

Bestimmung des Gebietsabflusses über Fließhöhensensoren – eine einfache, kostengünstige und vielversprechende Methode in Einzugsgebieten ohne Direktmessung

(Ergebnisse aus dem Waldfonds-Projekt MEZG-Rindbach)

Masterarbeit

*„Analyse der Abflussbildung in steilen,
alpinen Teileinzugsgebieten anhand
Abflusshöhenmessungen und Zemokost“*

DDI Michael Aichinger

Betreut von:

Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Christian Scheidl (BOKU)

Mag. Dr. Bernhard Kohl (BFW)

DI Dr. Gerhard Markart (BFW)

Inhalt

- Fragestellung / Ziele
- Projektgebiet
- Datengrundlage
- Methodik
 - Abflusshöhenmessung
 - Auswertung der beobachteten Ereignisse
- Ergebnisse
 - Beobachtete Ereignisse
 - TEZG Charakteristika
 - Vergleich der Beobachtungen mit Zemokost



Abb. 1: montierter Abflusshöhensensor TEZG 4

Fragestellung / Ziele

- Analyse der Abflussbildung auf Teileinzugsgebietsebene
 - Einfluss von:
 - Niederschlagsmenge
 - Niederschlagsintensität
 - Ereignisdauer
 - Vorfeuchte
 - Auf Modellparameter:
 - Abflussbeiwert
 - Rauigkeitsklasse
 - Systemzustand
- Verwendung von kosteneffizienten Sensoren
- Nachrechnung von erfassten Ereignissen mit ZEMOKOST und Vergleich der Ergebnisse
- Analyse der Unterschiede in den beobachteten Teileinzugsgebieten

Projektgebiet

- östlich von Ebensee (OÖ)
- Fläche: 23,1km²
- 422-1.598m ü. A.
- Gestein: Kalk
- überwiegend bewaldet

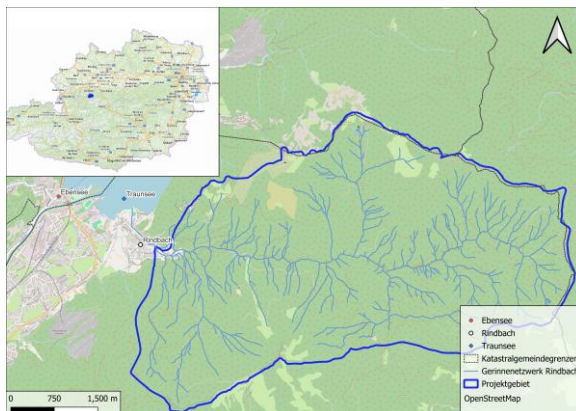


Abb. 2: Übersichtskarte Projektgebiet, EZG Rindbach

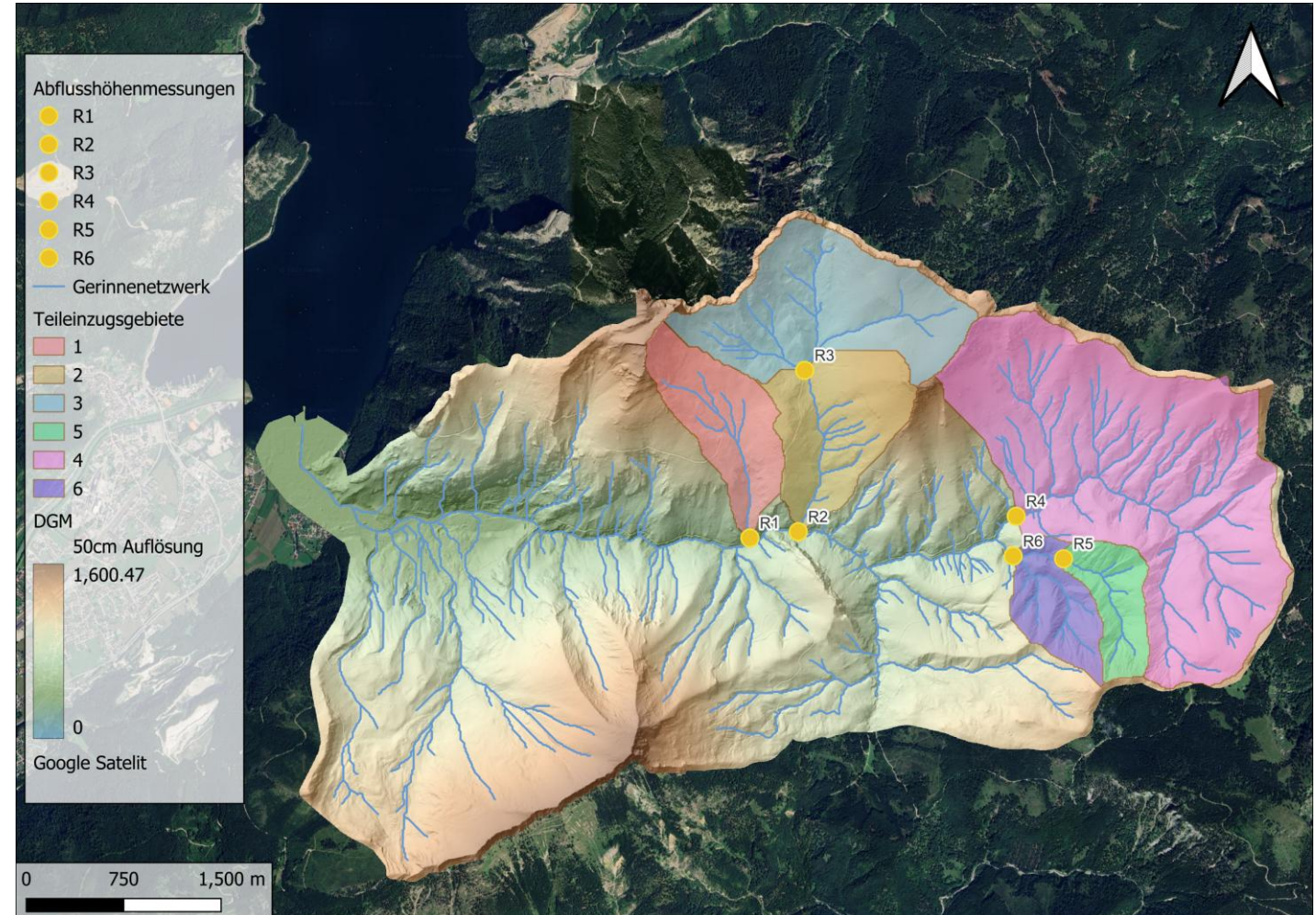


Abb. 3: EZG des Rindbaches mit den 6 beobachteten Teileinzugsgebieten

Datengrundlage

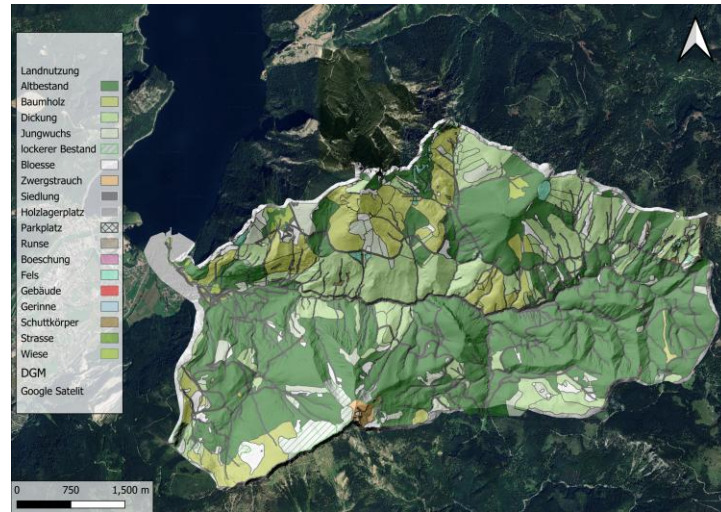


Abb. 4: Landnutzungskartierung Rindbach (S. Wieshammer, 2025)

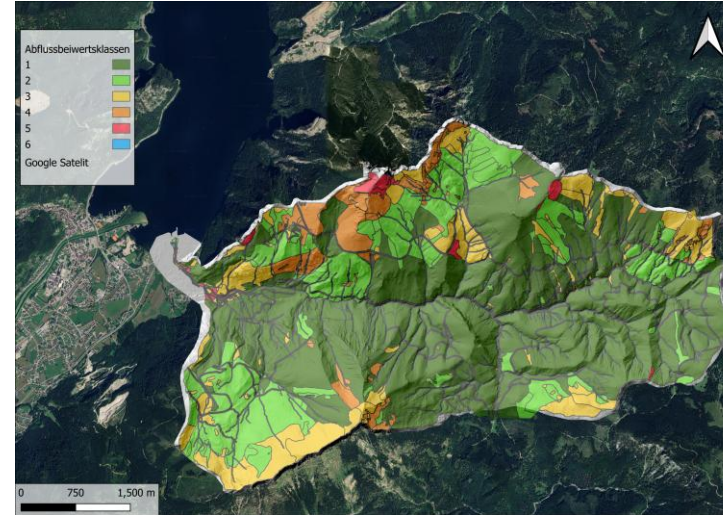


Abb. 5: AKL-Kartierung Rindbach (S. Wieshammer, 2025)

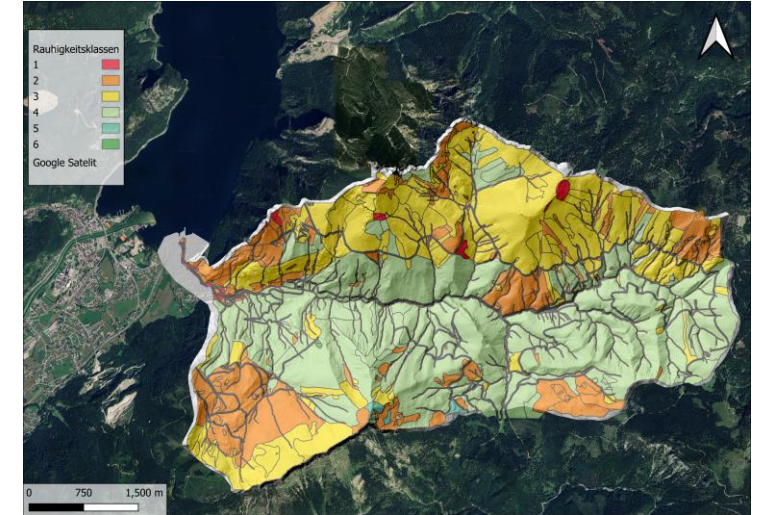


Abb. 6: RKL-Kartierung Rindbach (S. Wieshammer, 2025)

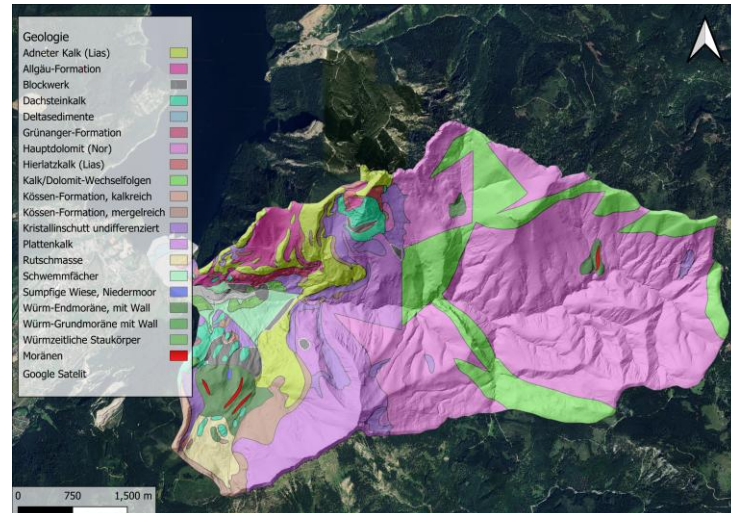


Abb. 7: Geologische Karte Rindbach (Geosphere Austria, 2025)

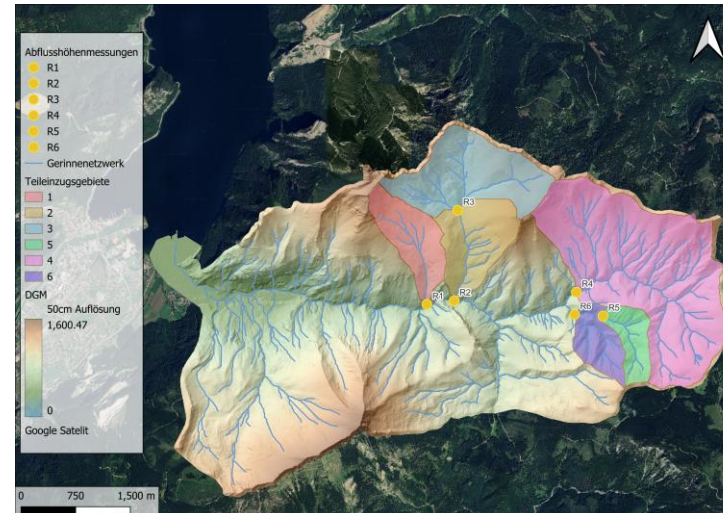


Abb. 8: Übersichtskarte TEZG und Abflusshöhensensoren

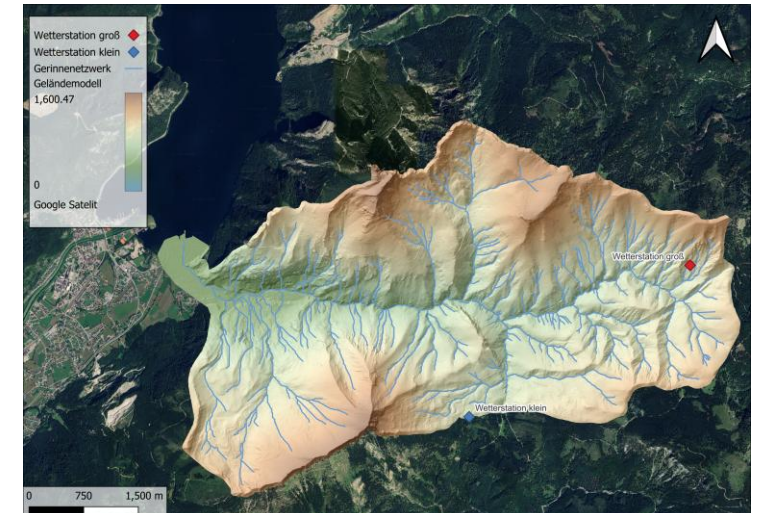


Abb. 9: Übersichtskarte Wetterstationen

Methodik - Wetterdaten

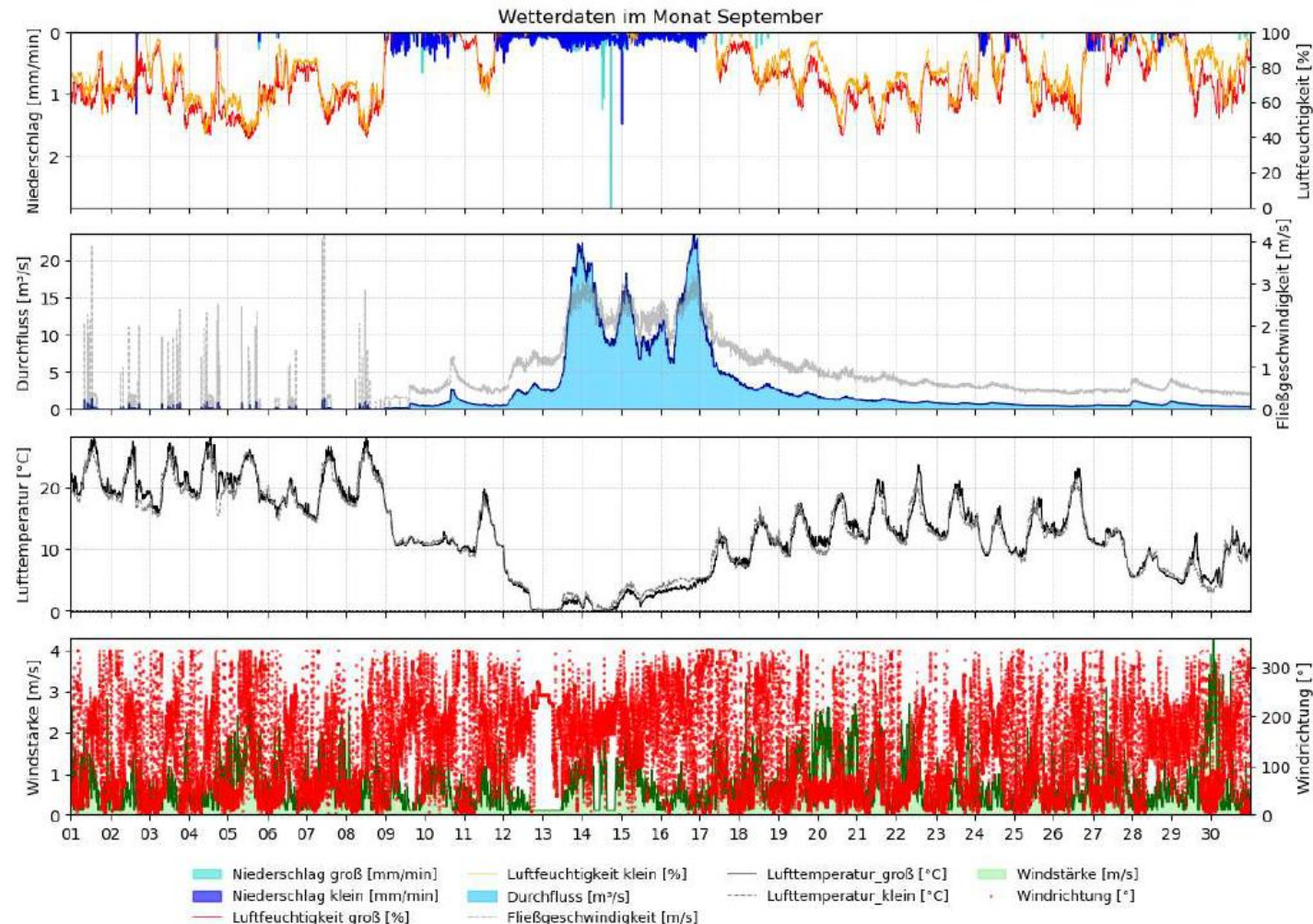
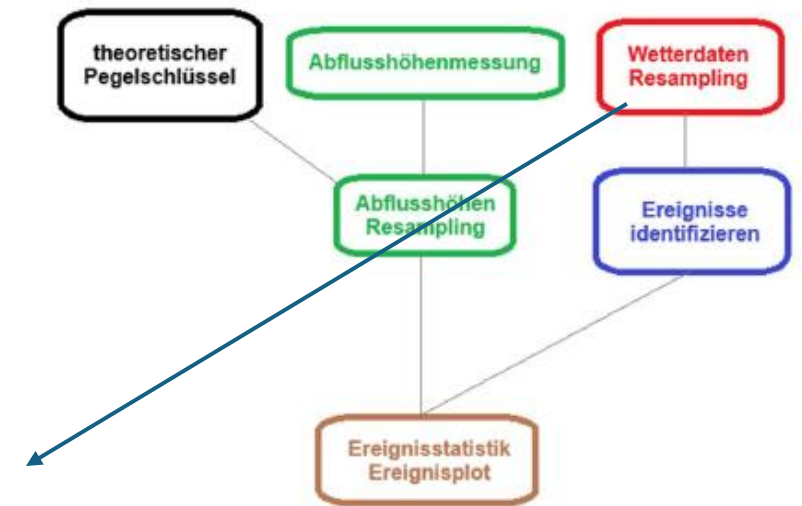


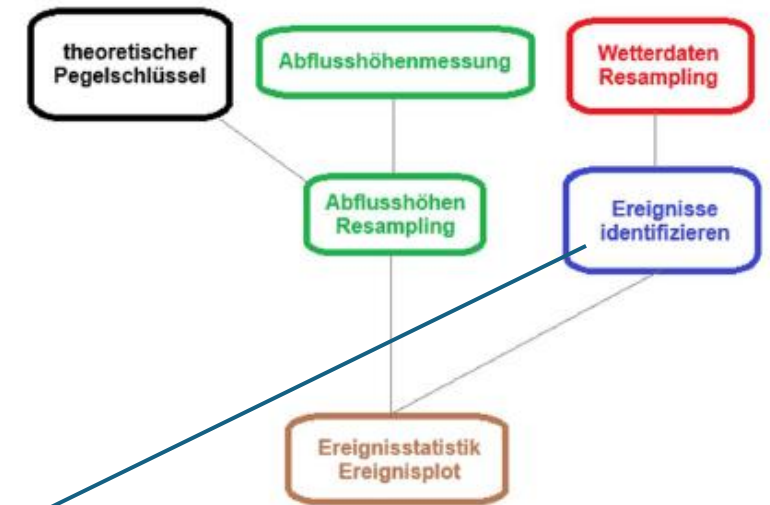
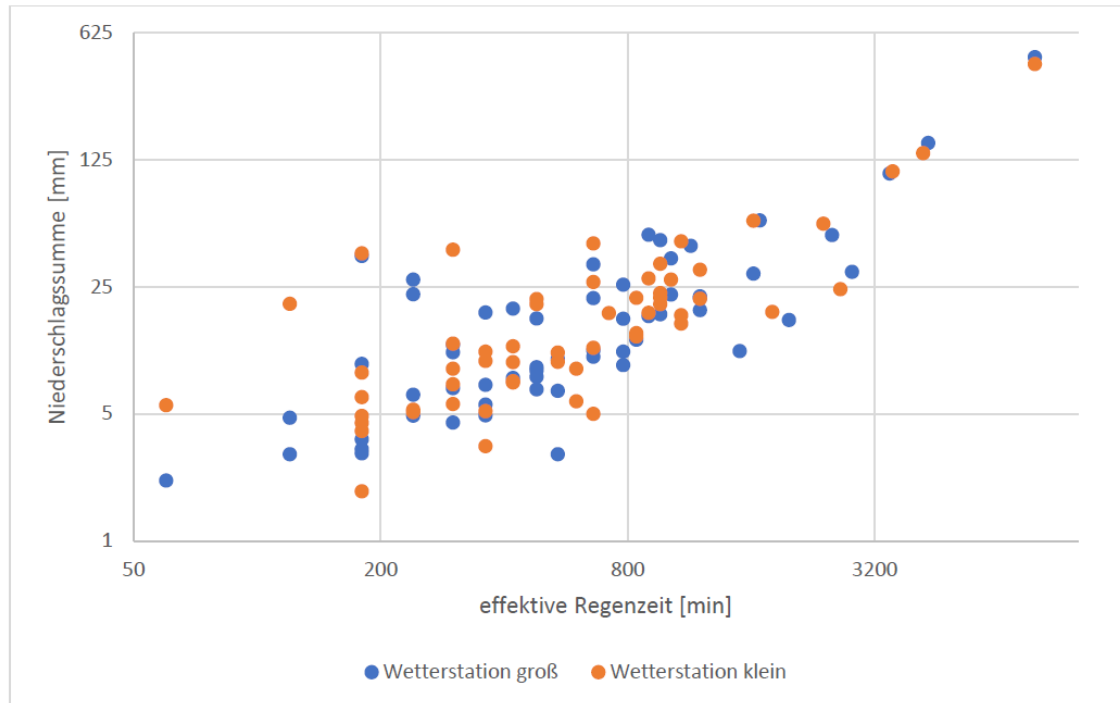
Abb. 10: Plot der meteorologischen Daten für den Monat September (2024)



- Niederschlag
- Luftfeuchtigkeit
- Lufttemperatur
- Windstärke
- Windrichtung
- Bodentemperatur
- Bodenfeuchte
- Pegel Nicolaibrücke - Gebietsauslass

Methodik – Ereignisse identifizieren

- Mind. 2mm/h
- Unterbrechung >6h → neues Ereignis



53 Ereignisse, davon 38 mit sichtbarer Abflussreaktion

Abb. 11: identifizierte Ereignisse, Niederschlagssumme in mm und effektive Regenzeit in Minuten, logarithmische Darstellung

Methodik - Abflusshöhenmessung

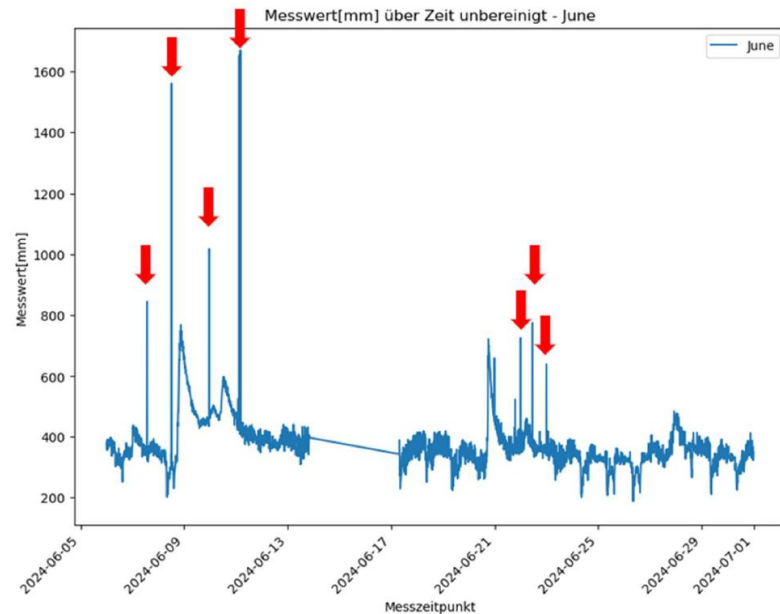


Abb. 12: Rohdaten der Abflusshöhenmessung des Sensors R2 für den Juni, mit Messfehler

- Korrektur von Messfehlern
- Resampling auf einheitliches Zeitintervall

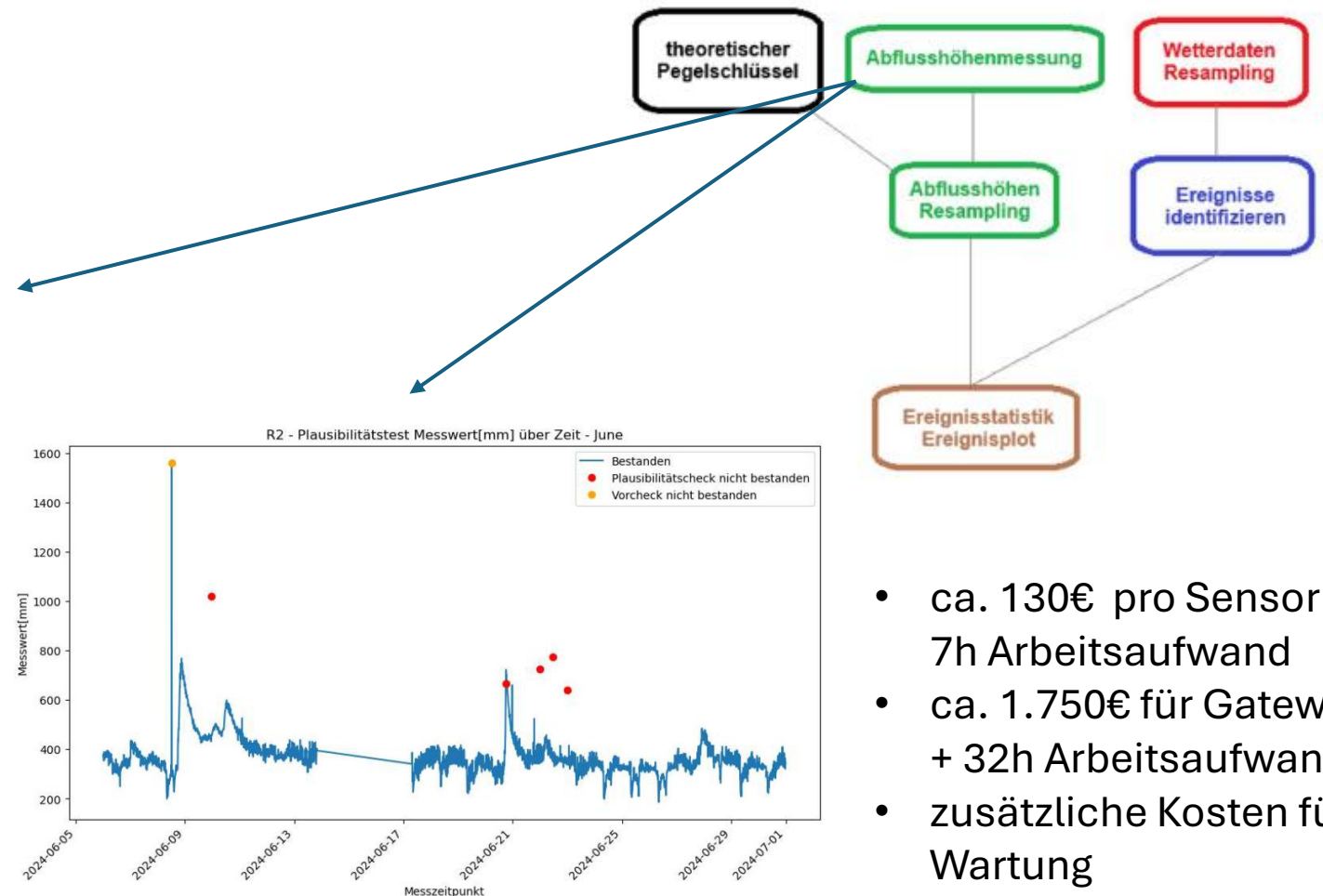


Abb. 13: Ergebnisse des Vorchecks und Plausibilitätstests des Sensors R2 für den Monat Juni

- ca. 130€ pro Sensor + 7h Arbeitsaufwand
- ca. 1.750€ für Gateway + 32h Arbeitsaufwand
- zusätzliche Kosten für Wartung

Methodik – theoretischer Pegelschlüssel

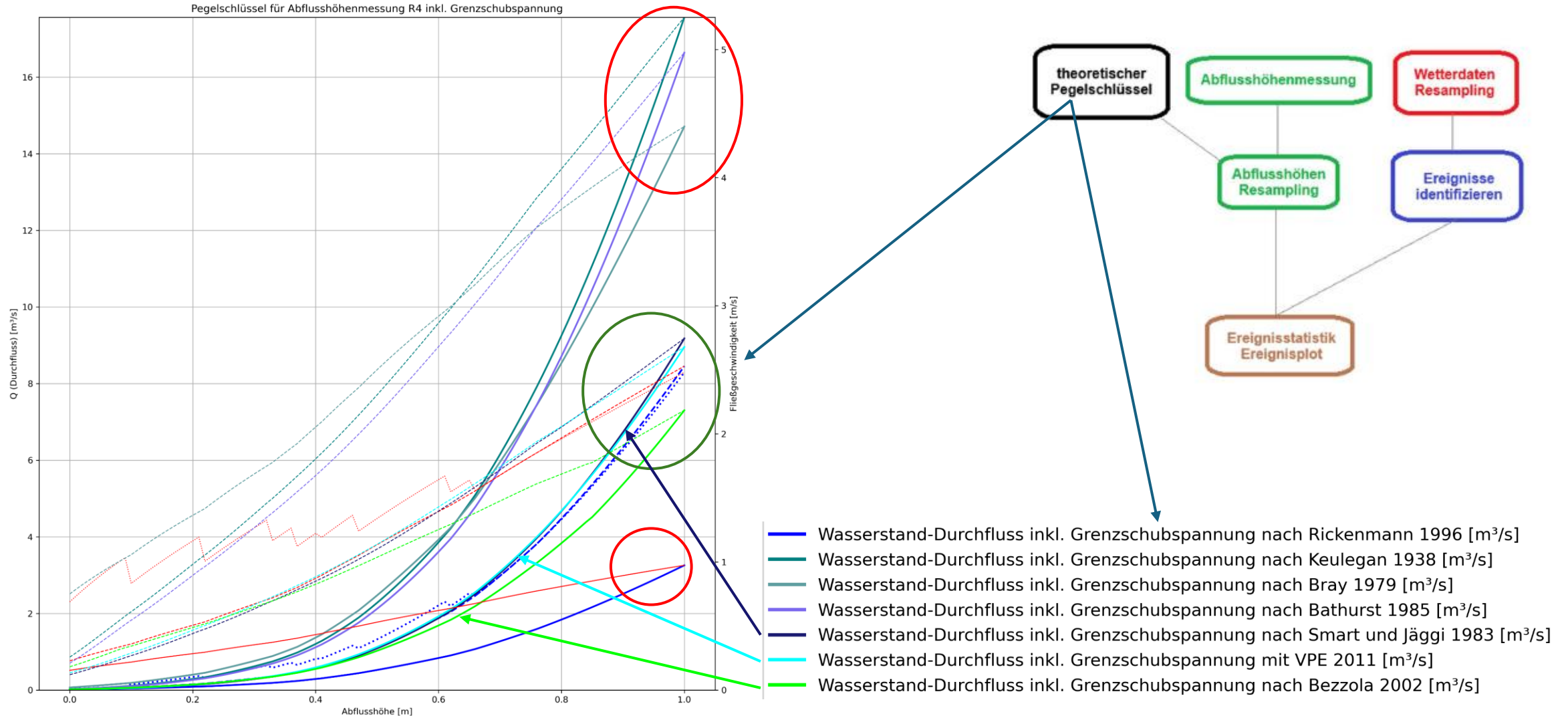


Abb. 14: theoretischer Pegelschlüssel für den Sensor R4

Methodik – Ereignisstatistik, Ereignisplots

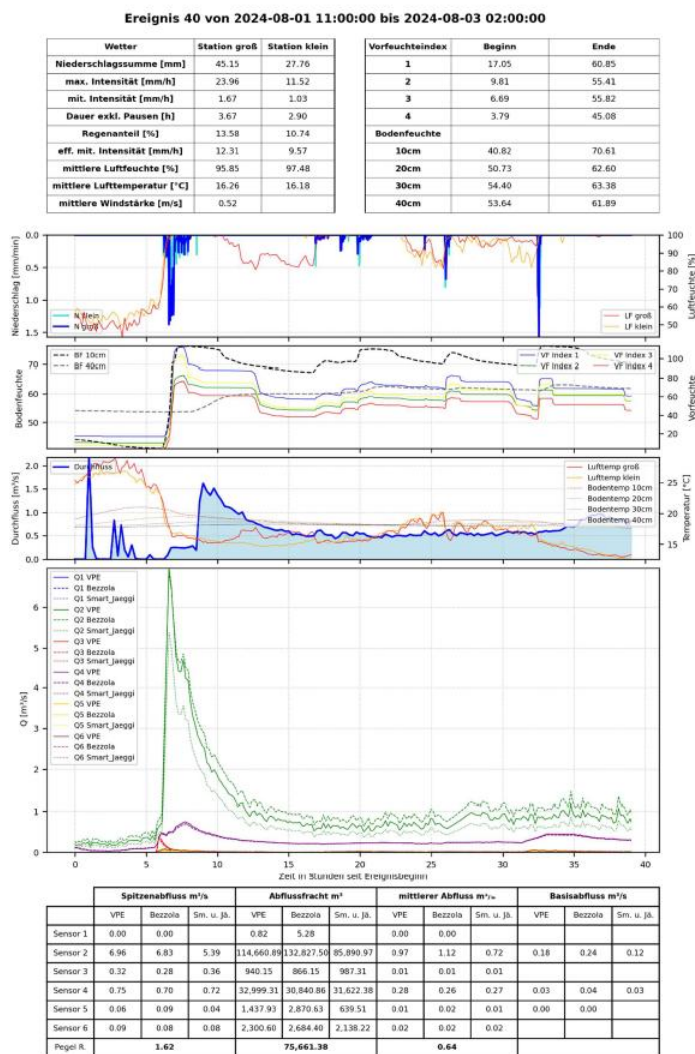


Abb. 15: Ereignisplot Teil 1 des Ereignisses Nummer 40

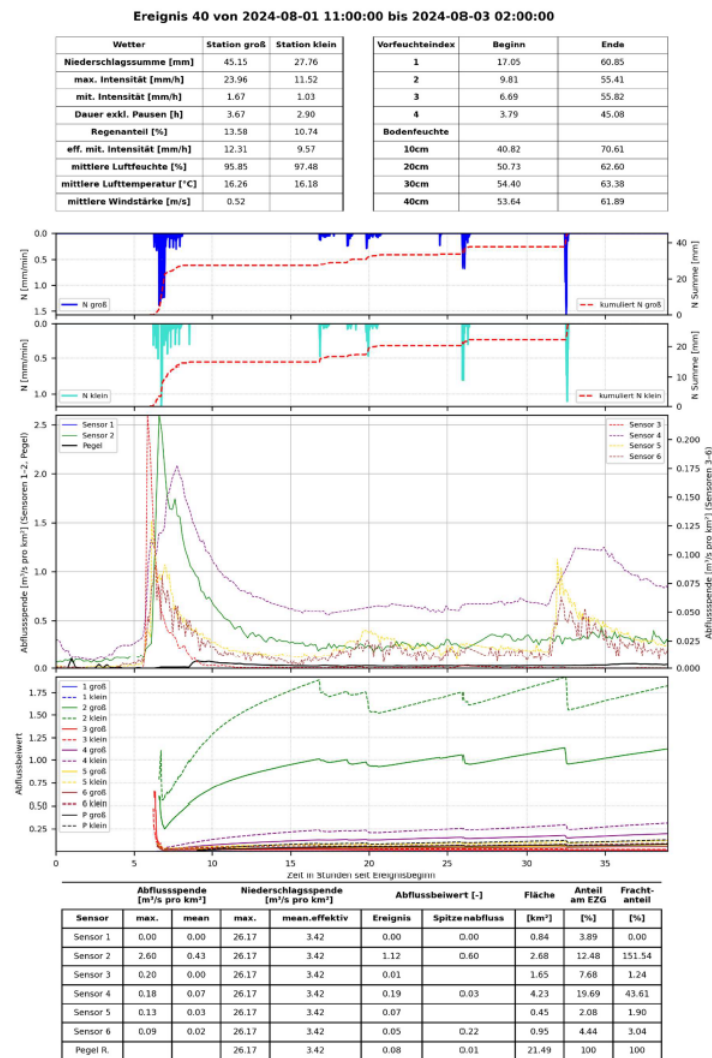
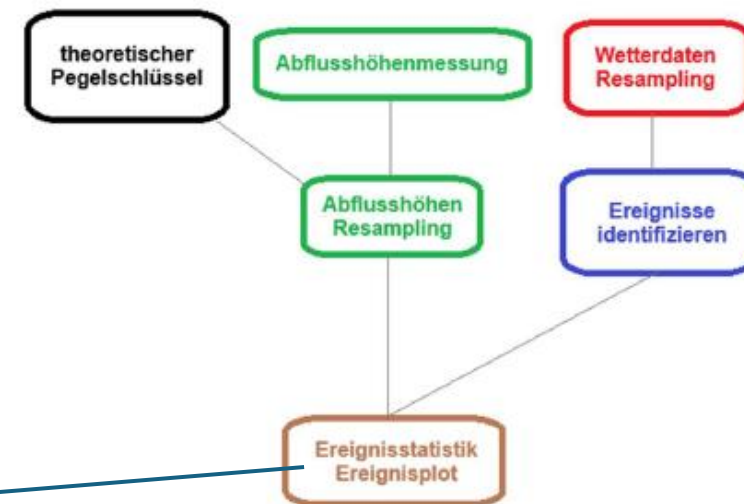


Abb. 16: Ereignisplot Teil 2 des Ereignisses Nummer 40



- Niederschlag und Luftfeuchte
- Bodenfeuchte
- Durchfluss
- Abflussspende
- Abflussbeiwert
- ...

Ergebnisse – Spitzenabflussspende und Niederschlagssumme

- **TEZG 1:** hohe Abflussspende, sprunghafter Anstieg bei ca. 25mm Niederschlagssumme
- **TEZG 2 und 3:**
 - 2 → hohe Abflussspende
 - 3 → niedrige Abflussspende
- **TEZG 4:** Sprung zwischen 30 und 40mm Niederschlagssumme
- **TEZG 5 und 6:** TEZG 5 zeigt höhere Abflussspenden

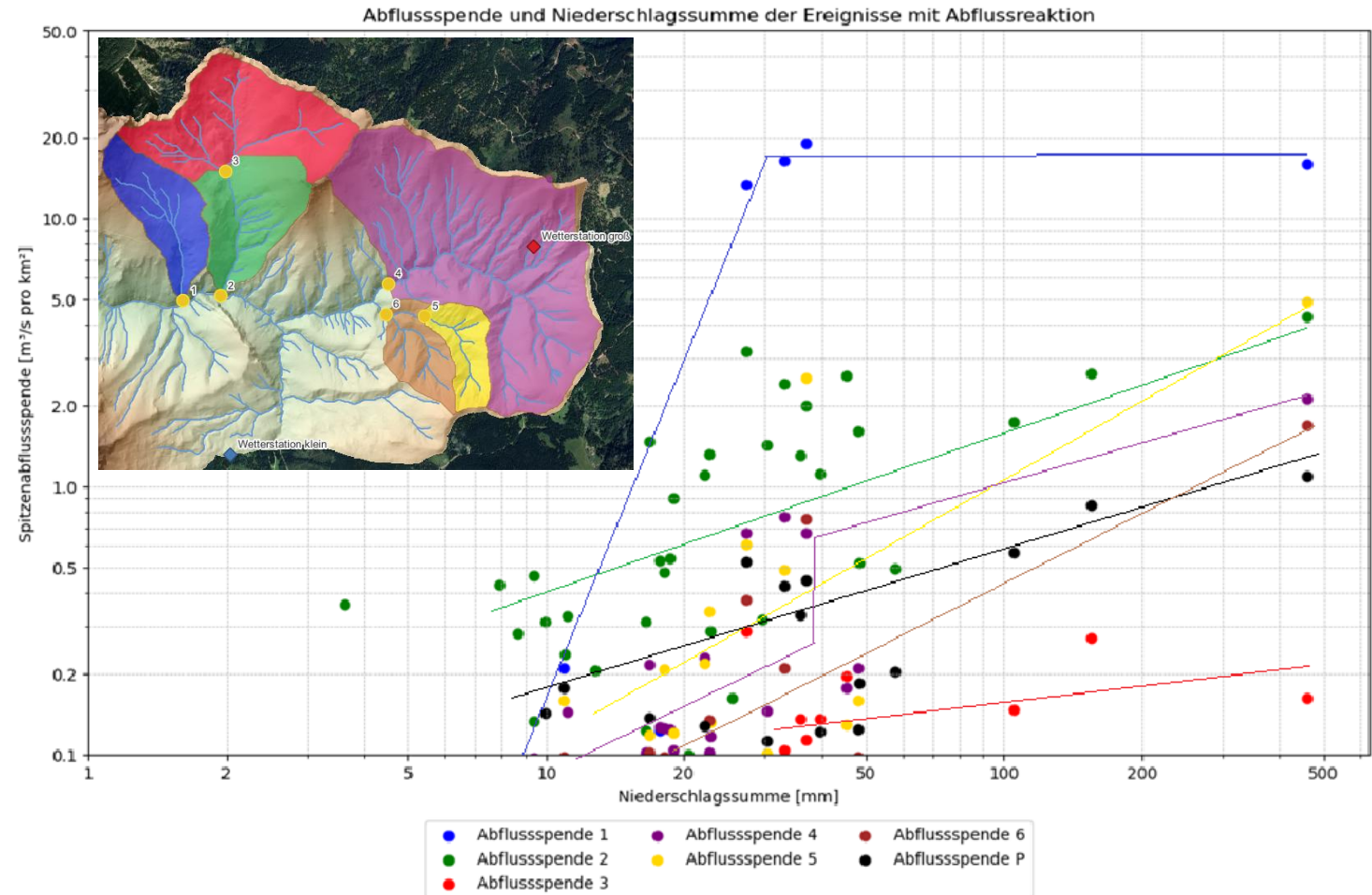


Abb. 17: Spitzenabflussspende [$\text{m}^3/\text{s pro km}^2$] und Niederschlagssumme [mm] für alle Teileinzugsgebiete (1-6) und den Pegel Rindbach (P)

Ergebnisse – Abflussbeiwert und Niederschlagssumme in Abhängigkeit des Systemzustandes



Vorfeuchteindex über
saisonabhängige Gewichtung der
Vorniederschlagsmengen berechnet

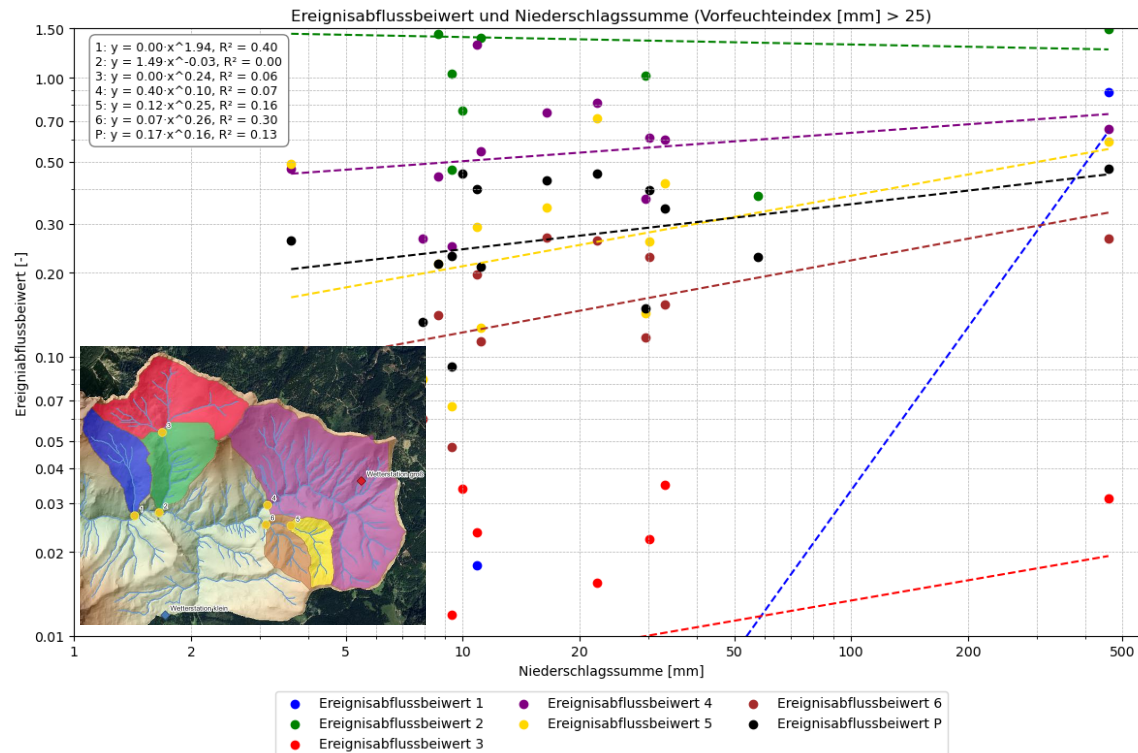


Abb. 18: Ereignisabflussbeiwert und Niederschlagssumme der Ereignisse mit Abflussreaktion und mit einem Vorfeuchteindex (gewichtete Vorniederschlagsmenge) von über 25 mm

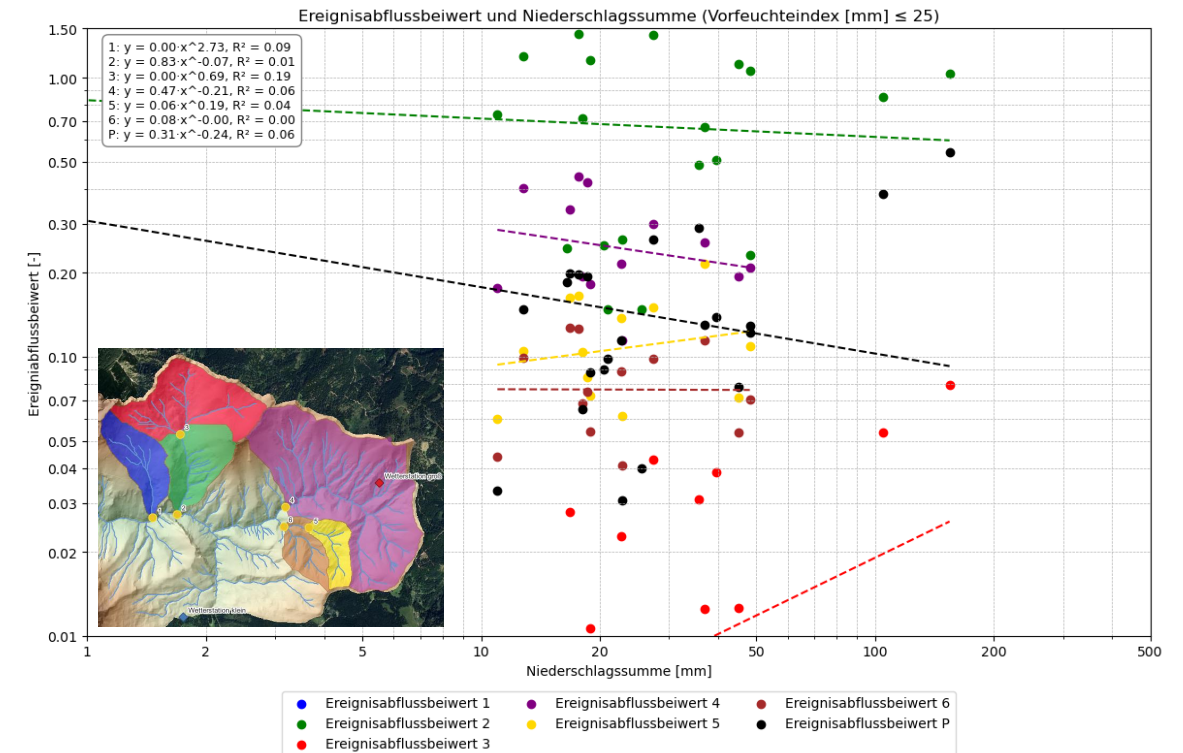


Abb. 19: Ereignisabflussbeiwert und Niederschlagssumme der Ereignisse mit Abflussreaktion und mit einem Vorfeuchteindex (gewichtete Vorniederschlagsmenge) von kleiner gleich 25 mm

- Hohe Vorfeuchte → Ereignisabflussbeiwert steigt mit steigender Niederschlagssumme
- Niedrige Vorfeuchte → Ereignisabflussbeiwert sinkt tendenziell mit steigender Niederschlagssumme (Ausreißer!)

Ergebnisse – Abflussbeiwert und Vorfeuchteindex

*Vorfeuchteindex über saisonabhängige
Gewichtung der Vorniederschlagsmengen
berechnet*

Ereignisabflussbeiwert steigt mit höheren
Vorniederschlagsmengen

- **TEZG 2** und **3**: geringes Bestimmtheitsmaß ($r^2 < 0,03$)
- **TEZG 4**: höheres Bestimmtheitsmaß ($r^2 = 0,33$)
- **TEZG 5** und **6**: höheres Bestimmtheitsmaß
TEZG 5 (oberes TEZG) $\rightarrow$ ($r^2 = 0,22$)
– TEZG 6 (unteres TEZG) $\rightarrow$ ($r^2 = 0,26$)
- **Pegel Rindbach**: $r^2 = 0,21$

TEZG	A [km ²]	r^2	Steigung
4	4,23	0,33	0,73%
5	0,45	0,22	0,37%
6	0,95	0,26	0,21%
Pegel Rindbach	21,49	0,21	0,41%

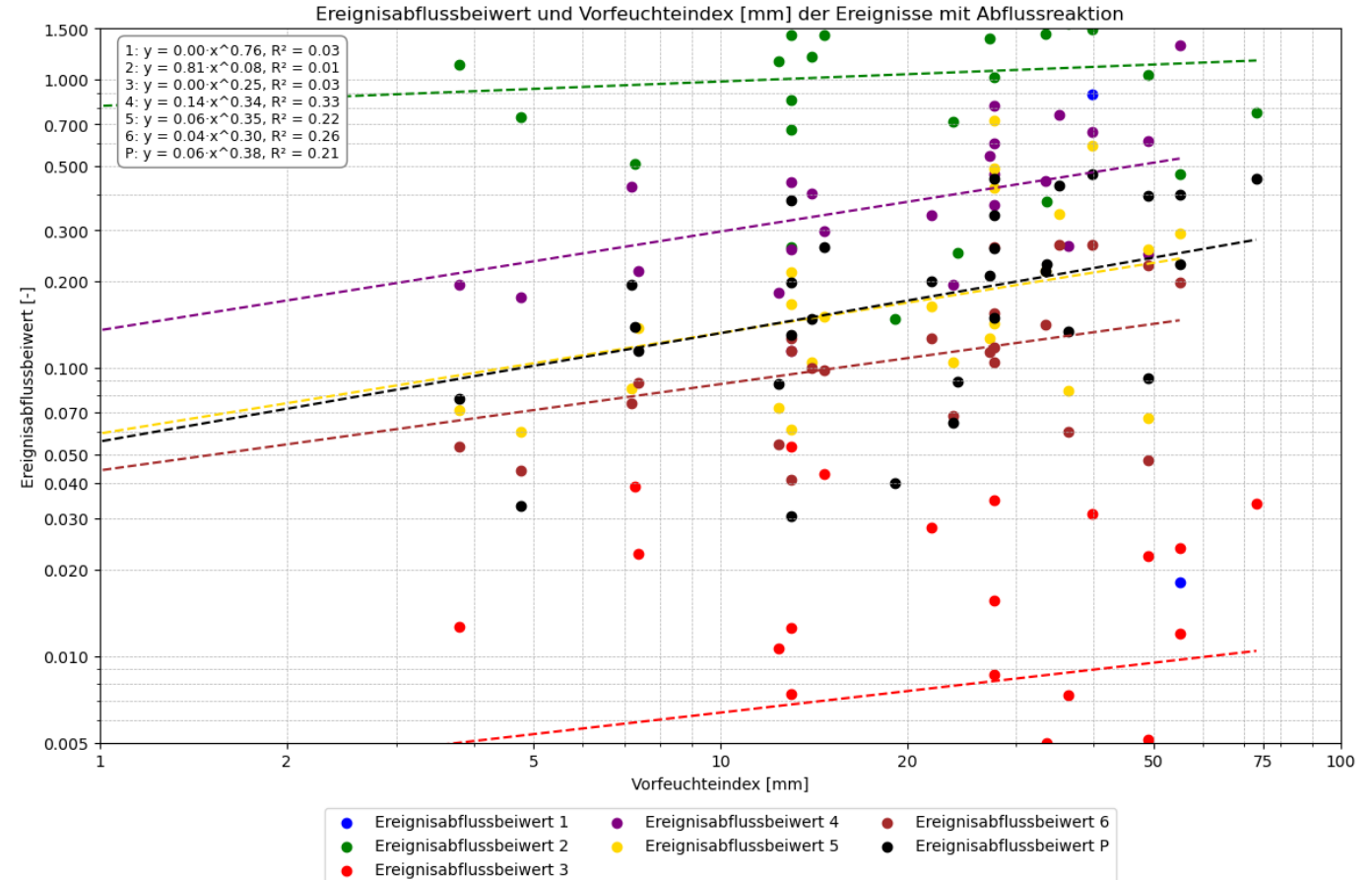


Abb. 20: Ereignisabflussbeiwert und Vorfeuchteindex als gewichtete Vorniederschlagsmenge [mm] der Ereignisse mit Abflussreaktion für die Teileinzugsgebiete 1, 2, 3, 4, 5, 6 und das gesamte Teileinzugsgebiet (P) in log-log Darstellung mit logarithmischer Ausgleichsfunktion

- **TEZG 1:**
 - Sehr rascher Ganglinienanstieg
 - Sehr hohe Spitzenabflussspenden
- **TEZG 2 und 3:**
 - 2 → schneller Anstieg, hohe Spitzenabflussspenden
 - 3 → langsamer Anstieg, geringe Spitzenabflussspenden
- **TEZG 4:** langsamer Anstieg
- **TEZG 5 und 6:** TEZG 5 (oberer Bereich des TEZG 6) zeigt einen schnelleren Anstieg und höhere Spitzenabflussspenden

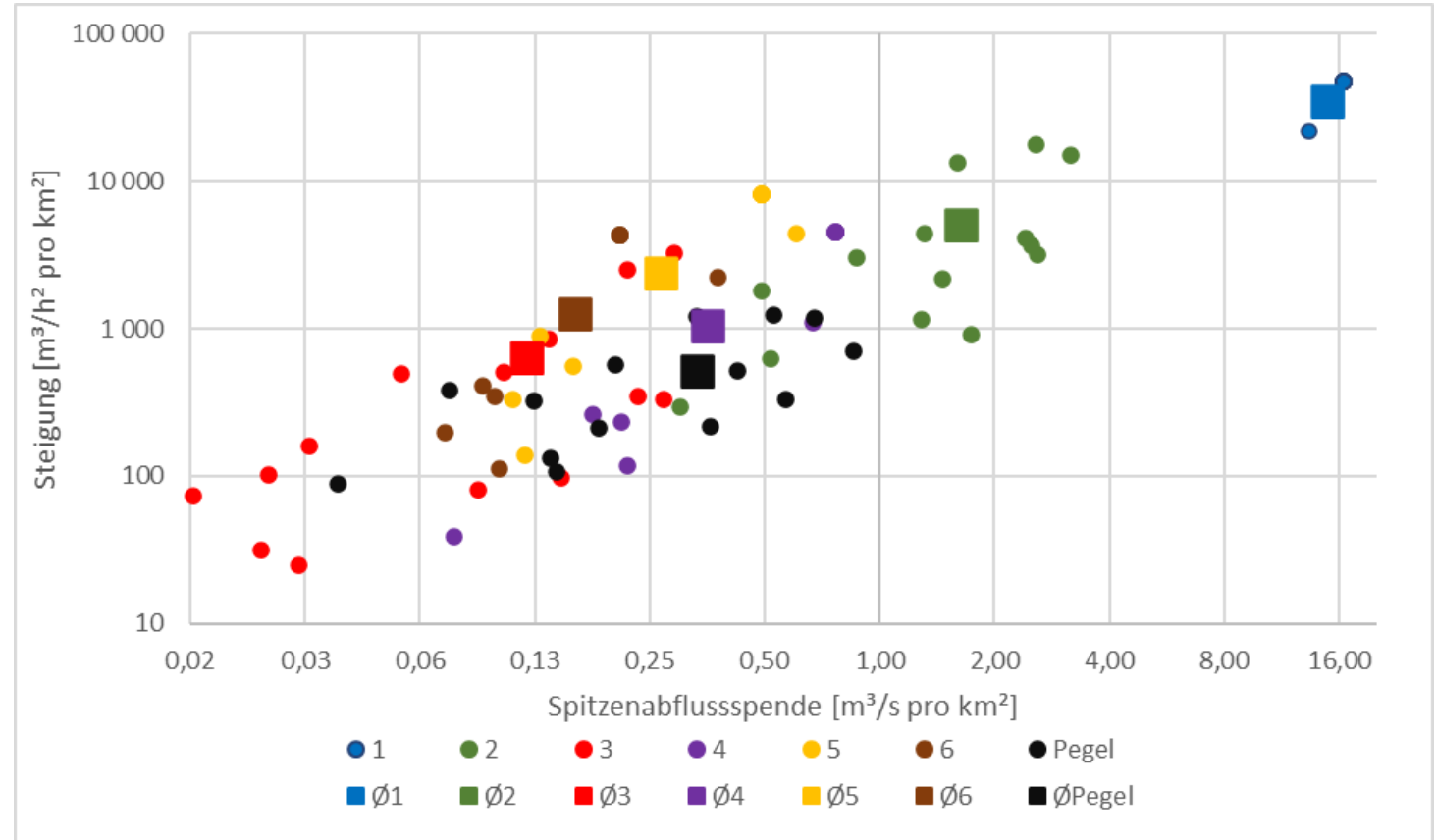


Abb. 21: mittlere Steigung der Ganglinie zwischen Anstiegsbeginn und Spitzenabflussspende für die Teileinzugsgebiete und das gesamte Einzugsgebiet, Datenpunkte (Kreis) und Mittelwerte (Quadrat) für die Teileinzugsgebiete

Ergebnisse – ZEMOKOST Nachrechnung

von konvektiven Ereignissen mit trockenem (25), mittleren (32) und feuchtem (21) Systemzustand

- Für 3 Ereignisse (21, 25 und 32)
- Erster Lauf mit dem auf das Gesamteinzugsgebiet kalibriertem Modell:
 - Überschätzung bei trockenem Systemzustand (Ereignis 25; 455%)
 - Unterschätzung bei feuchtem Systemzustand (Ereignis 21; 17%)
- Parameteranpassung (Ereignis 21)
 - AKL: obere Klassengrenze
 - RKL: untere Klassengrenze
 - Systemzustand: -6
 - ZAF: 3
 - ZAA: 50%

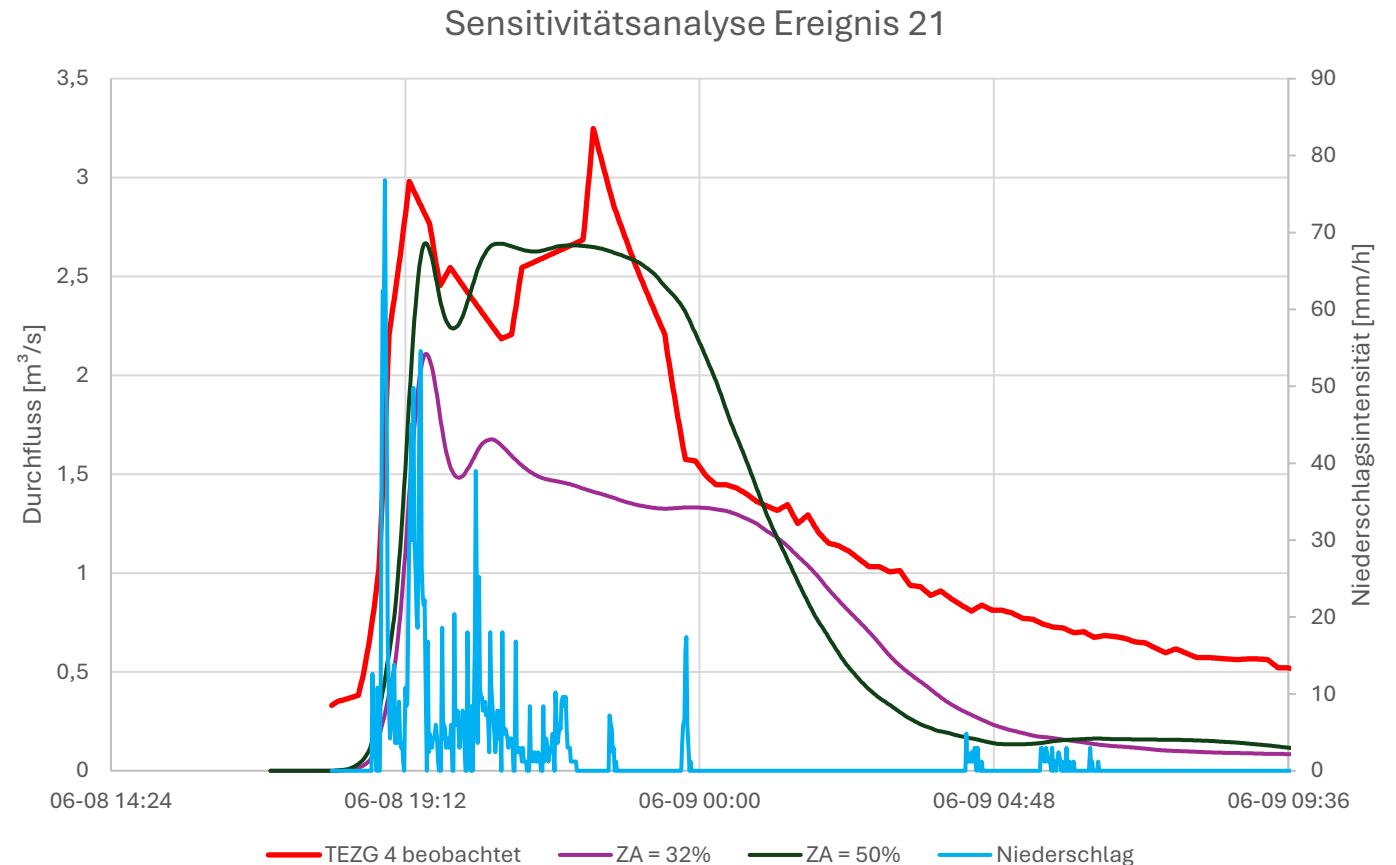


Abb. 22: Sensitivitätsanalyse des Ereignisses 21, Verwendung von Zwischenabflussanteil = 32% und 50%

Diskussion – Charakteristika der Teileinzugsgebiete

- **TEZG 1:** Abflussreaktion erst ab Niederschlagssummen >25 mm
- **TEZG 2:** Überproportionale Abflussfracht
- **TEZG 3:** stark ausgeprägte unterirdische Abflussprozesse im Moränenkörper, unterproportionale Abflussfracht
- **TEZG 4:** hoher Einfluss der Vorfeuchte auf den Abflussbeiwert, generell langsamer kontinuierlicher Anstieg der Ganglinie ohne starke Schwankungen
- **TEZG 5 und 6:** ähnliche Verhältnisse, ähnliche Abflussreaktionen, schnellerer Anstieg der Ganglinie des oberen Teileinzugsgebietes
(TEZG 5: $2.400 \text{ m}^3/\text{h}^2$, TEZG 6: $1.300 \text{ m}^3/\text{h}^2$)

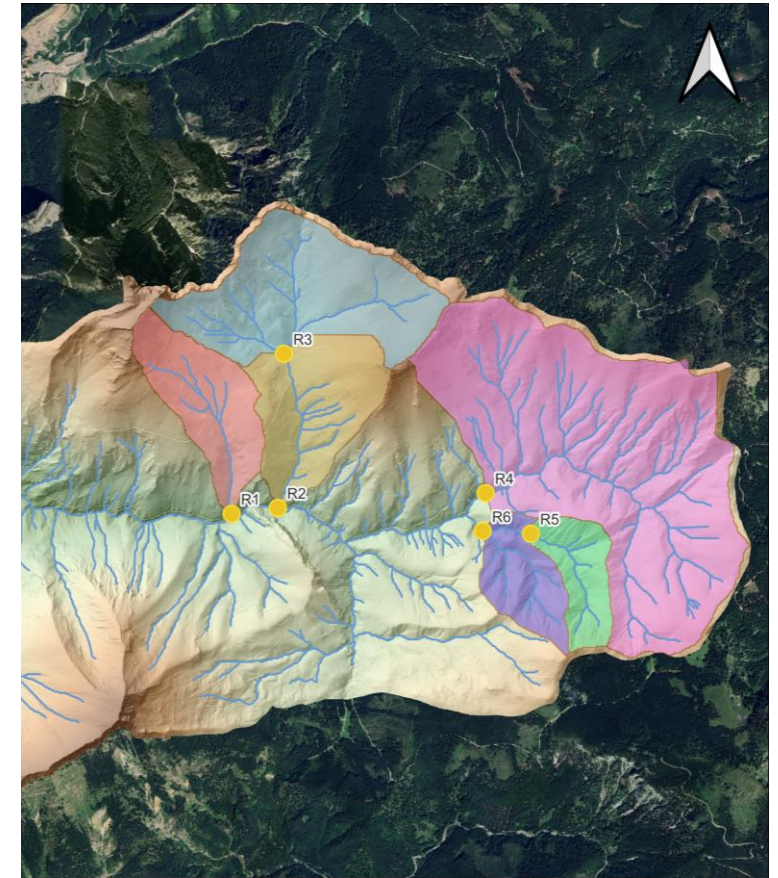


Abb. 23: Übersicht TEZG

Schlussfolgerungen

- Mit zunehmender Vorfeuchte steigt der Anteil an Oberflächenabfluss, der Abflussbeiwert, der Spitzenabfluss, die Abflussfracht und die Anstiegsgeschwindigkeit der Ganglinie
→ maßgeblich in TEZG mit hohem Interflowanteil (TEZG 4)
- Unterirdische Abflussprozesse (z.B.: Karstspucklöcher) können zu einem untypischen Abflussverhalten führen (TEZG 1 und 3)
- Bereits kalibrierte Gebietsmodelle sind nicht ohne weiteres auf Teileinzugsgebiete übertragbar, da deren Kalibrierungsparameter oft nur Durchschnittswerte wiedergeben
- Kosteneffiziente Sensoren ermöglichen eine hohe räumliche Auflösung und können so zu besseren Ergebnissen führen, als nur wenige teure Sensoren

Quellen

- Bathurst, J. C. (1985). Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 625–643. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:4\(625\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:4(625))
- Bezzola, G. R. (2002). Fließswiderstand und Sohlenstabilität natürlicher Gerinne: unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der relativen Überdeckung. (Dissertation, ETH Zürich, Schweiz). Abgerufen von <https://www.researchcollection.ethz.ch/entities/publication/6f367c3c-63fe-40a7-92eb-75ee016a1a8b>
- Bray, D. (1979). Estimating Average Velocity in Gravel-Bed Rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(9), 1103–1122. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005270>
- Dragino. (2023). LDD575 LoRaWAN Distance Detection Sensor. Abgerufen am 14.09.2025, von <https://www.dragino.com/products/distance-level-sensor/item/161-ldds75.html>
- Geologische Bundesanstalt. (o.J.). Geologische Einheiten. Abgerufen am 09.11.2025, von <https://geoportal.inspire.gv.at/metadatensuche/inspire/api/records/b894632e-d8dd438c-88d3-c68fcf8b6a16>
- Hering, E. (2023). Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete (3., aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Keulegan, G. H. (1938). Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 21, 707–741. <https://doi.org/10.6028/jres.021.039>
- Kohl, B. (2011). ZEMOKOST – Entwicklung eines praktikablen Niederschlag-/Abflussmodells zur Modellierung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. (Dissertation, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften, Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich).
- Kradolfer, W. (1983). Berechnung des Normalabflusses in Gerinnen mit einfachen und gegliederten Querschnitten. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*. Nr. 65. Zürich: ETH Zürich. Abgerufen am 09.11.2025, von <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vawdam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/065.pdf>

Quellen

- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., Stern, R. (2004). Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. Abgerufen am 09.11.2025, von https://www.bfw.gv.at/wpcontent/uploads/BFW_Gelaendeanleitung_Dok03_2004.pdf
- Morgenschweis, G. (2011). Hydrometrie. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Petrascheck, A. (1978). Die Berechnung des Oberflächenabflusses von Flächenelementen. Österreichische Wasserwirtschaft, 30(3-4), 65–72. Wien: Österreichischer Wasserund Abfallwirtschaftsverband.
- Pürstinger, C. (2015). Ereignisdokumentation Rindbach. Unveröffentlichtes Skript.
- Rickenmann, D. (1996). Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. Wasser, Energie, Luft, 88(11-12), 298–304.
- Smart, G. M., Jäggi, M. (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen = Sediment transport on steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 64. Zürich: ETH Zürich. Abgerufen am 09.11.2025, von <https://vaw.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vawdam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/064.pdf>
- Straka, W. (2023). Zwischenbericht AP 3 - Geologie und Hydrogeologie Rindbach. Unveröffentlichtes Skript.
- Strickler, A. (1923). Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitt. Amt für Wasserwirtschaft, 16.
- Zötl, J. G. (1974). Karsthydrogeologie. Wien: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8370-0>