

Hydrologische Analyse der extremen Hochwasser-Ereignisse im Ahr-Einzugsgebiet

Bora Shehu, Axel Bronstert

Universität Potsdam, Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

1. Einleitung

Motivation:

→ Wie hoch war der Abflussbeiwert des Ahr-Hochwassers im Jahr 2021?

Herausforderungen:

→ Es sind mehrere Niederschlagsprodukte vorhanden, die sich jedoch erheblich voneinander unterscheiden.

→ Tatsächliche Abflussdaten sind ebenfalls nicht bekannt, es liegen nur rekonstruierte Daten vor.

→ Da sowohl die Niederschlags- als auch die Abflussdaten unsicher sind, ist die Modellierung durch Larsim schwierig.

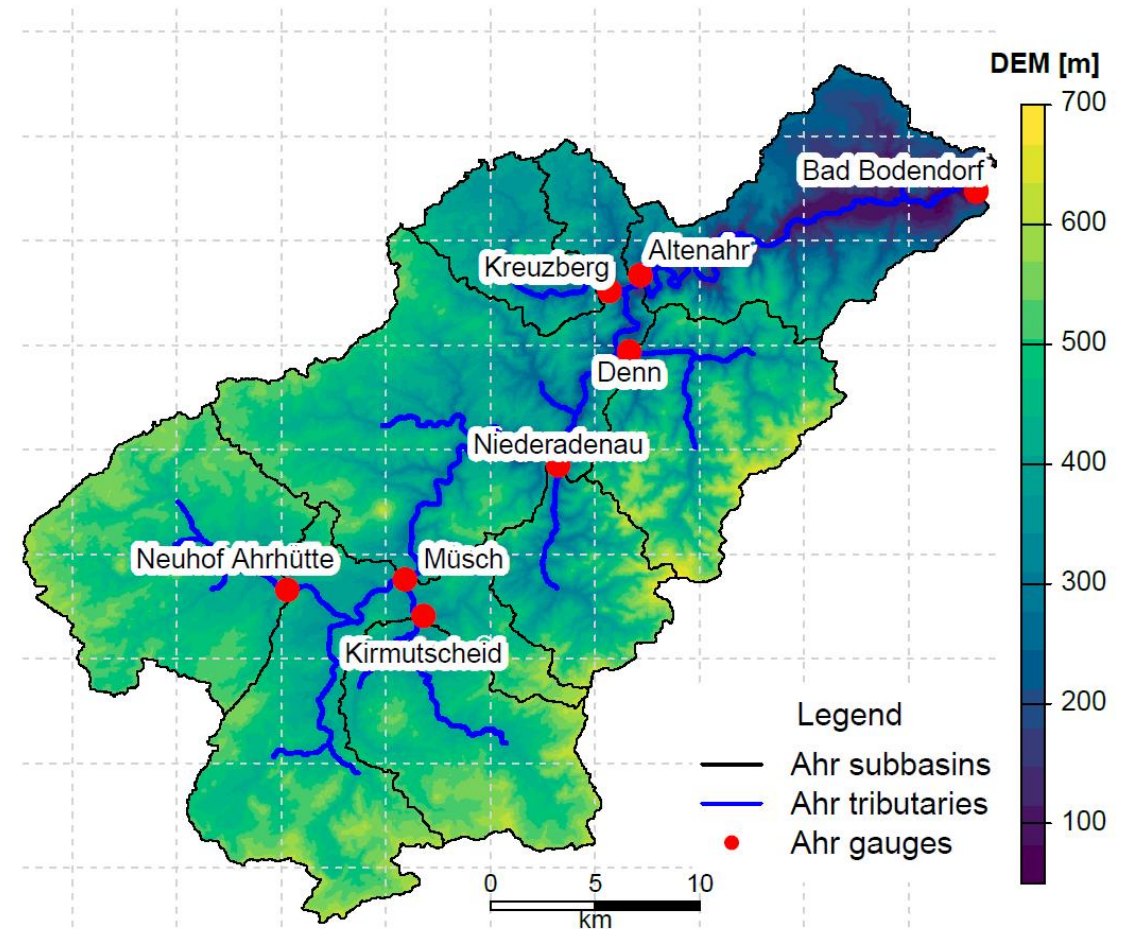


Abb.1: Ahr-Einzugsgebiet und die dazugehörigen Pegel, die die modellierten Teileinzugsgebiete definieren.

2. Niederschlag am 14. Juli 2021: Volumen und Extremität

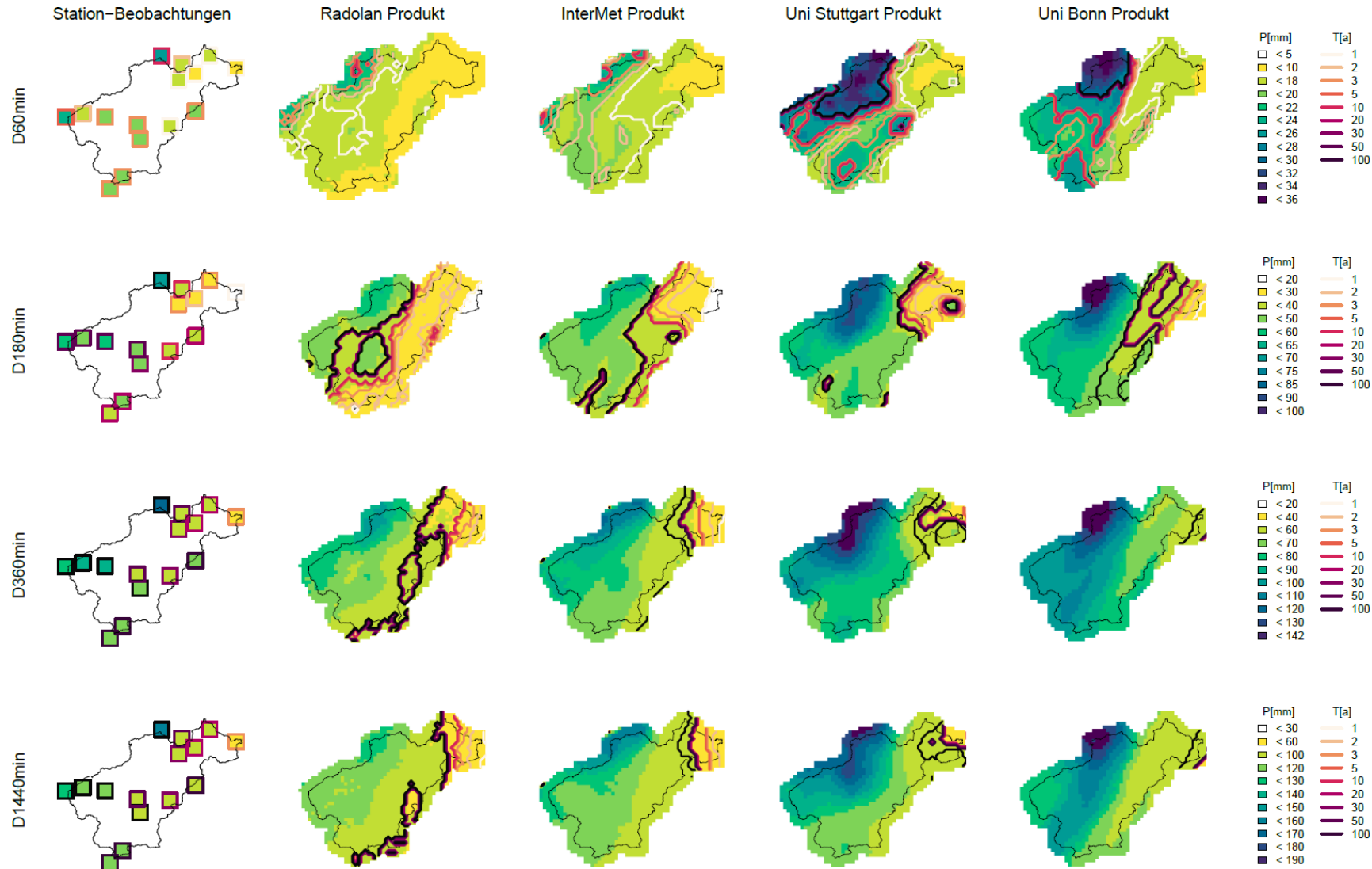


Abb.2: Räumliche Verteilung im Ahr-Einzugsgebiet für die maximalen Niederschlagsmengen (P[mm]) des Ereignisses vom Juli 2021, die jeweiligen Wiederkehrperioden, wie sie von Kostra 2020 pixelweise geschätzt wurden.

Niederschlagsprodukte:

- Station Produkt - Wetterstationen aus RLP, NRW und DWD
- InterMet Produkt – Stationen Interpolation von RLP
- Radolan Produkt – das operative Radarprodukt des DWD
- Uni Stuttgart Produkt – Radar + Station + Pearsonal Weather Station
- Uni Bonn Produkt – optimierter Radar Data

2. Niederschlag am 14. Juli 2021: Unsicherheitschätzung

→ Die Niederschlagsunsicherheit wird durch 100 Realisierungen in Zeit und Raum berücksichtigt

→ Conditional Sequential Gaussian Simulation (SGS): primär basierend auf Stationen mit der räumlichen Varianz aus Radolan

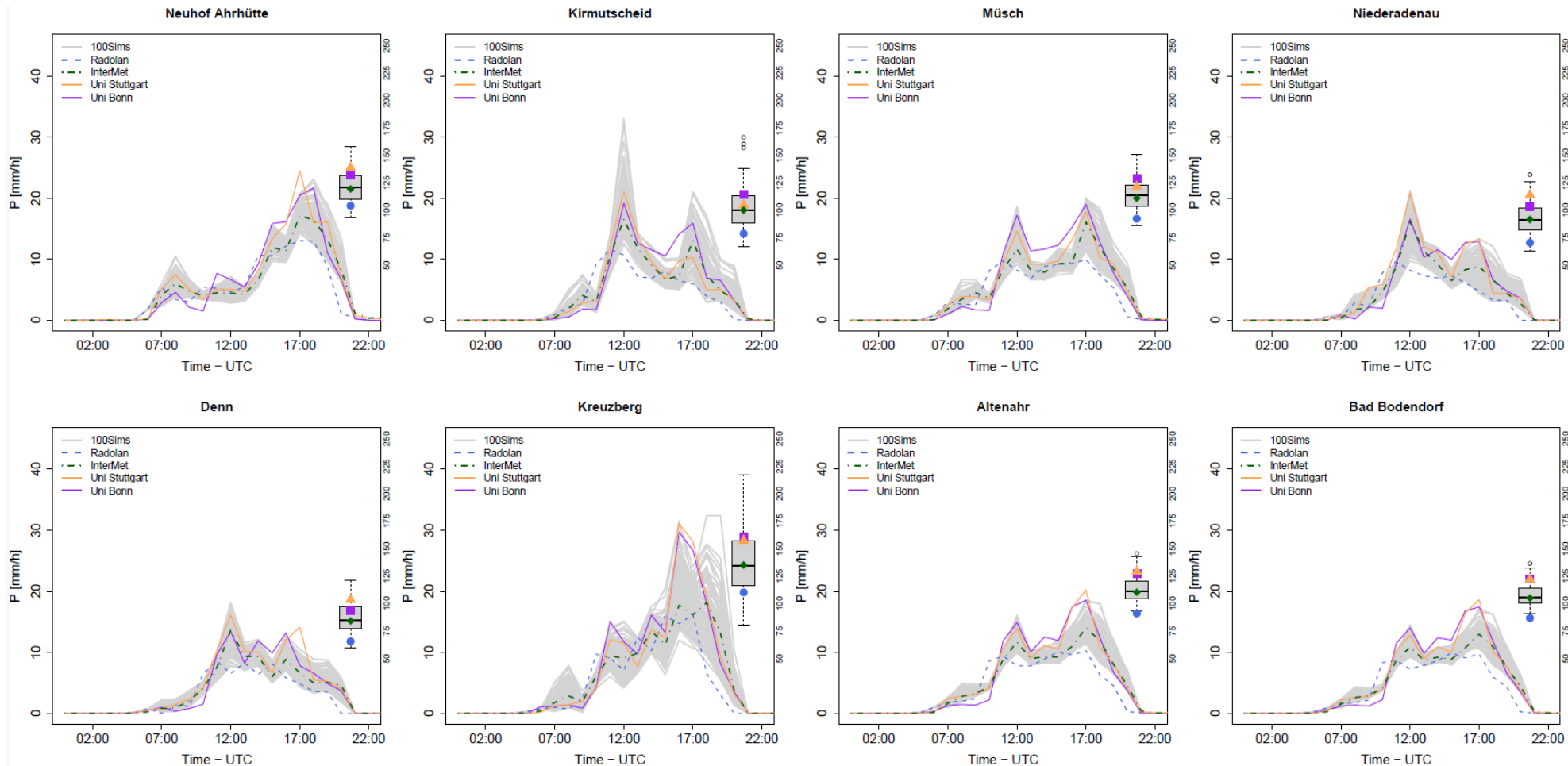


Abb.3: Stündlich flächenbezogene mittlere Niederschlagsintensitäten (mm/h) für jedes Ahr-Teilgebiet für den 14.07.201

- Hohe Unsicherheit bei Kreuzberg, Kirmutscheid
- Uni Stuttgart und Uni Bonn Produkte sind ähnlich.
- N-Simulationen erfassen alle Produktvolumen
- Der Niederschlag in Kreuzberg stärker als angenommen?

3. Larsim modellierte Abflüsse

Tab. 1: Parameter der sieben kalibrierten Pegel, veränderte Parameter sind in blau gezeigt.

| TGB | Pegel | EQB | EQI | EQD | EQD2 | A2 | EKM | EKL | EKR | BSF | beta | Dmin | Dmax | KG |
|------|-----------------|-------|-----|------------|------------|--------|------------|------------|------------|--------------|-------|------|------|----------|
| 7029 | Kirmutscheid | 6000 | 300 | 200 | 10 45 | 2 4 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.5 | 0.006 | 0 | 0.45 | 1 |
| 6888 | Neuhof Ahrhütte | 8000 | 500 | 150 | 40 | 2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.006 | 0 | 0.45 | 1 |
| 7047 | Müsch | 8000 | 500 | 150 | 40 15 | 2 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.3 0.5 | 0.006 | 0 | 0.4 | 1 |
| 7162 | Niederadenau | 8000 | 900 | 800 180 | 500 140 | 2 1 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.3 3 | 0.2 0.1 | 0.006 | 0 | 0.3 | 1.1 1 |
| 7256 | Denn | 8000 | 900 | 800 200 | 500 130 | 2 3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 0.01 | 0.006 | 0 | 0.3 | 1.1 1 |
| 7291 | Kreuzberg | 8000 | 400 | 320 | 200 30 | 1.8 | 0.3 0.6 | 0.3 0.6 | 0.3 0.6 | 0.3 0.03 | 0.003 | 0 | 0.3 | 1 1 |
| 7305 | Altenahr | 10000 | 450 | 250 | 30 10 | 1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 0.01 | 0.002 | 0 | 2 | 1 |
| 7370 | Bad-Bodendorf | 10000 | 500 | 400 | 50 50 | 1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.01 0.01 | 0.002 | 2 | 0.2 | 1 |

- EQD: Eichgroesse fuer die Rueckhaltegroesse des Direktabflusses
- EQD2: Eichgroesse fuer die Rueckhaltegroesse des Oberflaechenabflusses
- A2: Aufteilungsrate in mm/h fuer die Aufteilung in Direkt- und Oberflaechenabfluss
- EKM: Eichgroesse fuer den Rauhigkeitsbeiwert Flussbett
- EKL: Eichgroesse fuer den Rauhigkeitsbeiwert linkes Vorland
- EKR: Eichgroesse fuer den Rauhigkeitsbeiwert rechtes Vorland
- BSF: Parameter b der Bodenfeuchte-Saettigungsfklaechen-Funktion
- KG: Korrekturfaktor Niederschlag

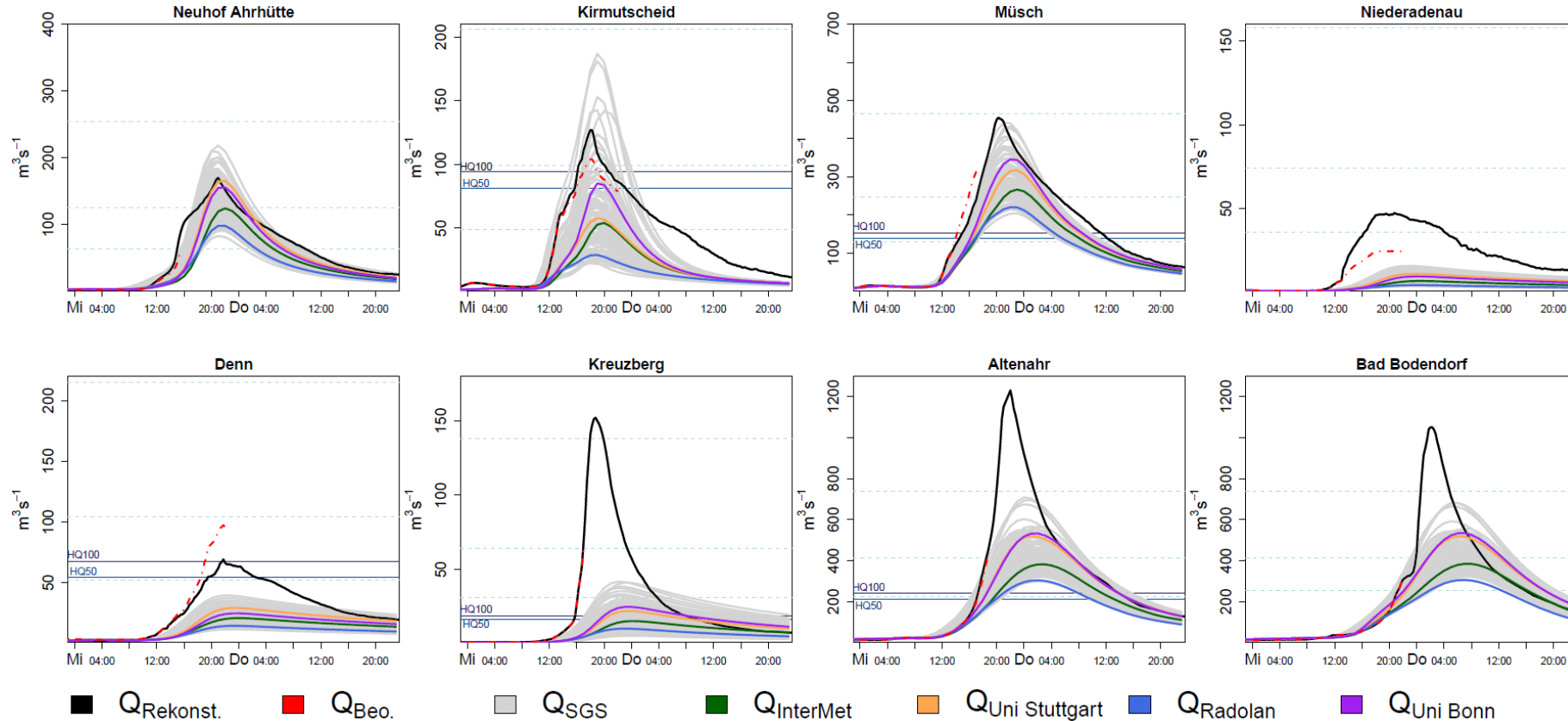
→ Hier werden zwei Parametersätze verwendet:

- Satz 1 - Standard Parametersatz (erste Zeile)
- Satz 2 - kalibrierter Parametersatz für das Ereignis 2021 (zweite Zeile)

→ Hier ist der Niederschlagskorrekturfaktor KG für alle Fälle auf 1 gesetzt.

→ Quelle: Regenauer, J., Böhm, M., Gerlinger, K. (2022): Nachrechnung des Hochwassers an der Ahr am 14./15. Juli 2021 mit dem LARSIM-Wasserhaushaltsmodell für Rheinland -Pfalz, Stand 03.03.2022, Hydron.

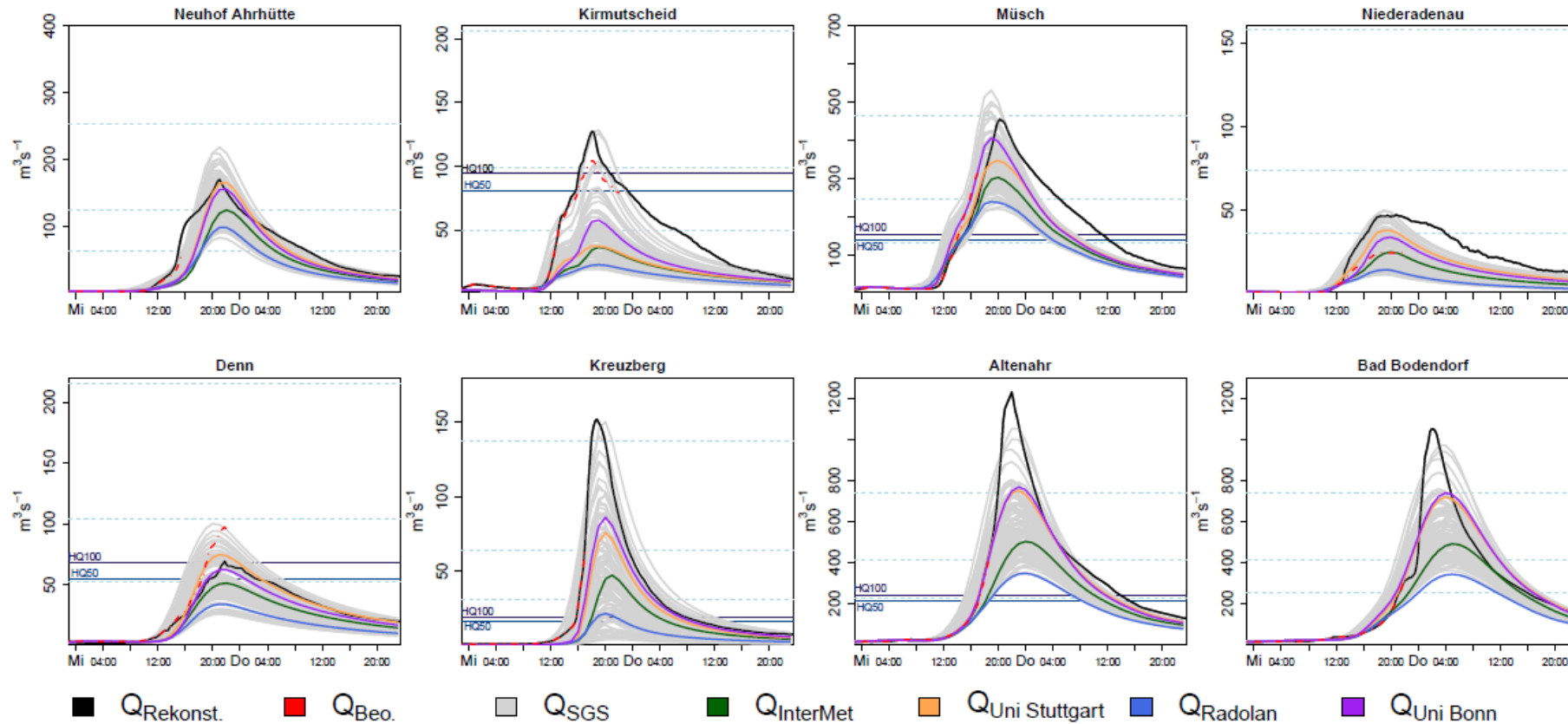
3. Larsim modellierte Abflüsse: Standard Parametersatz bei Hochwasser Juli2021



- Die Abflüsse in Niederadenau, Denn und Kreuzberg wurden deutlich unterschätzt. Hier ist der Einfluss der verschiedenen N-Produkte kaum sichtbar.
- Hohe Sensitivität durch N-Produkte in anderen Teileinzugsgebieten.
- Die Abflüsse der Uni Stuttgart und Bonn weichen insbesondere bei Kirmutscheid ab.
- Alle Produkte zeigen einen höheren Abfluss als HQ100 in Altenahr an, aber der Peak wird immer noch unterschätzt.

Abb. 4: Simulierter Abfluss (m^3/s) von Larsim mit dem alten Parametersatz (operationell für die 2021 Ereignis) mit verschiedenen N-produkten

3. Larsim modellierte Abflüsse: Parametersatz kalibriert für Hochwasser Juli2021



- Die Abflüsse in Niederadenau, Denn und Kreuzberg entsprechen besser den rekonstruierten Daten.
- Das Uni Bonn-Produkt scheint bessere Ergebnisse zu erbringen als andere N-Produkte.
- Dennoch passen einige N-Simulationen mit höheren Niederschlagsmengen besser zu den rekonstruierten Abflüssen.

Abb. 5: Simulierter Abfluss (m^3/s) von Larsim mit dem neuen Parametersatz (kalibriert für das 2021 Ereignis) mit verschiedenen N-produkten

3. Larsim modellierte Abflüsse

Tab. 2: Mittlere tägliche Niederschlagsmenge für die einzelnen Teileinzugsgebiete.

| Pegel | Niederschlagsvolumen [mm] | | | | |
|-----------------|---------------------------|----------|---------------|----------|--------|
| | Radolan | InterMet | Uni Stuttgart | Uni Bonn | N-Sims |
| Kirmutscheid | 79 | 100 | 105 | 114 | 166 |
| Neuhof Ahrhütte | 104 | 120 | 139 | 132 | 136 |
| Müsch | 92 | 111 | 122 | 130 | 133 |
| Niederadenau | 71 | 92 | 114 | 104 | 123 |
| Denn | 66 | 84 | 103 | 93 | 98 |
| Kreuzberg | 110 | 135 | 157 | 161 | 215 |
| Altenahr | 91 | 110 | 129 | 127 | 142 |
| Bad-Bodendorf | 87 | 105 | 122 | 123 | 132 |

Tab. 3: Maximal von Larsim modellierter Abfluss für jedes Teileinzugsgebiet.

| Pegel | QRekon. | Maximale Abflüsse [m ³ /s] | | | | |
|-----------------|---------|---------------------------------------|----------|---------------|----------|--------|
| | | Radolan | InterMet | Uni Stuttgart | Uni Bonn | N-Sims |
| Kirmutscheid | 127 | 23 | 36 | 37 | 58 | 128 |
| Neuhof Ahrhütte | 170 | 98 | 124 | 165 | 156 | 169 |
| Müsch | 455 | 239 | 303 | 347 | 406 | 459 |
| Niederadenau | 47 | 15 | 25 | 38 | 34 | 47 |
| Denn | 69 | 34 | 51 | 75 | 62 | 69 |
| Kreuzberg | 152 | 22 | 47 | 76 | 86 | 151 |
| Altenahr | 1230 | 346 | 502 | 750 | 768 | 1052 |
| Bad-Bodendorf | 1050 | 342 | 490 | 718 | 739 | 971 |

* N-Sims zeigt die N-Simulation, deren modellierte Abflüsse am besten mit den rekonstruierten Daten übereinstimmen.

- Die Produkte der Uni Stuttgart und der Uni Bonn zeigen mehr oder weniger ähnliche Ergebnisse.
 - Bessere Übereinstimmung mit N-Simulationen als mit den gegebenen N-Produkten.
 - Die durchschnittlichen Niederschlagsmengen in den jeweiligen N-Simulationen deuten darauf hin, dass die Niederschlagsmenge noch unterschätzt wird.
- Gab es tatsächlich mehr Niederschlag oder müssen wir bestimmte Parameter ändern: z.B. die Feldkapazität oder die Bodenfeuchte?

3. Larsim modellierte Abflüsse

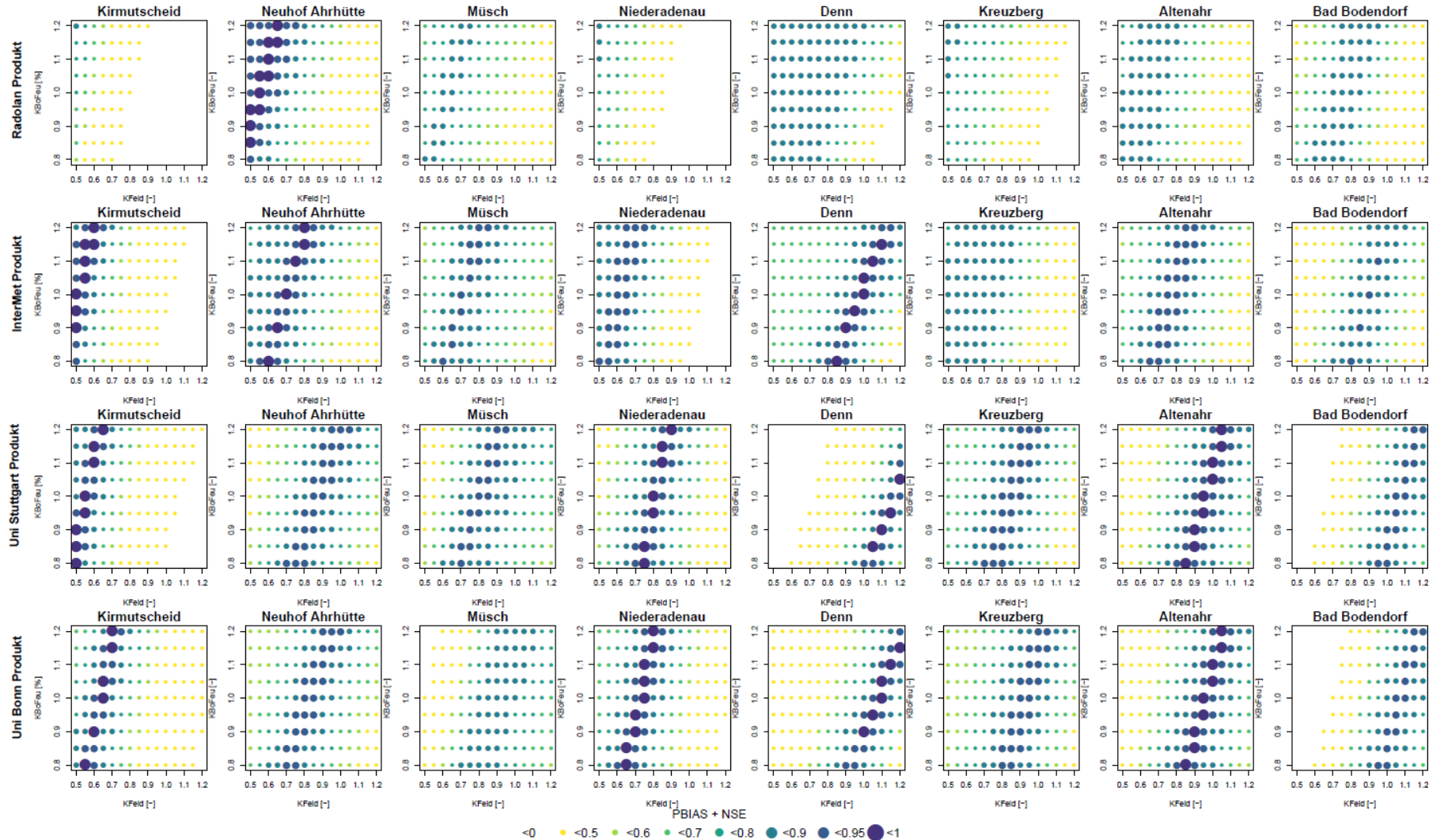
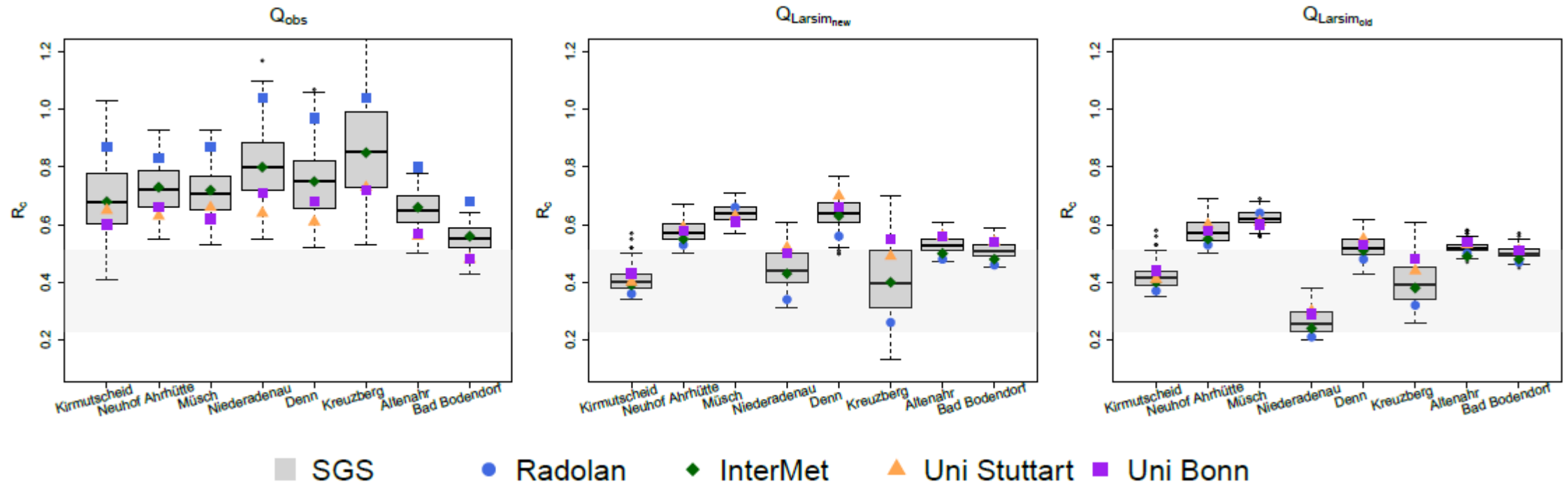


Abb. 6: Sensitivitätsanalyse von zwei Modellparametern: Korrektur der Feldkapazität und Korrektur der Bodenfeuchte.

Die Sensitivität wird in Form eines Performance-Kriteriums (Kombination aus Bias und NSE) gegenüber den rekonstruierten Abflüssen dargestellt.

4. Abflussbeiwert: beobachtete vs. von Larsim modellierte Werte

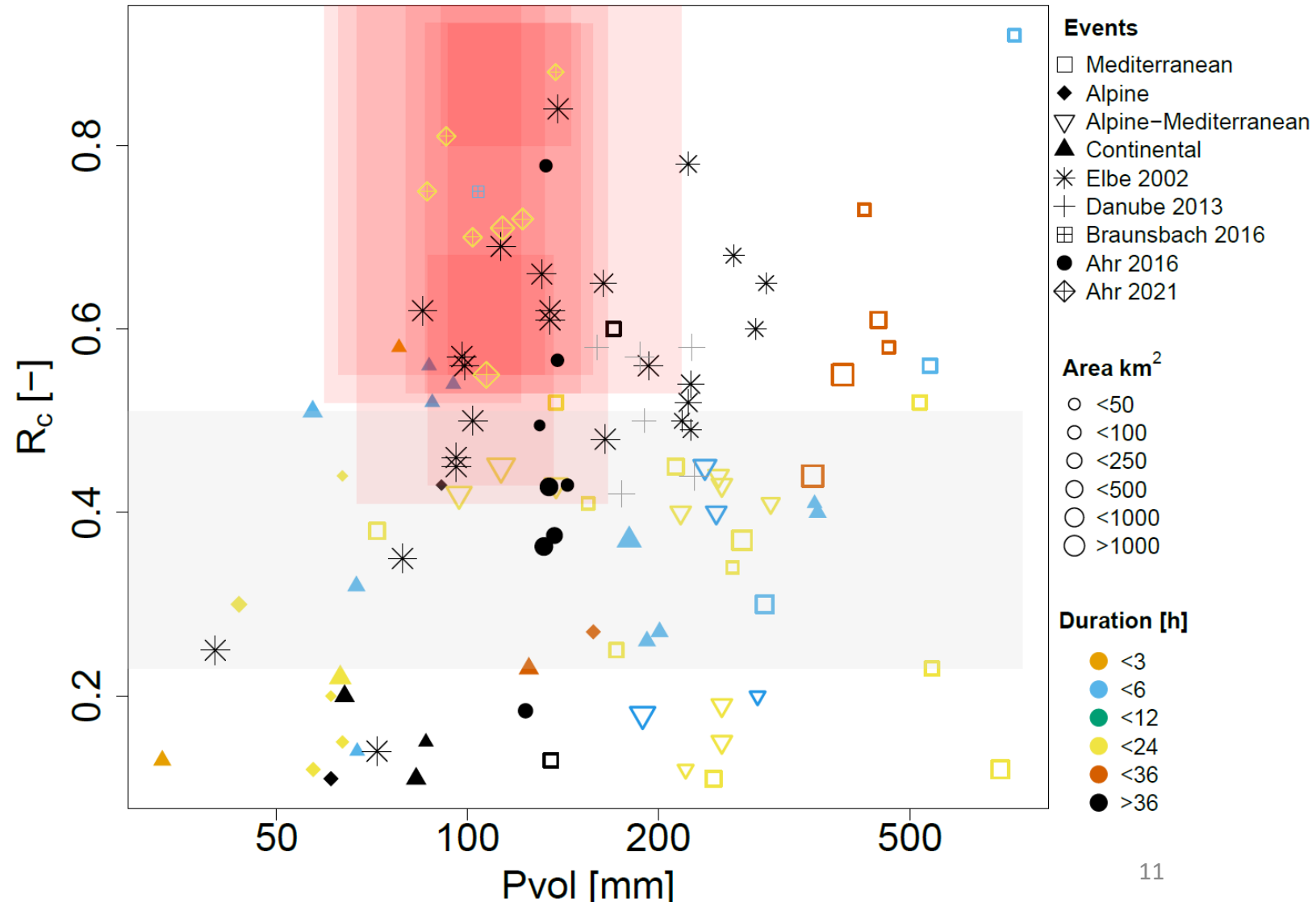
Abb.7: Berechnete Abflussbeiwerte aus verschiedenen Niederschlagsprodukten und den rekonstruierten Daten als Referenz für den Direktabfluss - linke Abbildung, aus dem mit Larsim (neuer Parametersatz) simulierten Direktabfluss - mittlere Abbildung, und aus Larsim (mit altem Parametersatz) - rechte Abbildung.



6. Vergleich des Hochwassers vom Juli 2021 mit anderen in Europa

Abb. 8: Abflussbeiwert vs. Niederschlagsmenge für verschiedene Hochwasserereignisse in Europa (entnommen aus Marchi et al. 2010), und die Ahr-Hochwasser von 2016 und 2021.

Die rote Farbe zeigt den Unsicherheitsbereich der berechneten Abflussbeiwerte für das Ahr-Hochwasser 2021, und die graue Farbe zeigt die erwarteten Abflussbeiwerte auf nassen Böden nach Marchi et al. 2010.



7. Fazit

- Aufgrund der Unsicherheiten bei den Niederschlägen und den Abflüssen ist die Schätzung des Abflusskoeffizienten für das Ereignis 2021 schwierig.
- Die Abflusskoeffizienten für das Ahr-Hochwasser im Juli 2021 werden zwischen 0,4 und 0,8 geschätzt, was über dem Hochwasser im Juni 2016 und den Durchschnittswerten für europäische Hochwasser liegt.
- Gab es tatsächlich mehr Niederschlag oder sollten wir weitere Änderungen im Modell berücksichtigen?

Vielen Dank!
Gibt es Fragen?

Appendix I

Tab. 4: Die maximale Niederschlagsmenge des Ereignisses Ahr 2016 im Vergleich zum Ereignis 2021.

| Duration | Kirmutscheid | Neuhof Ahrhütte | Müsch | Niederadenau | Denn | Kreuzberg | Altenahr | Bad Bodendorf |
|----------|--------------|-----------------|-------|--------------|------|-----------|----------|---------------|
| 60min | 58% | 34% | 45% | 63% | 53% | 31% | 45% | 46% |
| 180min | 57% | 35% | 41% | 60% | 52% | 28% | 41% | 43% |
| 360min | 45% | 26% | 30% | 47% | 43% | 23% | 30% | 31% |
| 720min | 35% | 23% | 24% | 35% | 32% | 23% | 24% | 25% |
| 1440min | 40% | 26% | 29% | 36% | 37% | 27% | 29% | 31% |

Tab. 5: Hydrologischen Komponenten des Ereignisses von 2016 im Vergleich zum 2021er Ereignis.

| Component | Kirmutscheid | Neuhof Ahrhütte | Müsch | Niederadenau | Denn | Kreuzberg | Altenahr | Bad Bodendorf |
|---|--------------|-----------------|-------------|--------------|------|-----------|--------------|---------------|
| Total Rainfall 2016[10 ⁶ m ³] | 13.4 | 17 | 53 (22.4) | 8.4 | 12.6 | 5.5 | 107 (27.5) | 114 |
| IHW Total Rainfall 2021[10 ⁶ m ³] | 9.3 | 17.4 | 42.7 (16.1) | 6.4 | 9.8 | 6.7 | 96.2 (37.1) | 105.4 |
| Volume Q _D 2016[10 ⁶ m ³] | 6.83 | 2.74 | 17.4 (7.8) | 3.49 | 9.76 | 2.68 | 41.55 (8.24) | 39.84 |
| Volume Q _D 2021[10 ⁶ m ³] | 6.1 | 10.9 | 28.2 (11.3) | 4.1 | 6 | 4.9 | 54.2 (15.81) | 50.7 |
| Ratio to 2021 Event [-] | 1.12 | 0.265 | 0.62 (0.7) | 0.85 | 1.62 | 0.55 | 0.77 (0.52) | 0.79 |
| Runoff Coefficient 2016 [-] | 0.51 | 0.16 | 0.33 (0.34) | 0.41 | 0.78 | 0.49 | 0.39 (0.3) | 0.33 |
| IHW Runoff Coefficient 2021 [-] | 0.65 | 0.63 | 0.66 (0.7) | 0.64 | 0.61 | 0.73 | 0.56 (0.43) | 0.48 |
| Ratio to 2021 Event [-] | 0.78 | 0.26 | 0.49 | 0.65 | 1.27 | 0.68 | 0.69 | 0.68 |

Tab. 6: Charakteristika des Ahr-Einzugsgebiets.

| ID | Name | Area [km ²] | Elev. [m] | Slope [°] | Forest [%] | Grass. [%] | Agric. [%] | Urban [%] | KF [mm] | LK [mm] | FK [mm] |
|----|-----------------|----------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------------|------------|------------|
| 1 | Neuhof Ahrhütte | 125. | 489. | 6.4 | 42.3 | 43.8 | 8.2 | 3.7 | 36.4 | 55.8 | 215.3 |
| 2 | Kirmutscheid | 88.4 | 486 | 6.6 | 45.9 | 41.5 | 8.1 | 3.3 | 36.4 | 55.8 | 215.3 |
| 3 | Müsch | 352 | 481.4 | 6.7 | 42.2 | 44.2 | 8.3 | 4 | 35.4 | 59 | 184.8 |
| 4 | Niederadenau | 56.9 | 443.8 | 13.5 | 77.1 | 15.6 | 0.98 | 5.9 | 25.7 | 37.7 | 116.1 |
| 5 | Denn | 94.9 | 459 | 14.9 | 83.1 | 15.4 | 0.0 | 0.9 | 30 | 35.5 | 104 |
| 6 | Kreuzberg | 42.5 | 373.8 | 8.4 | 56.7 | 39.6 | 0.0 | 2.3 | 31.4 | 44.8 | 179.3 |
| 7 | Altenahr | 745.6 | 449.1 | 9.2 | 56.2 | 35.2 | 4.1 | 3.4 | 32.6 | 49.9 | 161.8 |
| 8 | Bad Bodendorf | 863.8 | 419.4 | 9.3 | 55.5 | 31.3 | 6.8 | 4.7 | 32.1 | 50.7 | 163.1 |

Tab. 7: Dominante hydrologische Prozesse.

| ID | Name | DP [%] | DP0 [%] | HOF [%] | SOF1 [%] | SOF2 [%] | SOF3 [%] | SFF1 [%] | SFF2 [%] | SFF3 [%] |
|----|-----------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | Neuhof Ahrhütte | 15.2 | 1.4 | 0 | 4.8 | 4.6 | 32.8 | 0.2 | 18.8 | 21.8 |
| 2 | Kirmutscheid | 7.4 | 3.2 | 0 | 7.3 | 3.5 | 33.5 | 0.2 | 24.8 | 27.6 |
| 3 | Müsch | 13.5 | 2.3 | 0 | 5.9 | 4 | 33.5 | 0.3 | 20.8 | 22.3 |
| 4 | Niederadenau | 3.8 | 0.3 | 0 | 8.3 | 5.2 | 14.7 | 0.1 | 38.1 | 35.4 |
| 5 | Denn | 3.8 | 0 | 0 | 6.6 | 4.4 | 11.5 | 0.1 | 38.7 | 37 |
| 6 | Kreuzberg | 3.6 | 0.6 | 0 | 7.4 | 6.1 | 26.5 | 0.4 | 38.1 | 16.8 |
| 7 | Altenahr | 8.8 | 1.7 | 0 | 6.5 | 4.5 | 27 | 0.3 | 28.6 | 25.6 |
| 8 | Bad Bodendorf | 9 | 1.8 | 0 | 6.3 | 4.3 | 27.6 | 0.2 | 27.7 | 25.5 |