuelle Abflussmessung birgt weniger Unsicherheiten, als die Berechnung des Niederschlags im EZG der Kleinen Emme. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Unterschätzung des Niederschlags vorliegt.

Der Datensatz "Stationen Mt.CH" unterschätzt demnach mindestens einem Ereignis die Niederschlagsmenge. Beim Datensatz "Messnetz 2009" ist dies bei keinem Ereignis der Fall.

Tab. 8-13: Kennzahlen zu den Niederschlagsereignissen im Sommer 2009. Berechnet auf Grundlage von Stationen Mt.CH. Die Farben entsprechen folgenden Kategorien: Blau: Messnetz 2009 > Stationen Mt.CH, Rot: Messnetz 2009 < Stationen Mt.CH, Blausürkis: Messnetz 2009 = Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasser- prozessstyp	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]	SSM [mm]	Summenlinie	Abfluss- koeffizient
1	17.07.2009	Dauerregen	67.5	1.8	82.8	Mitte	0.3
2	28.07.2009	Schauer	31.1	4.4	80.0	Ende	0.1
3	15.07.2009	Schauer	8.7	4.4	80.0	Anfang	0.5
4	05.09.2009	Schauer	13.1	1.1	70.3	Block	0.5
5	03.08.2009	Kurzregen	22.0	1.5	85.0	Block	0.4
6	08.08.2009	Schauer	19.7	2.5	81.2	Anfang	0.2
7	03.07.2009	Schauer	4.0	0.3	85.1	Mitte	1.0
8	10.10.2009	Schauer	9.6	1.9	93.7	Block	0.4
9	26.06.2009	Schauer	22.3	2.0	54.0	Block	0.1
10	03.09.2009	Schauer	11.0	1.8	61.4	Mitte	0.2
11	11.08.2009	Schauer	10.7	0.8	89.7	Mitte	0.3
12	02.09.2009	Schauer	6.1	1.5	56.2	Mitte	0.2
Mittelwert: In % von Messnetz 2009			74	76	98		156

8.2.2 Repräsentativität von Niederschlagsmessstationen

Die Untersuchung soll zeigen, wie gross die Unterschiede des Gebietsniederschlags³² des EZG und des Punktniederschlags der Stationen Napf und Schüpfheim sind und ob die Niederschlagsmessungen der beiden Niederschlagsstationen den Gebietsniederschlag gut repräsentieren. Um eine gesicherte Aussage zur Repräsentativität der Messstelle in Bezug auf den Gebietsniederschlag im EZG zu ermöglichen, muss ein Vergleich über eine längere Periode erfolgen. Die Schauerregen, welche im Sommer 2009 oft zu beobachten waren, können lokal auftreten und somit sind die Unterschiede der Niederschlagsmengen innerhalb des EZG gross. Grossflächige Dauerregen hingegen können sich über das ganze EZG erstrecken. Der Niederschlag fällt gleichmässiger über dem EZG und die räumliche Repräsentativität von Niederschlagsstationen wird grösser.

8.2.2.a Niederschlagsmessstation Napf

Die Niederschlagsmessstation Napf ist die dem EZG nächstgelegene automatische Niederschlagsmessstation der MeteoSchweiz mit zeitlich hochaufgelösten Daten (10 min). Die Messwerte der Messperiode vom 26.06.2009-12.10.2009 werden analysiert. Die Messwerte der Station Napf dieses Zeitraums sollen mit den Werten vom Datensatz "Messnetz 2009" verglichen werden.

³² Der Gebietsniederschlag wird anhand vom Datensatz "Messnetz 2009" berechnet.

Beim Vergleich der stündlichen Niederschlagsmengen (Abb. 8-18) ergibt sich ein Korrelationskoeffizient (nach Pearson) von 0.66.³³ Auffallend ist, dass bei der Punktmessung im Gegensatz zum Gebietsniederschlag vermehrt höhere Werte (> 8 mm/h) gemessen werden. Trotz der Messung dieser lokal höheren Spitzenwerten ist der geschätzte aufsummierte Gebietsniederschlag der gesamten Periode mit 490 mm gegenüber der Messung beim Napf um 24 mm höher. Der Verlauf der Doppelsummenkurve ist über die Messperiode betrachtet annähernd linear (Abb. 8-19).

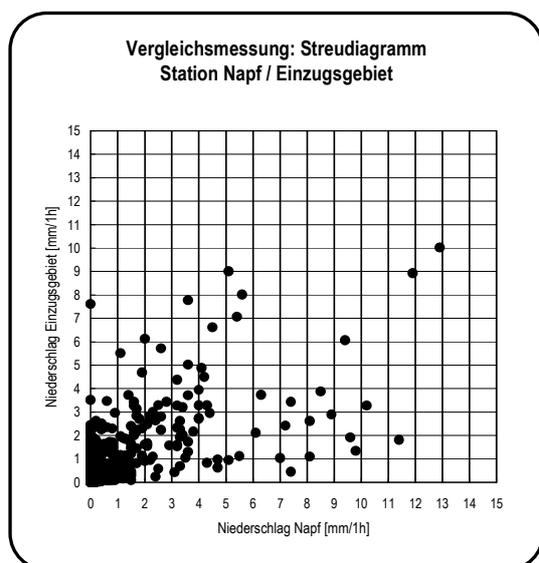


Abb. 8-18: Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Napf & des Einzugsgebietes (1h-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.66, Zeitraum: 26.06.2009 -12.10.2009.

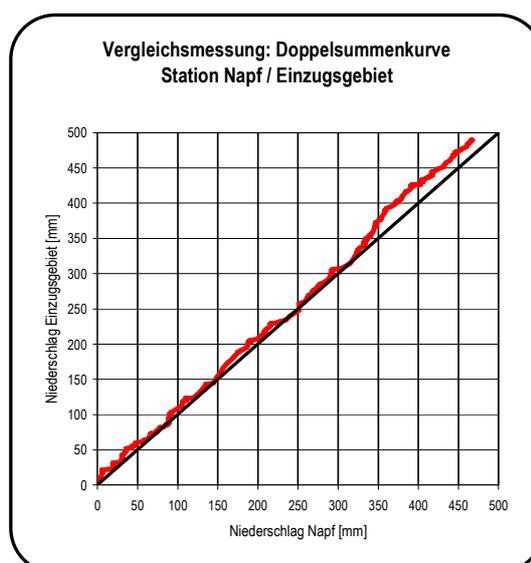


Abb. 8-19: Doppelsummenkurve: Niederschlagsmenge der Station Napf & des Einzugsgebietes. Zeitraum: 26.06.2009 – 12.10.2009

Trotz oft auftretender lokaler Schauerniederschläge ist die absolute Niederschlagsmenge der Messstation Napf, über einen längeren Zeitraum von mehr als 3 Monaten, vergleichbar mit der Menge des Gebietsniederschlags. Grosse Abweichungen bei kurzen Zeitintervallen (1h) sind jedoch oft zu beobachten.

8.2.2.b Kantonale Niederschlagsmessstation Schüpfheim

Die stündlichen Niederschlagsmengen der Messperiode vom 26.06.2009 bis 12.10.2009 der Messstation Schüpfheim und des Gebietsniederschlag ergeben einen Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) von 0.61 (Abb. 8-20). Analog zur Messstation Napf werden auch in Schüpfheim einige hohe Messwerte über 10 mm aufgezeichnet, die im Gebietsmittel kleiner ausfallen. Allerdings sind im Gebietsniederschlag drei Stundenwerte (7.8, 9 und 10 mm) enthalten, die in Schüpfheim überhaupt nicht aufgezeichnet sind. Die Niederschlagssumme während der ganzen Periode beträgt in Schüpfheim 492 mm und der Gebietsniederschlag liegt mit 490 mm nur 2 mm tiefer. Der Verlauf der Summen-

³³ Es wurden nur Stunden miteinbezogen, bei denen mindestens einer der beiden Messwerte grösser als 0 ist.

kurve ist über die Messperiode betrachtet linear (Abb. 8-21). Die Abweichungen der Messwerte bei stündlichen Intervallen können bis zu 10 mm betragen. Während kurzen Zeitintervallen (1h) wird der Gebietsniederschlag durch die Punktmessung an der kantonalen Station nicht repräsentiert. Über einen längeren Zeitraum (26.06.2009 -12.10.2009) ist die Messung der Niederschlagsmenge der Station Schüpfheim mit der mittleren Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet vergleichbar.

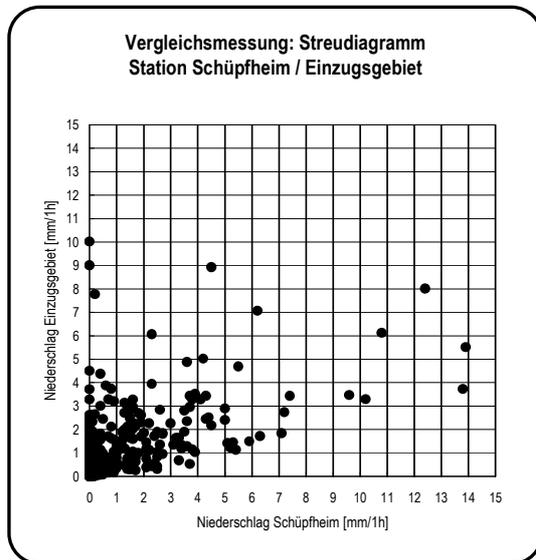


Abb. 8-20: Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Schüpfheim & des Einzugsgebietes (1h-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.61, Zeitraum: 26.06.2009 – 12.10.2009.

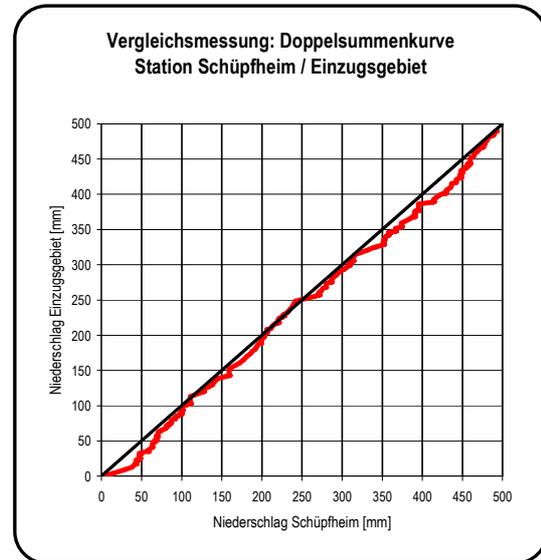


Abb. 8-21: Doppelsummenkurve: Niederschlagsmenge der Station Schüpfheim & des Einzugsgebietes. Zeitraum: 26.06.2009 – 12.10.2009.

8.2.2.c Niederschlag-Abfluss-Beziehung an der Fontanne

Die Abflussmessstation GIUB 4 ist zu nahe beim Gebietsauslass in Werthenstein positioniert, um diese zur Hochwasserwarnung verwenden zu können. Die Station wurde installiert, um das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss im Teileinzugsgebiet der Fontanne zu verbessern. Anhand von nur vier Niederschlags-Abfluss-Ereignissen lassen sich keine allgemein gültigen Zusammenhänge ermitteln. Diese ungenügende Datenlage wird durch folgende zwei Fakten begründet:

- a) Die Messperiode beschränkt sich auf einen kurzen Zeitraum, währenddem kaum hohe Pegelstände auftraten.
- b) Zudem sind nur Niederschlagsdaten vom 31.08.2009 bis 12.10.2009 zur Auswertung brauchbar (siehe Kap. 5.1.2).

Eine Analyse der vier Ereignisse zeigte, dass der Anfang des Direktabflusses vor dem Beginn des Niederschlagsereignisses an der Station Grämse gemessen wurde. Die Reaktionszeit ist somit bei

allen Ereignissen negativ (siehe Tableau 25, AMIGUET [2010]). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Niederschläge lokalen Charakter hatten und durch eine einzelne punktuelle Messung nicht aufgezeichnet wurden. Die Zeit zwischen dem Niederschlagsbeginn bei der Station Grämse bis zur Abflussspitze bei der Station GIUB 4 gibt keine einheitlichen Ergebnisse. Die Reaktionszeit variiert zwischen 1 und 11 Stunden [AMIGUET 2010].

Alternativ wird die Analyse mit den Messwerten der rund 6 km entfernten Niederschlagsstation Napf der MeteoSchweiz vorgenommen. Ein Vergleich der Niederschlagsmesswerte (10-Minuten Summe) zeigt, dass die Messwerte der beiden Stationen in hoher zeitlicher Auflösung nicht vergleichbar sind (Korrelationskoeffizient 0.06). Die Kreuzkorrelation (Abb. 8-23) die angewendet wird, um zeitverzögerte Korrelationen zwischen zwei Zeitreihen aufzuzeigen, zeigt bis zu einer Differenz von 40 Minuten keinen zeitlich verschobenen Zusammenhang auf. Der Korrelationskoeffizient ist bei keiner Zeitdifferenz grösser als 0.07.

Bei den stündlichen Niederschlagswerten ist eine Korrelation von 0.79 zu beobachten (Abb. 8-22). Trotz des linearen Zusammenhangs auf stündlicher Basis, unterscheidet sich die aufsummierte Regenmenge der Messperiode von 98.4 mm bei der Station Grämse von der Niederschlagssumme beim Napf (79.8 mm) um rund 20 %. Um die Relation der Niederschlagsstation Grämse und der Abflussstation GIUB 4 zu untersuchen, ist eine längere Untersuchungsperiode notwendig.

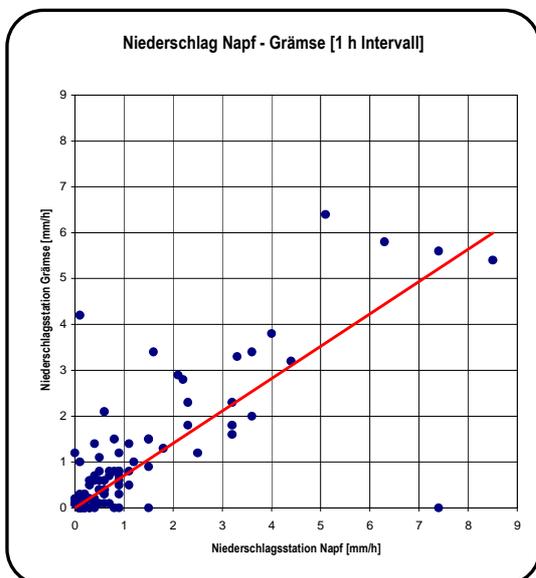


Abb. 8-22: Streudiagramm: Niederschlagsmenge der Station Napf & Grämse (1h-Summe), Korrelationskoeffizient: 0.79, Zeitraum: 31.08.2009-12.10.2009.

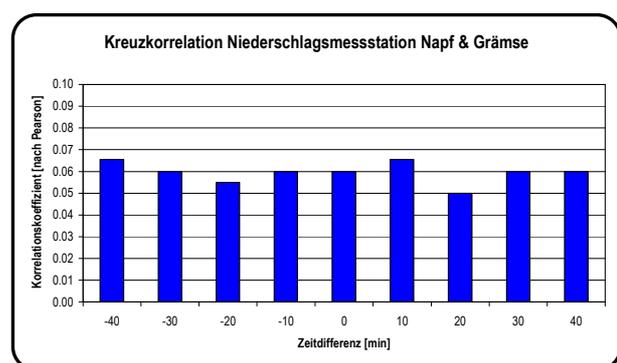


Abb. 8-23: Kreuzkorrelation der 10 minütlichen Niederschlagsmenge der Stationen Napf & Grämse von -40 min bis +40 min. Zeitraum: 31.08.2009-12.10.2009.

8.2.3 Niederschlagsereignisse der Hochwasser 1992 – 2006 [Radar Mt.CH]

Die Tab. 8-14 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Kenngrößen aller untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe zwischen 1992 und 2006. Die Ereignisnummern beziehen sich auf die partielle Reihe von 1984-2009. Die Kennwerte werden anhand des Datensatzes "Radar Mt.CH" berechnet.

Tab. 8-14: Kennzahlen der 11 Niederschlagsereignisse der partiellen Serie während des Zeitraums von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Nr.	Datum	Spitzenabfluss [m³/s]	Hochwasserprozessstyp	N-Dauer [h]	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]	VN21 [mm]	SSM [mm]	Abflusskoeffizient	Summenlinie	Reaktionszeit [h]
1	21.08.2005	470.5	Dauerregen	43	189.0	4.4	86.6	97.6	0.3	Block	6
2	16.07.2002	390.4	Schauer	10	50.9	5.1	39.0	90.8	0.4	Mitte	3
4	12.06.1997	330.7	Kurzregen	16	62.9	3.9	32.8	66.3	0.2	Mitte	5
6	02.06.2004	266.0	Dauerregen	70	165.5	2.4	26.6	79.3	0.2	Block	8
7	02.08.1996	227.3	Kurzregen	12	33.5	2.8	14.1	56.8	0.5	Anfang	0
8	13.01.2004	226.1	Dauerregen	66	104.3	1.6	38.3	96.4	0.4	Block	3
10	06.08.2000	218.2	Dauerregen	43	67.9	1.6	27.5	88.7	0.4	Mitte	4
12	21.07.1992	212.9	Schauer	26	85.7	3.3	15.2	66.7	0.2	Anfang	0
14	11.08.2002	203.1	Dauerregen	48	92.1	1.9	35.7	91.5	0.3	Anfang/Ende	3
16	19.05.1994	199.3	Dauerregen	32	85.5	2.7	14.9	76.1	0.3	Mitte	2
19	16.07.2001	193.5	Dauerregen	32	77.3	2.4	27.6	96.6	0.2	Mitte	2

8.2.3.a Hochwasserprozessstypen

Von elf untersuchten Hochwassern sind sieben durch Dauerregen ausgelöst worden, darunter das Grösste (21.08.2005). Je zwei der Hochwasser sind auf Kurzregen und auf Schauer zurückzuführen (Abb. 8-24).

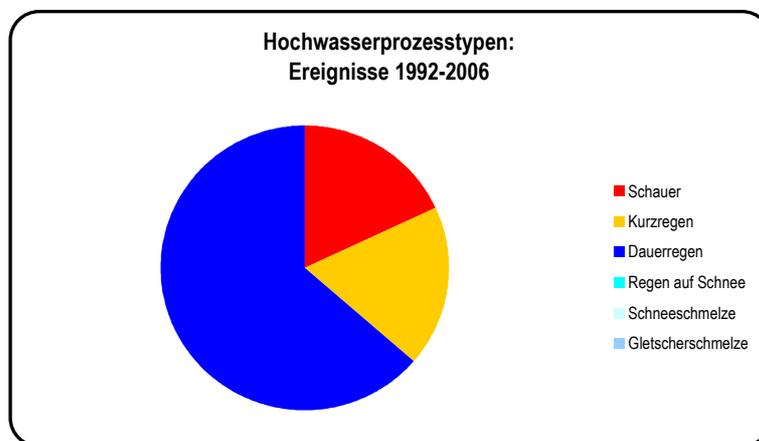


Abb. 8-24: Hochwasserprozessstypen der 11 untersuchten Ereignisse während der Messperiode 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Die Mehrheit der Hochwasser treten während der Sommermonate von Juni bis August auf. Am häufigsten ist der Monat August betroffen (Abb. 8-25).

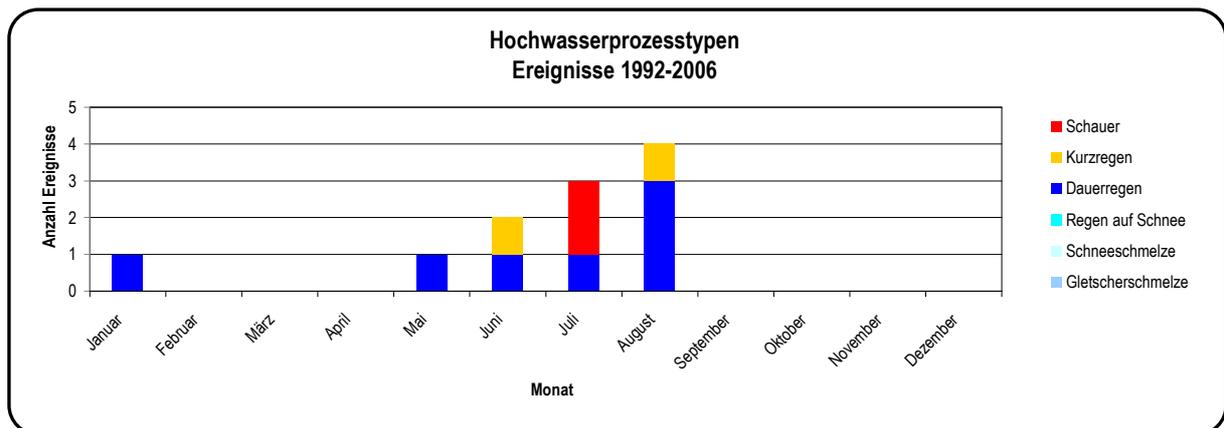


Abb. 8-25: Hochwasserprozesstypen der 11 untersuchten Ereignisse während der Messperiode 1992-2006. Einteilung der Ereignisse nach Monaten. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

8.2.3.b Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität

Die grössten Niederschlagsmengen fallen bei den Dauerregenereignissen und die kleinsten Mengen bei den Kurzregenereignissen. Bei der Niederschlagsintensität sind die auf Grund der Einteilung der Hochwasserprozesstypen zu erwartenden Unterschiede vorhanden. Die Schauerniederschläge weisen die höchste Intensität auf. Es folgen die Kurzregenereignisse. Die kleinste Intensität wird bei den Dauerregenereignissen beobachtet (Tab. 8-15).

Tab. 8-15: Mittelwerte der Niederschlagsmengen und maximale Intensitäten der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozesstyp. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Hochwasserprozesstyp	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]
Schauer	68.3	4.2
Kurzregen	48.2	3.4
Dauerregen	111.7	2.4
Regen auf Schnee	-	-
Schneeschmelze	-	-
Gletscherschmelze	-	-
Mittelwert 1992-2006	92.2	2.9

Die Rangierung der Ereignisniederschläge nach TEZG³⁴ zeigt die räumliche Verteilung der Niederschlagssumme der elf untersuchten Ereignisse während der Zeitperiode von 1992 bis 2006 (Abb. 8-26). Im Mittel der elf Ereignisse fällt im Bereich Grosse Entle relativ zu den anderen TEZG der meiste Niederschlag (Rang 1). Bei der Kleinen Fontanne ist die Regensumme am kleinsten (Rang 14). Am

³⁴Die Teileinzugsgebiete sind bei jedem Ereignis nach der Höhe der gefallenen Niederschläge rangiert (1-14). Die Summe all dieser Rangierungen der Teileinzugsgebiete wird nochmals rangiert. Das Teileinzugsgebiet mit der tiefsten Summe der Rangierung ist mit Rang 1 markiert. Somit wird das Teileinzugsgebiet, das im Mittel von der höchsten Niederschlagsmenge betroffen ist, mit dem 1. Rang gekennzeichnet.

meisten Niederschlag fällt in den östlichen Gebieten (Rang 1-3). Eine Erklärung hierfür kann der Luftmassenzustrom aus westlicher Richtung sein. Auf Grund der Erhebungen am östlichen Rand des EZG werden sie blockiert und zum Aufsteigen gezwungen. Durch die Temperaturabnahme mit zunehmender Meereshöhe, nimmt die Intensität und Häufigkeit von Kondensationsprozessen zu, was zur Niederschlagsbildung führt [WÜTHRICH 2004]. Es folgen die TEZG Südgraben und Sörenberg im Süden (Rang 4-5). Die TEZG mit tieferen Niederschlagsmengen (Rang 10-14) befinden sich im Nordwesten.

Die „Regentropfen“ in Abb. 8-27 symbolisieren die maximale stündliche Niederschlagsintensität. Jeder Tropfen steht für die maximale Intensität im entsprechenden TEZG³⁵ bei einem Ereignis. Bei drei Ereignissen tritt die maximale Intensität beim Hohwäldlibach auf. Je zweimal beim Südgraben und der Grossen Entle, sowie je einmal beim Längehohwald, dem Steinibach, dem Rotbach und in Sörenberg. Die höchste Intensität kann somit ausnahmslos in den südlichen TEZG, die höhergelegene Gebietsflächen beinhalten, beobachtet werden.

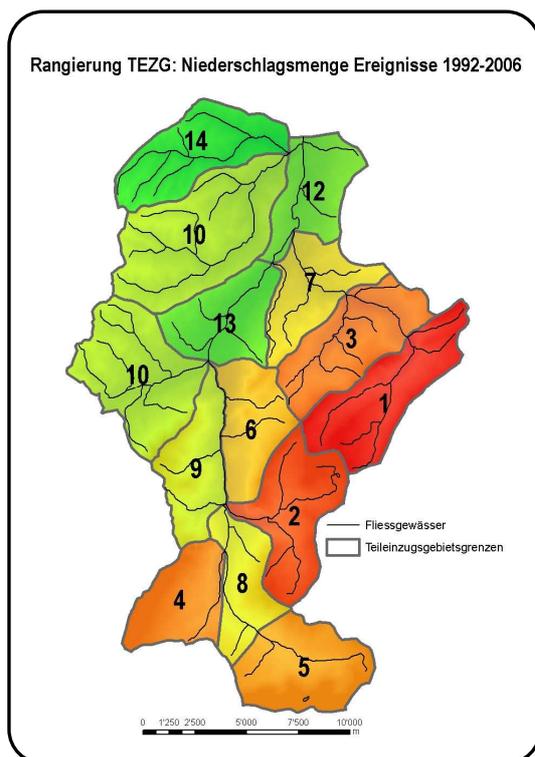


Abb. 8-26: Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe der Ereignisniederschläge während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH

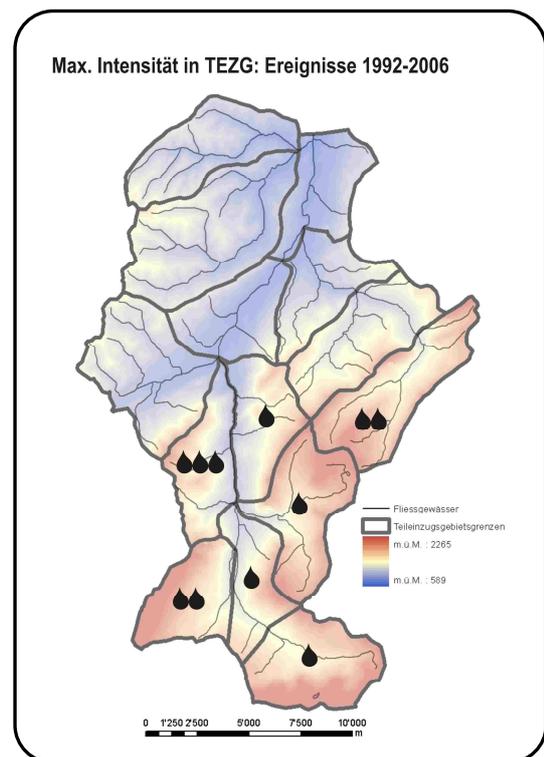


Abb. 8-27: Teileinzugsgebiete mit max. Niederschlagsintensität während der 11 Ereignisse der Messperiode 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

³⁵ Das Teileinzugsgebiet mit max. Niederschlagsintensität ist anhand des beschriebenen Vorgehens von Kap. 7.4.2.b bestimmt worden.

8.2.3.c VN 21 und SSM

Der Vorregenindex ist bei den Dauerregenereignissen am höchsten und bei den Kurzregenereignissen am tiefsten. Ebenfalls ist der Füllgrad des Bodenfeuchtespeichers bei den Dauerregen-Hochwassern am höchsten und der Füllgrad bei Kurzregenereignissen am tiefsten (Tab. 8-16).

Tab. 8-16: Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse während der Messperiode 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozesstyp. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Hochwasserprozesstyp	VN21	SSM
	[mm]	[mm]
Schauer	27.1	78.8
Kurzregen	23.5	61.6
Dauerregen	36.7	89.5
Regen auf Schnee	-	-
Schneesmelze	-	-
Gletschersmelze	-	-
Mittelwert 1992-2006	32.6	82.4

Eine geringe Bodenfeuchtespeicherkapazität³⁶ ist in den höheren Regionen im Südosten (Rang 1-8), eine mittlere Kapazität beim Einzugsgebiet der Fontanne (Rang 9-10) und eine grosse Speicherkapazität in tiefen Lagen im Haupttal von Escholzmatt bis Entlebuch (Rang 11-14) vorhanden (Abb. 8-31).

Die tieferen Ränge von Vorregenindizes und Bodenfeuchtespeicherung sind in den höheren Lagen gelegen (Ränge 1-6) (Abb. 8-28 und Abb. 8-29). Die Verteilung der Ränge innerhalb der höhergelegenen TEZG ist unterschiedlich. Trotzdem sind mit Ausnahme vom Vorregenindex bei der Entle (Rang 7) die TEZG mit tiefer Rangierung (1-7) beim Vorregenindex wie auch beim Bodenfeuchtespeicher in den höheren Regionen im Osten und Süden des EZG zu beobachten. Insbesondere die TEZG Rotbach und Grosse Entle weisen bei beiden Parametern tiefe Ränge auf. Durch die Ausgangsbedingungen geringe Bodenfeuchtespeicherkapazität und hohe VN21-Summe, ist in diesen Gebieten mit einem verringerten Wasserrückhalt zu rechnen.

³⁶ Die Rangierung beruht auf der mittleren Bodenfeuchtespeicherung eines Einzugsgebietes (SSM). Diese ist mit Hilfe des PREVAH-Systems berechnet worden. Das Einzugsgebiet mit dem Rang 1 hat die kleinste Bodenfeuchtespeicherkapazität. Die Rangierung wurde unabhängig von Ereignissen vorgenommen.

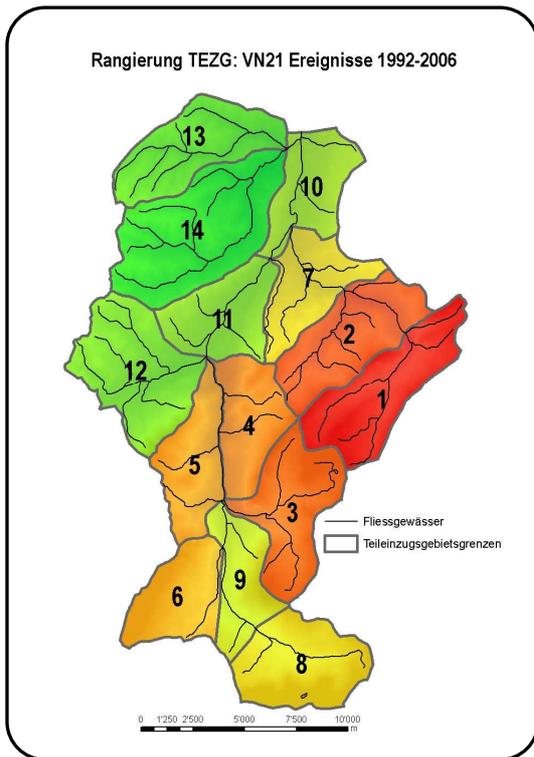


Abb. 8-28: Rangierung der Teileinzugsgebiete nach Höhe des VN21 der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

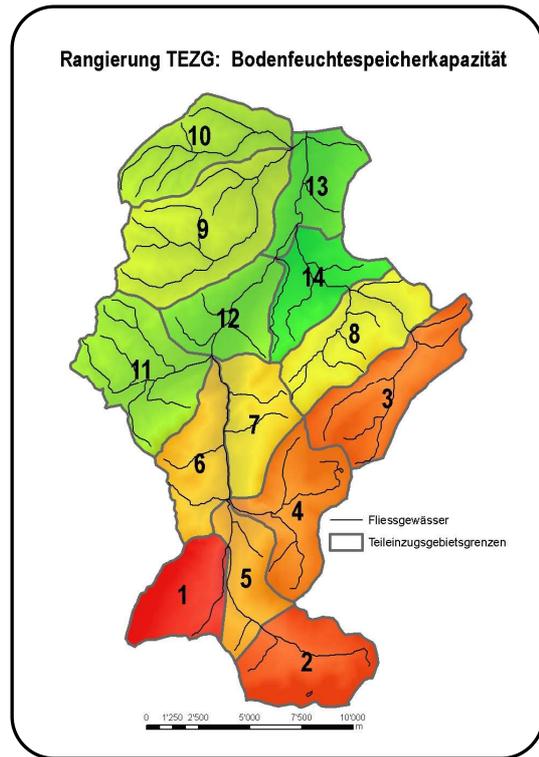


Abb. 8-29: Rangierung der Bodenfeuchtespeicherkapazität [mm] der Teileinzugsgebiete. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

8.2.3.d Summenlinie

In der Tab. 8-17 ist der Zeitpunkt des Niederschlagsintensitätsmaximum während eines Ereignisses beschrieben. Am häufigsten ist die höchste Intensität in der Mitte der Ereignisdauer (5) zu beobachten (Tab 8-18). Das Ereignis Nr. 14 kann keinem der vier Summenlinien-Typen zugewiesen werden. Die Intensität ist zu Beginn und am Ende erhöht. Diese Summenlinie wird mit "Anfang/Ende" bezeichnet.

Tab. 8-17: Übersicht der Summenlinien-Typen der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessstyp	Summenlinie Radar Mt.CH
1	21.08.2005	Dauerregen	Block
2	16.07.2002	Schauer	Mitte
4	12.06.1997	Kurzregen	Mitte
6	02.06.2004	Dauerregen	Block
7	02.08.1996	Kurzregen	Anfang
8	13.01.2004	Dauerregen	Block
10	06.08.2000	Dauerregen	Mitte
12	21.07.1992	Schauer	Anfang
14	11.08.2002	Dauerregen	Anfang/Ende
16	19.05.1994	Dauerregen	Mitte
19	16.07.2001	Dauerregen	Mitte

Tab. 8-18: Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Summenlinie Radar Mt.CH	Anzahl Ereignisse
Anfang	2
Mitte	5
Ende	-
Block	3
Anfang/Ende	1

8.2.3.e Reaktionszeit

Die Reaktionszeiten können im Unterschied zum Datensatz "Messnetz 2009" nur in stündlicher Auflösung berechnet werden (Tab. 8-19). Der Mittelwert liegt bei über 3 h (Tab 8-20). Der Vorregenindex bei kurzen Reaktionszeiten unterhalb von 2 h und weniger ist mit 18 mm kleiner als bei Ereignissen mit Reaktionszeiten grösser als 2 h (41 mm). Der Bodenfeuchtespeicher ist bei Ereignissen mit längeren Reaktionszeiten ebenfalls voller (87 %) als bei Ereignissen mit kurzen Reaktionszeiten (74%). Die Variabilität der Niederschläge in den Tagen vor dem Ereignis und der damit verbundene hohe Sättigungsgrad des Bodens kann bei den beschriebenen Ereignissen nicht als Erklärung der unterschiedlichen Reaktionszeiten dienen. Bei beiden Ereignissen (Nr. 7 und Nr. 12), bei welchen der Niederschlagsanfang und der Beginn des Direktabflusses auf dieselbe Stunde fallen (Reaktionszeit: 0 h), ist die grösste Niederschlagsintensität am Anfang der Ereignisdauer (Tab 8-17) und der Schwerpunkt der Niederschläge im nördlichen Einzugsgebietsteil in der Nähe der Entle auszumachen. Die kurzen Fliesswege bei diesen Ereignissen und die intensiven Niederschläge zu Beginn könnten die Reaktionszeit verkürzt haben.

Tab. 8-19: Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessstyp	Reaktionszeit [h]
1	21.08.2005	Dauerregen	6
2	16.07.2002	Schauer	3
4	12.06.1997	Kurzregen	5
6	02.06.2004	Dauerregen	8
7	02.08.1996	Kurzregen	0
8	13.01.2004	Dauerregen	3
10	06.08.2000	Dauerregen	4
12	21.07.1992	Schauer	0
14	11.08.2002	Dauerregen	3
16	19.05.1994	Dauerregen	2
19	16.07.2001	Dauerregen	2

Tab. 8-20: Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Hochwasserprozessstyp	Reaktionszeit [h]
Schauer	1.5
Kurzregen	4.3
Dauerregen	4.0
Regen auf Schnee	-
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 1992-2006	3.3

Zusammenhänge zwischen dem räumlich-zeitlichen Verlauf der Niederschlagsfelder und der Reaktionszeit konnten wie schon bei der Analyse der Ereignisse vom Messnetz 2009 anhand der stündlichen Gebietsniederschlagskarten nicht vorgenommen werden.

Die längeren Reaktionszeiten beim Datensatz "Radar Mt.CH" im Vergleich zum "Messnetz 2009" sind möglicherweise durch das grobmaschige Messnetz und die stündliche Auflösung der Reaktionszeit zustande gekommen. Der exakte Anfang konnte mit dem Bodenmessnetz der MeteoSchweiz, welches

dem Datensatz "Radar Mt.CH" teilweise als Grundlage dient, nicht korrekt geschätzt werden, da das zugrunde liegende Messnetz der Niederschlagstagesammler Daten nur in geringer zeitlicher und räumlicher Auflösung für die Interpolation bereitstellt.

8.2.3.f Abflusskoeffizient

Im Mittel weist der Abflusskoeffizient einen Wert von 0.3 auf (Tab. 8-22).

Tab. 8-21: Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozesstyp	Abflusskoeffizient
1	21.08.2005	Dauerregen	0.3
2	16.07.2002	Schauer	0.4
4	12.06.1997	Kurzregen	0.2
6	02.06.2004	Dauerregen	0.2
7	02.08.1996	Kurzregen	0.5
8	13.01.2004	Dauerregen	0.4
10	06.08.2000	Dauerregen	0.4
12	21.07.1992	Schauer	0.2
14	11.08.2002	Dauerregen	0.3
16	19.05.1994	Dauerregen	0.3
19	16.07.2001	Dauerregen	0.2

Tab. 8-22: Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse der Messperiode von 1992-2006 aufgeteilt nach Hochwasserprozess-typen. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

Hochwasserprozesstyp	Abflusskoeffizient
Schauer	0.3
Kurzregen	0.4
Dauerregen	0.3
Regen auf Schnee	-
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 1992-2006	0.3

8.2.3.g Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag

In den Abb. 8-32 ff. werden der Spitzenabfluss, die Anfangsbedingungen und der Niederschlag der Ereignisse während der Messperiode zwischen 1992 und 2006 dargestellt. Die Nr. 1 ist das Ereignis mit dem grössten und die Nr. 19 mit dem kleinsten Spitzenabfluss. Als Anfangsbedingung werden bei den ersten Darstellungen der Vorregenindex VN21 (Abb. 8-32 und 8-33) und bei den darauffolgenden Abbildungen (Abb. 8-34 und 8-35) der Bodenfeuchtespeicher verwendet. Für den Niederschlag werden bei den Grafiken auf der linken Seite die mittlere Ereignisintensität und bei den Grafiken auf der rechten Seite der Ereignisniederschlag aufgetragen.

VN 21 & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Der Vorregenindex schwankt zwischen 15 und 90 mm, wobei mit Ausnahme des Hochwassers von 2005 (grösster blauer Punkt) der grösste VN21 bei 40 mm liegt. Der Vorregenindex vom Ereignis Nr. 1 ist somit mehr als doppelt so hoch wie der Vorregenindex des Ereignis mit dem 2. höchsten Spitzenabfluss. Bei den drei Ereignissen mit den höchsten Spitzenabflüssen traten die höchsten Intensitäten auf. Dies entspricht beim Ereignis Nr. 1 (Dauerregen) nicht der Beschreibung des Hochwassertypus. Mit Ausnahme des Ereignisses Nr. 1 sind die sechs Dauerregenereignisse diejenigen mit den tiefsten Intensitäten (Abb. 8-30). Wird anstatt der Intensität die Niederschlagsmenge betrachtet (Abb. 8-31), weisen die Dauerregenereignisse mehrheitlich höhere Niederschlagsmengen als die Schauer- und Kurzniederschläge auf.

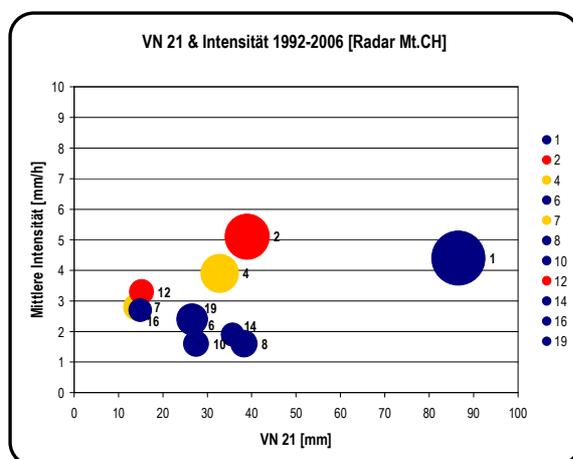


Abb. 8-30: VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

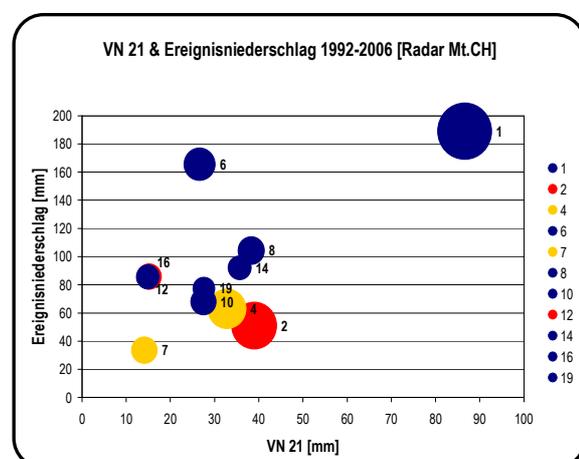


Abb. 8-31: VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

SSM & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Der Bodenspeicher im Einzugsgebiet ist zu Beginn der Hochwasserereignisse während der Messperiode von 1992-2006 zwischen 57 und 98 % gefüllt. Vor dem grössten Hochwasser ist auch der höchste Füllstand mit 98 % zu beobachten. Es sind aber auch Ereignisse mit kleineren Abflussspitzen vorhanden (Nr. 8 und Nr. 19) die zu Ereignisbeginn ebenfalls einen hohen Füllstand des Bodenfeuchtespeichers von rund 97 % aufweisen. Die mittlere Niederschlagsintensität des grössten Hochwassers (Nr. 1) ist um 2 bis 3 mm grösser als jene der Ereignisse Nr. 8 und Nr. 19, womit sich auch die Unterschiede hinsichtlich des Spitzenabflusses erklären lassen (Abb. 8-32). Noch deutlicher treten die Unterschiede bei betrachten des Ereignisniederschlags (Abb. 8-33) hervor.

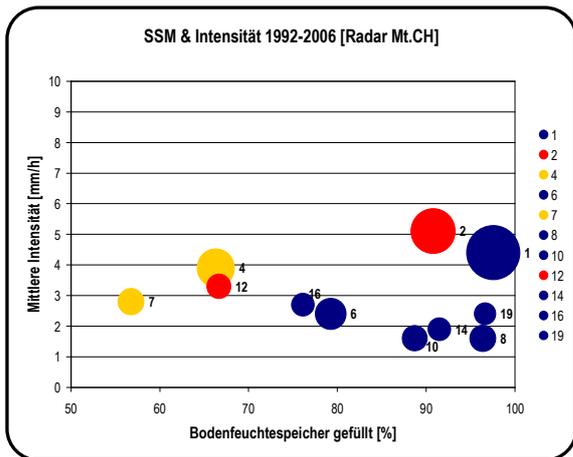


Abb. 8-32: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

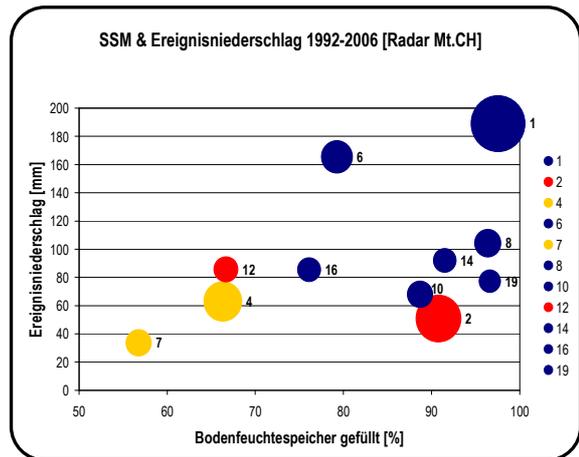


Abb. 8-33: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1992-2006. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen und dunkelblau für Dauerregen steht.

8.2.3.h Räumliche Auflösung mit unterschiedlichem Messnetz

Der Gebietsniederschlag aller untersuchten Ereignisse kann anhand des Datensatzes "Radar Mt.CH" als auch mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" berechnet werden. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen diesen beiden Datensätzen anhand des Gebietsniederschlags und ausgewählter Indizes untersucht.

Der aufsummierte Niederschlag der elf Ereignisse während der Messperiode 1992 bis 2006, gemessen mit dem Datensatz "Radar Mt.CH", beträgt 1016 mm und mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" 876 mm (Tab. 8-23). Die Interpolation der Bodenmessstationen der MeteoSchweiz unterschätzt im Vergleich zum Datensatz "Radar Mt.CH" den Gebietsniederschlag um 140 mm. Die grössten Unterschiede treten in den höheren Gebieten im Südwesten und Osten auf. Insbesondere an der Grenze der TEZG zwischen dem Rotbach und der grossen Entle sind Differenzen von bis zu 325 auszumachen (Abb. 8-33). Nur beim Gebietsauslass in der Nähe der Station Werthenstein und in der Nähe des Zusammenflusses von Wiss Emme und Waldemme in Schüpfheim weist der Datensatz "Stationen Mt.CH" einen bis zu 31 mm höheren Niederschlag auf als der Datensatz "Radar Mt.CH".

Der Datensatz "Radar Mt.CH" (Abb. 8-34) lässt eine grössere räumliche Variabilität der Niederschläge erkennen. Der Gebietsniederschlag ist mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" gleichmässiger verteilt und weist kleinere Unterschiede zwischen maximalen und minimalen Werten auf.

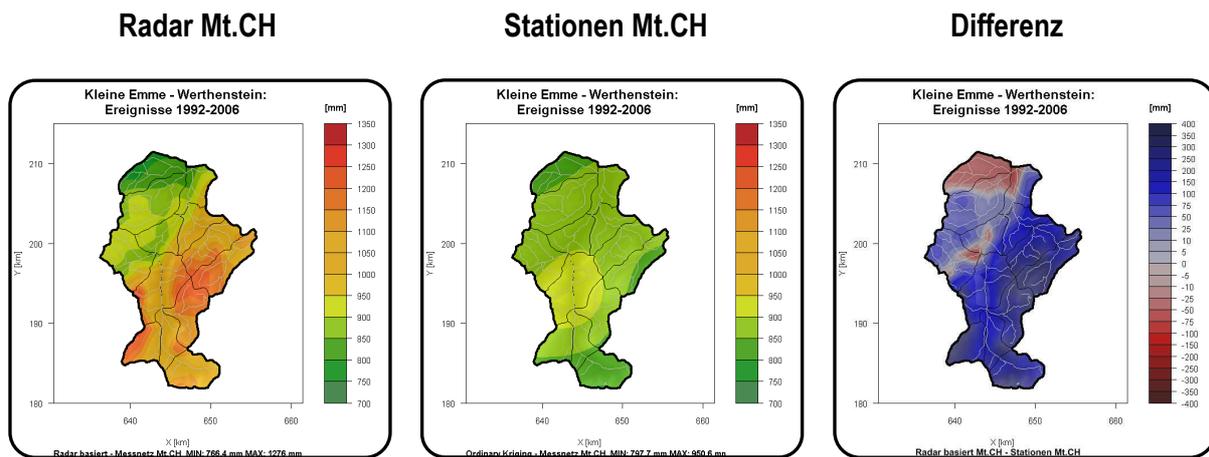


Abb. 8-34: Gebietsniederschlag der 11 Ereignisse der Messperiode 1992-2006. **Links:** Radar Mt.CH, **Mitte:** Stationen Mt.CH, **Rechts:** Differenz (Blau: Radar Mt.CH > Stationen Mt.CH, Rot: Radar Mt.CH < Stationen Mt.CH).

Tab. 8-23: Kennzahlen der Gebietsniederschläge der 11 Ereignisse zwischen 1992-2006.

	Radar Mt.CH	Stationen Mt.CH	Differenz
	[mm]	[mm]	[mm]
Minimum	766	797	-31
Mittel	1016	876	140
Maximum	1276	951	325

In der Tab. 8-24 sind Kenngrößen der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Periode von 1992 bis 2006 dargestellt. Die Werte wurden auf Grundlage des Datensatzes "Stationen Mt.CH" berechnet. Die Farben geben Informationen zu den Unterschieden zwischen den Resultaten, berechnet mit dem Datensatz "Radar Mt.CH" (Tab. 8-14) und dem Datensatz "Stationen Mt.CH".

Die Niederschlagsmenge ist mit dem Datensatz "Radar Mt.CH" bei allen Ereignissen grösser als mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH". Bezüglich der Intensität bildet das Ereignis Nr. 2 eine Ausnahme. Im Datensatz "Radar Mt.CH" beginnt das Niederschlagsereignis eine Stunde vor dem Datensatz "Stationen Mt.CH". Somit weist das Ereignis Nr. 2 im Datensatz "Radar Mt.CH" eine längere Dauer auf und die mittlere Intensität während des ganzen Ereignisses wird kleiner. Im Mittel werden 88 % der Niederschlagsmenge mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" und 87 % der Niederschlagsintensität des Datensatzes "Radar Mt.CH" mit "Stationen Mt.CH" geschätzt.

Der Vorregenindex und der Füllstand des Bodenfeuchtespeichers ist bei "Radar Mt.CH" ebenfalls mehrheitlich höher. Minimal tiefere Werte sind bei der Bodenfeuchtespeicherung bei Ereignis Nr. 12 und Nr. 14 zu beobachten. Der Vorregenindex wird mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" relativ zum Datensatz "Radar Mt.CH" um 14 % und der Bodenfeuchtespeicherfüllstand um 1 % unterschätzt.

Neben den Unterschieden hinsichtlich der mittleren Ereignisintensität sind bei zwei Ereignissen (Nr. 4 und Nr. 19) auch Unterschiede bezüglich des Auftretenszeitpunktes der höchsten Intensität fest-

zustellen. Die höchste Intensität tritt bei den zwei Ereignissen im Datensatz "Radar Mt.CH" in der Mitte und im Datensatz "Stationen Mt.CH" am Ende auf. Die von der Niederschlagsmenge abhängigen Abflusskoeffizienten werden mit "Stationen Mt.CH" 15 % höher geschätzt als mit dem Datensatz "Radar Mt.CH".

Tab. 8-24: Kennzahlen zu den Niederschlagsereignissen während der Messperiode 1992-2006. Berechnet auf Grundlage von Stationen Mt.CH. Die Farben entsprechen folgenden Kategorien: Blau: Messnetz 2009 > Stationen Mt.CH, Rot: Radar Mt.CH < Stationen Mt.CH, Blaustürkis: Radar Mt.CH = Stationen Mt.CH, Gelb: Radar Mt.CH ≠ Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasser- prozessstyp	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]	VN21 [mm]	SSM [mm]	Summenlinie	Abfluss- koeffizient
1	21.08.2005	Dauerregen	141.9	3.3	79.3	97.3	Block	0.5
2	16.07.2002	Schauer	42.9	5.4	34.0	89.6	Mitte	0.4
4	12.06.1997	Kurzregen	53.8	3.8	25.4	63.6	Ende	0.3
6	02.06.2004	Dauerregen	145.8	2.1	24.0	78.1	Block	0.3
7	02.08.1996	Kurzregen	31.2	2.2	13.8	56.3	Anfang	0.5
8	13.01.2004	Dauerregen	88.1	1.3	31.6	94.9	Block	0.5
10	06.08.2000	Dauerregen	62.5	1.5	18.0	88.1	Mitte	0.4
12	21.07.1992	Schauer	74.9	2.8	15.3	67.0	Anfang	0.3
14	11.08.2002	Dauerregen	83.7	1.7	30.0	91.5	Anfang/Ende	0.3
16	19.05.1994	Dauerregen	81.0	2.3	12.4	73.4	Mitte	0.4
19	16.07.2001	Dauerregen	69.7	2.0	23.7	96.0	Ende	0.2
Mittelwert: In % von Radar Mt.CH			88	87	86	99		115

8.2.4 Niederschlagsereignisse der 20 grössten Hochwasser von 1984 – 2009

[Stationen Mt.CH]

Die Tab. 8-25 zeigt die wichtigsten Kenngrössen aller untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe zwischen 1984 und 2009. Die Kennwerte werden anhand des Datensatzes "Stationen Mt.CH" berechnet.

Tab. 8-25: Kennzahlen der 20 Niederschlagsereignisse der partiellen Serie während des Zeitraums von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Spitzenabfluss [m³/s]	Hochwasserprozessstyp	N-Dauer [h]	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]	VN21 [mm]	SSM [mm]	Abflusskoeffizient	Summenlinie	Reaktionszeit [h]
1	21.08.2005	470.5	Dauerregen	43	141.9	3.3	79.3	97.3	0.5	Block	7
2	16.07.2002	390.4	Schauer	8	42.9	5.4	34.0	89.6	0.5	Mitte	2
3	08.08.2007	349.7	Dauerregen	46	105.0	2.3	32.4	89.9	0.3	Mitte	7
4	12.06.1997	330.7	Kurzregen	14	53.8	3.8	25.4	63.6	0.3	Ende	4
5	19.07.2008	269.8	Schauer	15	10.8	0.7	11.3	76.1	1.5	Ende	2
6	02.06.2004	266.0	Dauerregen	65	145.8	2.1	24.0	78.1	0.3	Block	6
7	02.08.1996	227.3	Kurzregen	14	31.2	2.2	13.8	56.3	0.5	Anfang	0
8	13.01.2004	226.1	Dauerregen	66	88.1	1.3	31.6	94.9	0.5	Block	3
9	14.07.2008	220.8	Dauerregen	24	52.1	2.2	45.0	89.9	0.5	Block	4
10	06.08.2000	218.2	Dauerregen	43	62.5	1.5	18.0	88.1	0.4	Mitte	4
11	21.07.2007	215.2	Kurzregen	11	37.9	3.4	41.7	89.1	0.4	Block	1
12	21.07.1992	212.9	Schauer	27	74.9	2.8	15.3	67	0.3	Anfang	1
13	19.12.1987	203.3	Regen auf Schnee	44	38.8	0.9	12.8	94.4	0.6	Ende	2
14	11.08.2002	203.1	Dauerregen	48	83.7	1.7	30.0	91.5	0.3	Anfang/Ende	3
15	25.05.1990	202.9	Kurzregen	16	51.0	3.2	33.2	89.6	0.4	Ende	3
16	19.05.1994	199.3	Dauerregen	35	81.0	2.3	12.4	73.4	0.4	Mitte	2
17	04.07.2007	198.5	Kurzregen	16	18.0	1.1	25.3	94.8	1.1	Mitte	2
18	14.02.1990	194.3	Regen auf Schnee und Dauerregen	52	129.6	2.5	25.9	82.1	0.3	Anfang	6
19	16.07.2001	193.5	Dauerregen	34	69.7	2.0	23.7	96	0.2	Ende	2
20	10.10.1988	192.6	Schauer	8	42.9	5.4	27.0	94.2	0.4	Ende	3

8.2.4.a Hochwasserprozessstypen

Von 20 untersuchten Hochwassern der Periode 1984 bis 2009 werden neun durch Dauerregen, fünf durch Kurzregen und vier durch Schauerregen verursacht. Zwei Hochwasserereignisse sind auf den Prozessstyp Regen auf Schnee zurückzuführen (Abb. 8-35).

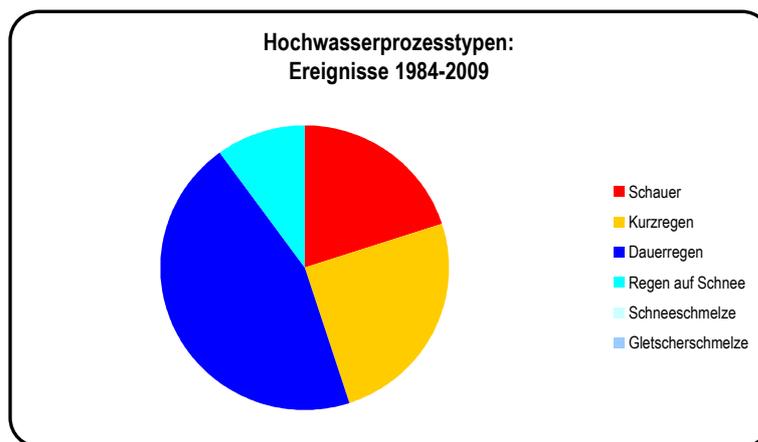


Abb. 8-35: Hochwasserprozessstypen der 20 untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe während der Messperiode 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Die Mehrheit der Hochwasser treten während der Sommermonate von Juli bis August auf. Am meisten ist der Monat Juli betroffen (Abb. 8-36). Werden anstelle der 20 grössten Hochwasser der partiellen Reihe die 70 grössten Hochwasser der Periode von 1984-2009 analysiert, verschiebt sich der Schwerpunkt der Häufigkeit des Auftretens auf die Monate Juni und Juli [AMIGUET 2010].

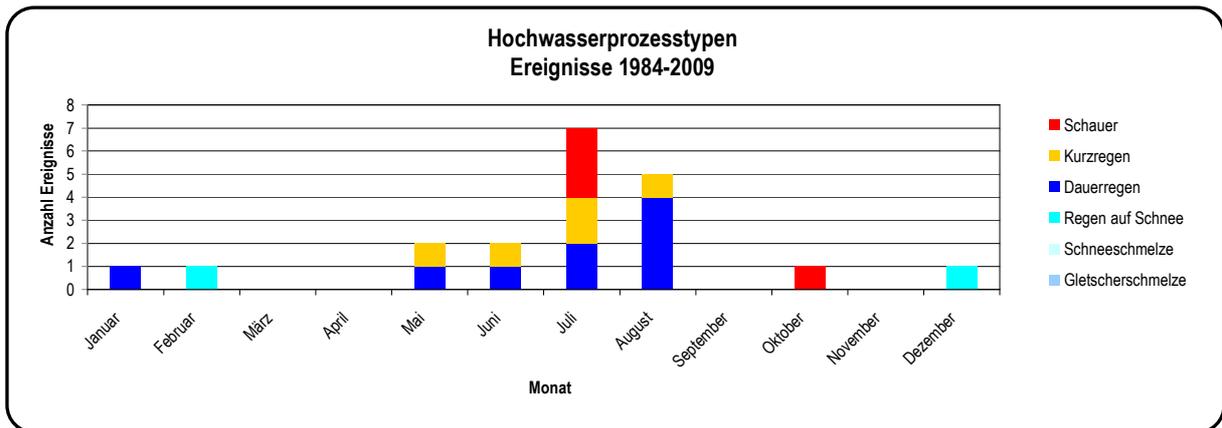


Abb. 8-36: Hochwasserprozessstypen der 20 untersuchten Ereignisse der partiellen Reihe während der Messperiode 1984-2009. Einteilung der Ereignisse nach Monaten. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

8.2.4.b Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität

Grössere Niederschlagsmengen von rund 80 bis 90 mm werden bei den Ereignissen der Hochwasserprozessstypen Dauerregenereignis und Regen auf Schnee gemessen. Kleinere Mengen von ca. 40 mm sind bei Schauern und Kurzregenereignissen zu beobachten. Hinsichtlich der Intensität sind grössere Werte bei Schauer- und Kurzregenhochwasser und kleinere bei Dauerregen- und Regen auf Schnee-Hochwassern festzustellen (Tab. 8-26).

Tab. 8-26: Mittelwerte der Niederschlagsmengen und der Niederschlagsintensität der Ereignisse während der Messperiode 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Hochwasserprozessstyp	N-Menge [mm]	N-Intensität [mm/h]
Schauer	42.9	3.6
Kurzregen	38.4	2.7
Dauerregen	92.2	2.1
Regen auf Schnee	84.2	1.7
Schneeschmelze	-	-
Gletscherschmelze	-	-
Mittelwert 1984-2009	68.1	2.5

8.2.4.c VN 21 und SSM

Der Vorregenindex ist bei Dauerregenereignissen am höchsten (32.9 mm) und bei den Regen auf Schnee-Ereignissen (19.4 mm) am kleinsten. Der Bodenfeuchtespeicher weist bei Dauerregen und bei den Regen auf Schnee-Ereignissen den höchsten Füllstand auf (Tab. 8-27). Dies trotz des tiefen Vorregenindexes der Regen-auf-Schnee Ereignisse. Dies entspricht der Charakteristik dieses Typs, da nach Merz [2002] der Boden durch vorhergehende Schmelzprozesse bereits gesättigt sein kann. In

diesem Fall ist der Boden zu Beginn der Ereignisse nicht gesättigt aber der Füllstand des Bodenfeuchtespeichers ist mit 88.3 % hoch.

Tab. 8-27: Mittelwerte der VN21 und des Füllgrades des Bodenfeuchtespeichers der Ereignisse während der Messperiode 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessstyp. Datengrundlage: Stationen Mt.-CH.

Hochwasserprozessstyp	VN21	SSM
	[mm]	[mm]
Schauer	21.9	81.7
Kurzregen	27.9	78.7
Dauerregen	32.9	88.8
Regen auf Schnee	19.4	88.3
Schneesmelze	-	-
Gletschersmelze	-	-
Mittelwert 1984-2009	28.1	84.8

8.2.4.d Summenlinie

In der Tab. 8-28 wird der Zeitpunkt des Niederschlagsintensitätsmaximums während eines Ereignisses beschrieben. Am häufigsten ist die höchste Intensität am Ende des Ereignisses (6) zu beobachten (Tab 8-29).

Tab. 8-28: Übersicht der Summenlinien-Typen der untersuchten Niederschlagsereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessstyp	Summenlinie Stationen Mt.CH
1	21.08.2005	Dauerregen	Block
2	16.07.2002	Schauer	Mitte
3	08.08.2007	Dauerregen	Mitte
4	12.06.1997	Kurzregen	Ende
5	19.07.2008	Schauer	Ende
6	02.06.2004	Dauerregen	Block
7	02.08.1996	Kurzregen	Anfang
8	13.01.2004	Dauerregen	Block
9	14.07.2008	Dauerregen	Block
10	06.08.2000	Dauerregen	Mitte
11	21.07.2007	Kurzregen	Block
12	21.07.1992	Kurzregen	Anfang
13	19.12.1987	Regen auf Schnee	Ende
14	11.08.2002	Dauerregen	Anfang/Ende
15	25.05.1990	Kurzregen	Ende
16	19.05.1994	Dauerregen	Mitte
17	04.07.2007	Kurzregen	Mitte
18	14.02.1990	Regen auf Schnee und Dauerregen	Anfang
19	16.07.2001	Dauerregen	Ende
20	10.10.1988	Schauer	Ende

Tab. 8-29: Anzahl der Ereignisse mit entsprechenden Summenlinien-Typen während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Summenlinie Messnetz	Anzahl Ereignisse
Anfang	3
Mitte	5
Ende	6
Block	5
Anfang/Ende	1

Bei je fünf Ereignissen ist die höchste Intensität in der Mitte des Ereignisses, oder sie weist einen gleichmässigen Verlauf auf (Block). Bei drei Ereignissen ist das Intensitätsmaximum gleich zu Beginn festzustellen. Das Ereignis Nr. 14 wird mit dem Summenlinientyp "Anfang/Ende" bezeichnet (siehe Kap. 8.2.3.d).

8.2.4.e Reaktionszeit

Die Reaktionszeiten werden in stündlicher Auflösung berechnet (Tab. 8-30). Der Mittelwert liegt bei über 3 h (Tab 8-31). Bei kurzen Reaktionszeiten unterhalb von 2 h ist der Vorregenindex mit 24 mm kleiner als bei Ereignissen mit Reaktionszeiten grösser als 2 h (27 mm). Der Bodenfeuchtespeicher ist bei Ereignissen mit längeren Reaktionszeiten ebenfalls voller (87 %) als bei Ereignissen mit kurzen Reaktionszeiten (82%). Wie bereits beim Datensatz "Radar Mt.CH" können grosse Niederschlagsmengen in den Tagen vor dem Ereignis und ein hoher Sättigungsgrad des Bodens zu Beginn des Ereignisses nicht als Erklärung für kurze Reaktionszeiten dienen.

Tab. 8-30: Übersicht der Reaktionszeiten der Niederschlags-Abflussereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozesstyp	Reaktionszeit [h]
1	21.08.2005	Dauerregen	7
2	16.07.2002	Schauer	2
3	08.08.2007	Dauerregen	7
4	12.06.1997	Kurzregen	4
5	19.07.2008	Schauer	2
6	02.06.2004	Dauerregen	6
7	02.08.1996	Kurzregen	0
8	13.01.2004	Dauerregen	3
9	14.07.2008	Dauerregen	4
10	06.08.2000	Dauerregen	4
11	21.07.2007	Kurzregen	1
12	21.07.1992	Schauer	1
13	19.12.1987	Regen auf Schnee	2
14	11.08.2002	Dauerregen	3
15	25.05.1990	Kurzregen	3
16	19.05.1994	Dauerregen	2
17	04.07.2007	Kurzregen	2
18	14.02.1990	Regen auf Schnee und Dauerregen	6
19	16.07.2001	Dauerregen	2
20	10.10.1988	Schauer	3

Tab. 8-31: Mittelwerte der Reaktionszeiten der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozesstyp. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Hochwasserprozesstyp	Reaktionszeit [h]
Schauer	2.0
Kurzregen	2.0
Dauerregen	4.0
Regen auf Schnee	4.0
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 1984-2009	3.2

Bei dem Ereignis, bei welchem der die Reaktionszeit 0 h beträgt, ist die grösste Niederschlagsintensität am Anfang der Ereignisdauer auszumachen (Tab. 8-27). Die starken Niederschläge zu Beginn des

Ereignisses könnten die Reaktionszeit verkürzt haben. Bei den drei Ereignissen mit Reaktionszeiten von 0 bis 1 h (Nr. 7, Nr. 11, Nr. 12) ist der Niederschlagsschwerpunkt während der ersten Stunde im Norden des EZG. Die Reaktionszeit könnte sich durch die kurzen Fliesswege zur Abflussmessstation Werthenstein verkürzt haben.

8.2.4.f Abflusskoeffizient

Im Mittel hat der Abflusskoeffizient einen Wert von 0.5 (Tab. 8-33). Der Koeffizient ist bei 2 Ereignissen grösser als 1 (Tab. 8-32). Abflusskoeffizienten mit Werten grösser als 1 bedeuten, dass der Direktabfluss höher ist, als der gefallene Niederschlag. Dieses Verhältnis kann in der Realität nicht eintreten. Erklärungen hierfür können die Unterschätzung des Niederschlags (zu grobmaschiges Messnetz, fehlerhafte Interpolation) oder die Überschätzung vom Abfluss an der Station Werthenstein sein, wobei letzteres kaum in Frage kommt. Genauso wie die Reaktionszeiten werden auch die Abflusskoeffizienten durch die subjektive Einschätzung des Niederschlags- und Abflussbeginns sowie des jeweiligen Endes beeinflusst.

Tab. 8-32: Übersicht der Abflusskoeffizienten der Niederschlag-Abflussereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Nr.	Datum	Hochwasserprozessyp	Abflusskoeffizient
1	21.08.2005	Dauerregen	0.5
2	16.07.2002	Schauer	0.5
3	08.08.2007	Dauerregen	0.3
4	12.06.1997	Kurzregen	0.3
5	19.07.2008	Schauer	1.5
6	02.06.2004	Dauerregen	0.3
7	02.08.1996	Kurzregen	0.5
8	13.01.2004	Dauerregen	0.5
9	14.07.2008	Dauerregen	0.5
10	06.08.2000	Dauerregen	0.4
11	21.07.2007	Kurzregen	0.4
12	21.07.1992	Schauer	0.3
13	19.12.1987	Regen auf Schnee	0.6
14	11.08.2002	Dauerregen	0.3
15	25.05.1990	Kurzregen	0.4
16	19.05.1994	Dauerregen	0.4
17	04.07.2007	Kurzregen	1.1
18	14.02.1990	Regen auf Schnee und Dauerregen	0.3
19	16.07.2001	Dauerregen	0.2
20	10.10.1988	Schauer	0.4

Tab. 8-33: Mittelwerte der Abflusskoeffizienten der Ereignisse der Messperiode von 1984-2009 aufgeteilt nach Hochwasserprozessypen. Datengrundlage: Stationen Mt.CH.

Hochwasserprozessyp	Abflusskoeffizient
Schauer	0.7
Kurzregen	0.5
Dauerregen	0.4
Regen auf Schnee	0.5
Schneesmelze	-
Gletschersmelze	-
Mittelwert 1984-2009	0.5

8.2.4.g Verhältnis von Spitzenabfluss & Anfangsbedingungen & Niederschlag

In den Abb. 8-37 ff. werden der Spitzenabfluss, die Anfangsbedingungen und der Niederschlag der Ereignisse während der Messperiode zwischen 1984 und 2009 dargestellt. Die Nr. 1 ist das Ereignis mit dem grössten und die Nr. 20 mit dem kleinsten Spitzenabfluss. Als Anfangsbedingung werden bei den ersten Darstellungen der Vorregenindex VN21 (Abb. 8-37 und Abb. 8-38) und bei den darauffolgenden Abbildungen (Abb. 8-39 und Abb. 8-40) der Bodenfeuchtespeicher verwendet. Für den Niederschlag werden bei den Grafiken auf der linken Seite die mittlere Ereignisintensität und bei den Grafiken auf der rechten Seite der Ereignisniederschlag aufgetragen.

VN 21 & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Der Vorregenindex schwankt zwischen 10 und 80 mm, wobei mit Ausnahme des Hochwassers von 2005 (grösster blauer Punkt) der grösste VN21 bei 45 mm liegt. Die höchsten Intensitäten treten bei den Schauerniederschlägen Nr. 2 (grösster roter Punkt) und Nr. 20 auf (Abb. 8-39).

Wird an Stelle der Intensität die Niederschlagsmenge betrachtet (Abb. 8-40), ist zu erkennen, dass bei Dauerregenereignissen mit entsprechend lang anhaltenden Niederschlägen, mehrheitlich höhere Mengen gemessen werden als bei Schauer- und Kurzniederschlägen.

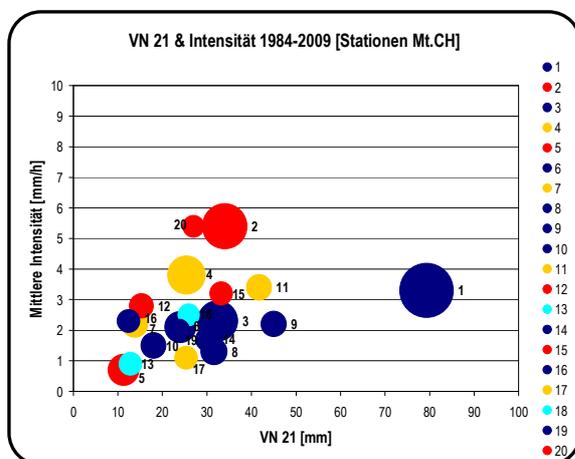


Abb. 8-37: VN21/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Stationen Mt.CH. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen, türkis für Regen auf Schnee und dunkelblau für Dauerregen steht.

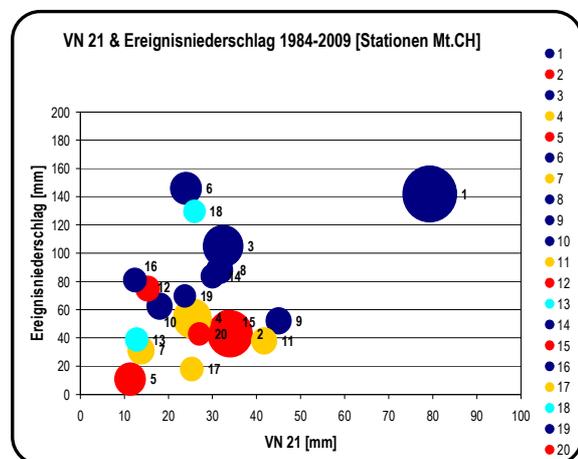


Abb. 8-38: VN21/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Datengrundlage: Mt.CH. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen, türkis für Regen auf Schnee und dunkelblau für Dauerregen steht.

SSM & Niederschlagsintensität / Niederschlagsmenge

Der Bodenspeicher im Einzugsgebiet ist zu Beginn der jeweiligen Hochwasserereignisse während der Messperiode von 1984-2009 zwischen 56 % und 97 % gefüllt (Abb. 8-39). Zu Beginn des grössten

Hochwassers ist auch der höchste Füllstand mit 97 % zu beobachten. Der Bodenfeuchtespeicher kann aber auch vor Ereignissen mit kleineren Spitzenabflüssen hohe Werte aufweisen (Nr. 19: 96 %, Nr. 8,13, 17: 95 %). Beim Ereignis Nr. 1 mit dem höchstem Spitzenabfluss ist im Unterschied zu den übrigen Ereignissen mit hohem Anfangsfüllstand des Bodenfeuchtespeichers, die mittlere Intensität und vor allem der Ereignisniederschlag erhöht (Abb. 8-40).

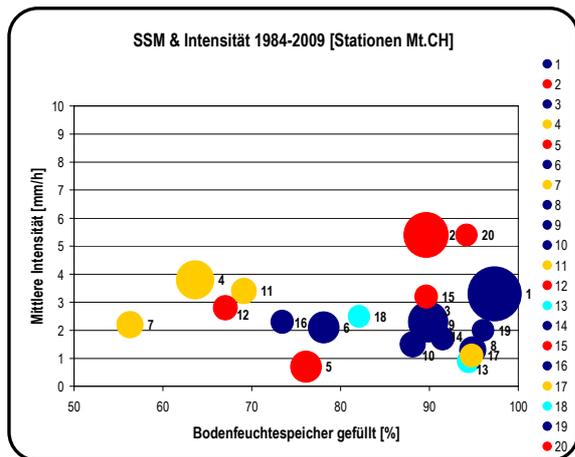


Abb. 8-39: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsintensitäts/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen, türkis für Regen auf Schnee und dunkelblau für Dauerregen steht.

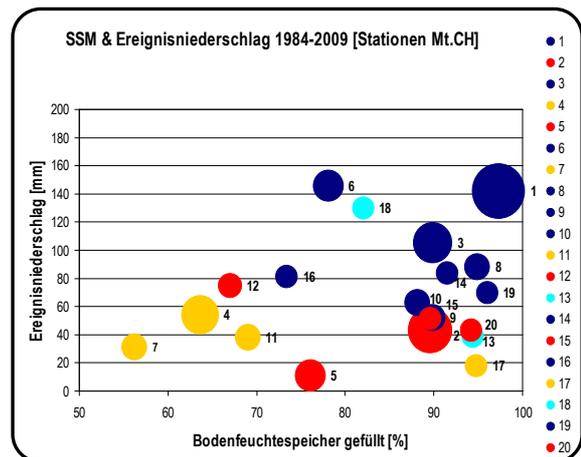


Abb. 8-40: Bodenfeuchtespeicher (SSM)/Niederschlagsmenge/Spitzenabfluss-Diagramm der Ereignisse während der Messperiode von 1984-2009. Ein Kreis steht für ein Ereignis. Je grösser, desto höher der Spitzenabfluss. Die Farben zeigen den Hochwasserprozessstyp, wobei rot für Schauer, gelb für Kurzregen, türkis für Regen auf Schnee und dunkelblau für Dauerregen steht.

9 Synthese

Die Synthese erfolgt geordnet nach Kapiteln. Zuerst werden die Erkenntnisse aus dem Vergleich der Niederschlagsmessgeräte Young und Rainwise zusammengefasst (Kap. 9.1). Im darauffolgenden Kapitel 9.2 stehen die Gebietsniederschläge auf Grundlage verschiedener Datensätzen im Mittelpunkt. In Kap. 9.3 wird auf die Niederschlagsverteilung und die Reaktion des EZG bei Hochwasserereignissen näher eingegangen. Auf Grundlage dieser Information werden Schlüsselgebiete bei Hochwasserereignissen bestimmt (Kap. 9.4). In Kap. 9.5 werden die Möglichkeit der Integration der Strassenwetterstationen in ein Hochwasserwarnsystem diskutiert und schliesslich mögliche Niederschlagsmessmethoden- und Abflussmessstandorte für ein Hochwassersystem vorgeschlagen.

9.1 Vergleichsmessung der Niederschlagsmessgeräte “Young 52202“ und “Rainwise“

Das Messgerät von Rainwise wurde innerhalb des temporären Messnetzes 2009 im EZG der Kleinen Emme zum ersten Mal vom Geografischen Institut der Universität Bern eingesetzt. Im Unterschied dazu, wurde die Niederschlagswippe von Young schon in verschiedenen Messkampagnen vom Geografischen Institut eingesetzt. Die Messungen während einer 5-monatigen Messperiode im Jahre 2004 und die entsprechenden Resultate wurden von REBER [2005] als befriedigend eingestuft. Somit werden die Messungen der Young-Niederschlagswippe als Referenzwerte verwendet.

Die dynamischen Tests mit je drei Geräten im Labor ergeben für die Young-Wippen eine mittlere Genauigkeit von 97 % in der Mengenmessung. Die Genauigkeit der Rainwise-Wippen liegen unter Laborbedingungen bei 91 % und somit 6 % unterhalb der Messwerte der Young-Wippe. Die Messwerte der Vergleichsmessungen an zwei Standorten im EZG ergeben zwischen den beiden Gerätetypen Korrelationskoeffizienten von 0.53 beim 5 min-Intervall, 0.87 beim 1 h-Intervall und 0.99 beim 1 d-Intervall. Der Faktor der absoluten Mengenmessung in täglicher Auflösung ist bei den beiden Standorten sehr unterschiedlich. Der Median des Faktors beträgt bei den Stationen C & P 1.58 und bei den Stationen D & Q 0.95 (1 d-Intervall). Dies bedeutet, dass die Rainwise-Wippen (Station P) 64 % bzw. (Station Q) 105 % des von den Young-Wippen gemessenen Niederschlag aufzeichnen. Durch die unterschiedlichen Faktoren an den Standorten lässt sich keine Korrektur der Messwerte der Rainwise-Stationen vornehmen. Verschiedene Schwachstellen beim Gerätedesign (siehe Kap. 6.3.2), die tiefe Korrelation bei 5 minütlichen Daten und die grossen Unterschiede der täglichen Niederschlagssummen an den beiden Vergleichsstandorten, sind die Hauptgründe, weshalb die Rainwise-Regenmessgeräte für zukünftige Niederschlagsmesskampagnen nicht empfohlen werden. Es wird zusätzlich darauf hin-

gewiesen, dass Vergleichsmessungen mit einer grösseren Stichprobenzahl zusätzliche Informationen zur Messgenauigkeit liefern könnten.

Bei den bewährten Niederschlagsmessgeräten von Young mussten mehrere Datenausfälle durch Störungen hingenommen werden, die nur bei der Regenmessung mit Niederschlagswippen auftreten können [VGL. SEVRUK 2005]. Es wurden bei diversen Messgeräten Verstopfungen durch Insekten, Vogelkot und kleinere Pflanzenreste festgestellt. Um solche Messausfälle bei zukünftigen Kampagnen zu vermeiden, könnten anstelle von Niederschlagswippen Niederschlagswaagen eingesetzt werden. Diese haben keinen Trichterauslass und es besteht somit keine Gefahr von Verstopfung. Die MeteoSchweiz, die ebenfalls Niederschlagswippen (Lambrecht 15188 + Lambrecht 1518 H3) zur zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsmessung einsetzt, testet zur Zeit Niederschlagswaagen vom Typ "Ott Pluvio". Diese können im Vergleich zu den heute verwendeten Lambrecht-Wippen, die im Winter beheizt werden müssen, auch im Winter und ohne Heizung betrieben werden. Aus diesem Grund reicht bei "Ott Pluvio" die Energieversorgung mit einem Solarpanel [FELIX & CALPINI 2010]. Die "Ott Pluvio"-Geräte werden seit rund 10 Jahren für das Niederschlagsmessnetz im Kanton Luzern eingesetzt. Die Geräte erhalten sehr gute Bewertungen bei den Vergleichsmessungen der WMO, die während dem Zeitraum von 2007 bis 2009 stattfanden [vgl. WMO 2009]. Bei den dynamischen Tests im Labor wie auch bei den Feldversuchen (minütliche Regenintensität) erreicht das Niederschlagsmessgerät fünf von fünf möglichen Punkten. Im Gegensatz dazu erhielt das Modell von Lambrecht (Modell 15188), bei den Laborversuchen zwei und bei den Feldversuchen drei Punkte [WMO 2009].

9.2 Gebietsniederschläge mit unterschiedlicher Datengrundlage

Die Frage, welche Unterschiede die Gebietsniederschläge der drei verwendeten Datensätze ("Stationen Mt.CH", "Messnetz 2009", "Radar Mt.CH") aufweisen und ob die Verdichtung des Messnetzes im Sommer 2009 und der Datensatz "Radar Mt.CH" einen Mehrwert liefern, soll im Folgenden geklärt werden.

9.2.1 Sommer 2009

Datensätze "Messnetz 2009" und "Stationen Mt.CH"

Mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" wird von 26.06.2009 bis am 12.10.2009 74 % des Gebietsniederschlags des Datensatzes "Messnetz 2009" erfasst. Der Niederschlag fällt bei der Interpolation der MeteoSchweiz-Bodenmessstationen gleichmässiger über dem EZG. Deshalb ist die Spannweite

der Niederschlagsmenge (Min.: 413 mm, Max.: 459 mm) im EZG kleiner als bei der Messung mit dem temporären Messnetz (Min.: 388 mm, Max.: 638). Die höchsten Niederschläge im Datensatz "Stationen Mt.CH" werden im Bereich der Niederschlagsstation Napf geschätzt, welche einen grossen Einfluss auf die Berechnung des Gebietsniederschlags zu haben scheint. Die grössten Unterschiede treten im TEZG Rotbach auf, wo mit dem Datensatz "Messnetz 2009" bis zu 179 mm mehr Niederschlag geschätzt werden. Eine hohe Überschätzung des Niederschlags mit dem temporären Messnetz ist unwahrscheinlich, weil die beim Messnetz 2009 mehrheitlich eingesetzten Rainwise-Geräte bei den Vergleichsmessungen bei einem Standort eine Überschätzung von 5% und beim anderen Vergleichsstandort eine Unterschätzung von 36 % aufweisen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass der mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" berechnete Gebietsniederschlag während der Messperiode im Sommer 2009 den tatsächlichen Niederschlag unterschätzt.

Der Abflusskoeffizient ist bei den zwölf untersuchten Ereignissen mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" 56 % höher als beim Datensatz "Messnetz 2009". Beim Datensatz "Messnetz 2009" ist der Abflusskoeffizient bei keinem Ereignis gleich oder grösser 1 und beim Datensatz "Stationen Mt.CH" ist dies bei einem Ereignis der Fall. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass der Datensatz "Messnetz 2009" den wirklichen Niederschlag weniger stark unterschätzt als der Datensatz "Mt.CH".

Durch die höhere Dichte des Messnetzes im Sommer 2009 kann zudem die räumliche Variabilität des Niederschlags im Einzugsgebiet detailreich erfasst werden. Auf der Grundlage der Interpolation des Gebietsniederschlags anhand der MeteoSchweiz-Bodenmessstationen können während der Messperiode innerhalb des Einzugsgebietes kaum räumliche Differenzierungen der Niederschlagsmenge festgestellt werden.

Station Napf und Schüpheim

Die nächstgelegene Niederschlagsmessstation der MeteoSchweiz (Napf) und die einzige Station mit zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten innerhalb des Einzugsgebietes (Schüpheim) messen während der Periode von 26.06.2009 bis 12.10.2009 95% bzw. 100.5 % des Gebietsniederschlags der im Einzugsgebiet gefallen ist. Werden nur kurze Zeitintervalle (1 h) berücksichtigt sind die Daten der beiden Punktmessungen im Vergleich zu den Gebietsniederschlägen des ganzen EZG während der Messperiode weniger repräsentativ. Dies lässt sich anhand des Korrelationskoeffizienten erkennen, der beim Napf 0.66 und bei der Station Schüpheim 0.61 beträgt.

9.2.2 1992-2006

Datensätze "Radar Mt.CH" und "Stationen Mt.CH"

Während den elf untersuchten Ereignissen zwischen 1992 und 2006 wird im Einzugsgebiet mit dem Datensatz "Stationen Mt.CH" 88% der Niederschlagsmenge geschätzt, die mit dem Datensatz "Radar Mt.CH" berechnet wird. Der Niederschlag des Datensatzes "Stationen Mt.CH" ist wie schon während der Messperiode im Sommer 2009 beinahe gleichmässig über das Einzugsgebiet verteilt (Min.: 797 mm, Max.: 951 mm). Die Spannweite ist beim Datensatz "Radar Mt.CH" grösser (Max.: 1276 mm, Min.: 766) und die räumliche Variabilität ist höher. Die grössten Unterschätzungen im Vergleich zum "Radar Mt.CH"-Datensatz treten in den höhergelegenen Gebieten auf. Diese treten auf, weil beim Datensatz "Stationen Mt.CH" mehrheitlich Niederschlagsmessungen von Stationen in Tallagen interpoliert werden und im Datensatz "Radar Mt.CH" darüberhinaus auch niederschlagsklimatologische Informationen enthalten sind.

Der Abflusskoeffizient liegt im Mittel beim Datensatz "Stationen Mt.CH" um 15 % höher als beim Datensatz "Radar Mt.CH". Der Mittelwert des Koeffizienten liegt beim Datensatz "Radar Mt.CH" bei 0.28 und beim Datensatz "Stationen Mt.CH" bei 0.34. Bei sechs Ereignissen wird der Abflusskoeffizient mit dem Datensatz "Radar Mt.CH" höher geschätzt als mit dem Datensatz „Stationen Mt.CH“. Bei 5 Ereignissen wurde der identische Abflusskoeffizient berechnet.

9.3 Niederschlagsverteilung und Reaktion des Einzugsgebietes bei Hochwasserereignissen

Bei den 20 untersuchten Hochwasserereignissen der partiellen Serie von 1984-2009 handelt es sich zu 45 % um Dauerregen-, zu 25 % um Kurzregen, zu 20 % um Schauerregen- und zu 10 % um Schnee auf Regen-Hochwasser. Von den zwölf Abflussereignissen im Sommer 2009 sind zehn als Schauerereignisse, eines als Kurzregenereignis und eines als Dauerregenereignis klassifiziert. Das Dauerregenereignis vom 17.07.2009 ist das einzige Abflussereignis mit einer Wiederkehrperiode grösser als ein Jahr, welches während der Messperiode des temporären Messnetzes auftrat. Die Dauerregenereignisse weisen bei allen drei Datensätzen relativ zu Schauerregenereignissen im Mittel grössere Niederschlagsmengen und tiefere Niederschlagsintensitäten auf. Der Vorregenindex und der Füllgrad des Bodenfeuchtespeichers ist im Mittel beim Dauerregen, dem häufigsten auftretendem Hochwasserprozesstyp, bei allen Datensätzen höher als bei Schauerregenereignissen. Der Vorregenindex und der Füllgrad des Bodenfeuchtespeichers zu Beginn von Dauerregenereignissen ist mit Aus-

nahme des Vorregenindizes beim Datensatz "Messnetz 2009" ebenfalls höher als die Werte bei Kurzregenereignissen. Der höher gefüllte Bodenfeuchtespeicher und der erhöhte VN21 können bei den Ereignissen zu Anfangsbedingungen führen, bei welchen weniger Wasser zurückgehalten werden kann und der Niederschlag schneller zum Abfluss gelangt. Bei Dauerregen handelt es sich um lang andauernde zyklonale oder orographische Niederschläge während Tagen oder Wochen, die zum Teil vor dem eigentlichen Ereignisniederschlag gefallen sind. Dieser vor dem eigentlichen Ereignis gefallene Regen erhöht insbesondere bei den Dauerregenereignissen den Vorregenindex und den Füllgrad des Bodenfeuchtespeichers zu Ereignisbeginn.

Auf Grundlage der Datensätze "Radar Mt.CH" und "Stationen Mt.CH" wurden verschiedene Kenngrößen der Niederschlagsereignisse nach TEZG berechnet und teilweise rangiert. Bei beiden Datensätzen kann eine Zweiteilung des EZG beobachtet werden. Das Auftreten der grössten Niederschlagsmengen, der grössten Vorregenindizes, der kleinsten Bodenfeuchtespeicherkapazitäten (Ränge 1-4) und grossteils das Auftreten der maximalen Niederschlagsintensitäten während den Ereignissen beschränken sich auf die höhergelegenen Regionen östlich und südlich der TEZG Wiss Emme, Schüpheim und Entle. Die kleinsten Niederschlagsmengen, Vorregenindizes und die grössten Bodenfeuchtespeicherkapazitäten (Ränge 11-14) und in den meisten Fällen das "nicht Auftreten" der maximalen Intensität sind ausschliesslich auf Gebiete nordwestlich der TEZG Hohwäldlibach, Steimbach und kleine Entle begrenzt.

Um den Einfluss der physisch-geografischen Charakteristiken (Topografie, Bodentyp, Landnutzung) der TEZG auf das Abflussverhalten zu berücksichtigen, wird die Modellierung des Abflusses mit PREVAH für die TEZG miteinbezogen. Die *Abb. 9-1* zeigt die maximalen spezifischen Abflüsse³⁷ der TEZG.

Als Eingangsgrösse wird der stündliche Niederschlag des Datensatzes "Stationen Mt.CH" von 1984 bis 2008 verwendet. Der Niederschlag fällt bei dieser Modellierung räumlich homogen auf das EZG und somit zeigt die Karte den Einfluss der physischen Charakteristiken der TEZG mittels des spezifischen Abflusses.

³⁷ Der spezifische Abfluss wird definiert als Abfluss am Gebietsauslass auf die Fläche des Einzugsgebietes aufgeteilt [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$] [Amiguet 2010]. Der maximale spezifische Abfluss beschreibt das Maximum (1h Intervall) des spezifischen Abflusses, das in einem TEZG während der Messperiode 1984-2008 aufgetreten ist. Grundlage: "Stationen Mt.CH" - räumlich homogene Niederschlagsverteilung.

Die Einteilung der TEZG „Abfluss“ (Abb. 9-1) entsprechen nicht exakt der Einteilung der TEZG „Niederschlag“³⁸ (Abb. 8-28). Die Gebietseinteilung wurde beim Abfluss anhand der Abflussstationen und beim Niederschlag mittels topografischer Teileinzugsgebiete vorgenommen.

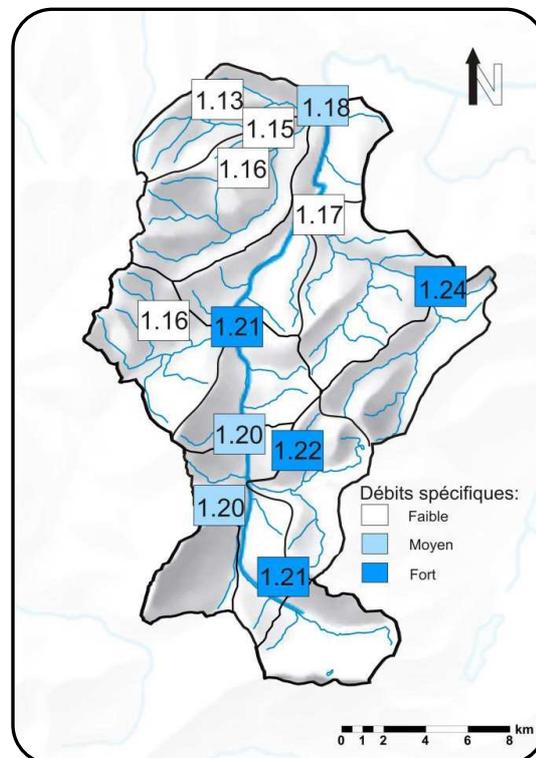


Abb. 9-1: Maximal spezifischer Abfluss [$m^3/s \cdot km^2$] von TEZG zwischen 1984-2008. Homogene Niederschlagsverteilung. Datensatz: "Stationen Mt.CH". [AMIGUET 2010].

Um die Teilaspekte des Niederschlags und des Abflusses zusammenzuführen, werden die TEZG anhand der Höhe des maximalen spezifischen Abflusses rangiert³⁹ und mit der Rangierung der Niederschlagsmengen vereint⁴⁰. Die Resultate der Rangierung mit Niederschlagsmengen der Ereignisse vom Sommer 2009 und der untersuchten Hochwasserereignisse 1992-2006 sind in Abb. 9-2 und Abb. 9-3 dargestellt. Ein tiefer Rang steht für ein TEZG mit einem hohen maximalen spezifischen Abfluss, welches im Mittel aller untersuchten Ereignisse hohe Niederschlagsmengen aufweist. Die TEZG mit den Rängen 1 bis 7 befinden sich bei den untersuchten Ereignissen im Sommer 2009 und zwischen 1992 und 2006 ausnahmslos in den höheren Gebieten südöstlich der TEZG Wiss Emme

³⁸ Die Einteilung der TEZG „Abfluss“ umfasst 12 TEZG und die Einteilung der TEZG „Niederschlag“ umfasst 14 TEZG.

³⁹ Die Teileinzugsgebiete des maximalen spezifischen Abflusses sind nicht identisch mit den Teileinzugsgebieten der Niederschlagsuntersuchungen. Die Synthesekarten (Abb. 9-2 und 9-3) sind anhand der Teileinzugsgebiete der Niederschlagsuntersuchungen erarbeitet worden. Bei fehlendem Wert des spezifischen Abflusses eines Teileinzugsgebietes, wird anstelle dessen, der nächstgelegene Wert in Fliessrichtung des Oberflächengewässers verwendet. Die TEZG werden danach von 1-14 rangiert. Die Nr. 1 entspricht dem höchsten Abflussbeiwert.

⁴⁰ Die beiden Ränge eines TEZG werden addiert. Die aufsummierten Ränge aller TEZG werden anschliessend nochmals rangiert. Der tiefsten Zahl wird Rang 1 zugeteilt.

Schüpfheim und Entle. Die TEZG mit Rängen 10 bis 14 liegen ebenfalls während beiden Untersuchungsperioden ohne Ausnahme in den Regionen nordwestlich der TEZG Hohwäldlibach, Steini- bach und Kleine Entle.

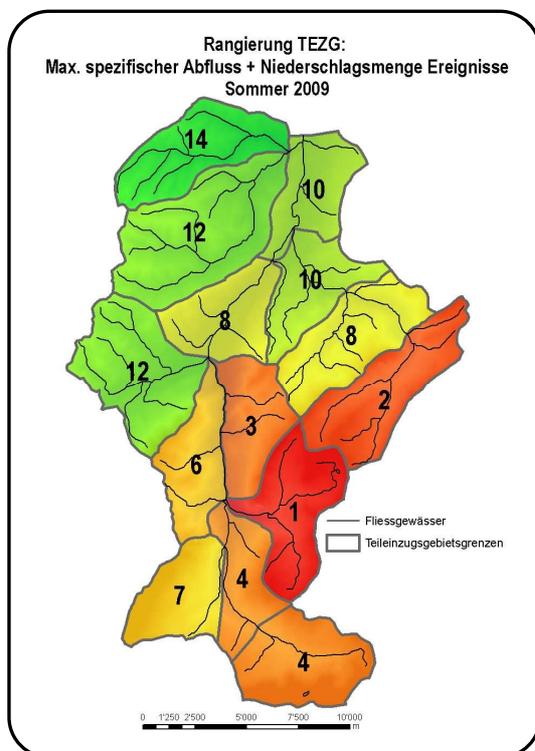


Abb. 9-2: Rangierung des maximalen spezifischen Abflusses von 1984-2008 und der Niederschlagsmengen der Ereignisse im Sommer 2009. Datengrundlage: Datensatz Messnetz 2009.

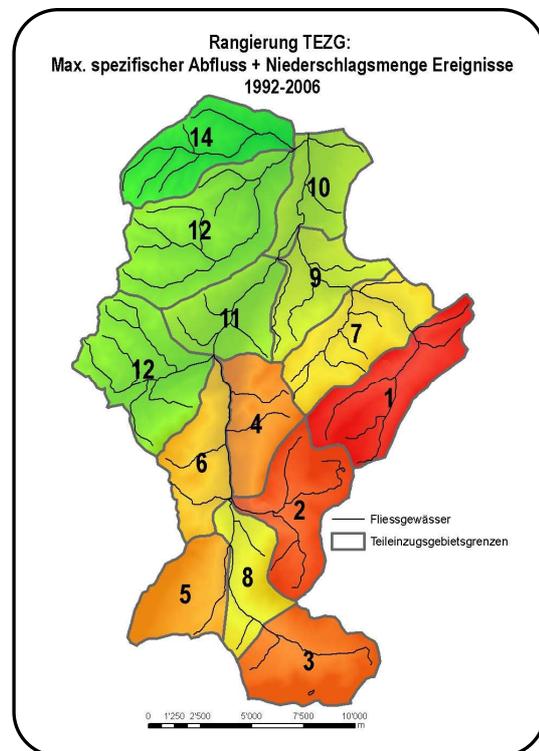


Abb. 9-3: Rangierung des maximalen spezifischen Abflusses von 1984-2008 und der Niederschlagsmengen der untersuchten Ereignisse von 1992-2006. Datengrundlage: Radar Mt.CH.

9.4 Schlüsselgebiete bei Hochwasserereignissen

Zur Identifikation der Schlüsselgebiete wird der Rangierung in Abb. 9-2, gemessen mit dem Datensatz "Radar Mt.CH", mehr Gewicht als der Rangierung in Abb. 9-3 eingeräumt, da während des Sommers 2009 mit dem Datensatz "Messnetz 2009" von zwölf Ereignissen nur bei einem Ereignis ein Abfluss mit einer Wiederkehrperiode von grösser als einem Jahr beobachtet wurde, währenddem in der Periode 1992 bis 2006 11 der 20 grössten Hochwasser der Periode 1984 bis 2009 miteinbezogen wurden und zusätzlich eine räumliche Differenzierung der Niederschläge beobachtet werden kann.

Die Schlüsselgebiete werden in Kategorien eingeteilt. Dies beinhaltet eine Abstufung von drei Kategorien mit je zwei Einzugsgebieten (Abb. 9-4).

Die TEZG Rotbach und Grosse Entle, die bei den Niederschlagsereignissen der Messperiode von 1992 bis 2006 und der Messperiode im Sommer 2009 die ersten beiden Ränge belegen, können als Schlüsselgebiete der ersten Klasse bei Hochwasserereignissen bezeichnet werden. Die TEZG Sören-

berg und Steinibach, welche die Ränge 3 und 4 belegen, können als Schlüsselgebiete der zweiten Klasse eingestuft werden. Als Schlüsselgebiete der dritten Klasse werden die TEZG Südgraben und Hohwäldlibach mit den Rangierung auf Platz 5 und 6 (1992-2006) sowie 6 und 7 eingestuft (Sommer 2009). Mit dieser Auswahl der Schlüsselgebiete sind mit Ausnahme des TEZG Längehohwald alle TEZG bei den Schlüsseinzugsgebieten vertreten, die bei Ereignissen während der Messperiode 1992-2009 maximale Intensitäten aufweisen (Abb 8-29).

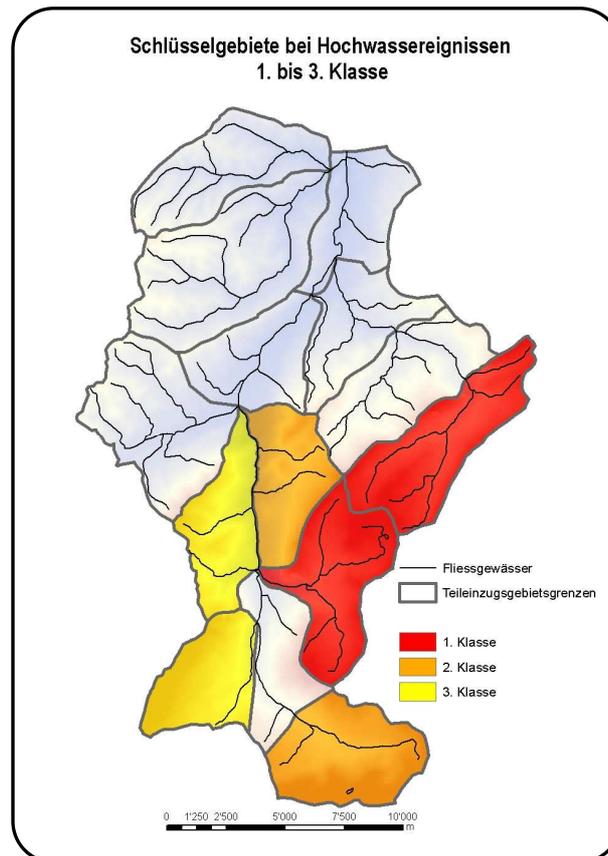


Abb. 9-4: Schlüsselgebiete bei Hochwassereignissen. 1. bis 3. Klasse.

9.5 Hochwasserwarnsystem Kleine Emme

Die Resultate der Untersuchungen sollen als Grundlage für die Hochwasserwarnung mittels Echtzeitmessung von Niederschlag und Abfluss dienen. In den folgenden Abschnitten, wird erläutert, ob die Daten der Strassenwetterstationen die Güte aufweisen, um in ein Hochwasserwarnsystem integriert zu werden und welche Art der Niederschlagsmessung einen Mehrwert zur Hochwasserwarnung liefern könnte.

9.5.1 Strassenwetterstationen

An acht Standorten im EZG wird mit dem Niederschlagsmessgerät PWD11-Vaisala, welches Bestandteil einiger Strassenwetterstationen des Kantons Luzern ist, die Niederschlagsintensität [mm/h] und die Niederschlagsmenge [mm] detektiert. Da eine Echtzeitdatenlieferung bereits aufgebaut ist und acht Stationen über das Untersuchungsgebiet verteilt sind, ist zu prüfen, ob die Genauigkeit der Niederschlagsmessungen ausreicht, um diese Stationen in ein Hochwasserwarnsystem zu integrieren.

Während rund zwei Monaten (21.3.2010 bis 21.5.2010) wurden Vergleichsmessungen mit Young-Niederschlagswippen an zwei Strassenwetterstationen durchgeführt.

Die 15 minütlichen Niederschlagsmengen der PWD11-Messgeräte mussten anhand der Datenlage mit Hilfe von Mittelwerten der Niederschlagsintensitäten berechnet werden. Die Resultate des Vergleichs der 15 min-Daten sind somit mit starken Einschränkungen behaftet und werden nicht mit in die Auswertung einbezogen. Die täglichen Vergleichsmessungen ergeben eine genügende Datenlage, um die Messgeräte für die Integration in ein Hochwasserwarnsystem zu prüfen. Die Messwerte der Vergleichsmessungen für tägliche Niederschlagsmengen ergaben Korrelationskoeffizienten von 0.8 (Schwanderholzstutz) und 0.88 (Zinggen), was auf eine starke lineare Beziehung hindeutet. Der Korrelationskoeffizient gibt aber keinen Hinweis auf die absolute Genauigkeit der Niederschlagsmengen. Mit den PWD11-Messgeräten werden die täglichen Niederschlagsmengen im Mittel und relativ zu den Young-Wippen um 69.7 % und 59.2 % unterschätzt.

Die Neuauflage der PWD11-Messgeräte, der PWD22, wurde bei Testmessungen der WMO untersucht. Labormessungen können anhand des optoelektrischen Messprinzips nicht vorgenommen werden. Die Genauigkeit der Messungen des Niederschlags in minütlicher Auflösung in Vigna di Valle in Italien wird mit zwei von fünf möglichen Punkten beurteilt. Die gemessenen Niederschlagsmengen wurden bei diesem Versuch vom PWD22 unterschätzt [WMO 2009].

Die Strassenwetterstationen können durchaus nützliche Informationen zur Art des Niederschlags und des Strassenzustands liefern und dem Strasseninspektorat die effiziente Organisation des Winterdienstes ermöglichen. Die Güte der quantitativen Regenmessung ist für eine Integration in ein Hochwasserwarnsystem jedoch ungenügend. Obwohl die Messinfrastruktur und die Datenübertragung besteht, wird auf Grund der grossen Unterschätzung der täglichen Niederschlagsmengen von einer Modellierung oder Warnung auf Grundlage der Niederschlagsmessungen der Strassenwetterstationen abgeraten.

9.5.2 Niederschlags- und Abflussmessung bei einem Hochwasserwarnsystem

9.5.2.a Abflussmessung

Obwohl sich die vorliegende Arbeit hauptsächlich mit der Analyse von Niederschlagsdaten befasst, werden im Folgenden anhand der Auswahl der Schlüsselgebiete Standorte für die Abflussmessung vorgeschlagen. Die Schlüsseleinzugsgebiete sollten bei der Standortwahl der Abflussmessstationen für ein Hochwasserwarnsystem berücksichtigt werden. In der folgenden Auflistung werden die sechs Schlüsseleinzugsgebiete, die wichtigsten Oberflächengewässer und mögliche Standorte zur Abflussmessung präsentiert. Zudem wird erwähnt, ob an diesem Standort bereits eine Abflussstation besteht, die in ein Hochwasserwarnsystem miteinbezogen werden könnte und welche Institution die entsprechende Station betreibt. Bei einem Hochwasserwarnsystem können Abflussmessstationen des temporären Messnetzes von 2009 und 2010⁴¹ miteinbezogen werden. Die Standorte der bestehenden Abflussmessstandorte, die in ein Hochwasserwarnsystem integriert werden könnten, sind in *Abb. 9-5* ersichtlich.

Schlüsselgebiete 1. Klasse:

TEZG Grosse Entle: Abflussmessung an der Grossen Entle bei Stillaub [GIUB3]. (bestehend/GIUB)

TEZG Rotbach: Keine Abflussmessstation vorhanden. Abflussmessung direkt beim Rotbach auf Grund des grossen Geschiebetransports und des instabilen Flussbetts nicht möglich [Amiguet 2010]. Abflussmessung nach der Einmündung des Rotbachs in die Waldemme bei Spierbärgli [CKW]. (bestehend/CKW).

Schlüsselgebiete 2. Klasse:

TEZG Sörenberg: Abflussmessung an der Waldemme bei Sörenberg [LU14]. (bestehend/ Kanton LU)

TEZG Steinibach: Keine Abflussmessstation am Steinibach und Staubbach vorhanden. Evtl. Abflussmessung an der Kleinen Emme in Schöpfheim [GIUB2]. (bestehend / GIUB)

⁴¹ Im Sommer & Herbst 2010 wird das temporäre Messnetz im Einzugsgebiet der Kleinen Emme bis Werthenstein während einer 2. Messperiode betrieben. Das Messnetz beinhaltet alle bereits 2009 verwendeten Abflussmessstationen und die Niederschlagsstationen A-E.

Schlüsselgebiete 3. Klasse:

TEZG Südelgraben: Abflussmessung am Südelgraben bei Hirseggrügg [GIUB1] (bestehend/GIUB)

TEZG Hohwäldlibach: Keine Abflussmessstation am Hohwäldlibach und Hellschwandbach vorhanden.
Evtl. Abflussmessung (Hohwäldlibach) nach der Einmündung in die Waldemme bei Spierbärgli [CKW]. (bestehend/CKW). Evtl. Abflussmessung (Hellschwandbach) an der Kleinen Emme in Schüpfheim [GIUB2].

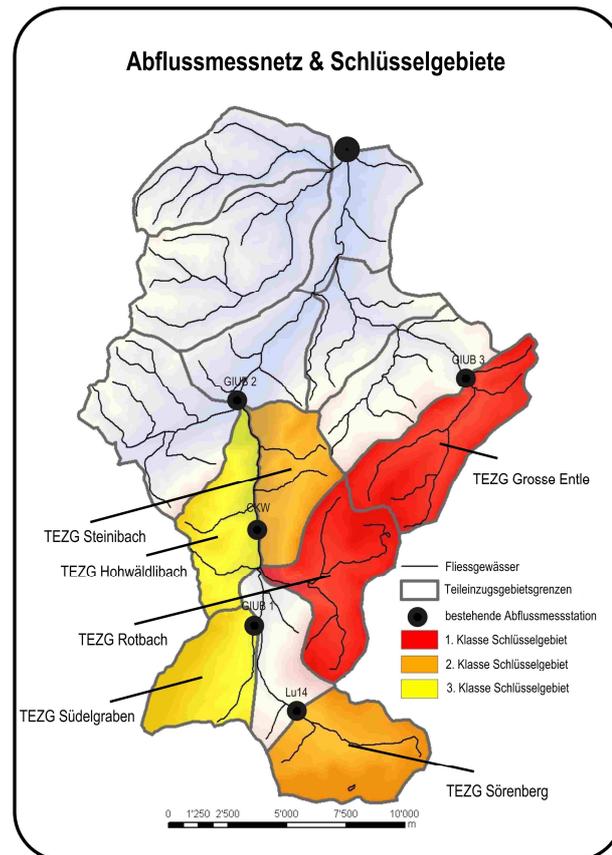


Abb. 9-5: Schlüsselgebiete und bestehende Abflussstationen im EZG.

Mit den erwähnten Abflussmessstationen können die Abflüsse der Schlüsseleinzugsgebiete direkt am Gebietsauslass oder nach der Einmündung in die Waldemme oder in die Kleinen Emme gemessen werden. Die mittleren Laufzeiten zwischen den 5 Abflussmessstationen im Einzugsgebiet bis zur Abflussmessstation in Werthenstein betragen bei Ereignissen im Sommer 2009 zwischen 59 und 101 Minuten [Amiguet 2010]. Diese Zeitspanne erscheint für eine Hochwasserwarnung für die Station Werthenstein ausreichend.

9.5.2.b Niederschlagsmessung

Bei einem Messsystem zur Hochwasserwarnung im EZG der Kleinen Emme besteht nicht wie beim temporären Messnetz 2009 die Möglichkeit 17 zusätzliche Niederschlagsmessstationen zu installieren. Das Messnetz müsste auf wenige Stationen reduziert werden. Wie die stündlich aufsummierten Darstellungen des Gebietsniederschlags der Ereignisse von 2009 zeigen, ist die Niederschlagsverteilung im EZG einer grossen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterworfen (siehe Anhang). Mit Punktmessungen können jedoch nur eingeschränkte Informationen zur räumlichen und zeitlichen Verteilung des Niederschlags im ganzen EZG und der TEZG erhoben werden. Da die räumliche Repräsentativität von Punktmessungen in bergigen Gebieten gering ist, wird der Messfehler mit abnehmender Dichte des Messnetzes zunehmen. Trotz Unsicherheiten in der Schätzung der absoluten Niederschlagsmengen bei der Niederschlagsmessung mit Radar wird deshalb empfohlen, den Gebietsniederschlag anhand von Radarmessungen zu berechnen. Die Radardaten haben den Vorteil, dass sie in sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verfügbar sind [BEZZOLA & HEGG 2008]. Die Radarmessung hat ebenfalls den Vorteil, dass die Richtung und Geschwindigkeit der Niederschlagsfelder im überregionalen Bereich geschätzt werden können und womit auch ein Nowcasting⁴² zur Dauer und Intensität der Niederschläge in naher Zukunft ermöglicht wird.

⁴² „Unter Nowcasting versteht man heute häufig eine detaillierte Erfassung der augenblicklichen Wettersituation kombiniert mit einer räumlich-zeitlich möglichst exakten Beschreibung der Entwicklung der nächsten 0 - 6 Stunden“ [Deutscher Wetterdienst].

10 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Schlussfolgerung bezieht sich auf eine mögliche Umsetzung eines Hochwasserwarnsystems im oberen Einzugsgebietsteil der Kleinen Emme bis zur Abflussmessstelle in Werthenstein.

Je grösser die Anzahl der Niederschlagsstationen im EZG, desto genauere Informationen zur räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung liegen vor. Eine Kosten-Nutzen Analyse der einzelnen Stationen müsste anhand einer längeren Messperiode durchgeführt werden.

Wenn das Niederschlagsmessnetz verdichtet werden sollte, ist der Wahl der Niederschlagsmessgeräte grosse Beachtung zu schenken. Die günstigen Rainwise-Regenwippen liefern ungenaue Messresultate und können nicht für zukünftige Messkampagnen empfohlen werden. Die wartungsarmen optoelektrischen Messsensoren (Vaisala PWD11) der Strassenwetterstationen liefern ebenfalls keine adequate Niederschlagsmessungen für eine Hochwasserwarnung. Die zufriedenstellenden Messungen mit der Niederschlagswippe Young 52202 werden von häufigen Ausfällen durch Verstopfung überschattet. Auf Grund der obengenannten Messfehler wird empfohlen, Niederschlagswaagen anstelle von Niederschlagswippen einzusetzen. Beim bestehenden Niederschlagsmessnetz des Kantons Luzern werden bereits Niederschlagswaagen (Ott Pluvio) eingesetzt. Das Know-How der Betreuung der Stationen und unterstützende Softwareelemente wären vorhanden. Zudem weisen die Niederschlagswaagen Ott Pluvio bei Testmessungen der WMO im Gegensatz zu optoelektrischen Sensoren (Vaisala PWD22) und Niederschlagswippen (Lambrecht 15188) hohe Messgenauigkeiten unter Laborbedingungen und im Feldeinsatz auf (Kap. 9.1 und 9.5.1).

Bei den Schlüsselgebieten im südöstlichen Einzugsgebietsteil ist eine Hochwasserwarnung anhand von Abflussmessungen gegenüber von Niederschlagsmessungen zu präferieren (Kap. 9.5.2). Die Abflussmessungen haben den Vorteil, dass sie als "Integral" des Niederschlags eines bemessenen Gebiet betrachtet werden können.⁴³ Die Niederschläge können im Gegensatz dazu nur punktuell gemessen werden.

Im übrigen Einzugsgebietsteil im Norden soll die Niederschlagsmessung mit Radar, trotz hoher Ungenauigkeiten in der Messung der absoluten Niederschlagsmengen, in ein Hochwasserwarnsystem miteinbezogen werden (Kap. 9.5.2.b).

Die Resultate der vorliegenden Arbeit können als Zwischenergebnis eines andauernden Forschungsprozesses angesehen werden. Das Niederschlags- und Abflussmessnetz wird im Jahre 2010 in

⁴³ Wasserbilanz: Niederschlag (N) = Abfluss (A) + Verdunstung (V) ± Speicheränderung (ΔS)

reduzierter Form vom Masterstudenten Ulrich Schneider weiter betrieben. Er wird anhand der zusätzlich gewonnenen Daten die Niederschlags-Abfluss-Beziehung mit einem Modell herleiten.

Zur Validierung der Niederschlagsmessung mit Radar und zur Untersuchung, ob die Messungen mit dem Radarmessnetz im EZG der Kleinen Emme grosse Differenzen der absoluten Niederschlagsmengen im Vergleich zu einem interpolierten Gebietsniederschlags eines Bodenmessnetznetzes aufweisen, könnte eine Vergleichsstudie im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt werden.

Zudem wäre es wünschenswert, wenn der kombinierte Niederschlags-Datensatz "Radar Mt.CH" der für den Zeitraum von 1992 bis 2006 besteht, von MeteoSchweiz weitergeführt würde.

11 Literaturverzeichnis

11.1 Zitierte Literatur

AMIGUET C. (2010): Densification du réseau hydrométrique dans le bassin-versant de la Kleine Emme et étude de la réaction du débit de crue. Eléments de base pour un futur projet de système d'alarme de crues. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

ATLAS DER SCHWEIZ 2.0 (2004): Wetter & Klima. Niederschlag, Temperatur, Gewitter. Institut für Kartographie ETH Zürich. Zürich.

BAUMANN W. (2010): Hochwasserschutz und Renaturierung Kleine Emme: Öffentliche Planaufgabe: http://www.presseportal.ch/fr/pm/100000205/100605947/staatskanzlei_luzern. Zugriff: 25.08.2010.

BAUMGARTNER A. & LIEBSCHER H.-J. (1990): Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. Lehrbuch Band 1. Gebrüder Borntraeger. Berlin, Stuttgart.

BEZZOLA G.R. & HEGG C. (EDS.) (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. BAFU. Bern.

BEZZOLA G.R. & HEGG C. (EDS.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. BAFU. Bern.

BLÜTHGEN J. & WEISCHET W. (1980): Allgemeine Klimageographie. In: Lehrbuch der Allgemeinen Geographie. De Gruyter. Berlin.

BUNDESAMT FÜR RAUMPLANUNG (BFR) (1980): Bodeneignungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung. Bern.

BUNDESAMT FÜR STATISTIK (BFS) (2001): Bodennutzung im Wandel. Arealstatistik Schweiz. Bundesamt für Statistik. Neuchatel.

BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2009a): Basismessnetz: Wasserstand und Abfluss an Oberflächengewässern. <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01831/01839/index.html?lang=de>. Zugriff 02.08.2010.

BUNDESAMT FÜR UMWELT (BAFU) (2009b): Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser). <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02049/index.html?lang=de>. Zugriff: 20.04.2010.

BURROUGH P.A. & McDONNELL R.A. (1998): Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press. Oxford.

DEUTSCHER WETTERDIENST: Kurzfristvorhersagen und Nowcasting. http://www.dwd.de/bvbw/app-manager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_schule_wetter&_state=maximized&_windowLabel=T26800984001161863103053. Zugriff: 10.09.2010.

DIEZIG R. (2006): Hochwasserprozesstypen in der Schweiz. Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

- DINGMAN S. LAWRENCE (2001):** Physical Hydrology (2nd edition). Prentice Hall. New Jersey.
- DVWK (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU) (1984):** Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten – Teil 2. Synthese. Heft 113. Parey. Berlin.
- DYCK S. & PESCHKE G. (1989):** Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen. Berlin.
- DYCK S. & PESCHKE G. (1983):** Grundlagen der Hydrologie. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.
- FAEH, A., NAEF, F., SCHERRER, S. (1999):** Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7. Bern.
- FELIX C. & CALPINI B. (2010):** Fast deployed pluviometric weather stations integrated into the Swiss-MetNet.http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/messsysteme/boden/swissmetnet/SMN_event.Par.0012.DownloadFile.tmp/smfastdeployed.pdf. Zugriff: 28.08.2010.
- FREIE UNIVERSITÄT BERLIN (FUB) (2007):** E-learning. Karstmorphologie. <http://www.geo.fu-berlin.de/fb-e-learning/pg-net/themenbereiche/geomorphologie/karstmorphologie/index.html>. Zugriff: 28.08.2010.
- FREI C., GERMANN U., FUKUTOME S., LINIGER M. (2008):** Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 221. Zürich.
- FREI C. & SCHÄR C. (1998):** A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. International Journal of Climatology 18: 873–900.
- GEIGER H., RÖTHLISBERGER G., ZELLER J. (1991):** Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Band 7. Grundlagen. Hrsg: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Birmensdorf.
- GEIGER H., RÖTHLISBERGER G., ZELLER J. (1978):** Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Band 3. Glarus, Schwyz, Uri, Zug, Luzern, Nidwalden, Obwalden. Hrsg: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Birmensdorf.
- GERMANN U., GALLI G., BOSCACCI M., BOLLIGER M. (2006):** Radar precipitation measurement in a mountainous region. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 132: 1669-1692.
- GREBNER D., RÖSCH T., SCHWARB M. (1999):** Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981-1993. In: BWG: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.5. Bern.
- HALLER T. (2007):** Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES). Geographisches Institut der Universität Bern – Hydrologie. Bern.
- HELBLING A., KAN C., VOGT S. (2006):** Dauerregen, Schauer oder Schmelze - welche Ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus. In: Wasser Energie Luft. 2006, Heft 3.
- HINGRAY B., PICOUET C., MUSY A. (2009):** Hydrologie 2. Une science pour l'ingénieur. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne.

- ICE WEB BENUTZERHANDBUCH (2009):** www.wetterluzern.ch/deutsch/help.html Zugriff: 09.05.2010.
- ISAAKS E.H. & SRIVASTAVA R.M. (1989):** An Introduction to Applied Geostatistics. R-Project. (2009). The R Project for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>. Zugriff: 11.9.2010.
- KIRCHHOFER W. & SEVRUK B. (1991):** Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.2, Bern.
- KIRPICH Z.P. (1940):** Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. [éd.] Am Soc. Civ. Engrs Civ. Eng. 1940. Cité de Nachtnebel 2008. Vol. 10.
- KOCH M. (2003):** Der Niederschlag. http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydraulik/Lehre/Hydrologie_I-/skript/IngHydro4a.pdf. Zugriff: 25.08.2010.
- LABHART T. (2009):** Geologie der Schweiz. Ott Sachbuchverlag. Hep Verlag AG. 8. Auflage. Bern.
- LESER H. (HRSG.) (1997):** Diercke Wörterbuch Allgemeine Geographie. Deutscher Taschenbuchverlag. Braunschweig.
- MANIAK U. (2005):** Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag. Berlin.
- MASSON P. (2010):** Grundlagen für ein Hochwasserwarnsystem im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Technische Umsetzung und Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- MERZ R., BLÖSCHL G., PARAJKA J. (2006):** Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. Journal of Hydrology, 331: 591-604.
- METEOSCHWEIZ (2008):** Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211. Zürich.
- METEOSCHWEIZ:** Datenportal der MeteoSchweiz für Lehre und Forschung. <http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/services/datenportal/idaweb.html>. Zugriff: 25.08.2010.
- MUSY A. & HIGY C. (2009):** Hydrologie 1. Une science de la nature. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne.
- NACHTNEBEL, H.P. (2008):** Hydrologie und Flussgebietsmanagement. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau.
- OFFICE FEDERAL DES EAUX ET DE LA GEOLOGIE (OFEG) (2005):** Bericht über die Hochwasser 2005. Berne.
- OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV) (2010):** Données et bases hydrologiques. <http://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/map/M2487.gif>. Zugriff: 20.04.2010.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV) (2009A):** Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser). Division Hydrologie. www.hydrodaten.admin.ch/lhg/hq/2487hq.pdf. Zugriff: 20.04.2010.

OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV) (2009b): Les crues de 2005. www.bafu.admin.ch/hydrologie/01834/02041/02043/index.html?lang=fr. Zugriff : 11.05.2010.

PRESS F. & RAYMOND S. (2003): Allgemeine Geologie. Einführung in das System Erde. Spektrum Akademischer Verlag. Elsevier GmbH. 3. Auflage. München.

PWD-11: <http://www.alexander-sds.de/>. Zugriff 01.07.2010

RAINWISE INC. (2007): Rainlog. Annual Rainfall Data Logger. Instruction Manual. Bar Harbor.

REBER L. (2005): Variabilität konvektiver Niederschläge – Untersuchungen im Emmental (Wasen). Diplomarbeit der Philosoph-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

REGRESSION UND KORRELATION: http://www.imbe.med.uni-erlangen.de/lehre/Querschnittsbereich1/Unterlagen/Regression_Korrelation.pdf. Zugriff: 15.08.2010.

ROBINSON M. (2005): Chapter 36 Precipitation Measurement: Gauge Deployment. In: Malcolm G. Anderson and Jeffrey J. McDonnell (Eds.): Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, Ltd.. Chichester.

SARTOR J. (1999): Einsatz der Langzeit-Seriensimulation für kleine Einzugsgebiete. http://www.fh-trier.de/fileadmin/groups/11/bauingenieurwesen/Personen/sartor/Forschung/Sartor_1999.pdf. Zugriff: 05.07.2010.

SCHÄDLER B. & WEINGARTNER R. (1992): Débits naturels 1961-1980. In: BWG: Atlas hydrologique de la Suisse, Feuille 2.5. Berne.

SCHÄDLER B. & WEINGARTNER R. (1991): Natürliche Abflüsse 1961-1980. Tafel 5.4. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.4, Bern.

SCHLUNEGGER F. (2006): Geologie und Geomorphologie des Entlebuch – eine kleine Landschaftsgeschichte. In: Entlebucher Brattig 2006. Jahreszeitschrift. Kunstverein Amt Entlebuch.

SEVRUK B. (2005): Chapter 35 Rainfall Measurement: Gauges. In: Malcolm G. Anderson and Jeffrey J. McDonnell (Eds.): Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons Ltd.. Chichester.

SEVRUK B. (2004): Niederschlag als Wasserkreislaufelement. Theorie und Praxis der Niederschlagsmessung. Zürich, Nitra.

SEVRUK B. & KIRCHHOFER W. (1991): Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951-1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.3, Bern.

SEVRUK B. (1985): Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 31: 65-75. Bern.

SOENARIO I. & SLUITER R. (2010): Optimization of Rainfall Interpolation. Intern rapport IR 2010-01. Royal Netherlands Meteorological Institute. De Bilt.

SPREAFICO M. & WEINGARTNER R. (2005): Hydrologie der Schweiz. Auserwählte Aspekte und Resultate, Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 7. Bern.

- TIPPING BUCKET RAIN GAUGE (2008):** <http://www.youngusa.com/products/3/18.html>. Zugriff: 30.05.2010.
- UWE (2010):** Dienststelle für Umwelt und Energie des Kantons Luzern. Umwelt-Luzern. http://www.umwelt-luzern.ch/kleine_emme. Zugriff: 16.08.2010.
- UWE:** Niederschlag Messnetz. <http://www.umwelt-luzern.ch/index/themen/gewaesser/hydrometrie/-niederschlag.htm>. Zugriff: 28.08.2010.
- VAISALA PWD SENSOR SERIES:** <http://www.hobeco.net/pdf/FWD12.pdf>. Zugriff: 01.07.2010.
- VIVIROLI, D., GURTZ, J., ZAPPA, M. (2007):** The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia P40. Geografisches Institut, Universität Bern. Bern
- WEINGARTNER R. & ASCHWANDEN H. (1992):** Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. In : Atlas hydrologique de la Suisse, Feuille 5.2. Berne.
- WEINGARTNER R. (1989):** Das Unit-Hydrograph-Verfahren und seine Anwendung in schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde, Nr. 107. Bern.
- WMO (2009):** Field Intercomparison of rainfall intensity gauges. WMO. Instruments and Observing Methods. WMO-No 99. World Meteorological Organization. Geneva.
- WMO (2008):** Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Weather, Climate, Water. 7th Edition, WMO-No. 8. World Meteorological Organization. Geneva.
- WMO (1998):** Solid Precipitation Measurement Intercomparison, WMO-No. 872. World Meteorological Organization. Geneva.
- WMO (1994):** Guide to Hydrological Practices. Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications, 5th Edition, WMO-No. 168. World Meteorological Organization. Geneva.
- WÜEST M., FREI C., ALTENHOFF A., HAGEN M., LITSCHI M., SCHÄR C. (2009):** A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. International Journal of Climatology. DOI: 10.1002/joc2025.
- WUSSOW G. (1922):** Untere Grenzwerte dichter Regenfälle. In: Meteorologische Zeitschrift, Band 39, Wien.
- ZEMP F. & SCHLUNEGGER F. (2005):** Geo-Pfad. Geomorphologie Escholzmatt. Ott Verlag + Druck AG. Thun.

11.2 Weiterführende Literatur

FREI C., SCHÖLL R., FUKUTOME S., SCHMIDLI J., VIDALE PL. (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research* 111.

GREBNER D. (1996): Räumlich-zeitliche Variabilität von Niederschlägen. In: *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse*. Birkhäuser Verlag, Basel. S. 141-161.

HENGL T. (2009): *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.

JOSS J. & GERMANN U. (2000): Solutions and Problems when Applying Qualitative and Quantitative Information from Weather Radar. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 25, Nr.10-12, 837-841. Locrano.

JOSS J., SCHÄDLER B., GALLI G., CAVALLI R., BOSCACCI M., HELD E., DELLA BRUNA G., KAPPENBERGER G., NESPOR V., SPIESS R. (1998): Operational use of radar for precipitation measurements in Switzerland. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. Switzerland

LIENERT C., WEINGARTNER R., HURNI L. (2010): An interactive, web-based, real time hydrological map information system (submitted). *Hydrological Sciences Journal*.

MERZ R. (2002): Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. *Wiener Mitteilungen* Band 181. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der technischen Universität Wien.

SHEPARD D.S. (1984): Computer mapping: the SYMAP interpolation algorithm in: Gaile G.L, Willmott C.J. (Eds.), *Spatial Statistics and Models*, 133-145, Dordrecht.

WARNECKE G. (1997): *Meteorologie und Umwelt - Eine Einführung*. Springer Verlag. Berlin.

12 Anhang

Der Anhang befindet sich auf dem digitalen Datenträger im Umschlag auf der letzten Seite der vorliegenden Arbeit.

Der Datenträger weist folgende Ordnerstruktur auf:

1. *MA_Riedener_2010..PDF*
2. *Anhang*
 - a. **Ereignisse Sommer 2009 [Messnetz 2009] (12 Ereignisse)**
 - b. **Ereignisse 1992-2006 [Radar Mt.CH] (11 Ereignisse)**
 - c. **Ereignisse 1984-2009 [Stationen Mt.CH] (20 Ereignisse)**
 - d. **R-Skripte**
 - i. Erstellung Niederschlagskarten
 1. Sources (Ordner mit Grundlagen der folgenden Skripte)
 2. ASCII2BIN.r (Konvertierung von ASCII zu BIN Dateien)
 3. Subtract_BINgrids.r (Subtraktion von zwei GRIDS)
 4. SumGRIDMaps.ctrl (Kontrolldatei von GRID-Karten Summierung)
 5. SumGRIDMaps_opt.exe (Ausführende Datei von SumGRIDMaps.ctrl)
 6. Map_BIN_files_js_grd_sum-v1.r (Darstellung von Gebietsniederschlag)
 7. Map_BIN_files_js_shp-v1.r (Darstellung von Gebietsniederschlag nach Teileinzugsgebieten klassifiziert)
 8. TEZG_Psum.dat (Beispiel zu Map_BIN_files_js_shp-v1.r: Daten der Teileinzugsgebiete)
 - ii. Messdatenformatierung und Messdatenaggregation
 1. fun_agg_chron.r (Aggregation von Niederschlagsdaten, z.B. 5min zu 1h)
 2. read_cr10.r (Einlesen und Formatierung der Niederschlagsdaten des CR10-Dataloggers)

3. `read_RainWise.r` (Einlesen und Formatierung der Niederschlagsdaten des Rainwise-Dataloggers)