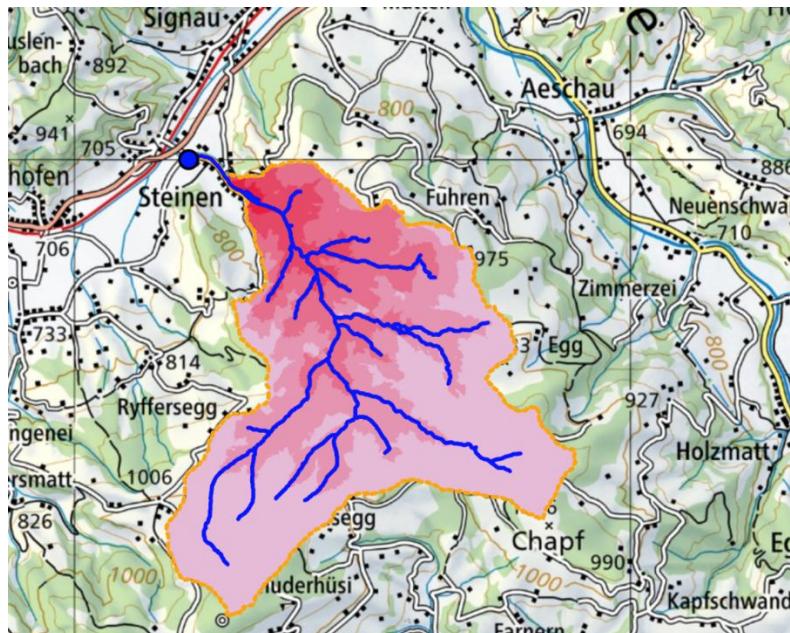




Kanton Bern
Canton de Berne

Hochwasserschätzverfahren für kleine Einzugsgebiete und deren Einbindung in AUGUR

Dokumentation **ENTWURF**



 Hunziker, Zarn & Partner
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

 Bellprat
CLIMATE
CONSULTING

 **GEO TOOLS**
SUTER
 **Scherrer AG**
Hydrologie und Hochwasserschutz

Impressum

Versionsverlauf

31.01.2026 0.1 Entwurf

03.02.2026 0.2 Entwurf

Autoren

Hunziker, Zarn & Partner AG

Andreas, Niedermayr, Dr.-Ing. Bauing.

info@hzp.ch, +41 (0)62 823 94 61

Auftraggeber

Tiefbauamt des Kantons Bern

Oberingenieurkreis IV Oberaargau / Emmental

Dunantstrasse 13

3400 Burgdorf

Kontaktperson: Georg Heim, georg.heim@be.ch, +41 (0)31 635 01 17

Auftragnehmer

Hunziker, Zarn & Partner AG, Schachenallee 29, 5000 Aarau

Andreas Niedermayr

Bellprat Climate Consulting, Langgrütstrasse 107, 8047 Zürich

Omar Bellprat

GeoTools Suter, c/o Christoph Suter, Willishalten 31, 3086 Zimmerwald

Christoph Suter

Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz, Schönmattstrasse 8, 4153 Reinach

Simon Scherrer

Abbildung auf Titelseite

Screenshot aus AUGUR

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Einleitung | 4 |
| 1.1 Veranlassung | 4 |
| 1.2 Auftrag und Ziel | 4 |
| 1.3 Arbeitsschritte..... | 5 |
| 1.4 Quellen | 6 |
| 2 Auswahl und Aufbereitung der Schätzverfahren | 7 |
| 3 Programmierung..... | 8 |
| 3.1 Code und Integration in AUGUR..... | 8 |
| 3.2 Erläuterungen zur Bestimmung der kumulierten Gerinnelänge | 9 |
| 3.3 Erläuterungen zur Bestimmung der Fliesszeiten / Isozonen | 9 |
| 4 Vorgabe der Abflussreaktion | 10 |
| 5 Plausibilisierung der Abflussschätzung mit Referenzwerten | 13 |

Anhang

| | |
|--|----|
| A Methodenbeschreibung «modifiziertes Fliesszeitverfahren» | 15 |
| B Methodenbeschreibung «Verfahren nach Kölla» | 16 |
| C Methodenbeschreibung «Verfahren Clark-WSL» | 17 |
| D Prozessbeurteilungsschema für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses | 19 |
| E Plausibilisierung der Methoden mit Vergleichsrechnungen | 20 |

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

| | |
|-------------------------|--|
| <i>HAKESCH</i> | Bei der Ermittlung von Hochwasserabflüssen in kleinen, ungemessenen Einzugsgebieten ($< 10 \text{ km}^2$) wird häufig das Programmpaket HAKESCH eingesetzt [1]. In diesem Programmpaket sind fünf Methoden integriert, mit denen die Größenordnung von Hochwasserabflüssen definierter Jährlichkeit geschätzt werden kann. |
| <i>Hydromaps.ch</i> | Eine relevante Eingabegrösse stellt der anzusetzende Starkniederschlag dar. Seit 2022 liegt das neue Blatt des hydrologischen Atlas der Schweiz, Blatt B04 (www.hydromaps.ch) [2]), vor. Die dort publizierten Starkniederschlagswerte weisen im Gegensatz zur früheren Grundlage, v.a. bei den in kleinen Einzugsgebieten massgebenden 1-h Werten, wesentlich höhere Niederschlagsmengen auf. |
| <i>Erhöhte Abflüsse</i> | Gemäss Rückmeldungen aus der Praxis liefern die HAKESCH-Verfahren auf der neuen Grundlage meist deutlich höhere Spitzenabflusswerte als früher. Es stellt sich beim Kanton Bern die Frage, ob HAKESCH in Anbetracht der erhöhten Starkniederschläge noch sinnvoll für die Hochwasserschätzung verwendet werden kann und ob allenfalls sinnvolle Anpassungen an den Methoden möglich resp. nötig sind. |

1.2 Auftrag und Ziel

| | |
|---------------------------------------|---|
| <i>Überprüfung der Schätzmethoden</i> | Das Tiefbauamt des Kantons Bern hat einem Bearbeitungsteam aus der Hunziker, Zarn & Partner AG, Bellprat Climate Consulting, GeoTools Suter und der Scherrer AG den Auftrag erteilt, die in HAKESCH enthaltenen Ansätze auf die weitere Anwendbarkeit zu testen, diese durch eine Neukalibrierung zu optimieren und die Methoden in die Weboberfläche AUGUR zu integrieren. |
| <i>Einbezug NAM</i> | Der Auftrag umfasste zudem die Entwicklung eines auf dem SCS-Curve-Number-Verfahren basierenden Niederschlag-Abflussmodells, welches an hydrologischen Detailstudien und Abflussmessungen kalibriert werden sollte. Das NAM sollte ebenfalls in die AUGUR-Umgebung integriert werden. |
| <i>Vereinfachte Anwendung</i> | Die Integration in die Weboberfläche AUGUR soll dem Anwender eine vereinfachte Anwendung und den direkten Zugriff auf aktuelle Geo- und Niederschlagsdaten ermöglichen. Relevante Arbeitsschritte (z.B. Einzugs- |

gebietsabgrenzung, Bestimmung der Fliesszeiten) können in der Weboberfläche automatisch aufbereitet und als Eingabegrösse den Verfahren übergeben werden.

| | |
|--------------------------|---|
| <i>weitere Verfahren</i> | Parallel zur beschriebenen Integration von Schätzmethoden in die Oberfläche AUGUR wird im Rahmen eines zusätzlichen Mandats ein weiteres Niederschlag-Abflussmodell (NAM) entwickelt und künftig in die Umgebung integriert. Der fachkundige Anwender wird mittelfristig auf mehrere Methoden resp. Datenquellen zugreifen und anhand der Zwischenresultate einen Entscheid zur Wahl des massgebenden Hochwasserabflusses treffen können. |
| <i>Qualitätsanspruch</i> | Die Qualitätsanforderung an die Hochwasserabschätzverfahren entsprechen einem Beurteilungs-Detailierungsgrad M2, Stufe Gefahrenkarte. |
| <i>Zielpublikum</i> | Die berücksichtigten Hochwasserabschätzverfahren sind auf erfahrene Naturgefahrenfachkräfte mit vertieften hydrologischen Kenntnissen ausgerichtet. |

1.3 Arbeitsschritte

Aufgaben Der Auftrag umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Auswahl und inhaltliche Aufbereitung der zu behandelnden Hochwasserschätzmethoden.
- Programmierung der Schätzmethoden und Anpassung der AUGUR Oberfläche, d.h. Integration der Schätzmethoden, Umsetzung einer automatischen Geodatenaufbereitung und Niederschlagsabfrage.
- Vorgabe von Abflussreaktionsklassen und deren Parametern.
- Plausibilisierung der Anwendbarkeit.

1.4 Quellen

- [1] <https://www.bafu.admin.ch/de/hochwasserabschaetzung-in-ungemessenen-einzugsgebieten>
- [2] Sophie Fukutome, Sonia Alouini, Christoph Frei (2025). "Extreme Punktniederschläge". In Daten- und Analyseplattform. Hydrologischer Atlas der Schweiz. <https://hydromaps.ch>
- [3] <https://augur.world/discharge/>
- [4] Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Praxishilfe, Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4 – Bern 2003.
<https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/XIP0tavoQU2D/hochwasserabschaetzunginschweizerischeneinzugsgebietenpraxishilf.pdf>
- [5] Zur Abschätzung von Hochwasser in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen, eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete, Elisabeth Kölla, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 87, 1986.
<https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/087.pdf>
- [6] Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Stephan Vogt, Diplomarbeit ETH Zürich, Departement Erdwissenschaften, ausgeführt an der Eidg. Forschungsanstalt WSL, März 2001.
- [7] Gefährdungskarte Oberflächenabfluss, geo7, im Auftrag des BFU, SSV und VKG, 2018
<https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de¢er=2660000.1189875&z=1&topic=bafu&layers=ch.bafu.gefaehrdungskarte-oberflaechenabfluss&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&catalogNodes=ech>
- [8] «Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen, Felix Naef et al., «Wasser Energie Luft» – 99. Jahrgang, 2007, Heft 3, CH-5401 Baden.
- [9] Scherrer, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen, Herausgeber: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG).
- [10] https://obellprat.github.io/augur-hakesch2-calibration/calibration_hakesch.html

2 Auswahl und Aufbereitung der Schätzverfahren

| | |
|-----------------------------------|---|
| <i>HAKESCH mit fünf Verfahren</i> | In HAKESCH sind fünf Varianten enthalten, wovon die Methoden «Taubmann» und «Müller» leidlich der Plausibilisierung der erhaltenen Bandbreite dienen. |
| <i>Müller</i> | Gemäss HAKESCH wird mit dem Verfahren nach Müller die Obergrenze des plausiblen Schätzbereichs angegeben. Beim Verfahren von Müller handelt es sich um einen Hüllkurvenansatz, der auf Basis von Abflussdaten in den 1940er Jahren entwickelt wurde. Da dort keine Niederschläge berücksichtigt werden, wurde im vorliegenden Mandat auf dieses Verfahren verzichtet. |
| <i>Taubmann</i> | Das Verfahren nach Taubmann stellt in HAKESCH die plausible Untergrenze des Schätzbereichs an. Das Verfahren nach Taubmann ergibt erfahrungsgemäss häufig sehr geringe Abflüsse. Selten liegen die anderen Verfahren unter diesem Wert. Falls dennoch Taubmann in Einzelfällen grössere Abflüsse ergibt, dann liegt dies an der im Taubmann-Verfahren problematischen Berechnung der Konzentrationszeit ¹ . Auf das Verfahren nach Taubmann wurde im vorliegenden Mandat verzichtet, da sich aus dessen Ergebnis keine Zusatzinformationen ableiten lassen, die das gewählte Endergebnis verbessern. |
| <i>Drei relevante Methoden</i> | Es verbleiben somit drei massgebende Verfahren (modifizierte Fliesszeit, Kölla und Clark-WSL). Diese sollen formelmässig erfasst und die relevanten Parameter benannt werden. |
| <i>Literatur</i> | Es wurde relevante Literatur ([4], [5], [6]) zu den drei Ansätzen «modifiziertes Fliesszeitverfahren», «Kölla» und «Clark-WSL» studiert, die massgebenden Eingabegrössen identifiziert und der Berechnungsablauf sowie besondere Erkenntnisse in einer Übersicht zusammengefasst. |
| <i>Expertengespräch</i> | Teamintern wurden zwischen HZP und der Scherrer AG die Erkenntnisse besprochen. Zusätzlich wurde zum Verfahren «Clark-WSL» mit dem damaligen Verfasser Stephan Vogt ein Gespräch geführt, in dem Detail- und Verständnisfragen geklärt wurden. |

¹ Die massgebende Niederschlagsdauer resp. Konzentrationszeit im Verfahren nach Taubmann wird über die Gerinnelänge und das Gefälle ermittelt. Je kürzer das Gerinne, umso kleiner ist die Konzentrationszeit und umso höher ist die massgebende Niederschlagsintensität. Bei kurzen Gerinnelängen, die nur einen Teil der Einzugsgebietslänge umfassen, überschätzt das Verfahren also die in kurzer Überregnungsduer tatsächlich beitragende Fläche.

| | |
|------------------------------------|---|
| <i>Methodenbeschreibung</i> | Das Ergebnis wurde in einer Methodenbeschreibung zusammengefasst (vgl. Anhang A, B und C). Für weitere Details wird auf die Literatur ([4], [5]) verwiesen. |
| <i>Niederschlag-Abfluss-Modell</i> | Die Beschreibung zum Aufbau des Curve-Number Niederschlag-Abflussmodells wird zu einem späteren Zeitpunkt in den vorliegenden Bericht integriert. |

3 Programmierung

3.1 Code und Integration in AUGUR

| | |
|--|--|
| <i>Python</i> | Auf Basis der Methodenbeschreibung wurden die drei Verfahren und die zur Bestimmung von Eingabegrössen relevanten Arbeitsschritte programmiert (Sprache Python) und das Ergebnis in die Umgebung AUGUR.world integriert. |
| <i>Open-Source</i> | Der zugrundeliegende Software-Code ist einsehbar [10] und kann geteilt werden. Es besteht keine Lizenzierung (kein “copy-left” oder “copy-right”) auf den Code. |
| <i>Aufbereitung der Eingabeparameter</i> | Die für die Verfahren nötigen Parameter werden in der Oberfläche anhand des digitalen Terrainmodells SwissAlti3d, welches auf 5 m Rasterweite umgerechnet wurde, automatisch ermittelt. Dies umfasst u.a.: |
| <i>Niederschlagswerte</i> | <ul style="list-style-type: none">• Abgrenzung des Einzugsgebiets (inkl. Füllung von Senken).• Berechnung der Gebietsgrösse, Höhenunterschiede und Länge des Hauptgerinnes resp. der kumulierten Gerinnelänge.• Bestimmung der Fliesszeiten und Isozonierung. <p>Niederschlagsintensitäten werden automatisch über hydromaps.ch [2] abgerufen.</p> |

3.2 Erläuterungen zur Bestimmung der kumulierten Gerinnelänge

| | |
|-------------------------------------|---|
| <i>Auswertung Geländemodell</i> | Im Geländemodell wird für jede Rasterzelle die Hauptrichtung der talwärts gerichteten Entwässerung ermittelt. Daraus lässt sich je Zelle die Summe aller dorthin entwässernden Zellen bestimmen. |
| <i>Grenzwert</i> | Durch Vorgabe eines Grenzwerts der Anzahl entwässernder Zellen lässt sich ein im Starkregenfall massgebendes kumulierte Gerinnenetz ermitteln. Dieses enthält nicht nur tatsächliche Gewässerläufe, sondern auch diejenigen Bereiche, über die im Fall von Starkniederschlägen verstärkt Abfluss geführt wird. |
| | Im Programm wurde gutachterlich ein Grenzwert von 3'000 Zellen resp. eine beitragende Fläche von 7'500 m ² ermittelt. Das Ergebnis des resultierenden Gerinnenetzes ist hiermit relativ verästelt und bildet sowohl die Länge und Lage offener Gewässerläufe, als auch Hauptströmungsbereiche weiterer Zuflüsse ab; letztere geben ein im Vergleich zur Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7] vergleichbares Bild. |

3.3 Erläuterungen zur Bestimmung der Fliesszeiten / Isozonen

| | |
|-----------------------------------|--|
| <i>Relevanz für Clark-WSL</i> | Im Verfahren Clark-WSL wird die massgebende Niederschlagsdauer über die Anzahl der vorhandenen Isozonen und des je Isozone angesetzten Zeitintervalls (im vorliegenden Fall 10 Minuten) ermittelt. |
| <i>Abhängigkeiten</i> | Bei der Bestimmung der Isozonen spielen die Fliessgeschwindigkeit im Gelände sowie die Fliessgeschwindigkeit im Gewässer eine Rolle. Die Abgrenzung der Isozonen erfolgt in AUGUR über eine automatische Auswertung des Geländemodells und der Bodenbedeckung. <ul style="list-style-type: none">• Anhand des Geländemodells wird für jede Rasterzelle die Geländeneigung ermittelt.• Bei der Bodenbedeckung wird zwischen Wald und den übrigen Bodenbedeckungen unterschieden. Im Wald treten bei gleicher Geländeneigung geringere Oberflächenfliessgeschwindigkeiten als beispielsweise im Kulturland auf.• Auf dem Gelände (d.h. ausserhalb des kumulierten Gerinnes, vgl. Kap. 0) ergibt sich in Abhängigkeit von Bodenbedeckung und Neigung eine bestimmte Fliessgeschwindigkeit. Die gewählten Werte der Fliessgeschwindigkeit v sind in Tab. 1 angegeben. |

- Im Gerinne könnte in der Theorie die Fliessgeschwindigkeit mit verschiedenen Formeln (meistens in Abhängigkeit des noch unbekannten Abflusses) berechnet werden. Da der Abfluss sowohl entlang des Gerinnes als auch während des Ereignisses nicht konstant ist, erscheint dies sehr theoretisch. Stattdessen wird einheitlich eine Fliessgeschwindigkeit von 1.5 m/s im Gerinne (dies deckt alle Zellen innerhalb des kumulierten Gerinnenetzes ab) angesetzt.

Tab. 1: In Abhängigkeit von Geländeneigung und Bodenbedeckung angesetzte Fliessgeschwindigkeiten an der Oberfläche (ausserhalb des Gerinnes)

| Neigung | v im Wald (m/s) | v im Kulturland und auf den übrigen Bodenbedeckungen (m/s) |
|----------|-----------------|--|
| < 1% | 0.05 | 0.1 |
| 1 – 5 % | 0.1 | 0.2 |
| 5 – 10% | 0.2 | 0.4 |
| 10 – 20% | 0.3 | 0.6 |
| 20 – 40% | 0.4 | 0.8 |
| > 40% | 0.5 | 1.0 |

4 Vorgabe der Abflussreaktion

Abflussprozesse

Bei der Hochwasserabflussbildung spielen neben der Dauer und der Intensität von Starkniederschlägen und der Grösse/ Topographie des Einzugsgebiets die auftretenden Abflussprozesse eine entscheidende Rolle. Zu den wichtigsten bei Starkregen auftretenden Abflussprozessen zählen der Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen (HOF), der gesättigte Oberflächenabfluss (SOF), der Abfluss im Boden (SSF) und die Tiefenversickerung (DP). Die Abflussprozesstypen können zusätzlich nach ihrer Reaktion in rasch beitragend (z.B. SSF1), verzögert beitragend (z.B. SSF2) und stark verzögert beitragend (z.B. SSF3) unterschieden werden.

Abflussreaktion

In AUGUR.world sind derzeit keine Ansätze zur Bestimmung der Abflussbereitschaft hinterlegt; der Anwender muss deshalb eigenständig die Abflussbereitschaft ermitteln. Im Anhang D der vorliegenden Dokumentation

findet sich ein Schema zur Beurteilung des massgebenden Abflussprozesstyps. Weitere Methoden zur Bestimmung der im Einzugsgebiet auftretenden Abflussprozesse sind z.B. in [4], [8] und [9] beschrieben.

Abflussreaktion

Eine flächendifferenzierte Ansprache sämtlicher Abflussprozesstypen mit Zuordnung der Reaktionsfreudigkeit erfordert einen hohen Arbeitsaufwand und ist mit Unschärfen verbunden. Stattdessen wird vorgeschlagen, die diversen Abflussprozesstypen nach ihrer Abflussfreudigkeit in fünf Abflussreaktionsklassen zu unterteilen (vgl. Tab. 2). Mit diesen fünf Abflussreaktionsklassen kann das gesamte Spektrum der Abflussfreudigkeit im Sinne der Schätzmethoden ausreichend genau und differenziert abgebildet werden.

Flächige Zuordnung

Der Anwender soll die Flächenanteile der Abflussreaktionsklassen abschätzen und in die Oberfläche eingeben. Eine geometrische Verortung der Reaktionsklassen ist ausschliesslich bei den Niederschlag-Abflussmodellen implementiert.

Tab. 2: *Definition der Abflussreaktionsklassen*

| Abflussreaktionsklasse | Beschreibung | Stellvertretend für Abflussprozesstyp |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | rasch und stark beitragend | HOF1, SOF1 |
| 2 | leicht verzögert beitragend | HOF2, SOF2, SSF1 |
| 3 | verzögert beitragend | SOF3, SSF2 |
| 4 | stark verzögert beitragend | SOF3, SSF3 |
| 5 | sehr stark verzögert beitragend | DP |

Abflussparameter

In den drei Schätzverfahren wird die Abflussbereitschaft über die Parameter ψ (mod. Fliesszeit), $V_{0,20}$ (Kölla) und WSV (Clark-WSL) parametrisiert. Anhand von Erfahrungswerten lässt sich je Abflussreaktionsklasse eine **Bandbreite** der anzunehmenden Parameter angeben (vgl. Klammerwerte in Tab. 3). Durch Variation der Werte und Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Referenzwerten (vgl. Kap. 0) wurden schliesslich die in

Tab. 3 fett hervorgehobenen Werte gewählt und in AUGUR standardmäßig hinterlegt.

Tab. 3: Erfahrungswerte und deren Bandbreite zur Parametrisierung der Abflussreaktion

| Abflussreaktions-klasse | ψ | $V_{0,20}$ | WSV |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 0.45 (0.45 – 0.5) | 20 (20 – 25) | 10 (10 – 15) |
| 2 | 0.35 (0.3 – 0.45) | 25 (25 – 30) | 20 (15 – 30) |
| 3 | 0.15 (0.1 – 0.2) | 35 (35 – 40) | 30 (35 – 40) |
| 4 | 0.1 (0.1) | 45 (40) | 45 (40 – 45) |
| 5 | 0.05 (0.05 – 0.1) | 50 (40 – 45) | 60 (45 – 60) |
| Siedlungsgebiet | 0.3 | 30 | 20 |

5 Plausibilisierung der Abflussschätzung mit Referenzwerten

Beschreibung der Referenzwerte

Für den Vergleich der Ergebnisse der Schätzmethoden werden hydrologische Studien der Scherrer AG herangezogen, welche in verschiedenen Regionen des Mittellandes und des voralpinen Hügellandes erarbeitet wurden. Aus den vorliegenden Studien wurden 40 Bemessungspunkte ausgewählt, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

- Einzugsgebietsfläche < 10 km²
- Bei der Studie angesetzte Starkniederschlagswerte weichen um weniger als 10% vom Median der hydromaps.ch Starkniederschläge ab.
- Die Flächenanteile der Abflussreaktionsklassen sind bekannt.
- Die Bandbreite des Hochwasserabflusses HQ₁₀₀ ist definiert.

Vergleich mit Referenzwerten

Für diese 40 Referenzgebiete wurde mit AUGUR, unter Ansatz der in den hydrologischen Studien definierten Anteile der Abflussreaktion und der bei den Studien gewählten Niederschlagswerten, der Hochwasserabfluss HQ₁₀₀ geschätzt. Das Ergebnis der drei Schätzmethoden wurde vergleichend der Bandbreite des Referenzabflusses gegenübergestellt (vgl. Anhang E).

Ergebnis

Bei den Verfahren «mod. Fliesszeit» und «Clark-WSL» ergibt die Schätzung in rund 1/3 der Fälle einen Wert, der innerhalb der Bandbreite des Referenzwertes liegt. Die Anzahl an Über- und Unterschätzungen hält sich in etwa die Waage. Beim Verfahren von Kölla findet (unter Beachtung, dass die Bestimmung der kumulierten Gerinnelänge ein stärker verästeltes Gewässernetz ergibt) eine tendenziell häufigere Überschätzung des Referenzwertes statt.

Wählt man aus allen drei Schätzverfahren jeweils den Mittelwert und vergleicht diesen mit der Referenz, so zeigt sich ein respektables Ergebnis. In 32% der Fälle liegt der Mittelwert dieser drei Verfahren in der Referenzbandbreite. Die Anzahl an Über- und Unterschätzungen ist ungefähr gleich gross. Nur bei 10% aller Bäche ergibt sich eine Unterschätzung der Referenz um mehr als 26% und in 10% der Fälle ergibt sich eine Überschätzung der Referenz um mehr als 55%. In 60% aller Fälle bewegen sich die Ergebnisse in einem Genauigkeitsbereich von -14% bis + 22% (relativ zur Referenz).

Aarau, 03.02.2026

Hunziker, Zarn & Partner AG
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "A. Niedermayr".

Dr. Andreas Niedermayr

Anhang

A Methodenbeschreibung «modifiziertes Fließzeitverfahren»

Modifiziertes Fließzeitverfahren*

$$HQ(x) = 0.278 \cdot i(T_c, x) \cdot \psi_s \cdot E$$

mit:

i = massgebende Niederschlagsintensität (mm/h), abhängig von x und T_c

x = Jährlichkeit resp. Wiederkehrperiode (-)

T_c = Konzentrationszeit (min)

ψ_s = Spitzenabflusskoeffizient nach Rickli und Forster (-)

E = Einzugsgebietsfläche (km^2)

Annahmen:

- Die Intensität des Niederschlags ist über die gesamte Dauer konstant (Blockniederschlag).
- Die höchsten Spitzenabflüsse treten dann auf, wenn die Dauer des Bemessungsniederschlags der Konzentrationszeit entspricht.
- Als Konzentrationszeit wird allgemein die Zeit bezeichnet, welche ein Wassertropfen benötigt, um vom entferntesten Punkt des Einzugsgebiets bis zum Gebietsauslass zu gelangen. Im modifizierten Fließzeitverfahren setzt sich die Konzentrationszeit aus der Summe der Benetzungsdauer T_B und der Fließzeit T_{Fl} zusammen, d.h. $T_c = T_{Fl} + T_B$
- Die Fließzeit T_{Fl} (in min) wird im mod. Fließzeitverfahren nach dem Ansatz von Kirpich bestimmt: $T_{Fl} = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot J^{-0.385}$ mit:
 - L = max. Fließlänge (Distanz zwischen dem Gebietsauslass und dem entferntesten Punkt des Einzugsgebiets, dem Haupttal folgend) [m]
 - J = mittleres Gefälle entlang der maximalen Fließlänge, d.h. $J = \Delta H / L$ [m/m]
- Die Benetzungsdauer T_B ist die Zeit, welche der Bemessungsniederschlag benötigt, um das Benetzungsvolumen aufzufüllen. Das Benetzungsvolumen entspricht dem Regenvolumen, das aufgebracht werden muss, um die obersten Bodenschichten aufzusättigen und damit Abflussprozesse zu ermöglichen. Das Benetzungsvolumen wird nach KÖLLA (1986) bestimmt, es ist primär von den Bodeneigenschaften und der Geologie abhängig. Dabei sind die Erkenntnisse der Gebietsbegehung zu berücksichtigen. Die Intensität des Bemessungsniederschlags wird iterativ ermittelt, so dass das Benetzungsvolumen während der Benetzungsdauer T_B komplett aufgefüllt wird und der Spitzenabfluss innerhalb der Fließzeit T_{Fl} realisiert werden kann.

Die Benetzungsdauer T_B hängt von der Niederschlagsintensität ab und ergibt sich nach der Methode Kölla (1986)* in Abhängigkeit des erforderlichen Benetzungsvolumens. Die Parameterschätzung erfolgt zunächst für das 20 jährliche Regenereignis $V_{O_{20}}$ (mm) dar. Mit Korrekturfaktoren kann das erforderliche Benetzungsvolumen auf das 2.3 jährliche und 100-jährliche Ereignis angepasst werden.

$$V_{O_{2.3}} = 0.5 \times V_{O_{20}}$$

$$V_{O_{100}} = 1.3 \times V_{O_{20}}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned} T_C &= T_B + T_{Fl} \\ T_B \times i_x(T_C) &= V_{O_x} \end{aligned}$$

Iteratives Vorgehen zur Bestimmung der Benetzungsdauer:

- (1) Jährlichkeit x und erforderl. Benetzungsvolumen V_{O_x} definieren.
- (2) Fließzeit T_{Fl} berechnen
- (3) Startwert für T_B wählen
- (4) Für $T_C = T_B + T_{Fl}$ wird aus dem Intensitätsdiagramm die Regen-Intensität $i_x(T_C)$ für das x -jährliche Ereignis der Dauer T_C abgelesen.
- (5) Falls $T_B \times i_x(T_C) < V_{O_x} \rightarrow T_B$ verlängern, falls $T_B \times i_x(T_C) > V_{O_x} \rightarrow T_B$ verkürzen.
- (6) Schritte (4) und (5) so lange wiederholen, bis $T_B \times i_x(T_C) = V_{O_x}$

* vgl. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/087.pdf>

B Methodenbeschreibung «Verfahren nach Kölla»

Verfahren nach Kölla*

Eingabeparameter:

- Gesamtfläche des Einzugsgebiets E (in km²)
- Gletscherfläche (in km²)
- Kumulative Gerinnellänge L_{Ge} (in km)

Grundschaema für die Bestimmung des 20-jährlichen Hochwasserabflusses:

- Effektiv beitragende Fläche ermitteln: FL_{eff20} = 0.12 × L_{Ge}^{1.07} (in km²)
- Bodentyp klassifizieren, V_{o20} zuordnen (globaler Wert für den Nahbereich entlang des Gerinnes)
- Der Verlust f₂₀ beträgt 0.1 × V_{o20}
- Die Fließzeit (in h) wird abweichend vom mod. Fließzeitverfahren berechnet: T_{Fl} = FL_{eff20}^{0.2}
- Die Benetzungsdauer T_B und massgebende Regendauern T_c = T_{Fl} + T_B werden iterativ bestimmt:
 - (1) Startwert für T_B wählen
 - (2) Für T_c = T_B + T_{Fl} wird aus dem Intensitätsdiagramm die Regen-Intensität i_x(T_c) für das x-jährliche Ereignis der Dauer T_c abgelesen.
 - (3) Falls T_B × i_x(T_c) < V_{o20} → T_B verlängern, falls T_B × i_x(T_c) > V_{o20} → T_B verkürzen.
- Abflussanteile aus der Gletscherspende: Q_{Gle20} = 0.5 m³/s × Gletscherfläche
- Falls Schneeschmelze relevant: bei massgebender Regendauer T_c ermittelte Regen-Intensität um r_s = 4 mm/h (= Schmelzwasseräquivalent) erhöhen.
- Die Regenintensität kann um den Verlust f_{o20} (teils durchlässiger Untergrund, Ausdehnung der beitragenden Flächen) reduziert werden.

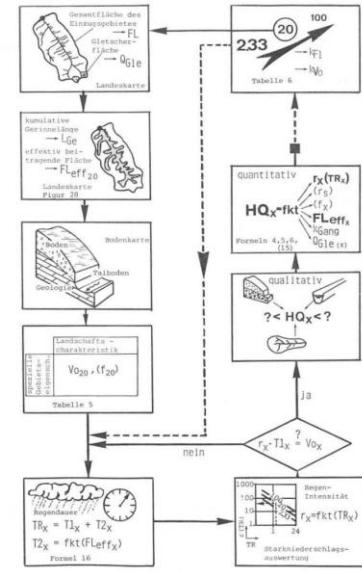


Figure 30 Ablaufschema zur Abschätzung eines mittleren, 20- oder 100-jährlichen Hochwasserabflusses für Schweizerische Einzugsgebiete mit einer Fläche < 100 km²

(Fortsetzung...) Grundschaema für die Bestimmung des 20-jährlichen

Hochwasserabflusses:

- Bei kleinen Einzugsgebieten und/ oder kurzen Regendauern kann die Ganglinie des Regens gegenüber einem Blockniederschlag zu einer Erhöhung des Abflusses beitragen. Dies wird mit einem Ganglinienkorrekturfaktor abgebildet:

4.). Für Regendauern bis zu einer Stunde gilt

$$k_{Gang} = 1 + \frac{10 - FL}{9} \cdot 0.2 \quad (FL \geq 1 \text{ km}^2) \quad (\text{Hinweis: Kölla verwendet } FL \text{ für die Gesamteinzugsgebietsfläche } E)$$

$$k_{Gang} = 1.2 \quad (FL < 1 \text{ km}^2)$$

bei längeren bis 3 Stunden

$$k_{Gang} = 1 + \frac{3 - TR_X}{2} \cdot \frac{10 - FL}{9} \cdot 0.2 \quad (FL \geq 1 \text{ km}^2)$$

$$k_{Gang} = 1 + \frac{3 - TR_X}{2} \cdot 0.2 \quad (FL < 1 \text{ km}^2)$$

- Der Spitzenabfluss berechnet sich schliesslich zu $HO_{20} = FL_{eff20} \times (i_{20}(T_C) + r_s - f_{20}) \times k_{Gang} \times 1/3.6 + Q_{Gle}$. Hinweis: 1/3.6 ist die Umrechnung von km²*mm/h in m³/s

Für 2.3 und 100 jährliche Ereignisse sind die Berechnungen zu wiederholen und dabei das Benetzungs volumen (V_{o2,3} resp. V_{o100}) und der Verlust (f_{2,3} resp. f₁₀₀) anzupassen sowie die effektiv beitragende Fläche durch Berücksichtigung eines Korrekturfaktors (k_{F2,33} resp. k_{F100}) neu zu berechnen (vgl. Tabelle).

| | V _{o20} [mm] | f ₂₀ [mm/h] | V _{o2,33} [mm] | f _{2,33} [mm/h] | k _{F2,33} | V _{o100} [mm] | f ₁₀₀ [mm/h] | k _{F100} |
|---|-----------------------|--------------------------|---|---|--------------------|--|---|-------------------|
| A | 20 | | | | 0,9 | | | 1,1 |
| B | 25 | = 0,1 · V _{o20} | V _{o2,33} = 0,5 · V _{o20} | f _{2,33} = 0,1 · V _{o2,33} [mm] | 0,8 | V _{o100} = 1,3 · V _{o20} | f ₁₀₀ = 0,1 · V _{o100} [mm/h] | 1,15 |
| C | 30 | | | | 0,75 | | | 1,2 |
| D | 35 | | | | 0,7 | | | 1,25 |
| E | 40 | | | | 0,65 | | | 1,3 |
| F | 45 | f ₂₀ | V _{o2,33} = f ₂₀ · V _{o20} | f _{2,33} = 0,1 · V _{o2,33} [mm] | 0,6 | V _{o100} = 1,3 · V _{o20} | f ₁₀₀ = 0,1 · V _{o100} [mm/h] | 1,3 |

* vgl. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/087.pdf>

C Methodenbeschreibung «Verfahren Clark-WSL»

Verfahren nach Clark-WSL*

Vorbereitung:

- Flächendifferenzierte Abflusstypen kartieren und den Parameter WSV_{60min} zuordnen.
- Isozonen (Zeitschrittraster z.B. 10 Minuten) erstellen.
- Aus der Anzahl der Isozonen ergibt sich die Konzentrationszeit t_c und daraus lässt sich die Gesamtniederschlagssumme N_{total} (mm) ableiten (Hinweis: bei sehr flachen Geländeverhältnissen können am Rand des EZG mehrere, von der Fläche aber sehr kleine, Isozonen entstehen. Diese verlängern t_c , reduzieren die Niederschlagsintensität und führen somit zu einer reduzierten Abflussentwicklung).
- Isozonen und Abflusstypen verschneiden, so dass eine Matrix (Fläche je Isozone und Abflusstyp) resultiert.

Arbeitsschritte Abflussbestimmung:

- **Je Teilgebiet** der Matrix werden zunächst folgende Werte ermittelt

- Für die Dauer t_c (min) wird WSV_{corr} unter Berücksichtigung der Infiltration berechnet

$$(1) \text{WSV}_{corr} = \text{WSV}_{60\text{min}} * (0.5 + t_c/120\text{min})$$

- Der effektive Niederschlag N_{eff} während des Ereignisses der Dauer t_c berechnet

$$(2) N_{eff} = (P - 0.2 \text{WSV}_{corr})^2 / (P + 0.8 \text{WSV}_{corr})$$

- Aus der Differenz von gefallenem Niederschlag und effektivem Niederschlag ergibt sich je Teilgebiet der während eines Ereignisses infiltrierende Niederschlag (mm)

$$(3) N_{infilt,total} = N_{total} - N_{eff}$$

- Die Infiltrationsrate ist während des Ereignisses nicht konstant, sondern nimmt mit der Zeit exponentiell von anfänglich f_0 auf f_c (unter gesättigten Verhältnissen) ab.

Die bis zu einem definierten Zeitpunkt t total infiltrierende Niederschlagshöhe (mm) ergibt sich über

$$(4) N_{infilt}(t) = f_c * t + ((f_0 - f_c)/r) * (1 - e^{-rt})$$

Die Rezessionskonstante r (1/s) und das Verhältnis von f_0/f_c lassen sich aus nebenstehender Tabelle entnehmen.

Für $t = t_c$ entspricht $N_{infilt}(t_c) = N_{infilt,total}$ und aus Gl. 4 können f_c und f_0 ermittelt werden.

| WSV [mm] | f_0/f_c | r |
|-----------|-----------|------|
| ≥ 30 | 1 | - |
| 25 – 30 | 2 | 0.02 |
| 20 – 25 | 5 | 0.04 |
| ≤ 20 | 8 | 0.06 |

- Mit Formel (4) lässt sich für jeden Zeitschritt und jedes Teilgebiet/Isozone die infiltrierende Niederschlagshöhe ermitteln. Sollte in einem Zeitschritt rechnerisch mehr infiltrieren können, als tatsächlich an Regen fällt, wird die Differenz auf den nächsten Zeitschritt übertragen.

Zwischenergebnis:

- Für jede Isozone/Teilgebiet liegt **für jeden Zeitschritt** ein Ergebnis über den jeweils effektiven Niederschlag vor. Für jede Isozone kann daraus für jeden Zeitschritt die Abflussbildung ermittelt werden.
- Der je Zeitschritt zum Gebietsauslass gelangende Abfluss $W(t)$ ergibt sich über die lineare Translation der von oben einmündenden Abflüsse W_{iso} der einzelnen Isozonen. Konkret bedeutet dies z.B. bei $n = 4$ Isozonen (mit Nummerierung von unten nach oben):

- $W(t=1) = W_{iso,1}(t=1)$
- $W(t=2) = W_{iso,1}(t=2) + W_{iso,2}(t=1)$
- $W(t=3) = W_{iso,1}(t=3) + W_{iso,2}(t=2) + W_{iso,3}(t=1)$
- $W(t=4) = W_{iso,1}(t=4) + W_{iso,2}(t=3) + W_{iso,3}(t=2) + W_{iso,4}(t=1)$

Wichtig: $W(t)$ stellt ein Zwischenergebnis dar. Der Wert durchläuft am Gebietsauslass noch einen linearen Speicher (siehe nächste Folie) und wird dort gedämpft.

* vgl. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/hydrologie/uw-umwelt-wissen/hochwasserabschaetzungsuebersichtseinzugsgebietenpraxishilf.pdf.download.pdf/hochwasserabschaetzungsuebersichtseinzugsgebietenpraxishilf.pdf> und dort enthalten Literaturverweise

Verfahren nach Clark-WSL*

Wichtig:

Der zum Gebietsauslass gelangende Abfluss $W(t)$ durchläuft noch einen linearen Speicher:

- Die Speicherkonstante K ergibt sich zu
$$K = 2.25 * WSV_{60\text{min}} - 18.5 \quad (\text{WSV}_{60\text{min}} \text{ ist hierbei ein Mittelwert des Gesamtgebiets})$$
- Der lineare Speicher befindet sich am Gebietsausgang. Für die Bestimmung von K ist ein gemittelter WSV anzusetzen.
- Der Abfluss Q wird anhand von W und der linearen Speicherwirkung mit dem Schema nach Muskingum berechnet:

A.3 Das Rechenschema nach Muskingum

Für die numerische Berechnung des Abflusses $Q(t)$ aus dem linearen Speicher wählte Clark den Übergang zu diskreten Zeitschritten. Hierzu bietet sich das Verfahren von Muskingum an:

$$Q_t = c_1 \cdot W_t + c_2 \cdot W_{t-\Delta t} + c_3 \cdot Q_{t-\Delta t} \quad (\text{A.7})$$

mit den Konstanten

$$c_1 = c_2 = \left(\frac{\Delta t}{2K + \Delta t} \right) \quad c_3 = \left(\frac{2K - \Delta t}{2K + \Delta t} \right) \quad (\text{A.8})$$

* vgl. <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/hydrologie/uw-umweltwissen/hochwasserabschaetzungschweizerischeneinzugsgebietenpraxishilf.pdf.download.pdf/hochwasserabschaetzungschweizerischeneinzugsgebietenpraxishilf.pdf> und dort enthalten Literaturverweise

D Prozessbeurteilungsschema für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses

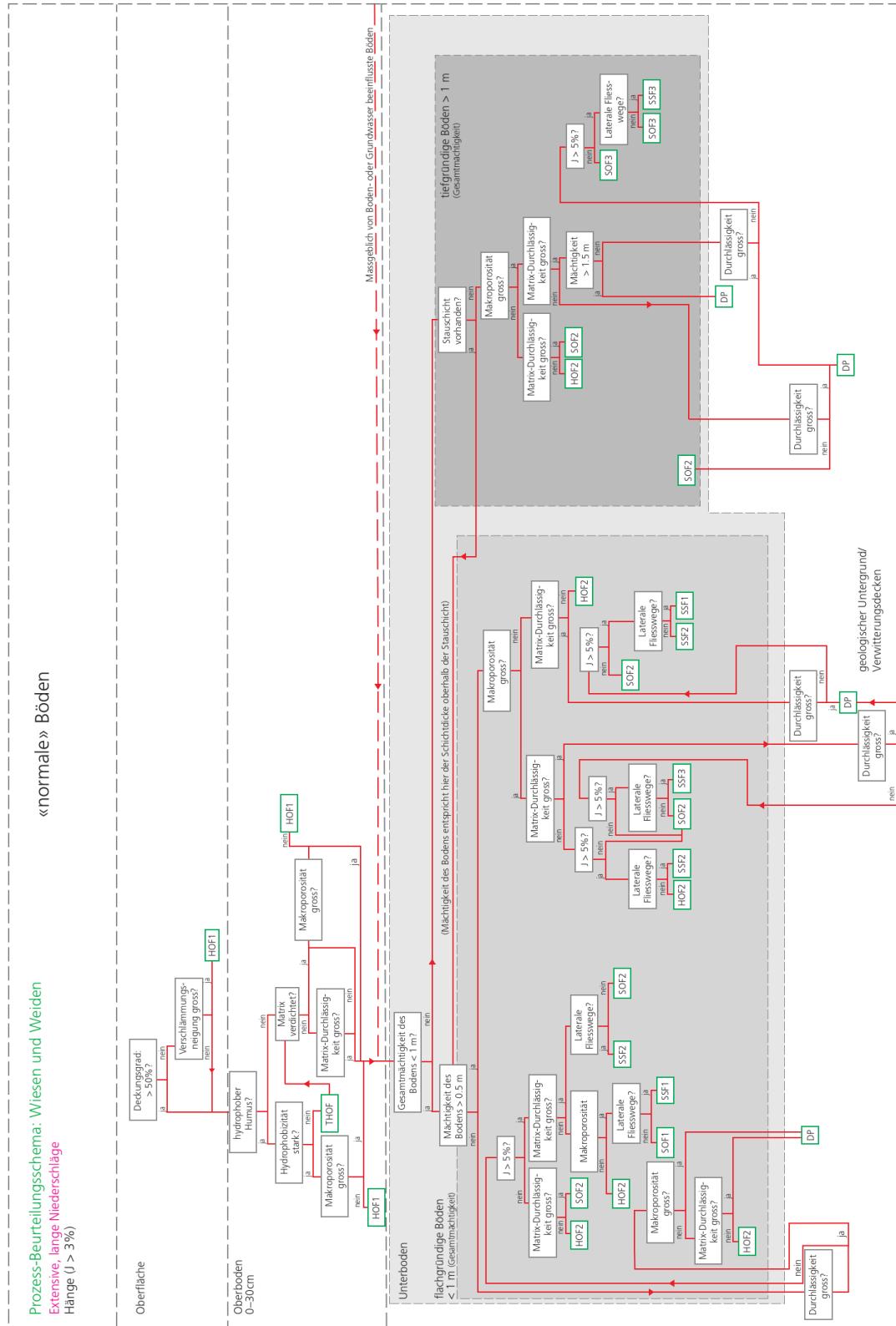
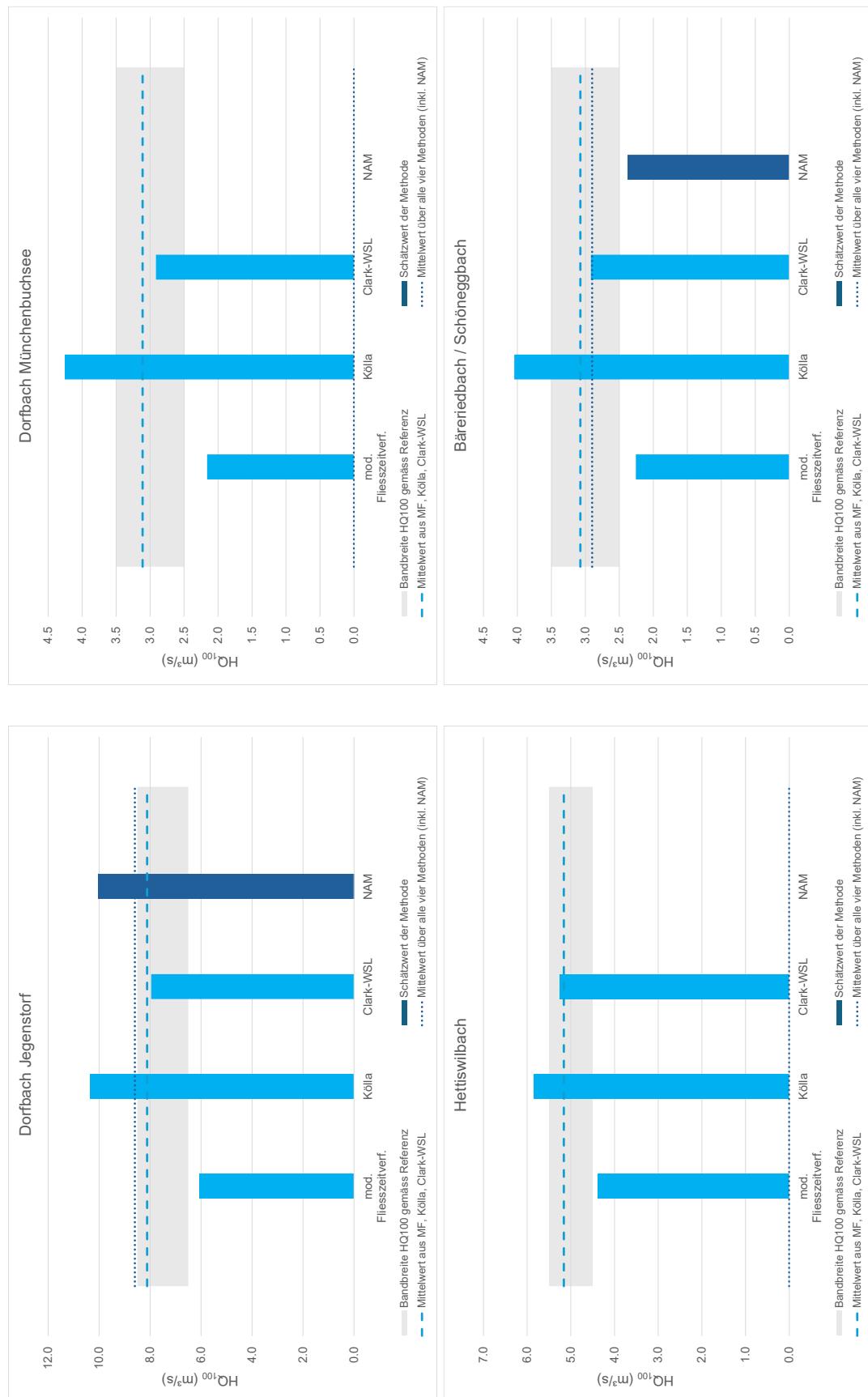
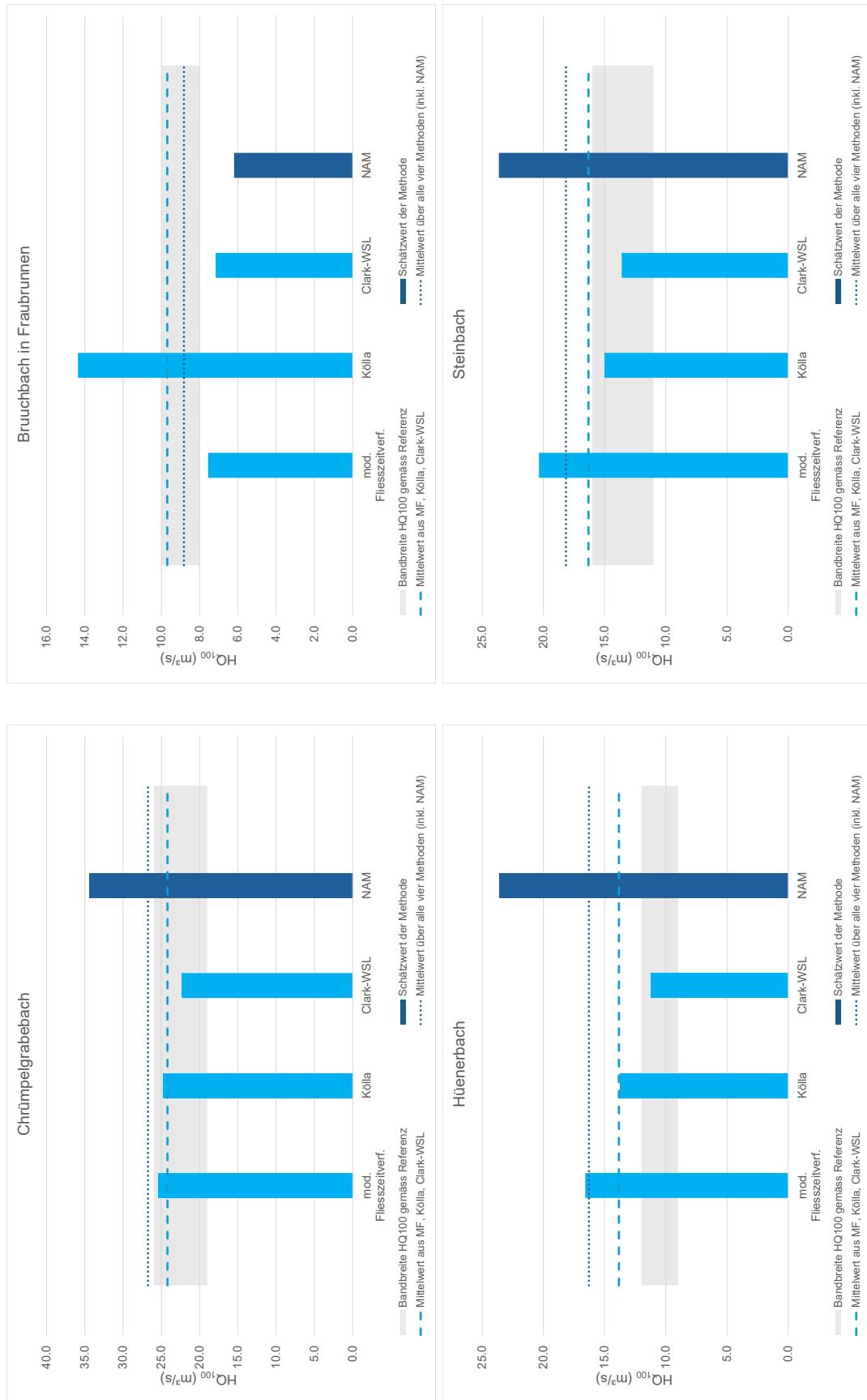


Abb. 1: Prozessbeurteilungsschema für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses unter Berücksichtigung der Schlüsselstellen (Grafik aus [4]). Die Beurteilung der einzelnen Kriterien geht auf Scherrer (2001) zurück.

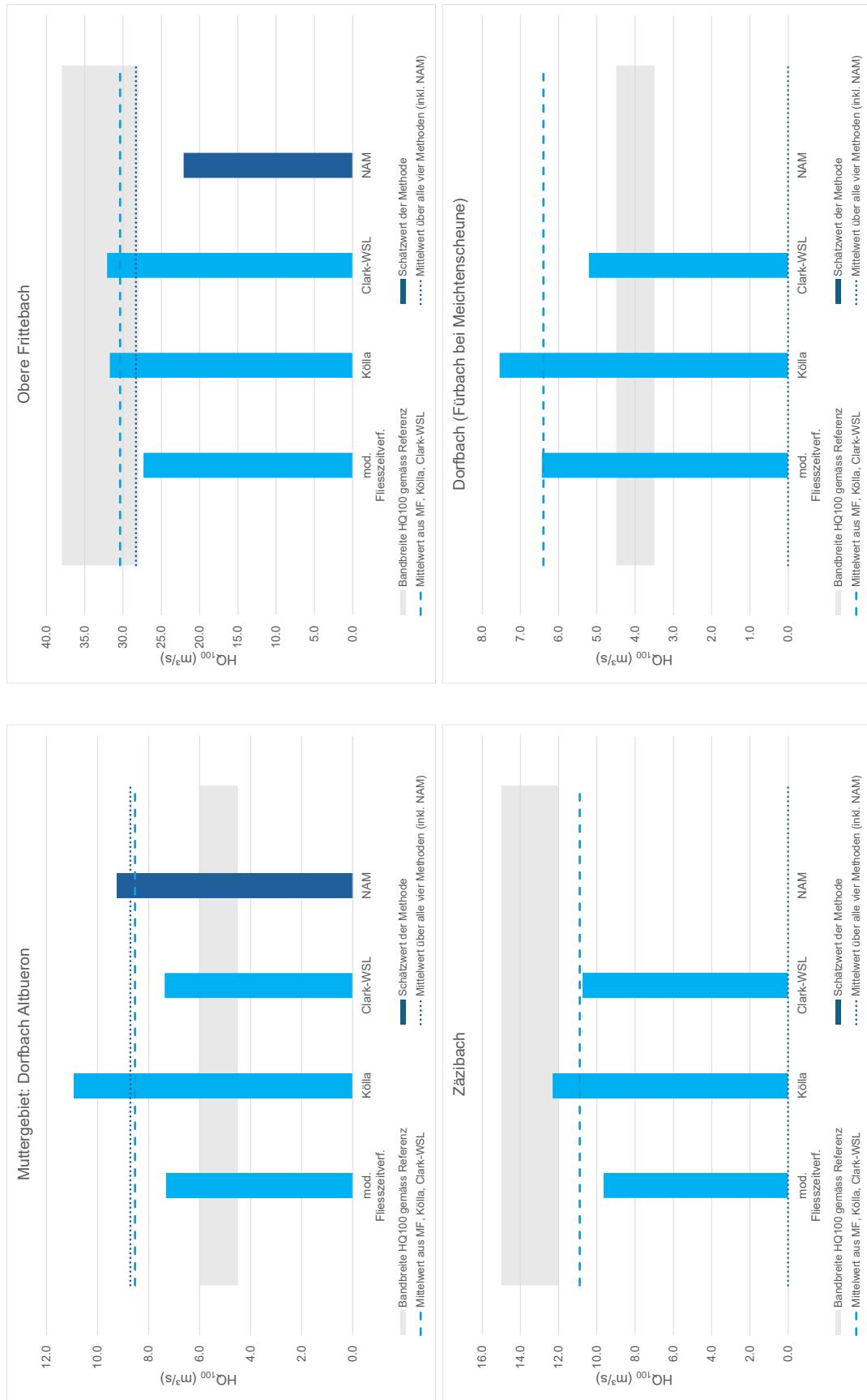
E Plausibilisierung der Methoden mit Vergleichsrechnungen



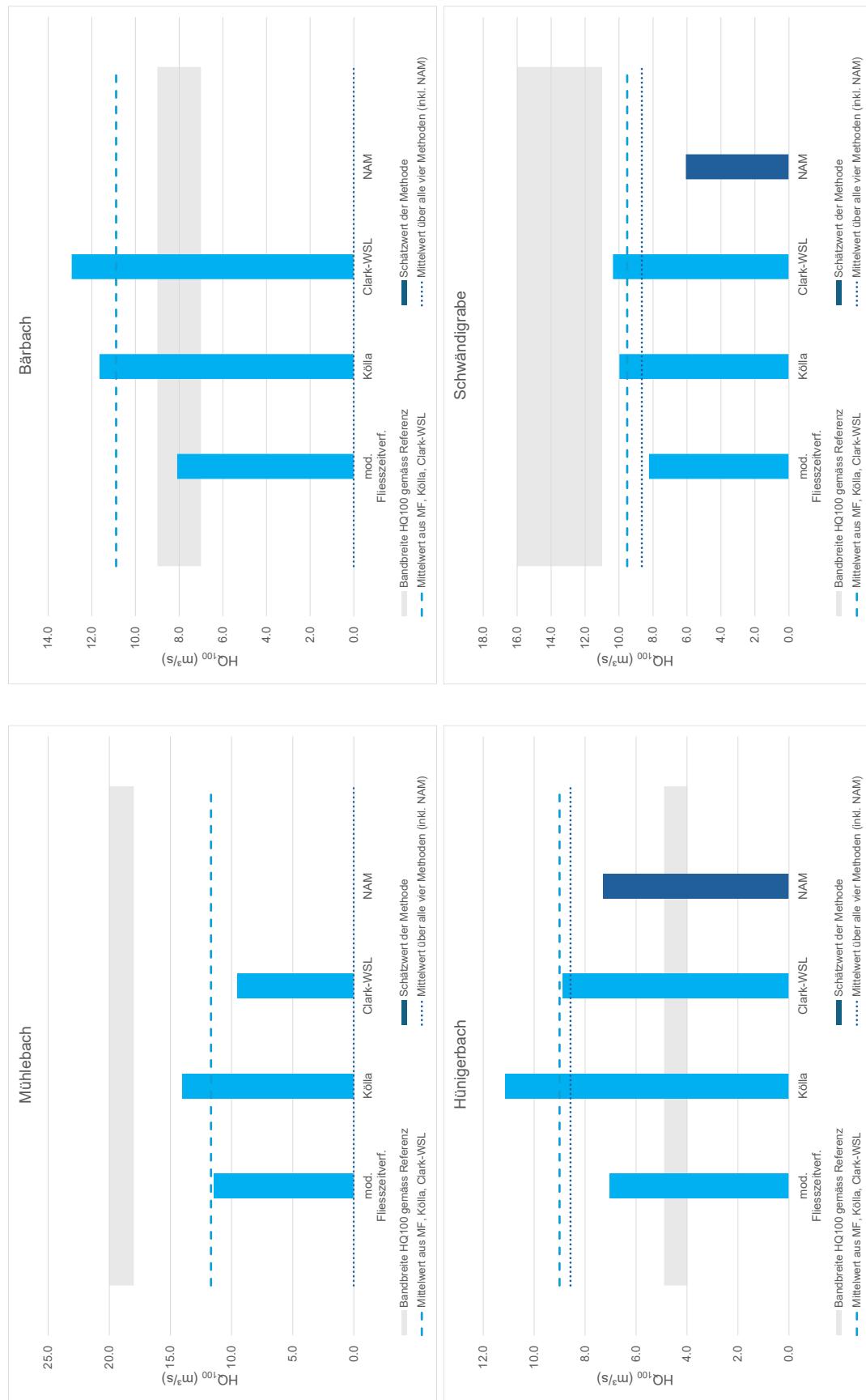
Anhang E



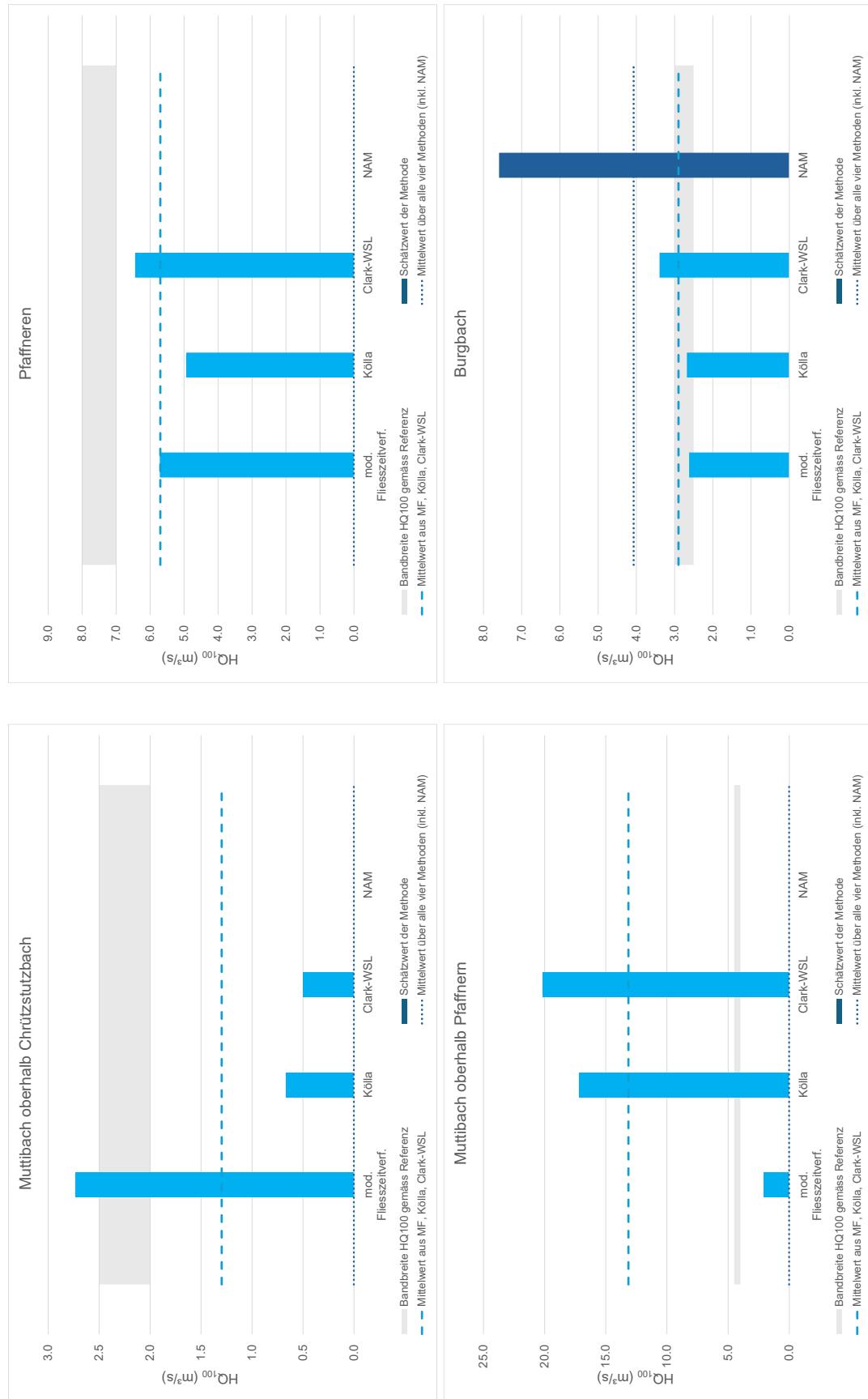
Anhang E



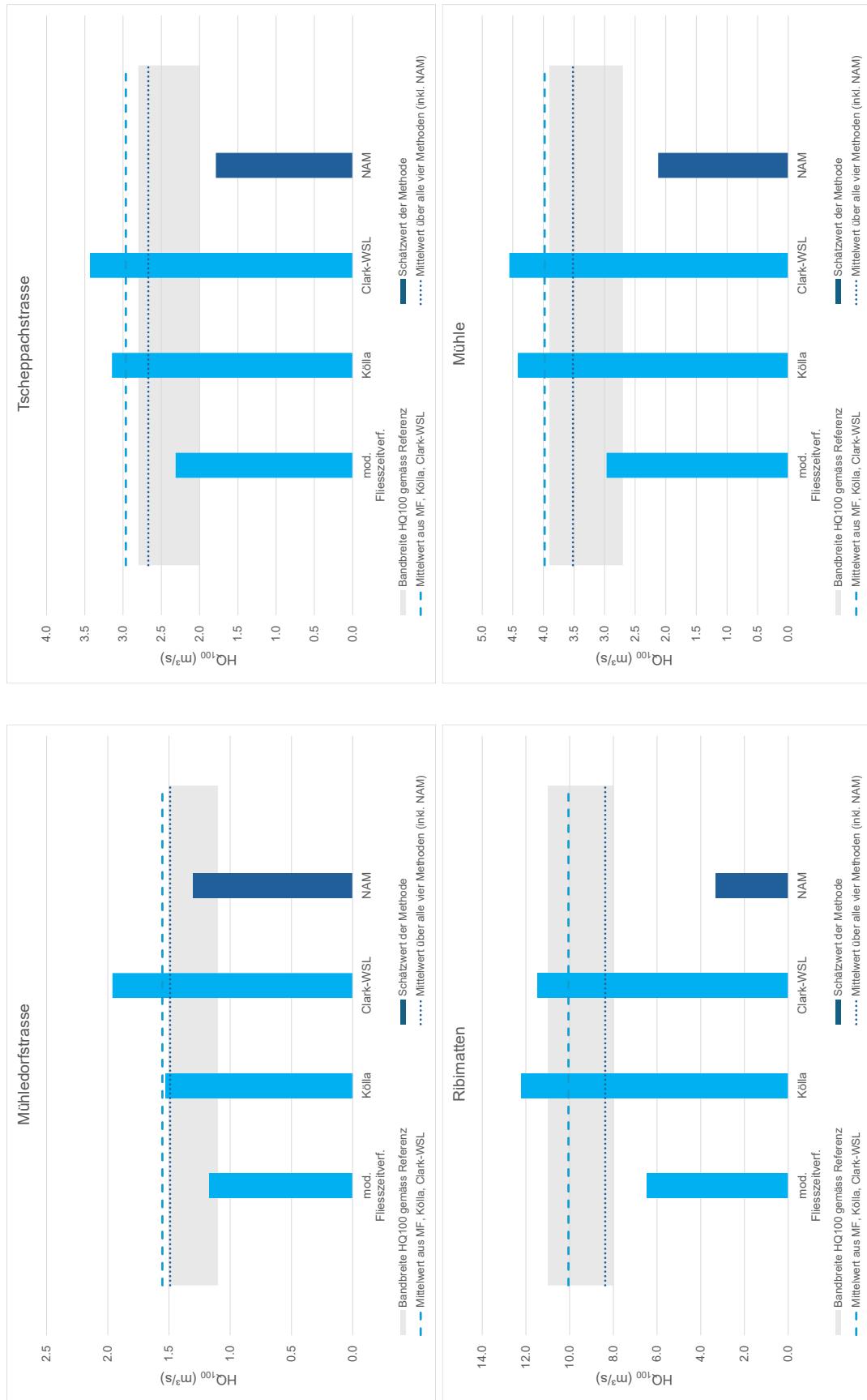
Anhang E



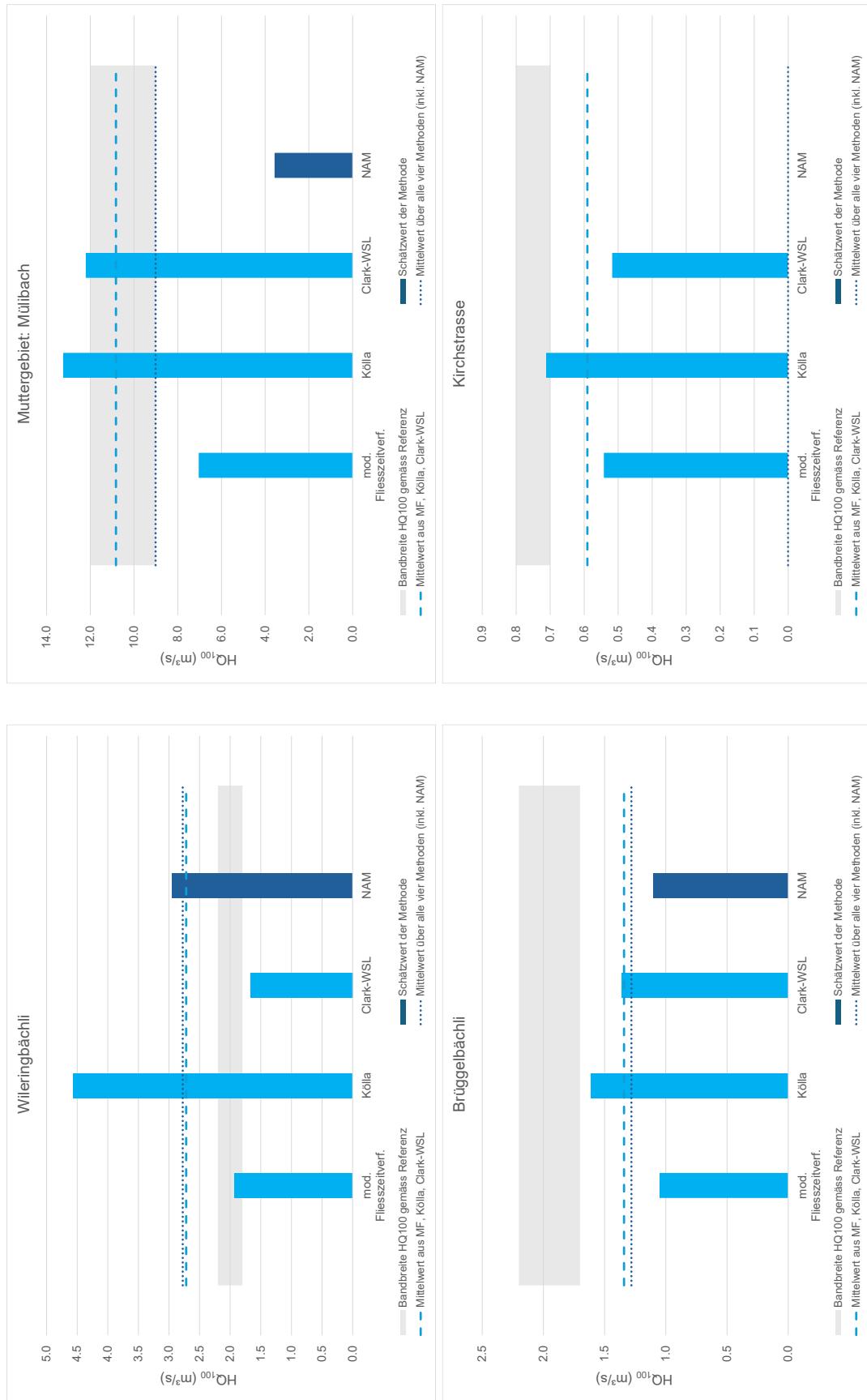
Anhang E



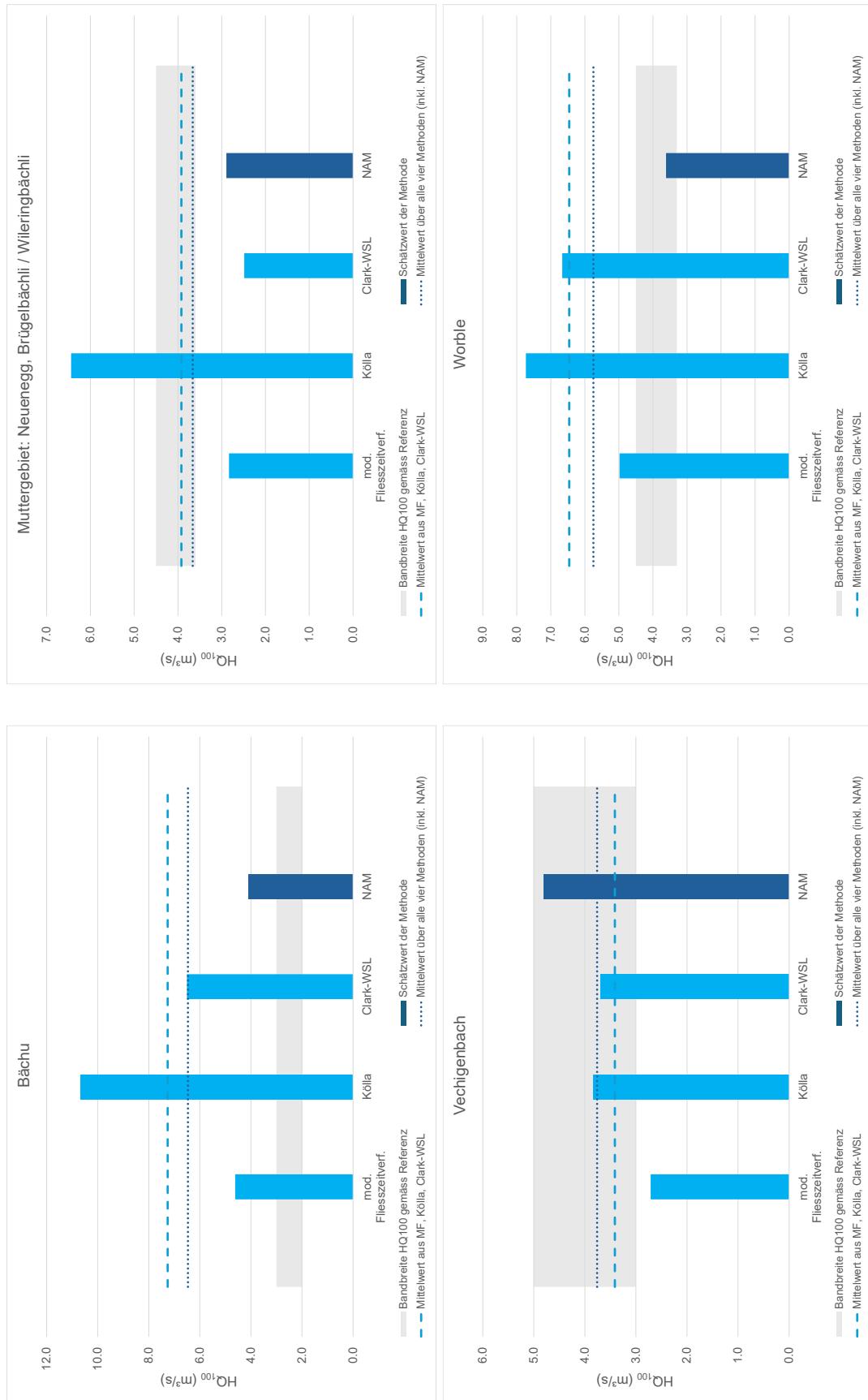
Anhang E



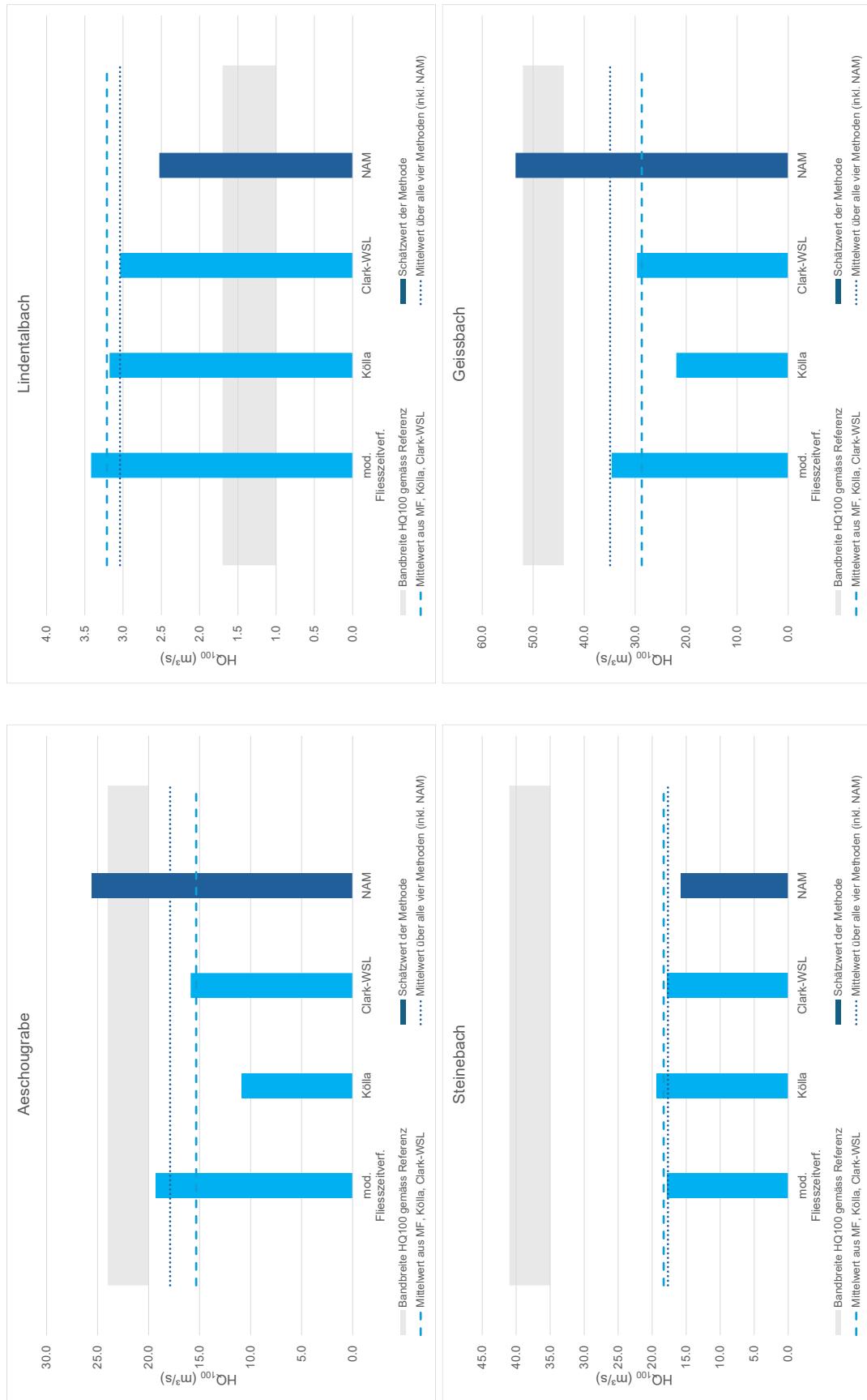
Anhang E



Anhang E



Anhang E



Anhang E

