



Kanton St. Gallen

Gemeinde Mels
Gemeinde Flums
Gemeinde Walenstadt

Hochwasserschutzprojekt Seez, 3. Etappe

km 10.200 bis 5.850

Fachbericht Hydrologie

Ausfertigung für		Projekt Nr.	Plan Nr.	Beilage Nr.	
		49.001		1.6	
Studie	Projektverfasser IG Seez Mitte c/o Herzog Ingenieure AG Promenade 75, 7270 Davos Platz  Herzog Ingenieure AG Wasserbau Tiefbau Grundbau 	Entw.	Gez.	Gepr.	Datum
Vorprojekt			gm	.	03.03.2026
Auflageprojekt					
Ausführungsprojekt					
Abschlussakten		(Name der elektronischen Datei)			
		Format	A4		

Impressum

Auftraggeber Bau- und Umweltdepartement Kanton St. Gallen
Amt für Wasser und Energie
Lämmli brunnenstrasse 54
Würenlingerstrasse 11
CH-9001 St. Gallen

Auftragnehmer NIEDERER + POZZI UMWELT AG



Burgerrietstrasse 13
CH-8730 Uznach
Tel.: 055 / 285 91 80
email: admin@nipo.ch
website: www.nipo.ch

Berichtsverfasser Roman Salvisberg
Mischa Schmid

Auftrag U.SG.21.23b: HWS Seez 3.Etappe (NAM + Retention)

Verzeichnis der Versionen und Änderungen

Version	Datum	Status/Änderungen
1.0	06.07.2023	Entwurf
1.1	24.08.2023	Entwurf
1.2	15.07.2025	Entwurf
2.0	03.11.2025	Bericht

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Auftrag	1
1.2 Einzugsgebiet Seez	2
1.3 Bestehende Hydrologie Naturgefahrenanalyse	4
1.4 Vorgehen	4
2. Verwendete Grundlagen	5
3. Abflussmessungen Pegel Seez-Mels	6
4. Historische Hochwasserereignisse	8
4.1 Einordnung Hochwasserereignis vom 17.6.2016 (Rang 5)	9
4.1.1 Hochwasserverlauf	9
4.1.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	9
4.1.3 Niederschlagsverlauf	10
4.2 Einordnung Hochwasserereignis vom 18.7.2009 (Rang 19)	14
4.2.1 Hochwasserverlauf	14
4.2.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	14
4.2.3 Niederschlagsverlauf	15
4.3 Einordnung Hochwasserereignis vom 13.7.2008 (Rang 14)	19
4.3.1 Hochwasserverlauf	19
4.3.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	19
4.3.3 Niederschlagsverlauf	20
4.4 Einordnung Hochwasserereignis vom 17.9.2006 (Rang 16)	24
4.4.1 Hochwasserverlauf	24
4.4.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	24
4.4.3 Niederschlagsverlauf	25
4.5 Einordnung Hochwasserereignis vom 23.8.2005 (Rang 3)	28
4.5.1 Hochwasserverlauf	28
4.5.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	28
4.5.3 Niederschlagsverlauf	29
4.6 Einordnung Hochwasserereignis vom 18.7.1987 (Rang 1)	32
4.6.1 Hochwasserverlauf	32
4.6.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen	32
4.6.3 Niederschlagsverlauf	33
5. Beurteilung der Abflussreaktion im Einzugsgebiet	34
5.1 Boden und Geologie	34
5.2 Abflusstypen	34
5.3 Abflussreaktionskurven	36
6. Abflussberechnung	38
6.1 Aufbau NAM	38
6.2 Oberflächenabfluss: Fliesszeiten / Isochronen	39
6.3 Unterirdischer Abfluss im Boden: Bodenspeicher	41
6.4 Modellkalibrierung	43
6.4.1 Hochwasser vom 17. Juni 2016	43
6.4.2 Hochwasser vom 18. Juli 2009	43
6.4.3 Hochwasser vom 13. Juli 2008	44
6.4.4 Hochwasser vom 17. September 2006	44
6.4.5 Hochwasser vom 23. August 2005	44
6.4.6 Modellparameter	1
6.4.7 Sensitivitätsanalyse	4
6.5 Niederschlagsszenarien	8
6.5.1 Räumliche Verteilung des Niederschlags	8
6.5.2 Zeitliche Verteilung des Niederschlags und Niederschlagsintensitäten	10
6.6 Abflussberechnung	12
7. Schlussfolgerungen	20

1. EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Im Rahmen des Hochwasserschutzprojekts Seez 3. Etappe ist ein Konzeptwechsel angedacht. Gemäss bisherigem Konzept war vorgesehen, bei Hochwasser einen Teil des Abflusses mittels Entlastung oberhalb von Flums aus der Seez auszuleiten und rechts der Seez in der unbesiedelten Ebene zu retinieren (siehe Abbildung 1).

Das neue Konzept sieht stattdessen vor, den Zufluss vom linken Seitenzubringer Röllbach, welcher oberhalb von Flums in die Seez mündet, durch Drosselung bzw. Rückhalt zu reduzieren. Das Kernstück des neuen Konzepts ist ein Hochwasserrückhaltebecken am Standort Valaschga (siehe Abbildung 1). Dieses Becken soll den Zufluss aus dem Röllbach in die Seez so weit drosseln, dass beim Dimensionierungsereignis der Abfluss in der Seez (nach der Mündung Röllbach) 130 m³/s nicht übersteigt. Dieser Abfluss entspricht der maximal vorhandenen Kapazität des Seez-Gerinnes in Flums.

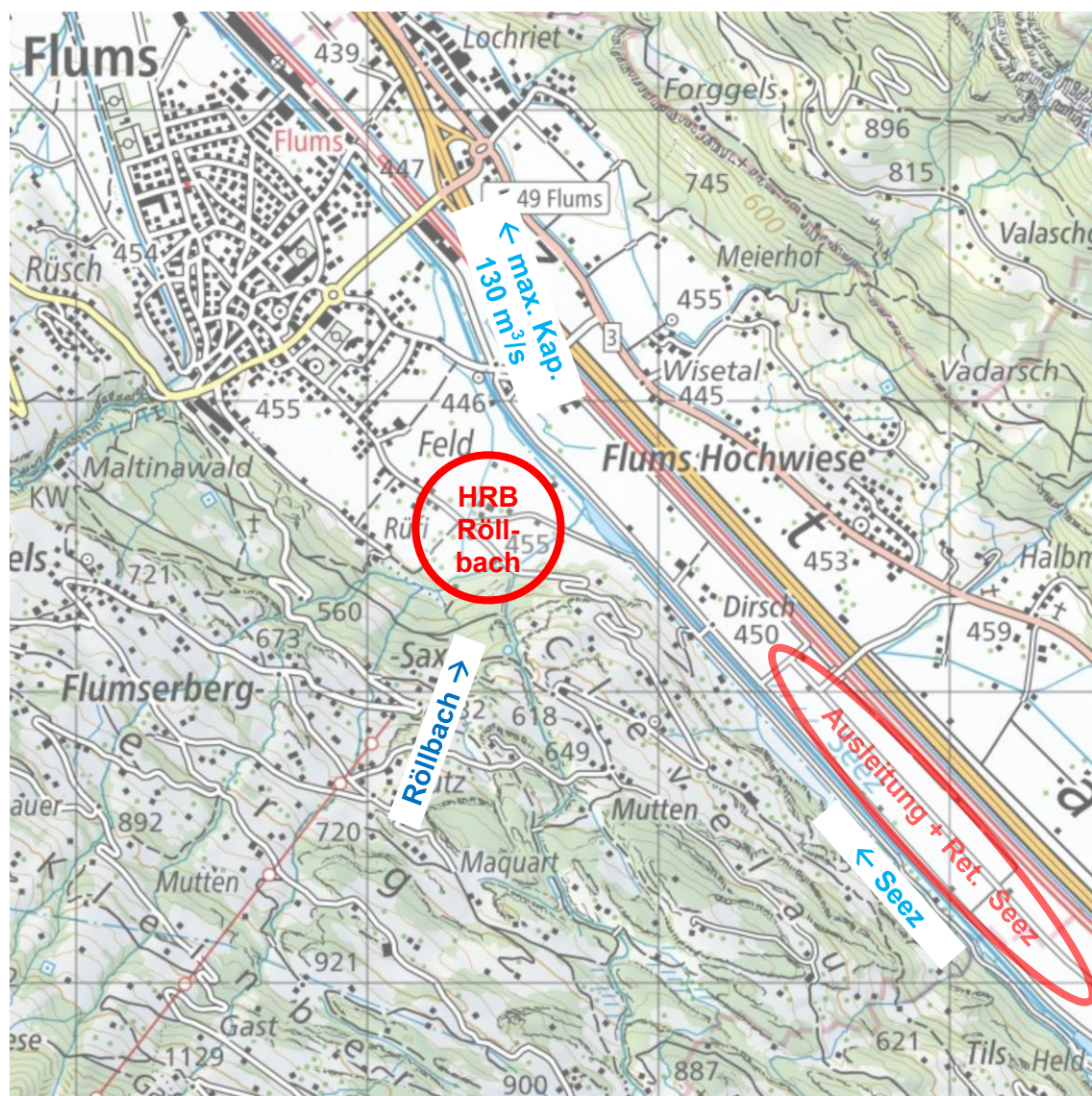


Abbildung 1: Standort Hochwasserrückhaltebecken (HRB) Röllbach gemäss neuem Hochwasserschutzkonzept (anstatt des bisherigen Konzepts bestehend aus Ausleitung und Retention der Seez)

Die Niederer + Pozzi Umwelt AG wurde vom Kanton St. Gallen beauftragt, für das Dimensionierungsereignis HQ₁₀₀ der Seez eine belastbare Volumenangabe für den Rückhalt vom Röllbach herzuleiten sowie ein möglichst gutmütiges Rückhaltesystem am Röllbach zu entwerfen.

1.2 Einzugsgebiet Seez

Das Einzugsgebiet der Seez weist bis Flums eine Grösse von 141.6 km² auf. Im Süden des Seetzals bildet das Weisstannental mit den Hängen der Pizol-Gruppe das Haupteinzugsgebiet. Letzteres ist von Nebentälern durchfurcht, die grösstenteils in Nord-Süd-Richtung verlaufen. Bei Mels mündet die Seez in den Talboden des Seetzales (siehe Abbildung 2).

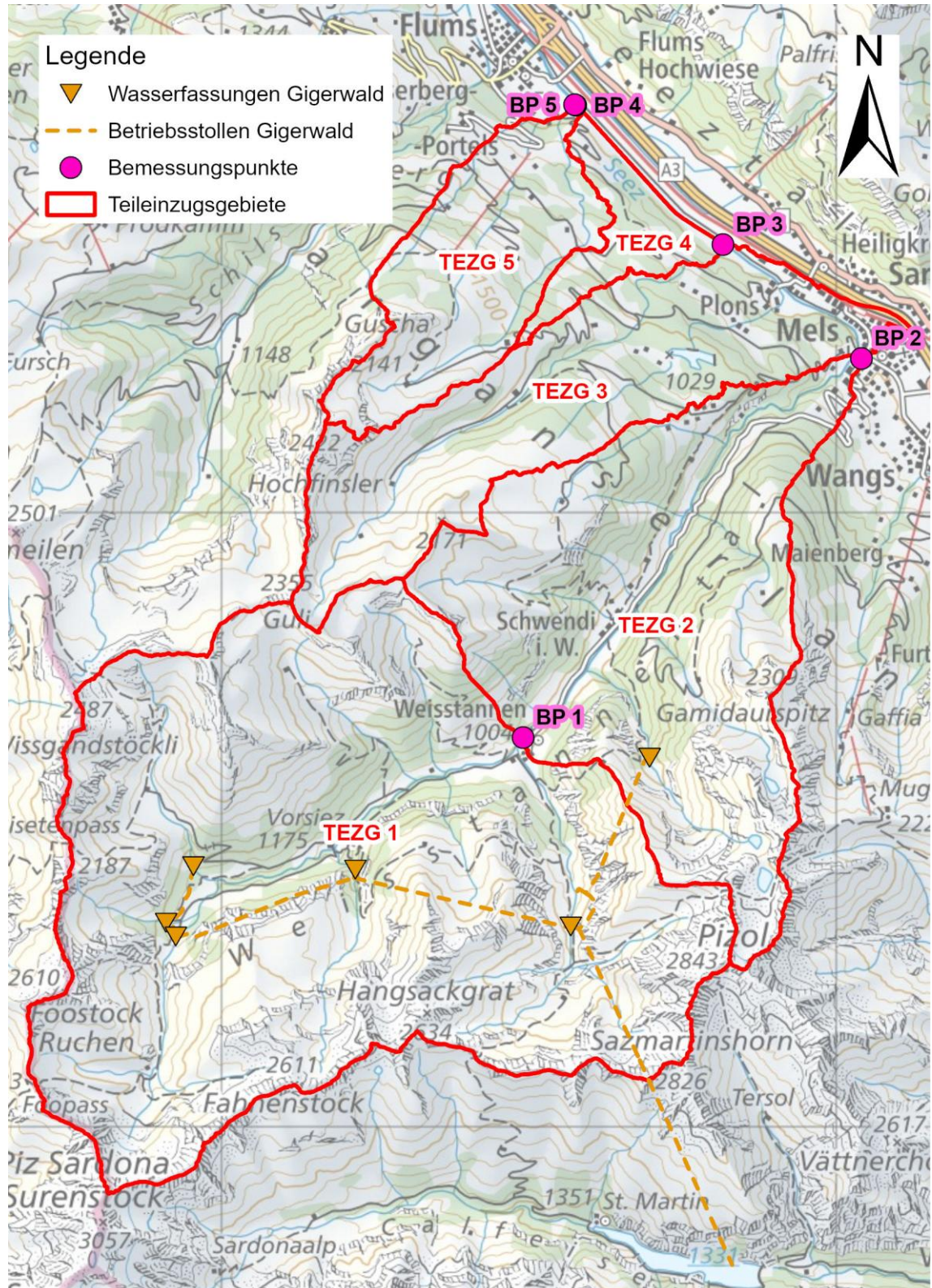


Abbildung 2: Übersicht über das Einzugsgebiet der Seez mit den Bemessungspunkten, den Teileinzugsgebieten sowie den Wasserefassungen/Betriebsstollen Gigerwaldsee

Folgende Kennwerte des Einzugsgebiets (EZG) beziehen sich auf die in Abbildung 2 ersichtlichen Teileinzugsgebiete (TEZG).

Tabelle 1: Gebietskennwerte EZG Seez

Höchster Punkt im EZG (Gross Schiben)	2'937 m ü. M.
Tiefster Punkt im Einzugsgebiet (bis Mündung Röllbach)	444 m ü. M.
EZG oberhalb BP 1: Seez, Weisstannental	70.3 km ²
EZG oberhalb BP 2: Seez, Messstation Seez-Mels (BAFU)	105.7 km ²
EZG oberhalb BP 3: Seez, unterhalb Mündung Cholschlagerbach	126.3 km ²
EZG oberhalb BP 4: Seez, oberhalb Mündung Röllbach	130.0 km ²
EZG oberhalb BP 5: Seez, unterhalb Mündung Röllbach	141.6 km ²

Die Seez und ihre Teileinzugsgebiete weisen einige spezifische Besonderheiten auf:

- Mit dem Weisstannental (105.7 km²) umfasst die Seez im Oberlauf ein grosses voralpines Einzugsgebiet.
- Im Unterlauf zwischen Mels und Flums fliessen auf einer gesamten Flie遝sstrecke von 6.5 km nur linksseitig Zuflüsse aus mehreren, eher schmalen Teileinzugsgebieten in die Seez, z.B. Cholschlagerbach, Röllbach. Die TEZG 3, 4 und 5 weisen grosse Gefälle von teilweise mehr als 35% auf.
- Seit 1977 ist das Abflussregime im TEZG 1 der Seez durch die Überleitung von Wasser in das benachbarte EZG des Stausees Gigerwald (Calfeisental) beeinflusst (siehe Abbildung 2). Die Überleitungen betreffen ein EZG von ca. 45 km² und betragen bis zu 13 m³/s. Die übergeleiteten Wassermengen werden direkt bei der Einleitung in den Stausee Gigerwald gemessen.
- Das Abflussregime der Seez ist durch weitere kleinere Wasserfassungen, unter anderem von Kraftwerken, beeinflusst. Das gefasste Wasser verbleibt bei diesen Anlagen jedoch im EZG der Seez.

1.3 Bestehende Hydrologie Naturgefahrenanalyse

Für den Projektabschnitt Seez 3. Etappe (Mels bis Mündung Röllbach) wurden die Abflussspitzen auf Grundlage der Naturgefahrenanalyse (NGA) vom Auftraggeber wie folgt abschnittsweise festgelegt:

Tabelle 2: Hochwasserabflüsse Seez 3. Etappe (Quelle: NGA, zukünftige Werte)

Bemessungspunkt	Abfluss [m^3/s]			
	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ
Seez, BP 2	k. A.	115	k. A.	k. A.
Seez, BP 3	k. A.	130	k. A.	k. A.
Seez, BP 4	95	130	180	k. A.
Seez, BP 5	110	150	208	250

Für den Röllbach wurden in der Naturgefahrenanalyse folgende Abflussspitzen festgelegt:

Tabelle 3: Hochwasserabflüsse Röllbach (Quelle: NGA, aktuelle Werte)

Bemessungspunkt	Abfluss [m^3/s]			
	HQ ₃₀	HQ ₁₀₀	HQ ₃₀₀	EHQ
Röllbach, BP 5	21.4	29.9	40.7	52.2

Für den Cholschlagerbach (TEZG 3) wurden in der NGA keine Abflussspitzen festgelegt.

1.4 Vorgehen

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten dar. Im Kapitel 2 sind die verwendeten Grundlagen zusammengestellt. Kapitel 3 und 4 fassen die Erkenntnisse, welche aus den historischen Hochwassern an der Messstation Seez-Mels gewonnen werden konnten, zusammen. Im Kapitel 5 wird die Abflussbereitschaft des EZG Seez beurteilt. Basierend darauf werden die Hochwasserabflüsse für das Dimensionierungsereignis HQ₁₀₀ mittels einem Niederschlagsabflussmodell (NAM) berechnet (Kapitel 6).

2. VERWENDETE GRUNDLAGEN

- [1] Scherrer AG (2004): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen
- [2] Scherrer S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 147.
- [3] Bundesamt für Landestopografie (2014): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100'000, Blatt Bözberg-Beromünster. Bearbeiter: H. Jäckli, T. Kampf. Herausgabedatum: 1972.
- [4] Bundesamt für Landestopografie (2022): Geologischer Vektordatensatz 1:25'000, Blätter Spitzmeilen, Sargans, Elm und Vättis. Verfasser: diverse Autoren.
- [5] D. R. Maidment et al. (1996): Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. Hydrological processes 10.6, 831–844.
- [6] Christoph Frei, Sophie Fukutome (2022): Extreme Punktniederschläge. Karte B04. Hydrologischer Atlas der Schweiz. www.hydromaps.ch
- [7] NCCS (2018): CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S
- [8] Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (1990): Abschätzung des hundertjährigen Abflusses der Seez bei Mels
- [9] Grebner D. Richter KG (1989): Gebietsniederschlag – Zwischenbericht zur Ursachenanalyse Hochwasser 1987. Geographisches Institut ETH Zürich.
- [10] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (2023): Wetterarchiv der Schweiz. Witterungsberichte Schweiz 1980 – 1989, Annalen 1987, Klimabulletin Juli 2009 und Juni 2016. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/wetterarchiv-der-schweiz.html>
- [11] Intercantonal Measurement and Information System IMIS (2023). IMIS measuring network. EnviDat. <https://www.doi.org/10.16904/envidat.406>.
- [12] MeteoGroup Schweiz AG (2023): Bodenstationen. <http://ftp4.meteogroup.ch/extern/meteoschweiz/069201.pdf>
- [13] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (2023): Wetter und Klima von A bis Z. Temperaturabnahme mit der Höhe. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/temperatur/temperaturabnahme-mit-der-hoehe.html>
- [14] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (2023): Wetter und Klima von A bis Z. Schneefallgrenze. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/schneefallgrenze.html>
- [15] Bundesamt für Statistik (2020): Bodeneignungskarte der Schweiz, Geodaten. Veröffentlicht am 17.06.2020. <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/13147140/master>
- [16] Grebner D., Roesch T., Schwarb M. (1999): Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981-1993. Tafel 2.5. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- [17] Kienzler, P. (2007): Experimental study of subsurface stormflow formation. Combining tracer, hydrometric and geophysical techniques. ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005477823>

3. ABFLUSSMESSUNGEN PEGEL SEEZ-MELS

Die Abflussmengen der Seez werden seit 1966 am Pegel Seez-Mels (siehe Abbildung 3) gemessen. Im Zeitraum von 1966 bis 1974 wurden lediglich die Tagesmittel, seit 1974 werden die 60min- und 10min-Mittel gemessen. Die Station befindet sich in Mels am Ausgang des Weisstannentals (siehe Abbildung 2, BP 2).



Abbildung 3: Pegel Seez-Mels

In Tabelle 4 sind die Jahreshochwasser für den Zeitraum von 1974 bis 2018 an der Messstation Seez-Mels aufgelistet. Aus den Abflussmessungen können folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

- Das Hochwasser vom 18.7.1987 war mit Abstand das grösste Jahreshochwasser innerhalb der ausgewerteten 45-jährigen Messperiode.
- Die Jahreshochwasser ereigneten sich nur im Sommer (Juni bis August) und im Herbst (September bis November). Innerhalb der ausgewerteten Messperiode traten im Winter und im Frühling (Dezember bis Mai) keine Jahreshochwasser auf.
- Die fünf grössten Jahreshochwasser traten alle im Sommer auf.
- Die Jahreshochwasser traten häufiger im Sommer (30x) als im Herbst (15x) auf.

Tabelle 4: Datum, Abfluss und Rangierung der Jahreshochwasser Pegel Seez-Mels für den Zeitraum von 1974 bis 2018 sowie die Einteilung, in welcher metrologischen Jahreszeit die Hochwasser auftraten

Datum	Abfluss [m ³ /s]	Jahreszeit	Rang
02.08.1974	46.3	Sommer	11
18.07.1975	52.3	Sommer	9
02.06.1976	38.0	Sommer	20
19.08.1977	64.6	Sommer	2
08.08.1978	59.7	Sommer	4
12.06.1979	37.3	Sommer	24
17.10.1980	28.9	Herbst	33
27.09.1981	53.4	Herbst	7
19.07.1982	48.0	Sommer	10
11.09.1983	19.6	Herbst	44
05.09.1984	29.0	Herbst	32
26.08.1985	41.2	Sommer	15
06.07.1986	56.2	Sommer	6
18.07.1987	74.6	Sommer	1
12.10.1988	21.6	Herbst	42
14.08.1989	21.8	Sommer	40
29.07.1990	29.4	Sommer	30
17.06.1991	53.2	Sommer	8
24.07.1992	29.6	Sommer	29
27.08.1993	20.9	Sommer	43
11.08.1994	29.3	Sommer	31
13.09.1995	25.0	Herbst	37
07.06.1996	21.7	Sommer	41
28.08.1997	28.1	Sommer	34
05.09.1998	36.6	Herbst	25
03.06.1999	37.7	Sommer	23
13.06.2000	39.4	Sommer	18
04.08.2001	34.9	Sommer	26
16.11.2002	37.8	Herbst	21
09.10.2003	17.7	Herbst	45
24.09.2004	26.5	Herbst	36
23.08.2005	61.0	Sommer	3
17.09.2006	40.8	Herbst	16
08.08.2007	37.7	Sommer	22
13.07.2008	41.5	Sommer	14
18.07.2009	38.7	Sommer	19
08.09.2010	26.7	Herbst	35
18.06.2011	42.6	Sommer	13
04.06.2012	39.5	Sommer	17
01.06.2013	23.3	Sommer	39
14.10.2014	30.5	Herbst	28
07.06.2015	24.6	Sommer	38
17.06.2016	58.6	Sommer	5
01.09.2017	45.1	Herbst	12
29.10.2018	34.0	Herbst	27

4. HISTORISCHE HOCHWASSEREREIGNISSE

In den Aufzeichnungen des Seezunternehmens sind Hinweise auf Hochwasserschäden und Überflutungen seit 1870 enthalten. Für die Hochwasser der Jahre 1911, 1922 und 1954 wurden von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) in [8] die aufgetretenen Spitzenabflüsse am Pegel Seez-Mels mittels Staukurvenberechnungen rekonstruiert bzw. abgeschätzt:

- Hochwasser 6./7. Oktober 1911: 80 – 100 m³/s
- Hochwasser 15./16. Juli 1922: 90 – 110 m³/s
- Hochwasser 21./22. August 1954: 80 – 100 m³/s

Damit waren für die Periode von 1911 bis 1987 (Zeitpunkt der Untersuchungen der VAW: März 1990) die grössten Hochwasser bekannt und konnten in eine Schätzung des hundertjährigen Hochwassers einbezogen werden. Unter Berücksichtigung der historischen Hochwasser und der Pegelmessreihe 1966 bis 1987 (siehe Kapitel 3) wurde von der VAW für das hundertjährige Hochwasser beim Pegel Seez-Mels ein Abfluss von 100 – 130 m³/s abgeschätzt.

Im Folgenden soll als Grundlage für die Modellkalibrierung des Niederschlagsabflussmodells (siehe Kapitel 6) die Entstehungsweise ausgewählter Jahreshochwasser (siehe Tabelle 5) untersucht, dokumentiert und eingeordnet werden. Hierzu wurden Informationen zum Witterungsverlauf sowie zu den vom Niederschlagsradar geschätzten und von den Bodenstationen gemessenen Niederschlagsmengen zusammengetragen.

Tabelle 5: Datum, Abfluss und Rangierung der für die Modellkalibrierung verwendeten Jahreshochwasser

Datum	Abfluss [m ³ /s]	Jahreszeit	Rang
23.08.2005	61.0	Sommer	3
17.09.2006	40.8	Herbst	16
13.07.2008	41.5	Sommer	14
18.07.2009	38.7	Sommer	19
17.06.2016	58.6	Sommer	5

Zur Rekonstruktion des Witterungsverlaufes und der Niederschlagsmengen wurden das Produkt CombiPrecip von MeteoSchweiz, das Wetterarchiv der Schweiz [10], die Station Wildsee (TAM2) [11] und die Messstation Weisstannen (MMWET) [12] herangezogen. Die Station Wildsee befindet sich auf 2'468 m ü. M. und ist seit September 2000 in Betrieb, die Messstation Weisstannen befindet sich auf 998 m ü. M. und ist seit Oktober 2008 in Betrieb (siehe Abbildung 2).

CombiPrecip liefert die beste Schätzung der Niederschlagsverteilung am Boden, die derzeit zur Verfügung steht. Vom Radarnetz werden sämtliche flüssigen und festen Niederschläge erfasst (Regen, Schnee, Hagel) und die stündlichen Niederschlagsfelder am Boden in Millimeter (mm) geschätzt. Die Schätzungen der Radarstationen werden mithilfe eines geostatistischen Ansatzes mit den Daten der automatischen Niederschlagsmessgeräte der Bodenstationen kombiniert. Für diesen geostatistischen Ansatz werden im Einzugsgebiet des Weisstannens die Daten der Station Weisstannen verwendet, welche seit 1.1.2010 eine Partnerstation der MeteoSchweiz ist. Das Pluviometer der Station Weisstannen ist beheizt, wodurch fester Niederschlag wie Schnee geschmolzen bzw. gemessen wird. Das Pluviometer der Station Wildsee ist nicht beheizt, wodurch fester Niederschlag wie Schnee nicht geschmolzen bzw. gemessen wird (die Station ist nicht Teil des Partnernetzes von MeteoSchweiz). Fester Niederschlag kann nur durch Sonnenstrahlung geschmolzen bzw. gemessen werden.

4.1 Einordnung Hochwasserereignis vom 17.6.2016 (Rang 5)

4.1.1 Hochwasserverlauf

Beim Hochwasserereignis vom 17.6.2016 stieg der Abfluss im Pegel Seez-Mels ab ca. 12 Uhr am 16.6.2016 von 5 m³/s innerhalb von ca. 14 Stunden auf 59 m³/s an. Die Abflussmengen der Seez-Überleitungen werden seit 1978 gemessen (Station Seezableitung bei der Einleitung in den Gigerwaldsee). Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 69 m³/s. Die Zuordnung der Seez-Überleitungen zum im Pegel Seez-Mels gemessenen Abfluss erfolgte unter der vereinfachten Annahme, dass die Fliesszeit in den Bächen vom Standort der Wasserfassungen zum Pegel Seez-Mels gleich der Fliesszeit von den Wasserfassungen durch die Betriebsstollen zur Einleitstelle in den Stausee Gigerwald ist (Station Seezableitung).

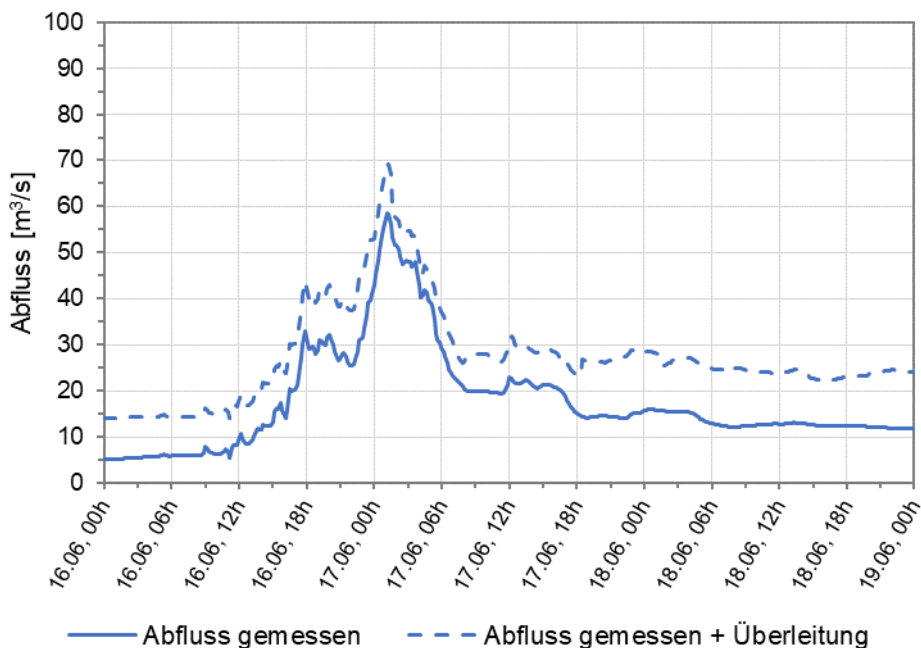


Abbildung 4: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 17.6.2016

4.1.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- Vom 1. bis zum 8. Juni lag feuchte Warmluft mit häufiger Schauer und Gewitteraktivität über Mitteleuropa.
- Ab dem 9. Juni zogen vom Atlantik her mehrere Schauerzonen über die Schweiz. Die Verdrängung der feuchtwarmen Luft ging mit kräftigen Niederschlägen und einzelnen Gewittern einher. Am 11. und 13. Juni gab es verbreitet grössere Niederschlagsmengen.
- Vom 16. bis am 18. Juni strömte aus Süden sehr feuchte Mittelmeerluft zur Schweiz. Innerhalb von 48 Stunden fielen in weiten Teilen der Schweiz grössere Niederschlagsmengen. Die durch die bisherige Juniwitterung bereits nassen Böden reagierten auf die Starkniederschläge mit Hangrutschen und Überschwemmungen. Der Walensee trat über die Ufer.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 18.7.2009 von nassen Vorbedingungen (nasse Böden) auszugehen. Der Vorregenindex ist ein Mass für die Vorfeuchte der Böden bei Ereignisbeginn. Der Vorregenindex geht davon aus, dass die Bodenfeuchte nach einem Niederschlagsereignis exponentiell abnimmt. Der Einfluss des Niederschlags ist umso größer, je näher er am betrachteten Ereignis liegt bzw., umso geringer, je weiter er zeitlich zurückliegt. Der Vorregenindex wird aus den 1 bis n Tagessummen vor dem Ereignis (Tag 0) wie folgt ermittelt:

$$VN_n = \sum_{i=1}^n N_i * 0.9^i$$

Der Vorregenindex lässt in den TEZG 1 und 2 (Weisstannental) auf nasse Vorbedingungen schliessen (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vorregenindex VN5, VN10 und VN15 (Einheit mm) pro Teileinzugsgebiet beim Hochwasserereignis 17.6.2016 (Berechnung aus den n Tagesniederschlagssummen vor dem Ereignis auf Grundlage von CombiPrecip)

	VN5	VN10	VN15
TEZG 1	25.6	40.7	48.1
TEZG 2	27.8	47.1	54.9

4.1.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

In Abbildung 6 ist die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung ersichtlich. Für die Modellkalibrierung wurde auf Grundlage von CombiPrecip (Radar) pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der Niederschlagsmenge ermittelt (siehe Abbildung 5).

Innerhalb von 24 Stunden vor der Abflussspitze (ca. 1 Uhr am 17.6) fiel eine Niederschlagsmenge von ca. 70 mm, wovon ca. 60 mm in den letzten 12 Stunden vor der Abflussspitze fielen. Die maximale Niederschlagsintensität betrug verbreitet im ganzen Weisstannental 6-10 mm/h, lokal im unteren Teil des Tals 10-20 mm/h. Die vom Radar geschätzte Niederschlagsintensität stimmt grösstenteils mit der gemessenen Niederschlagsintensität bei der Bodenstation Weisstannen überein. Die vom Radar geschätzte Niederschlagssumme ist ca. 10-15 mm grösser als die von der Bodenstation Weisstannen gemessene Niederschlagssumme. Bei der Station Wildsee setzte der gemessene Niederschlag am 16.6 nach 19 Uhr plötzlich aus, weil der Regen- in Schneefall übergegangen ist, wobei letzterer vom unbeheizten Pluviometer nicht gemessen wurde (siehe Abbildung 7).

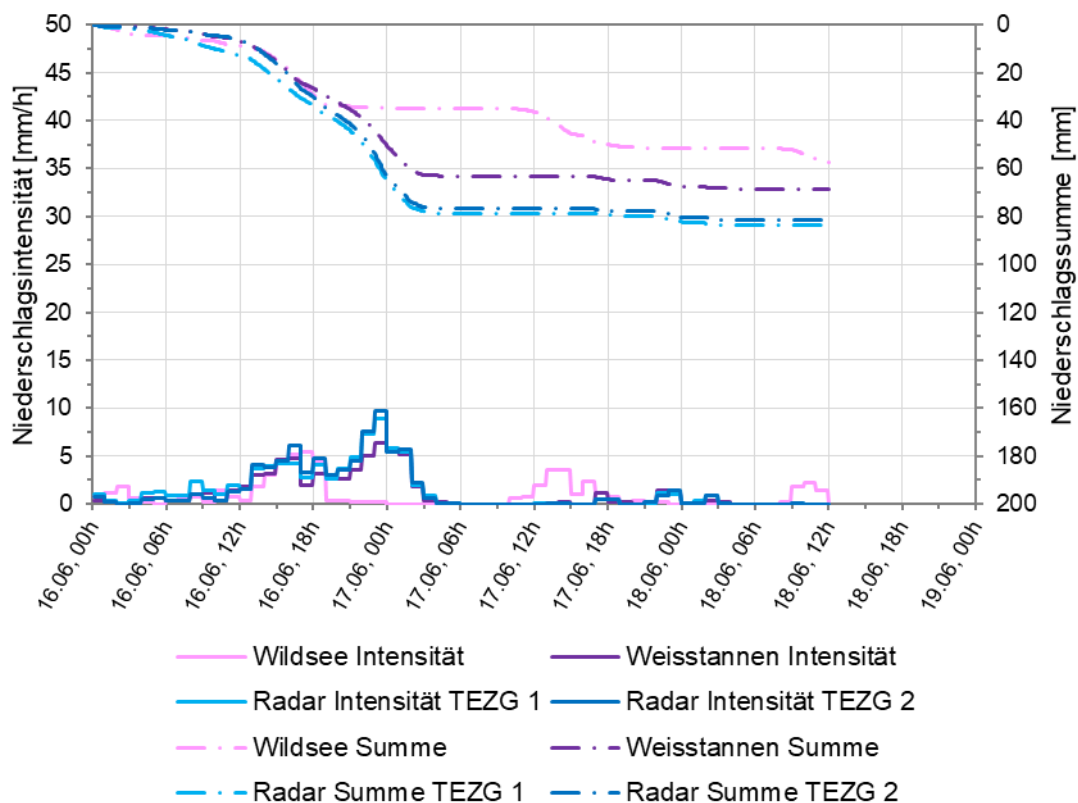


Abbildung 5: Niederschlagsintensitäten und -summen (räumliche CombiPrecip-Mittelwerte pro Teileinzugsgebiet) im Vergleich zu den Daten der Bodenstationen Wildsee (TAM2) und Weisstannen (MMWET) beim Hochwasser vom 17.6.2016

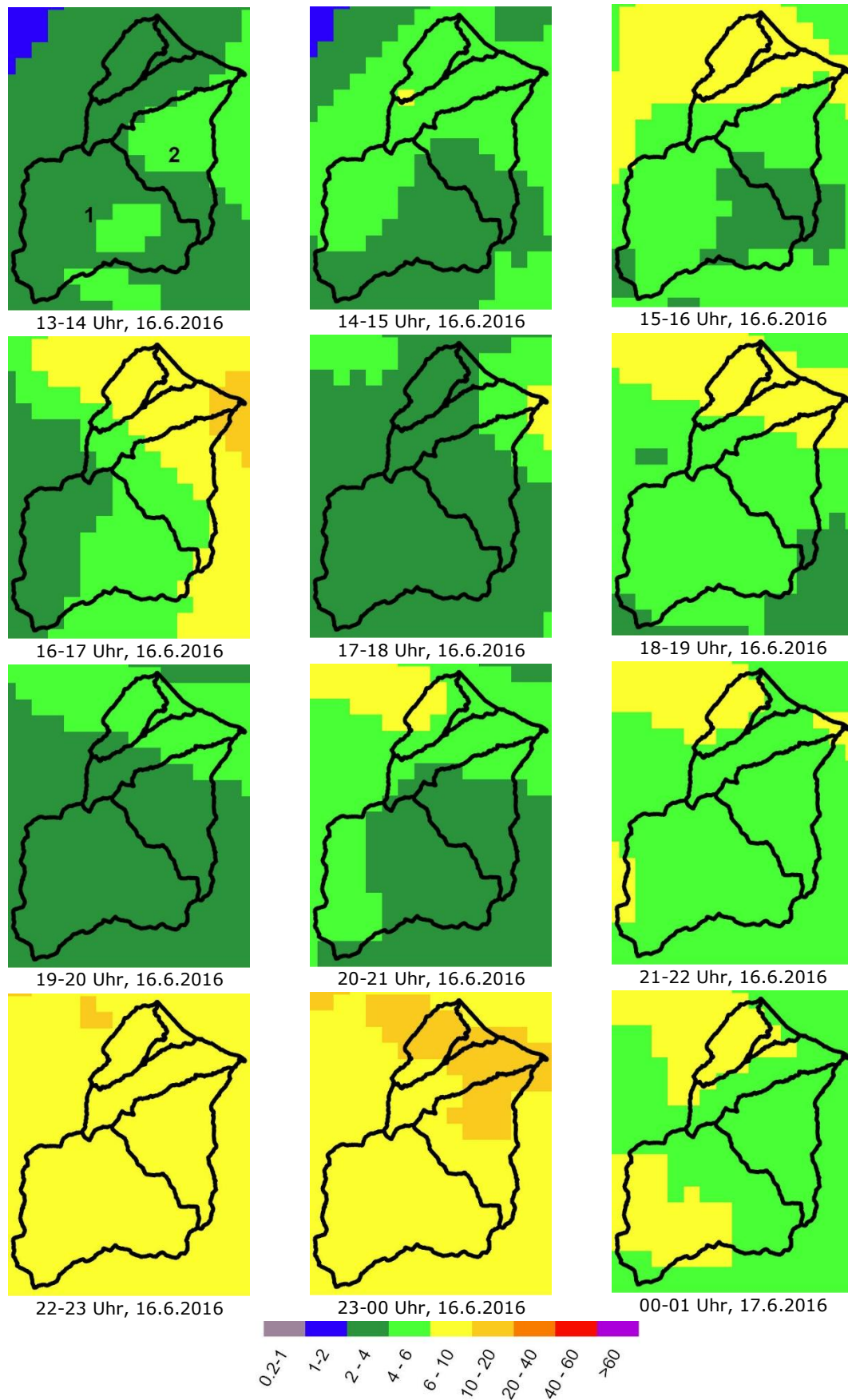


Abbildung 6: Niederschlag während des Hochwassers vom 17.6.2016: Stündliche Niederschlagsmengen in mm (Quelle: CombiPrecip, MeteoSchweiz)

Niederschlagsform

Die Datenauswertung der Station Wildsee (2'468 m ü. M.) zeigt folgendes:

Ab ca. 12 Uhr am 16.6 sank die Lufttemperatur von ca. 5 Grad bis um ca. 20 Uhr unter die Nullgradgrenze (siehe Abbildung 7). Gleichzeitig ging der Regen- in Schneefall über und die Schneehöhe nahm von ca. 19 Uhr am 16.6 bis um ca. 5 Uhr am 17.6 um ca. 30 cm zu. Der Niederschlag, welcher in fester Form (Schnee) fiel, wurde in den TEZG 1 und 2 zurückgehalten und war während des Hochwasserereignisses nicht abflusswirksam.

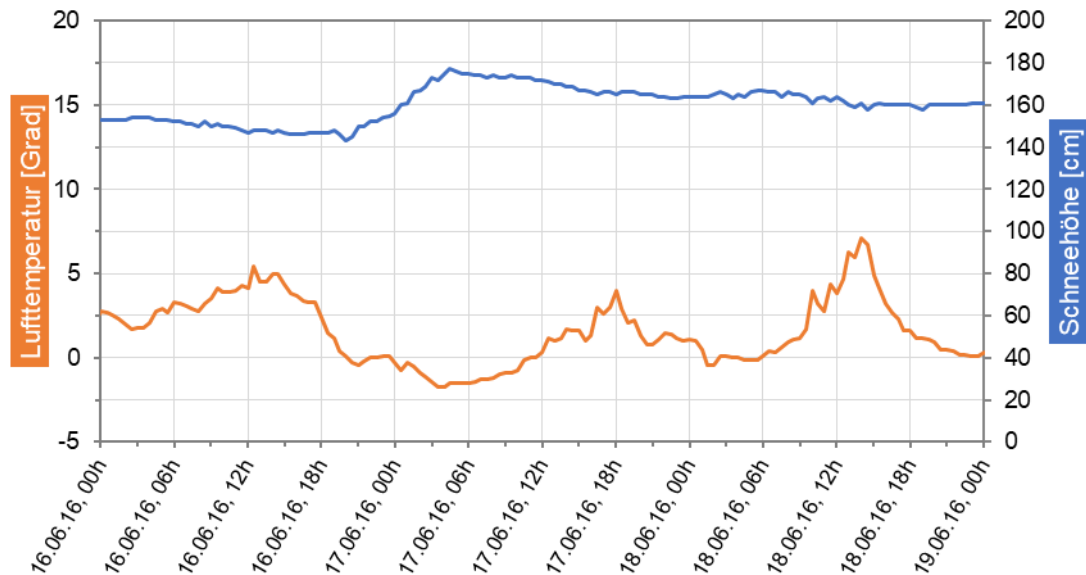


Abbildung 7: Lufttemperatur und Schneehöhe bei der Station Wildsee (30min-Mittel) vom 16.6.2016 bis 18.6.2016 (Quelle: [11])

Schneefallgrenze

Aufgrund der gemessenen Lufttemperatur und der Schneehöhe bei der Station Wildsee wird angenommen, dass der Niederschlag bis um ca. 19 Uhr am 16.6 im ganzen Weisstannental hauptsächlich in flüssiger Form (Regen) fiel. Anhand der gemessenen Lufttemperatur bei der Station Wildsee (Auswertung Stundemittel) wurde der zeitliche Verlauf der Schneefallgrenze ab 18 Uhr am 16.6 für das ganze Weisstannental abgeschätzt. Bei der Abschätzung wurden folgende vereinfachenden Annahmen getroffen:

- Pro 100 m Höhenunterschied nimmt die Temperatur im Schnitt um 0.65 Grad ab [13].
- Die Schneefallgrenze liegt tiefer als die Nullgradgrenze. Als Richtwert wurde die Schneefallgrenze 300 m unterhalb der Nullgradgrenze angenommen (gemäss [14] liegt sie im Durchschnitt 200 bis 400 m unterhalb der Nullgradgrenze).

Anhand der ermittelten Schneefallgrenze und swissalti3D wurde pro Teileinzugsgebiet das Verhältnis von berechneter EZG-Fläche zu beschneiter EZG-Fläche abgeschätzt. In Abbildung 8 ist die Abschätzung der beschneiten EZG-Flächenanteile für die TEZG 1 und 2 ersichtlich.

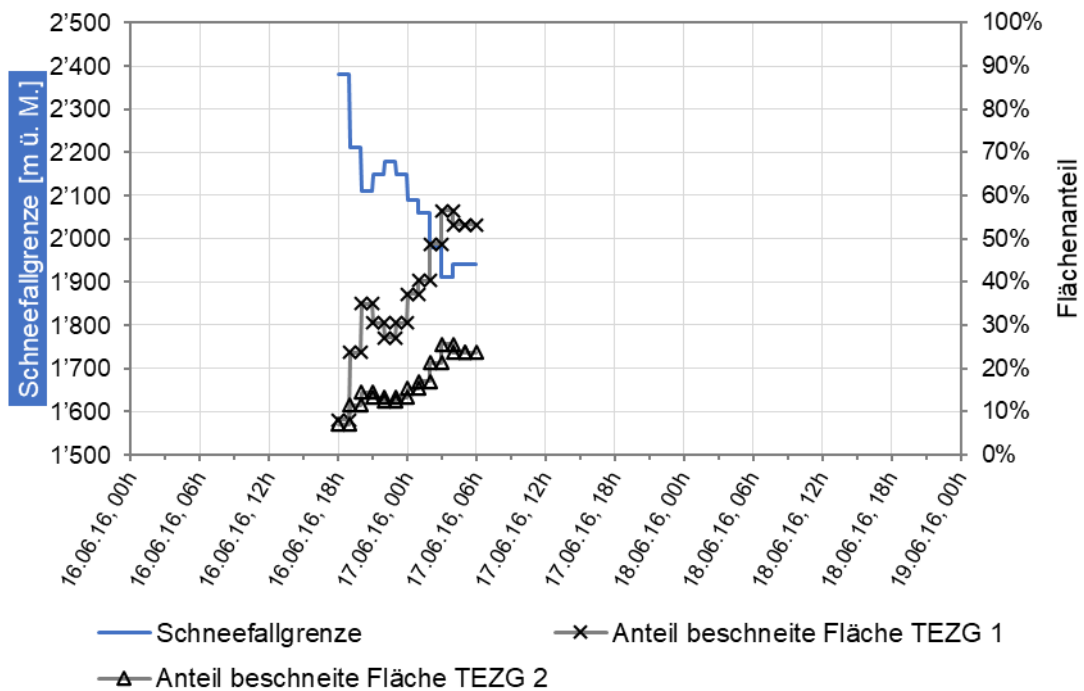


Abbildung 8: Abschätzung der Schneefallgrenze und der beschneiten EZG-Fläche für die TEZG 1 und 2 (Stundenmittel) während des Schneefalls am 16./17.6.2016

Die berechnete Schneefallgrenze sank von ca. 2'400 m ü. M. auf ca. 1'900 m ü. M. ab. Dadurch veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee sehr stark, insbesondere im TEZG 1. Am 16.6 um 19 Uhr fiel im TEZG 1 hauptsächlich Regen, am 17.6 um 3 Uhr fiel hingegen mehr Schnee als Regen. Im TEZG 2 veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee weniger stark. Während des gesamten Ereignisses fiel im TEZG 2 hauptsächlich Regen. Dies ist auf die tiefliegende mittlere Einzugsgebietshöhe des TEZG 2 zurückzuführen. Das TEZG 1 liegt auf einer mittleren Höhe von 1'920 m ü. M., im Gegensatz dazu liegt das TEZG 2 im Mittel rund 350 m tiefer auf einer mittleren Höhe von ca. 1'570 m ü. M.

4.2 Einordnung Hochwasserereignis vom 18.7.2009 (Rang 19)

4.2.1 Hochwasserverlauf

Beim Hochwasserereignis vom 18.7.2009 stieg der Abfluss im Pegel Seez-Mels ab ca. 18 Uhr am 17.7.2009 von 3.5 m³/s innerhalb von ca. 6 Stunden auf 39 m³/s an. Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 52 m³/s.

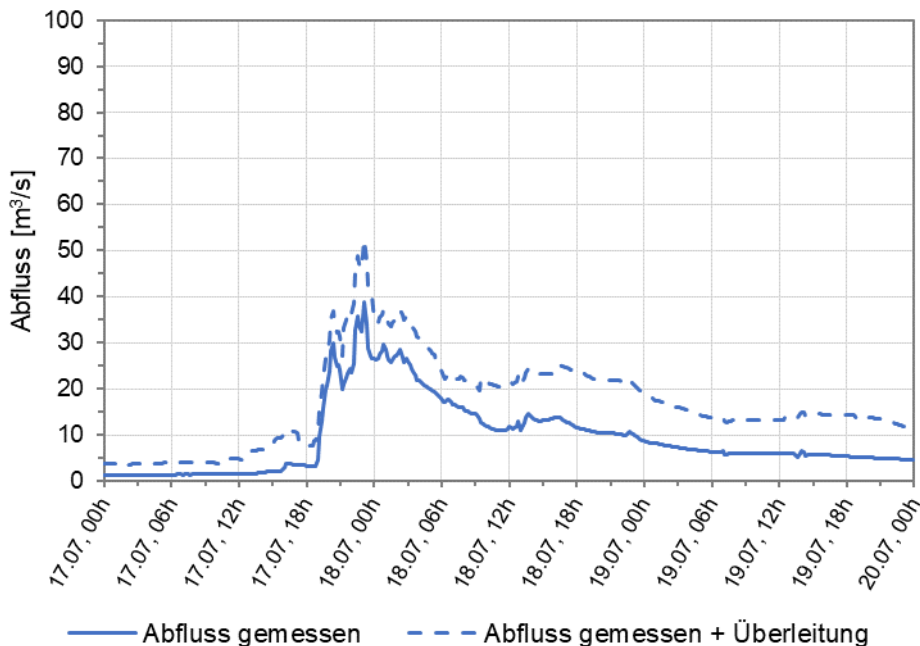


Abbildung 9: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 18.7.2009

4.2.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- 1. bis 4. Juli: Hochsommer. In der 2. Tageshälfte auch Gewitter. Im Norden am 3./4. vermehrt Gewitter.
- 5. bis 7. Juli: Ein Tief zieht nach Skandinavien und steuert schubweise feucht-warme, am 7. dann kühlere Luft zu den Alpen.
- 8. bis 10. Juli: Tief über Skandinavien. Der Zustrom feucht-kühler Luft aus Nordwest zur Deutschschweiz lässt zögernd nach.
- 11. bis 13. Juli: Aus Nordwesten fliesst feuchtere Warmluft zur Ostschweiz.
- 14. bis 16. Juli: Schwül-warme, am 16. etwas trockenere Luft strömt aus Südwesten zu den Alpen. Auf den 15. teils heftige Gewitter.
- 17. bis 18. Juli: Eine massive Regenzone mit starker Abkühlung überquert die Alpen.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 18.7.2009 von nassen Vorbedingungen (nasse Böden) auszugehen.

In den Monaten April und Mai 2009 lagen die Mitteltemperaturen gemäss Wetterarchiv der Schweiz rund 5 Grad höher als normal für diese Jahreszeit. Bereits ab ca. Mitte Mai lag bei der Station Wildsee auf einer Höhe von 2'468 m ü. M. kein Schnee.

Der Vorregenindex lässt in den TEZG 1 und 2 (Weisstannental) auf nasse Vorbedingungen schliessen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Vorregenindex VN5, VN10 und VN15 (Einheit mm) pro Teileinzugsgebiet beim Hochwasserereignis 18.7.2009 (Berechnung aus den n Tagesniederschlagssummen vor dem Ereignis auf Grundlage von CombiPrecip)

	VN5	VN10	VN15
TEZG 1	5.2	13.0	28.6
TEZG 2	3.0	12.6	25.6

4.2.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

In Abbildung 11 ist die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung ersichtlich. Für die Modellkalibrierung wurde auf Grundlage von CombiPrecip (Radar) pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der Niederschlagsmenge ermittelt (siehe Abbildung 10).

Innerhalb von 12 Stunden vor der Abflussspitze (ca. 23 Uhr am 17.7) fiel eine Niederschlagsmenge von ca. 40 mm, wovon ca. 30 mm in den letzten 6 Stunden vor der Abflussspitze fielen. Die maximale Niederschlagsintensität betrug verbreitet im ganzen Weisstannenental 4-6 mm/h, lokal im unteren Teil des Tals 6-20 mm/h. Die vom Radar geschätzte Niederschlagsintensität stimmt grösstenteils mit der gemessenen Niederschlagsintensität bei der Bodenstation Wildsee überein. Die vom Radar geschätzte Niederschlagssumme ist ca. 5 mm grösser als die von der Bodenstation Weisstannen gemessene Niederschlagssumme. Bei der Station Wildsee setzte der gemessene Niederschlag am 17.7 nach 21 Uhr plötzlich aus, weil der Regen- in Schneefall übergegangen ist, wobei letzterer vom unbeheizten Pluviometer nicht gemessen wurde (siehe Abbildung 12).

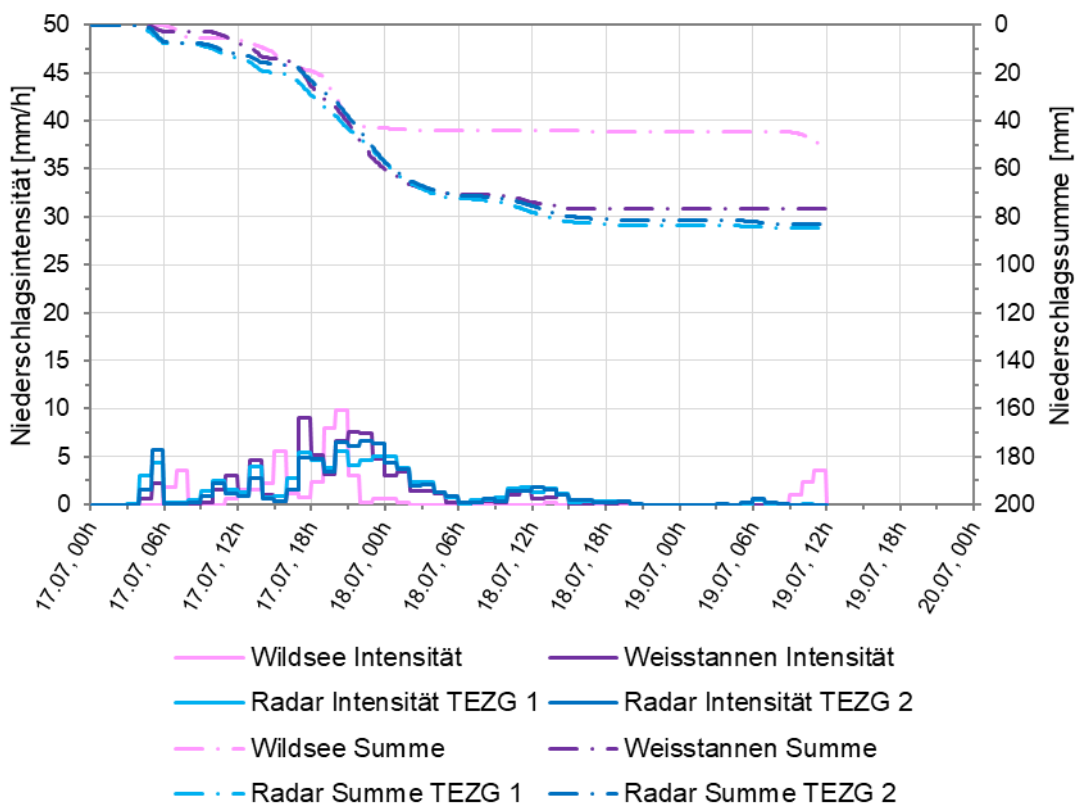


Abbildung 10: Niederschlagsintensitäten und -summen (räumliche CombiPrecip-Mittelwerte pro Teileinzugsgebiet) im Vergleich zu den Daten der Bodenstationen Wildsee (TAM2) und Weisstannen (MMWET) beim Hochwasser vom 18.7.2009

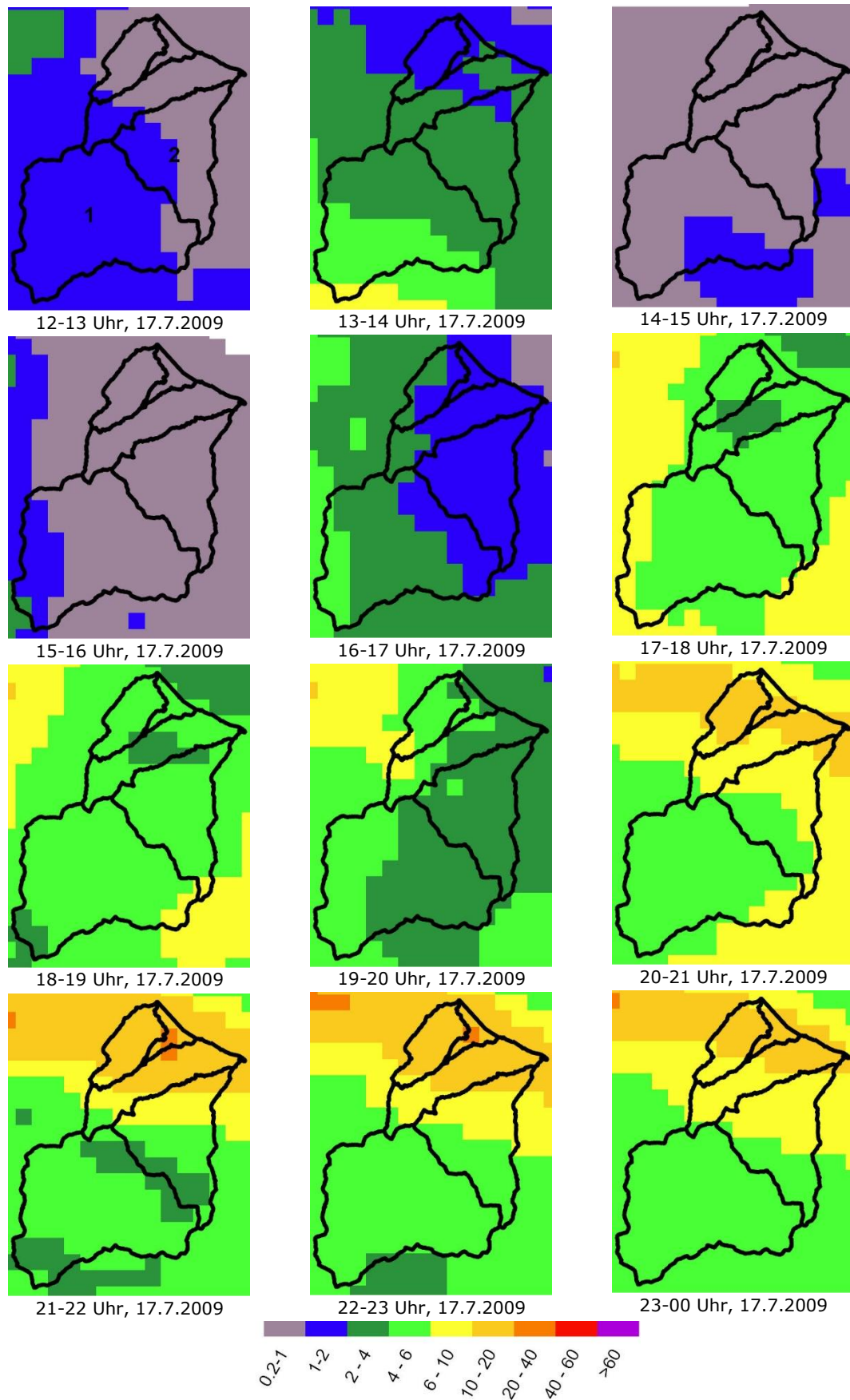


Abbildung 11: Niederschlag während des Hochwassers vom 18.7.2009: Stündliche Niederschlagsmengen in mm (Quelle: CombiPrecip, MeteoSchweiz)

Niederschlagsform

Die Datenauswertung der Station Wildsee (2'468 m ü. M.) zeigt folgendes:

Ab ca. 18 Uhr am 17.7 sank die Lufttemperatur von ca. 8 Grad bis um ca. 23 Uhr unter die Nullgradgrenze (siehe Abbildung 12). Gleichzeitig ging der Regen- in Schneefall über und die Schneehöhe nahm von ca. 21 Uhr am 17.7 bis um ca. 17 Uhr am 18.7 um ca. 30 cm zu. Der Niederschlag, welcher in fester Form (Schnee) fiel, wurde in den TEZG 1 und 2 zurückgehalten und war während des Hochwasserereignisses nicht abflusswirksam.

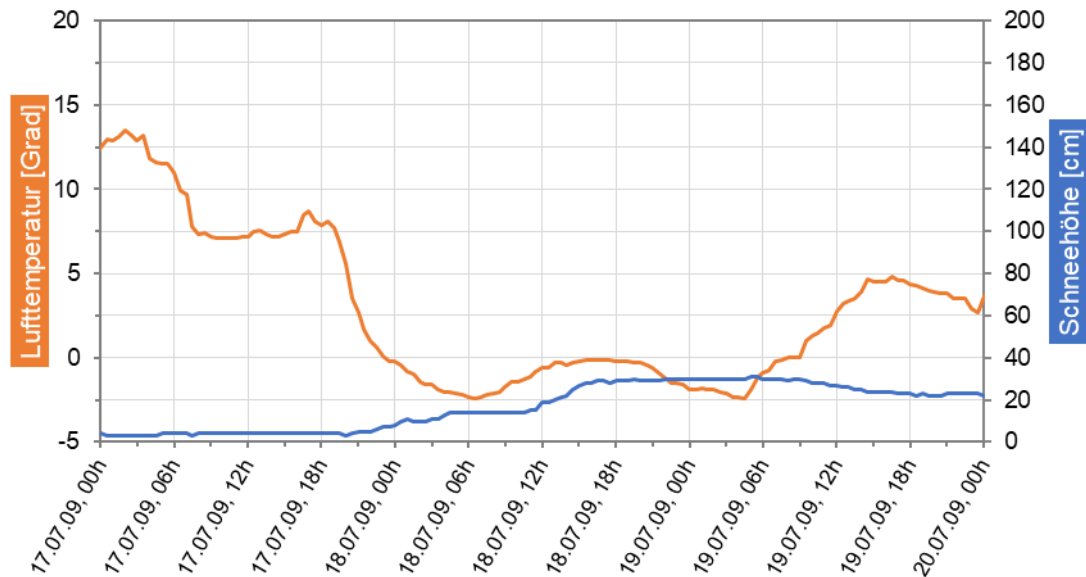


Abbildung 12: Lufttemperatur und Schneehöhe bei der Station Wildsee (30min-Mittel) vom 17.7.2009 bis 19.7.2009 (Quelle: [11])

Schneefallgrenze

Aufgrund der gemessenen Lufttemperatur und der Schneehöhe bei der Station Wildsee wird angenommen, dass der Niederschlag bis um ca. 21 Uhr am 17.7 im ganzen Weisstannental hauptsächlich in flüssiger Form (Regen) fiel. Anhand der gemessenen Lufttemperatur bei der Station Wildsee (Auswertung Stundemittel) wurde der zeitliche Verlauf der Schneefallgrenze ab 21 Uhr am 17.7 für das ganze Weisstannental abgeschätzt. Bei der Abschätzung wurden vereinfachende Annahmen getroffen (Methode siehe Kapitel 4.1.3). Anhand der ermittelten Schneefallgrenze und swissalti3D wurde pro Teileinzugsgebiet das Verhältnis von berechneter EZG-Fläche zu beschneiter EZG-Fläche abgeschätzt. In Abbildung 13 ist die Abschätzung der beschneiten EZG-Flächenanteile für die TEZG 1 und 2 ersichtlich.

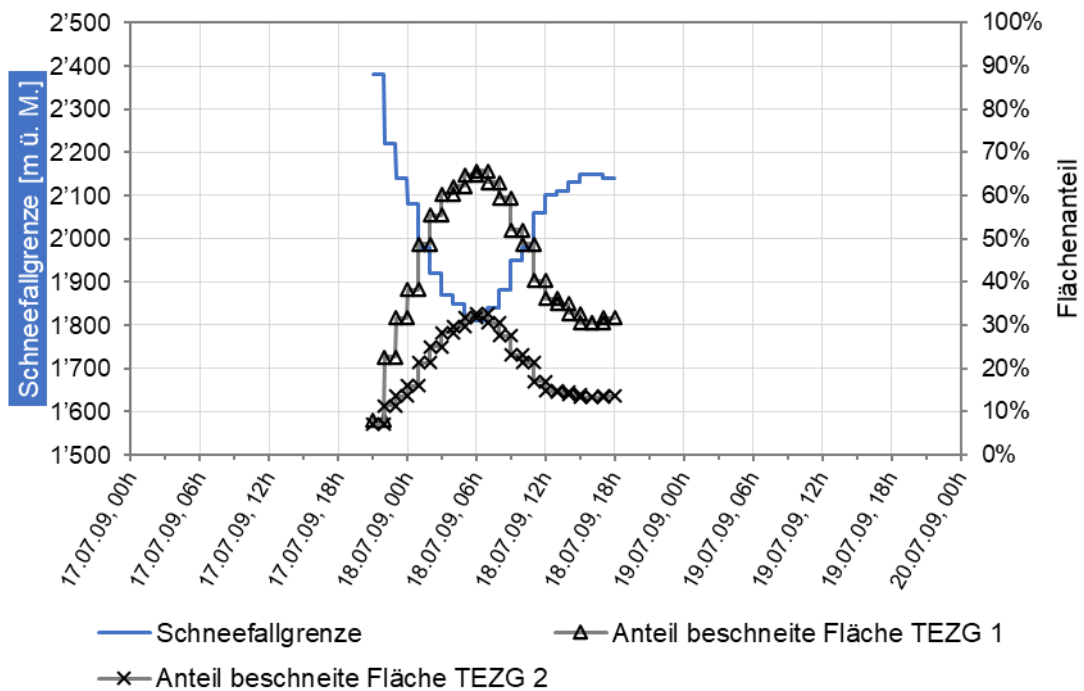


Abbildung 13: Abschätzung der Schneefallgrenze und der beschneiten EZG-Fläche für die TEZG 1 und 2 (Stundenmittel) während des Schneefalls am 17./18.7.2009

Die berechnete Schneefallgrenze sank von ca. 2'400 m ü. M. auf ca. 1'800 m ü. M. ab. Dadurch veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee sehr stark, insbesondere im TEZG 1. Am 17.7 um 21 Uhr fiel im TEZG 1 hauptsächlich Regen, am 18.7 um 6 Uhr fiel hingegen mehr Schnee als Regen. Im TEZG 2 veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee weniger stark. Während des gesamten Ereignisses fiel im TEZG 2 hauptsächlich Regen.

4.3 Einordnung Hochwasserereignis vom 13.7.2008 (Rang 14)

4.3.1 Hochwasserverlauf

Beim Hochwasserereignis vom 13.7.2008 stieg der Abfluss im Pegel Seez-Mels ab ca. 4 Uhr am 13.7.2008 von 4 m³/s innerhalb von ca. 3 Stunden auf 42 m³/s an. Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 49 m³/s.

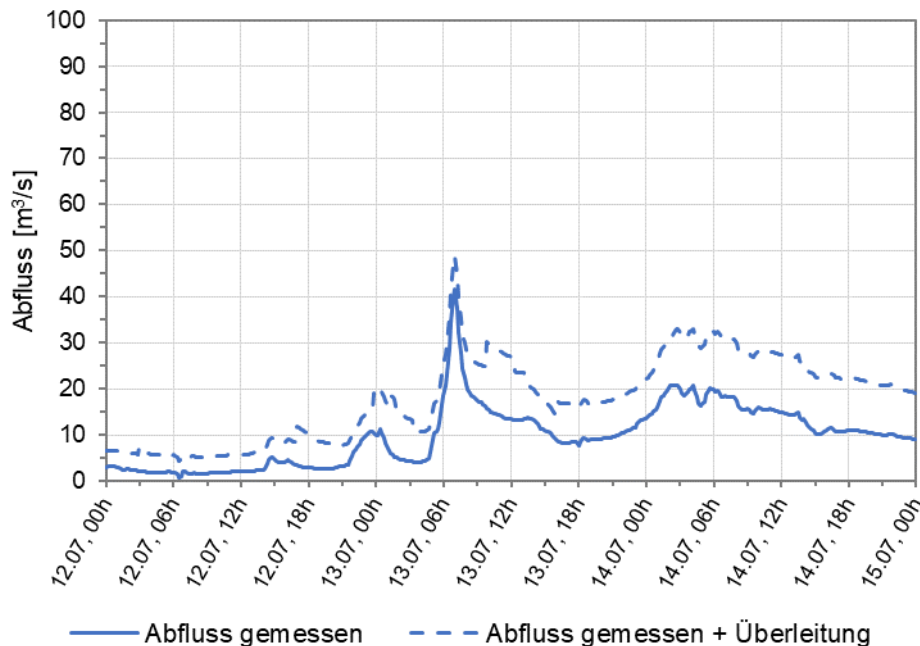


Abbildung 14: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 13.7.2008

4.3.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- 1. bis 2. Juli: Vor einer Störung fließt aus Südwesten schwül-warme Luft heran. Gewitterhaft. Am 3. Juli Störungsdurchzug aus Westen mit Schauer und Gewitter.
- 4. bis 5. Juli: Tief südwestlich von Irland. Die Alpen befinden sich noch in trockener Luft. Ziemlich oder meist sonnig.
- 6. bis 7. Juli: Das Tief zieht nach Schweden. Störungsdurchzug. Kühler. Zeitweise Schauer und Gewitter.
- 8. bis 10. Juli: Nördliche Westlage. Ein Ausläufer des Azorenhochs sorgt auch im Norden für zunehmend sonniges und wärmeres Wetter.
- 11. bis 14. Juli: Eine Luftmassengrenze überquert langsam aus Nordwesten die Alpen. Am 11. im Norden starke Gewitterregen. Insgesamt viel Regen und im Norden zunehmend kühl. Am 11. zuerst sonnig und sehr warm. Nachmittags vor allem entlang der Nordgrenze und in der Innerschweiz teils heftige Gewitter, lokal Sturm und Hagel. Am 12. und 13. teils ergiebiger Regen.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 13.7.2008 von nassen Vorbedingungen (nasse Böden) auszugehen.

Der Vorregenindex lässt in den TEZG 1 und 2 (Weisstannental) auf nasse Vorbedingungen schliessen (siehe Tabelle 8), insbesondere im TEZG 1.

Tabelle 8: Vorregenindex VN5, VN10 und VN15 (Einheit mm) pro Teileinzugsgebiet beim Hochwasserereignis 13.7.2008 (Berechnung aus den n Tagesniederschlags-summen vor dem Ereignis auf Grundlage von CombiPrecip)

	VN5	VN10	VN15
TEZG 1	18.2	38.2	66.3
TEZG 2	14.8	29.4	41.3

4.3.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

In Abbildung 16 ist die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung ersichtlich. Für die Modellkalibrierung wurde auf Grundlage von CombiPrecip (Radar) pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der Niederschlagsmenge ermittelt (siehe Abbildung 15).

Innerhalb von 12 Stunden vor der Abflussspitze (ca. 7 Uhr am 13.7) fiel eine Niederschlagsmenge von ca. 30-40 mm. Das Niederschlagsereignis war in mehrere Phasen unterteilt. Die maximale Niederschlagsintensität variierte räumlich sehr stark, von gebietsweise 4-10 mm/h bis lokal im unteren Teil des Tals 10-20 mm/h. Die vom Radar geschätzte Niederschlagsintensität weicht zeitweise deutlich von der gemessenen Niederschlagsintensität bei der Station Wildsee ab. Bei der Station Wildsee setzte der gemessene Niederschlag am 13.7 nach 22 Uhr plötzlich aus, weil der Regen- in Schneefall übergegangen ist, wobei letzterer vom unbeheizten Pluviometer nicht gemessen wurde (siehe Abbildung 17).

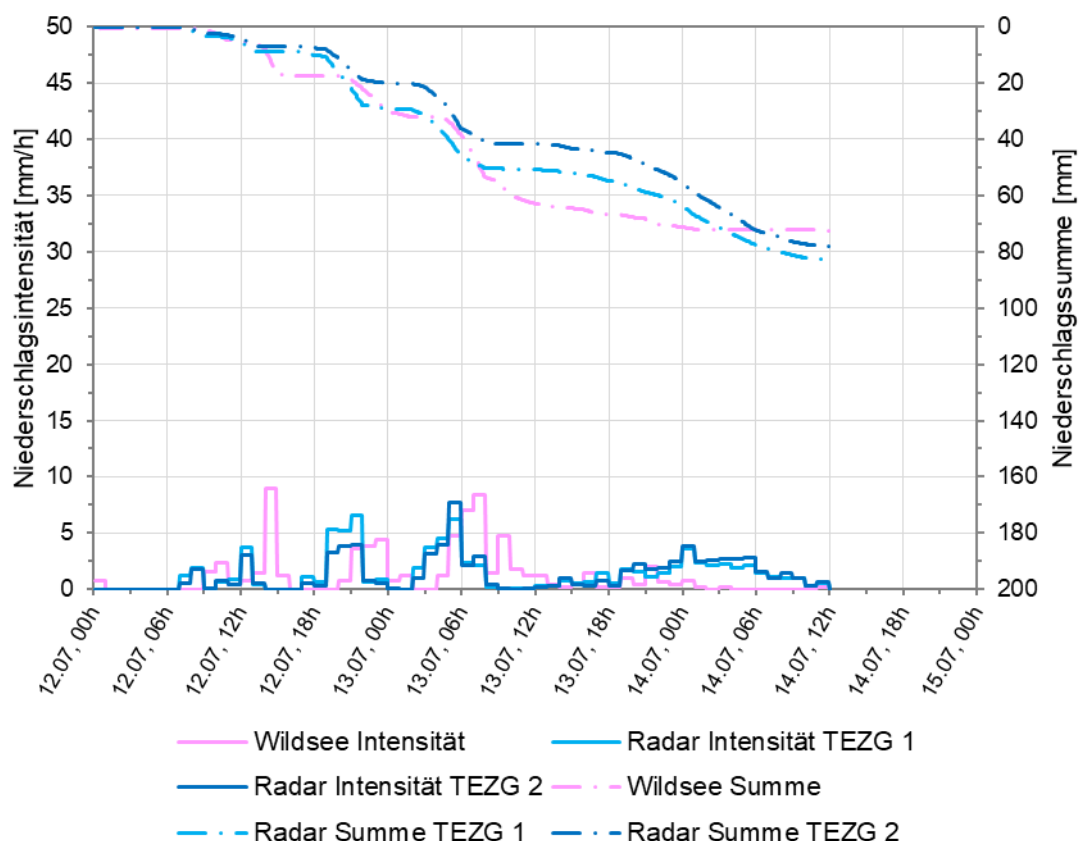


Abbildung 15: Niederschlagsintensitäten und -summen (räumliche CombiPrecip-Mittelwerte pro Teileinzugsgebiet) im Vergleich zu den Daten der Bodenstation Wildsee (TAM2) beim Hochwasser vom 13.7.2008

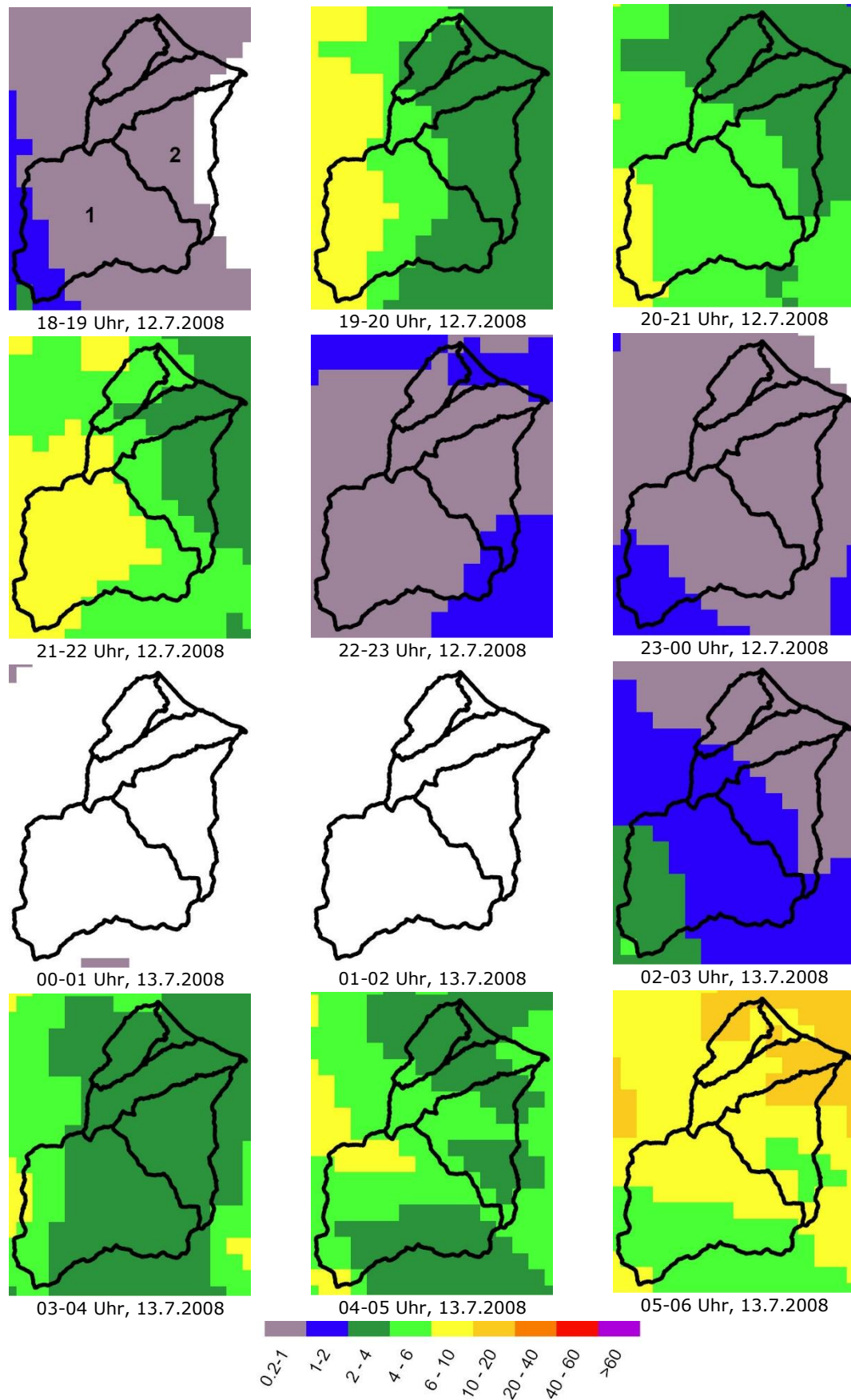


Abbildung 16: Niederschlag während des Hochwassers vom 13.7.2008: Stündliche Niederschlagsmengen in mm (Quelle: CombiPrecip, MeteoSchweiz)

Niederschlagsform

Die Datenauswertung der Station Wildsee (2'468 m ü. M.) zeigt folgendes:

Ab ca. 8 Uhr am 12.7 sank die Lufttemperatur von ca. 8 Grad bis um ca. 1 Uhr am 14.7 unter die Nullgradgrenze (siehe Abbildung 17). Gleichzeitig ging der Regen- in Schneefall über und die Schneehöhe nahm von ca. 0 Uhr am 14.7 bis um ca. 15 Uhr um ca. 20 cm zu. Der Niederschlag, welcher in fester Form (Schnee) fiel, wurde in den TEZG 1 und 2 zurückgehalten und war während des Hochwasserereignisses nicht abflusswirksam.

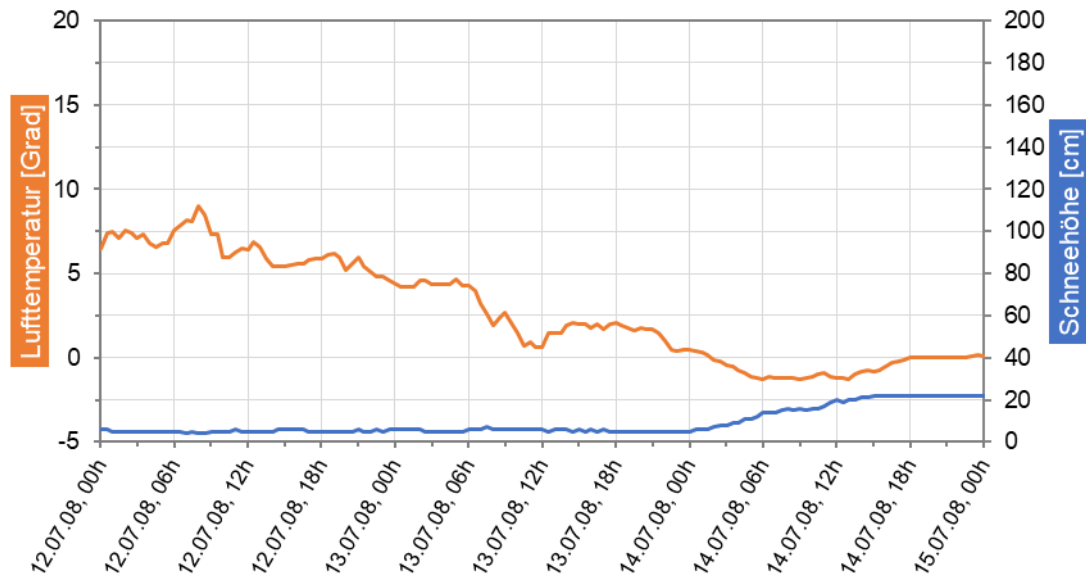


Abbildung 17: Lufttemperatur und Schneehöhe bei der Station Wildsee (30min-Mittel) vom 12.7.2008 bis 14.7.2008 (Quelle: [11])

Schneefallgrenze

Aufgrund der gemessenen Lufttemperatur und der Schneehöhe bei der Station Wildsee wird angenommen, dass der Niederschlag bis um ca. 22 Uhr am 13.7 im ganzen Weisstannental hauptsächlich in flüssiger Form (Regen) fiel. Anhand der gemessenen Lufttemperatur bei der Station Wildsee (Auswertung Stundemittel) wurde der zeitliche Verlauf der Schneefallgrenze ab 21 Uhr am 13.7 für das ganze Weisstannental abgeschätzt. Bei der Abschätzung wurden vereinfachende Annahmen getroffen (Methode siehe Kapitel 4.1.3). Anhand der ermittelten Schneefallgrenze und swissalti3D wurde pro Teileinzugsgebiet das Verhältnis von berechneter EZG-Fläche zu beschneiter EZG-Fläche abgeschätzt. In Abbildung 13 ist die Abschätzung der beschneiten EZG-Flächenanteile für die TEZG 1 und 2 ersichtlich.

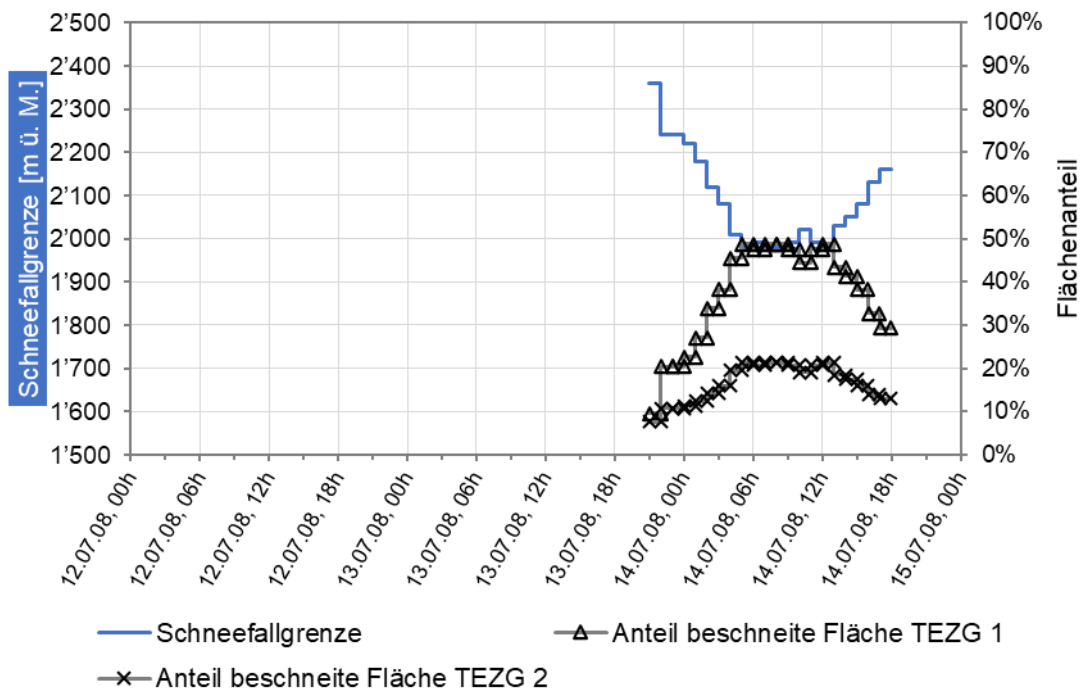


Abbildung 18: Abschätzung der Schneefallgrenze und der beschneiten EZG-Fläche für die TEZG 1 und 2 (Stundenmittel) während des Schneefalls am 13./14.7.2008

Die berechnete Schneefallgrenze sank von ca. 2'400 m ü. M. auf ca. 2'000 m ü. M. ab. Dadurch veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee sehr stark, insbesondere im TEZG 1. Am 13.7 um 22 Uhr fiel im TEZG 1 hauptsächlich Regen, am 14.7 um 6 Uhr fiel gleich viel Schnee wie Regen. Im TEZG 2 veränderte sich das Verhältnis von Regen zu Schnee weniger stark. Während des gesamten Ereignisses fiel im TEZG 2 hauptsächlich Regen.

4.4 Einordnung Hochwasserereignis vom 17.9.2006 (Rang 16)

4.4.1 Hochwasserverlauf

Beim Hochwasserereignis vom 17.9.2006 stieg der Abfluss im Pegel Seez-Mels ab ca. 4 Uhr am 16.9.2006 von 1 m³/s innerhalb von ca. 2 Stunden auf 41 m³/s an. Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 42 m³/s.

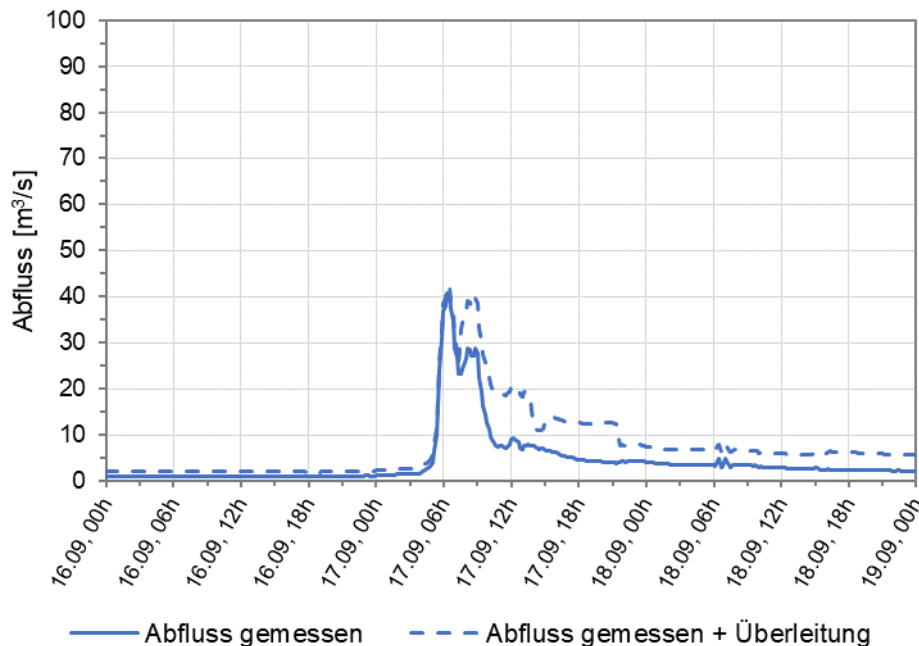


Abbildung 19: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 17.9.2006

4.4.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- 1. September: Hoch südl. der Alpen. Sonnig.
- 2. bis 3. September: Nördlich vorbeiziehende Störungen streifen die Alpennordseite. Warm.
- 4. bis 5. September: Hoch über Frankreich: Zustrom trockener, sehr warmer Luft aus Westen. Meist sonnig. Nullgradgrenze auf 4700 m ü. M.
- 6. bis 8. September: Das Hoch über Mitteleuropa baut sich ab. Eine Störung aus Norden bringt auf den 8. teils starke Gewitter und eine Abkühlung.
- 9. bis 13. September: Ein neues Hoch zieht über Mittel- nach Osteuropa und sorgt erneut für spätsommerlich warmes Wetter. Lokal gewitterhaft, aber verbreitet trocken oder nur wenig Regen. Am 13. am Alpennordhang Föhneinsatz.
- 14. bis 16. September: Tief über Frankreich. Im Süden ergiebige Stauregen, im Norden föhnig, aber wenig Sonne. Am 16. Kurze Beruhigung. Am Alpennordhang föhnig, trocken. Am 16. ziemlich sonnig, nachts dann viel Regen an den zentralen und östlichen Voralpen.
- 17. bis 19. September: Das Tief zieht über Oberitalien nach Polen und führt sehr feuchte Luft vor allem zur Deutschschweiz. Regen, am Alpennordhang und im Jura und Mittelland der Deutschschweiz teils sehr ergiebig.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 17.9.2006 von trockenen Vorbedingungen (trockene Böden) auszugehen.

Der Vorregenindex lässt in den TEZG 1 und 2 (Weisstannental) auf trockene Vorbedingungen schliessen (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Vorregenindex VN5, VN10 und VN15 (Einheit mm) pro Teileinzugsgebiet beim Hochwasserereignis 17.9.2006 (Berechnung aus den n Tagesniederschlags-summen vor dem Ereignis auf Grundlage von CombiPrecip)

	VN5	VN10	VN15
TEZG 1	2.4	16.4	16.7
TEZG 2	1.6	13.6	13.7

4.4.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

In Abbildung 21 ist die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung ersichtlich. Für die Modellkalibrierung wurde auf Grundlage von CombiPrecip (Radar) pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der Niederschlagsmenge ermittelt (siehe Abbildung 20).

Innerhalb von 6 Stunden vor der Abflussspitze (ca. 6 Uhr am 17.9) fiel im Weisstannental eine Niederschlagsmenge von ca. 45-50 mm. Die maximale Niederschlagsintensität betrug verbreitet im ganzen Weisstannental 10-20 mm/h. Die vom Radar geschätzte Niederschlags-summe stimmt zwar gut mit der gemessenen Niederschlagssumme bei der Bodenstation Wildsee überein, die zeitliche Verteilung des Niederschlags ist aber anders. Die bei der Station Wildsee gemessene zeitliche Niederschlagsverteilung zeigt annäherungsweise einen dreiecksförmigen Verlauf mit einer Spitze nach ca. 2/3 der gesamten Ereignisdauer. Die vom Radar geschätzte Niederschlagsintensität weicht jedoch zwischen 00-01 Uhr am 17.9 deutlich von der gemessenen Niederschlagsintensität bei der Bodenstation Wildsee ab.

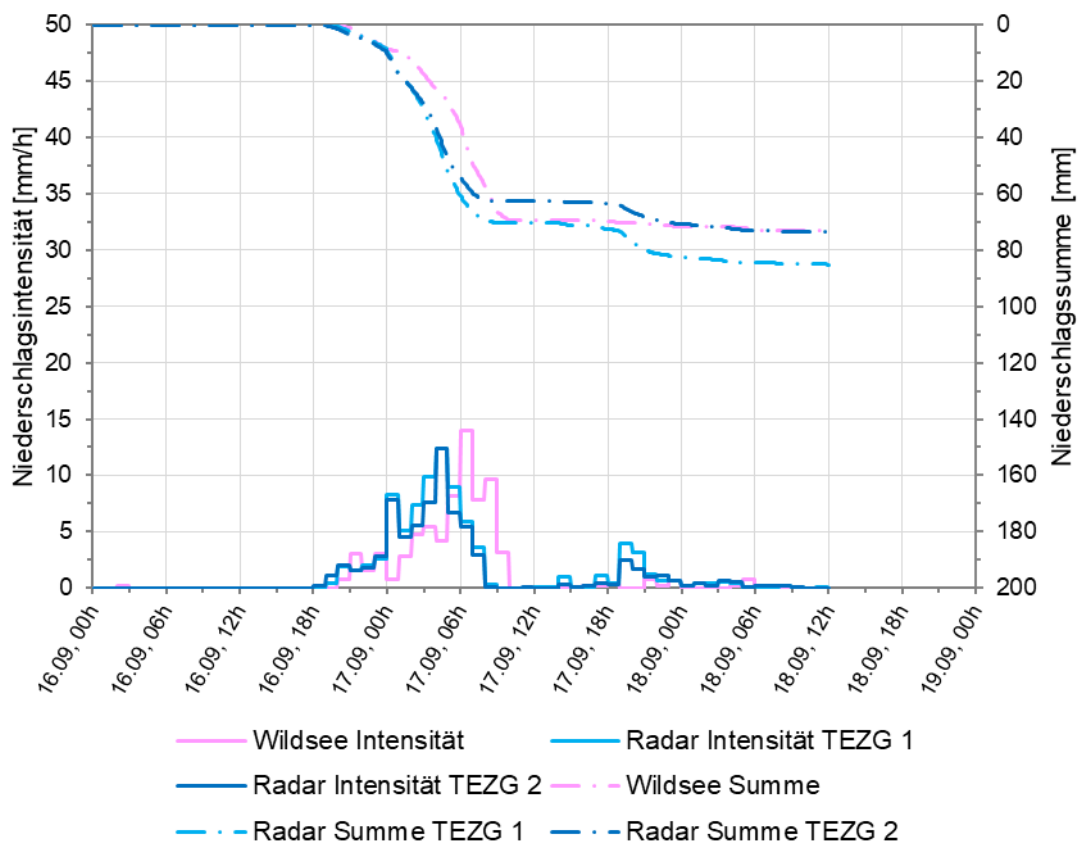


Abbildung 20: Niederschlagsintensitäten und -summen (räumliche CombiPrecip-Mittelwerte pro Teileinzugsgebiet) im Vergleich zu den Daten der Bodenstation Wildsee (TAM2) beim Hochwasser vom 17.9.2006

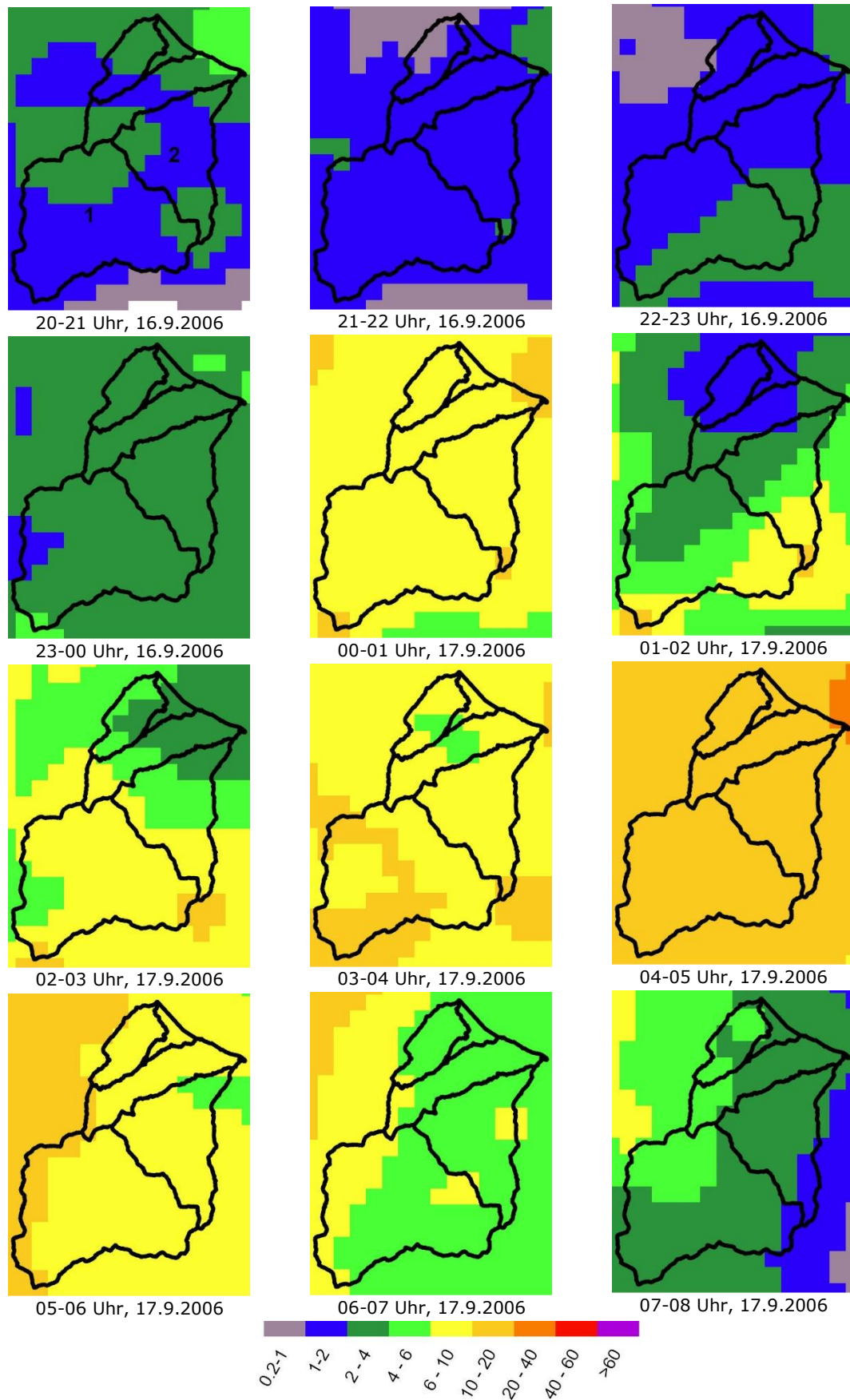


Abbildung 21: Niederschlag während des Hochwassers vom 17.9.2006: Stündliche Niederschlagsmengen in mm (Quelle: CombiPrecip, MeteoSchweiz)

Niederschlagsform

Die Datenauswertung der Station Wildsee (2'468 m ü. M.) zeigt folgendes:

Ab ca. 14 Uhr am 16.9 sank die Lufttemperatur von ca. 9 Grad bis um ca. 3 Uhr am 17.9 auf ca. 5 Grad ab (siehe Abbildung 17). Um 6 Uhr ist die Station temporär ausgefallen. Während des Ausfalls ist die Lufttemperatur plötzlich auf 2.5 Grad gesunken. Die Schneehöhe nahm von ca. 3 Uhr am 17.9 bis um ca. 7 Uhr leicht um wenige Zentimeter zu. Es ist schwierig einzuschätzen, ob es sich beim leichten Anstieg der Schneehöhe um einen Messfehler handelt oder ob der Niederschlag tatsächlich in fester Form (Schnee oder Schneeregen) gefallen ist, obwohl die Lufttemperatur positiv war bzw. die Nullgradgrenze deutlich oberhalb der Station lag.

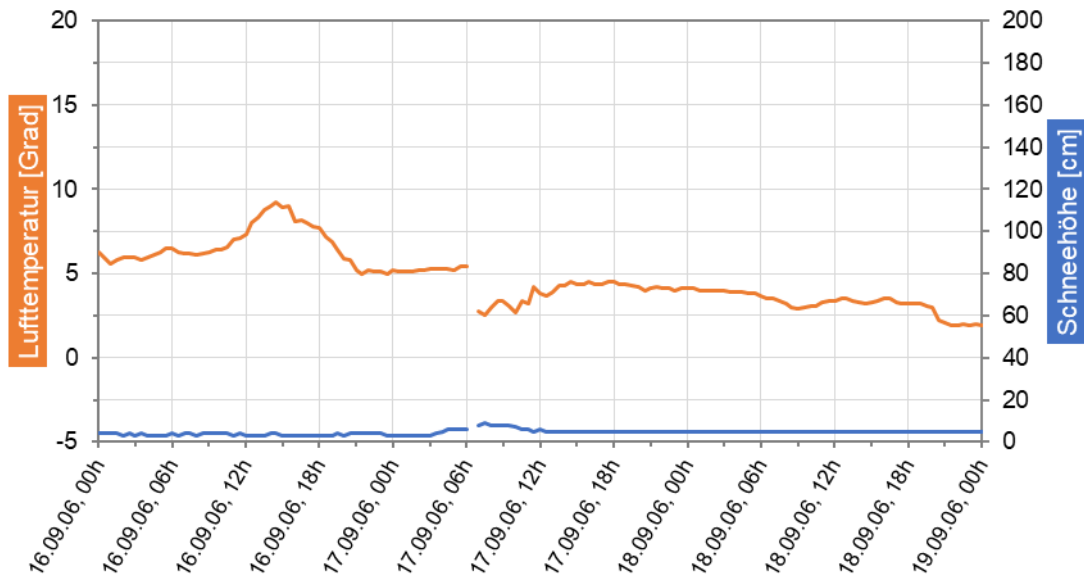


Abbildung 22: Lufttemperatur und Schneehöhe bei der Station Wildsee (30min-Mittel) vom 16.9.2006 bis 18.9.2006 (Quelle: [11])

Die Ursache für die Zunahme der Schneehöhe lässt sich mit den vorliegenden Daten (Lufttemperatur und der Schneehöhe bei der Station Wildsee) nicht ermitteln. Aus diesem Grund wird angenommen, dass der Niederschlag während des gesamten Ereignisses in flüssiger Form (Regen) fiel.

4.5 Einordnung Hochwasserereignis vom 23.8.2005 (Rang 3)

4.5.1 Hochwasserverlauf

Beim Hochwasserereignis vom 23.8.2005 stieg der Abfluss im Pegel Seez-Mels ab ca. 12 Uhr am 22.8.2005 von 6 m³/s innerhalb von ca. 17 Stunden auf 61 m³/s an. Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 68 m³/s.

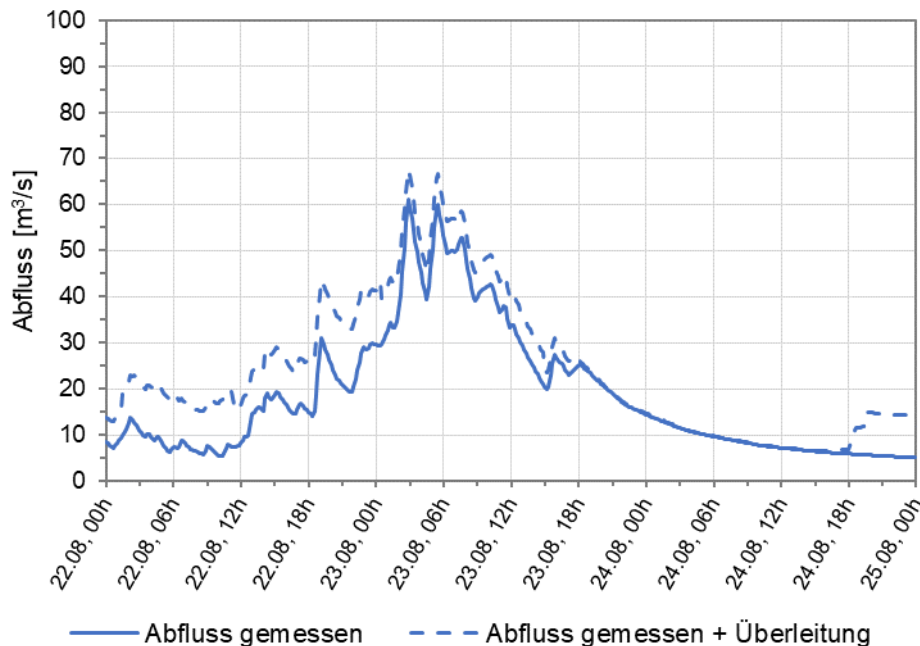


Abbildung 23: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 23.8.2005

4.5.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- 1. bis 3. August: Eine kräftige Gewitterstörung aus Westen bringt weiten Landesteilen ergiebigen Regen und im Norden eine deutliche Abkühlung.
- 4. bis 5. August: Ein Ausläufer des Azorenhochs bringt vorübergehend den Sommer zurück.
- 6. bis 7. August: Ein Skandinavientief führt feuchte Polarluft vor allem zur Deutschschweiz.
- 8. bis 10. August: Mit westlichen Höhenwinden strömt trockene Luft zu den Alpen. Meist sonnig, zu Beginn im Norden sehr kühle Nächte.
- 11. August: Ein Gewittertief zieht südlich der Alpen vorbei. Im Norden sonnig. In den Alpen örtlich Gewitter.
- 12. bis 13. August: Eine schwache Störung bringt der Alpennordseite nachts Regen.
- 14. bis 17. August: Ein Tief wandert aus Nordwesten zum Golf von Venedig. Es steuert aus Nordosten feuchtkühle Luft vor allem zur Deutschschweiz. Häufige, im Osten und am Alpennordhang ergiebige Niederschläge. Am 17. August: Zwischenhoch.
- 18. bis 19. August: Ein Tief über Frankreich steuert aus Südwesten feuchtere Luft heran.
- 20. bis 23. August: Das Tief zieht über Oberitalien zu den Ostalpen und am 23. zum Balkan. Zuerst im S viel Regen, am 21. und 22. Extremer Regen am Alpennordhang. Grosse Unwetterschäden.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 23.8.2005 von sehr nassen Vorbedingungen (sehr nasse Böden) auszugehen.

Der Vorregenindex lässt in den TEZG 1 und 2 (Weisstannental) auf sehr nasse Vorbedingungen schließen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Vorregenindex VN5, VN10 und VN15 (Einheit mm) pro Teileinzugsgebiet beim Hochwasserereignis 23.8.2005 (Berechnung aus den n Tagesniederschlagssummen vor dem Ereignis auf Grundlage von CombiPrecip)

	VN5	VN10	VN15
TEZG 1	48.5	61.4	65.1
TEZG 2	39.1	51.6	54.6

4.5.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

In Abbildung 25 ist die zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung ersichtlich. Für die Modellkalibrierung wurde auf Grundlage von CombiPrecip (Radar) pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der Niederschlagsmenge ermittelt (siehe Abbildung 24).

Innerhalb von 18 Stunden vor der Abflussspitze (ca. 3 Uhr am 23.8) fiel im Weisstannental eine Niederschlagsmenge von ca. 65-75 mm. Die maximale Niederschlagsintensität betrug verbreitet im ganzen Weisstannental 6-10 mm/h. Die vom Radar geschätzte Niederschlagsintensität weicht ab 3 Uhr am 23.8 deutlich von der gemessenen Niederschlagsintensität bei der Bodenstation Wildsee ab. Die vom Radar geschätzte Niederschlagssumme ist ca. 30-40 mm kleiner als die gemessene Niederschlagssumme bei der Bodenstation Wildsee. Die Ursache für diese Abweichung bzw. diesen Unterschied lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht ermitteln. Möglicherweise weisen die Schätzungen der Radarstationen für dieses Niederschlagsereignis eine ungenügende Qualität auf.

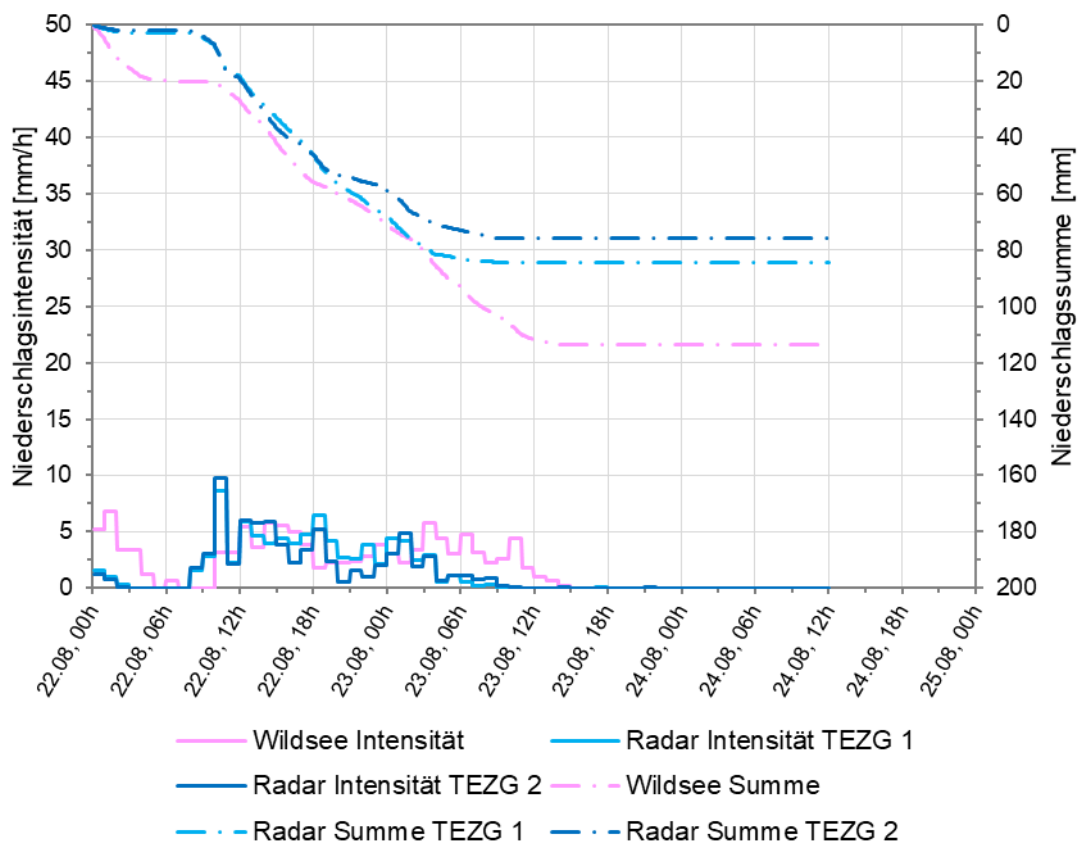


Abbildung 24: Niederschlagsintensitäten und -summen (räumliche CombiPrecip-Mittelwerte pro Teileinzugsgebiet) im Vergleich zu den Daten der Bodenstation Wildsee (TAM2) beim Hochwasser vom 23.8.2005

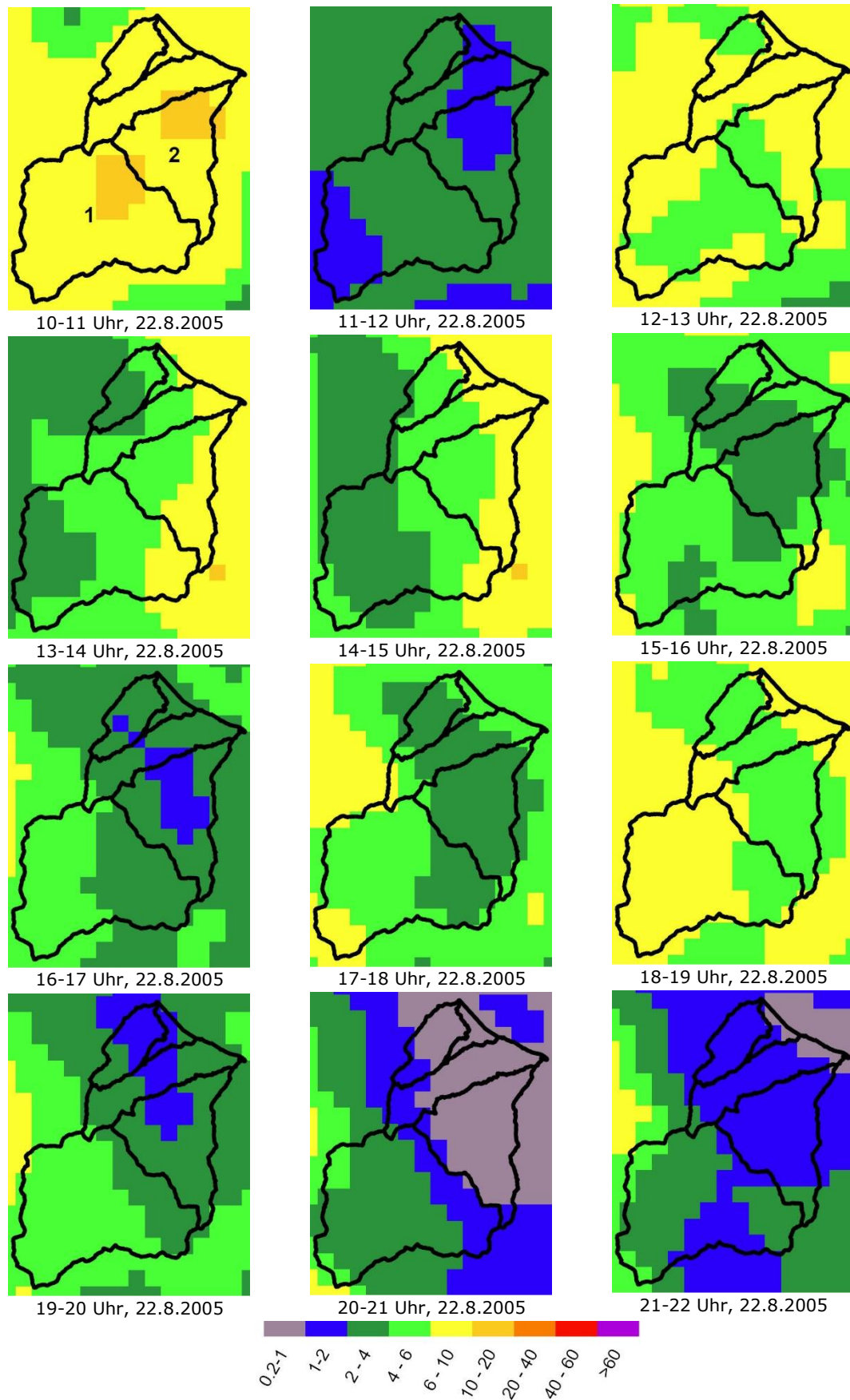


Abbildung 25: Niederschlag während des Hochwassers vom 23.8.2005: Stündliche Niederschlagsmengen in mm (Quelle: CombiPrecip, MeteoSchweiz)

Niederschlagsform

Die Datenauswertung der Station Wildsee (2'468 m ü. M.) zeigt folgendes:

Ab ca. 14 Uhr am 22.8 sank die Lufttemperatur von ca. 5 Grad bis um 9 Uhr am 23.8 auf ca. 2.5 Grad ab (siehe Abbildung 24). Im Zeitraum vom 23.8 bis am 24.8 ist die Station dreimal temporär ausgefallen. Die Schneehöhe blieb konstant auf ca. 0 cm (an vielen Stationen wächst im Sommer Gras, welches vom Ultraschallsensor als Schneehöhe gemessen wird).

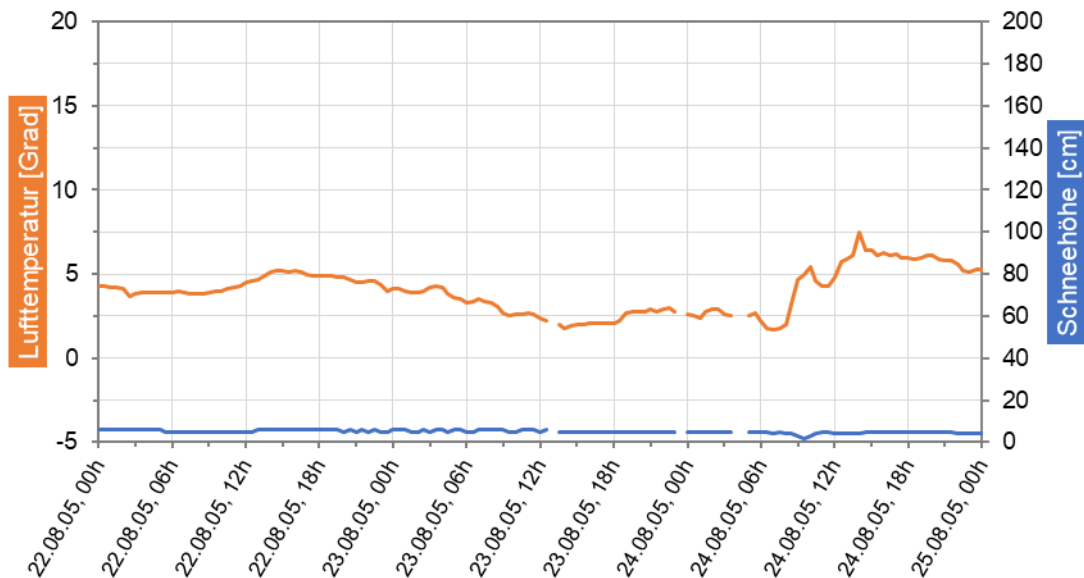


Abbildung 26: Lufttemperatur und Schneehöhe bei der Station Wildsee (30min-Mittel) vom 22.8.2005 bis 24.8.2005 (Quelle: [11])

Aufgrund der gemessenen Lufttemperatur und der Schneehöhe bei der Station Wildsee wird angenommen, dass der Niederschlag während des gesamten Ereignisses in flüssiger Form (Regen) fiel.

4.6 Einordnung Hochwasserereignis vom 18.7.1987 (Rang 1)

4.6.1 Hochwasserverlauf

Das Hochwasserereignis vom 18.7.1987 weist einen zweigipfligen Verlauf auf. Im Pegel Seez-Mels sank der Abfluss nach einer ersten Spitze von 39 m³/s um 7 Uhr am 18.7 auf 15 m³/s. Etwa um 15 Uhr, rund 8 Stunden später, nahm der Abfluss wieder zu und erreichte um 17.30 Uhr (2.5 Stunden später) die zweite Spitze von 75 m³/s. Berücksichtigt man den Einfluss der Überleitungen aus dem EZG der Seez in den Stausee Gigerwald, so ergibt sich eine natürliche Abflussspitze von 84 m³/s.

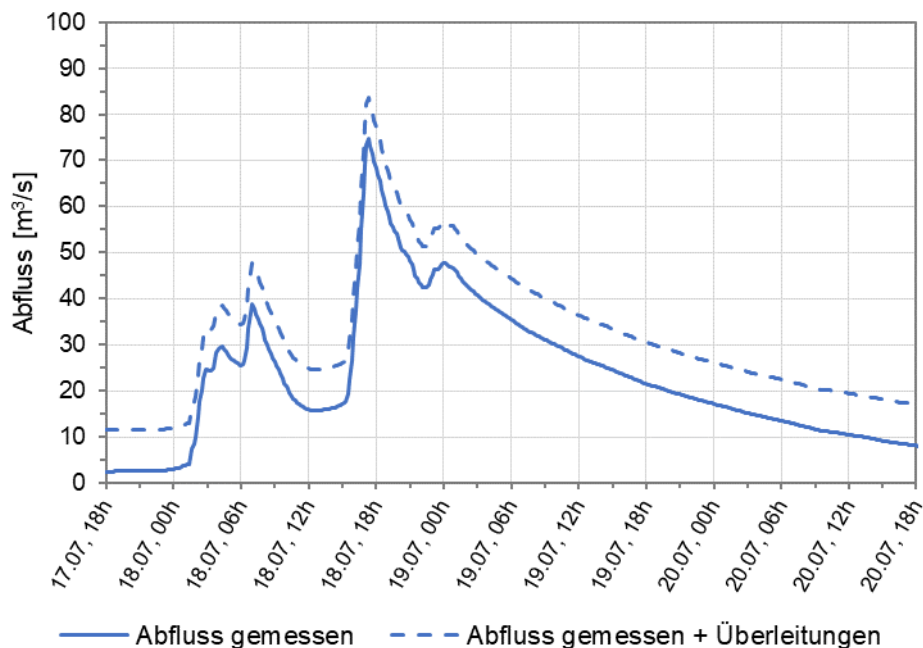


Abbildung 27: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 18.7.1987

4.6.2 Witterungsverlauf / Vorbedingungen

Witterungsverlauf gemäss Wetterarchiv der Schweiz (Wetter Deutschschweiz):

- 1. bis 9. Juli: Teilweise bis ziemlich sonnig, sommerlich warm. Nullgradgrenze bis gegen 4'000 m ü. M. steigend. Verbreitete Gewitter mit örtlich sehr starken Schauerregen, zum Teil mit Hagel.
- 10. bis 13. Juli: Vom Ostatlantik zieht ein Hoch über Mitteleuropa hinweg zum Balkan. Sonnig und warm. Nullgradgrenze auf 4'000 m ü. M. steigend. Am 12. nachmittags lokale Regenschauer und Gewitter.
- 14. bis 23. Juli: Ein Tiefdruckwirbel zieht von Island nach Grossbritannien und bleibt dort stationär. Aus Nordwesten strömt kühle Meeresluft bis zu den Alpen. In der Höhe herrscht eine mässige Südwestströmung.

Folgerung: Aufgrund des Witterungsverlaufes ist beim Hochwasser vom 18.7.1987 von trockenen Vorbedingungen (trockene Böden) auszugehen.

4.6.3 Niederschlagsverlauf

Niederschlagsverteilung

Die Auswertung der zeitlichen Niederschlagsverteilung (Niederschlagssummen) für dieses Ereignis ist in Tabelle 11 zusammengefasst. Innerhalb von 12 Stunden vor der ersten Abflussspitze fiel eine Niederschlagsmenge von ca. 63 mm, anschliessend nochmals 49 mm bis zur zweiten Abflussspitze.

Tabelle 11: Gemessene 3h-Niederschlagssummen in Weisstannen zum Hochwasserereignis vom 18./19.7.1987 gemäss Analyse im Bericht von Grebner u. Richter 1989 (Quelle: [9])

		Niederschlagssumme Weisstannen [mm]			
Tag	Zeit	3h	12h	24h	36h
17.7	18 – 21	3	63	112	143
	21 – 24	17			
18.7	0 – 3	27			
	3 – 6	17			
	6 – 9	9			
	9 – 12	8	31		
	12 – 15	17			
	15 -18	14			
	18 – 21	9	31		
	21 – 24	9			
	19.7	0 – 3	8		
3 – 6		5			

Weitere Stationen in der Umgebung für eine Abschätzung der mittleren räumlichen Niederschlagsverteilung mittels Interpolation liegen nicht vor. Aus diesem Grund wurde das Jahreshochwasser 1987 nicht für die Modellkalibrierung verwendet.

5. BEURTEILUNG DER ABFLUSSREAKTION IM EINZUGSGEBIET

Für die Beurteilung des Abflussverhaltens bei extremem Starkregen sind Kenntnisse über die Abflussreaktion im EZG notwendig. Die Abflussreaktion hängt vor allem davon ab, welcher Anteil des Starkregens unverzüglich oberflächlich abfließt und welcher Anteil des Starkregens in den Boden infiltriert und zwischengespeichert wird. Wie gross der Anteil der unterschiedlichen Abflussprozesse am Gesamtabfluss ist, wird von den Gegebenheiten im EZG beeinflusst, z.B. durch das Infiltrations- und Speichervermögen der Böden, die Geländeneigung, die Vegetation und die Geologie.

5.1 Boden und Geologie

Für das EZG der Seez liegt flächendeckend die Bodeneignungskartekarte im Massstab 1:200'000 [15] vor. Auf Grundlage der Bodeneignungskartekarte wurden das Infiltrations- und Speichervermögen der Böden beurteilt und so die zu erwartenden Abflussprozesse bestimmt.

Für die hydrogeologische Beschreibung des EZG der Seez wurde die hydrogeologische Karte der Schweiz (Massstab 1:100'000) [3] und der geologische Atlas der Schweiz (Massstab 1:25'000) [4] herangezogen. Wenn sowohl der Boden als auch der geologische Untergrund gut durchlässig ist, kann während eines Starkregens ein grosser Anteil des Niederschlags in den Boden und den geologischen Untergrund eindringen (Tiefenversickerung). Auf Grundlage der Karten wurde die Durchlässigkeit des geologischen Untergrunds für die am häufigsten vorkommenden Fest- und Lockergesteine im EZG der Seez beurteilt.

Festgesteine im EZG der Seez:

- Tonschiefer und tonige Kalkschiefer sowie Verrucano mit geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit

Lockergesteine im EZG der Seez:

- Moränen mit uneinheitlicher Durchlässigkeit
- Lehmhaltige, kiesarme Schuttbildungen mit mittelgrosser bis geringer Durchlässigkeit (Bergsturzschutt, Gehängeschutt, Bachschuttkegel)

5.2 Abflusstypen

Tabelle 12 zeigt die Klassifizierung der Abflussbereitschaft. Die Beurteilung der Abflussreaktion stützt sich auf die Erkenntnisse aus den vorangehenden Kapiteln und lehnt sich an das Vorgehen bzw. den Bestimmungsschlüssel in [1] an. Das Vorgehen ermöglicht die Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen und unterteilt diese Flächen in verschiedene Abflusstypen mit einer charakteristischen Abflussreaktion.

Mit einem Anteil von 96.2% dominieren die natürlichen Flächen im EZG (siehe Tabelle 12). Flächen des Abflusstyps 1 (z.B. Felsflächen) kommen im EZG vor allem im oberen Weisstantal vor (9.7%). Die Flächen des Abflusstyps 2 (26.2%) sind Flächen entlang der Gewässer, Gletscherflächen, grundnasse Böden oder gering bis mässig speicherfähige Böden mit gehemmtem bis stark gehemmtem Infiltrationsvermögen. Zum Abflusstyp 3 (27.7%) gehören Böden mit normalem oder nur schwach gehemmtem Infiltrationsvermögen an. Der Abflusstyp 4 (Waldflächen sowie durchlässige und speicherfähige Böden) erstreckt sich über ca. 19.6% des EZG. Der Flächenanteil des Abflusstyps 5 (durchlässige Böden und durchlässige Geologie mit Tiefenversickerung) beträgt 13.0%. Die Siedlungsgebiete mit den Abflusstypen S1 und S2 machen nur gerade 1.4% des EZG aus (befestigte Flächen, Strassen und Wege, Gartenanlagen, etc.).

Im EZG gehören ca. zwei Drittel der Flächen den rasch bis leicht verzögert beitragenden Abflusstypen 1 bis 3 bzw. S1 bis S3 an. Aufgrund dieser Verteilung (grösstenteils rasch bis leicht verzögerte Flächen, welche zum Hochwasserabfluss beitragen) kann die Abflussbereitschaft des EZG Seez als stark eingestuft werden.

Tabelle 12: Abflussbereitschaft (Abflusstypen) der natürlichen Flächen sowie der Siedlungsflächen im EZG der Seez

Abflusstyp	Abflussreaktion	Flächenanteil am EZG	
		[km ²]	[%]
1	Rasch und stark beitragende Flächen	13.8	9.7
2	Leicht verzögert beitragende Flächen	37.1	26.2
3	Verzögert beitragende Flächen	39.2	27.7
4	Stark verzögert beitragende Flächen	27.8	19.6
5	Sehr stark verzögert beitragende Flächen	18.4	13.0
S1	Rasch und stark beitragende Flächen	1.6	1.1
S2	Leicht verzögert beitragende Flächen	0.0	0.0
S3	Verzögert beitragende Flächen	0.4	0.3
	Abflussreaktion unbekannt	3.4	2.4

Abbildung 28 zeigt die Abflussbereitschaft im EZG der Seez.

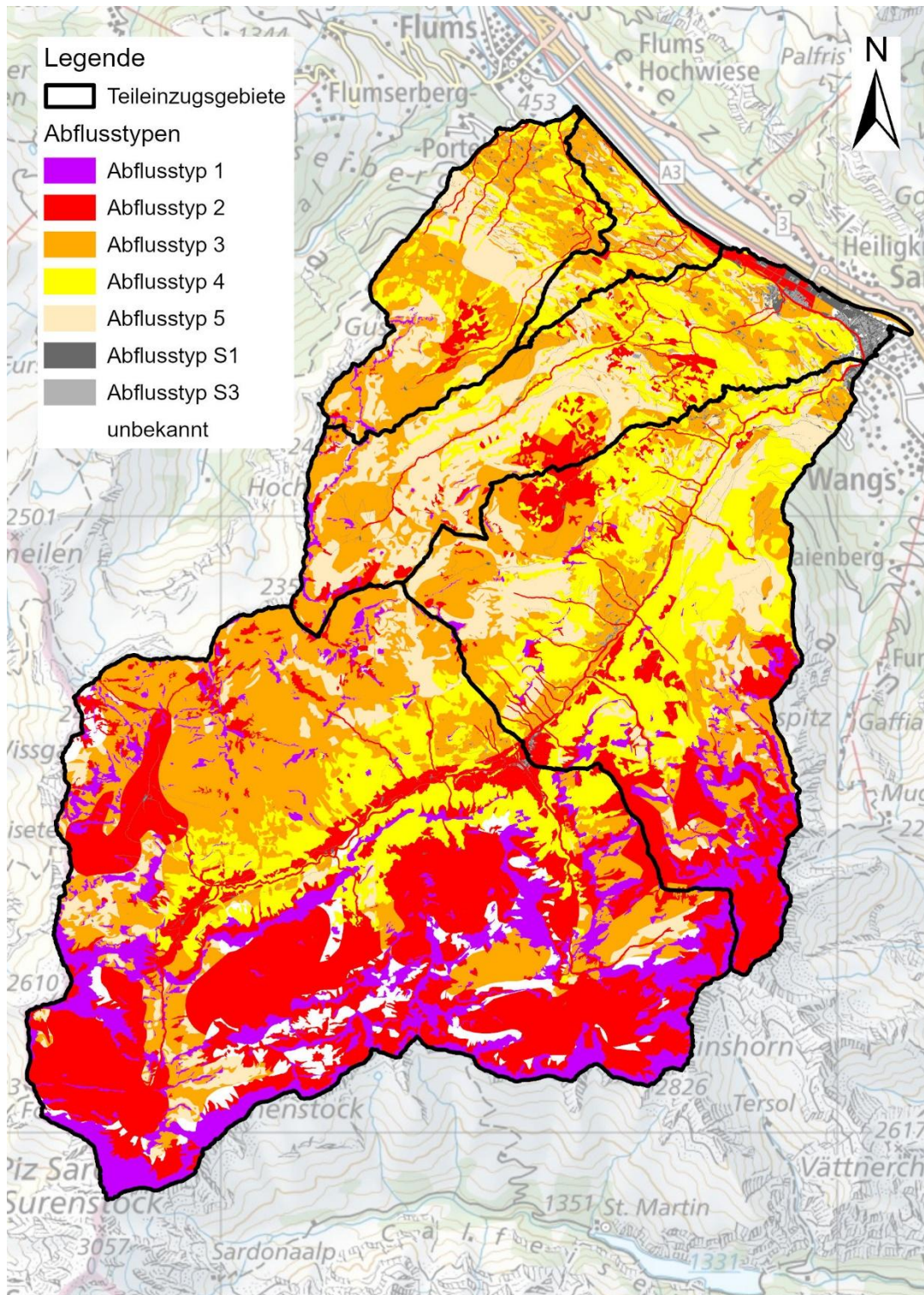


Abbildung 28: Flächen mit vergleichbarer Abflussbereitschaft (Abflusstypen) im Einzugsgebiet der Seez

5.3 Abflussreaktionskurven

Auf Grundlage von Berechnungsversuchen von Scherrer [2] und Scherrer AG [1] wurde den Abflusstypen 1 bis 5 und den Siedlungsabflusstypen S1 bis S3 je eine Abflussreaktionskurve zugeordnet. Basierend darauf wurde pro Teileinzugsgebiet die über sämtliche Abflusstypen flächengemittelte Abflussreaktionskurve ermittelt (siehe Abbildung 29). Die Abflussreaktionskurven zeigen den Anteil des abfließenden Niederschlags in Abhängigkeit der bereits gefallenen Niederschlagssumme.

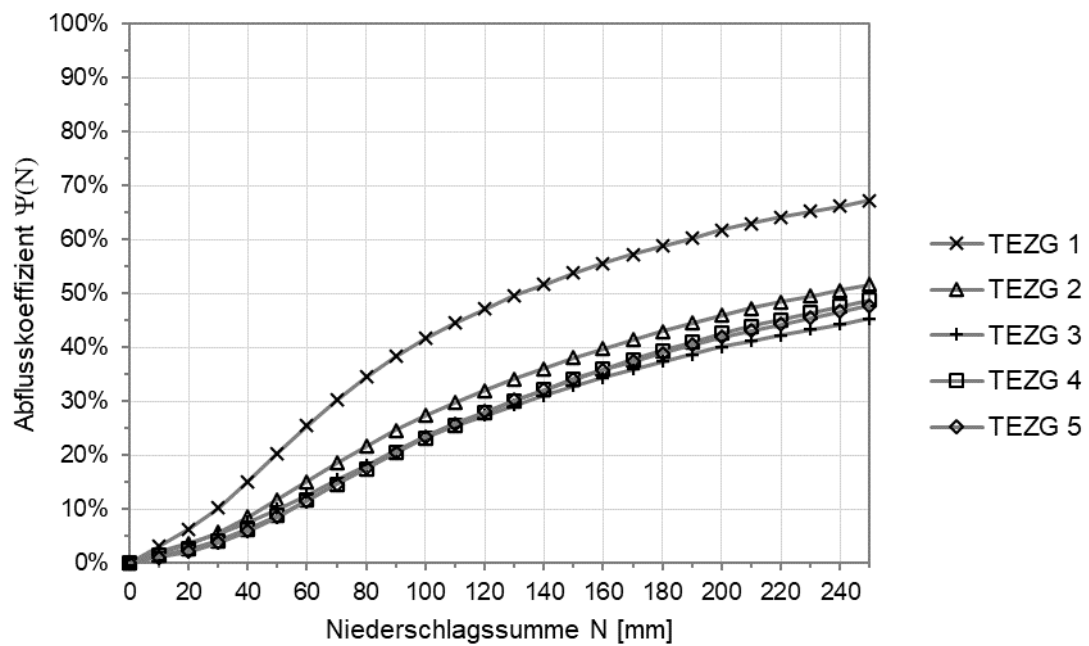


Abbildung 29: Flächengemittelte Abflussreaktionskurven gemäss Gebietsbeurteilung

Im TEZG 1 fließen bei einem Ereignis mit einer Niederschlagssumme von 100 mm ca. 42% des Niederschlagsvolumens als Abfluss ab (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Flächengemittelte Abflusskoeffizienten bei einem Ereignis mit einer Niederschlagssumme von 100 mm gemäss Gebietsbeurteilung

TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5
41.7%	27.4%	23.2%	23.2%	23.5%

6. ABFLUSSBERECHNUNG

6.1 Aufbau NAM

Das eingesetzte Niederschlagsabflussmodell (NAM) wurde von der Niederer + Pozzi Umwelt AG entwickelt und berücksichtigt die bei der Hochwasserentstehung massgebenden Abflussprozesse. Dieses Modell erlaubt es, Starkregenereignisse zu simulieren und so das Abflussverhalten des EZG bei unterschiedlichen Niederschlagsszenarien (Niederschlagsmenge, Niederschlagsdauer, Vorbedingungen wie feuchte Böden, etc.) abzuschätzen. Zudem können mit dem Modell historische Hochwasserereignisse untersucht bzw. nachgerechnet werden.

Das NAM ist wie folgt aufgebaut:

- Das NAM besteht aus Teileinzugsgebieten mit Bemessungspunkten, welche in Abbildung 2 ersichtlich sind.
- Das NAM baut auf den Abflussreaktionskurven in Abbildung 29 auf.
- Die Fliesszeiten des Wassers auf der Bodenoberfläche bis zum Bemessungspunkt des Teileinzugsgebietes (Konzentrationszeit) und die Fliesszeiten in den Gewässern werden berücksichtigt. Die Fliesszeiten in den Gewässern werden mittels Normalabfluss abgeschätzt (siehe Kapitel 6.2).
- Der Retentionseffekt von Stau- und/oder Bergseen wird nicht berücksichtigt.
- Das Modell berücksichtigt das natürliche Einzugsgebiet ohne Wasserfassungen.

Vorgehen bei der Simulation im NAM (siehe Abbildung 30):

Auf Grundlage der Niederschlagszeitreihe bzw. der aufsummierten Niederschlagssumme und der Abflussreaktionskurven wird der abflusswirksame Niederschlag ermittelt. Dieser Niederschlag wird unterteilt in direkt abfliessenden Oberflächenabfluss und in unterirdischen Abfluss im Boden. Letzterer wird im Boden retiniert bzw. zwischengespeichert und verzögert dem Bemessungspunkt des Teileinzugsgebietes abgegeben. Diese Zwischenspeicherung im Boden wird mit linearen Bodenspeichern modelliert (siehe Kapitel 6.3). Die Fliesszeit des direkt abfliessenden Oberflächenabflusses bis zum Bemessungspunkt des Teileinzugsgebietes wird mithilfe von Isochronen bestimmt (siehe Kapitel 6.2). Anschliessend werden die Gesamtabflüsse aller Teileinzugsgebiete, bestehend aus dem Bodenspeicherausfluss und dem Oberflächenabfluss, unter Berücksichtigung der Fliesszeiten in den Gewässern zeitversetzt aufsummiert. Das Modell beinhaltet folgende Modellparameter (siehe Abbildung 30):

- Abflussreaktionskurven
- Bodenspeicherkonstanten k
- Direktabflussanteil d

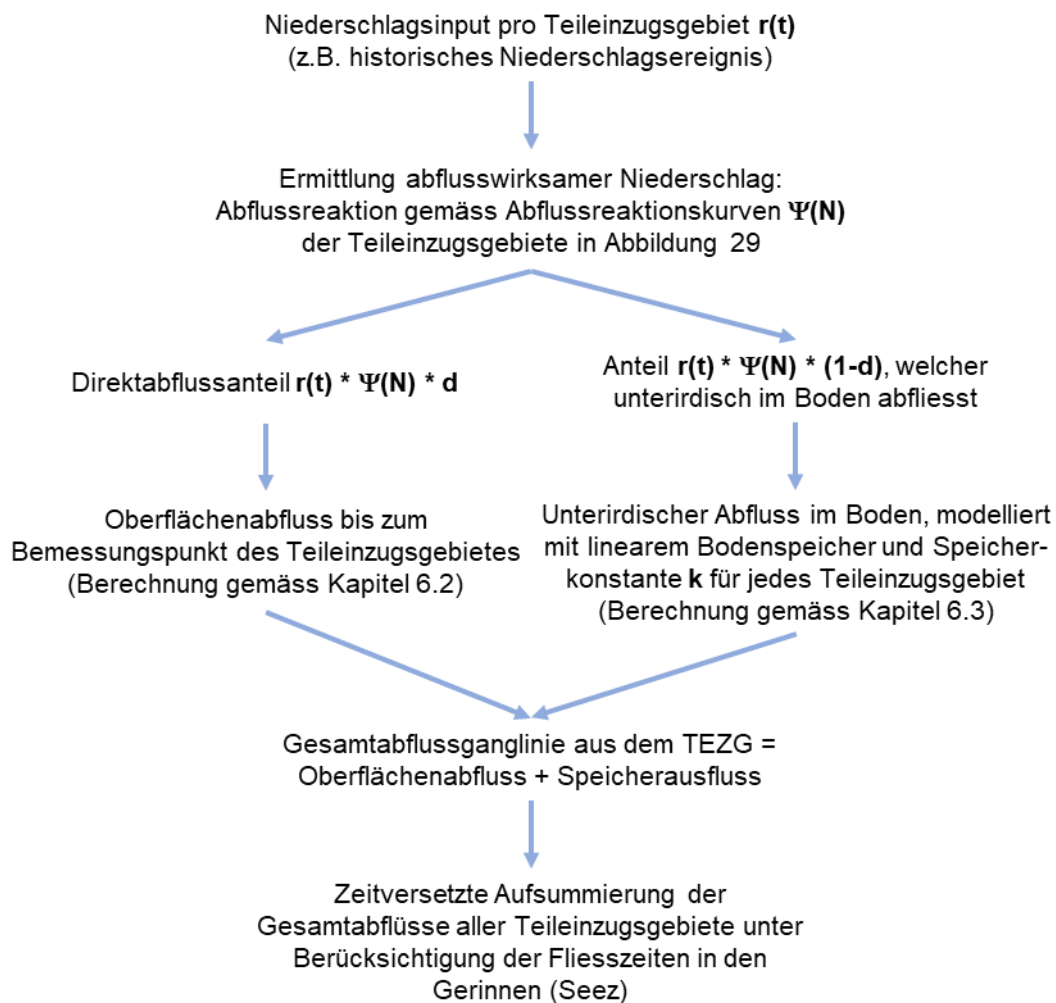


Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Niederschlagsabflussmodells

6.2 Oberflächenabfluss: Fließzeiten / Isochronen

Auf Grundlage des Höhenmodells (swissalti3D, 2m Raster) wurde nach der Methode von [5] ein Geschwindigkeitsfeld erstellt. Jeder Rasterzelle wurde im Geschwindigkeitsfeld basierend auf der lokalen Neigung und dem beitragenden Gebiet flussaufwärts (der Anzahl der Zellen, die in diese Zelle fließen bzw. der Abflussakkumulation) eine Geschwindigkeit zugewiesen. Anschliessend wurde die Fließzeit bis zum Bemessungspunkt ermittelt und in 5min-Isochronen zu einem Unit-hydrograph klassifiziert. Zwecks besserer Lesbarkeit sind in Abbildung 31 die ermittelten 20min-Isochronen für jedes Teileinzugsgebiet (in Bezug auf den jeweiligen Bemessungspunkt, siehe auch Tabelle 15) dargestellt. In Tabelle 14 sind die Konzentrationszeiten der Bemessungspunkte entlang der Seez zusammengefasst.

Tabelle 14: Konzentrationszeiten entlang der Seez, EZG oberhalb BP 1 bis BP 5

Seez, BP 1	Seez, BP 2	Seez, BP 3	Seez, BP 4	Seez, BP 5
100 min	160 min	190 min	220 min	220 min

In Tabelle 15 sind die Konzentrationszeiten für jedes Teileinzugsgebiet zusammengefasst.

Tabelle 15: Konzentrationszeiten für jedes Teileinzugsgebiet (in Bezug auf den jeweiligen Bemessungspunkt des Teileinzugsgebietes)

TEZG, BP 1	TEZG, BP 2	TEZG, BP 3	TEZG, BP 4	TEZG, BP 5
100 min	100 min	80 min	60 min	60 min

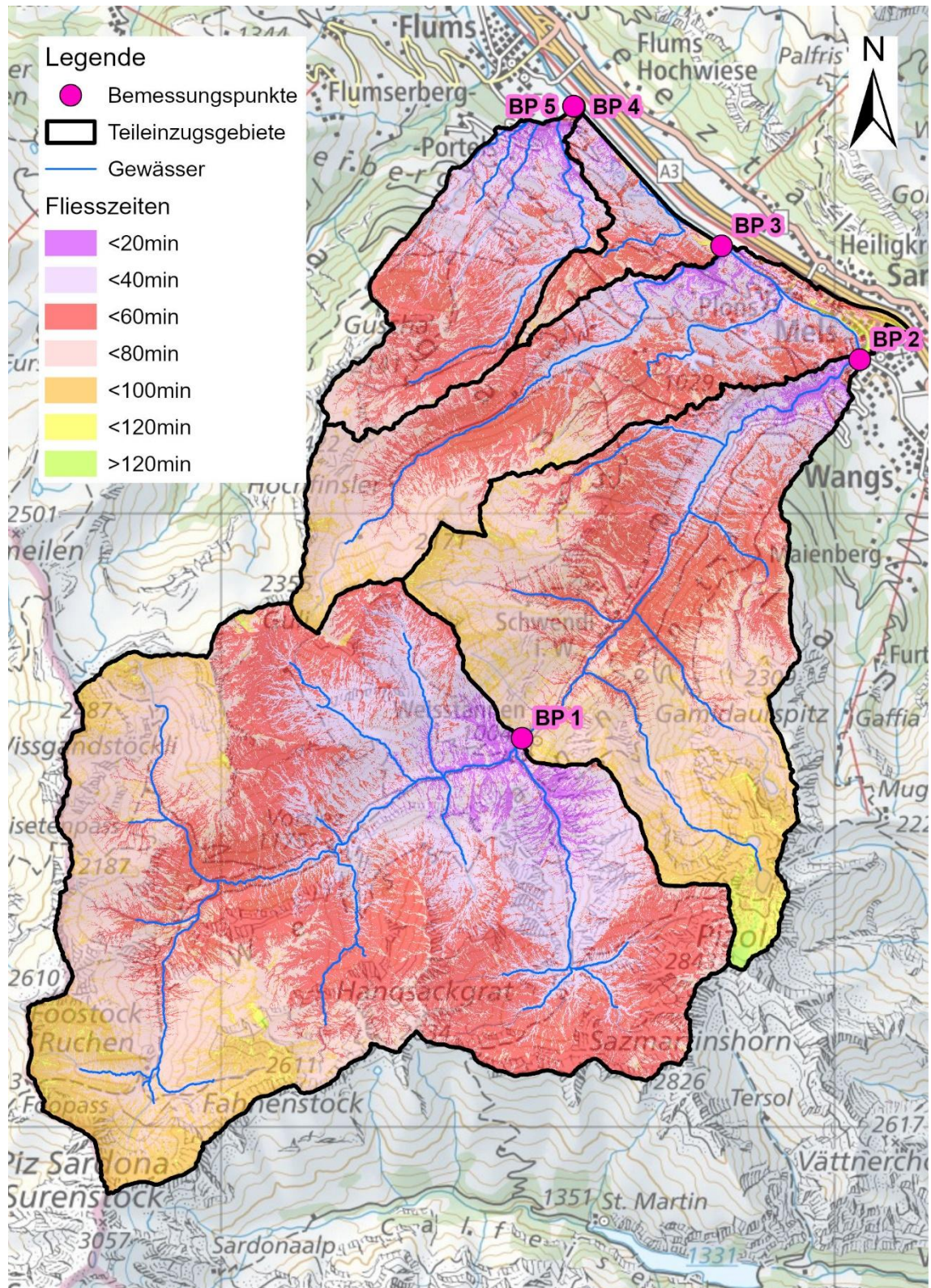


Abbildung 31: Flusszeiten (20min-Isochronen) für jedes Teileinzugsgebiet (in Bezug auf den jeweiligen Bemessungspunkt des Teileinzugsgebietes)

6.3 Unterirdischer Abfluss im Boden: Bodenspeicher

Unterirdischer Abfluss im Boden spielt vor allem bei langanhaltenden Niederschlagsereignissen eine grosse Rolle. Er kann wesentlich zum Hochwasserabfluss beitragen, wenn das Wasser in lateralen, präferentiellen Fließwegen abfließt. Der unterirdische Abfluss im Boden wird mit linearen Speichern modelliert. Abbildung 32 erläutert das Prinzip des linearen Bodenspeichers. Für den Speicher gilt jederzeit die Kontinuitätsgleichung, dass die Differenz zwischen Zufluss und Ausfluss der Speicheränderung entspricht:

$$\frac{dS}{dt} = Z(t) - Q(t) = (r(t) * \Psi(N) * (1 - d) * A) - Q(t)$$

Speicherzufluss über ganzes TEZG mit Fläche A:
 $Z(t) = r(t) * \Psi(N) * (1-d) * A$

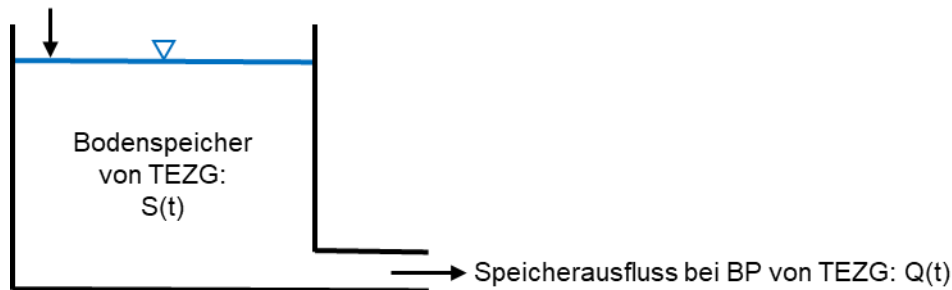


Abbildung 32: Linearer Bodenspeicher zur Modellierung des unterirdischen Abflusses

Der Faktor k wird als Speicherkonstante bezeichnet und beschreibt, wie schnell bzw. langsam sich der Bodenspeicher entleert. Der Ausfluss aus dem Speicher $Q(t)$ ist proportional zum Speicherinhalt im Boden $S(t)$. Die Speichergleichung lautet:

$$S(t) = k * Q(t)$$

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gibt an, in welcher Zeit sich der Ausfluss aus dem Bodenspeicher nach Ende des Niederschlags bzw. nach Abklingen des Oberflächenabflusses halbiert. Zwischen der Speicherkonstante k und der Halbwertszeit $T_{1/2}$ besteht folgender Zusammenhang:

$$k = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Die Bodenspeicherkonstante für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental) wurde auf Grundlage des Hochwasserereignisses vom 23.8.2005 (Rang 3) abgeschätzt. Bei diesem Hochwasser kann davon ausgegangen werden, dass im abfallenden Ast der Abflussganglinie im Pegel Seez-Mels keine bzw. nur geringfügige Schmelzwasserabflüsse auftraten, weil bei der Station Wildsee zum Zeitpunkt des Ereignisses kein Schnee lag (siehe Abbildung 26). Der gemessene Abfluss beim Pegel Seez-Mels nähert sich am 25.8 asymptotisch dem Basisabfluss von ca. 3.7 m³/s. In der Zeit von ca. 19 Uhr am 23.8, wo der Niederschlag und der rasch abfließende Oberflächenabfluss bereits abgeklungen ist, bis um ca. 1 Uhr am 24.8 halbiert sich der Ausfluss aus dem Bodenspeicher der TEZG 1 und 2 innerhalb von ca. 6 Stunden von 20 m³/s auf 10 m³/s (siehe Abbildung 33).

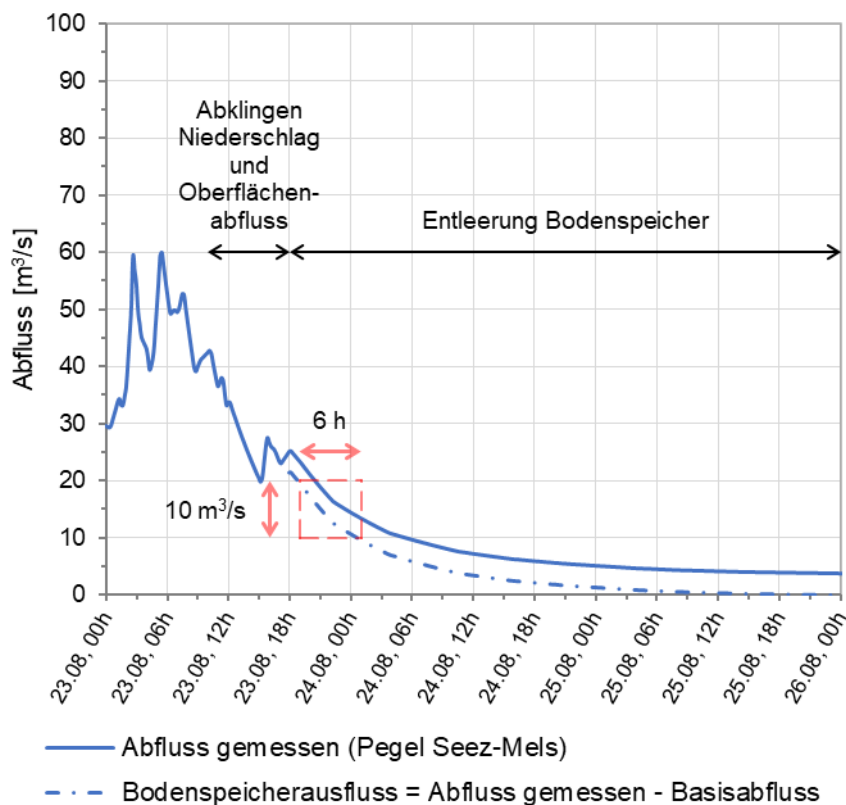


Abbildung 33: Abfluss Pegel Seez-Mels (BP 2) beim Hochwasserereignis vom 23.8.2005 und Abschätzung der Halbwertszeit des Bodenspeicherausflusses aus den TEZG 1 und 2 des Weisstannentals

Die Halbwertszeit des Bodenspeicherausflusses aus den TEZG 1 und 2 beträgt ca. $T_{1/2} = 6 \text{ h}$. Daraus ergibt sich für die TEZG 1 und 2 eine Bodenspeicherkonstante von $k = 8.7 \text{ h}$.

6.4 Modellkalibrierung

Für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental) wurde eine Modellkalibrierung am Pegel Seez-Mels durchgeführt. Die Modellparameter wurden so lange variiert, bis die Resultate aus den Simulationsrechnungen (BP 2) und die Messungen am Pegel Seez-Mels nicht besser zur Deckung gebracht werden konnten. Für die Modellkalibrierung wurden die in Kapitel 4 untersuchten Hochwasserereignisse vom 17. Juni 2016, 18. Juli 2009, 13. Juli 2008, 17. September 2006 und 23. August 2005 nachgerechnet. Die Resultate der Simulationsrechnungen wurden mit den natürlichen Abflüssen am Pegel Seez-Mels verglichen, weil das Modell das natürliche Einzugsgebiet ohne die Wasserfassungen bzw. Überleitungen berücksichtigt.

6.4.1 Hochwasser vom 17. Juni 2016

Bei diesem Hochwasserereignis waren folgende Voraussetzungen für eine Modellkalibrierung gegeben:

- Es war ein langanhaltendes, grossflächiges Niederschlagsereignis, welches das ganze Weisstannental betraf, sodass pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der stündlichen Niederschlagsfelder (CombiPrecip) für den Niederschlagsinput verwendet werden konnte.
- Für die Nachrechnung des Hochwassers mit dem Modell wurde bei Schneefall nur die beregnete Fläche unterhalb der Schneefallgrenze berücksichtigt bzw. die vom Radar geschätzte Niederschlagsmenge um den Anteil der beschneiten EZG-Fläche (siehe Abbildung 8) auf die Flüssigniederschlagsmenge (Regen) reduziert. Berechnungsbeispiel: Am 17.6 um 18 Uhr wurde die über das TEZG 2 gemittelte Niederschlagsmenge von 4.7 mm/h um 7% (beschneiter Flächenanteil im TEZG 2) auf die über das TEZG 2 gemittelte Regenmenge von 4.4 mm/h reduziert.
- Aufgrund des Witterungsverlaufs vor dem Hochwasserereignis (siehe Kapitel 4.1.2) ist von nassen Vorbedingungen auszugehen. Für die Nachrechnung mit dem Modell wurde ein Vorregenindex von 26 mm (TEZG 1) und 28 mm (TEZG 2) berücksichtigt.
- Es wurde ein konstanter Basisabfluss von 14 m³/s angenommen.

Die Simulation schätzt die Abflussspitze und deren Zeitpunkt übereinstimmend mit der Messung (siehe Abbildung 34). Der Hochwasserverlauf und das Abflussvolumen können mit dem Modell zufriedenstellend nachgerechnet werden.

6.4.2 Hochwasser vom 18. Juli 2009

Bei diesem Hochwasserereignis waren folgende Voraussetzungen für eine Modellkalibrierung gegeben:

- Es war ein langanhaltendes, grossflächiges Niederschlagsereignis, welches das ganze Weisstannental betraf, sodass pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der stündlichen Niederschlagsfelder (CombiPrecip) für den Niederschlagsinput verwendet werden konnte.
- Für die Nachrechnung des Hochwassers mit dem Modell wurde bei Schneefall nur die beregnete Fläche unterhalb der Schneefallgrenze berücksichtigt bzw. die vom Radar geschätzte Niederschlagsmenge um den Anteil der beschneiten EZG-Fläche (siehe Abbildung 13) auf die Flüssigniederschlagsmenge (Regen) reduziert.
- Aufgrund des Witterungsverlaufs vor dem Hochwasserereignis (siehe Kapitel 4.2.2) ist von nassen Vorbedingungen auszugehen. Für die Nachrechnung mit dem Modell wurde ein Vorregenindex von 29 mm (TEZG 1) und 26 mm (TEZG 2) berücksichtigt.
- Es wurde ein konstanter Basisabfluss von 3.5 m³/s angenommen.

Die Simulation unterschätzt die Abflussspitze leicht und ist gegenüber der Messung zeitverschoben (siehe Abbildung 35). Der Hochwasserverlauf und das Abflussvolumen können mit dem Modell zufriedenstellend nachgerechnet werden.

6.4.3 Hochwasser vom 13. Juli 2008

Bei diesem Hochwasserereignis waren folgende Voraussetzungen für eine Modellkalibrierung gegeben:

- Es war ein langanhaltendes, grossflächiges Niederschlagsereignis, welches das ganze Weisstannental betraf, sodass pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der stündlichen Niederschlagsfelder (CombiPrecip) für den Niederschlagsinput verwendet werden konnte.
- Für die Nachrechnung des Hochwassers mit dem Modell wurde bei Schneefall nur die beregnete Fläche unterhalb der Schneefallgrenze berücksichtigt bzw. die vom Radar geschätzte Niederschlagsmenge um den Anteil der beschneiten EZG-Fläche (siehe Abbildung 18) auf die Flüssigniederschlagsmenge (Regen) reduziert.
- Aufgrund des Witterungsverlaufs vor dem Hochwasserereignis (siehe Kapitel 4.3.2) ist von nassen Vorbedingungen auszugehen. Für die Nachrechnung mit dem Modell wurde ein Vorregenindex von 38 mm (TEZG 1) und 29 mm (TEZG 2) berücksichtigt.
- Es wurde ein konstanter Basisabfluss von 5 m³/s angenommen.

Die Simulation überschätzt die erste Abflussspitze leicht und ist gegenüber der Messung zeitverschoben (siehe Abbildung 36). Die Simulation schätzt die zweite Abflussspitze und deren Zeitpunkt übereinstimmend mit der Messung. Der Hochwasserverlauf und das Abflussvolumen können mit dem Modell zufriedenstellend nachgerechnet werden.

6.4.4 Hochwasser vom 17. September 2006

Bei diesem Hochwasserereignis waren folgende Voraussetzungen für eine Modellkalibrierung gegeben:

- Es war ein langanhaltendes, grossflächiges Niederschlagsereignis, welches das ganze Weisstannental betraf, sodass pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der stündlichen Niederschlagsfelder (CombiPrecip) für den Niederschlagsinput verwendet werden konnte.
- Aufgrund des Witterungsverlaufs vor dem Hochwasserereignis (siehe Kapitel 4.4.2) ist von trockenen Vorbedingungen auszugehen. Für die Nachrechnung mit dem Modell wurde in beiden TEZG ein Vorregenindex von 0 mm berücksichtigt.
- Es wurde ein konstanter Basisabfluss von 1 m³/s angenommen.

Die Simulation überschätzt die Abflussspitze deutlich, schätzt aber deren Zeitpunkt übereinstimmend mit der Messung (siehe Abbildung 37). Dieses Resultat stützt die Einschätzung, dass der Niederschlag oberhalb der Station Wildsee wahrscheinlich als Schnee oder Schneeregeng gefallen ist, welcher nicht unmittelbar abflusswirksam war (siehe Kapitel 4.4.3). In einer zweiten Simulation wurde analog der konstanten Lufttemperatur von ca. 5 Grad eine konstante Schneefallgrenze von 2'400 m ü. M. während des Ereignisses angenommen. Folgende Anpassungen wurden am Niederschlagsinput vorgenommen:

- Die vom Radar geschätzte Niederschlagsmenge wurde um den Anteil der beschneiten EZG-Fläche auf die Flüssigniederschlagsmenge (Regen) reduziert. Der beschneite Flächenanteil bei einer Schneefallgrenze von 2'400 m ü. M. beträgt im TEZG 1 ca. 7% und im TEZG 2 ca. 6%.
- Die vom Radar geschätzte Niederschlagsmenge zwischen 0-1 Uhr am 17.9 wurde so angepasst, dass die zeitliche Niederschlagsverteilung analog der Station Wildsee annäherungsweise einen dreiecksförmigen Verlauf aufweist.

Die zweite Simulation (siehe Abbildung 38) überschätzt die Abflussspitze deutlich weniger als die erste Simulation. Der Hochwasserverlauf und das Abflussvolumen können mit dem Modell zufriedenstellend nachgerechnet werden.

6.4.5 Hochwasser vom 23. August 2005

Bei diesem Hochwasserereignis waren folgende Voraussetzungen für eine Modellkalibrierung gegeben:

- Es war ein langanhaltendes, grossflächiges Niederschlagsereignis, welches das ganze Weisstannental betraf, sodass pro Teileinzugsgebiet der räumliche Mittelwert der stünd-

lichen Niederschlagsfelder (CombiPrecip) für den Niederschlagsinput verwendet werden konnte.

- Aufgrund des Witterungsverlaufs vor dem Hochwasserereignis (siehe Kapitel 4.5.2) ist von sehr nassen Vorbedingungen auszugehen. Für die Nachrechnung mit dem Modell wurde ein Vorregenindex von 61 mm (TEZG 1) und 52 mm (TEZG 2) berücksichtigt.
- Es wurde ein konstanter Basisabfluss von 6 m³/s angenommen.

Die Simulation schätzt beide Abflussspitzen übereinstimmend mit der Messung (siehe Abbildung 39). Der gesamte Hochwasserverlauf ist jedoch gegenüber der Messung um ca. 6 Stunden zeitverschoben. Dieses Resultat stützt die Einschätzung, dass der Niederschlag von den Radarstationen nicht richtig erfasst bzw. geschätzt wurde (siehe Kapitel 4.5.3). In einer zweiten Simulation wurde der Niederschlagsinput wie folgt angepasst:

- Der vom Radar geschätzte Niederschlag wurde um 6 Stunden zeitverschoben, sodass die zeitliche Niederschlagsverteilung (zwischen 18 Uhr am 22.8 und 21 Uhr am 23.8) mit der Messung bei der Bodenstation Wildsee übereinstimmt.

Die zweite Simulation (siehe Abbildung 40) schätzt die erste Abflussspitze und deren Zeitpunkt übereinstimmend mit der Messung. Der Hochwasserverlauf, insbesondere der abklingende Ast der Ganglinie, und das Abflussvolumen können mit dem Modell zufriedenstellend nachgerechnet werden.

Insgesamt ergibt das Modell für alle nachgerechneten Hochwasser plausible Resultate und kann für die Abflussberechnungen (siehe Kapitel 6.6) eingesetzt werden. Eine Zusammenfassung der kalibrierten Modellparameter ist in Kapitel 6.4.6 gegeben.

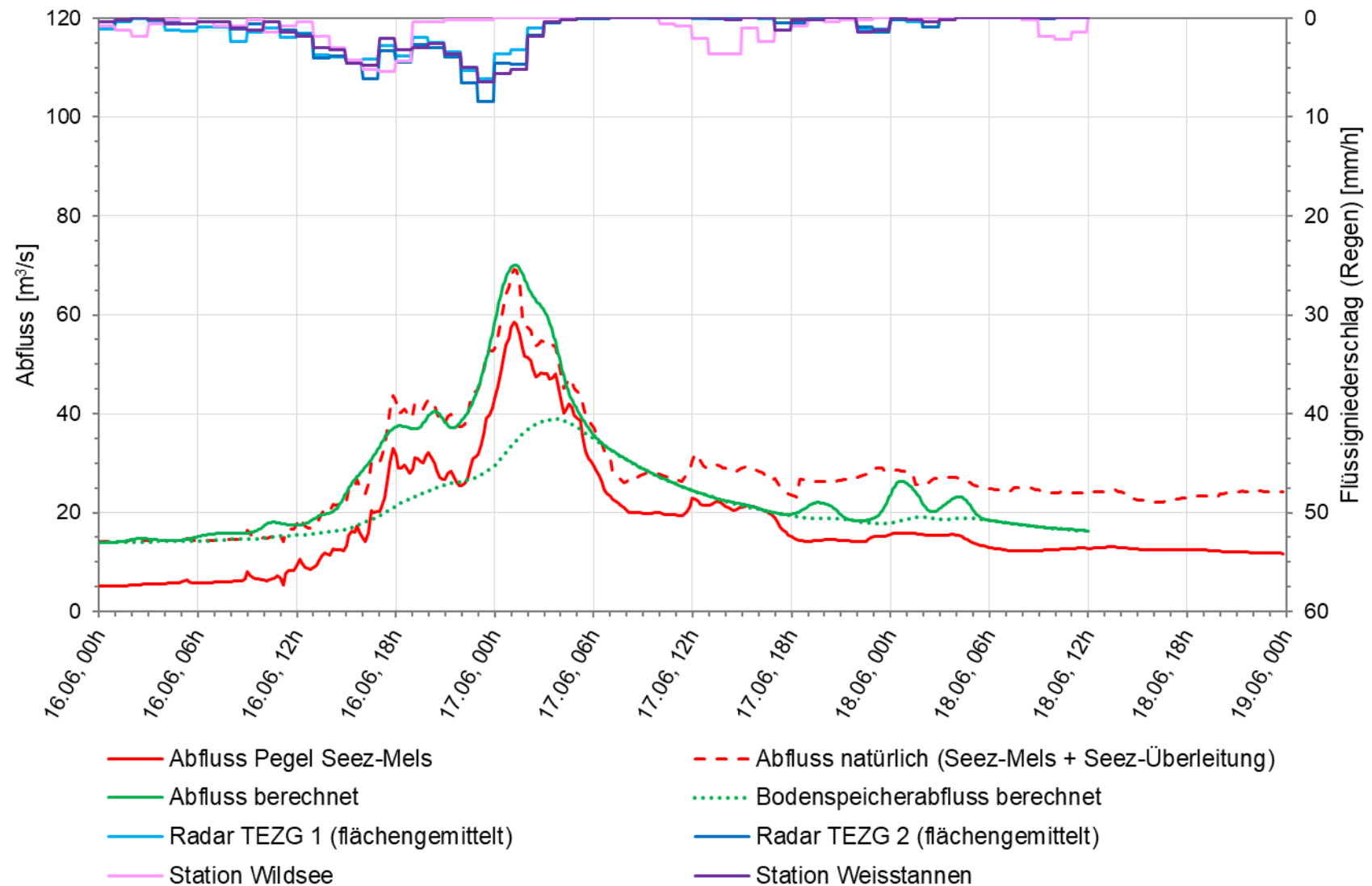


Abbildung 34: Simulation Hochwasserereignis 17.6.2016: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie.

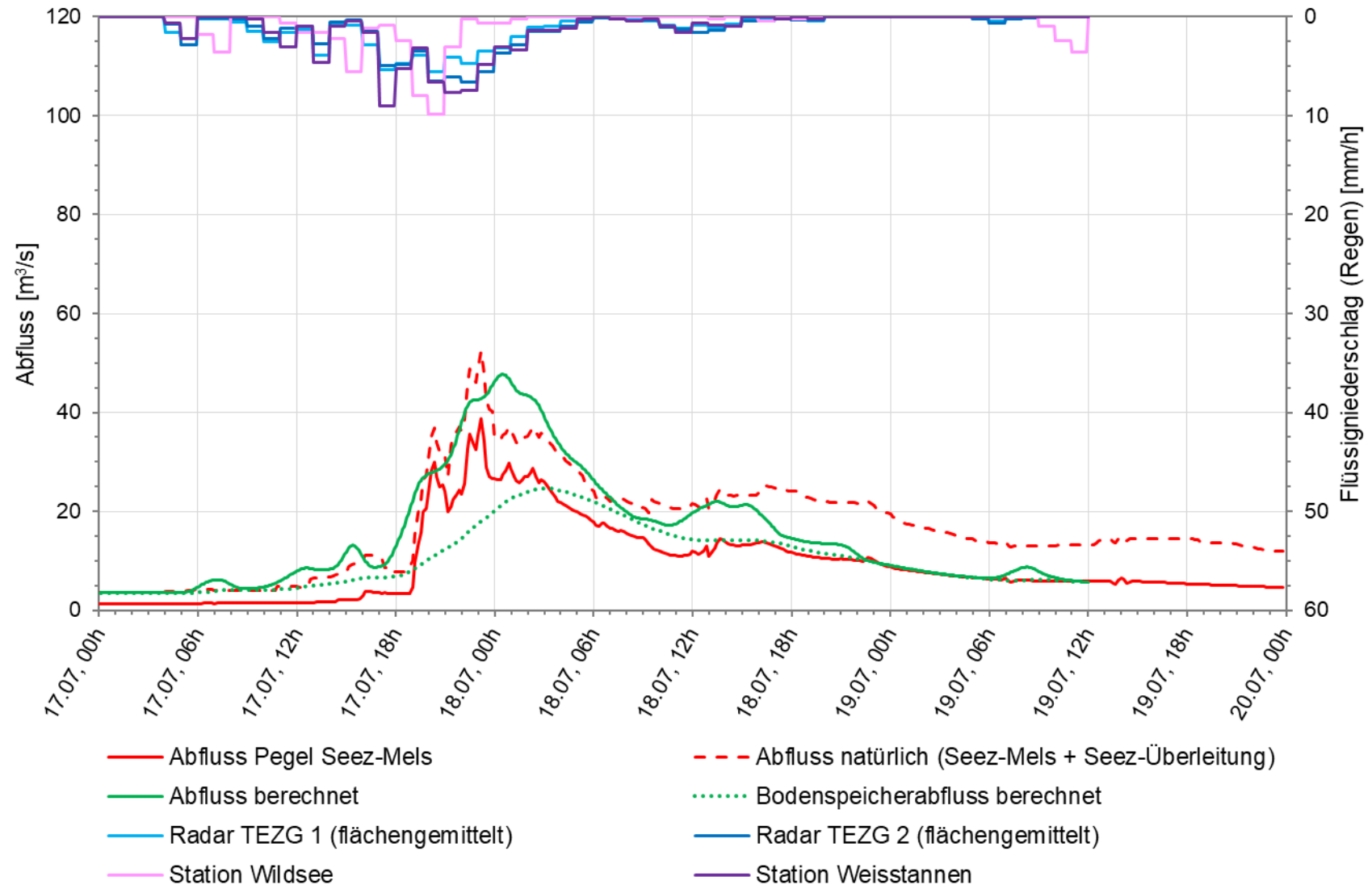


Abbildung 35: Simulation Hochwasserereignis 18.7.2009: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie.

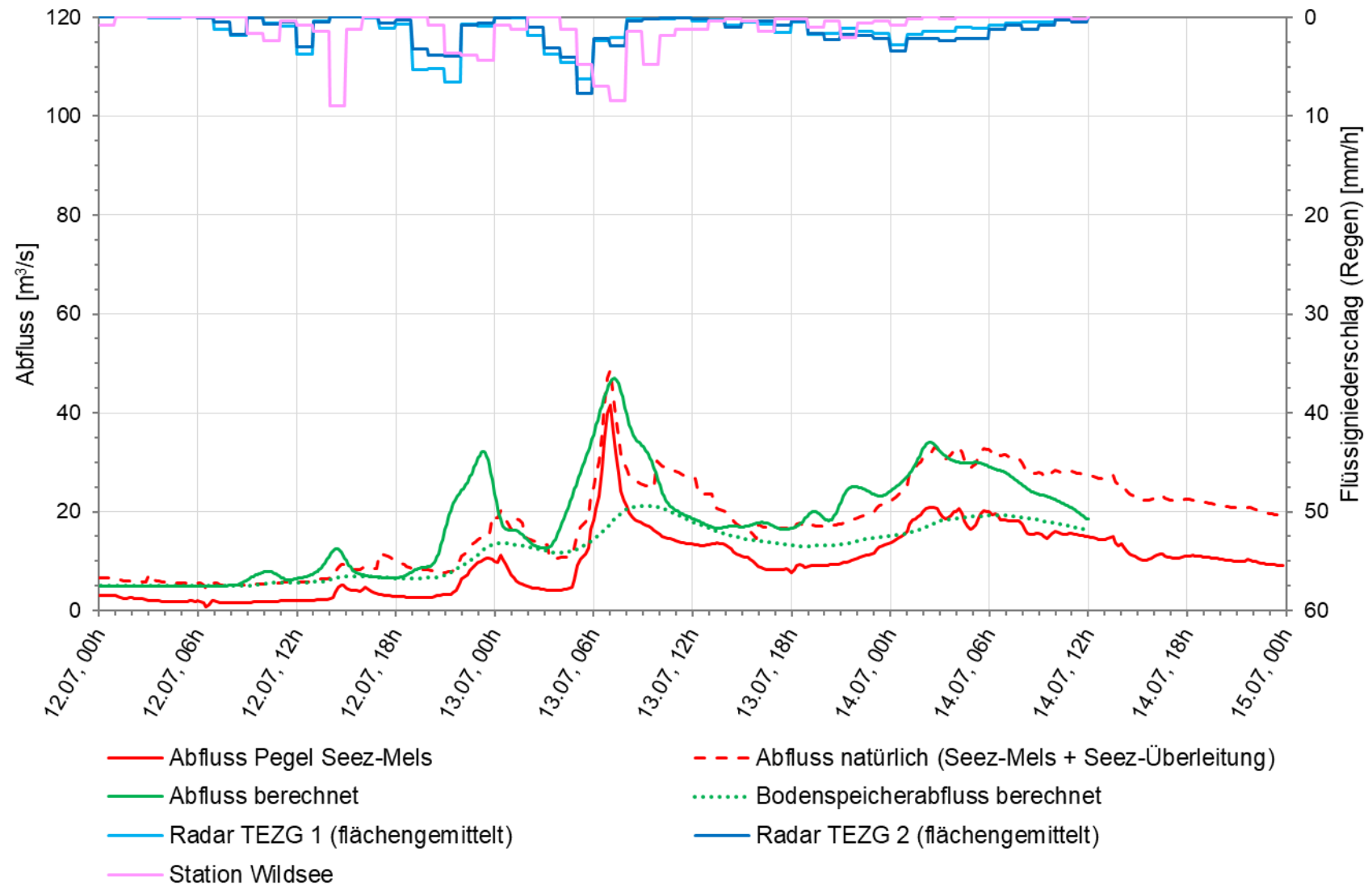


Abbildung 36: Simulation Hochwasserereignis 13.7.2008: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie.

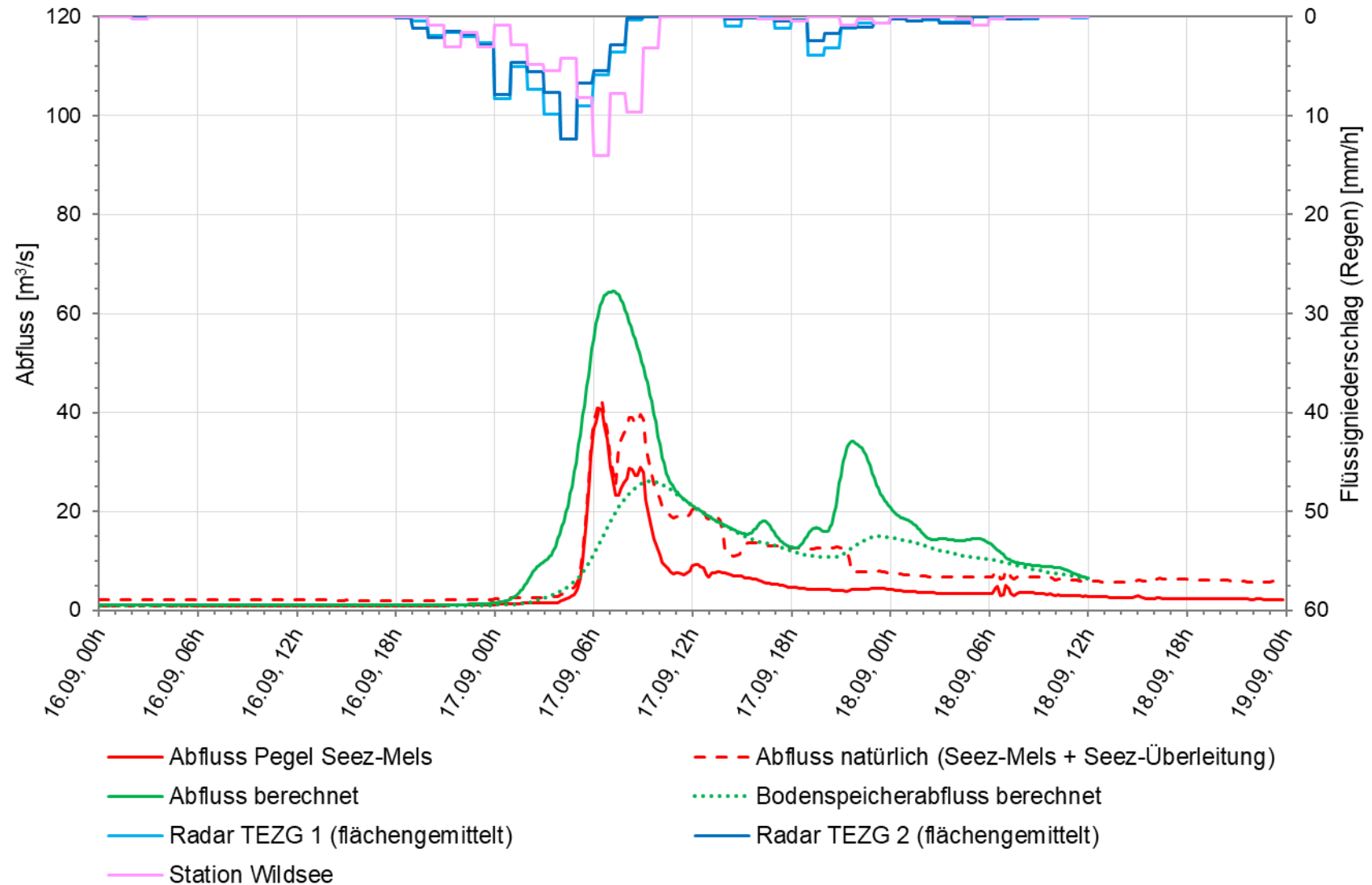


Abbildung 37: Simulation Hochwasserereignis 17.9.2006: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie.

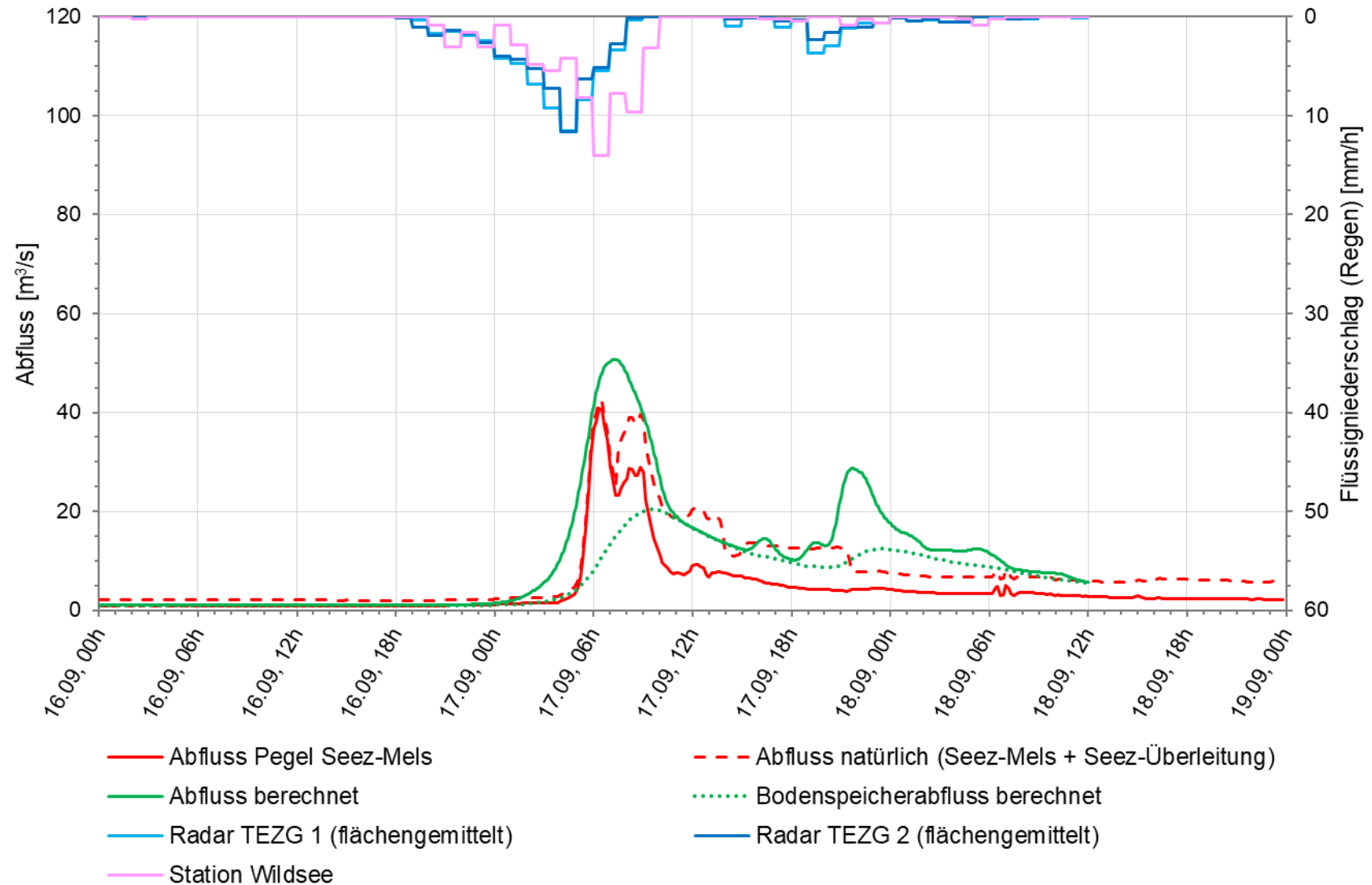


Abbildung 38: Simulation Hochwasserereignis 17.9.2006: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie. Bei dieser Simulation wurde der Niederschlagsinput gegenüber der Simulation in Abbildung 37 abgeändert (siehe Kapitel 6.4.4).

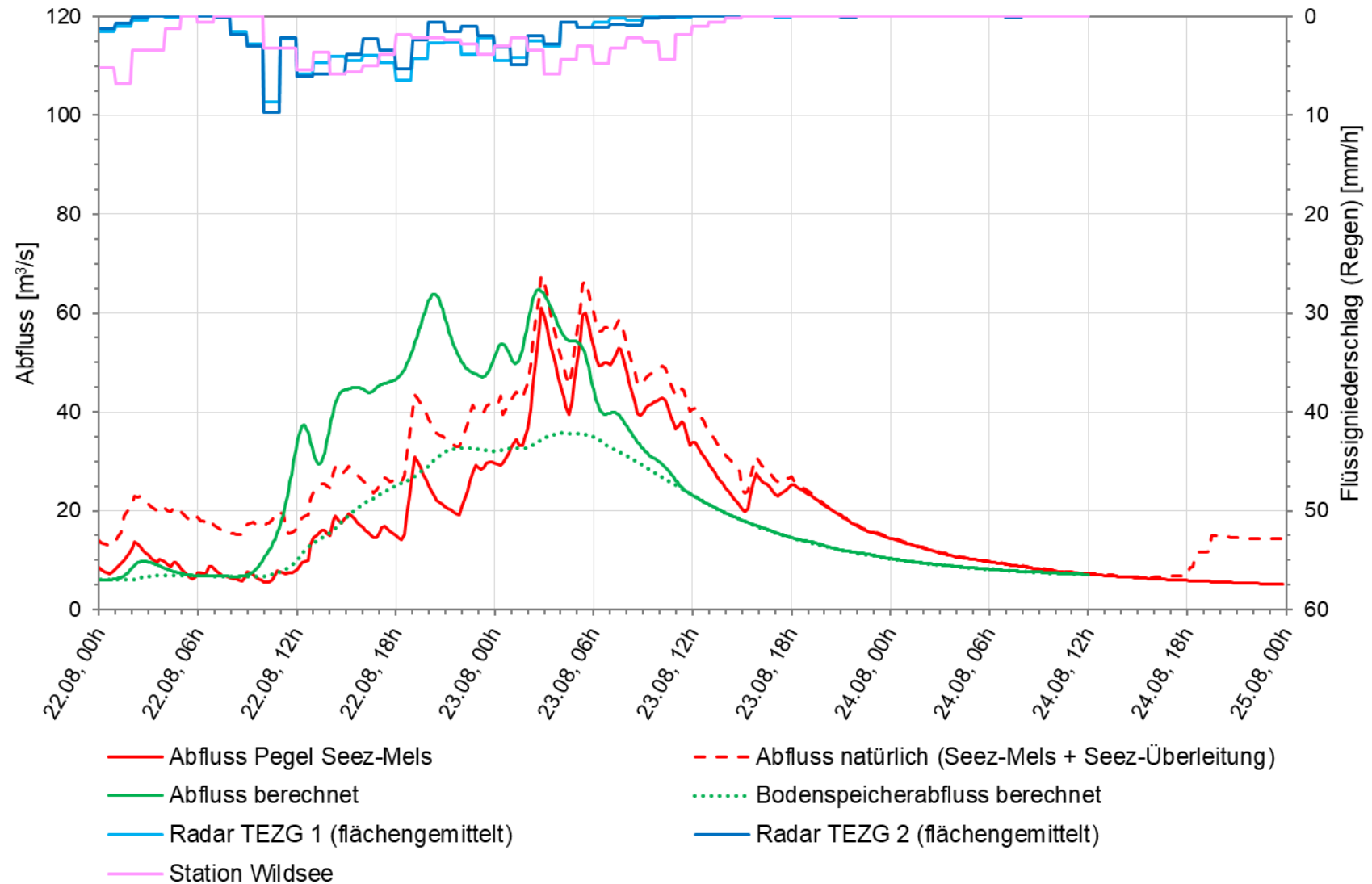


Abbildung 39: Simulation Hochwasserereignis 23.8.2005: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie.

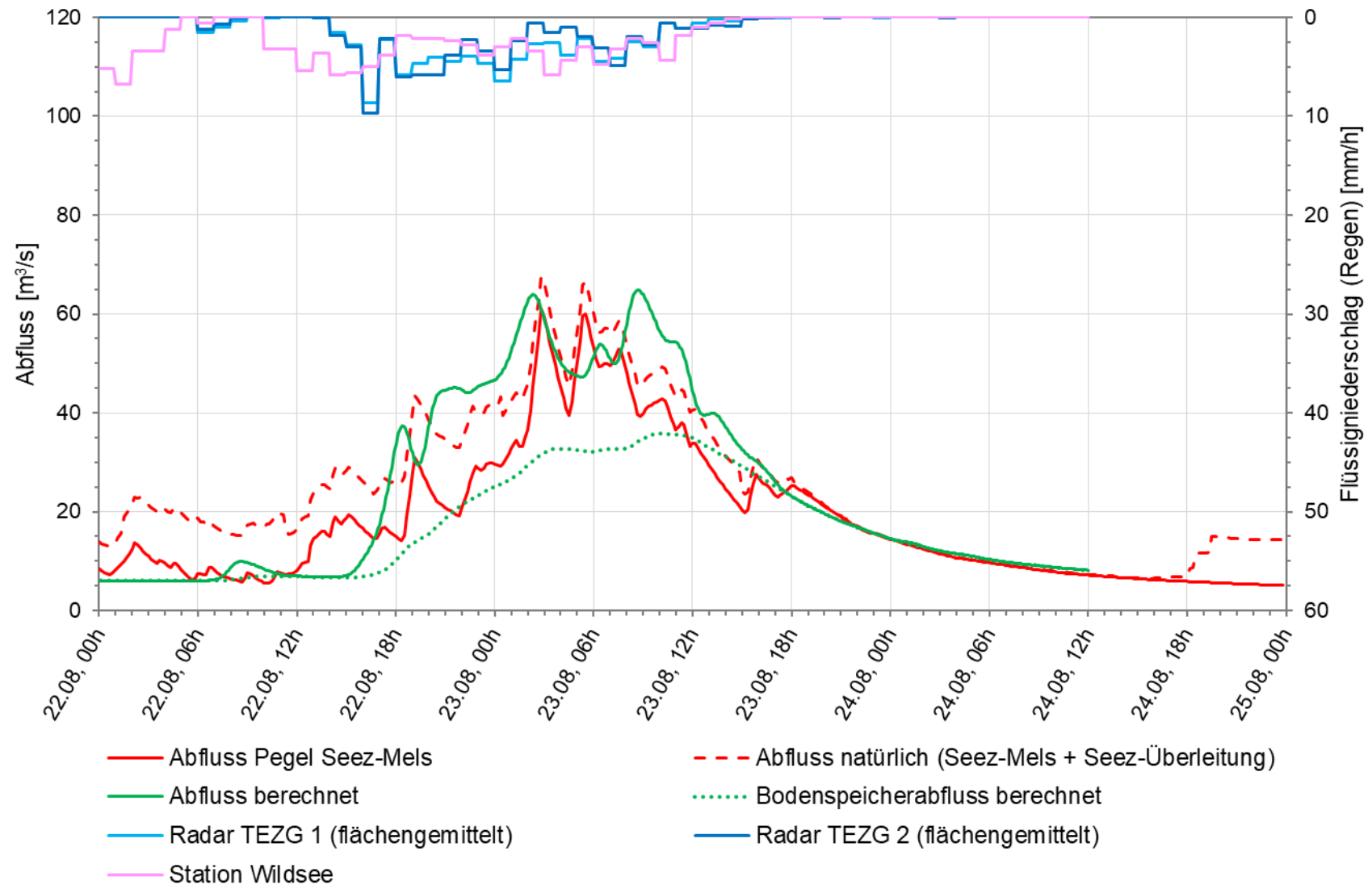


Abbildung 40: Simulation Hochwasserereignis 23.8.2005: Der von den Bodenstationen gemessene und vom Radar (CombiPrecip) geschätzte Niederschlagsverlauf sowie die am Pegel Seez-Mels gemessene/natürliche und nachgerechnete Abflussganglinie. Bei dieser Simulation wurde der Niederschlagsinput gegenüber der Simulation in Abbildung 39 zeitverschoben (siehe Kapitel 6.4.5).

6.4.6 Modellparameter

Die Modellparameter wurden wie folgt kalibriert bzw. festgelegt.

Abflussreaktionskurven

In Abbildung 41 sind die kalibrierten Abflussreaktionskurven ersichtlich.

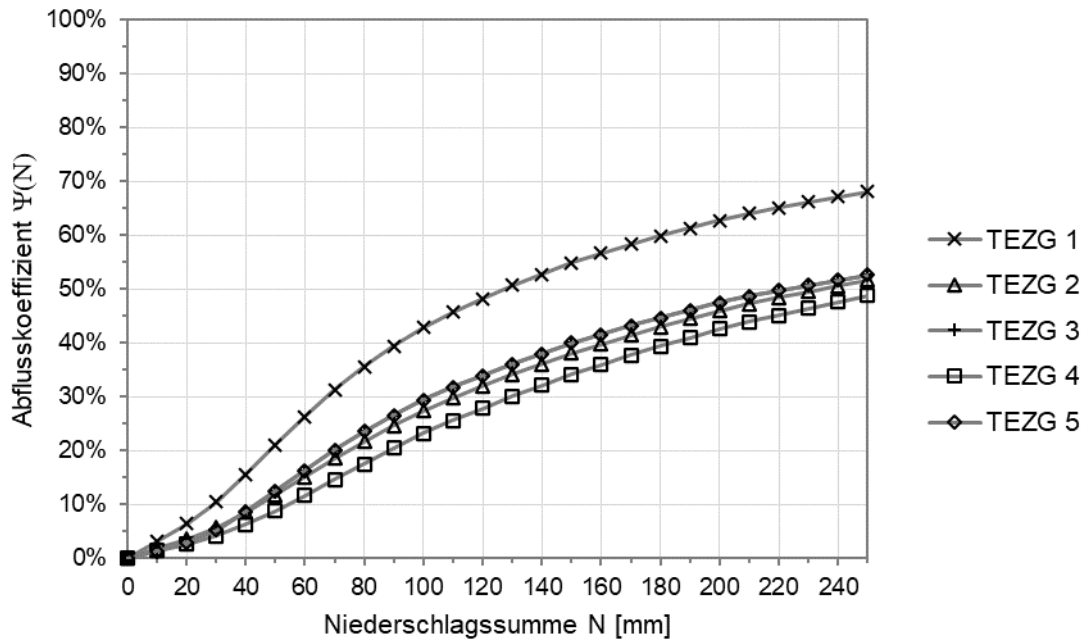


Abbildung 41: Flächengemittelte Abflussreaktionskurven gemäss Modellkalibrierung

Die Abflussreaktionskurve des Röllbachs (TEZG 5) wurde so kalibriert, dass bei einem hundertjährigen Niederschlag (siehe Tabelle 19, Szenario 6, Niederschlagsmengen TEZG 5) die in der Naturgefahrenanalyse festgelegte Abflussspitze von 29.9 m³/s erreicht wird (siehe Tabelle 3). In Abbildung 42 sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} am Bemessungspunkt 5 (Röllbach) für das Szenario 6 dargestellt.

HQ₁₀₀ Röllbach (Szenario 6)

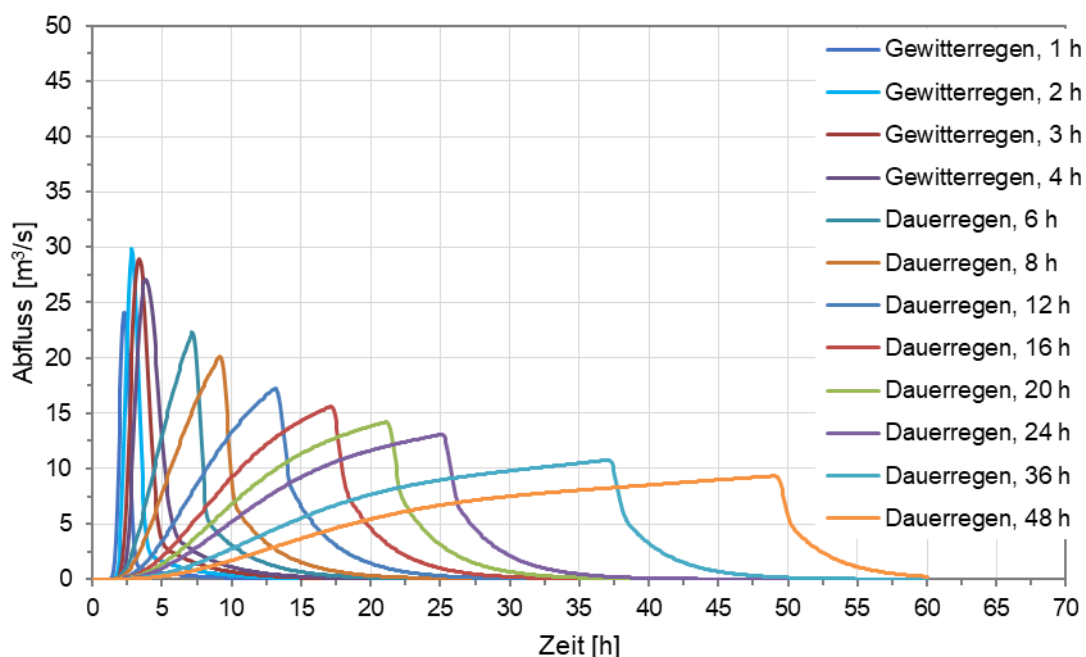


Abbildung 42: Abflussganglinien Röllbach HQ₁₀₀ (Szenario 6)

Da für den Cholschlagerbach in der Naturgefahrenanalyse keine Abflussspitze festgelegt ist, wurde für das TEZG 3 die Abflussreaktionskurve des vergleichbaren TEZG 5 (Röllbach) übernommen.

Im TEZG 1 fließen bei einem Ereignis mit einer Niederschlagssumme von 100 mm ca. 43% des Niederschlagsvolumens als Abfluss ab (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Flächengemittelte Abflusskoeffizienten bei einem Ereignis mit einer Niederschlagssumme von 100 mm gemäss Gebietsbeurteilung und Modellkalibrierung. Letztere wurden für die Simulationen mit dem Modell verwendet.

	TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5
Gebietsbeurteilung	41.7%	27.4%	23.2%	23.2%	23.5%
Modellkalibrierung	42.8%	27.4%	29.4%	23.2%	29.4%

Bodenspeicherkonstanten

Die Bodenspeicherkonstante für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental) wurde in Kapitel 6.3 ermittelt. Basierend auf dieser Speicherkonstante wurden die Speicherkonstanten für die übrigen Teileinzugsgebiete ohne Abflussmessungen abgeschätzt (siehe Tabelle 17). Die Abschätzung erfolgte unter der vereinfachten Annahme, dass die Bodenspeicherkonstante und die Konzentrationszeit des Oberflächenabflusses (siehe Tabelle 15) proportional zueinander sind.

Tabelle 17: Kalibrierte Bodenspeicherkonstanten k , welche für die Simulationen mit dem Modell verwendet wurden

	TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5
Speicherkonstante k [h]	8.7		4.3	3.2	3.2
Halbwertszeit $T_{1/2}$ [h]	6.0		3.0	2.3	2.3

Direktabflussanteil

Der kalibrierte Direkt- bzw. Oberflächenabflussanteil für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental) beträgt 40% ($d = 0.4$) bzw. der Anteil des unterirdischen Abflusses im Boden 60%.

Im Rahmen von Beregnungsversuchen von Kienzler [17] wurden hydrometrische Messungen und Tracerexperimente durchgeführt, um die Entstehung und die Fliessraten von unterirdischem Abfluss bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten zu untersuchen. An allen Versuchshängen war der Einfluss der Niederschlagsintensität auf den unterirdischen Abfluss klein und die Fliessraten waren auf ein gebietsspezifisches Maximum beschränkt. Bei niedrigen Niederschlagsintensitäten (10 mm/h), welche mit den aufgetretenen Intensitäten bei den Ereignissen von 2005, 2006, 2008, 2009 und 2016 vergleichbar sind (siehe Kapitel 6.4.1 bis 6.4.5), trat an allen Versuchshängen hauptsächlich unterirdischer Abfluss auf. Bei hohen Niederschlagsintensitäten (40-50 mm/h) traten an allen Versuchshängen grosse Oberflächenabflussmengen auf, wobei die unterirdischen Abflussraten unverändert blieben bzw. weiterhin auf das gebietsspezifische Maximum beschränkt waren.

Basierend auf den Erkenntnissen der Modellkalibrierung und der Beregnungsversuche von Kienzler [17] wurde für die Simulationen mit dem Modell eine Direktabflusskurve festgelegt, welche den Direktabflussanteil in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität beschreibt (siehe Abbildung 43). Mit zunehmender Niederschlagsintensität nimmt der Oberflächenabfluss zu, wobei der unterirdische Abfluss im Boden konstant bzw. auf das kalibrierte, gebietsspezifische Maximum beschränkt bleibt.

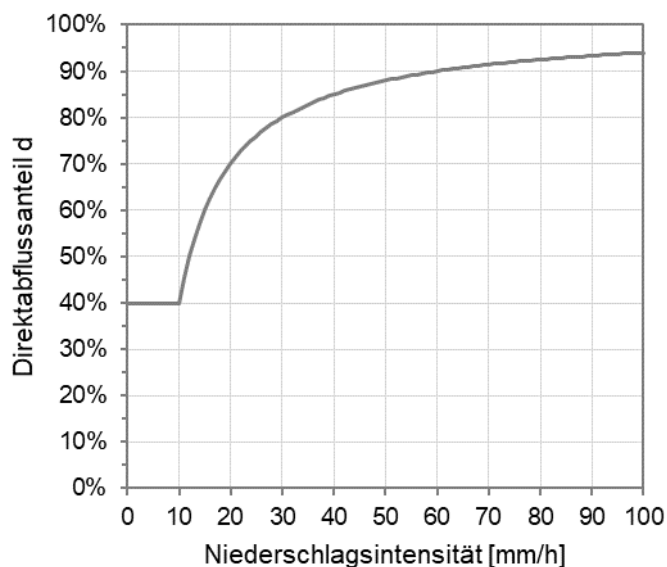


Abbildung 43: Direktabflusskurve für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental), welche den Direktabflussanteil in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität beschreibt und für die Simulationen mit dem Modell verwendet wurde

Die Direktabflusskurve in Abbildung 43 wurde für die für die übrigen Teileinzugsgebiete ohne Abflussmessungen übernommen.

6.4.7 Sensitivitätsanalyse

Für die TEZG 1 und 2 (Weisstannental) wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und die Sensitivität der Modellparameter untersucht. Die Sensitivität beschreibt die Empfindlichkeit der mit dem Modell nachgerechneten Abflussganglinie auf die Veränderung der Modellparameter. Dabei wurden die Modellparameter separat bzw. nacheinander wie folgt variiert:

- Die Abflussbereitschaft der Einzugsgebietsflächen im Weisstannental (siehe Abbildung 28) wurde um eine Stufe tiefer (z.B. Abflusstyp 2 statt 1) bzw. höher (z.B. Abflusstyp 2 statt 3) eingestuft (siehe Abbildung 44).
- Die Halbwertszeit des Bodenspeicherausflusses (siehe Tabelle 17) wurde auf $T_{1/2} = 3\text{ h}$ verkürzt bzw. auf $T_{1/2} = 12\text{ h}$ verlängert.
- Der Direktabflussanteil wurde auf $d = 0.2$ verkleinert bzw. auf $d = 0.8$ vergrößert (siehe Abbildung 45).

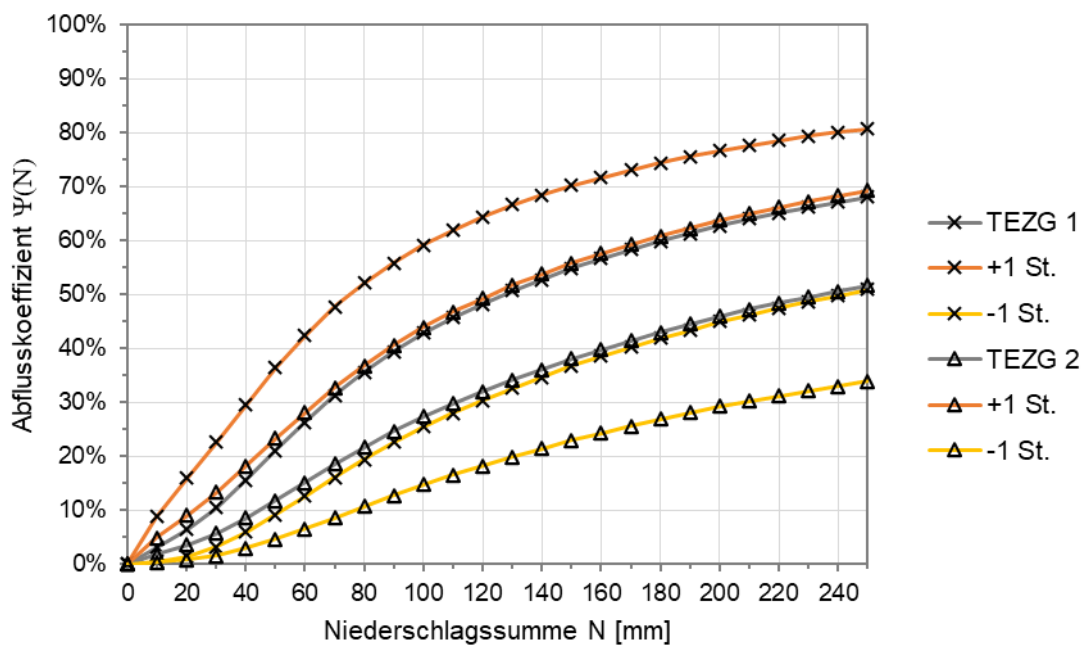


Abbildung 44: Sensitivitätsanalyse: Variation Abflussreaktionskurven

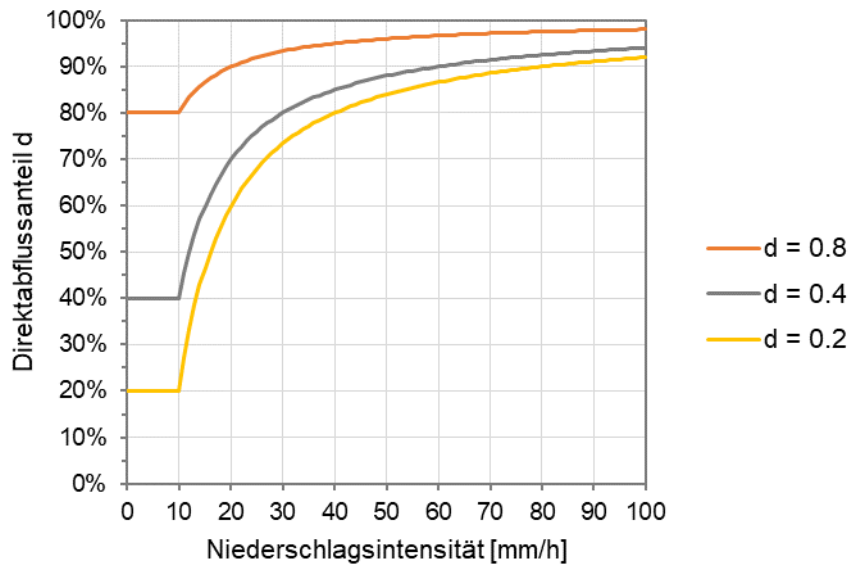


Abbildung 45: Sensitivitätsanalyse: Variation Direktabflusskurve

In Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 sind die Resultate der Sensitivitätsanalyse für das untersuchte Jahreshochwasser 2016 ersichtlich.

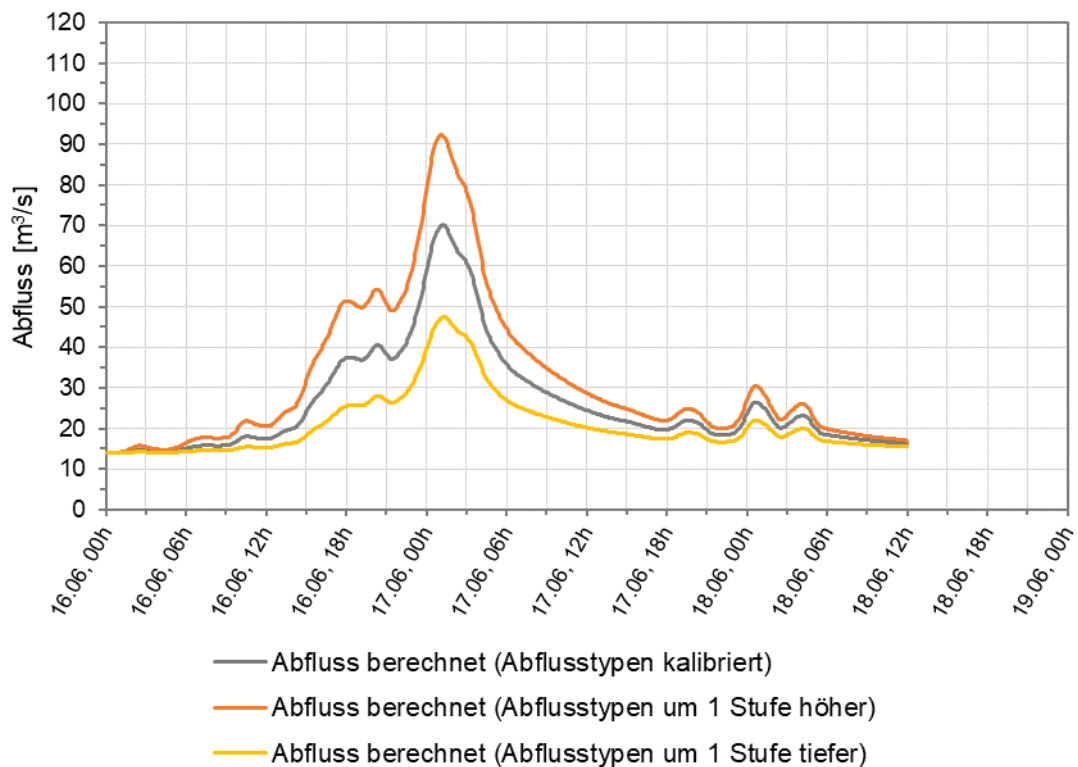


Abbildung 46: Resultate Sensitivitätsanalyse Modellparameter Abflussreaktionskurven

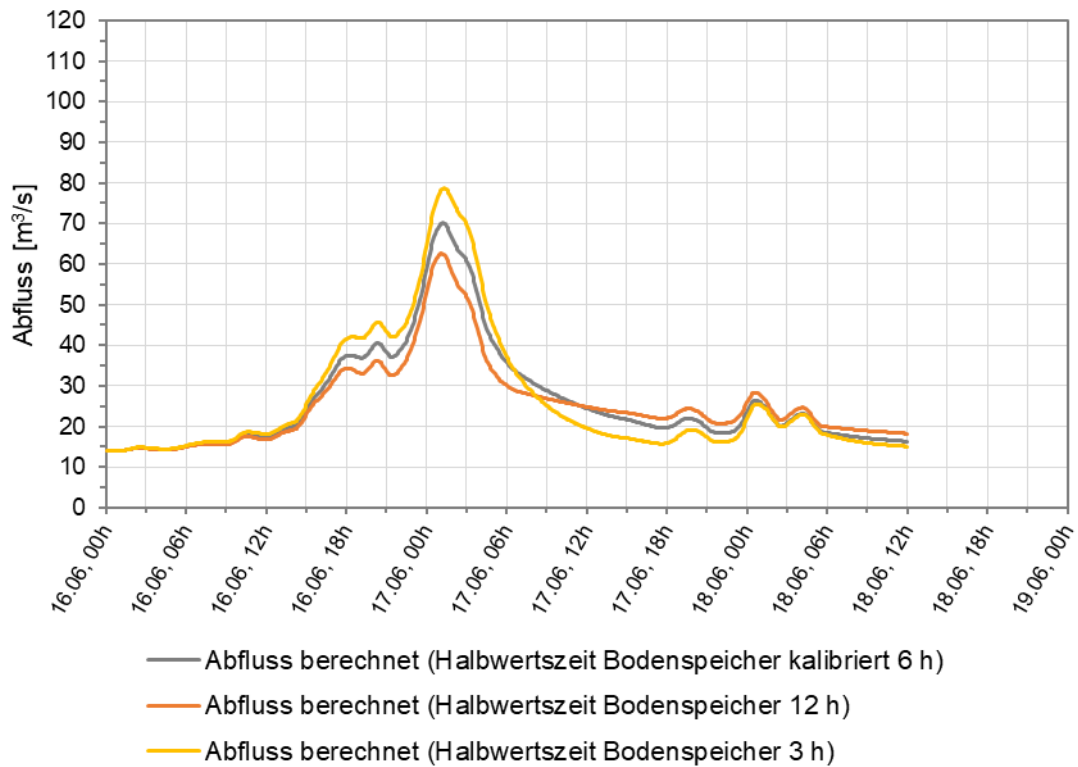


Abbildung 47: Resultate Sensitivitätsanalyse Modellparameter Halbwertszeit Bodenspeicher

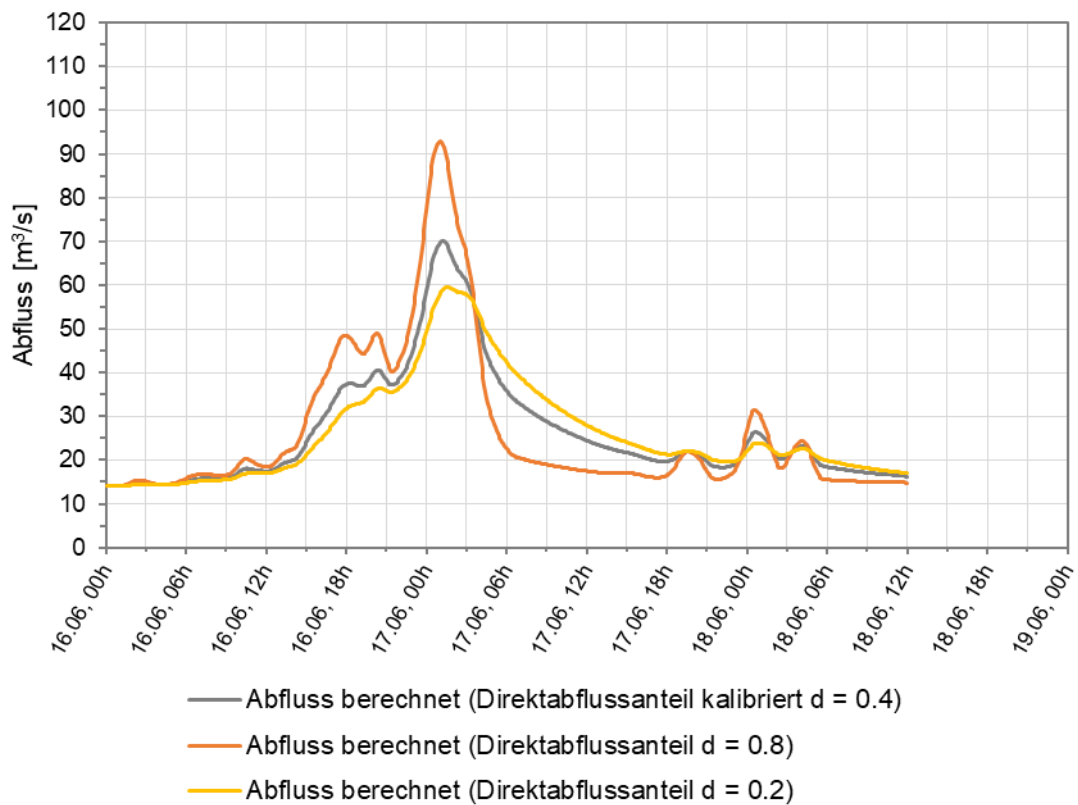


Abbildung 48: Resultate Sensitivitätsanalyse Modellparameter Direktabflussanteil

Die Berechnungen zeigen, dass eine Veränderung der Abflussbereitschaft einen Einfluss auf die Abflussspitze und das Abflussvolumen hat, wobei die Form der Abflussreaktion unverändert bleibt (siehe Abbildung 46). Eine Veränderung der Halbwertszeit des Bodenspeichers und/oder des Direktabflussanteils hat nur einen Einfluss auf die Abflussspitze. Das gesamte Abflussvolumen ist unabhängig von der Halbwertszeit des Bodenspeichers und vom Direktabflussanteil. Je länger bzw. kürzer die Halbwertszeit ist, desto langsamer bzw. schneller entleert sich der Bodenspeicher (siehe Abbildung 47). Je grösser der Direktabflussanteil ist, desto weniger wird der Bodenspeicher gefüllt bzw., desto schneller klingt das Hochwasser nach dem Niederschlagsende ab, weil der Anteil des Bodenspeicherausflusses gering ist (siehe Abbildung 48).

6.5 Niederschlagsszenarien

Niederschläge haben eine zeitliche (Dauer bzw. Intensität des Niederschlags) und räumliche Verteilung (Gebiet des Niederschlags).

6.5.1 Räumliche Verteilung des Niederschlags

Es wurden fünf massgebende räumlich unterschiedliche Niederschlagsszenarien festgelegt (siehe Abbildung 49). Die extremen Punktniederschläge [6], welche die Verhältnisse in einer einzelnen Rasterzelle von 1x1 km² beschreiben, wurden mithilfe der HADES Tafel 2.5 [16] und in Abhängigkeit der Fläche des jeweiligen Hauptniederschlagsgebietes in Gebietsniederschläge umgerechnet bzw. abgemindert.

- **Szenario 1:** Alle Teileinzugsgebiete werden voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde die voll überregnete Gebietsfläche von 141.6 km² berücksichtigt. Dies entspricht einem hundertjährigen Gebietsniederschlag über das gesamte EZG bis Flums (BP 5).
- **Szenario 2:** Das Teileinzugsgebiet TEZG 1 (oberes Weisstannental) wird voll, die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde für das Teileinzugsgebiet TEZG 1 die voll überregnete Gebietsfläche von 70.3 km² berücksichtigt.
- **Szenario 3:** Beide Teileinzugsgebiete im Weisstannental (TEZG 1 und 2) werden voll, die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde für die Teileinzugsgebiete TEZG 1 und 2 die voll überregnete Gebietsfläche von 105.7 km² berücksichtigt.
- **Szenario 4:** Die Teileinzugsgebiete TEZG 2, 3, 4 und 5 werden voll, die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde für die Teileinzugsgebiete TEZG 2, 3, 4 und 5 die voll überregnete Gebietsfläche von 71.3 km² berücksichtigt.
- **Szenario 5:** Die Teileinzugsgebiete im Seetal (TEZG 3, 4 und 5) werden voll, die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde für die Teileinzugsgebiete TEZG 3, 4 und 5 (Seetal) die voll überregnete Gebietsfläche von 35.9 km² berücksichtigt.
- **Szenario 6:** Das Teileinzugsgebiet TEZG 5 (Röllbach) wird voll, die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet. Bei der Abminderung der Punkt- in Gebietsniederschläge wurde für das Teileinzugsgebiet TEZG 5 die voll überregnete Gebietsfläche von 11.6 km² berücksichtigt. Die in Abbildung 49 schraffierten TEZG 2, 3, 4 und 5 werden gegenüber dem TEZG 1 (oberes Weisstannental im Südwesten) um 60 Minuten zeitversetzt bzw. länger überregnet.

Beim Szenario 1 wurde je Niederschlagsdauer (siehe Kapitel 6.5.2) die hundertjährige Niederschlagsmenge, welche auf das gesamte EZG fällt, bestimmt. Bei den übrigen Szenarien wurden diejenigen Teileinzugsgebiete, welche nicht voll beregnet werden, zu 60% bis 89% beregnet. So ist gewährleistet, dass trotz unterschiedlicher Grösse der voll überregneten Hauptniederschlagsgebiete bei allen Szenarien (je Niederschlagsdauer) die gleiche hundertjährige Niederschlagsmenge auf das gesamte EZG fällt.

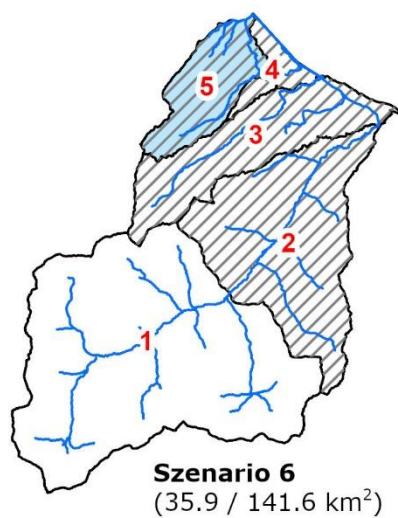
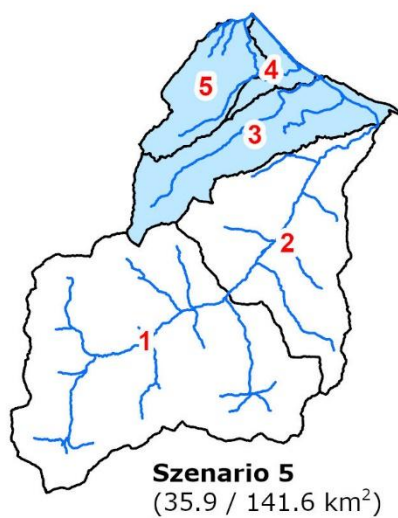
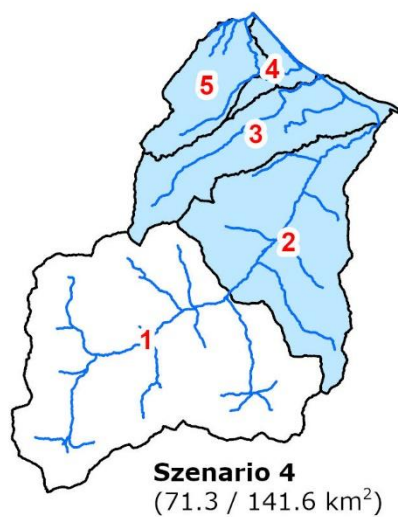
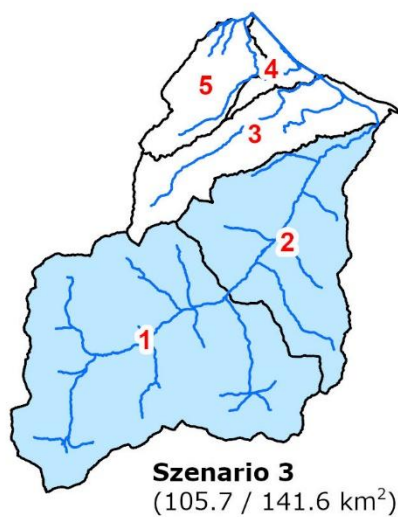
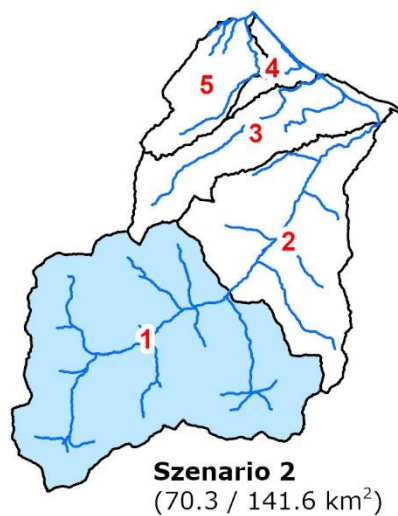
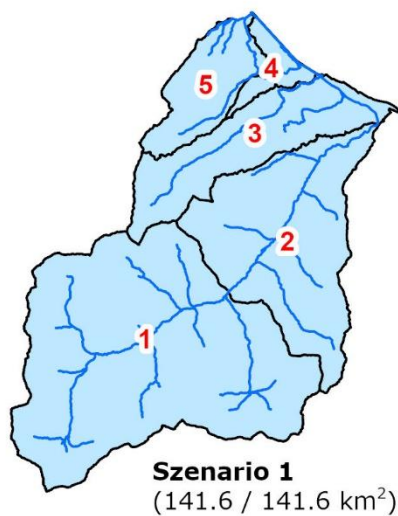


Abbildung 49: Niederschlagszonen der Hauptniederschlagsgebiete (blau markiert)

6.5.2 Zeitliche Verteilung des Niederschlags und Niederschlagsintensitäten

Für die Festlegung der zeitlichen Verteilung des Niederschlags wurden die extremen Punktniederschläge [6] statistisch ausgewertet. In Tabelle 19 sind die räumlichen Mittelwerte der extremen Punktniederschläge für die 24-Stunden- und 60-Minuten-Summen pro Teileinzugsgebiet zusammengefasst.

Tabelle 18: Räumliche Mittelwerte der extremen Punktniederschläge für die Wiederkehrperiode 100 Jahre aus [6] für die 24-Stunden- und 60-Minuten-Summen pro Teileinzugsgebiet

	TEZG 1	TEZG 2	TEZG 3	TEZG 4	TEZG 5
60min-Summe [mm]	49	51	52	53	53
24h-Summe [mm]	152	150	153	147	155

Bei kurzzeitigen Niederschlägen bis zu einer Dauer von 4 Stunden wurde eine zeitliche Dreiecksverteilung der Niederschlagsmengen angenommen, wobei die Niederschlagsspitze nach einem Drittel der Niederschlagsdauer auftritt. Für langanhaltende Niederschlägen mit einer Dauer von mehr als 4 Stunden wurde eine gleichmässige zeitliche Verteilung der Niederschlagsmenge angenommen (Blockregen mit konstanter Intensität).

Tabelle 19: Die für die Abflussberechnungen mit dem NAM verwendeten Niederschlagswerte. Bei den blau markierten Niederschlagswerten handelt es sich um die auf das jeweilige Hauptniederschlagsgebiet (siehe Abbildung 49) abgeminderten hundertjährigen Gebietsniederschlagsmengen. Die übrigen Teileinzugsgebiete werden nicht voll überregnet (Wiederkehrperiode < 100 Jahre).

		Niederschlagsmengen [mm] (je Niederschlagsdauer)											
	TEZG	1h	2h	3h	4h	6h	8h	12h	16h	20h	24h	36h	48h
Szenario 1	1	32	41	47	54	65	77	98	109	118	127	150	170
	2	33	42	48	55	66	77	98	108	117	125	147	166
	3	34	43	49	56	67	79	100	110	119	127	149	168
	4	34	43	49	55	66	77	97	107	115	123	143	160
	5	35	44	50	57	69	80	102	112	121	129	152	171
Szenario 2	1	38	48	56	63	75	87	108	119	128	136	160	181
	2	27	35	40	46	56	67	88	99	108	116	137	155
	3	28	35	40	46	58	68	90	100	109	118	139	157
	4	28	35	40	46	57	67	88	97	106	113	133	150
	5	29	36	41	47	59	70	92	102	111	120	141	160
Szenario 3	1	34	44	51	58	70	81	102	113	123	131	154	175
	2	36	45	52	59	70	81	102	113	122	129	151	171
	3	26	33	38	44	55	66	87	97	106	115	136	154
	4	27	33	38	44	54	64	84	94	103	111	130	147
	5	27	34	39	45	56	67	88	99	108	117	138	156
Szenario 4	1	26	33	38	44	55	66	88	99	108	117	139	159
	2	39	50	57	64	76	87	107	118	127	135	157	176
	3	40	51	58	65	77	89	109	120	129	137	159	179
	4	41	51	58	65	76	87	107	117	125	132	153	171
	5	41	52	59	67	79	90	111	122	131	139	162	182
Szenario 5	1	28	36	41	48	59	70	92	103	112	121	143	163
	2	29	37	42	49	60	71	92	103	111	119	141	159
	3	45	57	66	73	85	96	116	127	136	145	167	187
	4	46	57	65	72	84	95	113	123	132	139	160	178
	5	46	59	67	75	87	98	118	129	139	147	170	189
Szenario 6	1	30	39	45	51	63	74	96	107	116	124	147	167
	2	31	40	46	52	64	75	96	106	115	123	145	164
	3	32	41	47	53	65	76	98	108	117	125	147	166
	4	33	41	46	53	64	75	95	105	113	120	141	158
	5	53	67	77	85	97	107	123	135	145	155	177	195

6.6 Abflussberechnung

Die Resultate der Abflussberechnungen mit dem NAM für den Ist-Zustand an den 5 Bemessungspunkten entlang der Seez aufgrund der verschiedenen Niederschlagsszenarien sind in Tabelle 20 dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass bei den Bemessungspunkten 1 bis 4 die 4 h-Niederschläge (Gewitterregen) und beim Bemessungspunkt 5 die 12 h-Niederschläge (Dauerregen) die grössten Abflüsse erzeugen.

Bei den Abflussberechnungen wurden folgende Annahmen gemacht:

- Das Modell berücksichtigt das natürliche Einzugsgebiet, d.h. ohne die Seez-Überleitungen in den Gigerwaldsee in Abzug zu bringen. Im Hochwasserfall muss davon ausgegangen werden, dass sämtliche Wasserfassungen (siehe Abbildung 2) abgestellt werden und keine Überleitungen in den Stausee Gigerwald stattfinden.
- Die Auswertungen der Abflussmessungen am Pegel Seez-Mels (siehe Kapitel 3) haben gezeigt, dass die grösseren Hochwasser vor allem im Sommer in den Monaten Juni, Juli und August auftraten. In der ausgewerteten Messperiode beträgt das über die drei Monate Juni, Juli und August gemittelte Monatsmittel des Abflusses ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Aus diesem Grund wurde für die Abflussberechnungen ein Basisabfluss aus dem Weisstannental von insgesamt $3 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen. Für das Teileinzugsgebiet TEZG 1 (70.3 km^2) wurde ein Basisabflussanteil von $2 \text{ m}^3/\text{s}$, für das Teileinzugsgebiet TEZG 2 (35.4 km^2) ein Basisabflussanteil von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen.

Das NAM schätzt die Bandbreite des hundertjährigen Abflusses beim Pegel Seez-Mels (siehe Abbildung 50) übereinstimmend mit den Untersuchungen der VAW (siehe Kapitel 4).

Folgerung:

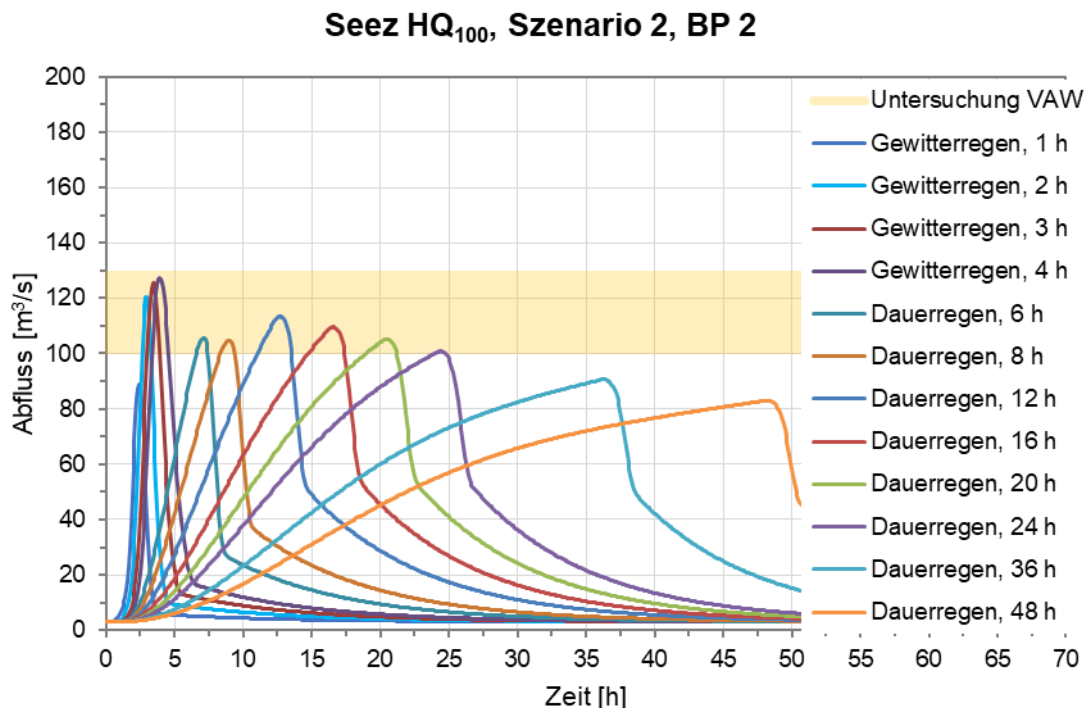


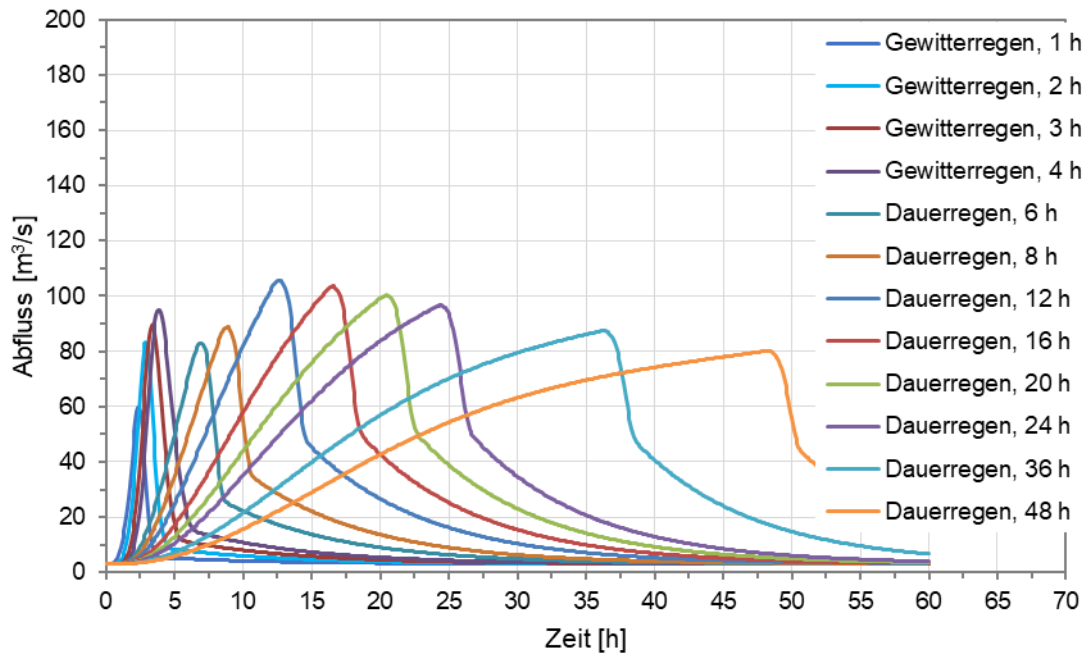
Abbildung 50: Abflussberechnungen mit dem NAM (Szenario 2) im Vergleich mit den Untersuchungen der VAW in [8], welche für das HQ₁₀₀ beim Pegel Seez-Mels eine Abflussbandbreite von 100 – 130 m^3/s ergaben (siehe Kapitel 4)

Tabelle 20: Die Resultate der Abflussberechnungen HQ_{100} mit dem NAM. Fett eingetragen sind die grössten Abflussspitzen.

		Abflussspitzen HQ_{100} [m ³ /s] (je Niederschlagsdauer)											
	BP	1h	2h	3h	4h	6h	8h	12h	16h	20h	24h	36h	48h
Szenario 1	1	56	75	76	78	68	71	82	79	75	72	64	58
	2	60	83	90	95	83	89	106	104	100	97	87	80
	3	60	85	94	103	91	100	122	120	117	113	102	93
	4	60	85	94	103	91	101	124	122	119	115	104	95
	5	61	86	96	106	95	106	133	132	129	124	112	103
Szenario 2	1	86	115	117	117	96	92	94	89	84	79	70	63
	2	89	120	125	127	106	105	113	110	105	101	91	83
	3	89	121	128	132	110	112	127	124	120	115	104	95
	4	89	122	128	133	111	112	128	125	121	117	105	97
	5	89	122	129	134	113	116	135	133	129	125	113	103
Szenario 3	1	68	91	93	93	80	79	88	83	79	75	66	60
	2	72	101	109	114	97	99	113	110	106	101	91	83
	3	72	102	111	119	102	106	126	123	119	115	103	95
	4	72	102	111	119	103	107	127	125	121	116	105	96
	5	73	103	112	121	105	110	133	132	129	124	112	103
Szenario 4	1	32	43	43	46	46	55	70	69	67	65	59	54
	2	39	58	67	74	70	80	98	97	95	93	84	78
	3	40	61	75	87	85	97	118	117	114	111	100	92
	4	40	62	75	88	87	98	120	120	117	113	103	94
	5	41	63	78	93	93	106	131	131	128	123	112	102
Szenario 5	1	41	54	54	57	53	62	75	73	70	68	61	55
	2	43	60	64	70	64	76	96	95	93	91	83	76
	3	45	63	72	84	81	95	118	117	114	110	100	92
	4	45	63	73	85	83	97	121	120	116	113	102	94
	5	45	65	75	90	93	108	133	132	128	124	112	103
Szenario 6	1	49	65	67	69	62	68	80	77	74	70	63	57
	2	64	85	86	89	81	89	106	103	99	96	86	79
	3	68	93	97	101	93	103	124	121	116	112	101	92
	4	68	93	97	102	94	105	126	123	118	114	102	94
	5	69	96	106	117	103	115	139	136	131	126	113	103

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} an den Bemessungspunkten 2 (Pegel Seez-Mels) und 5 (Seez nach Mündung Röllbach) für das Szenario 1 dargestellt.

Seez HQ_{100} , Szenario 1, BP 2



Seez HQ_{100} , Szenario 1, BP 5

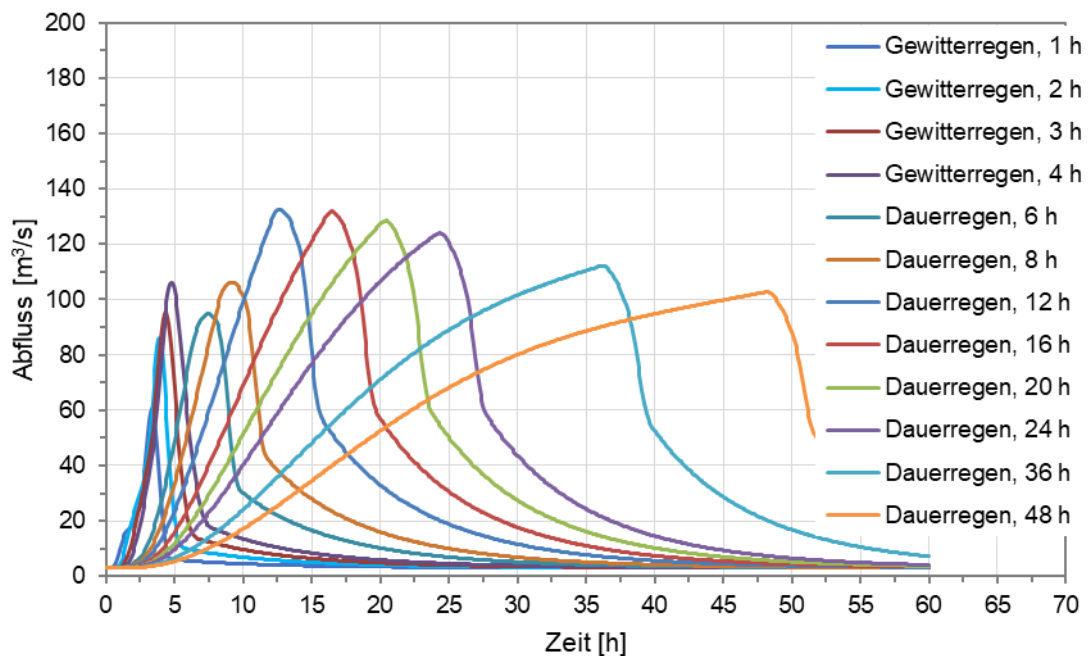
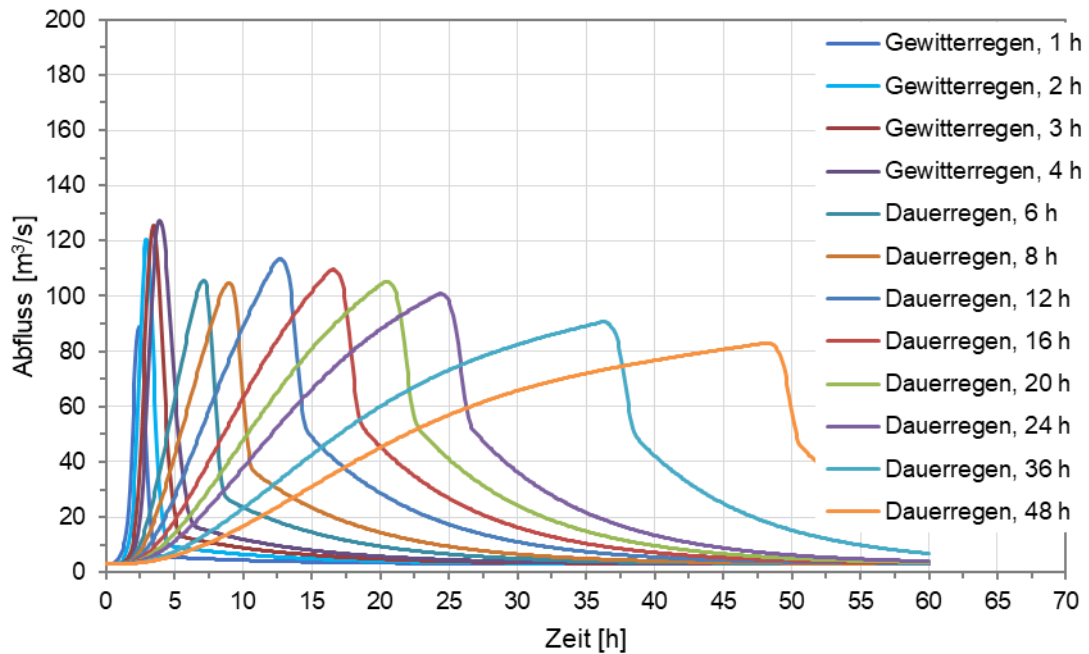


Abbildung 51: Abflussganglinien Seez HQ_{100} an den BP 2 und 5 für das Szenario 1

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} an den Bemessungspunkten 2 (Pegel Seez-Mels) und 5 (Seez nach Mündung Röllbach) für das Szenario 2 dargestellt.

Seez HQ_{100} , Szenario 2, BP 2



Seez HQ_{100} , Szenario 2, BP 5

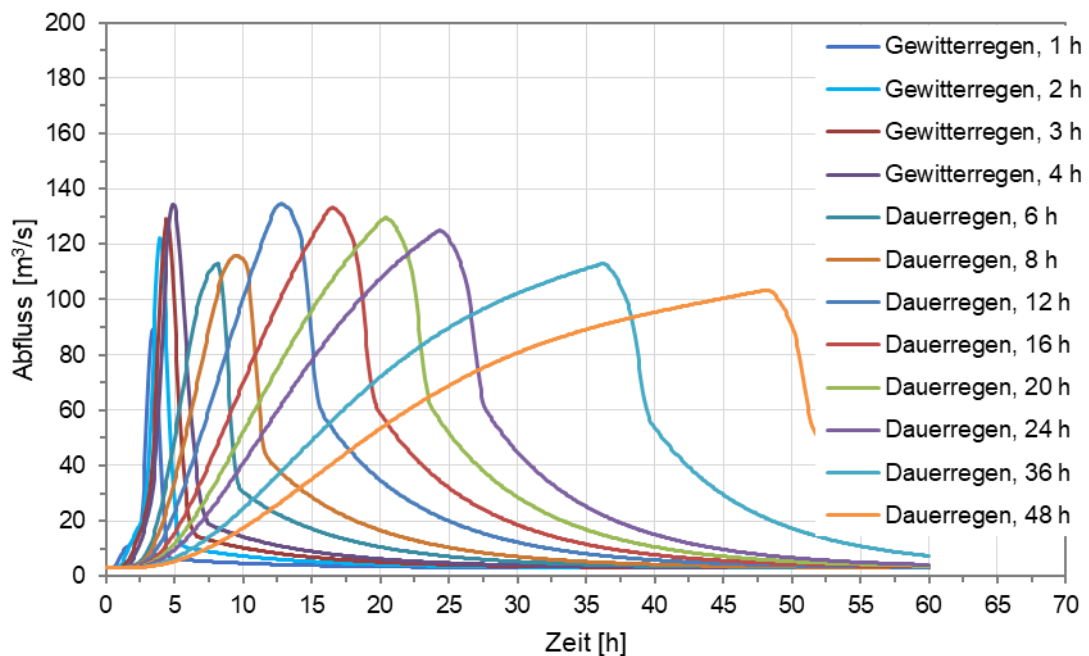
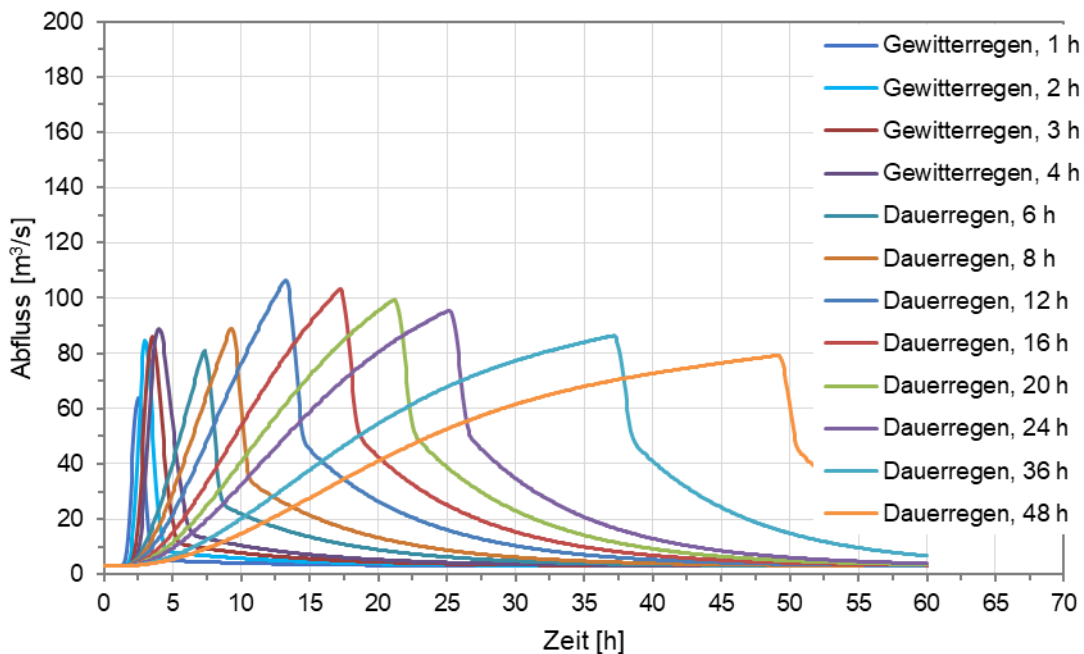


Abbildung 52: Abflussganglinien Seez HQ_{100} an den BP 2 und 5 für das Szenario 2

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} an den Bemessungspunkten 2 (Pegel Seez-Mels) und 5 (Seez nach Mündung Röllbach) für das Szenario 6 dargestellt.

Seez HQ_{100} , Szenario 6, BP 2



Seez HQ_{100} , Szenario 6, BP 5

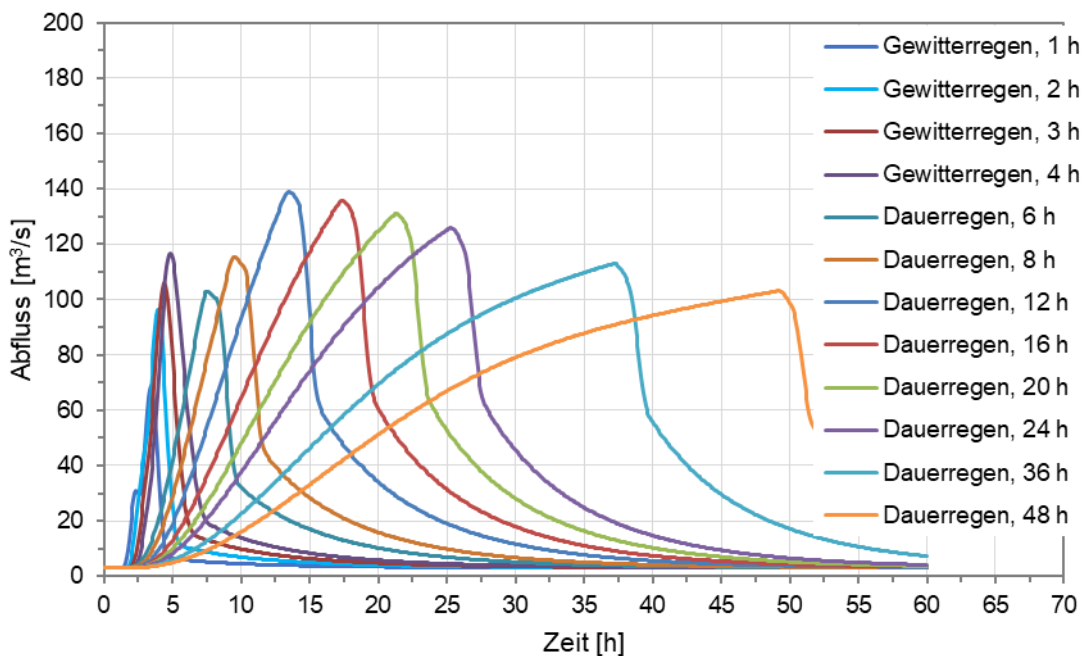


Abbildung 53: Abflussganglinien Seez HQ_{100} an den BP 2 und 5 für das Szenario 6

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} am Bemessungspunkt 5 (Röllbach) für die Szenarien 1 und 6 dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass der Röllbach beim Szenario 6 (Gewitterregen) die grössten Abflüsse (ca. $30 \text{ m}^3/\text{s}$) erreicht. Diese Abflussspitzen bei den Gewitterregen überlagern sich jedoch nicht mit den Abflussspitzen aus den TEZG 1 bis 3 (siehe

Abbildung 55).

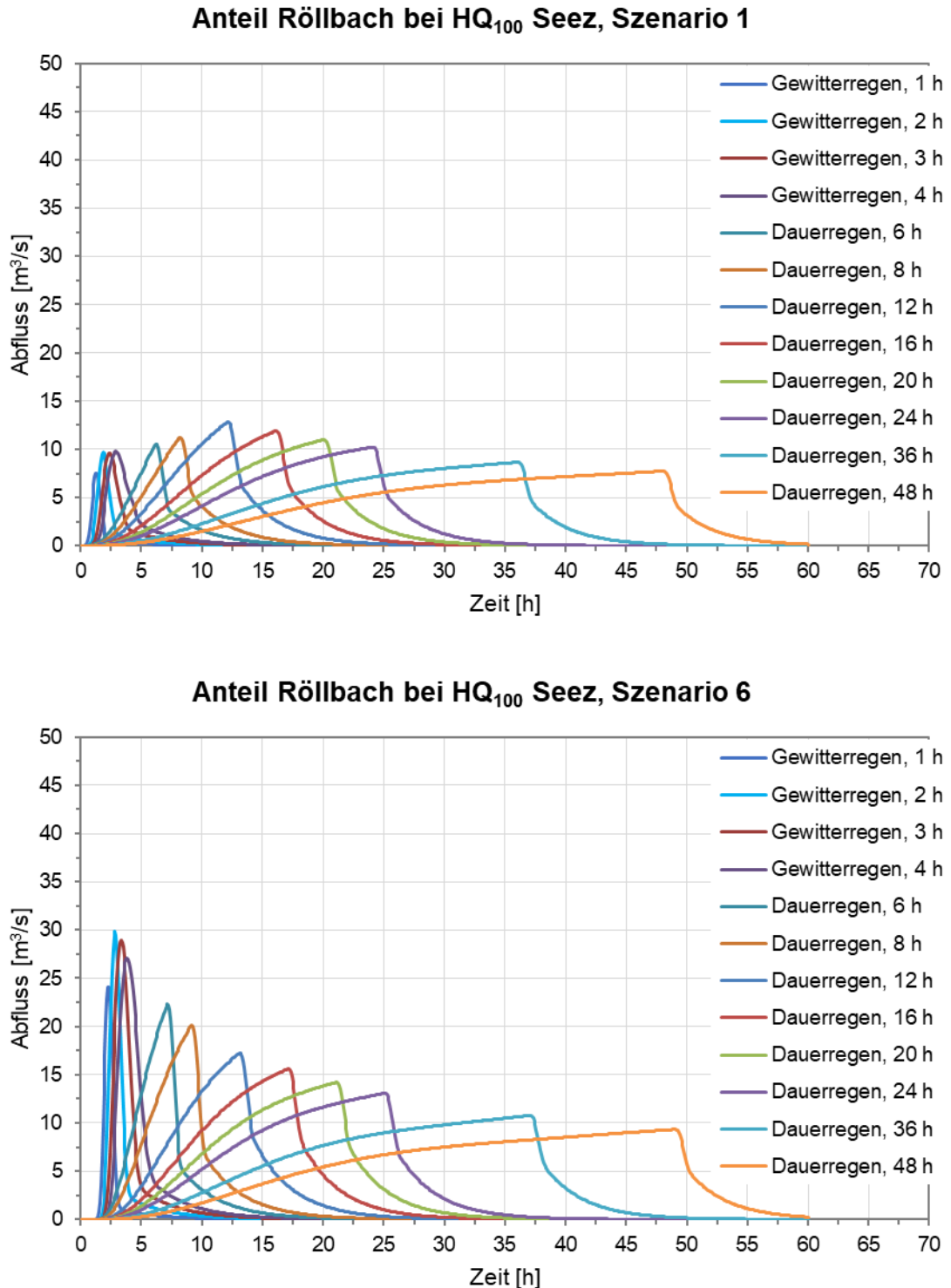
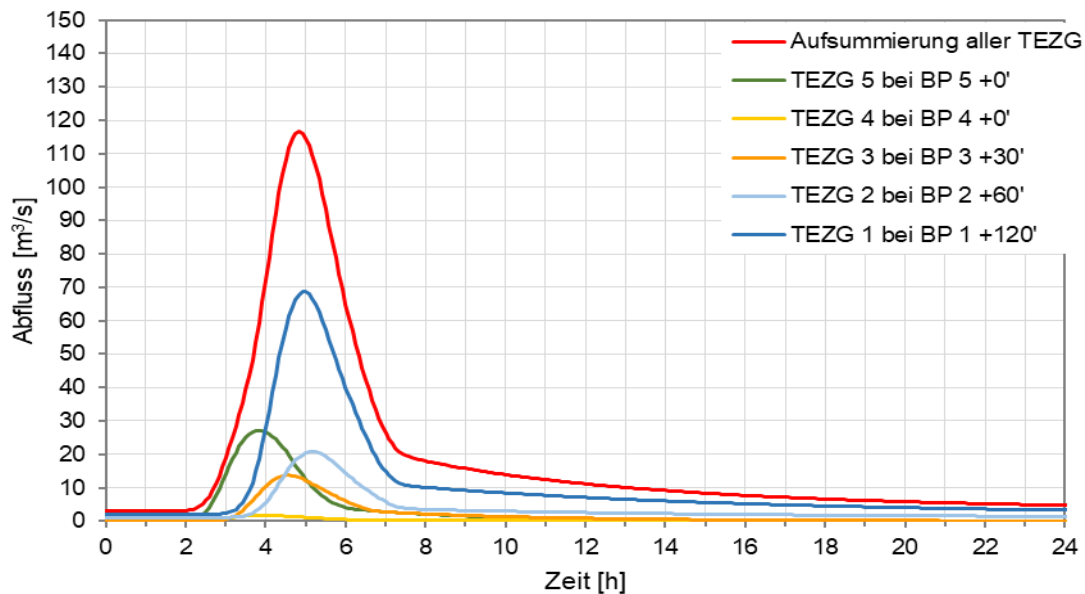


Abbildung 54: Abflussanteile Röllbach bei einem HQ_{100} der Seez für die Szenarien 1 und 6

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} aller Teileinzugsgebiete inkl. Aufsummierung zum Gesamtabfluss beim BP 5 für die Szenarien 1 und 6 (Gewitterregen 4 Stunden) dargestellt. Die Berechnungen des Szenarios 1 zeigen, dass die Abflussspitze beim BP 5 erst nach Abklingen der Abflussspitzen der TEZG 2 bis 5 auftritt. Die Berechnungen des Szenarios 6 zeigen, dass sich die Abflussspitzen von TEZG 1, 2 und 3 grösstenteils überlagern. Der Abflussanteil des Röllbachs zum Zeitpunkt der Abflussspitze der Seez beim BP 5 beträgt ca. $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Szenario 1) bzw. $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (Szenario 6).

Seez HQ_{100} , Anteile TEZG, Szenario 6, 4 h-Niederschlag



Seez HQ_{100} , Anteile TEZG, Szenario 1, 4 h-Niederschlag

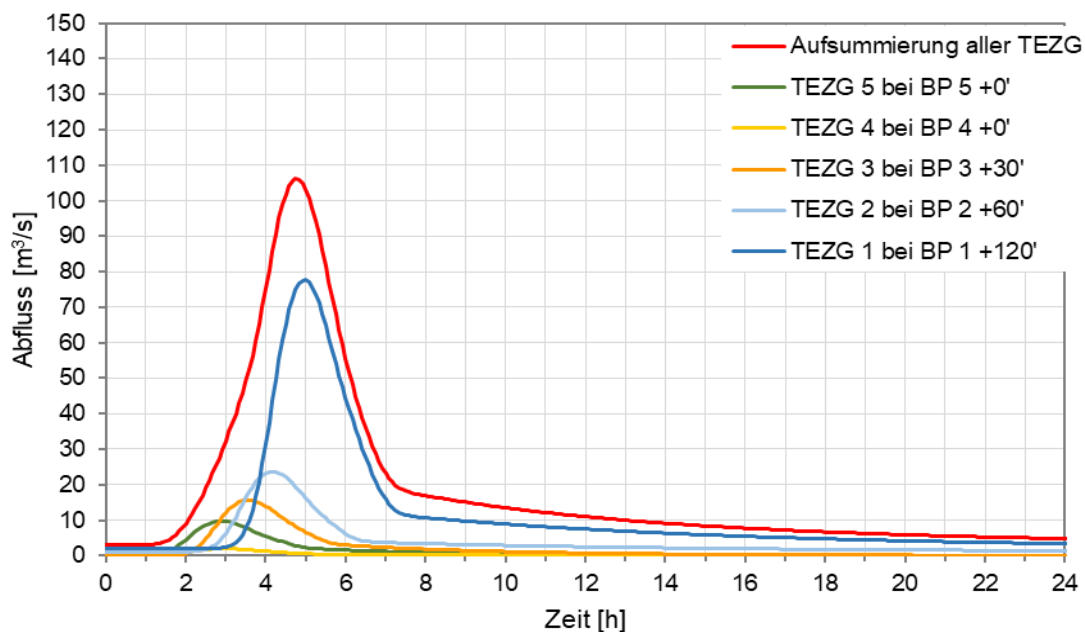
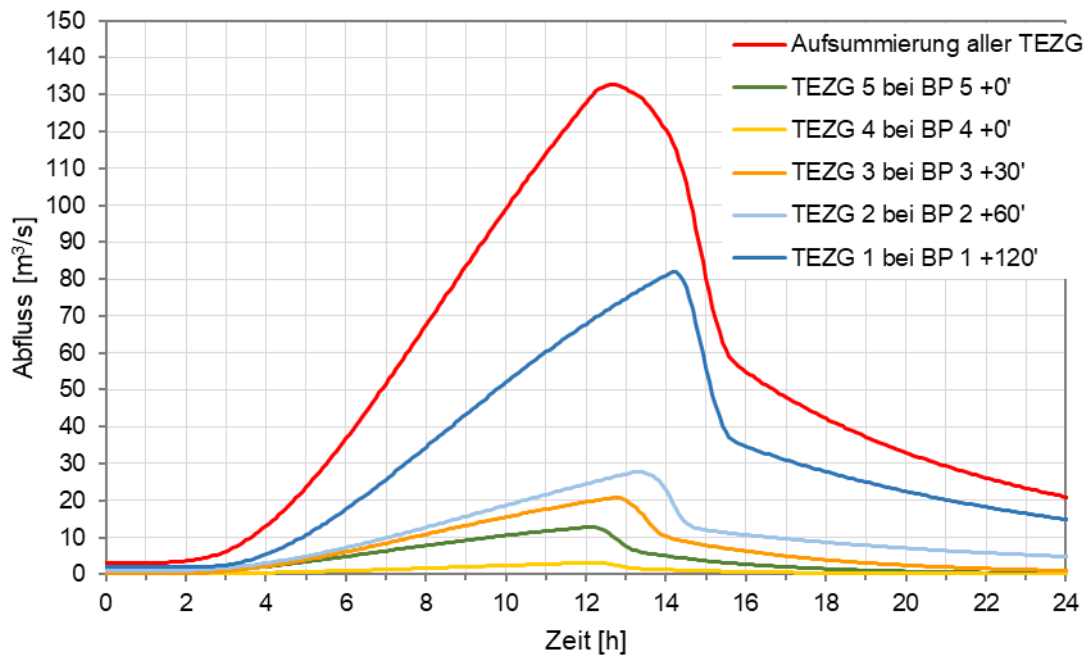


Abbildung 55: Zeitversetzte Aufsummierung aller Abflussganglinien am BP 5 unter Berücksichtigung der Fliesszeiten im Gerinne der Seez (siehe angegebene Zeitversetzung) für die Szenarien 1 und 6 (je Gewitterregen 4 Stunden)

Untenstehend sind die berechneten Abflussganglinien HQ_{100} aller Teileinzugsgebiete inkl. Aufsummierung zum Gesamtabfluss beim BP 5 für die Szenarien 1 und 6 (Dauerregen 12 Stunden) dargestellt. Die Berechnungen des Szenarios 1 zeigen, dass die Abflussspitze beim BP 5 bereits vor Erreichen der Abflussspitzen der TEZG 2 bis 5 auftritt. Der Abflussanteil des Röllbachs zum Zeitpunkt der Abflussspitze der Seez beim BP 5 beträgt ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Szenario 1) bzw. $16 \text{ m}^3/\text{s}$ (Szenario 6).

Seez HQ_{100} , Anteile TEZG, Szenario 1, 12 h-Niederschlag



Seez HQ_{100} , Anteile TEZG, Szenario 6, 12 h-Niederschlag

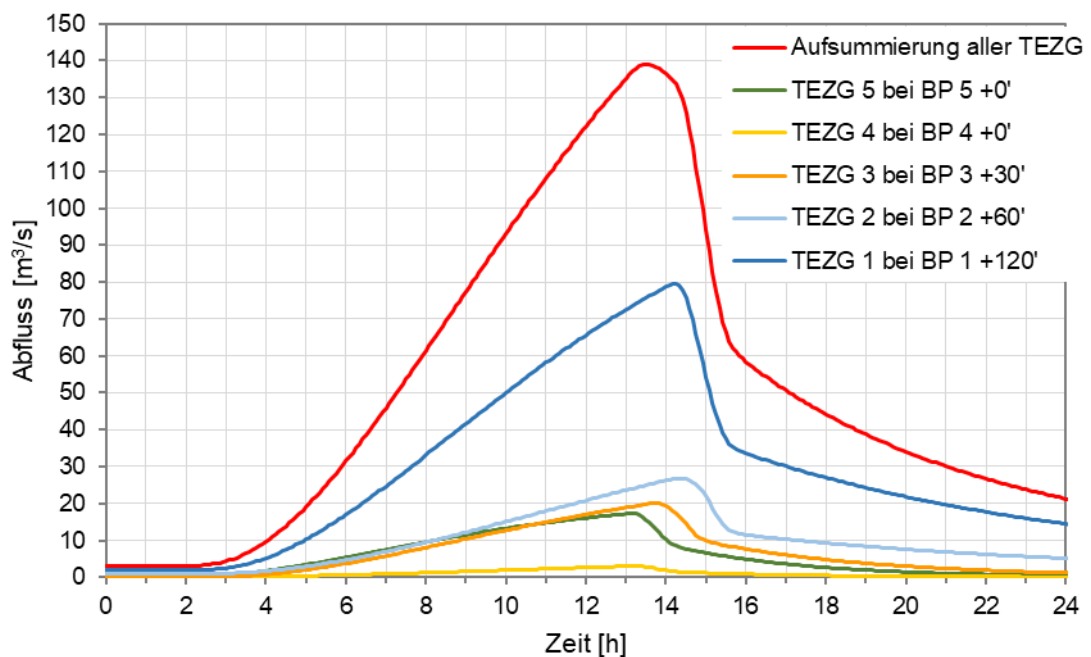


Abbildung 56: Zeitversetzte Aufsummierung aller Abflussganglinien am BP 5 unter Berücksichtigung der Fließzeiten im Gerinne der Seez (siehe angegebene Zeitversetzung) für die Szenarien 1 und 6 (je Dauerregen 12 Stunden)

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das NAM ergibt für den Bemessungspunkt 5 (BP 5) der Seez eine 100-jährliche Abflussbandbreite von 131 bis 139 m³/s (siehe Tabelle 20). Diese Bandbreite liegt nur knapp unter dem vom Auftraggeber für den Projektabschnitt Seez 3. Etappe festgelegten Dimensionierungsabfluss von 150 m³/s (siehe Tabelle 2). Diese Abweichung liegt innerhalb des Unsicherheitsbereichs der Hochwasserabschätzung, weshalb eine Anpassung des Dimensionierungsabflusses nicht angezeigt ist. Die Abflussprozesse und die Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet können mit dem NAM nur näherungsweise erfasst werden. Zudem sind die räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilungen (siehe Kapitel 6.5), welche für die Abflussberechnungen im NAM angenommen wurden, mit Unsicherheiten behaftet.

Der festgelegte Dimensionierungsabfluss von 150 m³/s für den BP 5 ist eine konservative Annahme, welche die im NAM enthaltenen Unsicherheiten berücksichtigt.

Die Berechnungen mit dem NAM zeigen, dass der Röllbach bei einem vierstündigen Niederschlagsereignis mit Schwerpunkt über seinem Einzugsgebiet zwar eine Abflussspitze von 28 m³/s erreicht (siehe Abbildung 57). Aufgrund der Einzugsgebietscharakteristik überlagert sich diese Spitze aber nur teilweise mit der Abflussspitze der Seez, welche bei einem solchen Ereignis gegenüber der Spitze des Röllbachs zeitlich verzögert eintritt (BP 4, 102 m³/s). Die resultierende Abflussspitze in der Seez nach der Mündung des Röllbachs beträgt 117 m³/s (BP 5). Der Abflussbeitrag des Röllbachs zur Hochwasserspitze der Seez beträgt 15 m³/s.

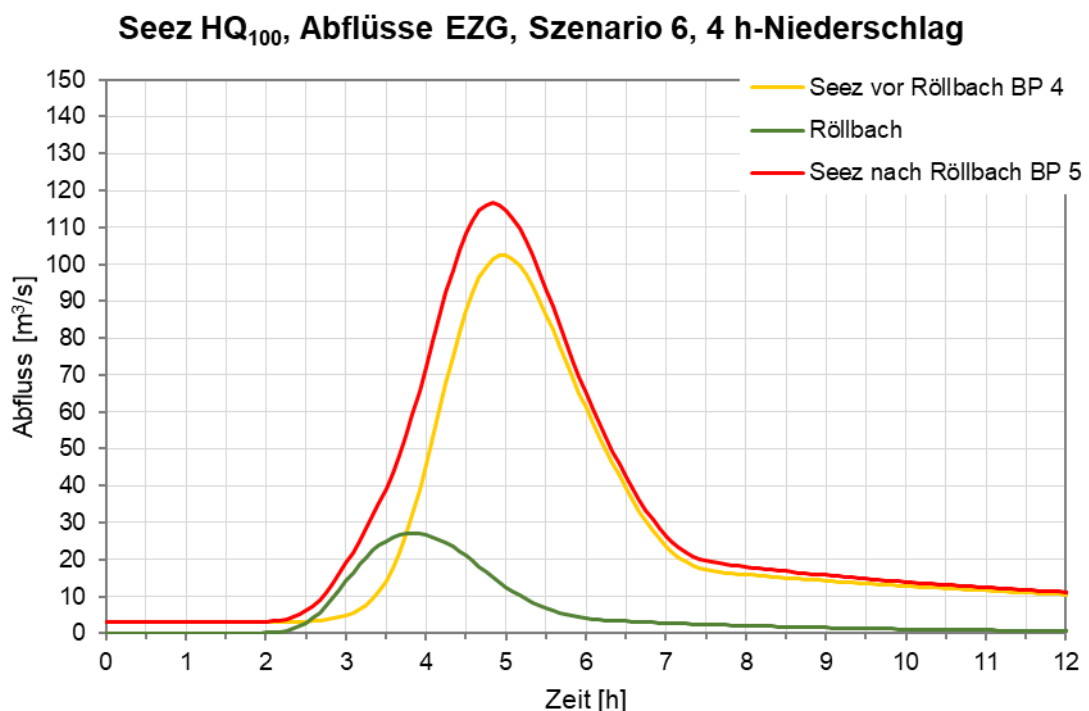


Abbildung 57: Abflussganglinien der Seez vor/nach Mündung des Röllbachs sowie die Abflussganglinie des Röllbachs für das Szenario 6 (4h-Niederschlag)

Bei länger andauernden Niederschlagsereignissen oder bei Ereignissen, deren Niederschlagschwerpunkt nicht über dem Einzugsgebiet des Röllbachs liegt, ist der Abflussbeitrag des Röllbachs zur Hochwasserspitze der Seez kleiner als 15 m³/s.

Ein Rückhalt des Röllbach-Hochwasser zur Reduktion der Abflussspitze der Seez in Flums um $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (von 150 auf $130 \text{ m}^3/\text{s}$) erscheint aus hydrologischer Sicht nicht machbar. Bei Niederschlagsereignissen mit Schwerpunkt über dem Röllbach-Einzugsgebiet beträgt der Abflussbeitrag des Röllbachs zur Hochwasserspitze der Seez maximal $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (Szenario 6, Tabelle 20). Bei Niederschlagsereignissen mit Schwerpunkt über dem Seez-Einzugsgebiet (Szenarien 1 bis 5, Tabelle 20) ist der Abflussbeitrag des Röllbachs zur Hochwasserspitze der Seez kleiner als $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Ein Rückhalt der Röllbach-Hochwasser hat somit keinen massgeblichen Einfluss auf die Abflussspitze im Gerinne der Seez.

Uznach, 03.11.2025

Niederer + Pozzi Umwelt AG