

Beiträge zur Hydrologie der Schweiz
Nr. 39

Herausgegeben von der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie
(SGHL) und der Schweizerischen Hydrologischen Kommission (CHy)

Daniel Viviroli und Rolf Weingartner

**Prozessbasierte
Hochwasserabschätzung für mesoskalige
Einzugsgebiete**

Grundlagen und Interpretationshilfe zum Verfahren PREVAH-regHQ

Bern, Juni 2012

Hintergrund

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Projektes „Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz – Grundlagenbereitstellung für die Hochwasserabschätzung“ zusammen, welches im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) ausgearbeitet wurde. Das Projekt wurde auf Seiten des BAFU von Prof. Dr. Manfred Spreafico und Dr. Dominique Bérod begleitet. Für die Bereitstellung umfangreicher Messdaten danken wir dem BAFU, den zuständigen Ämtern der Kantone sowie dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz).

Daten

Die im Bericht beschriebenen Daten und Resultate können unter der folgenden Adresse bezogen werden: <http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/PREVAHregHQ.html>. Weitere Informationen erhält man bei info@bafu.admin.ch.

Druck

Publikation Digital AG

Bezug des Bandes

Hydrologische Kommission (CHy) der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (scnat)
c/o Geographisches Institut der Universität Bern
Hallerstrasse 12, 3012 Bern
<http://chy.scnatweb.ch>

Zitiervorschlag

Viviroli, Daniel; Weingartner, Rolf (2012): Prozessbasierte Hochwasserabschätzung für mesoskalige Einzugsgebiete – Grundlagen und Interpretationshilfe zum Verfahren PREVAH-regHQ. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 39, Bern.

ISBN 978-3-033-03497-6

ISSN 1421-1130

© SGHL und CHy

Vorwort

Vor 27 Jahren, im Jahr 1985, erschien in dieser Reihe der Band Nr. 33. Mit der Thematik „Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung“ widmete er sich einer zentralen hydrologischen Fragestellung, die eine hohe Praxisrelevanz besitzt. Bei der Ausarbeitung der Abschätzverfahren für den Mittel-, Hoch- und Niederwasserbereich sahen sich die Autorin und die Autoren der 1985er Publikation mit vielen Einschränkungen konfrontiert: Es standen keine flächendeckenden, räumlich hochaufgelösten Rauminformationen zur Verfügung, die Länge der hydrologischen Messreihen war eher kurz (auf jeden Fall 27 Jahre kürzer als heute) und die limitierten Computerkapazitäten schränkten den Einsatz deterministischer hydrologischer Modelle stark ein.

Im Jahr 2003 startete die „International Association of Hydrological Sciences“ (IAHS) die sog. PUB-Initiative (PUB: Predictions in Ungauged Basins). In einer weltweit breit abgestützten Bewegung sollen die Grundlagen zur Abschätzung von Abflüssen verbessert werden. Ende 2012 wird die PUB-Dekade mit einer Konferenz in den Niederlanden abgeschlossen. Die PUB-Initiative belegt die nach wie vor hervorragende Bedeutung der Abschätzung hydrologischer Kenngrössen in Gebieten ohne Abflussmessungen. Die vorliegende Publikation ist in diesen Kontext einzuordnen. Es geht darum, in allen mesoskaligen Einzugsgebieten der Alpennordseite zeitlich hochaufgelöste, langjährige Abflussganglinien bereitzustellen, von denen dann beliebige Abflusskennwerte ableitbar sind. Um dieses Ziel zu erreichen, musste ein deterministisches Konzeptmodell, dessen Parameter im Normalfall über Niederschlags- und Abflussmessungen geeicht werden, regionalisierbar gemacht werden, d.h., auf Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen zugeschnitten werden, in denen eine solche Eichung nicht möglich ist. Dieses Ziel konnte nur erreicht werden, weil sich die Voraussetzungen im Vergleich zu 1985 signifikant verbessert haben.

Obwohl in den letzten Jahren also wesentliche Fortschritte erzielt wurden, besteht in einigen Bereichen immer noch ein grosser Nachholbedarf, wie die folgenden Beispiele belegen: räumlich zu wenig koordinierte hydrologische und meteorologische Messnetze, Mangel an langen, anthropogen weitgehend unbeeinflussten Messreihen im Alpenraum und auf der Alpensüdseite oder die nur beschränkte Anwendbarkeit der heute verfügbaren bodenhydrologischen Grundlagen.

Kern der vorliegenden Publikation bildet die Dissertation von Daniel Viviroli, in der die methodischen Grundlagen erarbeitet wurden und die 2007 in der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) abgeschlossen wurde. Dank eines namhaften Forschungsbeitrags des Bundesamts für Umwelt (BAFU) war es dann möglich, die Methodik auf der Alpennordseite breit anzuwenden, so dass nun Ganglinien für rund 450 mesoskalige Einzugsgebiete vorliegen. Aufgrund der komplexen Datensituation auf der Alpensüdseite und im Wallis beschränkt sich die vorliegende Publikation auf die nordalpinen Einzugsgebiete. Untersuchungen zur Schliessung dieser Lücken sind am GIUB im Gange.

Ich danke dem BAFU für die Unterstützung dieses Forschungsprojektes und der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und der Hydrologischen Kommission (CHy) für die Möglichkeit, die Ergebnisse in den Beiträgen zur Hydrologie der Schweiz zu veröffentlichen.

Bern, im Juni 2012
Rolf Weingartner

Avant-propos

Il y a 27 ans, en 1985, paraissait le volume n° 33 de cette série. Il était consacré à l'estimation des débits dans des cours d'eau sans mesure directe, une question hydrologique centrale présentant une application pratique très importante. Pour parvenir à développer des méthodes d'estimation des débits moyens, de crue et d'étiage, les auteurs de cette publication durent relever de nombreux défis : ils ne disposaient d'aucune information spatiale à haute résolution, les séries de mesures hydrologiques étaient relativement courtes (27 ans de moins qu'aujourd'hui en tous les cas) et les faibles capacités de leurs ordinateurs limitaient fortement le recours des modèles hydrologiques déterministes.

En 2003, l'Association internationale des sciences hydrologiques (AISH) lançait l'Initiative PUB (Predictions in Ungauged Basins). Il s'agissait, dans un mouvement largement étayé dans le monde entier, d'améliorer les connaissances en matière d'estimation des débits. La décennie PUB sera clôturée fin 2012 par une conférence en Hollande. Cette initiative prouve bien que l'estimation des paramètres hydrologiques dans des bassins sans mesure demeure primordiale. La présente publication est à placer dans ce contexte. Elle vise à fournir pour tous les bassins versants de taille moyenne du nord des Alpes des hydrogrammes sur plusieurs années, à une haute résolution temporelle, pouvant être utilisés pour dériver n'importe quelle caractéristique hydrologique. Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont dû trouver un moyen de régionaliser un modèle conceptuel déterministe, dont les paramètres sont normalement étalonnés à l'aide de mesures pluviométriques et hydrométriques, afin de pouvoir l'appliquer aux bassins versants sans mesure hydrométrique, ne permettant pas ce type d'étalonnage. S'ils ont réussi, c'est uniquement parce que les conditions se sont considérablement améliorées par rapport à 1985.

Bien que plusieurs limitations aient été surmontées ces dernières années, un certain retard reste à combler dans plusieurs domaines : par exemple, la coordination géographique des réseaux météorologiques et hydrologiques est toujours insuffisante, on manque encore de longues séries de données, qui ne sont pas altérées par des activités humaines, pour la région alpine et le sud des Alpes et les informations existantes sur l'hydrologie du sol sont difficilement utilisables.

La présente publication s'appuie sur la thèse de Daniel Viviroli (2007), membre du Groupe pour l'hydrologie de l'Institut de géographie de l'Université de Berne (GIUB), qui a élaboré les bases méthodologiques. Grâce à une contribution financière notable de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), la méthode a pu être largement appliquée au nord des Alpes, de sorte que l'on dispose désormais d'hydrogrammes pour environ 450 bassins versants de taille moyenne. Vu le manque de données suffisantes pour le sud des Alpes et le Valais, la présente publication se limite aux bassins versants du nord des Alpes. Le GIUB est cependant en train de mener des recherches visant à combler ces lacunes.

Nous remercions l'OFEV pour le soutien apporté à ce projet de recherche ainsi que la Société suisse d'hydrologie et de limnologie (SSHL) et la Commission suisse d'hydrologie (CHy), qui nous ont permis de publier nos résultats dans la série « Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse ».

Berne, juin 2012
Rolf Weingartner

Kurzfassung

Die Abschätzung seltener Spitzenabflüsse für ungemessene Gebiete hat eine grosse praktische Bedeutung für den modernen, integralen Hochwasserschutz. Gleichzeitig stellen solche Abschätzungen eine grosse methodische Herausforderung dar und sind mit grossen Unsicherheiten verbunden. Während in der Hochwasserabschätzung bisher vor allem regionalhydrologische Verfahren zum Einsatz kamen, ist es heute dank besserer Datenverfügbarkeit, gesteigerter Datenverarbeitungskapazität sowie methodischen Weiterentwicklungen möglich, neue, stärker prozessorientierte Ansätze der praktischen Anwendung zugänglich zu machen.

In diesem Bericht werden die Resultate eines solchen neuen prozessorientierten Verfahrens vorgestellt. Das Verfahren trägt den Namen PREVAH-regHQ und wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) entwickelt. Es basiert auf drei entscheidenden Schritten: Als erstes werden die freien Parameter des hydrologischen Modellsystems PREVAH mittels Regionalisierungsverfahren für das zu untersuchende Einzugsgebiet geschätzt, was die Anwendung in ungemessenen Gebieten ermöglicht. Als zweites wird mit diesen regionalisierten Parametern eine kontinuierliche Ganglinie über mindestens 20 Jahre Dauer in stündlicher Auflösung simuliert. Als drittes wird die simulierte Ganglinie mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet, was schliesslich zu einer Hochwasserabschätzung führt.

Weil die verwendeten Simulations- und Regionalisierungsverfahren nur von sehr erfahrenen Benutzerinnen und Benutzern vollständig angewendet werden können, wurden für das vorliegende Projekt Modellierungen und umfangreiche Auswertungen für 450 mesoskalige Einzugsgebiete des schweizerischen Rheineinzugsgebietes erstellt. Für jedes dieser Gebiete stehen der Anwenderin und dem Anwender ausführliche Informationen zur Verfügung, welche neben der eigentlichen Hochwasserabschätzung und deren Datengrundlagen auch weitere Auswertungen enthalten. Mit diesen Informationen ist nicht nur die Hochwasserabschätzung direkt durchführbar, sondern es ist zudem möglich, die Simulation und die daraus abgeleiteten Schätzergebnisse auf ihre Plausibilität zu prüfen und mit den Ergebnissen anderer Schätzverfahren oder – wo vorhanden – mit Messdaten aus benachbarten Einzugsgebieten zu vergleichen.

Die ausführliche Diskussion der Resultate belegt, dass das Modell die Gebietshydrologie gut wiedergibt, und die aus der Simulation abgeleiteten Hochwasserabschätzungen zeigen im Vergleich zu den aus der Beobachtung extrapolierten Referenzwerten lediglich eine leichte Tendenz zur Unterschätzung. Die bei der Kalibrierung an gemessenen Abflüssen erzielte Qualität der Modellresultate wird auch im Falle von geschätzten (regionalisierten) Modellparametern erreicht, wie Analysen mittels des sogenannten Jackknife-Ansatzes belegen. Bei der Schätzung eines HQ_{100} für ein ungemessenes Gebiet ist mit einem medianen Fehler von -9% zu rechnen, und in der Hälfte der Fälle ist ein Fehler von zwischen -32% bis +12% zu erwarten (Interquartilsbereich). Zudem liegt das aus der Simulation geschätzte HQ_{100} für ein als ungemessen behandeltes Gebiet in 48% der Fälle innerhalb des statistischen 90%-Vertrauensintervalls desjenigen Referenzwertes, welcher aus der Vergleichsbeobachtung geschätzt wurde. Von einer Anwendung abgeraten werden muss in kleinen Einzugsgebieten (Fläche < 25 km²) und Gebieten mit ausgeprägten Karstphänomenen (Anteil verkarstungsfähiger Gesteine > 50%).

Prozessorientierung und Transparenz des neuen Verfahrens sind wesentliche Vorteile gegenüber den etablierten regionalhydrologischen Verfahren. Die Möglichkeiten für Hochwasserabschätzungen in ungemessenen Gebieten werden durch die in diesem Bericht vorgestellten Resultate wesentlich erweitert. Den grössten Nutzen können die Anwenderinnen und Anwender indes erreichen, wenn sie mehrere Verfahren gleichzeitig anwenden und deren Resultate vergleichend beurteilen.

Für die Anwendung des Schätzverfahrens wird dem Leser empfohlen, sich zuerst mit den methodischen Grundlagen in Kapitel 2 vertraut zu machen und dann direkt zu Kapitel 7 zu springen, wo das praktische Vorgehen bei einer Abschätzung erläutert wird. In diesem Kapitel 7 finden sich dann auch Hinweise auf relevante Informationen in den Kapiteln 3 bis 6, welche zur Vertiefung der Grundlagen dienen.

Résumé

L'estimation des débits de pointe rares dans des bassins non jaugés revêt une importance pratique capitale pour la protection intégrée moderne contre les crues. En même temps ce type d'évaluation représente un véritable défi méthodologique et est lié à de profondes incertitudes. Alors que jusqu'ici on recourait principalement aux méthodes statistiques et empiriques, l'amélioration de la disponibilité et de la capacité de traitement des données ainsi que le développement des méthodes permettent désormais de proposer à l'application pratique de nouvelles approches, axées davantage sur les processus.

Ce rapport présente les résultats de l'une de ces nouvelles approches axées sur les processus. Il s'agit de la méthode PREVAH-regHQ, qui a été développée à l'Institut de géographie de l'Université de Berne (GIUB) sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Celle-ci se constitue de trois étapes fondamentales : la première consiste à estimer les paramètres libres du modèle hydrologique PREVAH pour le bassin versant à étudier à l'aide des méthodes de régionalisation, ce qui permet l'application dans des sites non jaugés. Les paramètres régionalisés permettent dans un deuxième temps de simuler un hydrogramme continu sur une période d'au moins 20 ans avec une résolution horaire. En troisième lieu, l'hydrogramme simulé fait l'objet d'une statistique conventionnelle des valeurs extrêmes, ce qui aboutit finalement à une estimation des crues.

Pour le présent projet, puisque seuls des utilisateurs très expérimentés sont capables d'appliquer en entier les méthodes de simulation et de régionalisation proposées, des modélisations et des analyses approfondies ont été effectuées pour 450 bassins versants de taille moyenne situés dans la partie suisse du bassin du Rhin. Des informations détaillées, comprenant en plus de l'estimation des crues proprement dite et de ses données de base d'autres analyses étendues relatives à la simulation, sont ainsi à disposition pour chacun de ces 450 bassins. Non seulement ces informations fournissent directement l'estimation des crues, mais elles permettent également de tester la plausibilité de la simulation et des estimations qui en découlent et de les comparer aux résultats obtenus avec d'autres méthodes d'estimation ainsi que, le cas échéant, aux données mesurées dans les bassins versants voisins.

La discussion détaillée des résultats atteste que le modèle reproduit bien l'hydrologie régionale et que les estimations dérivées de la simulation tendent seulement à être légèrement inférieures aux valeurs de référence extrapolées à partir des observations. Des analyses effectuées à l'aide de ce que l'on appelle la méthode du Jackknife démontrent que la qualité des résultats du modèle obtenue grâce à un étalonnage sur des débits mesurés est également atteinte lorsque les paramètres du modèle ont été estimés (régionalisés). Lorsqu'on estime un HQ_{100} pour un bassin non jaugé, il faut s'attendre à une erreur médiane de -9 % et, dans la moitié des cas, à une erreur allant de -32 % à +12 % (intervalle interquartile). En outre, le HQ_{100} estimé sur la base de la simulation pour un bassin considéré comme non jaugé se situe dans 48 % des cas dans l'intervalle de confiance à 90 % de la valeur de référence qui a été estimée à partir des observations. Il est déconseillé d'appliquer cette méthode dans les petits bassins versants (surface < 25 km²) de même que dans les zones marquées par les phénomènes karstiques (part des roches karstifiables > 50 %).

Par rapport aux méthodes courantes, cette nouvelle approche présente le grand avantage d'être axée sur les processus et d'être transparente. Les résultats présentés dans ce rapport élargissent sensiblement les possibilités de l'estimation des crues dans les bassins non jaugés. L'utilisateur en tirera le plus grand profit en recourant en parallèle aux méthodes diverses et en comparant les résultats.

On recommande au lecteur souhaitant appliquer la méthode d'estimation de se familiariser tout d'abord avec les bases méthodologiques du chapitre 2, puis de sauter directement au chapitre 7, qui explique la procédure pratique à suivre pour effectuer une estimation. Ce même chapitre renvoie par ailleurs aux informations importantes des chapitres 3 à 6, dans lesquels les bases sont approfondies.

Summary

Flood estimations for ungauged basins are of high practical value for a modern integral flood protection strategy. At the same time, any flood estimation task is still a considerable challenge and subject to large uncertainties. So far, the main approaches used for flood estimation in ungauged catchments were statistical and empirical procedures. Thanks to higher availability of data, increased capacities to process these data and methodological developments, however, it is possible today to make use of new and more process-oriented approaches for practical use.

In this report, the results of such a new process-oriented procedure are presented. The procedure is called PREVAH-regHQ and has been developed at the Institute of Geography, University of Bern (GIUB) on behalf of the Federal Office for the Environment (FOEN) and is based on three steps: First, the tuneable parameters of the hydrological modelling system PREVAH are estimated using a regionalisation procedure; with this step, application of the model to ungauged basins is made possible. Second, these estimated (regionalised) parameter sets are used for simulation a continuous hydrograph of a minimum duration of 20 years at hourly resolution. Third, the simulated hydrograph is analysed by means of conventional extreme value statistics which finally leads to flood estimation for an ungauged catchment.

Since the simulation and regionalisation procedures involved are only accessible to very experienced users, the entire procedure has been implemented for 450 meso-scale catchments in the Swiss part of the River Rhine basin. For each of these 450 catchments, the end user is provided with extensive simulation data and analyses which do not only allow for flood estimation but also verifying the plausibility of the underlying simulation. In addition, flood estimations from other procedures and – where available – from observation in neighbouring catchments are readily available and can be used to assess the flood estimation results of the approach presented in this report.

A comprehensive analysis of the results obtained shows that the model is able to reproduce the hydrological characteristics of the basins considered, and the flood estimations derived from the simulations show only a slight tendency to underestimating the reference values derived from observations. The quality of the simulations obtained from calibrating the model for gauged sites is preserved when regionalised model parameters are applied. The median error for estimation of a 100-yr return flood (HQ_{100}) in an ungauged basin is -9%, and for half of the cases, an error of between -32% and +12% can be expected (interquartile range). Moreover, the HQ_{100} estimated from simulation with regionalised model parameters lies within the 90% confidence interval of the reference HQ_{100} estimated from observations in 48% of cases. Application of the estimation procedure is not recommended for small catchments (drainage area $< 25 \text{ km}^2$) and catchments with pronounced influence of karst phenomena (share of karstic rock $> 50\%$).

The major advantages of the procedure presented lie in its process-oriented nature and the transparency of its results: the basis for flood estimation in ungauged catchments is significantly extended and complemented with this new approach. The highest benefit, however, is achieved by using different approaches side by side and comparatively assessing the respective results.

For a practical application of the estimation procedure, the reader is advised to acquaint himself with the methods presented in Chapter 2 and then proceed directly to Chapter 7 where the actual estimation procedure is explained. Chapter 7 again contains cross-references to relevant background information in Chapters 3 to 6 which go further into the details of the methods used.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Avant-propos	iv
Kurzfassung	v
Résumé	vi
Summary	vii
 1 Einleitung	 1
 2 Methodische Grundlagen	 3
2.1 Kontinuierliche Langzeitsimulation	3
2.2 Das hydrologische Modellsystem PREVAH	4
2.3 Anwendung in ungemessenen Gebieten	5
2.3.1 Methodik	5
2.3.2 Erste Prüfung der Modellgüte	6
2.4 Definition der Einzugsgebiete	7
2.5 Auswahl der Gebiete und räumliche Abdeckung	9
 3 Bereitstellung des meteorologischen Modellinputs	 13
3.1 Überblick und Stationsauswahl	13
3.2 Vorgenommene Anpassungen	14
3.2.1 Bibere	14
3.2.2 Jogne	14
3.2.3 Kander	15
3.2.4 Minster und Sihl	15
3.2.5 Sernft	15
3.2.6 Surb	15
3.2.7 Erfolgreiche Anpassungen	16
3.3 Güte des unkorrigierten Niederschlages	17
3.4 Ergänzende Hinweise zum Interpolations- und Simulationszeitraum	19
 4 Güte von Simulation und Hochwasserabschätzung	 21
4.1 Niederschlag und Abfluss	21
4.1.1 Niederschlag	21
4.1.2 Abfluss	22

4.2	Hochwasserabschätzung	25
4.2.1	Beurteilung anhand beobachteter Daten	25
4.2.2	Vergleich mit HQx_meso_CH	28
4.2.3	Beurteilung anhand von Hüllkurven	29
5	Ergebnisse für mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz (Resultatblätter)	35
5.1	Überblick pro Flussgebiet	35
5.1.1	Kennzahlen des Abflusses	35
5.1.2	Einordnung in das Verfahren GIUB'96(FN)	37
5.1.3	Mittlere jährliche Niederschlagswerte nach Höhenzone	38
5.1.4	Verwendete freie Modellparameter	40
5.2	Resultate für die einzelnen Einzugsgebiete	41
5.2.1	Abflussganglinie und Gütemasse	42
5.2.2	Hochwasserabschätzungen	43
5.2.3	Abflussstatistik und Jahreshochwasser	45
6	Einschränkungen und Hinweise	47
6.1	Grösse des Einzugsgebietes	47
6.2	Karst und weitere Besonderheiten	48
6.3	Extrapolationszeitraum	49
6.4	Die Rolle gemessener Gebiete	49
6.5	Anthropogene Beeinflussungen	50
7	Vorgehen bei einer Abschätzung	53
8	Ausblick	57
	Literaturverzeichnis	59
	Anhang A: Lage und Eigenschaften der 450 modellierten mesoskaligen Einzugsgebiete	63
	Anhang B: Übersichtsgraphiken für die 54 modellierten Flusseinzugsgebiete	73

1 Einleitung

Hochwasser und Überschwemmungen haben bedeutende Auswirkungen auf Mensch und Gesellschaft: In der Schweiz entstanden in den Jahren 1972–2007 durch diese Prozesse Schäden von rund 13 Milliarden Franken; 46 Menschen kamen ums Leben (*Hilker et al.*, 2008).

Ein absoluter Schutz vor Hochwassergefahren ist aus ökonomischer Sicht nicht möglich und aus ökologischen Gründen nicht wünschbar. Die aktuelle Strategie des Bundes versteht sich deshalb nicht als wasserbauliche „Gefahrenabwehr“, sie setzt vielmehr auf raumplanerische Massnahmen, Differenzierung der Schutzziele und Begrenzung des verbleibenden Risikos (*BWG*, 2001; *Bezzola et al.*, 2008). Diese Strategie setzt hohe Ansprüche an die hydrologischen Bemessungsgrundlagen, denn sie verlangt nach zuverlässigen Abschätzungen von Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperioden insbesondere auch an Stellen ohne Abflussbeobachtungen.

Zur Bereitstellung dieser Bemessungsgrundlagen steht bereits eine Reihe von breit abgestützten und für die schweizerische Praxis relevanten regionalhydrologischen Verfahren zur Verfügung (*Spreafico et al.*, 2003). Diese Verfahren sind im Programmpaket HQx_meso_CH (*Barben*, 2003) zusammengefasst und über eine sogenannte Praxishilfe (*Spreafico et al.*, 2003) gut zugänglich. Gemeinsam ist diesen Verfahren die alleinige Ausrichtung auf den Spitzenabfluss sowie die höchstens beschränkt vorhandene kausale Beziehung zu hydrologischen Prozessen. Um zu umfassenderen Bemessungsgrundlagen zu gelangen, sind jedoch Ansätze gefragt, welche die massgebenden Prozesse im Einzugsgebiet miteinbeziehen. Genau hier setzt das im vorliegenden Bericht vorgestellte Verfahren PREVAH-regHQ an. Es wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) entwickelt und basiert auf dem konzeptuellen, prozessorientierten, deterministischen hydrologischen Modell PREVAH, mit dem langjährige kontinuierliche Abflussganglinien simuliert werden. Diese werden anschliessend hochwasserstatistisch ausgewertet. Das Verfahren PREVAH-regHQ wurde auf mesoskalige Einzugsgebiete im schweizerischen Teil des Rheineinzugsgebietes angewendet. Da die meisten dieser Einzugsgebiete über keine Abflussmessungen verfügen, mussten die Modellparameter mittels Regionalisierung geschätzt werden. Die Bezeichnung PREVAH-regHQ leitet sich aus dem zugrundeliegenden hydrologischen Modell (PREVAH), der Regionalisierung („reg“) und der Ausrichtung auf Hochwasser („HQ“) ab.

Das neue Verfahren soll die bisherigen Ansätze ergänzen. Die Erfahrungen mit HQx_meso_CH haben gezeigt, dass die vergleichende Anwendung verschiedener Verfahren den Experten wertvolle Anhaltspunkte für eine Abschätzung liefert und insgesamt zu zuverlässigeren Ergebnissen führt als die Anwendung eines einzelnen Verfahrens (*Weingartner*, 1999). In diesem Sinne kann das neue Verfahren die bestehenden wesentlich erweitern, da ein gänzlich anderer Ansatz verwendet wird. Insgesamt kann für die Hochwasserabschätzung mit einem deutlichen Informationsgewinn gerechnet werden. Zudem besteht die Möglichkeit – neben der Hochwasserspitze – weitere wichtige Hochwasserkenngrossen wie Direktabflussvolumen, Anstiegszeit oder Überschreitungsdauer von Schwellenwerten zu bestimmen. Der Einbezug weiterer Informationen – etwa aus der Beurteilung vor Ort oder dem Studium historischer Hochwasser – ist dabei weiterhin unerlässlich. Die Hochwasserabschätzung ist eine komplexe Aufgabe; sie kann nicht automatisch, sozusagen durch Knopfdruck am Computer, erfolgen, sondern sie setzt immer auch Expertenwissen voraus.

Das Modellsystem und der Anwendungsrahmen werden in Kapitel 2 vorgestellt; Kapitel 3 erläutert die relevanten Details der Niederschlagsinterpolation. Nachdem in Kapitel 4 eine umfassende Gütebeurteilung der Simulationen und der daraus abgeleiteten Hochwasserabschätzungen vorgenommen wird, stellt Kapitel 5 vor, in welcher Form die Ergebnisse dargestellt werden. Kapitel 7 beschreibt als eigentlichen Kern des Berichts das konkrete Vorgehen bei einer Hochwasserabschätzung mit PREVAH-regHQ. Dabei sind die in Kapitel 6 erläuterten Einschränkungen in der Anwendung zu beachten. Abgeschlossen wird der Bericht mit einem Ausblick in Kapitel 8.

2 Methodische Grundlagen

2.1 Kontinuierliche Langzeitsimulation

Die in diesem Bericht vorgestellten Hochwasserabschätzungen basieren auf dem Ansatz der kontinuierlichen Langzeitsimulation. Dabei wird mit einem hydrologischen Modellsystem eine lückenlose Abflussreihe über eine längere Dauer – im vorliegenden Fall über 20 Jahre und in stündlicher Auflösung – simuliert. Diese Abflussreihen können anschliessend unter anderem mit extremwertstatistischen Methoden ausgewertet werden (Abbildung 2-1).

Gegenüber den heute weit verbreiteten stochastischen Schätzverfahren besitzt dieses Vorgehen eine Reihe von Vorteilen:

- Die problematische Verknüpfung von Extremniederschlägen mit Extremabflüssen gleicher Jährlichkeit ist nicht nötig; Intensität und Menge der Niederschläge werden über die gesamte Simulationsdauer hinweg direkt ins Modell einbezogen und dann mit dem Abfluss verknüpft.
- Die heikle Festlegung von Abflussbeiwerten zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags erübrigt sich, da die Abflussbildung durch das Modell hydrologisch sinnvoll abgebildet wird.
- Die Randbedingungen der individuellen Hochwasserereignisse (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) müssen nicht geschätzt werden. In der Simulation leiten sie sich vom ebenfalls durchgehend vorliegenden meteorologischen Modellinput ab.
- Es resultiert nicht bloss ein geschätzter Spitzenabflusswert, sondern auch eine komplette Abflussganglinie des untersuchten Gebietes. Dadurch können weitere relevante Hochwasserkennwerte erhoben werden wie etwa das Direktabflussvolumen, die Anstiegszeit oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten.
- Bezüglich der Wahl einer Wiederkehrperiode bestehen dieselben Möglichkeiten und Grenzen wie bei der Auswertung gemessener Abflussreihen (DVWK, 1999; siehe Kapitel 6.3).

Hinderlich für die Anwendung in der Praxis war bisher vor allem der grosse Aufwand, welcher eine kontinuierliche Simulation normalerweise mit sich bringt, vor allem was die Beschaffung und Aufbereitung der benötigten Input- und Modelldaten betrifft. Hydrologische Modelle sind zudem oft nicht benutzerfreundlich und erfordern vom Anwender¹ in jedem Fall vertiefte Kenntnisse von Modellstruktur und Prozessabbildung. Des Weiteren müssen im Normalfall Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand welcher die freien Parameter des hydrologischen Modells kalibriert werden können. Ist dies nicht der Fall, müssen diese Parameter über eine sogenannte Regionalisierung bestimmt werden.

Die obengenannten Probleme werden im vorliegenden Bericht umgangen, indem umfassende Modellierungen für den Grossteil der im schweizerischen Rheineinzugsgebiet gelegenen Einzugsgebiete vorgenommen werden (Kapitel 2.5), so dass Ganglinien für all diese Gebiete unmittelbar zur Verfügung stehen. Dies erspart dem Anwender die technisch und zeitlich sehr aufwändigen Vorarbeiten. Dennoch erfordert die Einschätzung und Interpretation der Ergebnisse ein solides hydrologisches Wissen (siehe Kapitel 7).

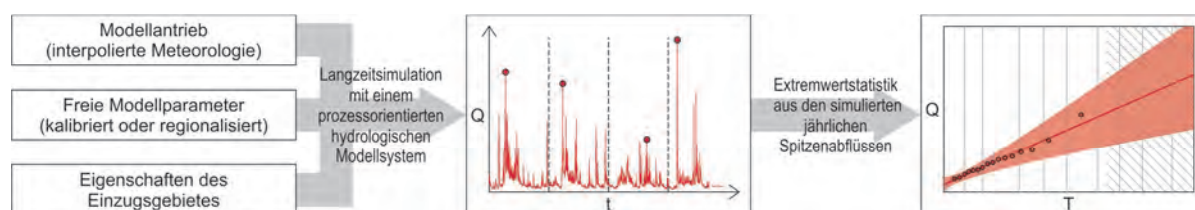


Abbildung 2-1. Prinzip der Langzeitsimulation zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse.

¹ Hier und im Folgenden wird unter „Anwender“ sowohl die weibliche wie auch die männliche Form verstanden.

Mit dem Ansatz der Langzeitsimulation soll das Hochwasserverhalten eines Gebietes als Ganzes charakterisiert werden. Mit den simulierten n-Jahreshochwassern (im vorliegenden Fall: $n = 20$) kann eine Extrapolation auf seltene Wiederkehrperioden T (z.B. $T = 50$ Jahre, $T = 100$ Jahre; vgl. Kapitel 6.3) vorgenommen werden (Bradley und Potter, 1992; Lamb et al., 2002; Viviroli, 2007; Viviroli et al., 2009b). Die exakte Wiedergabe einzelner Hochwasserereignisse ist hingegen nicht das Ziel dieses Ansatzes. Insbesondere für extreme Hochwasserereignisse – wie 1987, 1999 oder 2005 – bestehen bereits im Niederschlagsinput grosse Unsicherheiten (siehe z.B. Frei et al., 2008) und die hydrologischen Besonderheiten können eine ereignisspezifische Anpassung der freien Modellparameter nötig machen (Schwanbeck et al., 2007a, 2007b und 2008).

2.2 Das hydrologische Modellsystem PREVAH

Als Grundlage für die Abflusssimulation wurde das deterministische hydrologische Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotone Model) (Gurtz et al., 1997; Zappa, 2002; Viviroli et al., 2007 und 2009a) verwendet. Es basiert auf einer Kaskade linearer Einzelspeicher und besitzt spezifische Module für Schnee, Gletscher, Interzeption, Bodenfeuchte, Verdunstung, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration (Abbildung 2-2). Für die Verwendung von PREVAH im vorliegenden Fall sprechen vor allem auch die umfangreichen Erfahrungen, welche in alpinen und voralpinen Gebieten der Schweiz gesammelt wurden (für einen Überblick siehe Viviroli et al., 2009a).

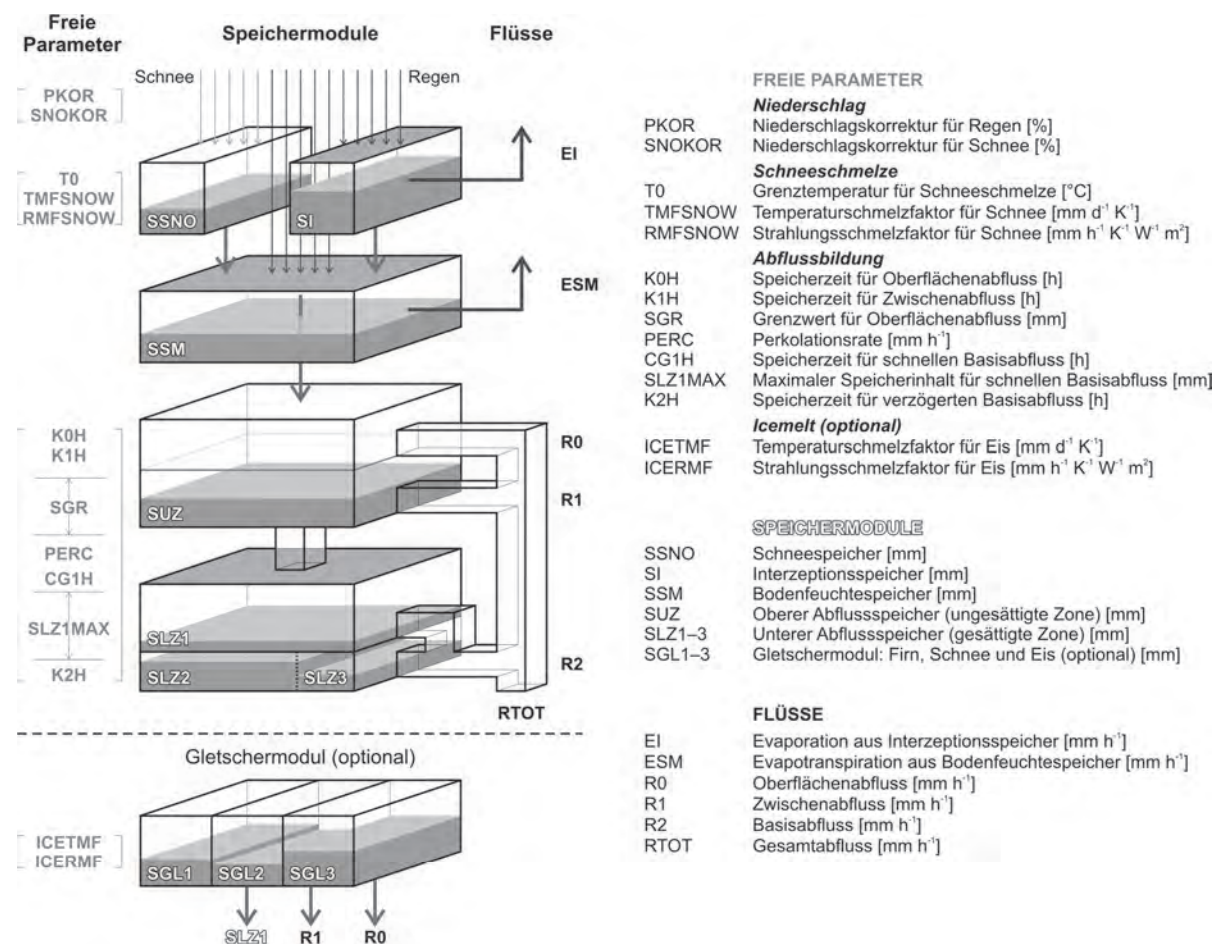


Abbildung 2-2. Freie Parameter, Speichermodule und Flüsse des hydrologischen Modellsystems PREVAH (nach Viviroli et al., 2009a).

In der für diese Studie erstellten Version besitzt PREVAH zwölf freie Modellparameter, zwei weitere kommen für vergletscherte Gebiete hinzu (Abbildung 2-2). Zur Kalibrierung dieser freien Parameter werden im Normalfall Abflussmessreihen benötigt. Weitere invariante Gebietsparameter werden von PREVAH auf der Grundlage des digitalen Höhenmodells (DHM) sowie weiterer digitaler Karten (u. a. Landnutzung und Bodeneigenschaften) festgelegt (BfS, 2003). Das Modellsystem wird im vorliegenden Anwendungsrahmen mit einer Rasterweite von 500 m × 500 m betrieben, wobei hydrologisch ähnlich reagierende Rasterzellen zu sogenannten Hydrotopen zusammengefasst werden. Als Basis

für den Modellantrieb dienen stündlich gemessene Werte für Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck, Globalstrahlung sowie relative Sonnenscheindauer aus dem Messnetz der *MeteoSchweiz* (2009), welche mit einem höhenabhängigen inversen Distanzgewichtungsverfahren interpoliert und schliesslich für Höhenzonen von 100 m vertikaler Erstreckung zusammengefasst werden (*Viviroli et al.*, 2007). Als Ausgabe liefert PREVAH Werte im Stundenschritt für sämtliche berücksichtigte Wasserhaushaltsgrössen, und zwar sowohl als summarische Werte am Gebietsauslass wie auch in der hier gewählten Basisauflösung von 0.25 km².

2.3 Anwendung in ungemessenen Gebieten

2.3.1 Methodik

Wie erwähnt besitzt PREVAH freie Modellparameter, welche üblicherweise an Messreihen des Abflusses kalibriert werden. Dies wurde als erster Schritt auch für die Entwicklung der vorliegenden Anwendung gemacht, und zwar für insgesamt 140 mesoskalige Einzugsgebiete der Alpennordseite (Abbildung 2-3). Zu diesem Zweck wurde ein halbautomatisches Kalibrierungsverfahren in PREVAH eingebaut, mit welchem in einem ersten Schritt ein für normale Abflussverhältnisse geeigneter Parametersatz erstellt wurde (Mittelwasserparametersatz, calMQ). In einem zweiten Schritt wurden hochwassersensitive Gütemasse verwendet, um diesen Mittelwasserparametersatz im Bereich der Spitzenabflüsse noch weiter zu verbessern und einen Hochwasserparametersatz zu erhalten (calHQ) (*Viviroli*, 2007; *Viviroli et al.*, 2009b).

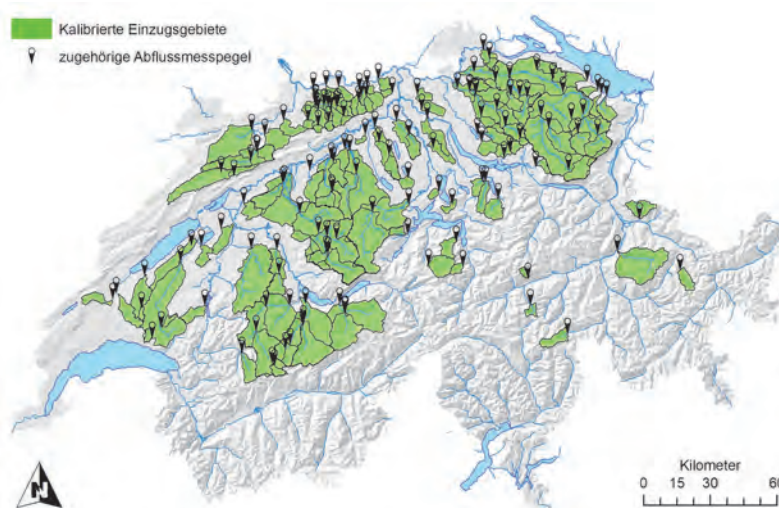


Abbildung 2-3. Übersichtskarte zu den 140 von *Viviroli* (2007) anhand von Abflussmessungen des BAFU (2010) kalibrierten Einzugsgebieten, welche als Grundlage für die Regionalisierung dienen.

Für die Anwendung in ungemessenen Gebieten müssen die freien Modellparameter mittels Regionalisierung geschätzt werden. Die Resultate der vorgängig durchgeführten Kalibrierungen dienen dabei als Datengrundlage. Ergänzt werden diese Informationen durch Angaben zu Physiographie, Landnutzung, Bodeneigenschaften, Geologie, Hydrogeologie und Klima der Gebiete, wozu insgesamt 80 entsprechende Gebietsattribute flächendeckend – also insbesondere auch für die ungemessenen Gebiete – erhoben wurden. Mit Hilfe dieser Gebietsattribute können die freien Modellparameter anschliessend geschätzt werden.

Konkret geschieht die Regionalisierung über die Kombination von drei Verfahren:

- 1) In einem ersten Verfahren werden jene fünf gemessenen und kalibrierten Einzugsgebiete gesucht, welche dem Zielgebiet im mehrdimensionalen Raum der Gebietsattribute (Gebietskenngrössen) am ähnlichsten sind. Die Modellparameter dieser Spendergebiete werden dann unverändert auf das Zielgebiet übertragen, und mit jedem Parametersatz wird eine Abflusssimulation durchgeführt. Der Median dieser fünf Simulationen bildet eine erste Ganglinie (Nearest-Neighbour-Verfahren).
- 2) In einem zweiten Verfahren werden die freien Modellparameter mittels „Ordinary Kriging“ im Raum interpoliert, wobei die Gebietsschwerpunkte jeweils als Stützstellen dienen. Für ein unbekanntes Gebiet können die freien Modellparameter dann direkt aus den resultierenden Parameterkarten herausgelesen und für eine Simulation benutzt werden (Kriging-Verfahren).
- 3) Schliesslich werden in einem dritten Verfahren Regressionsbeziehungen zwischen den flächendeckend verfügbaren Gebietsattributen als unabhängige Grössen und den freien Modellparametern

als abhängige Grössen hergeleitet. Diese Regressionsbeziehungen werden anhand der kalibrierten Einzugsgebiete geeicht; die resultierenden Parametersätze werden ebenfalls für eine Simulation verwendet (Regressionsverfahren).

Die drei obengenannten Verfahren werden kombiniert, indem für jeden Zeitschritt der mediane Abfluss der drei simulierten Ganglinien ermittelt wird (kombiniertes Verfahren, s. Abbildung 2-4). Je nach zugrundeliegender Kalibrierungsvariante resultiert eine Mittelwasservariante oder eine Hochwasservariante der Regionalisierung (regMQ, regHQ), wobei für die in diesem Bericht vorgenommenen Hochwasserabschätzungen ausschliesslich die Hochwasservariante der Regionalisierung verwendet wurde. Die Details des Regionalisierungsansatzes wurden von *Viviroli* (2007) und *Viviroli et al.* (2009c) umfassend untersucht und dokumentiert.

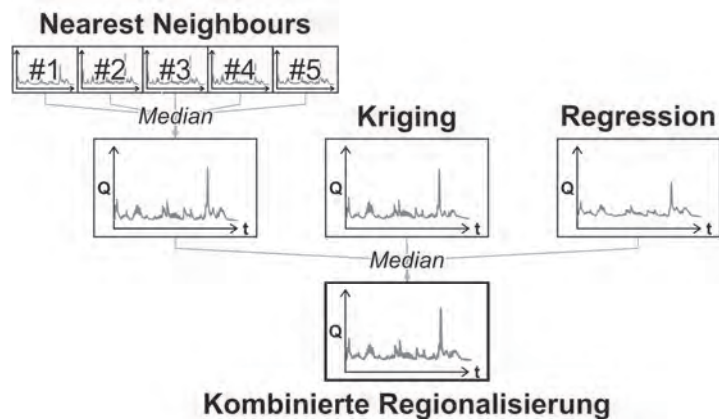


Abbildung 2-4. Kombination der simulierten Abflussganglinien der verschiedenen Regionalisierungsverfahren.

2.3.2 Erste Prüfung der Modellgüte

Zur Überprüfung des in Kapitel 2.2 vorgestellten Modellsystems wurden in 49 repräsentativen Einzugsgebieten der Alpennordseite umfassende Analysen durchgeführt. Dabei ist es auch möglich, die Güte der Regionalisierung zu prüfen, indem die Einzugsgebiete jeweils eines nach dem anderen als ungemessen betrachtet werden und die regionalisierten Simulationen anschliessend mit den vorhandenen Beobachtungen verglichen werden (Jackknife-Ansatz, Details siehe *Viviroli*, 2007).

Untersucht man die prozentuale Abweichung des geschätzten HQ_{100} vom Referenzwert, der aus Beobachtungen abgeleitet wurde, ergeben sich die in Abbildung 2-5 aufgetragenen Resultate. Sowohl bei der Kalibrierung wie auch bei der Regionalisierung ist eine leichte Tendenz zur Unterschätzung des HQ_{100} zu verzeichnen. Es ist aber deutlich erkennbar, dass sich die Schätzgüte bei der Regionalisierung gegenüber der Kalibrierung kaum verschlechtert: das Verfahren zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen Gebieten ist – abgesehen von einigen wenigen Ausreissern gegen oben – also stabil. Die kombinierte Regionalisierung, welche in diesem Bericht als Schätzgrundlage verwendet wird, weist einen medianen Schätzfehler von lediglich -7% auf, und für die Hälfte der 49 betrachteten repräsentativen Einzugsgebiete liegt der Schätzfehler zwischen -31% und +7% (Interquartilsbereich). Deutliche Überschätzungen können allenfalls auftreten, wenn aussergewöhnliche Bedingungen das Hochwassergeschehen prägen, beispielsweise Ausuferungen (Gürbe-Belp) oder starker Karsteinfluss (Suze-Sonceboz) (vgl. Kapitel 2.5 und 6).

Die Betrachtungen zum Schätzfehler lassen sich weiter verfeinern, indem die Anzahl getroffener und knapp verfehlter Schätzungen untersucht wird (Abbildung 2-5, unten). Von einem Treffer wird gesprochen, wenn der aus der Simulation geschätzte Wert im statistischen 90%-Konfidenzintervall des aus der Beobachtung extrapolierten Referenz- HQ_{100} liegt. Dies kann als sehr gutes Resultat bezeichnet werden. Bei einer knappen Fehlschätzung überschneiden sich zumindest die 90%-Konfidenzbereiche von Simulation und Referenz, was immer noch als befriedigend eingestuft wird. Betrachtet man die Summe von Treffern und knappen Fehlschätzungen, so erhält man bei der Regionalisierung immerhin einen Anteil von 65%; dieser liegt allerdings unter dem bei der Kalibrierung erreichten Anteil von 76%. Beim Anteil der Treffer zeigt die kombinierte Regionalisierung mit 51% allerdings einen Wert, welcher denjenigen der kalibrierten Modellversion sogar geringfügig übertrifft.

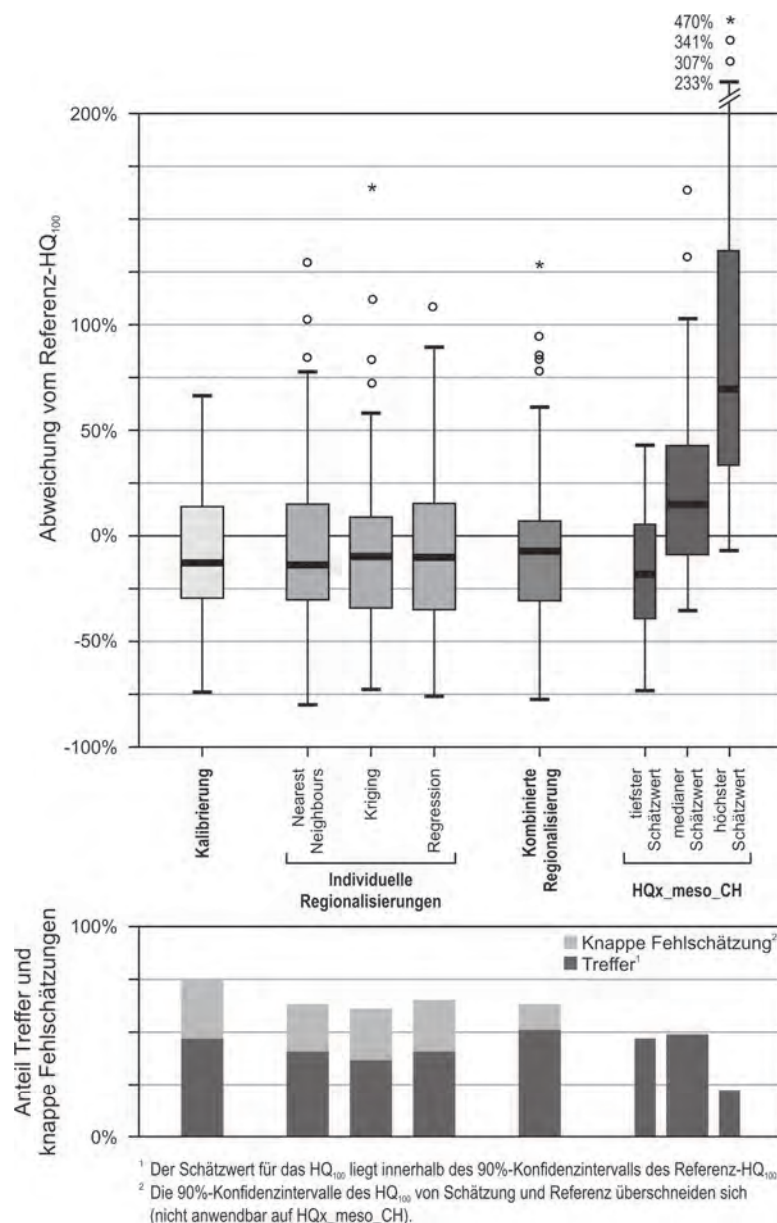


Abbildung 2-5. Ergebnisse für die Schätzung eines HQ_{100} im Vergleich zum aus der Beobachtung abgeleiteten Referenzwert. Datengrundlage: 49 repräsentative Testgebiete des schweizerischen Rheineinzugsgebietes. Die Beschriftung der Säulen in der unteren Grafik ist identisch mit jener in der oberen Grafik.

Interessant ist ein Vergleich mit den Schätzwerten von HQx_meso_CH (Barben, 2003; Spreafico et al., 2003). Dazu wird in HQx_meso_CH – wiederum für die 49 repräsentativen Gebiete – aus den fünf Verfahren, mit welchen ein HQ_{100} geschätzt werden kann, der mediane Schätzwert berechnet. In den 49 Gebieten resultiert so eine moderate Überschätzung von +15%, wobei der jeweils höchste Schätzwert von HQx_meso_CH relativ stark gegen oben ausschert (Abbildung 2-5, oben rechts) (Barben, 2003 empfiehlt deshalb, den jeweils höchsten und tiefsten Schätzwert zu streichen). Der Anteil der Treffer (Abbildung 2-5, unten rechts) liegt beim medianen Schätzwert von HQx_meso_CH aber bei 47% und ist somit vergleichbar mit den Resultaten der kalibrierten und regionalisierten Simulationen.

2.4 Definition der Einzugsgebiete

Als Grundlage für die Abgrenzung der im vorliegenden Bericht berücksichtigten Einzugsgebiete dienen die im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) definierten Basisgebiete (Breinlinger et al., 1992). Bei der Definition der Einzugsgebiete wird jeweils mit dem Basisgebiet an der höchstgelegenen Wasserscheide (Kopfeinzugsgebiet) begonnen. Die dann im Flussverlauf folgenden Einzugsgebiete werden jeweils inklusive aller oberliegenden Basisgebiete definiert und sind somit immer hydrologisch vollständig modelliert. Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen für die bearbeiteten Einzugsgebiete beziehen sich jeweils auf den Gebietsauslass des untersten Basisgebietes. Wenn ein Einzugsgebiet zusätzlich zum in der Bezeichnung erwähnten Basisgebiet noch weitere oberliegende Basisgebiete beinhaltet, wird der Bezeichnung ein „+“ angefügt.

Abbildung 2-6 zeigt das Resultat dieses Vorgehens für die Töss, deren Teil- und Zwischeneinzugsgebiete nach dem HADES Gebietsnummern zwischen 10-531 und 10-555 umfassen. Das Einzugsgebiet „10-531“ entspricht dem Basisgebiet 10-531, das Einzugsgebiet „10-532+“ umfasst die beiden Basisgebiete 10-531 und 10-532, das Einzugsgebiet „10-533+“ die Basisgebiete 10-531, 10-532 und 10-533 usw. Mit Seitenarmen des Fliessgewässers wird analog verfahren („10-551“ entspricht Basisgebiet 10-551, „10-552+“ fasst die Basisgebiete 10-551 und 10-552 zusammen usw.), bis schliesslich das gesamte Flussgebiet abgedeckt ist – was im vorliegenden Beispiel beim Einzugsgebiet „10-555+“ der Fall ist, welches alle Basisgebiete von 10-531 bis 10-555 beinhaltet.

Um die Vergleichbarkeit mit Wasserbilanzwerten des Hydrologischen Atlas (*Schädler und Weingartner*, 2002; Tafel 6.3) herzustellen, werden die Bezeichnungen für die Einzugsgebiete wo möglich durch einen Hinweis auf die von *Breinlinger et al.* (1992) definierten Bilanzierungsgebiete ergänzt. Das Einzugsgebiet „10-533+“, welches die Basisgebiete 10-531, 10-532 und 10-533 zusammenfasst, wird demnach um die Bezeichnung „10-530“ ergänzt, weil es dem Bilanzierungsgebiet 10-530 entspricht (Abbildung 2-6). Das Einzugsgebiet „10-543+“ fasst die Bilanzierungsgebiete 10-530 und 10-540 zusammen und wird ergänzend mit „10-540+“ bezeichnet, Einzugsgebiet „10-555+“ deckt die Bilanzierungsgebiete 10-530, 10-540 und 10-550 ab und wird um die Bezeichnung „10-550+“ ergänzt.

In den Resultatblättern (Kapitel 5) und in der Übersicht der verfügbaren Resultate (Anhang A und B) wird für ein Einzugsgebiet stets diejenige Bezeichnung angegeben, welche sich auf die oben beschriebene Nomenklatur bezieht (z. B. „10-542+“). Wo möglich wird diese Bezeichnung durch die auf die Bilanzierungsgebiete bezogene Nomenklatur ergänzt (z. B. „10-543+ [10-540+]“) (siehe auch Abbildung 2-6).

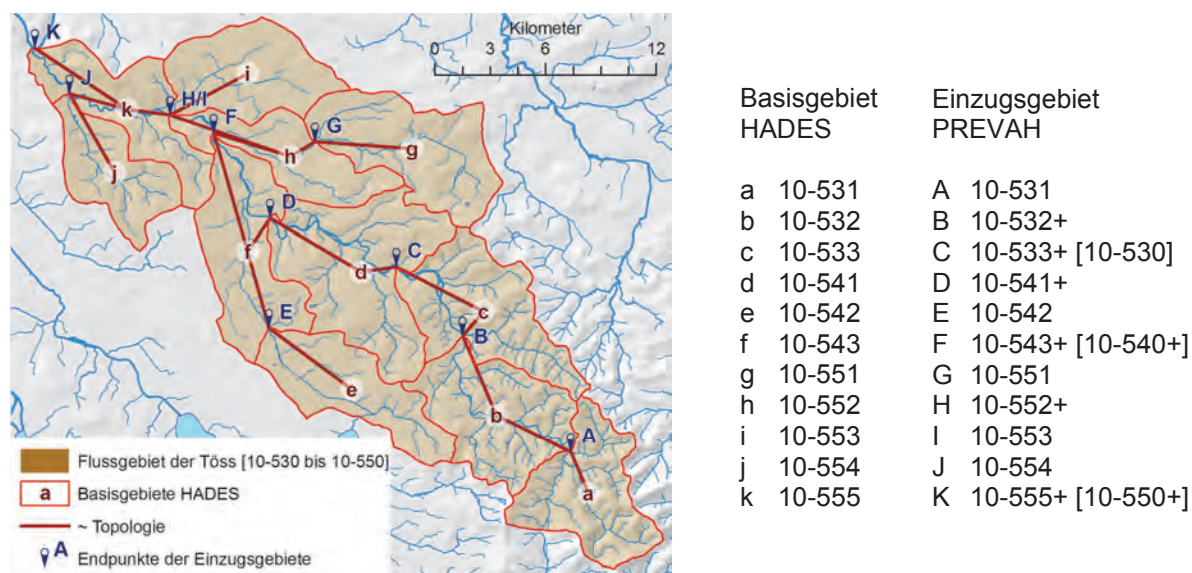


Abbildung 2-6. Definition der modellierten Einzugsgebiete auf Grundlage der HADES-Basisgebiete am Beispiel der Töss.

Vereinzelte treten bei diesem Vorgehen Spezialfälle auf, welche durch die Definition der Basis- und Bilanzierungsgebiete durch *Breinlinger et al.* (1992) bedingt sind:

- *Zwei ähnlich grosse Einzugsgebiete lassen sich nicht getrennt modellieren, wenn das eine zugrundeliegende Basisgebiet seitlich in das andere mündet:* Abbildung 2-7 (links) zeigt einen typischen Fall im Flussgebiet der Sihl: Eine separate Simulation für das Gebiet der Biber ist mit dem beschriebenen Verfahren nicht möglich, weil das dazugehörige Basisgebiet (40-152) auch die Alp (40-151) als oberliegendes Gebiet umfasst. Eine Auftrennung in zwei einzelne Gebiete ist modelltechnisch zwar ohne weiteres möglich (die Gebiete Alp-Einsiedeln und Biber-Biberbrugg wurden von *Viviroli*, 2007 erfolgreich modelliert), im Sinne eines einheitlichen Aufbaus der Einzugsgebietsdefinitionen wurde hier aber darauf verzichtet.
- *Zwei gleichberechtigte Basisgebiete bilden zusammen ein Bilanzierungsgebiet:* Abbildung 2-7 (Mitte) illustriert dies für die Simme: Die Basisgebiete des Iffigbachs (20-122) und der Simme (20-121) bilden zusammen das Bilanzierungsgebiet 20-120. Zusätzlich zu den beiden Basisgebieten (20-121 und 20-122) wird in solchen Fällen auch das Bilanzierungsgebiet (20-120) modelliert. Dies geschieht nicht durch Addition der beiden Ganglinien, sondern durch Simulation mit den für das

Bilanzierungsgebiet regionalisierten Modellparametern. Ein Vergleich der Varianten Addition und separate Simulation lieferte sehr ähnliche Ergebnisse, was stark für die Stabilität von Modellsystem und Parameterschätzung (Kapitel 2.1 bis 2.3) spricht.

- *Zwei nicht verbundene Basisgebiete bilden zusammen ein Bilanzierungsgebiet.* Abbildung 2-7 (rechts) verdeutlicht dies wiederum anhand des Sihlgebietes: Die Sihl (40-132) und die Minster (40-131 und 40-133) münden beide in den Sihlsee und besitzen keinen gemeinsamen Pegelpunkt, werden aber im Bilanzierungsgebiet 40-130 zusammengefasst. Auch hier wird das übergeordnete Bilanzierungsgebiet zusätzlich als Ganzes modelliert. Ähnliche Fälle treten bei Grosser und Kleiner Schliere (30-160) sowie bei Zulg und Rotache (20-170) auf.

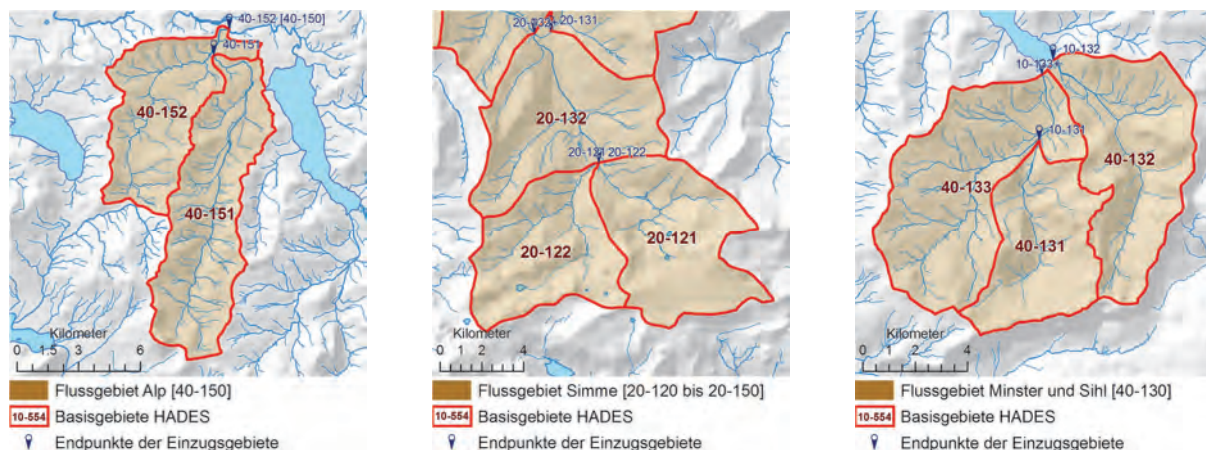


Abbildung 2-7. Spezialfälle bei der Definition von Einzugsgebieten (Erläuterungen siehe Text).

2.5 Auswahl der Gebiete und räumliche Abdeckung

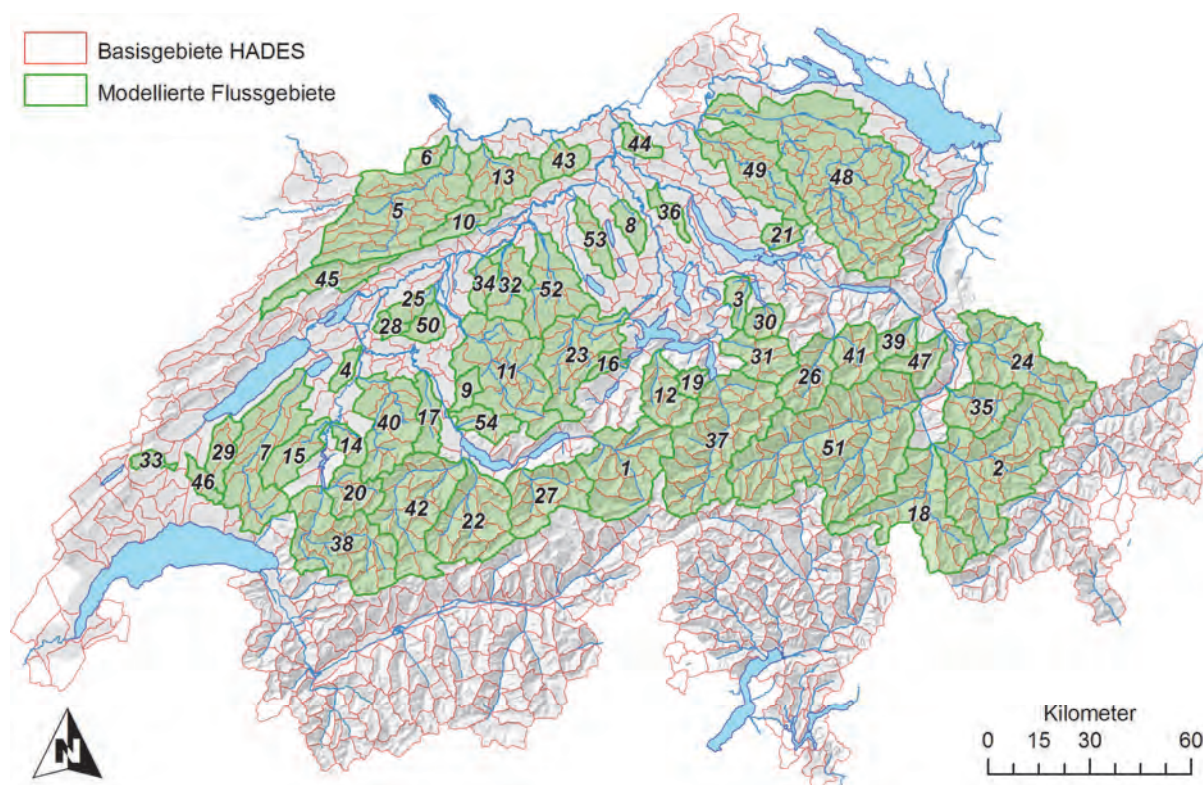
Die in diesem Bericht beschriebenen Simulationen und Auswertungen sollen das schweizerische Rheineinzugsgebiet möglichst umfassend abdecken. Südlich des nördlichen Alpenkammes stehen nur wenige Einzugsgebiete mit unbeeinflussten Messreihen zur Verfügung, wodurch eine Regionalisierung bisher noch nicht möglich war (Köplin et al., 2010; siehe auch Kapitel 8).

Wegen der grossen Unsicherheiten bei der Parameterschätzung werden folgende Einzugsgebiete nicht berücksichtigt:

- *Einzugsgebiete mit einer Gesamtfläche von deutlich mehr als 2 000 km²:* Ab dieser Gebietsgrösse müssten die Teileinzugsgebiete mit PREVAH individuell modelliert und dann über ein Routing zusammengeführt werden. Da für Gebiete dieser Grösse mit hoher Wahrscheinlichkeit lange Messreihen vorliegen, ist dies allerdings keine einschneidende Einschränkung.
- *Einzugsgebiete unterhalb von Seen, welche eine deutliche Retentionswirkung haben oder manuell reguliert werden (z. B. Greifensee oder Lac de Gruyère):* Eine Simulation mit PREVAH ist zwar möglich und wurde beispielsweise von Schwanbeck et al. (2007a, 2007b und 2008) erfolgreich durchgeführt; jedoch würde die Berücksichtigung von Seeretention und -regulierung eine weitere Unsicherheit in die bereits sehr herausfordernde Regionalisierung einführen. Die Anwendung unterhalb der Alpenrandseen ist zudem wegen der oberen Grössenlimite von 2 000 km² (siehe oben) nicht sinnvoll.
- *Einzugsgebiete, deren Abfluss durch bedeutende Abflussskanäle beeinflusst wird (wie etwa durch den Nollakanal im untersten Abschnitt des Hinterrheins):* Hier müsste ein hydraulisch angemessenes präzises Routing erfolgen, welches im Rahmen der hier verwendeten Methodik ausserhalb der Möglichkeiten einer Anwendung in ungemessenen Gebieten liegt.
- *Einzugsgebiete, welche über kein Kopfeinzugsgebiet verfügen:* Diese Gebiete sind hydrologisch unvollständig (vgl. Gamma, 1992), weshalb eine Parameterschätzung heikel ist.
- *Flussgebiete mit ausgeprägten Karstvorkommen, namentlich die Gebiete der Areuse und der Orbe:* Karstphänomene können mit PREVAH ohne Zuhilfenahme von hydraulischen Modellen nur rudimentär abgebildet werden und sind ohne entsprechende Messdaten kaum zu parametrisieren. Auf die Einschränkungen, die sich bei grossen Anteilen verkarstungsfähigen Gesteins ergeben, wird in Kapitel 6 noch ausführlicher eingegangen.

Um eine konsistente Aufbereitung des meteorologischen Modellinputs (siehe Kapitel 3) sicherzustellen, wurden die für die Modellierung definieren 450 Einzugsgebiete in 54 Flussgebiete zusammengefasst (Abbildung 2-8). Diese Gruppierung erlaubt vor allem auch die Ergebnisse innerhalb eines Flussgebietes durch Quervergleiche auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen (siehe Kapitel 6 und 7). Nicht bearbeitet wurden Einzugsgebiete, welche aufgrund der oben genannten Kriterien zwar modellierbar wären, aber keinem der 54 definierten Flussgebiete angehören, innerhalb welcher eine Plausibilisierung der Ergebnisse möglich ist. Diese Einzugsgebiete entsprechen gleichzeitig 43 Basisgebiete in Kopfeinzugsgebietslage, welche aufgrund ihrer zum Teil relativ geringen Einzugsgebietsfläche auch nur bedingt auswertbare Simulationen ergeben (siehe Kapitel 5.1). Beispiele sind der in den Brienzersee mündende Giessbach (Basisgebiet 20-082, Fläche 24.6 km²) oder der in den Rhein mündende Geisslibach (Basisgebiet 10-402, Fläche 40.4 km²).

Durch dieses Auswahlverfahren wurden letztendlich 450 Einzugsgebiete definiert, für welche umfassende Simulationen und Auswertungen vorgenommen werden konnten. Das durch Simulationen erfasste Gebiet deckt 17 325 km² ab, was ungefähr zwei Dritteln der Fläche des schweizerischen Rheineinzugsgebietes entspricht. Insgesamt sind damit auch knapp 90% derjenigen Basisgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet berücksichtigt, welche gemäss *Breinlinger et al. (1992)* als hydrologische Einzugsgebiete im engeren Sinne betrachtet werden können. Abbildung 2-8 stellt diese Einzugsgebiete zusammen mit den übergeordneten 54 Flussgebieten dar (siehe auch Anhang A).



- | | | | |
|-------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| 1 Aare | 15 La Glâne | 29 La Mentue | 43 Sissle |
| 2 Albula | 16 Gr. und Kl. Schliere | 30 Minster und Sihl | 44 Surb |
| 3 Alp | 17 Gürbe | 31 Muota | 45 La Suze |
| 4 Bibere | 18 Hinterrhein | 32 Murg | 46 Le Talent |
| 5 Birs | 19 Isenthalbach | 33 Le Nozon | 47 Tamina |
| 6 Birsig | 20 La Jagne | 34 Önz | 48 Thur |
| 7 La Broye | 21 Jona | 35 Plessur | 49 Töss |
| 8 Bünz | 22 Kander | 36 Reppisch | 50 Urtenen |
| 9 Chise | 23 Kleine Emme | 37 Reuss | 51 Vorderrhein |
| 10 Dünern | 24 Landquart | 38 Saane | 52 Wigger |
| 11 Emme | 25 Limpach | 39 Seez | 53 Wyna |
| 12 Engelberger Aa | 26 Linth | 40 Sense | 54 Zug und Rotache |
| 13 Ergolz | 27 Lütchine | 41 Sernft | |
| 14 La Gérine | 28 Lyssbach | 42 Simme | |

Abbildung 2-8. Übersichtskarte der 54 Flussgebiete, zu welchen die insgesamt 450 bearbeiteten Einzugsgebiete zusammengefasst werden (Nummerierung in alphabetischer Reihenfolge).

Welchen Grössenbereich die für diesen Bericht ausgewählten Einzugsgebiete umfassen, ist aus Abbildung 2-9 ersichtlich. Wie der obere Teil der Abbildung zeigt, sind von den insgesamt 450 Einzugsgebieten 436 grösser als 20 km², 301 grösser als 40 km² und 164 grösser als 100 km². Die Grösse von 500 km² überschreiten 35 Gebiete, diejenige von 1 000 km² überschreiten 7 Gebiete. Dem unteren Teil der Abbildung kann entnommen werden, dass die meisten hier modellierten Gebiete in der Grössenklasse 20–40 km² liegen. Diese Grössenklasse war auch bei der Gesamtheit der 140 von *Viviroli* (2007) betrachteten Gebiete am stärksten vertreten, und weil letztere Gebiete mit ihrer Kalibrierung als Grundlage der Parameterschätzung (Regionalisierung) dienen, besteht auch für die im vorliegenden Bericht zusammengefassten Simulationen eine repräsentative Grundlage. Die 49 repräsentativen Gebiete mit langen Beobachtungsreihen, welche *Viviroli* (2007) zur Überprüfung der Hochwasserabschätzungen verwendete, sind jedoch im Bereich 40–60 km² am stärksten vertreten. Wie in Kapitel 5.1 erläutert wird, bildet die Gebietsgrösse von 40 km² auch von der Qualität der Hochwasserabschätzungen her eine erste untere Grenze, unterhalb welcher meist mit Unterschätzungen gerechnet werden muss. Nicht empfohlen wird die Anwendung in Gebieten mit einer Einzugsgebietsfläche von weniger als 25 km².

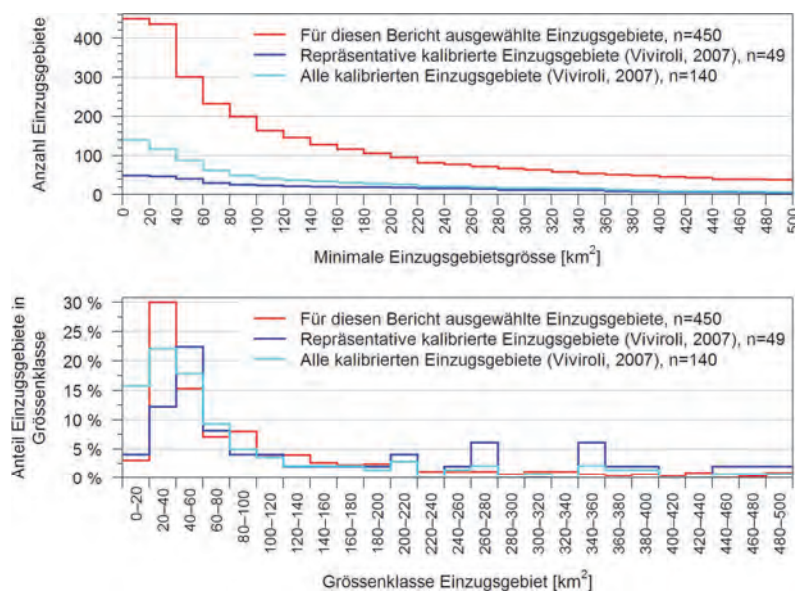


Abbildung 2-9. Überblick zur Grösse der in diesem Bericht berücksichtigten Einzugsgebiete; oben: Anzahl Gebiete im Vergleich zur minimalen Gebietsgrösse; unten: Anteil Gebiete mit einer bestimmten Grösse. Gebiete mit einer Fläche von mehr als 500 km² sind nicht dargestellt.

3 Bereitstellung des meteorologischen Modellinputs

In Folgenden wird auf ausgewählte Aspekte bei der Erstellung des meteorologischen Modellinputs eingegangen. Diese Diskussion fällt relativ ausführlich aus, weil die Untersuchungen von *Viviroli* (2007, 2009b, 2009c) gezeigt haben, dass insbesondere der Niederschlag von entscheidender Bedeutung für die Güte von Simulation und Hochwasserschätzung ist.

3.1 Überblick und Stationsauswahl

Grundsätzlich folgt die Erstellung der Modellmeteorologie dem von *Viviroli* (2007) beschriebenen Verfahren, bei welchem Stationsmesswerte der relevanten Eingangsgrößen mit einem höhenabhängigen inversen Distanzgewichtungsverfahren im Raum interpoliert werden (vgl. Kapitel 2.2). Im Vergleich zum ursprünglichen Vorgehen, bei welchem die Modellmeteorologie aller Einzugsgebiete jeweils einzeln aufbereitet wird, erfolgt die Interpolation hier jeweils gesamthaft für jedes der 54 bearbeiteten Flussgebiete (siehe Kapitel 2.4). Ausgehend von dieser flussgebietsbezogenen Interpolation werden anschliessend die benötigten meteorologischen Inputdaten für alle im betreffenden Flussgebiet enthaltenen Einzugsgebiete abgeleitet. Im Beispiel der Töss (vgl. Abbildung 2-6) wird also zuerst eine Meteorologie für das gesamte Flussgebiet interpoliert, um daraus anschliessend die PREVAH-Inputtabellen für die 11 untergeordneten Einzugsgebiete herzustellen. Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass die Ergebnisse entlang des modellierten Fliessgewässers – also bei der sukzessiven Bearbeitung der Einzugsgebiete vom höchst- bis zum tiefstgelegenen Gebiet – möglichst keine Sprünge aufweisen, welche durch auf unterschiedlicher Grundlage interpolierte meteorologische Inputs bedingt sind. Es ist anzumerken, dass die Konsistenz der Ergebnisse in etwas geringerem Masse auch von der Parameterschätzung für ungemessene Gebiete abhängt. Die Plausibilität der Simulationen wird später genauer diskutiert; es kann aber vorweggenommen werden, dass dank des gewählten Vorgehens kaum Probleme bezüglich Konsistenz der Ergebnisse auftraten.

Für die Auswahl der Meteostationen, auf welchen die Interpolation der Modellmeteorologie im Raum aufbaut, wurde als Ausgangspunkt das Vorgehen gemäss *Viviroli* (2007) verwendet:

- ANETZ: Alle Stationen in einem Umkreis von 35 km ab Gebietsschwerpunkt, mindestens aber fünf.
- Klimastationen: Alle in einem Umkreis von 25 km ab Gebietsschwerpunkt, mindestens aber drei.
- Niederschlagssammler: Alle innerhalb des Flussgebietes, mindestens aber fünf.

Weitere Kriterien beziehen sich auf die Repräsentativität für die Klimaregion sowie die Berücksichtigung hochgelegener Stationen; Details dazu können *Viviroli* (2007) entnommen werden. In einzelnen hier modellierten Gebieten erfolgten weitere gezielte Anpassungen, wenn die Plausibilität der Interpolation und der Simulationsergebnisse verbessert werden konnte. Dies wird in Kapitel 3.2 genauer erläutert.

Abbildung 3-1 zeigt die Lage der zur Verfügung stehenden Messstationen sowie die Schwerpunkte der 54 bearbeiteten Flussgebiete, wobei die Verbindungslinien anzeigen, welche Messstationen für welche Flussgebiete verwendet wurden. Während die Details der Stationsauswahl an dieser Stelle nicht relevant sind, ist doch klar ersichtlich, dass zur Gewährleistung einer klimatisch plausiblen Interpolation im westlichen Teil der Schweizer Alpen und Voralpen keine Stationen südlich des nördlichen Alpenkamms ausgewählt wurden. Gleichzeitig ist auch erkennbar, dass die höchstgelegenen Gebietsanteile der alpinen und voralpinen Gebiete nur unzureichend durch zeitlich hochauflösende ANETZ-Stationen repräsentiert sind. Dies schafft einige Schwierigkeiten in der Herstellung plausibler Höhengradienten für den Niederschlag, auf welche in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels eingegangen wird.

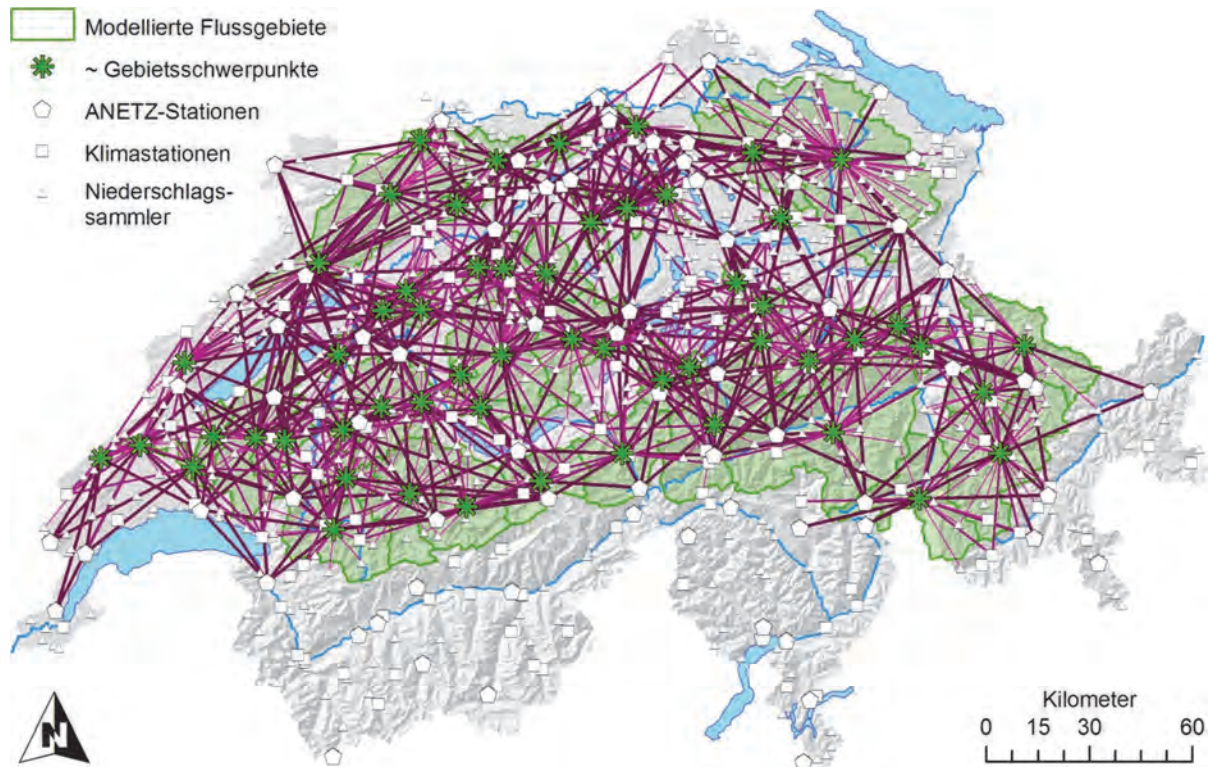


Abbildung 3-1. Lage der zur Verfügung stehenden Messstationen der MeteoSchweiz (2009) und Verwendung in der meteorologischen Interpolation für PREVAH. Die Linien verbinden die Gebietsschwerpunkte der 54 bearbeiteten Flussgebiete mit den jeweils verwendeten Messstationen.

Pro Einzugsgebiet wurden im Durchschnitt 8 ANETZ-Stationen, 5 Klimastationen und 12 Niederschlagssammler als Interpolationsgrundlage verwendet, wobei entsprechend der sehr unterschiedlichen Gebietsgrössen eine Spannweite von 4–12 ANETZ-Stationen, 3–7 Klimastationen und 6–46 Niederschlagssammlern zu verzeichnen ist. Die meisten Stationen wurden im Flussgebiet der Thur verwendet.

3.2 Vorgenommene Anpassungen

Während sich das oben beschriebene Auswahlverfahren für die meisten hier bearbeiteten Flussgebiete bewährt hat, musste in einigen Fällen eine Anpassung der Stationsauswahl vorgenommen werden. Eine solche Anpassung war dann angezeigt, wenn sich der Höhenverlauf des für die Simulation mit PREVAH interpolierten unkorrigierten Gebietsniederschlags deutlich von demjenigen Höhenverlauf unterschied, welcher sich aus der langjährigen Niederschlagsklimatologie von *Schwarb et al.* (2001) (HADES-Tafel 2.6) ableiten lässt. In diesen Fällen wurden ANETZ-Stationen hinzugefügt oder entfernt, bis der Höhenverlauf des Niederschlags plausibel war. Dabei wurde jeweils auch eine komplette hydrologische Simulation durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls beurteilt wurden. Wo keine Abflussmessungen zum Vergleich zur Verfügung standen, dienten die Wasserbilanzwerte von *Schädler und Weingartner* (2002) (HADES-Tafel 6.3) als Referenz. Abbildung 3-2 veranschaulicht die Situation vor und nach einer solchen Anpassung anhand der Surb; dieses Beispiel wird in Kapitel 3.2.6 besprochen.

3.2.1 Bibere

Bei der Bibere trat im mittleren Höhenbereich (500–600 m ü. M.) eine Überschätzung des Gebietsniederschlags um 200 bis 300 mm a⁻¹ auf, was einem Fehler von etwa 25% entspricht. Durch Hinzufügen der ANETZ-Stationen Fahy (Distanz 58 km, Stationshöhe 596 m ü. M.) und La Chaux-de-Fonds (34 km, 1 018 m ü. M.) konnte diese Abweichung praktisch eliminiert werden. Da der erwähnte Höhenbereich einen Anteil von 61% an der gesamten Gebietsfläche hat, ergeben sich durch die Ergänzung der Stationen auch Verbesserungen in der Plausibilität der hydrologischen Simulation.

3.2.2 Jogne

Für die Jogne bestanden in Höhen oberhalb von 1 100 m ü. M. konstant grösser werdende Abweichungen von der Referenz, die bis auf +500 mm a⁻¹ oder ca. +30% anwachsen. Das Gebiet wurde

folglich ohne die ANETZ-Station Chasseral (Distanz 60 km, Höhe 1 599 m ü. M.) aufbereitet, was einen deutlich plausibleren Höhenverlauf des Niederschlags brachte. Anzumerken ist, dass Gebietsniederschlag und Gebietsabfluss im Vergleich zu den Werten von *Schädler und Weingartner* (2002) (HADES-Tafel 6.3) bereits in der Ausgangsversion um 25% resp. 19% unterschätzt werden. Diese Unterschätzung vergrößert sich mit dem verbesserten Niederschlagsinput auf 37% resp. 32%. Es sollte aber beachtet werden, dass *Schädler und Weingartner* (2002) die Wasserbilanzwerte für die Jogne (Bilanzierungsgebiet 20-260) in der tiefsten Plausibilitätsklasse 3 („mittlere Plausibilität“) ansiedeln. Beim HQ₁₀₀ liegen die verbesserten Werte leicht unter den Vergleichswerten aus HQx_meso_CH, während zuvor eine noch etwas bessere Übereinstimmung erreicht wurde. Im Falle der Jogne liegen leider nur Abflussmessungen für den Zeitraum 1917–1920 vor, wodurch die Plausibilität der hydrologischen Simulation nicht abschliessend beurteilt werden konnte. Somit war die Auswahl einer Interpolationsvariante für die Gebietsmeteorologie nicht möglich. Die Erfahrung aus den anderen in diesem Kapitel vorgestellten Gebieten hat aber gezeigt, dass ein plausibler Höhenverlauf des Niederschlages insgesamt vorteilhaft für die hydrologische Simulation ist. Deshalb wurde auch bei der Jogne die verbesserte Interpolationsversion verwendet.

3.2.3 Kander

Die Kander zeigte mit Standardinterpolation der Meteorologie eine starke Überschätzung des Niederschlags in grossen Höhen. Hier konnte durch Weglassen der ANETZ-Station Grimsel-Hospitz (Distanz 55 km, Höhe 1 980 m ü. M.) eine markante Verbesserung erreicht werden, auch wenn so der Höhenbereich oberhalb von 2 000 m ü. M. nicht mehr mit Messwerten abgedeckt ist (die ANETZ-Station Jungfrauoch liefert keine Niederschlagswerte). Der Gebietsniederschlag sank von 2 040 mm a⁻¹ auf 1 611 mm a⁻¹, was im Vergleich zum von *Schädler und Weingartner* (2002) bestimmten Wert von 1 596 mm a⁻¹ eine Reduktion der Abweichung von +40% auf +1% bedeutet. Die Verbesserungen in der hydrologischen Simulation waren markant und selbst in den Gütemassen für das Gesamtgebiet Kander-Hondrich (Einzugsgebiet 20-114+ [20-110+]) deutlich zu erkennen.

3.2.4 Minster und Sihl

Bei Minster und Sihl trat eine deutliche Überschätzung des Niederschlags in grossen Höhen auf, welche im obersten Höhenband gegen 40% betrug. Abhilfe schaffte eine neue Interpolation mit Hinzufügen der ANETZ-Stationen Gütsch (Distanz 46 km, Höhe 2 287 m ü. M.), Napf (67 km, 1 406 m ü. M.) und Pilatus (43 km, 2 106 m ü. M.). Obwohl diese Stationen relativ weit vom Gebietschwerpunkt entfernt sind, konnte eine wesentliche Verbesserung des Niederschlagsverlaufs mit der Höhe erreicht werden. Bei den Hochwasserabschätzungen ergaben sich dadurch aber kaum Veränderungen, da die vor allem betroffenen grossen Gebietshöhen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtfläche des Flussgebietes haben (beispielsweise liegen nur 15% des Flussgebietes oberhalb von 1 800 m ü. M.).

3.2.5 Sernft

Der klar zu steile Höhengradient im Flussgebiet der Sernft konnte durch Hinzufügen der ANETZ-Station Gütsch (Distanz 53 km, Höhe 2 287 m ü. M.) korrigiert werden. Dabei liess sich der Fehler im unkorrigierten Gebietsniederschlag von +11% auf weniger als +1% verringern (Referenz: *Schwarb et al.*, 2001). Die Auswirkungen auf die Ergebnisse der hydrologischen Simulation waren relativ gering, brachten aber im mittleren Jahresabfluss für das Gesamtgebiet (Einzugsgebiet 40-036 [40-030]) eine Reduktion der Abweichung von der Referenz (*Schädler und Weingartner*, 2002) von +12% auf +2%.

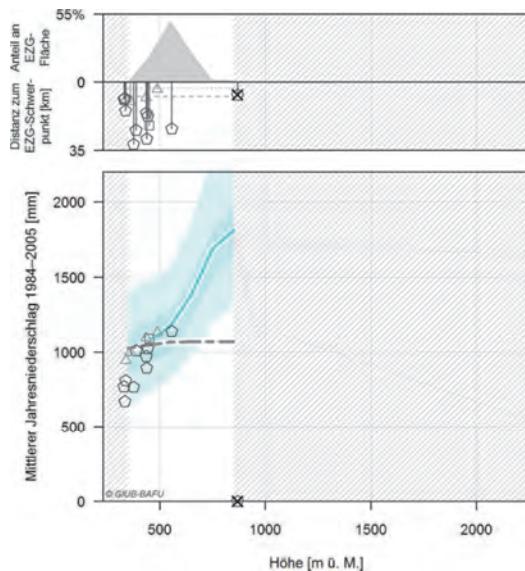
3.2.6 Surb

Bei der Surb entstand unter Verwendung des Standardauswahlverfahrens ein unplausibel starker Höhengradient, weil für die Interpolation kaum Stationen in den höheren Gebietslagen zur Verfügung stehen. Zudem sind für die ANETZ-Station Lägern (Distanz 7 km, Höhe 868 m ü. M.) keine Niederschlagswerte verfügbar. In diesem Fall half das Hinzufügen der relativ weit entfernten ANETZ-Stationen Napf (65 km, 1 407 m ü. M.), Pilatus (61 km, 2 106 m ü. M.) und St. Gallen (82 km, 779 m ü. M.). Die Abweichung vom Referenzwert des Gebietsniederschlags von 1 070 mm a⁻¹ (gemäss *Schädler und Weingartner*, 2002) reduzierte sich von +15% auf +6%, und der Fehler im HQ₁₀₀ verringerte sich von +58% auf +30%. Die ursprüngliche und die verbesserte Stationsauswahl sowie die zugehörigen Höhenverläufe des Niederschlags sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

a)



b1)



b2)

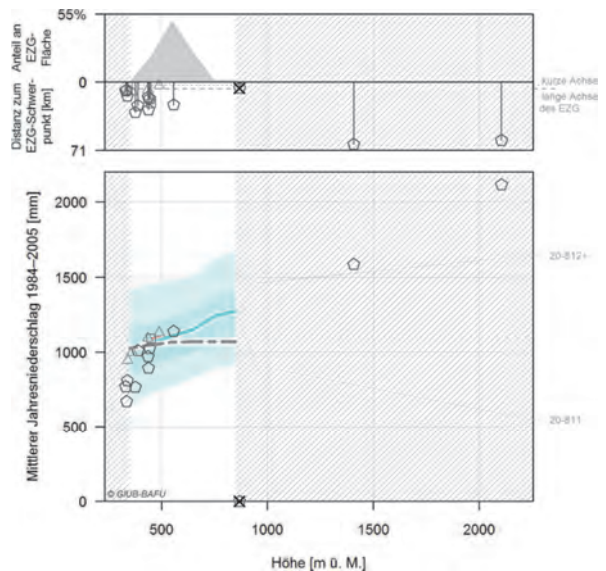


Abbildung 3-2. Anpassung der Stationsauswahl am Beispiel der Surb (vgl. Kapitel 3.2.6); a) zeigt Lage und Höhenlage der verwendeten Stationen, b1) den Höhenverlauf des Niederschlags vor der Anpassung und b2) den verbesserten Höhenverlauf nach der Anpassung.

3.2.7 Erfolgreiche Anpassungen

Generell hat sich gezeigt, dass Verbesserungen in der Modellmeteorologie bei grossen Flussgebieten viel schwieriger zu erreichen sind, da bei der Interpolation standardmässig bereits zahlreiche ANETZ-Stationen berücksichtigt werden. Der Spielraum für Ergänzungen ist somit gering. Ein Spezialfall ist das Gebiet der Kander (vgl. Kapitel 3.2.3), wo das Weglassen der ANETZ-Station Grimsel-Hospitz eine markante Verbesserung brachte, weil die Stationswerte für das Gebiet offenbar nicht repräsentativ sind. Wenig lohnenswert ist eine Korrektur, wenn der betroffene Höhenbereich nur geringen Anteil an der Gesamtfläche des Flussgebietes hat. Plausiblere Höhenverläufe des Niederschlags bringen in solchen Fällen kaum Veränderungen in den Ergebnissen der hydrologischen Modellierung. Ein Bei-

spiel dafür ist das Flussgebiet der Emme, wo sich eine Anpassung der Stationsauswahl kaum auf die – notabene bereits guten – Simulationsresultate auswirkte.

3.3 Güte des unkorrigierten Niederschlages

Im Folgenden wird die Güte des interpolierten Niederschlages besprochen, wie er sich nach Vornahme der oben geschilderten Anpassungen präsentiert und als Grundlage für die Simulationen dient. Die Angaben in diesem Abschnitt beziehen sich dabei ausschliesslich auf den unkorrigierten Niederschlag, welcher erst im Rahmen der eigentlichen Modellierung eine windabhängige Messfehlerkorrektur sowie eine über zwei freie Parameter einstellbare Wasserbilanzkorrektur erfährt (Viviroli *et al.*, 2007). Eine genaue Beurteilung der für die Modellierung relevanten korrigierten Niederschlagsmengen wird in Kapitel 4.1.1 vorgenommen.

Als Referenz dienen konsequenterweise die Werte der unkorrigierten langjährigen Niederschlagsklimatologie, welche Schwarb *et al.* (2001) in der HADES-Tafel 2.6 publiziert haben. Es muss beachtet werden, dass sich die Werte von Schwarb *et al.* (2001) auf die Periode 1971–1990 beziehen, während die hier für PREVAH verwendeten Niederschlagswerte für die Periode 1984–2003 ausgewertet werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass insbesondere die eminent wichtige Höhenverteilung der Niederschläge gemäss Schwarb *et al.* (2001) auch für die hier vorgenommene Interpolation als Orientierung dienen kann.

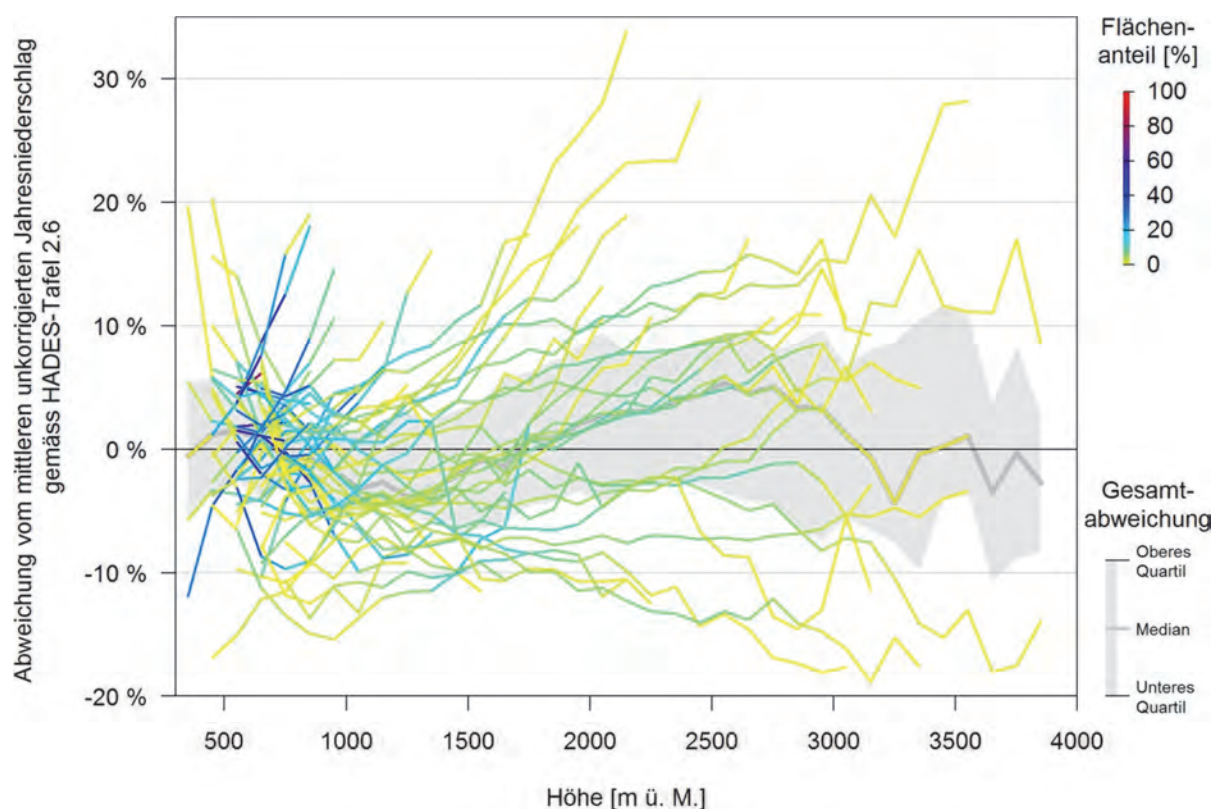


Abbildung 3-3. Abweichung der mittleren unkorrigierten Jahresniederschläge, die als Input für die Simulation mit PREVAH interpoliert wurden, von den aus Schwarb *et al.* (2001) (HADES 2.6) abgeleiteten Referenzwerten nach Höhenzone. Jede Linie entspricht einem der 54 simulierten Flussgebiete. Die Linienfarbe gibt an, welchen Flächenanteil ein Flussgebiet in der entsprechenden Höhenlage hat.

Abbildung 3-3 zeigt die Abweichungen der interpolierten Modellmeteorologie von den aus Schwarb *et al.* (2001) abgeleiteten Werten – wie erwähnt handelt es sich um unkorrigierte Niederschlagsdaten – in Abhängigkeit der Höhenlage für alle betrachteten 54 Flussgebiete. Vorerst ist ersichtlich, dass die Abweichungen mit zunehmender Höhenlage tendenziell grösser werden. Zudem sind die Überschätzungen etwas grösser als die Unterschätzungen. Beides ist durch die räumliche Verteilung des meteorologischen Messnetzes erklärbar: Einerseits ist das Stationsnetz in tiefen Lagen der Schweiz wesentlich dichter (Viviroli *et al.*, 2011), andererseits führt die in der Aufbereitung implizit vorgenommene Extrapolation von in tieferen Lagen beobachteten Höhengradienten in grosse Höhen eher

zu Überschätzungen, weil der Höhengradient Niederschlags mit zunehmender Gebietshöhe abflacht (Lang, 1985). Insgesamt sind Abweichungen von knapp -20% bis zu etwas über +30% zu beobachten. Vor der gezielten Anpassung einzelner Gebiete (Kapitel 3.2) waren Abweichungen von bis zu +40% zu verzeichnen. Die mediane Abweichung (dunkelgraue Linie in Abbildung 3-3) bewegt sich über das gesamte Höhenband hinweg zwischen -4% und +5%. Der entsprechende Quartilsbereich (graue Fläche) umfasst -11% bis +12%. In Anbetracht der recht unterschiedlichen Detaillierungsgrade der beiden verglichenen Niederschlagscharakterisierungen und der sehr unterschiedlichen Datengrundlagen kann dies als hinreichend gute Übereinstimmung beurteilt werden.

Ebenfalls in Abbildung 3-3 dargestellt sind die Flächenanteile, welche die Flussgebiete in der jeweiligen Höhenlage besitzen. Hier wird deutlich, dass die grossen Abweichungen vor allem dort auftreten, wo die Gebiete geringe Flächenanteile haben. Im Höhenbereich von 500 bis 1 000 m ü. M., welcher in vielen Gebieten den bedeutendsten Flächenanteil einnimmt, sind die Unterschiede wesentlich geringer. Abweichungen von mehr als 10% treten lediglich in 11% der gesamten betrachteten Gebietsfläche auf, was das Ausmass der Unterschiede weiter relativiert.

Als Vertiefung der oben ausgeführten summarischen Diskussion zeigen Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 für alle 450 modellierten Einzugsgebiete die Unterschiede zwischen den mittleren jährlichen unkorrigierten Niederschlagswerten in der Modellmeteorologie und den Werten gemäss *Schwarb et al.* (2001). Der Median der Unterschiede beträgt 5.2 mm a^{-1} und somit weniger als ein Prozent der Jahresniederschlagsmenge; der Quartilsbereich liegt zwischen -4% und +5%. Die Differenzen weisen weder mit der Niederschlagsmenge noch mit der Gebietsgrösse einen deutlichen Zusammenhang auf (Abbildung 3-4). Bei Betrachtung der mittleren Gebietshöhe (Abbildung 3-5) fällt aber auf, dass sich die Streuung der Unterschiede bei zunehmender mittlerer Gebietshöhe vergrössert. Unterhalb von 1 000 m mittlerer Gebietshöhe betragen die Unterschiede meist weniger als 10%. Doch auch oberhalb 1 000 m sind nur wenige Differenzen von über 20% zu verzeichnen.

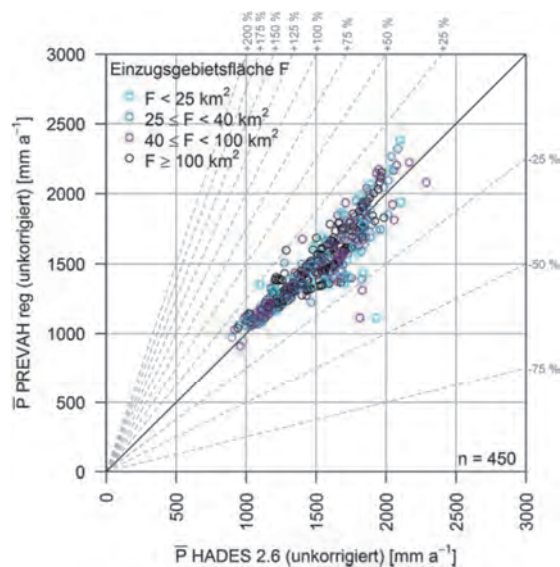


Abbildung 3-4. Mittlerer unkorrigierter Jahresniederschlag für die 450 simulierten Einzugsgebiete (Ordinate) im Vergleich zu den aus *Schwarb et al.* (2001) (HADES 2.6) abgeleiteten Referenzwerten (Abszisse). Die Punktfarbe zeigt die Einzugsgebietsgrösse an.

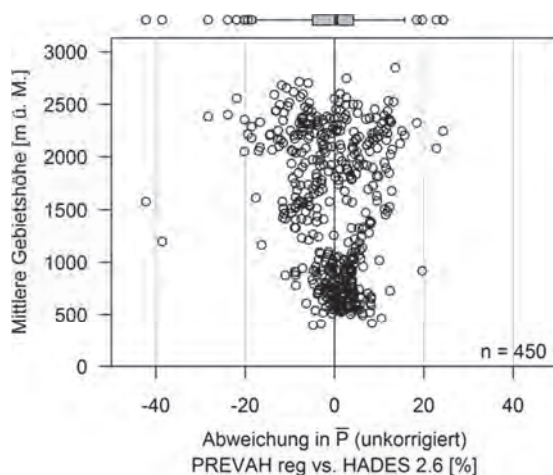


Abbildung 3-5. Abweichung des mittleren unkorrigierten Jahresniederschlags für die 450 simulierten Einzugsgebiete von den aus *Schwarb et al.* (2001) (HADES 2.6) abgeleiteten Referenzwerten, aufgetragen gegen die mittlere Gebietshöhe.

3.4 Ergänzende Hinweise zum Interpolations- und Simulationszeitraum

Für den vorliegenden Bericht wurde die Meteorologie für die Jahre 1983–2005 aufbereitet. Der Beginn beim 01.01.1983 liegt darin begründet, dass vor diesem Zeitpunkt in vielen Gebieten noch nicht ausreichend viele zeitlich hochauflösende ANETZ-Stationen zur Verfügung stehen (*Viviroli, 2007*). Das Ende wurde auf den 31.12.2005 festgelegt, weil ab 2005 grössere Umstellungen und Umbauten im Messnetz der MeteoSchweiz begannen (*MeteoSchweiz, 2005–2008*). Die dadurch entstehenden Inkonsistenzen in der Aufbereitung der Modellmeteorologie und insbesondere die Auswirkungen auf die Hochwasserabschätzung mit dem hier verwendeten Ansatz können erst eingehender untersucht werden, sobald einige Datenjahre des abschliessend umgebauten Messnetzes vorliegen.

Aus den Abflusssimulationen mit PREVAH sind insgesamt die 22 Jahre 1984–2005 auswertbar. Das erste Jahr 1983 dient als Initialisierungszeitraum zur Füllung der Modellspeicher. Bei vertieften Betrachtungen zur Simulations- und Extrapolationsgüte wird einheitlich der 20-jährige Zeitraum 1984–2003 verwendet, um die Vergleichbarkeit mit den von *Viviroli (2007)* erarbeiteten Grundlagen unmittelbar zu gewährleisten.

4 Güte von Simulation und Hochwasserabschätzung

4.1 Niederschlag und Abfluss

4.1.1 Niederschlag

Wie schon im vorangehenden Kapitel festgehalten, ist der Niederschlag massgeblich an der Güte der Ergebnisse von Simulation und Hochwasserschätzung beteiligt. Deshalb soll auch bei der Diskussion der Simulationsergebnisse mit dieser wichtigen Eingangsgrösse begonnen werden. Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.1 vorgenommenen Analysen zum unkorrigierten Niederschlag, wird hier aber der Niederschlag betrachtet, wie er nach einer Messfehlerkorrektur und Bilanzanpassung in das Modell eingegeben wird. Dazu werden die beiden freien Modellparameter PKOR und SNOKOR verwendet. Die Messfehlerkorrektur ist von den Windverhältnissen abhängig; sie wird für Regen und Schnee getrennt durchgeführt.

Als Referenz dienen die von *Schädler und Weingartner* (2002) in der HADES-Tafel 6.3 publizierten Werte. Die Autoren nahmen dort eine hydrologisch orientierte Abschätzung des Wasserhaushalts für die Bilanzierungsgebiete der Schweiz vor, indem sie den Niederschlag als Restglied aus Abfluss, Verdunstung und Speicheränderung ableiteten, und wo nötig und möglich regional abglichen.

Abbildung 4-1 zeigt den Vergleich zwischen korrigiertem und bilanzangepasstem Niederschlag für PREVAH und den Angaben *Schädler und Weingartner* (2002) für diejenigen 122 hier modellierten Einzugsgebiete, welche gleichzeitig auch Bilanzierungsgebieten des HADES entsprechen. Die zur Bilanzanpassung verwendeten freien Modellparameter (PKOR und SNOKOR) wurden über die Mittelwasservariante der Regionalisierung (regMQ) geschätzt. Vor dem Hintergrund der sehr unterschiedlichen Berechnungsweise der beiden Datenreihen kann die Übereinstimmung insgesamt als gut bezeichnet werden. Zu beachten ist dabei, dass *Schädler und Weingartner* (2002) ihren Werten unterschiedliche Plausibilitätsstufen zuordnen. Im Vergleich mit den in PREVAH verwendeten Werten zeigt sich, dass die grösseren Unterschiede meist in Gebieten beobachtet werden, deren Plausibilität eingeschränkt oder nicht bestimmbar ist. Bei Gebieten mit hoher Plausibilität sind tendenziell geringere Differenzen zu verzeichnen.

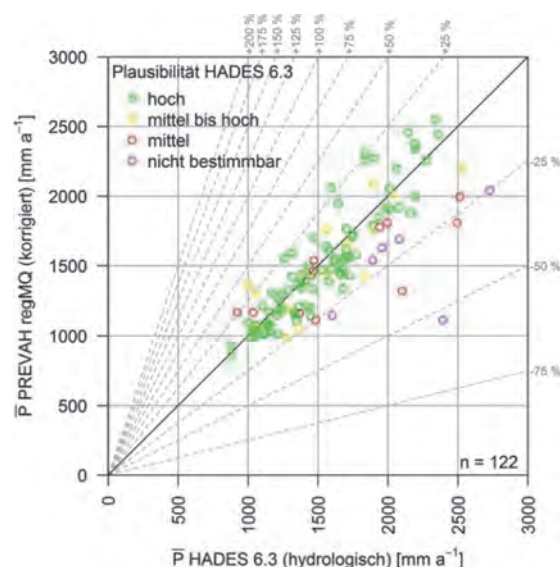


Abbildung 4-1. Mittlerer korrigierter Jahresniederschlag der Simulation im Vergleich mit Referenzwerten der HADES-Tafel 6.3 (*Schädler und Weingartner*, 2002) für 122 mit PREVAH modellierte Einzugsgebiete, welche sich mit Bilanzierungsgebieten gemäss HADES decken.

Abbildung 4-2 zeigt, dass bei der Mittelwasservariante der Regionalisierung (regMQ) im Vergleich zu *Schädler und Weingartner* (2002) im Mittel leicht geringere Gebietsniederschlagswerte angenommen werden. Die Unterschiede fallen auch bei der Hochwasservariante der Regionalisierung (regHQ) ähn-

lich aus, wobei durch die dort im Schnitt etwas höheren Bilanzkorrekturfaktoren (PKOR, SNOKOR) im Mittel leicht höhere Werte auftreten. Die Unterschiede bei der kalibrierten Modellversion (calMQ, calHQ) liegen in einem sehr ähnlichen Bereich, wobei beachtet werden muss, dass hier nicht dieselbe Grundgesamtheit an Gebieten beurteilt wird – es konnten hier nicht alle 140 von *Viviroli* (2007) kalibrierten Gebiete berücksichtigt werden, sondern nur diejenigen 105, welche sich mit Bilanzierungsgebieten gemäss HADES decken. Im Gegensatz zum bei den unkorrigierten Werten beobachteten Muster (Kapitel 3.3) ist hier in keiner Version der Parametersätze ein Zusammenhang der Unterschiede mit der mittleren Gebietshöhe auszumachen.

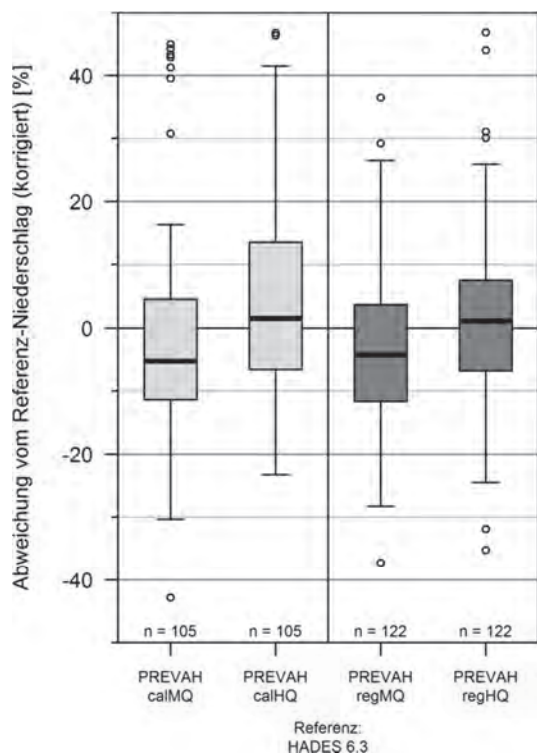


Abbildung 4-2. Prozentuale Abweichung des mittleren korrigierten Jahresniederschlags der Simulation von den Referenzwerten der HADES-Tafel 6.3 (Schädler und Weingartner, 2002). Berücksichtigt wurden alle mit PREVAH modellierten Einzugsgebiete, welche sich mit Bilanzierungsgebieten gemäss HADES decken. Links: Resultate des kalibrierten Modells (beurteilbar für 105 Einzugsgebiete) auf Basis des Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserparametersatzes (calHQ); Rechts: Resultate des regionalisierten Modells (beurteilbar für 122 Einzugsgebiete) in den Versionen Mittelwasser- (regMQ) und Hochwasserparametersatz (regHQ).

4.1.2 Abfluss

Nachdem die Plausibilität der Eingangsdaten für den Gebietsniederschlag belegt ist, kann die Charakteristika des mittleren Abflusses diskutiert werden.

Die erste Betrachtung (Abbildung 4-3) gilt der Abweichung des mittleren Jahresabflusses 1984–2003 zwischen der Simulation mit regionalisierten Modellparametern und der Beobachtung. Dieser Vergleich kann für 85 der 450 modellierten Einzugsgebiete vorgenommen werden, wobei die untersuchten Gebiete jeweils als unbeobachtet und unkalibriert betrachtet wurden und keinerlei Informationen in die Regionalisierung einbrachten (Jackknife-Prinzip, genauer erläutert in *Viviroli*, 2007). Die jeweils grössten Unterschätzungen des mittleren Jahresabflusses treten in Gebieten mit einer Einzugsgebietsfläche von weniger als 25 km² auf (hellblaue Signatur, jeweils untere rechte Hälfte der Grafik), die Streuung der Abweichungen fällt – in absoluten Werten betrachtet – bei grösseren Abflussmengen nDifferenzen aber in einem vertretbaren Rahmen, mit medianen Werten von -15 mm a⁻¹ (-2%) für die auf der Mittelwasser- und +49 mm a⁻¹ (+7%) für die auf der Hochwasserkalibrierung basierenden Regionalisierung. Dies entspricht der von *Viviroli* (2007) erreichten Güte der Regionalisierungsergebnisse in 49 repräsentativen Testgebieten mit langjährigen Messreihen (siehe ebenfalls Abbildung 4-5).

Die zweite Betrachtung (Abbildung 4-4) vergleicht die mittleren Jahresabflüsse 1984–2003 gemäss Simulation mit regionalisierten Modellparametern mit den Wasserbilanzwerten 1961–1990 von *Schädler und Weingartner* (2002) (HADES-Tafel 6.3). Dieser Vergleich ist für diejenigen 122 Einzugsgebiete möglich, welche sich mit Bilanzierungsgebieten gemäss HADES decken, was somit einen repräsentativen Überblick über die vorgenommenen Simulationen erlaubt. Wie schon bei der Betrachtung der Niederschläge (Abbildung 4-1) werden die grössten Unterschiede dadurch relativiert, dass sie in Gebieten auftreten, für welche *Schädler und Weingartner* (2002) eine eingeschränkte oder nicht bestimmbare Plausibilität festhalten. Die im Vergleich mit der Beobachtung verzeichnete Güte (Abbildung 4-3) kann bestätigt werden, wie auch Abbildung 4-5 anhand der relativen Abweichungen zeigt. Die medianen Unterschiede zu den Werten der HADES-Tafel 6.3 betragen -26 mm a⁻¹ (-3%) für

die Mittelwasservariante (regMQ) und $+36 \text{ mm a}^{-1}$ (+4%) für die Hochwasservariante (regHQ) der Regionalisierung.

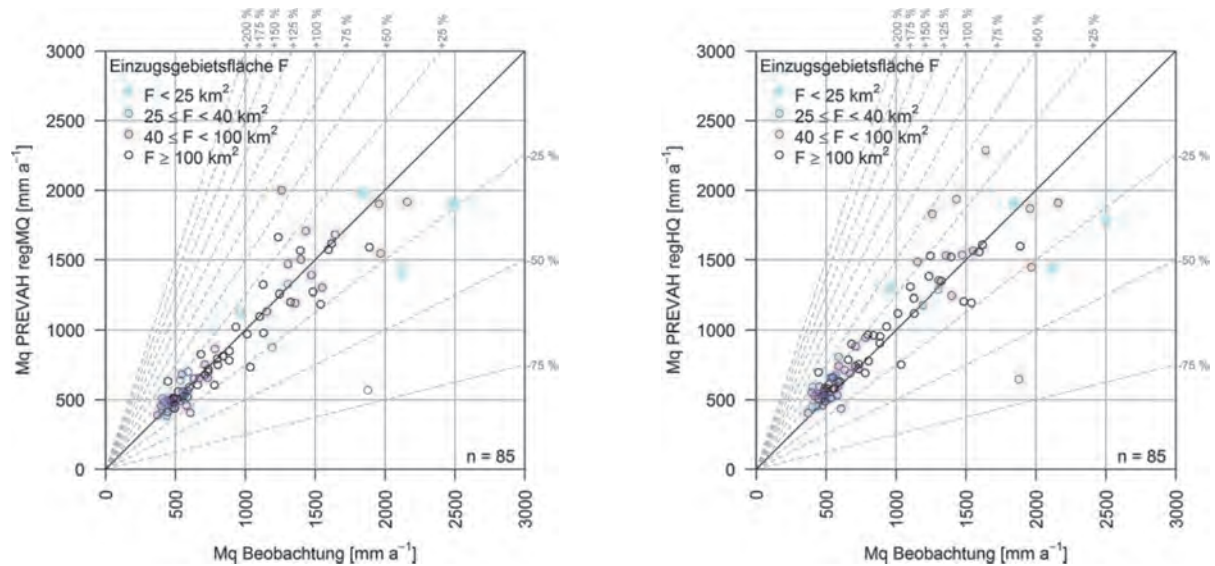


Abbildung 4-3. Vergleich der mit PREVAH simulierten mittleren Jahresabflusshöhen 1984–2003 (links: Mittelwasservariante, regMQ; rechts: Hochwasservariante, regHQ) mit den entsprechenden Werten aus der Beobachtung. Die Punktfarbe bezeichnet die Einzugsgebietsgrößenkategorie. Datengrundlage: 85 Einzugsgebiete mit Abflussmessungen.

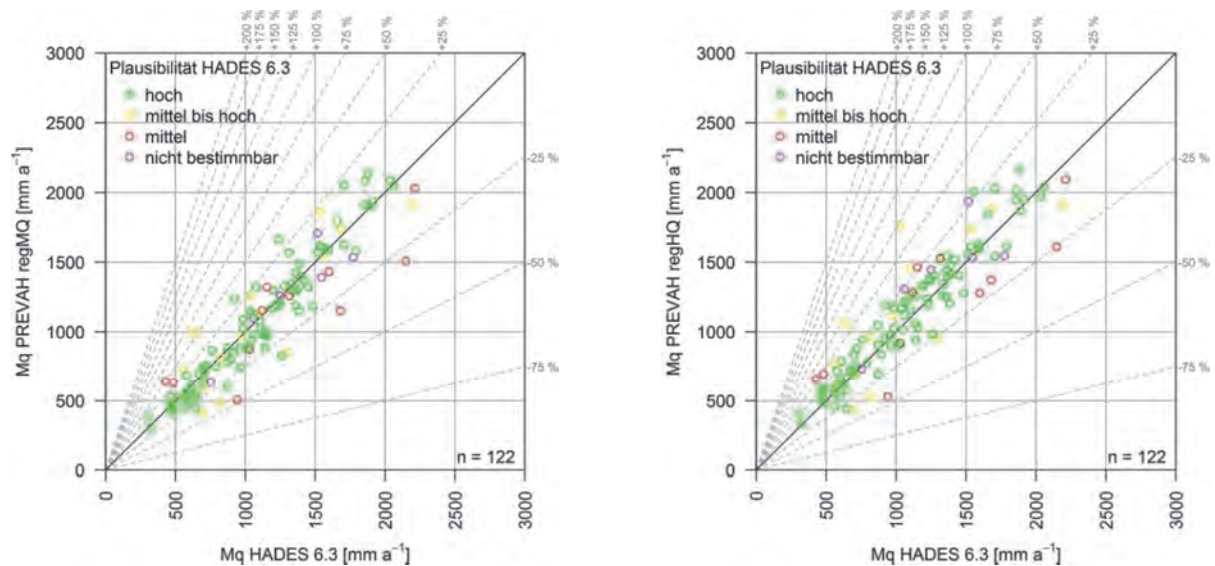


Abbildung 4-4. Vergleich der mit PREVAH simulierten mittleren Jahresabflusshöhen 1984–2003 (links: Mittelwasservariante, regMQ; rechts: Hochwasservariante, regHQ) mit Referenzwerten 1960–1991 gemäss Schädler und Weingartner (2002) (HADES-Tafel 6.3). Die von Schädler und Weingartner (2002) angegebene Plausibilität der Referenzwerte ist durch die Punktfarbe gekennzeichnet. Datengrundlage: 122 Einzugsgebiete, welche sich mit Bilanzierungsgebiete gemäss HADES decken.

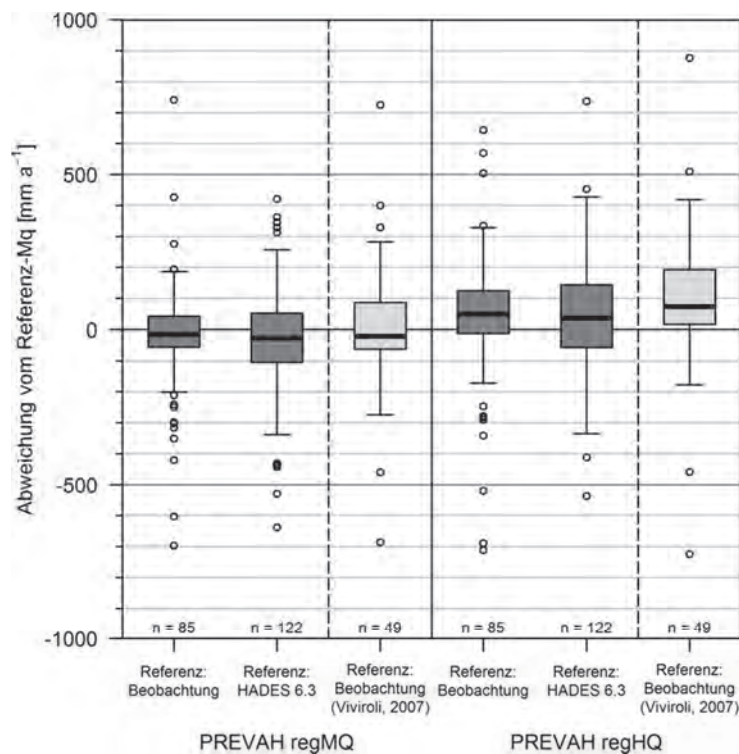


Abbildung 4-5. Abweichung der simulierten mittleren Jahresabflüsse 1984–2003 von verschiedenen Referenzwerten für die Mittelwasservariante (regMQ, linke Diagrammhälfte) und die Hochwasservariante (regHQ, rechte Diagrammhälfte) der Regionalisierung. Referenzwerte: Beobachtung (beurteilbar für 95 Einzugsgebiete) und Schädler und Weingartner (2002) (HADES-Tafel 6.3, beurteilbar für 122 Einzugsgebiete). Die beiden hellgrauen Boxplots beziehen sich auf die 49 von Viviroli (2007) untersuchten repräsentativen mesoskaligen Testgebiete (siehe Kapitel 2.3.2).

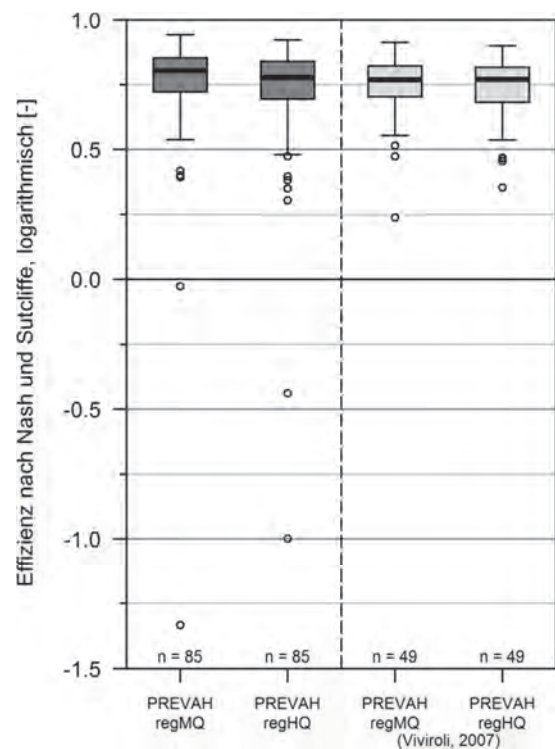
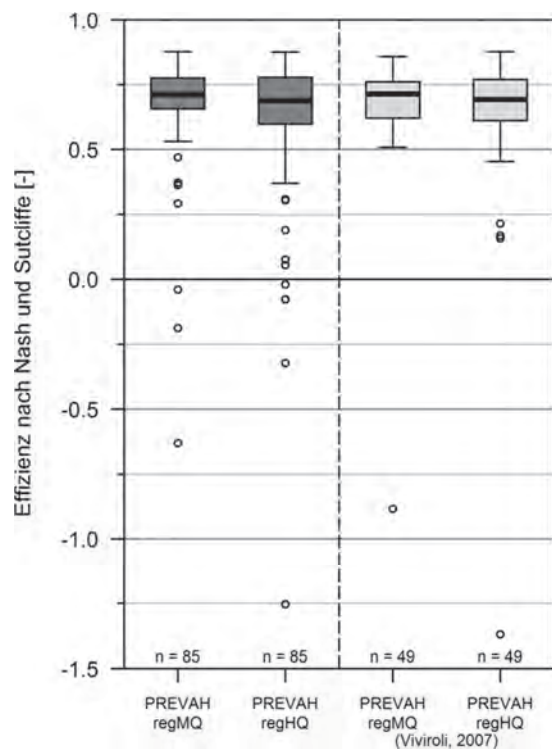


Abbildung 4-6. Nash-Sutcliffe-Effizienzen (linkes Diagramm: aus unveränderten Abflusswerten berechnet; rechtes Diagramm: aus logarithmischen Abflusswerten berechnet) der stündlichen simulierten Abflüsse 1984–2003, jeweils für die 85 mit Abflussdaten belegten Einzugsgebiete dieses Berichts (jeweils linke Diagrammhälfte) sowie für die 49 repräsentativen Testgebiete von Viviroli (2007) (jeweils rechte Diagrammhälfte). Die Parameter wurden mittels Regionalisierung geschätzt, regMQ bezeichnet die Mittelwasservariante, regHQ die Hochwasservariante der Parameterschätzung.

Vor dem Hintergrund der gut abgesicherten mittleren Jahreswasserbilanz können die simulierten Ganglinien nun mit Hilfe des Effizienzmasses nach Nash und Sutcliffe (1970) (NSE) beurteilt werden. NSE weist einen Wertebereich von $-\infty$ bis +1 auf, mit einer maximalen Güte bei einem Wert von 1. Eine Beurteilung ist für 85 der 450 bearbeiteten Einzugsgebiete möglich, für welche Beobachtungs-

daten vorliegen. Die medianen *NSE* betragen 0.71 für die Mittelwasservariante und 0.70 für die Hochwasservariante der Regionalisierung, was ungefähr den Resultaten der 49 repräsentativen Testgebiete von *Viviroli* (2007) entspricht (siehe Abbildung 4-6). Die Anwendung von *NSE* auf logarithmische Abflusswerte – das Gütemass reagiert damit sensitiver auf mittlere und tiefe Abflüsse – zeigt mediane Werte von 0.82 (Mittelwasservariante) und 0.78 (Hochwasservariante).

Zu allen in diesem Unterkapitel diskutierten Gütebetrachtungen des Abflusses muss angefügt werden, dass der 85 Gebiete umfassende Datensatz keine gezielt auf Repräsentativität hin zusammengestellte Auswahl darstellt: Von den insgesamt 450 modellierten Einzugsgebieten wurden diejenigen zusammengefasst, für welche beobachtete Abflüsse vorliegen. Im Gegensatz dazu wurden die 49 Testgebiete von *Viviroli* (2007) gezielt auf einen repräsentativen Querschnitt von hydrologischen, klimatologischen und physiogeographischen Bedingungen hin ausgewählt. Von den 85 erwähnten Einzugsgebieten sind jedoch immerhin 38 gleichzeitig repräsentative Testgebiete gemäss *Viviroli* (2007).

Aus den in diesem Kapitel präsentierten Resultaten lässt sich nun insgesamt ableiten, dass die hydrologische Plausibilität der Simulationen gegeben ist. Dies ist eine sehr wichtige Voraussetzung für die im Folgenden genauer betrachteten Hochwasserabschätzungen, welche im Endeffekt die zentrale Zielgrösse der hier erläuterten Simulationen sind.

4.2 Hochwasserabschätzung

4.2.1 Beurteilung anhand beobachteter Daten

Eine umfassende Gütebetrachtung zur Hochwasserabschätzung gestaltet sich insofern schwierig, als dass keine wirklich repräsentative Auswahl an Gebieten zur Verfügung steht. Im Folgenden wird dennoch ein Vergleich für Gebiete mit gemessenen Abflusswerten vorgenommen, wobei aber auf die bei der Interpretation zu berücksichtigenden Einschränkungen hinzuweisen ist. Auf die zum Teil beträchtlichen Unsicherheiten bei der Messung von Spitzenabflüssen (siehe z.B. *Eberhard et al.*, 2007) wird hier nicht eingegangen.

Beim folgenden Vergleich beziehen sich alle Werte – sowohl für die Simulation wie auch für die Beobachtung – auf die Jahresspitzenabflüsse der Periode 1984–2003, wobei nur diejenigen Einzugsgebiete berücksichtigt werden, für welche in der gesamten Periode Abflussbeobachtungen zur Verfügung stehen. Damit verringert sich die Zahl der bewertbaren Gebiete von 85 (siehe vorangehender Abschnitt) auf 61. Von diesen 61 Gebieten wurden 39 als repräsentative Testgebiete auch von *Viviroli* (2007) ausgewertet, wobei beachtet werden muss, dass für die Simulationen in der vorliegenden Studie eine neue Interpolation der Modellmeteorologie und eine neue Aufbereitung der Gebietseigenschaften vorgenommen wurde. Bei der Interpolation liegt der Unterschied zum Vorgehen von *Viviroli* (2007) darin, dass in der vorliegenden Arbeit übergreifende Flussgebiete mit den darin eingelagerten Einzugsgebieten bearbeitet wurden (Kapitel 3), wobei die Auswahl der Meteorostationen meist nicht exakt derjenigen von *Viviroli* (2007) entsprach. *Viviroli* (2007) betrachtete Einzugsgebiete oberhalb bestehender Messpegel, und diese Pegel liegen nicht immer ganz genau am Gebietsauslass eines Basis- oder Bilanzierungsgebietes. Die Unterschiede in den Gebietsflächen von *Viviroli* (2007) zu den hier über Basisgebiete definierten Einzugsgebieten bewegen sich zwischen -30% und +25%, die mittlere Differenz beträgt jedoch weniger als 1%.

Die restlichen 22 der insgesamt 61 hier betrachteten Gebiete, rund ein Drittel also, wurden von *Viviroli* (2007) nur als für ergänzende Betrachtungen geeignet eingestuft und bezüglich Hochwasserabschätzung nicht im Detail betrachtet.

Zur Beurteilung der Güte der Abschätzung wurden das mittlere Hochwasser (mHQ) und das grösste Hochwasser (HHQ) der 20-jährigen Periode sowie das extrapolierte 100-jährliche Hochwasser (HQ₁₀₀) beigezogen. Letzteres wurde sowohl für Beobachtung wie auch Simulation aus den 20 Jahresspitzenabflusswerten 1984–2003 extrapoliert. Um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten, kam dabei stets die Extremwertverteilung Typ 1 (E1) als Grundlage zum Einsatz, und die Schätzung der Verteilungsparameter erfolgte stets mit den wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (WGM). Die Details dazu finden sich in *Viviroli* (2007). In dieser Publikation wird auch gezeigt, dass sich das HQ₁₀₀ für eine Fehlerbewertung eignet, obwohl es strenggenommen ausserhalb des gemäss *DVWK* (1999) zulässigen Extrapolationsbereichs von $3 \times n$ Jahren liegt.

Basierend auf der oben erläuterten Datengrundlage zeigt Abbildung 4-7 die Abweichungen der Simulation von der Beobachtung. Die prozentualen Fehler der Hochwasserkennwerte zeigen dabei ein sehr ähnliches Muster, wobei der mediane Fehler für das HQ₁₀₀ – die Zielgrösse, auf welche hin das Simulationsverfahren im Endeffekt entwickelt wurde – mit -9% am geringsten ausfällt. Die Ergebnisse in den hier betrachteten 61 Gebieten sind denen der 49 repräsentativen Testgebiete von *Viviroli* (2007)

sehr ähnlich (siehe ebenfalls Abbildung 4-7), wobei 39 Gebiete, wie schon erwähnt, sowohl im hier untersuchten Datensatz (61 Gebiete) wie auch in demjenigen von *Viviroli* (2007) (49 Gebiete) berücksichtigt wurden, wenn auch auf Basis leicht anderer Gebietsdefinition und Modellmeteorologie.

Eine praktisch noch besser vorstellbare Zahl ist die Menge der Treffer und knappen Fehlschätzungen, welche aus der Modellanwendung auf die 61 betrachteten Gebiete resultiert (vgl. Kapitel 2.3.2). Dabei liegt das aus der Simulation geschätzte HQ_{100} für ungemessene Gebiete in 48% der Fälle innerhalb des statistischen 90%-Vertrauensintervalls des HQ_{100} , welches aus der Beobachtung geschätzt wurde (Treffer), und in weiteren 10% der Fälle überschneiden sich zumindest die 90%-Vertrauensintervalle von Simulation und Beobachtung (knappe Fehlschätzungen). Die Ergebnisse von *Viviroli* (2007) sind mit 51% Treffern und 12% knappen Fehlschätzungen wiederum sehr ähnlich.

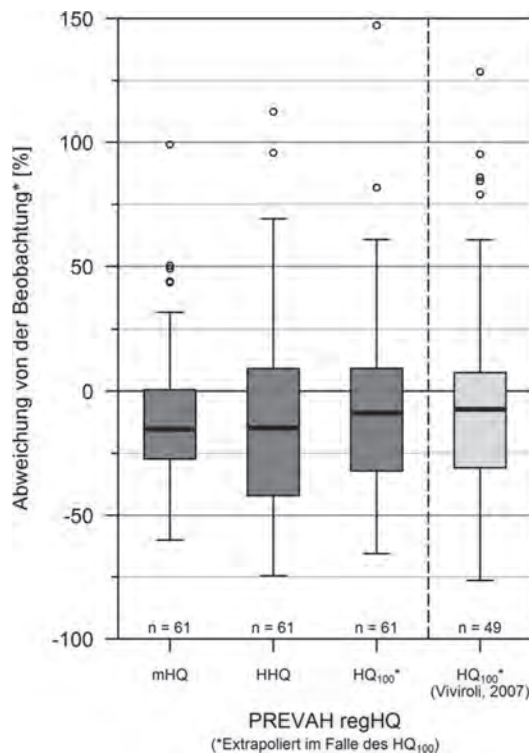


Abbildung 4-7. Abweichung der mit PREVAH simulierten Hochwasserkennzahlen der Periode 1984–2003 von der Beobachtung (MHQ: mittleres Jahreshochwasser; HHQ: grösstes Hochwasser; HQ₁₀₀: extrapoliertes 100-jährliches Hochwasser). Die Ergebnisse der dunkelgrau ausgefüllten Boxplots beziehen sich auf 61 Einzugsgebiete mit einer vollständigen beobachteten Abflussreihe 1984–2003. Der hellgrau ausgefüllte Boxplot zeigt zum Vergleich die von *Viviroli* (2007) erzielten Ergebnisse für 49 repräsentative mesoskalige Einzugsgebiete.

Die Detailbetrachtung der Fehler im HQ_{100} in Abhängigkeit der Fläche (Abbildung 4-8) zeigt, dass in Gebieten mit einer Fläche von weniger als 40 km² ausnahmslos Unterschätzungen verzeichnet werden, welche umso grösser ausfallen, je kleiner das Gebiet ist. Die Ergebnisse entsprechen in etwa denen von *Viviroli* (2007). Es kann ergänzt werden, dass Unterschätzungen vor allem bei sehr grossen spezifischen Abflusswerten häufig sind (Abbildung 4-9, links). Das Modellsystem gelangt hier an seine Grenzen, weil solche Extremabflüsse typischerweise durch kleinräumige Starkniederschlagszellen hervorgerufen werden. Solche Zellen werden durch das meteorologische Messnetz meist nur ungenügend erfasst; zudem ist die Fähigkeit von PREVAH zur Erzeugung einer sehr schnellen Abflussreaktion aufgrund der Modellstruktur limitiert. Abbildung 4-9 (rechts) belegt aber gleichzeitig, dass bei grossen absoluten Durchflussmengen keine systematischen Abweichungen vorliegen.

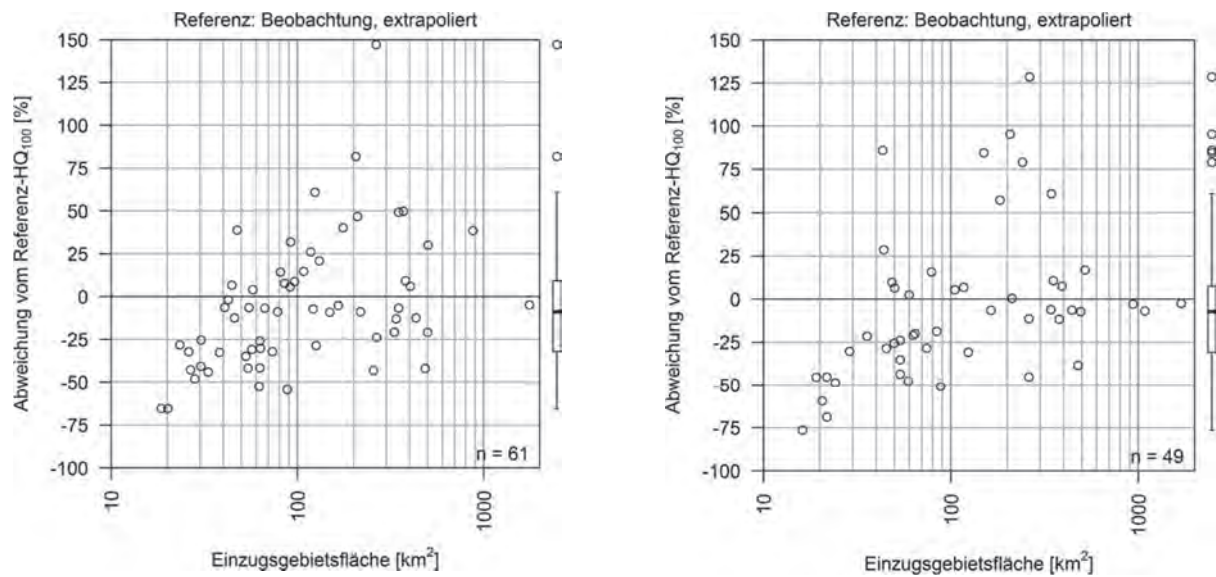


Abbildung 4-8. Vergleich der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ_{100} mit den aus der gleich langen Beobachtungsreihe extrapolierten HQ_{100} . Links: 61 Einzugsgebiete des vorliegenden Berichts, für welche Abflussmessungen vorliegen; rechts: 49 repräsentative Testgebiete gemäss Viviroli (2007) (jeweils unabhängig von Beobachtung getestet mit Jackknife-Methode).

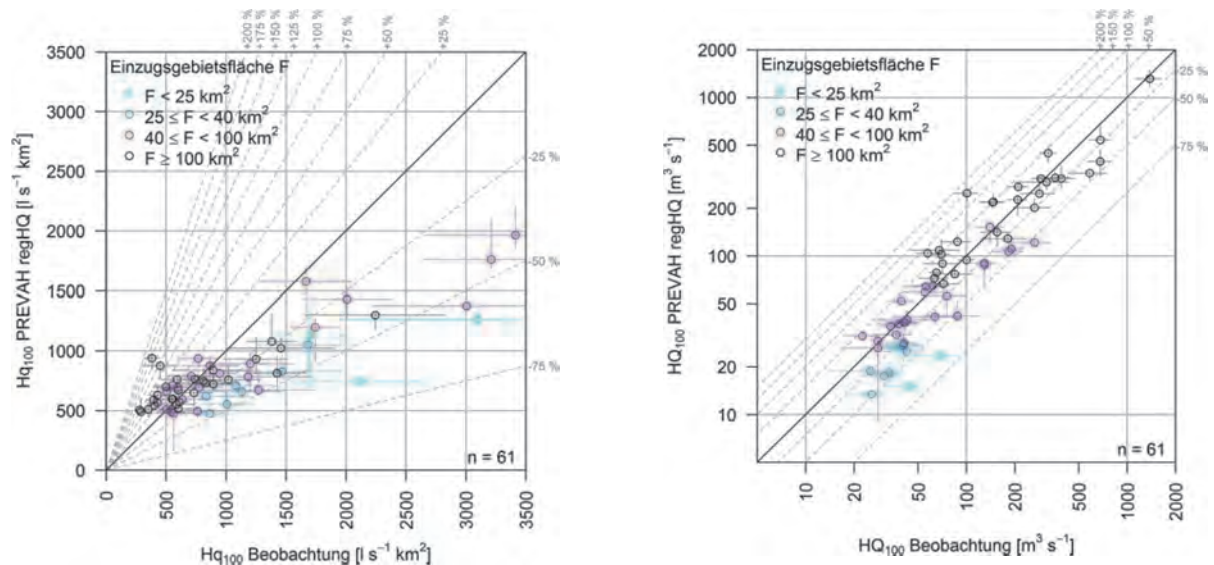


Abbildung 4-9. Vergleich der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ_{100} mit den aus der gleich langen Beobachtungsreihe extrapolierten HQ_{100} für die 61 Einzugsgebiete des vorliegenden Berichts, für welche Abflussmessungen vorliegen (unabhängig von Beobachtung getestet mit Jackknife-Methode); links: Abflussspenden; rechts: Durchflussmengen. Die horizontalen und vertikalen Spannbreitenlinien geben das statistische 90%-Konfidenzintervall der Extrapolation an.

Eine relevante Einschränkung der Schätzgüte muss in stark verkarsteten Gebieten berücksichtigt werden. Diese Problematik wurde bereits von Viviroli *et al.* (2009b) angesprochen, und sie bestätigt sich in der vorliegenden Untersuchung: In Gebieten, in welchen Karstgesteine gemäss Bitterli *et al.* (2004) (HADES-Tafel 8.6) mehr als 50% der FI-Ähre einnehmen, treten fast ausschliesslich Überschätzungen des HQ_{100} (Abbildung 4-10) auf. Im hier betrachteten Datenkollektiv bewegen sich die Überschätzungen zwischen +9% und +63%. Bei starker Verkarstung sollten die Resultate also mit besonderer Vorsicht interpretiert werden. Genauere Angaben dazu sind in Kapitel 5 zu finden, wo die Einschränkungen in der Modellanwendung zusammenfassend besprochen werden.

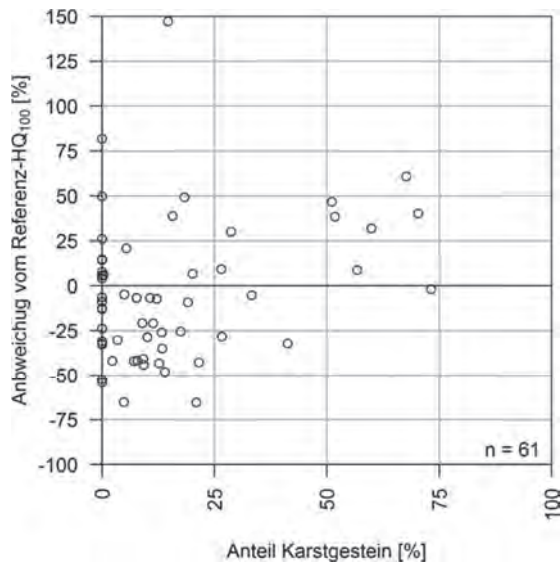


Abbildung 4-10. Abweichung der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ_{100} von den aus der gleich langen Beobachtungsreihe extrapolierten HQ_{100} für die 61 Einzugsgebiete des vorliegenden Berichts, für welche Abflussmessungen vorliegen (unabhängig von Beobachtung getestet mit Jackknife-Methode), aufgetragen gegen den Flächenanteil an Karstgesteinen.

Obwohl der ausgewertete Datensatz, wie schon erläutert, nicht explizit auf Repräsentativität hin zusammengestellt wurde (vgl. Kapitel 4.1.2), legen die obigen Erläuterungen doch nahe, dass das Modellsystem in der vorliegenden Anwendung auch im Hochwasserbereich gut verwertbare Resultate liefert. Ergebnishüte und Limitierungen sind mit den von *Viviroli* (2007) beschriebenen Eigenschaften sehr gut vergleichbar, trotz meteorologisch und physiogeographisch leicht anders aufbereiteter Gebiete.

4.2.2 Vergleich mit HQx_{meso_CH}

Für eine weitere, räumlich umfassende Einschätzung der Ergebnishüte im Hochwasserbereich kann man diejenigen Schätzwerte heranziehen, welche die im Programmpaket HQx_{meso_CH} (*Barben*, 2003; *Spreafico et al.*, 2003) enthaltenen Verfahren liefern. Lediglich für 8 der 450 modellierten Einzugsgebiete können wegen grösserer Auslandsanteile keine Schätzungen mit HQx_{meso_CH} vorgenommen werden. Beim Vergleich zwischen HQx_{meso_CH} und PREVAH muss aber unbedingt berücksichtigt werden, dass HQx_{meso_CH} verschiedene Schätzverfahren vereinigt und nicht eine Referenz im engeren Sinne darstellt, dass der Vergleich mit den hier erhaltenen Schätzungen also nur Hinweise auf allfällige Unterschiede geben kann und nicht als Fehlerbetrachtung im engeren Sinne verstanden werden darf. HQx_{meso_CH} beinhaltet fünf Verfahren, welche die Schätzung eines HQ_{100} erlauben: BaD7, GIUB'96(FN), GIUB'96(MQ), Kölla und Momente (siehe *Barben*, 2003). Als Schätzwert von HQx_{meso_CH} wird im Folgenden der Median der mit den erwähnten Verfahren vorgenommenen Schätzungen angegeben. Die Spannbreite der erhaltenen Schätzungen gibt Hinweise auf die Schätzunsicherheit.

Abbildung 4-11 zeigt den Vergleich der HQ_{100} -Schätzwerte aus der vorliegenden Studie mit HQx_{meso_CH} . Erkennbar ist, dass der Schätzwert von HQx_{meso_CH} bei grossen spezifischen Spitzenabflüssen und damit in eher kleinen Einzugsgebieten deutlich über demjenigen von PREVAH liegt (Abbildung 4-11, links). Als Hintergrund gilt es zu berücksichtigen, dass *Viviroli* (2007) bei HQx_{meso_CH} – zumindest im dort betrachteten repräsentativen Testdatensatz – eine leichte Tendenz zur Überschätzung des HQ_{100} feststellte. Gleichfalls muss beachtet werden, dass die fünf aus HQx_{meso_CH} verwendeten Verfahren eine beachtliche Spannbreite abdecken, in welcher der mit PREVAH geschätzte Wert oft enthalten ist. In der Darstellung der spezifischen Abflüsse kommt zudem nur ungenügend zum Ausdruck, dass mehr als 50% der Schätzwerte in beiden Verfahren unterhalb von ca. $1\,250\,l\,s^{-1}\,km^2$ liegen, und dass in diesem Bereich sehr viel geringere Unterschiede auftreten als bei grösseren Abflüssen. Diese starke Ballung von Werten wird in Betrachtung der absoluten Spitzenabflussmengen (Abbildung 4-11, rechts) aufgelöst, und es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen dem Median von HQx_{meso_CH} und der Schätzung von PREVAH bei grossen Durchflüssen und grossen Gebieten deutlich geringer sind. Die grosse Spannbreite der einzelnen Schätzungen von HQx_{meso_CH} ist hier indes noch deutlicher erkennbar.

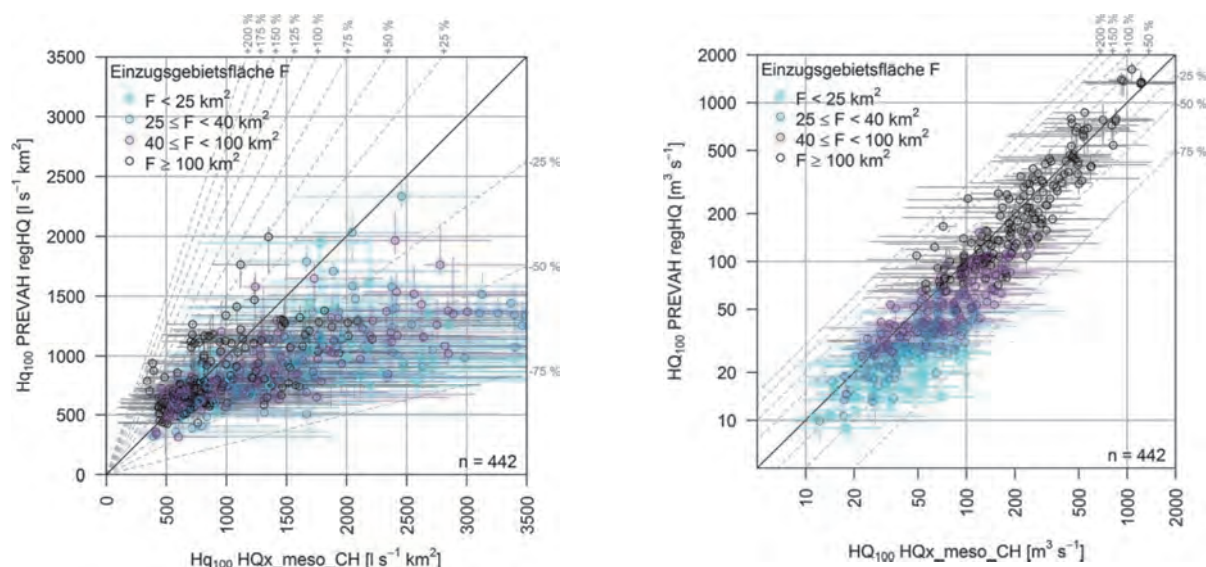


Abbildung 4-11. Vergleich der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ₁₀₀ mit den entsprechenden Schätzwerten aus HQx_meso_CH für 442 Einzugsgebiete. Links: Abflussspenden; Rechts: Durchflussmengen. Die vertikalen Spannbreitenlinien geben das statistische 90%-Konfidenzintervall der Extrapolation aus der Simulation an, die horizontalen Spannbreitenlinien bezeichnen den Bereich der mit HQx_meso_CH erhaltenen Schätzungen.

Mit dem obigen Vergleich sollen HQx_meso_CH und PREVAH keinesfalls gegeneinander ausgespielt werden. Vielmehr bestätigt sich erneut, dass die beiden Verfahren ergänzend verwendet werden können und dabei jeweils voneinander unabhängige Informationen über das Hochwasserverhalten eines Gebietes liefern können. Dabei müssen die Schätzwerte in einem zu untersuchenden Gebiet unbedingt untereinander und allenfalls mit Beobachtungsdaten ähnlicher Gebiete verglichen werden. Die umfassenden flussgebietsweisen Auswertungen dieses Berichts erleichtern eine solch umfassende Beurteilung wesentlich; diese Auswertungen werden in Kapitel 7 beschrieben, Hinweise zu ihrer Interpretation finden sich in den Kapiteln 5 und 6.

4.2.3 Beurteilung anhand von Hüllkurven

Eine weitere umfassende Einschätzung der Ergebnislage ist durch einen Vergleich mit den regional differenzierten Hüllkurven möglich, welche über das Verfahren GIUB'96(FN) (Kan, 1995; Weingartner, 1999) verfügbar sind. GIUB'96 basiert auf 717 Beobachtungen von maximalen Spitzenabflüssen (HHQ), welche vom Amt für Strassen- und Flussbau (ASF, 1974) sowie von der Landeshydrologie und -geologie (Spreafico und Stadler, 1986; Spreafico und Aschwanden, 1991) zwischen 1869 und 1991 gesammelt wurden. Aus diesem zeitlich und räumlich relativ heterogenen Datensatz wurden unter anderem zwei Grössen abgeleitet, welche für 15 Regionen differenziert bereitstehen:

- $Q_{max,90\%}$: 90%-Hüllkurve über das Datenkollektiv. Im Durchschnitt sind 10% der Werte grösser als dieser Wert, was den Einfluss von Ausreissern (auch durch Messfehler verursachte) vermindert. Für die im vorliegenden Bericht zusammengefassten Schätzungen kann eine deutliche Überschreitung des $Q_{max,90\%}$ ein Hinweis auf Plausibilitätsprobleme sein.
- $HHQ_{50\%}$: Regressionsgerade durch das Datenkollektiv. Weingartner (1999) konnte zeigen, dass das $HHQ_{50\%}$ einen guten Schätzer für den 100-jährlichen Spitzenabfluss (HQ₁₀₀) darstellt.

Ähnlich wie beim Vergleich mit HQx_meso_CH muss berücksichtigt werden, dass es sich bei $Q_{max,90\%}$ und $HHQ_{50\%}$ um die Ergebnisse eines weiteren – wenn auch in der Schweiz wichtigen und gut erprobten – Schätzverfahrens und nicht um Referenzwerte im engeren Sinne handelt. Zudem sollte beachtet werden, dass die Beobachtungszeiträume der für GIUB'96(FN) verwendeten Daten (insgesamt 12 744 Messjahre) sehr heterogen sind, sich ausnahmslos auf die Zeit vor 1991 beziehen und einen Schwerpunkt in der Periode 1951–1970 aufweisen, welcher insbesondere den hier betrachteten Skalenbereich von 10 bis 1 000 km² betrifft (Kan, 1995). Die Schätzwerte von PREVAH beziehen sich hingegen ausnahmslos aus dem Zeitraum 1984–2003.

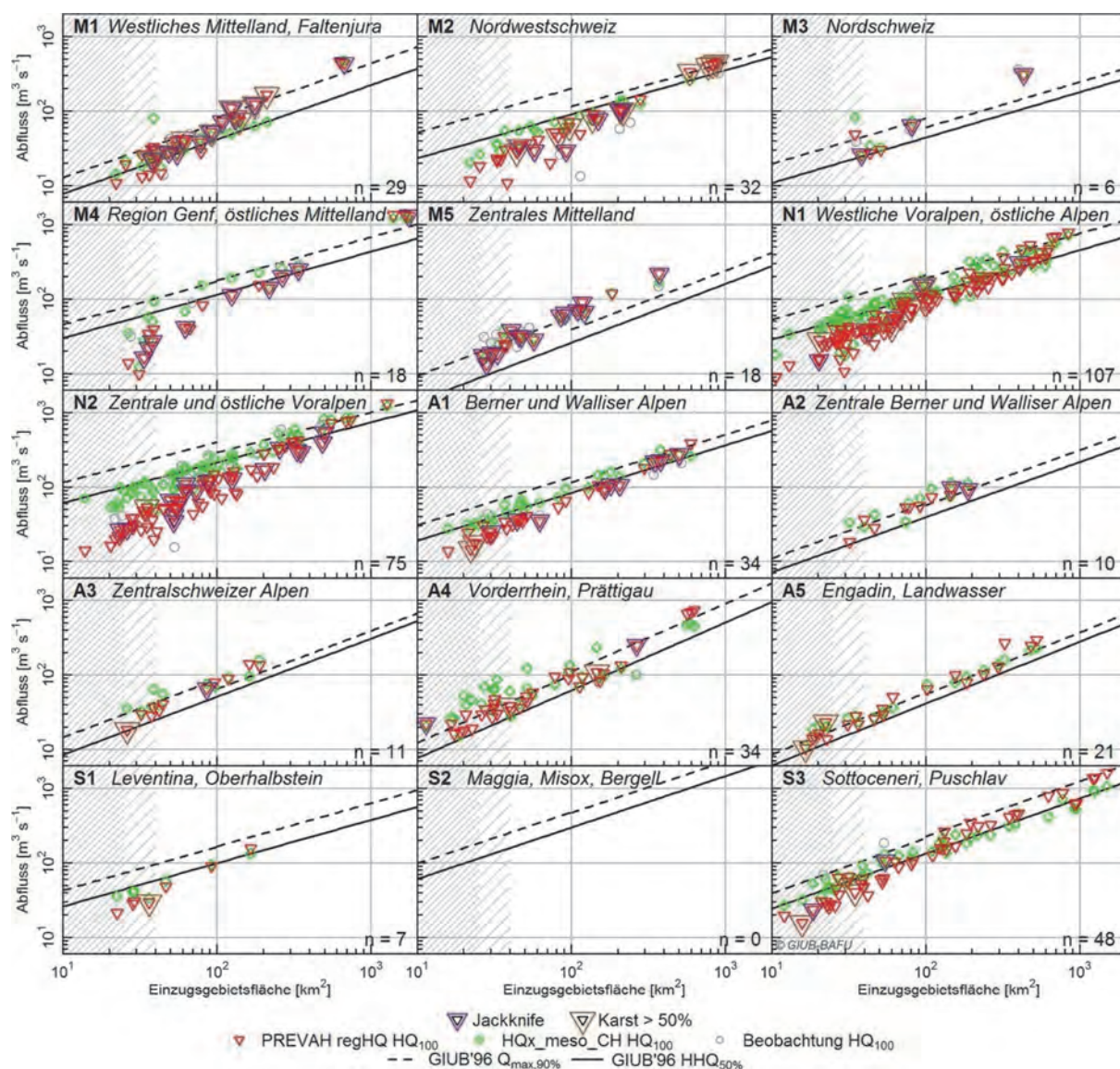


Abbildung 4-12. Einordnung der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ_{100} in das Verfahren GIUB'96(FN) für die insgesamt 450 simulierten Einzugsgebiete (rote Dreiecke). Zum Vergleich eingetragen sind die Schätzwerte aus HQx_meso_CH für 442 Einzugsgebiete (grüne Rauten) sowie die aus der Beobachtung 1984–2003 extrapolierten HQ_{100} für 61 Einzugsgebiete (graue Kreise). Die lockere Schraffur bezeichnet Einzugsgebietsflächen von weniger als 40 km^2 , wo mit einer deutlichen Unterschätzung des HQ_{100} gerechnet werden muss und die dichte Schraffur kennzeichnet den Bereich unterhalb von 25 km^2 , wo von einer Anwendung strikte abgeraten wird. Die mit n angegebene Grösse der Datenmenge, bezieht sich auf die mit PREVAH simulierten Einzugsgebiete.

Abbildung 4-12 zeigt den regional differenzierten Vergleich der aus PREVAH bestimmten Schätzungen des HQ_{100} mit den GIUB'96(FN)-Werten für $Q_{max,90\%}$ und $HHQ_{50\%}$. Ebenfalls eingetragen ist der aus den Beobachtungsdaten 1984–2003 extrapolierte Schätzwert (insgesamt 61 Gebiete) sowie der mediane Schätzwert der fünf in HQx_meso_CH zusammengefassten Verfahren (insgesamt 442 Gebiete) (vgl. Kapitel 4.2.2). Beim Schätzwert von HQx_meso_CH muss bedacht werden, dass eines der berücksichtigten Verfahren der Ansatz GIUB'96(FN) ist und mit GIUB'96(MQ) ein weiterer Ansatz auf demselben Datensatz basiert. Eine gute Übereinstimmung der Hüllkurven von GIUB'96(FN) mit den Schätzwerten von HQx_meso_CH bedeutet also nicht a priori eine grössere Sicherheit von $Q_{max,90\%}$ und $HHQ_{50\%}$.

In einigen Regionen ist über einen weiten Bereich von Einzugsgebietsgrössen eine grosse Übereinstimmung zwischen dem PREVAH- HQ_{100} und dem GIUB'96(FN)- $HHQ_{50\%}$ festzustellen, so beispielsweise in N1 (westliche Voralpen und östliche Alpen), A1 (Berner und Walliser Alpen), A2 (zentrale Berner und Walliser Alpen), A3 (Zentralschweizer Alpen), A4 (Vorderrhein, Prättigau), A5 (Engadin, Landwasser) und S3 (Sottoceneri, Puschlav). Deutlich höhere Werte werden mit PREVAH in M5

(zentrales Mittelland) geschätzt, leicht bis deutlich tiefere in M2 (Nordwestschweiz) und N2 (zentrale und östliche Voralpen). Vor dem Hintergrund von Modellaufbau und -struktur lassen sich keine systematischen Probleme und Abweichungsmuster identifizieren, und auch die Vertretung der Regionen in der für die Regionalisierung benutzten Kalibrierung (vgl. Kapitel 2.3.1) scheint nicht entscheidenden Einfluss auf die Unterschiede zu haben, da auch für schlecht vertretene Regionen (z. B. Sottoceneri und Puschlav) grosse Übereinstimmungen gefunden werden können.

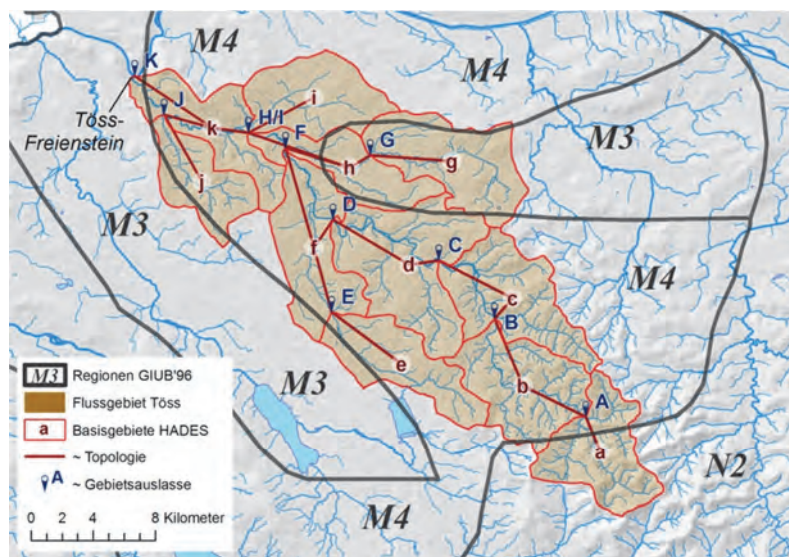
Für Gebiete mit einer Fläche von weniger als 50 bis 100 km² liefert PREVAH oft etwas tiefere Schätzwerte als GIUB'96(FN), was aufgrund der vorangegangenen Analysen tatsächlich durch eine Tendenz zur Unterschätzung des HQ₁₀₀ in kleinen Gebieten mitbedingt sein könnte. Deutlich tiefere Werte für den genannten Skalenbereich resultieren in M4 (Region Genf, östliches Mittelland).

Was die wenigen PREVAH-Werte betrifft, welche deutlich über dem $Q_{max,90\%}$ liegen, muss darauf hingewiesen werden, dass die Zuordnung zu den Hochwasserregionen von GIUB'96(FN) grossen Einfluss auf die Schätzwerte dieses Verfahrens hat. Die Zuordnung geschieht über die Koordinaten des Pegels, kann also selbst innerhalb eines Flussgebietes wechseln und somit an nahegelegenen Pegeln zu sehr unterschiedlichen Schätzwerten führen. Am deutlichsten zu sehen ist diese Problematik beim grössten PREVAH-Schätzwert der Region M3 (Nordwestschweiz), der – wie übrigens auch der aus der Beobachtung abgeleitete Wert – deutlich über dem $Q_{max,90\%}$ liegt und somit auf den ersten Blick unplausibel scheint. Der Datenpunkt gehört zum Flussgebiet der Töss (Abbildung 4-13, oben), dessen Teileinzugsgebiete hauptsächlich der Region M4 (Region Genf, östliches Mittelland) zugeordnet sind und dort sehr plausible Schätzwerte zeigen. Zwei Pegel werden jedoch M3 zugeordnet, wovon derjenige am nordwestlich gelegenen Gebietsauslass sich auf das Einzugsgebiet 10-555+ [10-550+] bezieht. Dieses Einzugsgebiet verfügt mit dem Messpegel Töss-Freienstein über langjährige Beobachtungsreihen. Während die entsprechenden Schätzwerte aus PREVAH und Beobachtung in M3 deutlich zu hoch erscheinen, sind sie in M4 völlig plausibel.

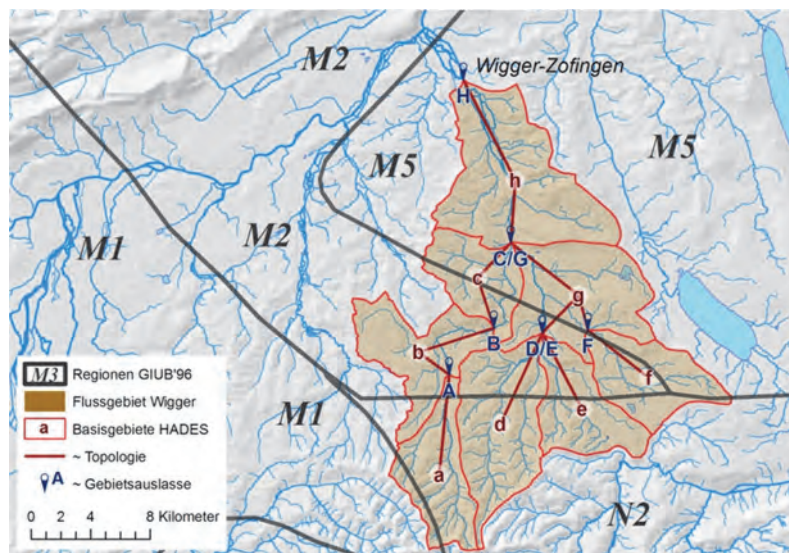
Ähnlich ist die Situation beim grössten PREVAH-Schätzwert in der Zone M5 (zentrales Mittelland), welcher dem Einzugsgebiet 20-713+ zugeordnet ist und klar über $Q_{max,90\%}$ liegt. Der Auslass des Einzugsgebietes deckt sich mit der Messstation Wigger-Zofingen (Abbildung 4-13, Mitte), für welche aus der Beobachtung ein ähnlich hoher Wert extrapoliert wird. Innerhalb der nahegelegenen Zone M2 (Nordwestschweiz) wären die Werte wiederum völlig plausibel. Zwar ist die Zuordnung zur Zone M5 hier eindeutig, doch weiter flussaufwärts gelegene Teile der Wigger werden in der Tat Zone M2 zugeordnet, ebenso wie die Aare, in welche die Wigger unterhalb von Zofingen mündet. Insgesamt werden 18 der 450 hier untersuchten Einzugsgebiete der Zone M5 zugeordnet (Abbildung 4-12), und für alle scheinen die mit PREVAH errechneten Schätzwerte zu hoch zu sein. Aufgrund der extrapolierten Beobachtungen wie auch der Schätzungen mit HQx_meso_CH muss davon ausgegangen werden, dass hier vielmehr der Schätzwert von GIUB'96(FN) zu tief liegt.

Die beiden leicht über $Q_{max,90\%}$ liegenden Werte in den grössten Einzugsgebieten der Zone M1 (Westliches Mittelland, Faltenjura) stammen von den Einzugsgebieten 20-604+ und 20-605+ [20-600+] der Emme (Abbildung 4-13, unten). Die meisten weiter flussaufwärts gelegenen Teilgebiete der Emme werden jedoch der Zone N2 (zentrale und östliche Voralpen) zugeschlagen, innerhalb welcher die PREVAH-Ergebnisse für 20-604+ und 20-605+ [20-600+] wiederum sehr plausibel wären. Der mediane Schätzwert von HQx_meso_CH deckt sich praktisch mit den PREVAH-Schätzungen. Vergleichbare Beobachtungsdaten liegen leider nicht vor, da die Messungen am Pegel Emme-Burgdorf 1990 beendet wurden. Wegen der Beeinflussung durch Seitenkanäle muss bei der Emme allerdings besonders vorsichtig vorgegangen werden. Die Seitenkanäle sind auch der Grund, wieso unterhalb von 20-605+ [20-600+] keine Schätzungen mit PREVAH vorgenommen wurden, auch wenn Viviroli (2007) für Emme-Wiler gute Ergebnisse vorweisen konnte.

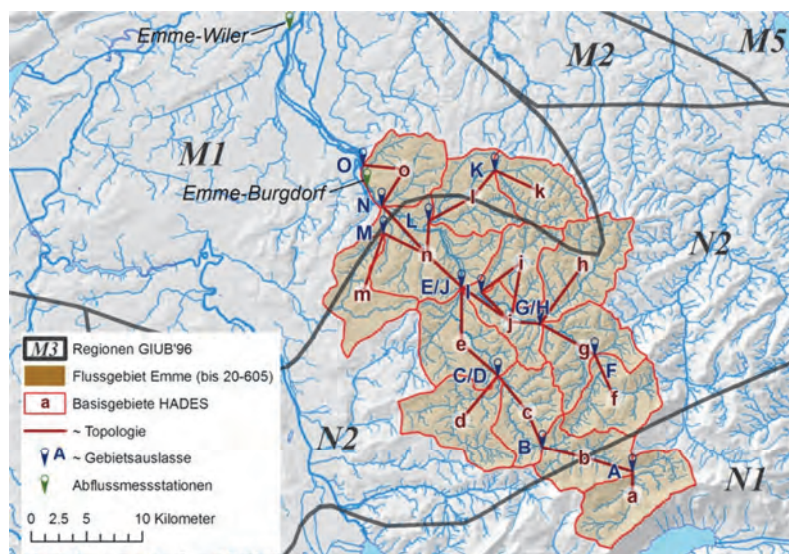
Die Zuordnung zu Gruppen aufgrund von Pegelkoordinaten ist also ein problematischer Punkt am ansonsten sehr gut erprobten GIUB'96-Verfahren.



Basisgebiet HADES	Einzugsgebiet PREVAH (Pegelname)
a 10-531	A 10-531
b 10-532	B 10-532+
c 10-533	C 10-533+ [10-530]
d 10-541	D 10-541+
e 10-542	E 10-542
f 10-543	F 10-543+ [10-540+]
g 10-551	G 10-551
h 10-552	H 10-552+
i 10-553	I 10-553
j 10-554	J 10-554
k 10-555	K 10-555+ [10-550+]



Basisgebiet HADES	Einzugsgebiet PREVAH (Pegelname)
a 20-691	A 20-691
b 20-692	B 20-692+
c 20-693	C 20-693+ [20-690]
d 20-701	D 20-701
e 20-702	E 20-702
f 20-703	F 20-703
g 20-704	G 20-704+ [20-700]
h 20-713	H 20-713+



Basisgebiet HADES	Einzugsgebiet PREVAH (Pegelname)
a 20-571	A 20-571
b 20-572	B 20-572+
c 20-573	C 20-573+ [20-570]
d 20-581	D 20-581
e 20-582	E 20-582+ [20-580+]
f 20-591	F 20-591
g 20-592	G 20-592+
h 20-593	H 20-593
i 20-594	I 20-594
j 20-595	J 20-595+ [20-590]
k 20-601	K 20-601
l 20-602	L 20-602+
m 20-603	M 20-603
n 20-604	N 20-604+
o 20-605	O 20-605+ [20-600+]

Abbildung 4-13. Zuordnung der Gebietsauslässe zu den Regionen des Verfahrens GIUB'96 für die Flussgebiete Töss (oben), Wigger (Mitte) und Emme (unten).

Einige fragwürdige Werte im Bereich von $Q_{max,90\%}$ oder leicht darüber sind auf die Karstproblematik zurückzuführen, welche schon in Kapitel 4.2.1 dieses Berichts angesprochen wurde und in Kapitel 6 nochmals beleuchtet wird. Insbesondere weist die Signatur in Abbildung 4-12 und in den in Kapitel 5 vorgestellten Resultatblättern auf den hohen Karstanteil von über 50% hin. So stammen die weiteren sehr hohen Werte in M1 denn auch von Teilgebieten der Suze, für welche *Viviroli* (2007) aufgrund des hohen Karstanteils eine Überschätzung durch PREVAH feststellte. Ebenso gehören die grössten mit PREVAH geschätzten Gebiete in M2 (Nordwestschweiz) zum relativ stark verkarsteten Gebiet der Birs, für welche die Schätzung mit PREVAH durch die Flächenanteile im Ausland zudem noch etwas erschwert wird.

In den Zonen N1 und A5 liefert PREVAH ebenfalls einige HQ_{100} -Schätzungen, die leicht über $Q_{max,90\%}$ liegen. Diese Werte stammen von Einzugsgebieten der Reuss und der Albula. Hier könnte eine Rolle spielen, dass sich die PREVAH-Werte auf die unbeeinflusste Situation beziehen, wohingegen im GIUB'96-Datensatz für diese Regionen beeinflusste Reihen zu finden sind (*Kan*, 1995). Dies dürfte auch in weiteren durch die Wasserkraft beeinflussten Regionen für einige Unterschiede zwischen PREVAH und GIUB'96(FN) verantwortlich sein, wie etwa im Flussgebiet des Vorderrheins (Region A4).

5 Ergebnisse für mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz (Resultatblätter)

Im Folgenden wird erläutert, in welcher Form die wichtigsten Ergebnisse der Hochwasserabschätzung in 450 mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz verfügbar sind. Dabei werden zuerst die verschiedenen Resultatblätter vorgestellt, welche pro Flussgebiet einen Überblick über die Hydrologie (Kapitel 5.1.1), die generelle Hochwassercharakteristik (Kapitel 5.1.2), die Niederschläge (Kapitel 5.1.3) sowie die regionalisierten Modellparameter (Kapitel 5.1.4) geben. Diese Resultatblätter können verwendet werden, um die Plausibilität der Modellierung und der Hochwasserabschätzung insgesamt zu überprüfen. Die für jedes Gebiet auf einem weiteren Resultatblatt verfügbaren stündlichen Abflüsse 1984–2005 (Kapitel 5.2.1) erlauben eine detailliertere Betrachtung des Abflussgeschehens. Hinweise zur Interpretation finden sich direkt in den entsprechenden Unterkapiteln. Anschliessend wird mit Hilfe der einheitlichen Extrapolationsgrafiken (Kapitel 5.2.2) auf die Resultate der Hochwasserabschätzungen eingegangen. Der Anwender kann auf Grundlage der simulierten Jahreshochwasser auch eigene Hochwasserabschätzungen vornehmen. Die entsprechenden Werte liegen in Form von Texttabellen vor (Kapitel 5.2.3).

Für Einschränkungen in der Anwendung wird auf das nachfolgende Kapitel 6 verwiesen, das konkrete Vorgehen bei einer Hochwasserabschätzung wird in Kapitel 7 zusammengefasst.

5.1 Überblick pro Flussgebiet

5.1.1 Kennzahlen des Abflusses

Das Resultatblatt zu den Kennzahlen des Abflusses (Abbildung 5-1) gibt einen umfassenden Überblick über die Hydrologie des Gebietes und erlaubt eine Plausibilisierung der Simulationsergebnisse vom Mittelwasser- bis hin zum Hochwasserbereich. In allen Grafiken des Resultatblattes sind die Resultate der regionalisierten Simulationen (ungemessene Gebiete) sowie – wo Messwerte zur Verfügung stehen – der kalibrierten Simulationen gemäss *Viviroli* (2007) eingetragen. Alle Simulationsergebnisse basieren auf demjenigen Parametersatz, welcher für Hochwasser erstellt wurde (Kapitel 2.3.1). Die Datenpunkte des Hauptgewässers (im Beispiel von Abbildung 5-1 diejenigen der Töss) sind mit einer Linie verbunden, und die entsprechenden Datenpunkte sind jeweils mit dem Namen des dazugehörigen Einzugsgebietes beschriftet. Zeilenweise dargestellt sind in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche die Abflussbereiche

- mQ (mittlerer jährlicher Abfluss 1984–2003) (oberste Zeile), mit Vergleichswerten aus Beobachtung (BAFU, 2010) und HADES-Tafel 6.3 (*Schädler und Weingartner*, 2002) wo verfügbar,
- mHQ (mittleres jährliches Hochwasser 1984–2003) (zweitoberste Zeile), mit Vergleichswerten aus Beobachtung (BAFU, 2010) wo verfügbar,
- HHQ (höchstes jährliches Hochwasser 1984–2003) (zweitunterste Zeile), mit Vergleichswerten aus Beobachtung (BAFU, 2010) wo verfügbar, und
- HQ₁₀₀ (aus der Reihe 1984–2003 extrapoliertes 100-jährliches Hochwasser) (unterste Zeile), mit Vergleichswerten aus HQ_{x_meso_CH} (*Barben*, 2003; *Spreafico et al.*, 2003) und, wo verfügbar, dem aus der gleich langen beobachteten Reihe (BAFU, 2010) extrapolierten HQ₁₀₀.

Die oben erwähnten Vergleichswerte aus der Beobachtung stammen von denjenigen 82 der 450 modellierten Einzugsgebiete, welche über Abflussmessungen verfügen, sowie von 31 weiteren langjährigen Messreihen, welche *Viviroli* (2007) zur Kalibrierung von repräsentativen Einzugsgebieten verwendete. In einigen Flussgebieten existieren einige wenige weitere Abflussmessungen, welche in den Diagrammen nicht eingetragen sind, weil sie entweder nur von kurzer Dauer sind oder vor Beginn der hier verwendeten Referenzperiode 1984–2003 enden. Wo vorhanden und verfügbar sollten diese Messdaten verwendet werden, um den Überblick über die Hydrologie des Gebietes zu ergänzen.

Die Spalten beziehen sich auf die

- Abflussmengen Q in $[m^3 s^{-1}]$ (links) und die
- Abflussspenden q in $[l s^{-1} km^2]$ auf einfach-logarithmischer Skala (rechts).

Das Logarithmieren der Abszisse in der rechten Spalte dient dazu, möglichst das gesamte Spektrum der Dimensionen von Einzugsgebietsgrössen einsehbar zu machen. Mit den spezifischen Abflüssen in der rechten Spalte lässt sich die Abflussproduktivität verschieden grosser Gebiete miteinander vergleichen. Ein plausibler Verlauf sollte im Hauptgewässer (mit Linien verbundene Datenpunkte) grundsätzlich eine mehr oder weniger kontinuierliche – wenn auch nicht unbedingt konstante – Zunahme der Abflussmenge mit der Einzugsgebietsfläche (linke Spalte) und eine gleichgerichtete Abnahme der Abflussspende (rechte Spalte) zeigen. Ausnahmen und Besonderheiten sind möglich, grössere Abweichungen und Ausreisser sollten aber kritisch hinterfragt werden. Hilfreich kann bei der Plausibilisierung sein, die verschiedenen Vergleichswerte (Beobachtung, HADES-Tafel 6.3, HQx_meso_CH) heranzuziehen, welche in den Resultatblättern schon eingetragen sind.

Eine Schwierigkeit bei der Interpretation stellt die in einigen Fällen sehr grosse Streuung der Abflussspenden in kleinen Einzugsgebieten dar. Diese Streuung kommt durch die Mischung von Einzugsgebieten aus verschiedenen Teilen des Flussgebietes zustande: Die im oberen Teil des Flussgebietes gelegenen Einzugsgebiete besitzen tendenziell hohe Abflussspenden, welche den Werten des mit Linien verbundenen Hauptgewässers ähnlich sind. Im unteren Teil des Flussgebietes befindliche Einzugsgebiete weisen hingegen typischerweise (wenn auch nicht gezwungenermassen) tiefere Abflussspenden auf. Um diese Problematik etwas zu entschärfen, sind die Symbolsignaturen zusätzlich nach mittlerer Gebietshöhe differenziert: Gebiete, deren mittlere Höhe (mH_i) geringer ist als diejenige des Gesamtgebietes (mH_{total} , hier Gebiet 10-555+ $[10-550+]$), werden mit hellgrauer statt schwarzer Symbolumrandung dargestellt. Von diesen Gebieten kann angenommen werden, dass sie sich im unteren Teil des Flussgebietes befinden und deshalb bezüglich Abflussspenden nicht unbedingt mit den restlichen Einzugsgebieten vergleichbar sind.

Für die folgenden Datenquellen und Abflussbereiche sind Konfidenzintervalle als Bänder (Einzugsgebiete des Hauptgewässers) respektive als Balken (übrige Einzugsgebiete) eingetragen. Beim Vergleich dieser Konfidenzintervalle ist Vorsicht geboten, da sie nicht dieselben Unsicherheitsbereiche bezeichnen:

- HQ_{100} aus Beobachtung: Statistisches 90%-Konfidenzintervall der Extremwertstatistik;
- mQ , mHQ , HHQ und HQ_{100} aus PREVAH: Minimum und Maximum der drei Simulationen, welche auf den mit Nearest Neighbours, Kriging und Regression regionalisierten Parametersätzen basieren (Hochwasservariante, regHQ). Wo verfügbar sind auch die entsprechenden Resultate der kalibrierten Simulation eingezeichnet (Hochwasservariante, calHQ);
- HQ_{100} aus HQx_meso_CH: Minimales und maximales geschätztes HQ_{100} bei Anwendung der fünf entsprechenden Schätzverfahren (vgl. Kapitel 4.2.2).

Spezielsignaturen kennzeichnen mit PREVAH regionalisierte Werte, für welche Besonderheiten bezüglich Einzugsgebiet oder Regionalisierungsmethodik zu berücksichtigen sind:

- Jackknife: Für diese Stationen liegen Beobachtungen und eine kalibrierte Simulation mit PREVAH vor; der angegebene Wert wurde regionalisiert, ohne diese Beobachtungsinformationen zu verwenden. Somit dient der Wert in erster Linie zur Plausibilisierung der Regionalisierung, für Abschätzungen sollten aber die Beobachtung oder die kalibrierte Simulation berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 6.4).
- Karst > 50%: Verkarstungsfähiges Gestein kommt auf mehr als 50% der betreffenden Einzugsgebietsfläche vor. Deshalb muss bei den simulierten Werten mit einer Überschätzung der Hochwasser gerechnet werden (siehe Kapitel 4.2.1 und 6).

Schraffiert gekennzeichnet sind schliesslich diejenigen Bereiche von Einzugsgebietsgrössen A , für welche eine Interpretation und Auswertung nur bedingt möglich ist ($25 km^2 \leq A < 40 km^2$, lockere Schraffur), respektive im Normalfall nicht empfohlen wird ($A < 25 km^2$, dichte Schraffur) (vgl. Kapitel 4.2.1 und 6.1).

Die Resultatblätter zu den Kennzahlen des Abflusses vereinen wesentliche Informationen zur simulierten Gebietshydrologie und zur Plausibilität der modellbasierten Abschätzungen. Deshalb sind die entsprechenden Grafiken für alle 54 betrachteten Flussgebiete in Anhang B dieser Publikation zu finden.

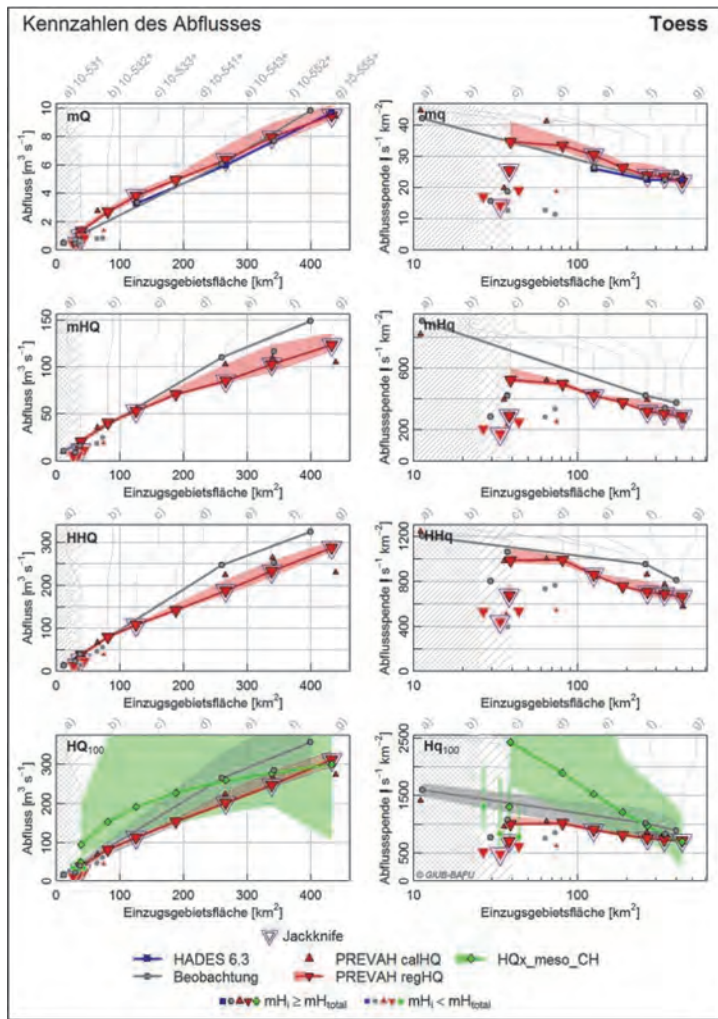


Abbildung 5-1. Beispiel für ein Resultatblatt zu den Kennzahlen des Abflusses. Erläuterungen siehe Haupttext.

5.1.2 Einordnung in das Verfahren GIUB'96(FN)

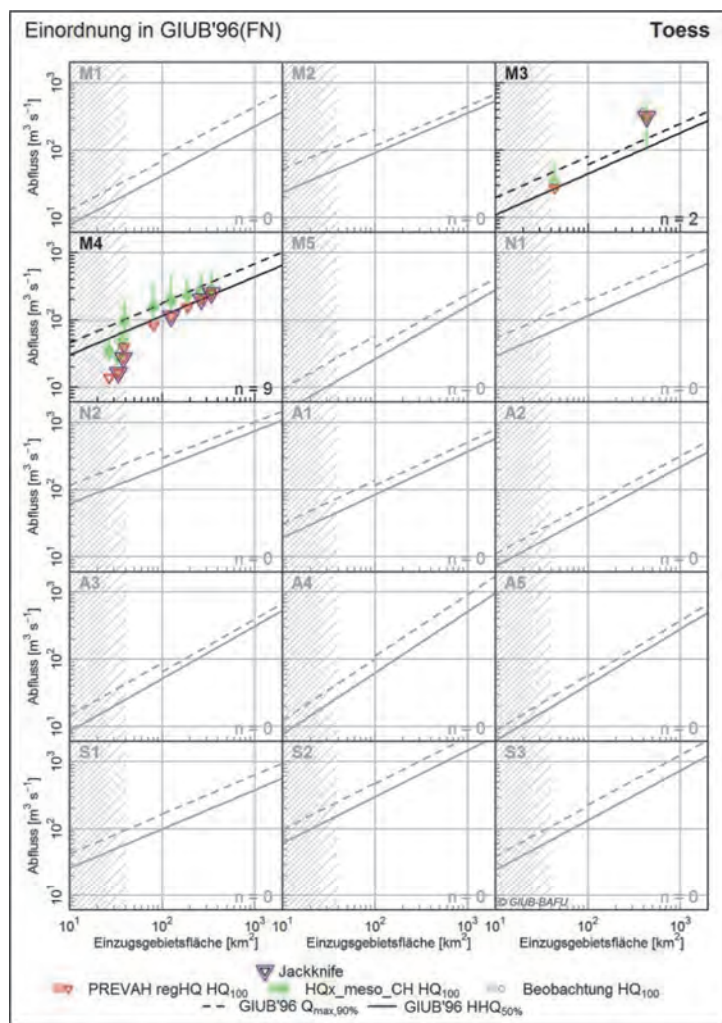
Das Resultatblatt zur Einordnung unterschiedlich erhobener HQ_{100} -Schätzungen in das Verfahren GIUB'96(FN) (Weingartner, 1999) wurde bereits in Kapitel 4.2.3 für die vergleichende Betrachtung aller 450 modellierten Einzugsgebiete ausführlich eingesetzt (Abbildung 4-12). Eine analoge Auswertung liegt für jedes Flussgebiet gesondert vor und umfasst dann jeweils alle darin enthaltenen Einzugsgebiete (Abbildung 5-2). Zusätzlich zu der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Version für alle modellierten Einzugsgebiete enthalten die pro Flussgebiet erstellten Resultatblätter auch Wertebereiche, die denjenigen der Resultatblätter zu den Kennzahlen des Abflusses entsprechen (vgl. vorangehendes Kapitel 5.1.1, im Folgenden nochmals kurz erläutert). In der Version, die alle Gebiete umfasst, werden die Wertebereiche um der Leserlichkeit willen weggelassen.

In jedem Resultatblatt werden die aus der regionalisierten PREVAH-Simulation extrapolierten HQ_{100} (PREVAH regHQ HQ_{100}) der passenden Region von GIUB'96 zugeordnet und den entsprechenden Kurven für das $Q_{max,90\%}$ (90%-Hüllkurve über das HHQ-Datenkollektiv von GIUB'96) und das $HHQ_{50\%}$ (Regressionsgerade durch das HHQ-Datenkollektiv von GIUB'96) gegenübergestellt (vgl. auch Kapitel 4.2.3). Der Wertebereich bezieht sich auf das HQ_{100} , welches aus dem Minimum und dem Maximum der drei regionalisierten Simulationen (Nearest Neighbours, Kriging und Regression) extrapoliert wurde.

Für alle jeweils berücksichtigten Einzugsgebiete ist auch der Vergleichswert aus HQx_meso_CH eingetragen, genauer der Median der fünf für die Schätzung des HQ_{100} verfügbaren Verfahren. Der dazugehörige Wertebereich bezieht sich auf das kleinste und das grösste HQ_{100} , welches bei der Anwendung der fünf entsprechenden Schätzverfahren in HQx_meso_CH resultiert (vgl. Kapitel 4.2.2). Wie schon in Kapitel 4.2.3 angesprochen, muss beachtet werden, dass das Verfahren GIUB'96(FN) in diesen fünf Verfahren enthalten ist und die Kurve $HHQ_{50\%,reg}$ folglich stets durch den Wertebereich von HQx_meso_CH erfasst wird. Mit GIUB'96(MQ) basiert zudem ein weiteres dieser fünf Verfahren auf demselben Datensatz wie GIUB'96(FN).

Ebenfalls eingetragen ist der aus den Beobachtungsdaten 1984–2003 extrapolierte Schätzwert für das HQ_{100} , welcher für 61 der 450 berücksichtigten Gebiete bestimmbar ist. Der Wertebereich bezieht sich hier auf das statistische 90%-Konfidenzintervall der Extremwertstatistik.

Die Einschränkungen in der Auswertbarkeit, die sich auf die Regionalisierung mittels Jackknife-Ansatz, das Vorkommen von Karstgesteinen sowie die minimale Gebietsgrösse beziehen, sind analog zum Resultatblatt der Kennzahlen des Abflusses (vorangehendes Kapitel 5.1.1).



- M1** Westliches Mittelland, Faltenjura
- M2** Nordwestschweiz
- N1** Westliche Voralpen, östliche Alpen
- N2** Zentrale und östliche Voralpen
- M3** Nordschweiz
- M4** Region Genf, östliches Mittelland
- M5** Zentrales Mittelland
- A1** Berner und Walliser Alpen
- A2** Zentrale Berner und Walliser Alpen
- A3** Zentralschweizer Alpen
- A4** Vorderrhein, Prättigau
- A5** Engadin, Landwasser
- S1** Leventina, Oberhalbstein
- S2** Maggia, Misox, Bergell
- S3** Sottoceneri, Puschlav

Abbildung 5-2. Beispiel für ein Resultatblatt zur Einordnung in das Verfahren GIUB'96(FN). Erläuterungen siehe Haupttext.

5.1.3 Mittlere jährliche Niederschlagswerte nach Höhenzone

Die Grafik zu den mittleren jährlichen Niederschlagswerten nach Höhenzone (Abbildung 5-3) gibt pro Flussgebiet einen Überblick über Höhengradienten und Mengen des Niederschlags und erlaubt so eine Überprüfung dieser wichtigen Eingangsgrösse in das Modell. In Kapitel 3 wurde bereits ausführlich diskutiert, wie die Niederschläge interpoliert werden, und es wurde auch aufgezeigt, dass unplausible Niederschlagsgradienten die Qualität der Resultate je nach Gebiet merklich beeinflussen können. Aspekte zur mittleren jährlichen Niederschlagsmenge wurden zudem auch in Kapitel 4.1.1 besprochen.

Im oberen Teil der Grafik werden zuerst einige Grundlagen des Gebietes beschrieben:

- Hypsographie des Gebietes, d. h. der Anteil Gebietsfläche pro 100 m-Höhenband, berechnet auf Basis des digitalen Geländemodells mit einer Rasterweite 100 × 100 m (BfS, 2003): Damit kann eingeschätzt werden, wie ausschlaggebend Abweichungen im Höhengradienten effektiv sind. Abweichende Niederschlagsmengen in Höhenbereichen, in welchen das betreffende Flussgebiet nur geringe Flächenanteile hat, sind weniger ausschlaggebend als in Höhenbereichen, die stark vertreten sind.

- Verwendete Meteostationen und Distanz zum Gebietsschwerpunkt: Diese Darstellung erlaubt es, die Repräsentativität der verwendeten meteorologischen Stationsdaten zu beurteilen, und zwar sowohl bezüglich Höhenverteilung wie auch bezüglich räumlicher Entfernung. Insbesondere bei Stationen des Automatischen Messnetzes (ANETZ) müssen nicht selten relativ weit entfernte Stationen gewählt werden, um den gesamten Höhenbereich abzudecken und damit zu realistischen Höhengradienten zu gelangen. Des Weiteren sind die lange und die kurze Achse desjenigen Ellipsoids eingezeichnet, welches das Gebiet vereinfacht am besten darstellen würde. Mit Hilfe dieser Achsenlängen kann beurteilt werden, wie sich die Entfernung einer Station vom Gebietschwerpunkt im Vergleich zur Gebietsgeometrie und -grösse verhält.

Die untere Grafik charakterisiert die Niederschlagsgradienten:

- Für jedes Einzugsgebiet ist der Niederschlag gegen die Höhe aufgetragen, und zwar wiederum mit einer Genauigkeit von 100 m-Höhenbändern. Einzugsgebiete des Hauptflusses (im Beispiel diejenigen der Töss) sind mit ausgezogenen Linien dargestellt, die übrigen mit gerissenen Linien. Das Gesamtgebiet – im Beispiel ist dies das Einzugsgebiet 10-541+ – ist mit einer ausgezogenen fetten Linie dargestellt, ergänzt durch den transparent hinterlegten Quartils- und den Wertebereich der mittleren jährlichen Niederschlagswerte 1984–2003.
- Als Referenzwert dient die als HADES-Tafel 2.6 veröffentlichte langjährige Niederschlagsklimatologie 1971–1990 von *Schwarb et al.* (2001). Aus deren Werten, welche auf einem Gitter mit einer Auflösung von 1.25 Bogenminuten (ca. $2.3 \times 1.6 \text{ km}^2$) vorliegen, wurde die Höhenverteilung der Niederschläge für das Gesamtgebiet (hier 10-541+) abgeleitet. Das von *Schwarb et al.* (2001) verwendete Interpolationsverfahren zeichnet sich durch vergleichsweise geringe Interpolationsfehler in grossen Höhen aus. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Werte den tatsächlichen Höhenverlauf der Niederschläge gut charakterisieren.
- Ergänzt wird die Grafik durch die mittleren jährlichen Niederschlagswerte 1984–2003, welche an den verwendeten Meteostationen gemessen wurden. Die zugehörigen Distanzen zum Gebietschwerpunkt lassen sich, wie schon erläutert, aus der oberen Grafik ablesen.

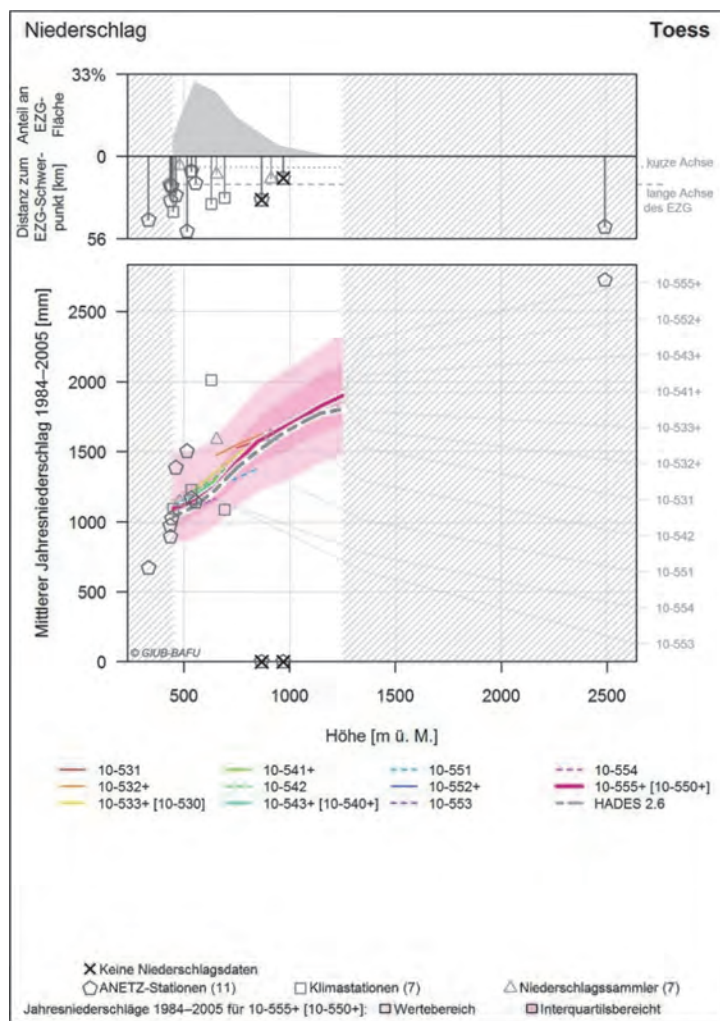


Abbildung 5-3. Beispiel für ein Resultatblatt zum mittleren jährlichen Gebietsniederschlag nach Höhenzone. Erläuterungen siehe Haupttext.

Zudem sei angemerkt, dass alle dargestellten Niederschlagswerte – die Stationswerte, die für PREVAH interpolierten Werte und die Werte von *Schwarb et al.* (2001) – unkorrigierte Niederschlagswerte sind, die schon in Kapitel 3.3 summarisch beurteilt wurden. Über die in PREVAH vorgenommene Messfehlerkorrektur und Bilanzanpassung wurde in Kapitel 2.2 berichtet. Gütebetrachtungen zum korrigierten Niederschlag und zur angepassten Wasserbilanz können in Kapitel 4.1. nachgelesen werden.

5.1.4 Verwendete freie Modellparameter

Neben dem Niederschlagsinput sind die freien Modellparameter eine weitere Schlüsselgrösse der Modellierung, welche einigen Unsicherheiten unterliegt. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden die freien Modellparameter mit Hilfe eines kombinierten Regionalisierungsverfahrens geschätzt, da sie für gut vier Fünftel der hier bearbeiteten 450 Einzugsgebiete nicht durch Kalibrierung anhand gemessener Abflusswerte ermittelt werden konnten. Alle in den Resultatblättern zu den verwendeten freien Modellparametern (Abbildung 5-4) dargestellten Parameter wurden unabhängig von allenfalls vorliegenden kalibrierten Werten erhoben (Jackknife-Prinzip, siehe Kapitel 4.1.2 sowie *Viviroli*, 2007).

Pro Flussgebiet liegt ein Resultatblatt vor, welches die mit Regionalisierung geschätzten Hochwasserparametersätze (HQ) darstellt, und zwar jeweils für die Regionalisierungsmethoden Nearest Neighbours (NNBR), Kriging (KRIG) und Regression (REGR). Es ist anzumerken, dass bei der Regionalisierung mit Nearest Neighbours keine eigentliche Schätzung der freien Modellparameter stattfindet, vielmehr werden komplette kalibrierte Parametersätze aus ähnlichen Einzugsgebieten (Spendergebieten) übertragen (NNBR1: aus ähnlichstem Gebiet, NNBR2: aus zweitähnlichstem Gebiet usw.). Die Plausibilität der Parametersätze sollte deshalb grundsätzlich gegeben sein, da ihre interne Abstimmung erhalten bleibt. Die Unsicherheit liegt allenfalls in der Wahl der Spendergebiete. Die Rangierung der Ähnlichkeit (NNBR1, NNBR2 usw.) spielt keine Rolle, da die fünf auf der Nearest-Neighbours-Regionalisierung basierenden Ganglinien mit identischer Gewichtung gemittelt werden (vgl. Kapitel 2.3.1). Hingegen ist die Überprüfung der Plausibilisierung der resultierenden Parameter bei den beiden Regionalisierungsverfahren Kriging und Regression sinnvoll, da die Parameterschätzung eine Interpolation aus kalibrierten Parametern darstellt – im Falle des Kriging im physischen Raum (Koordinaten) und bei der Regression im Attributraum (Gebietseigenschaften). Beide Verfahren extrapolieren bis zu einem gewissen Grade Eigenschaften aus einzelnen Gebieten, und dies, ohne dabei das Zusammenspiel der einzelnen Parameter zu beachten. Verschiedene Autoren haben indes gezeigt, dass dies grundsätzlich kein Problem ist und in der Anwendung zu guten Resultaten führt, selbst wenn die physikalische Relevanz der Parameterwerte nicht immer klar ist (*Vandewiele und Elias*, 1995; *Sefton und Howarth*, 1998; *Seibert*, 1999; *Peel et al.*, 2000; *Hundecha und Bárdossy*, 2004; *Lamb und Kay*, 2004; *Merz und Blöschl*, 2005; *Parajka et al.*, 2005; *Young*, 2006; *Viviroli*, 2007; *Oudin et al.*, 2008).

Die Resultatblätter enthalten – zusammengefasst für jedes Flussgebiet und dort jeweils für Nearest Neighbours (NNBR1_HQ bis NNBR5_HQ), Kriging (KRIG_HQ) und Regression (REGR_HQ) – jeweils drei Grafiken:

- Regionalisierungsergebnisse pro Parameter (oben): Für jeden freien Modellparameter sind die regionalisierten Werte aller modellierten Einzugsgebiete als Boxplot aufgezeichnet. Die Ordinate ist dabei auf den physikalisch plausiblen Parameterbereich (vgl. *Viviroli*, 2007; *Viviroli et al.*, 2009a) normalisiert: Ein Wert von -1 entspricht dem physikalisch plausiblen Minimum, ein Wert von +1 dem physikalisch plausiblen Maximum. Wenn mehrere Gebiete (oder mehrere Parameter) Werte an diesen physikalischen Grenzen zeigen, kann dies ein Hinweis auf Probleme in der Regionalisierung sein.
- Regionalisierungsergebnisse pro Einzugsgebiet (Mitte): Die Parametersätze sind für jedes Einzugsgebiet als Kurve nach *Andrews* (1972) aufgetragen. Diese Art der Darstellung verwendet Sinus- und Kosinusfunktionen, um aus den mehrdimensionalen Datensätzen – im vorliegenden Fall 12 Dimensionen für 12 freie Modellparameter – anschauliche Ähnlichkeitsdiagramme zu erstellen. Je ähnlicher zwei Kurven erscheinen, desto ähnlicher sind sich die Parametersätze der entsprechenden Einzugsgebiete (siehe auch *Viviroli*, 2007).
- Regionalisierungsergebnisse pro Einzugsgebiet, zusammengefasst (unten): Die Ähnlichkeit von zwei Kurven nach *Andrews* (1972) kann nicht nur visuell beurteilt werden, sie lässt sich auch quantifizieren, indem die zwischen den beiden Kurven liegende Fläche durch Integration bestimmt wird. Die summierte Unähnlichkeit zwischen allen Kurvenpaaren ist im untersten Diagramm als Boxplot dargestellt, links für alle Einzugsgebiete, rechts nur die Einzugsgebiete des Hauptgewässers (im Beispiel diejenigen der Töss). Mit Hilfe dieser Diagramme kann ebenfalls bestimmt werden, ob eine

Simulation auf deutlich anderen Parameterwerten basiert und ob somit die Plausibilität der Simulationsergebnisse besonders sorgfältig beurteilt werden muss.

Ähnlich wie bei der Darstellung der mittleren jährlichen Niederschlagswerte sind Ergebnisse für Einzugsgebiete des Hauptflusses (im Beispiel der Töss) mit ausgezogenen Linien dargestellt (resp. ausgefüllte Kreisen im untersten Diagramm), die übrigen mit gerissenen Linien (Kreise ohne Füllung im untersten Diagramm). Gebiete, für welche die Parameter unter Anwendung des Jackknife-Ansatzes regionalisiert wurden, sind in der Legendenbeschriftung gekennzeichnet.

Abschliessend zur Betrachtung der regionalisierten Modellparameter muss auf das Problem der Equifinalität hingewiesen werden: Kern des Problems ist, dass durch das Zusammenwirken der verschiedenen freien Parameter zahlreiche funktionelle Parameterkombinationen möglich sind, welche zu ähnlich guten Resultaten führen (siehe z.B. *Duan et al.*, 1992; *Madsen et al.*, 2002; *Beven und Binley*, 1992; *Beven*, 2002 und 2006; *Viviroli et al.*, 2009a). Wenn in den Regionalisierungen des vorliegenden Berichts also Gebiete identifiziert werden, deren Parametersätze sich von denjenigen anderer Gebiete im selben Flussgebiet unterscheiden, weist dies nicht a priori auf eine unzuverlässige Regionalisierung oder gar unzuverlässige Resultate hin. Vielmehr müssen die entsprechenden Simulationsergebnisse besonders sorgfältig auf ihre Plausibilität hin beurteilt werden, wozu die in diesem Kapitel bereits vorgestellten Übersichtsdiagramme verwendet werden können.

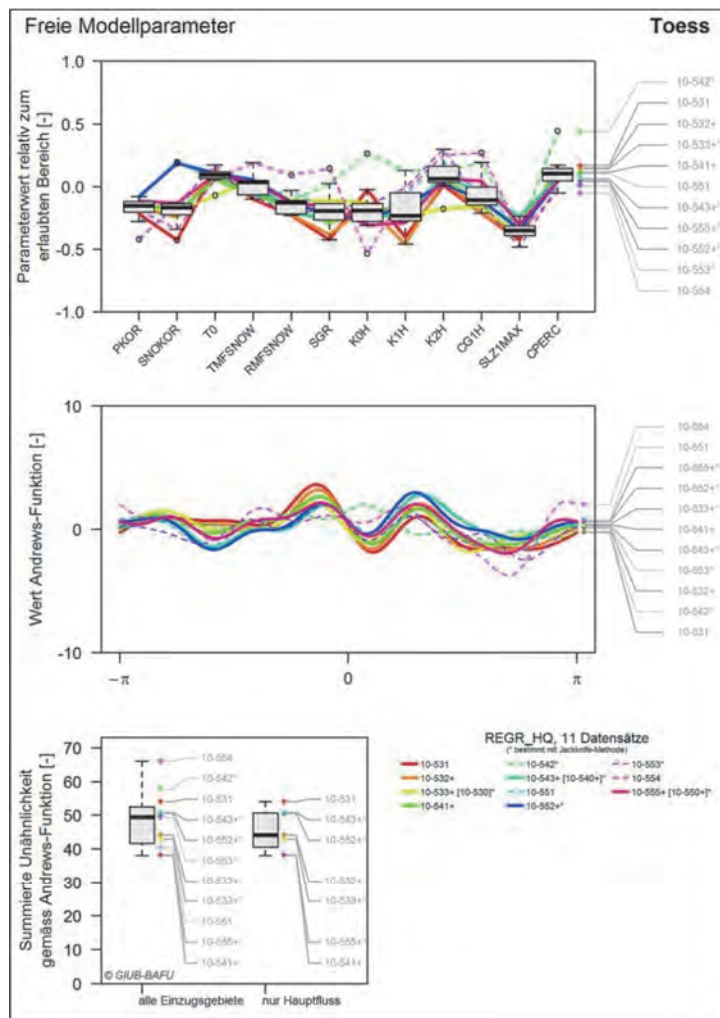


Abbildung 5-4. Beispiel für ein Übersichtsblatt zu den durch Regionalisierung geschätzten freien Modellparametern. Erläuterungen siehe Haupttext.

5.2 Resultate für die einzelnen Einzugsgebiete

Während die im vorangehenden Kapitel vorgestellten Resultatblätter gebietsweise einen Überblick über die Simulationen und ihre hydrologischen und meteorologischen Grundlagen geben, befassen sich die im Folgenden erläuterten Diagramme und Tabellen mit einzelnen Einzugsgebieten. Neben Abflussganglinie und Gütemassen (Kapitel 5.2.1) werden vor allem auch die Resultate und Grund-

lagen der Hochwasserabschätzung dargestellt, welche den Kern des vorliegenden Berichts ausmachen (Kapitel 5.2.2 und 5.2.3).

5.2.1 Abflussganglinie und Gütemasse

Pro Einzugsgebiet steht eine Darstellung der Abflusswerte 1984–2005 in stündlicher Auflösung zur Verfügung (Abbildung 5-5). Sie zeigt die Simulation mit dem regionalisierten Hochwasserparameter-satz sowie als transparent hinterlegtes Konfidenzintervall den Wertebereich der drei individuellen Regionalisierungen Nearest Neighbours, Kriging und Regression. Mit dieser Darstellung kann das Abflussverhalten des Gebietes auf seine Plausibilität hin überprüft werden. Die quantitative Auswertung einzelner Hochwasserereignisse ist hingegen, wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, nicht empfehlenswert.

Falls für ein Einzugsgebiet Abflussmessreihen bestehen, sind auch die stündlichen Beobachtungsdaten dargestellt, ebenso wie die Ergebnisse der normalerweise ebenfalls vorliegenden kalibrierten Simulation. Beachtet werden sollte, dass sich die auf der rechten Ordinate angegebenen spezifischen Abflüsse in $[l\ s^{-1}\ km^2]$ stets auf das modellierte, regionalisierte Einzugsgebiet beziehen. Die rechte Ordinate kann für die beobachteten und kalibrierten Werte also Abweichungen aufweisen, wenn sich die entsprechenden Einzugsgebiete bezüglich ihrer Grösse deutlich unterscheiden.

Für die regionalisierte (und allenfalls die kalibrierte) Simulation werden bei Vorliegen von Abflussmessreihen auch die folgenden Gütemasse angegeben (für eine detaillierte Diskussion siehe *Viviroli, 2007* und *Viviroli et al., 2009b*):

- *NSE*, die dimensionslose Modelleffizienz nach *Nash und Sutcliffe (1970)*, ist dem Bestimmtheitsmass nachempfunden und zeigt bei einem Wert von 1 perfekte Übereinstimmung zwischen simulierter und beobachteter Ganglinie an. Weil *NSE* relativ sensitiv auf Abweichungen im Bereich grosser Abflüsse reagiert, ist es zur Beurteilung der in diesem Bericht erarbeiteten Hochwasserresultate von Bedeutung.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [q(t) - Q(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [\bar{Q} - Q(t)]^2}, \quad NSE \in]-\infty, 1], \quad NSE = [-] \quad (\text{Formel 5-1})$$

wo $q(t)$ = simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t , $Q(t)$ = beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt t , $\bar{Q}$ = mittlerer beobachteter Abfluss und n = Anzahl betrachteter Zeitpunkte.

- *NSE_{ln}* berechnet sich analog zu *NSE*, nur dass die Abflusswerte vor der Berechnung des Gütemasses logarithmiert werden. Wegen des Logarithmierens ist *NSE_{ln}* weniger stark sensitiv auf grosse Abflusswerte als *NSE* und charakterisiert stärker die hydrologische Plausibilität der Simulation im Mittel- und Niedrigwasserbereich. Diese Plausibilität ist eine wichtige Grundlage für die Hochwasserabschätzungen.

$$NSE_{ln} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(q(t)) - \ln(Q(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(\bar{Q}) - \ln(Q(t))]^2}, \quad NSE_{ln} \in]-\infty, 1], \quad NSE_{ln} = [-] \quad (\text{Formel 5-2})$$

- *SVD_a* bezeichnet die mittlere jährliche summierte Volumenabweichung in $[mm\ a^{-1}]$, welche ein anschauliches Mass für den Wasserbilanzfehler des Modells ist. Der Wert kann beispielsweise in Relation zu Schätzungen des Wasserhaushalts von *Schädler und Weingartner (2002)* gesetzt werden, um die hydrologische Plausibilität der Wasserbilanz zu beurteilen. Da die zugrundeliegenden Abflusssimulationen auf der Hochwasservariante der Regionalisierung basieren, können in einzelnen Gebieten deutliche Wasserbilanzfehler auftreten.

$$SVD_a = \frac{\sum_{t=1}^n [q(t) - Q(t)]}{k}, \quad SVD_a \in]-\infty, \infty[, \quad SVD_a = [mm\ a^{-1}] \quad (\text{Formel 5-3})$$

wo k = Anzahl betrachteter Jahre.

- *VE* ist die volumetrische Modelleffizienz nach *Criss und Winston (2008)*. Sie bezeichnet denjenigen Anteil des Abflussvolumens, welcher vom Modell für den korrekten Zeitpunkt simuliert wurde, mit bester Übereinstimmung bei $VE = 1$. Das Gütemass behandelt Abflussvolumina stets auf die gleiche Weise, egal ob sie beispielsweise als Spitzen-, Rezessions- oder Niedrigwasserabfluss auftreten. Damit ist es vor allem eine hydrologisch sinnvoll interpretierbare Alternative zu *NSE* und *NSE_{ln}*.

$$VE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n |q(t) - Q(t)|}{\sum_{t=1}^n Q(t)}, \quad VE \in [0,1], \quad VE = [-] \quad (\text{Formel 5-4})$$

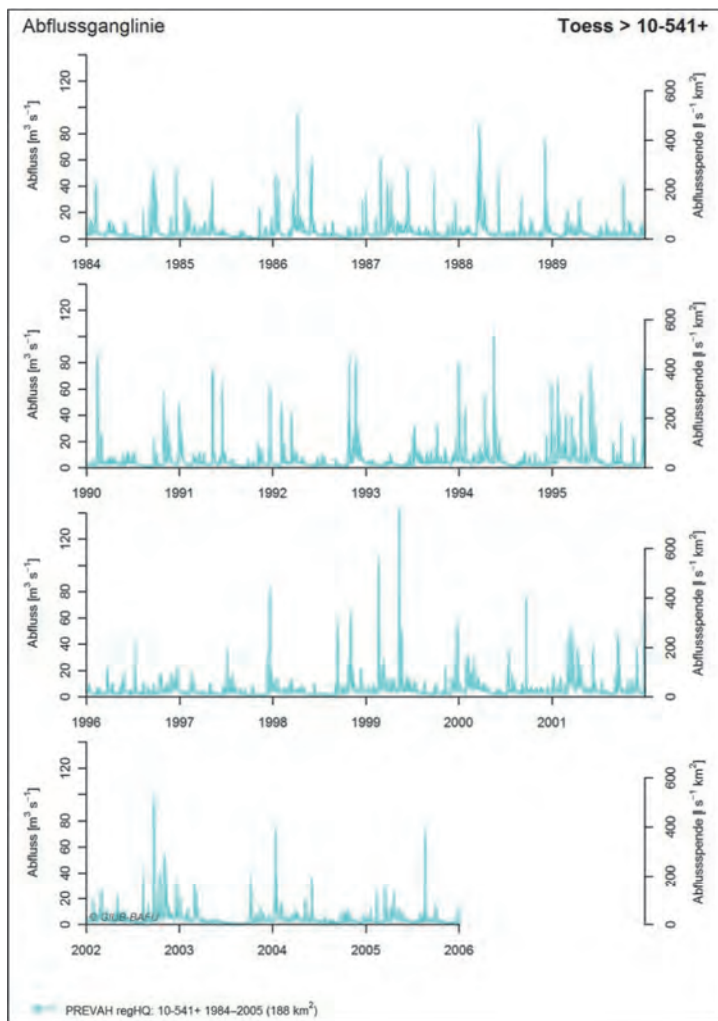


Abbildung 5-5. Beispiel für ein Resultatblatt zum simulierten stündlichen Abfluss 1984–2005. Erläuterungen siehe Haupttext.

5.2.2 Hochwasserabschätzungen

Einen Überblick über die Hochwasserabschätzung pro modelliertem Einzugsgebiet geben die Grafiken zur Hochwasserextrapolation (Abbildung 2-5). Ihre Grundlage ist stets eine Extrapolation aus der 20-jährigen Messreihe 1984–2003, wobei die Extremwertverteilung des Typs 1 (E1) mit Parameterschätzung nach wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (WGM) verwendet wurde. Die Einheitlichkeit von Bezugszeitraum und Extrapolationsmethodik soll sicherstellen, dass die Resultate sowohl untereinander wie auch mit den von *Viviroli* (2007) erarbeiteten Grundlagen vergleichbar sind. Die Kombination E1-WGM führt bei der Anwendung auf viele Gebiete in der Regel zu guten Ergebnissen (*Viviroli*, 2007; siehe auch *Greis und Wood*, 1981 und 1983; *Ayros Chumpitazi*, 2000; *Maniak*, 2005), wobei beachtet werden muss, dass bei der Betrachtung einzelner Gebiete andere Verteilungs- und Schätzverfahren geeigneter sein könnten (siehe folgendes Kapitel 5.2.3)

Im Detail zeigt eine Grafik (Abbildung 5-6) die folgenden Elemente:

- Extrapolation aus der stündlichen Simulation mit PREVAH, basierend auf den Jahreshochwassern 1984–2003: Der transparente Bereich bezeichnet das statistische 90%-Konfidenzintervall der Extremwertbetrachtung; der schraffierte Bereich begrenzt die maximal zulässige Extrapolationsdauer gemäss DVWK (1999) (bei n Abflussjahren beträgt diese maximal $3 \times n$ Jahre, hier also 60 Jahre). Die als leere Kreise eingezeichneten Jahreshochwasser der Simulation dienen zur Orientierung und können etwa dazu verwendet werden, um mögliche Ausreisser oder nicht plausible Werte zu identifizieren oder die Eignung der verwendeten Extrapolationsmethodik (E1-WGM) zu beurteilen.

Von einer Interpretation einzelner Jahreshochwasser wird aber abgeraten, da die zugrundeliegende kontinuierliche Simulation lediglich das charakteristische Hochwasserverhalten des betreffenden Gebietes wiedergeben soll, nicht aber einzelne Hochwasserereignisse (vgl. Kapitel 2.1).

- Vergleichswerte aus HQx_meso_CH zur Schätzung des HQ₁₀₀ (5 Verfahren) sowie des Q_{max} (3 Verfahren): Der transparente Bereich bezeichnet hier die Spannweite der erhaltenen Schätzungen.
- Angaben zur mittleren Gebietshöhe und zur Vergletscherung: Falls das Gebiet mehr als 50% verkastungsfähiges Gestein enthält, ist der genaue Anteil zusätzlich aufgeführt.

Die linke Ordinate zeigt jeweils die Durchflusswerte in $[m^3 s^{-1}]$, die rechte Ordinate die entsprechenden spezifischen Abflüsse in $[l s^{-1} km^2]$, wobei die Durchflusswerte wie schon bei der Darstellung der Abflusswerte (Kapitel 5.2.1) stets auf Basis der Fläche des modellierten, regionalisierten Einzugsgebietes in spezifische Abflüsse umgerechnet werden. Die rechte Ordinate ist demnach für kalibrierte und beobachtete Werte nicht immer exakt (siehe Kapitel 5.2.1), gilt aber exakt für die Schätzungen aus HQx_meso_CH, weil sich diese aufgrund der Gebietsdefinition (Kapitel 2.4) stets auf dieselbe Gebietsfläche beziehen wie die regionalisierte Simulation.

Nur bei Verfügbarkeit einer vollständigen Messreihe 1984–2003 ist zusätzlich die Extrapolation aus den stündlichen beobachteten Daten aufgetragen, ebenso wie die Extrapolation aus allfälligen kalibrierten Simulationen mit PREVAH. Bei kürzeren Messreihen (mindestens aber 5 Jahre) ist nur die Extrapolation aus der kalibrierten Simulation 1984–2003 mit PREVAH eingezeichnet. Die Extrapolationen für Beobachtung und kalibrierte Simulation basieren ebenfalls auf den Jahreshochwassern 1984–2003 in stündlicher Auflösung, ebenso wie sich die Konfidenzbereiche ebenfalls auf das statistische 90%-Intervall beziehen. Wenn eine Kalibrierung vorliegt – und damit auch ihre Auswertung eingezeichnet ist –, wurde die regionalisierte Simulation unter Einsatz des Jackknife-Prinzips unabhängig von den Kalibrierungsinformationen des betreffenden Gebietes erstellt.

Für einige wenige der bearbeiteten Einzugsgebiete stehen Messungen zur Verfügung, auch wenn diese nicht in den Diagrammen eingetragen sind und nicht für eine Modellkalibrierung verwendet wurden (oder die Modellkalibrierung nicht erfolgreich war, vgl. *Viviroli, 2007*). In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Reihen von kurzer Dauer.

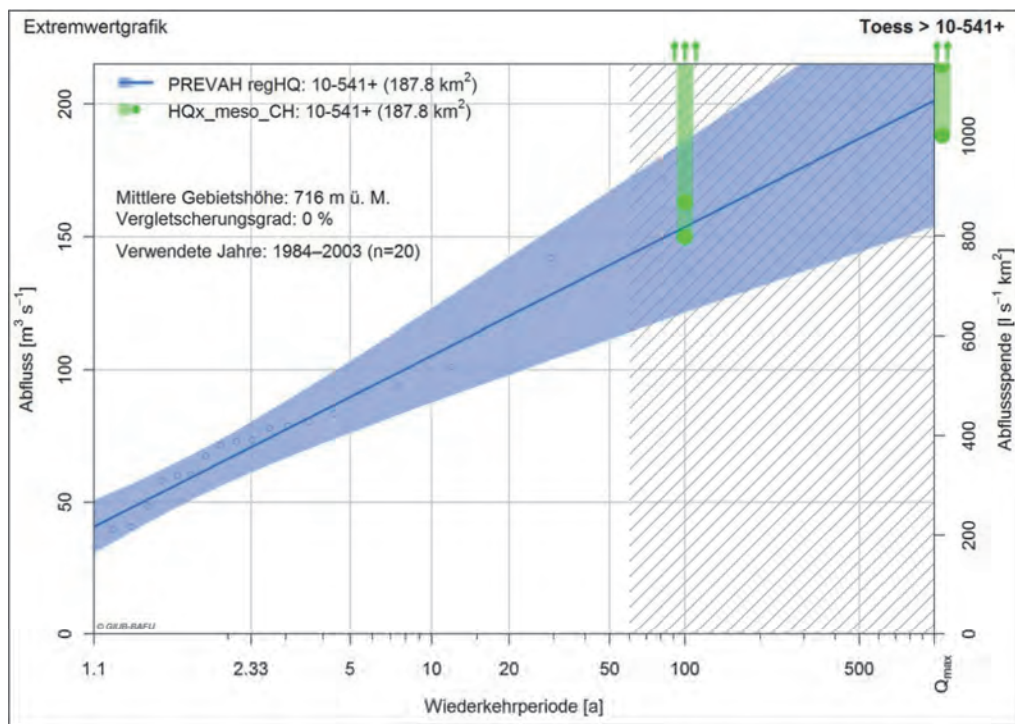


Abbildung 5-6. Beispiel für ein Resultatblatt zur Hochwasserabschätzung. Erläuterungen siehe Haupttext.

5.2.3 Abflussstatistik und Jahreshochwasser

Wie oben erläutert, wurden die Hochwasserextrapolationen mit einer einheitlichen und für die meisten Gebiete gut geeigneten Kombination von Verteilungsfunktion und Parameterschätzmethode erstellt. Damit wurde die grösstmögliche Vergleichbarkeit der Resultate sichergestellt, welche zur Beurteilung der Plausibilität innerhalb des übergeordneten Flussgebietes von zentraler Wichtigkeit ist.

Gleichwohl kann es bei der Hochwasserabschätzung für ein einzelnes Gebiet sehr sinnvoll sein, das Verfahren nach DVWK (1999) strenger zu befolgen. Dabei sollten die drei am besten angepassten Kurven aus einer Palette von maximal 18 möglichen Kombinationen (sieben Verteilungsfunktionen, jeweils maximal drei Parameterschätzmethoden) betrachtet werden, um dann mit Expertenwissen einen Entscheid für die am besten geeignete Kombination zu fällen.

Um solche individuellen Betrachtungen möglichst ohne grossen Zusatzaufwand zu ermöglichen, liegen für alle 450 modellierten Einzugsgebiete dieses Berichts auch jeweils zwei Textdateien vor, welche die nötigen Grundlagendaten für eine Schätzung durch den Anwender enthalten:

- Abflussstatistik (Abbildung 5-7, links): Diese Datei enthält wichtige Kennzahlen des im Stundenintervall simulierten Abflusses 1984–2005 in $[m^3 s^{-1}]$. Nebst dem mittleren Jahresabfluss (mQ) sind dies die Quantile des Abflusses ($Q_x = x\%$ -Quantil), der mittlere Jahresspitzenabfluss (mHQ) und der höchste Spitzenabfluss (HHQ), letzterer mit Zeitpunkt des Auftretens (Jahr-Monat-Tag-Stunde). Der angegebene Auftretenszeitpunkt ist lediglich der Vollständigkeit halber angegeben und sollte im Einzelnen nicht als Aussage interpretiert werden. Direkt für eine Hochwasserstatistik verwendet werden können die anschliessend aufgeführten jährlichen Hochwasser, für welche jeweils wieder der Zeitpunkt des Auftretens angegeben ist (Jahr-Monat-Tag-Stunde). Die Dateien liegen im ASCII-Format vor und können mit einem beliebigen Texteditor geöffnet werden.
- HQ-EX-Importdatei (Dateierweiterung .hqx) (Abbildung 5-7, rechts): Diese Datei kann im verbreiteten Analyseprogramm HQ-EX (WASY, 1997) direkt eingelesen werden. Nach Anlegen eines neuen Pegels in HQ-EX geschieht dies über den Befehl „Import...“ im Menü „Datei“. HQ-EX richtet sich nach den Vorschriften nach DVWK (1999) und erlaubt neben Berechnung und Ausgabe von Schätzwerten auch deren Darstellung. Die Importdatei selbst ist ASCII-formatiert und enthält den Namen des Gebietes (erste Zeile), das erste Beobachtungsjahr (dritte Zeile, erster Wert), die Einheit der Abflüsse (dritte Zeile, zweiter Wert), die Gebietsfläche in $[km^2]$ (dritte Zeile, dritter Wert) sowie anschliessend die jährlichen Spitzenabflüsse in der angegebenen Einheit (hier in $[m^3 s^{-1}]$).

The image shows two side-by-side screenshots of text editors. The left editor, titled '10-541+_qstatm3s - Editor', displays a table of flow statistics. The right editor, titled '10-541+_hqx - Editor', displays a table of peak flow data for a specific catchment area.

10-541+_qstatm3s - Editor	
Datei	Bearbeiten
4.94882 mQ	
0.58427 Q01	
1.19305 Q05	
2.20143 Q25	
3.17799 Q50	
5.30326 Q75	
13.82312 Q95	
30.50602 Q99	
70.60848 mHQ	
142.08740 HHQ	1999-05-12-18
48.79931 HQa	1984-12-17-05
40.10991 HQa	1985-05-09-18
94.04659 HQa	1986-04-10-09
60.48830 HQa	1987-03-01-01
83.48649 HQa	1988-03-22-07
40.84911 HQa	1989-10-08-09
80.36641 HQa	1990-02-15-13
73.72194 HQa	1991-05-12-02
78.96729 HQa	1992-11-22-17
67.55949 HQa	1993-12-31-24
101.24507 HQa	1994-05-19-12
71.58258 HQa	1995-12-25-13
37.84327 HQa	1996-07-08-17
78.17384 HQa	1997-12-21-22
60.32658 HQa	1998-11-04-09
142.08740 HQa	1999-05-12-18
73.02082 HQa	2000-09-21-08
58.46631 HQa	2001-12-30-01
91.79560 HQa	2002-09-24-15
33.33033 HQa	2003-10-07-21
70.89972 HQa	2004-01-13-16
66.22037 HQa	2005-08-22-20

10-541+_hqx - Editor	
Datei	Bearbeiten
Einzugsgebiet 10-541+	
Pegelkoordinaten 696864 258245	
1984 m³/s	187.80
48.80	
40.11	
94.05	
60.49	
83.49	
40.85	
80.37	
73.72	
78.97	
67.56	
101.25	
71.58	
37.84	
78.17	
60.33	
142.09	
73.02	
58.47	
91.80	
33.33	
70.90	
66.22	

Abbildung 5-7. Links: Beispiel für eine Abflussstatistik-Tabelle; Rechts: Beispiel für eine HQ-EX-Importtabelle.

Auch hier gilt, dass die simulierten Jahreshochwasser nicht als einzelne Werte interpretiert werden sollten, da die zugrundeliegende kontinuierliche Simulation darauf ausgerichtet ist, das Hochwasserverhalten eines Gebietes als Ganzes zu charakterisieren (vgl. Kapitel 2.1).

Für 82 der 450 modellierten Einzugsgebiete liegt jeweils eine kalibrierte Modellversion vor (Viviroli, 2007; Viviroli et al., 2009b), mit deren Hilfe der Anwender ebenfalls eine Hochwasserabschätzung vornehmen kann (siehe Kapitel 7, Punkt 4). Da die Kalibrierung immer anhand gemessener Abflusswerte erfolgt, ist für die entsprechenden Gebiete stets eine Abflussmessreihe vorhanden. Für die Hochwasserabschätzung ist es deshalb meist sinnvoller, direkt die beobachtete Ganglinie als Grundlage zu verwenden. Eine Schätzung auf Basis der simulierten Abflussdaten kann aber sinnvoll sein, wenn die Beobachtung nur wenige Jahre umfasst. Diese Thematik wird in Kapitel 6.4 noch ausführlicher besprochen.

6 Einschränkungen und Hinweise

Bevor im folgenden Kapitel 7 das praktische Vorgehen bei einer Hochwasserabschätzung mit dem hier vorgestellten Ansatz zusammengefasst wird, soll hier auf die Limitierungen des Ansatzes hingewiesen werden. Wie bei jeder anderen Schätzmethode gibt es auch beim hier verfolgten Vorgehen Bereiche, in welchen eine Anwendung nur eingeschränkt möglich ist. Hochwasserabschätzungen für die entsprechenden Gebiete sollten mit besonderer Vorsicht interpretiert werden. Die Kapitel 6.1 bis 6.3 erläutern die drei wichtigsten Einschränkungen, in den Kapiteln 6.4 und 6.5 folgen weitere Hinweise, welche sich aus der Modellierungsmethodik ergeben.

6.1 Grösse des Einzugsgebietes

In Kapitel 4.2.1 wurde bereits ausführlich auf den Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsgrösse und Schätzfehler für das HQ_{100} eingegangen. Dabei bestätigten sich die Einschränkungen, die bereits von *Viviroli* (2007 und 2009c) anhand des repräsentativen Datensatzes von 49 Testgebieten identifiziert wurden (siehe insbesondere Abbildung 4-7):

- Gebiete mit einer Fläche von weniger als 40 km^2 weisen eine eindeutige Tendenz zur Unterschätzung des HQ_{100} auf. Der Schätzfehler im Vergleich zum aus der Beobachtung extrapolierten Referenzwert nimmt mit abnehmender Fläche auf bis zu -65% zu. Die Hochwasserkennwerte der entsprechenden Gebiete sollten also im Normalfall gar nicht oder nur mit grösster Vorsicht verwendet werden. Die Gebietshydrologie (Kapitel 5.1.1) wird zwar noch zuverlässig wiedergegeben, die Erfassung der meteorologischen Verhältnisse, insbesondere des Starkniederschlags, ist hingegen problematisch. Die kritische Grösse von 40 km^2 wird in 148 der 450 hier modellierten Einzugsgebiete unterschritten (Abbildung 6-1), eines dieser 148 Einzugsgebiete ist gleichzeitig auch ein Bilanzierungsgebiet. In den Übersichtsdiagrammen von Kapitel 5.1 ist der Flächenbereich von unter 40 km^2 mit lockerer Schraffierung markiert.
- Bei einer Fläche von weniger als 25 km^2 muss von einer Auswertung unbedingt abgeraten werden, da die entsprechenden Gebiete durchwegs Unterschätzungen von -25% oder mehr aufweisen und Schwierigkeiten in der Wiedergabe der Gebietshydrologie auftreten können. Der Flächenbereich von unter 25 km^2 betrifft 43 der modellierten Einzugsgebiete; er ist in den Übersichtsdiagrammen von Kapitel 5.1 mit dichter Schraffierung gekennzeichnet.

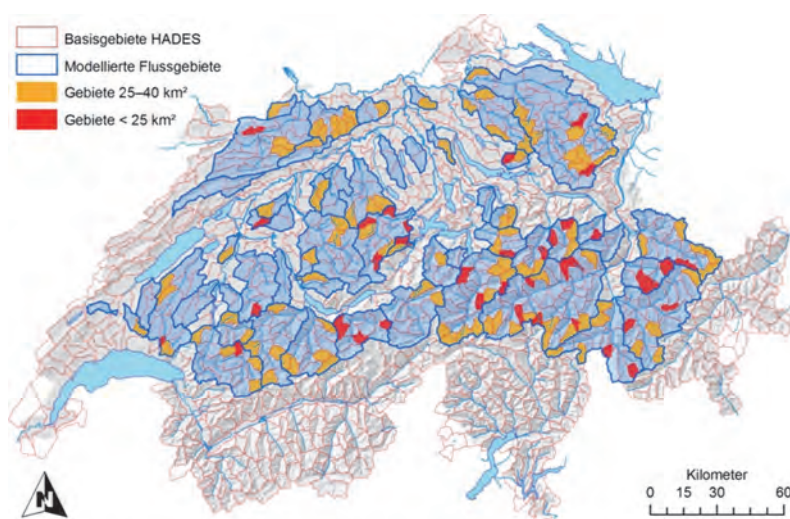


Abbildung 6-1. In diesem Bericht betrachtete Einzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 25 bis 40 km^2 (orange) resp. weniger als 25 km^2 (rot).

Aus Sicht der Gebietsfläche können unter Berücksichtigung der eben erläuterten Limitierungen also 302 der 450 hier bearbeiteten Einzugsgebiete ohne Einschränkung bezüglich des Hochwasser-

bereichs ausgewertet werden. Abbildung 6-1 zeigt in einer Übersichtskarte, für welche Gebiete Limitierungen bezüglich der Gebietsfläche vorliegen.

6.2 Karst und weitere Besonderheiten

Neben der Einzugsgebietsfläche stellen auch grossräumige Karstvorkommen eine Anwendungseinschränkung dar. PREVAH besitzt zwar ein einfaches Karstmodul (Gurtz *et al.*, 1997); auf dessen Anwendung in ungemessenen Gebieten wurde aber wegen grosser Unsicherheiten bei der Festsetzung des zugehörigen Parameters verzichtet (vgl. Kapitel 2.5).

Wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, kann die hydrogeologische Karte von Bitterli *et al.* (2004) (Abbildung 6-2, oben) dazu verwendet werden, potenzielle Problemgebiete zu identifizieren. Wo der Anteil an verkarstungsfähigem Gestein gemäss dieser Karte mehr als 50% ausmacht, muss tendenziell mit einer Überschätzung des HQ_{100} gerechnet werden. Abbildung 6-2 (unten) identifiziert die entsprechenden Einzugsgebiete, der exakte Anteil verkarstungsfähigen Gesteins aller 450 berücksichtigten Einzugsgebiete findet sich in Anhang A. In den betroffenen Gebieten müssen die Simulationsergebnisse von PREVAH unbedingt mit Referenzwerten verglichen werden, beispielsweise mit den Abflussspenden ähnlich grosser Gebiete derselben Region. Auch die Ergebnisse von HQx_{meso_CH} können hilfreich für eine Einordnung sein, obschon HQx_{meso_CH} Karstphänomene auch nicht berücksichtigt. Diese Plausibilisierungen können auf Grundlage der in Kapitel 5 vorgestellten Resultatblätter vorgenommen werden.

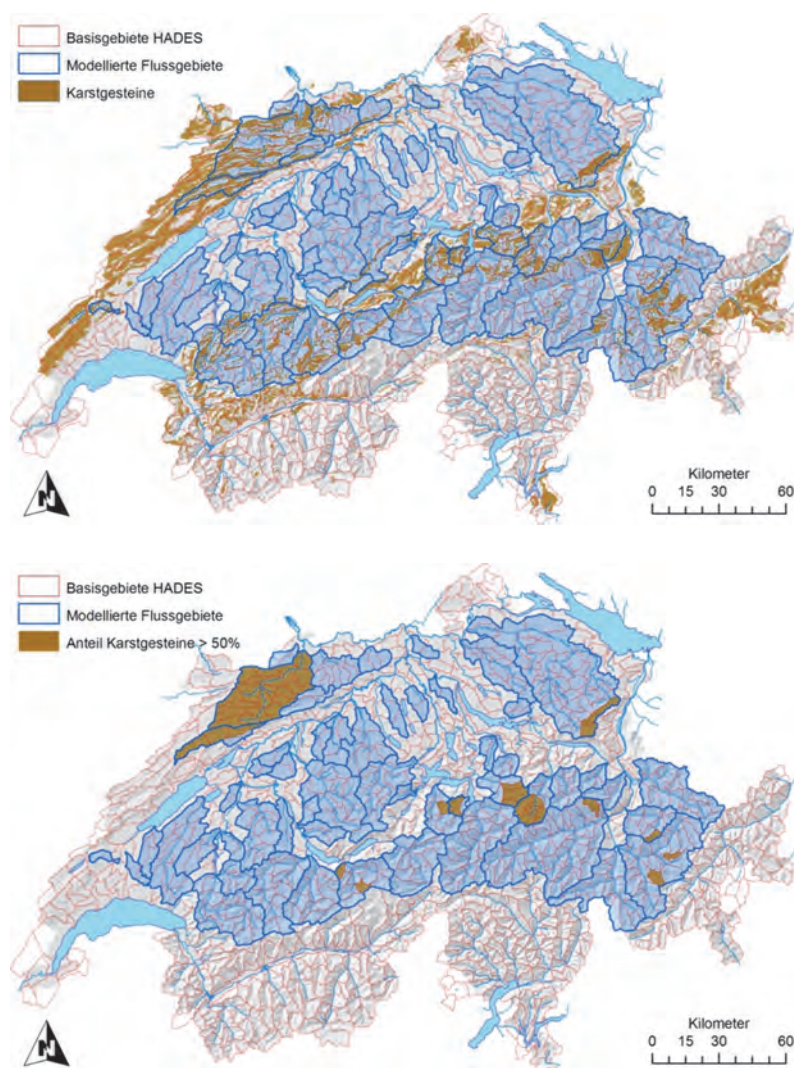


Abbildung 6-2. Oben: Vorkommen verkarstungsfähiger Gesteine gemäss Bitterli *et al.* (2004). Unten: In diesem Bericht betrachtete Einzugsgebiete mit einem Anteil verkarstungsfähiger Gesteine von mehr als 50%.

Für die in den Flussgebieten von Areuse und Orbe gelegenen Einzugsgebiete wurden wie in Kapitel 2.5 beschrieben wegen ausgeprägter Karstphänomene keine Simulationen vorgenommen.

Vorsicht ist auch bei Einzugsgebieten geboten, welche andere hydrologische oder hydraulische Besonderheiten aufweisen, die durch das Modellsystem nicht oder nur unzureichend abgebildet werden

können. An dieser Stelle sei vor allem auf Ausuferungen bei grossen Hochwasserabflüssen hingewiesen, welche eine korrekte Abschätzung der Spitzenabflüsse – notabene auch mit allen anderen empirischen und stochastischen Verfahren – stark erschweren (siehe z.B. *Naef und Thoma*, 2002). Diese Problematik findet sich beispielsweise im Flussgebiet der Murg (Aargau), wo die HQ_{100} der beiden grössten modellierten Einzugsgebiete 20-671+ (entspricht Pegel Langete-Lotzwil) und 20-672+ [20-670+] (entspricht Pegel Murg-Murgenthal) durch PREVAH deutlich und durch HQx_meso_CH noch deutlicher überschätzt werden.

6.3 Extrapolationszeitraum

Der DVWK (1999) empfiehlt in seinen Richtlinien, eine Extrapolation nicht über das dreifache der Anzahl beobachteter Jahre hinaus vorzunehmen. Dasselbe gilt selbstverständlich auch für simulierte Werte. Im vorliegenden Bericht wurden HQ_{100} aus der 20-jährigen Reihe 1984–2003 extrapoliert. Diese 20 Jahre sind die minimale Dauer, welche gemäss DVWK (1999) als Voraussetzung für Abschätzungen mit brauchbaren statistischen Aussagen vorzuliegen hat. Die maximal empfohlene Wiederkehrperiode von 60 Jahren wird aber bei der Schätzung des HQ_{100} überschritten. Gewählt wurde das HQ_{100} , weil es in anderen Schätzverfahren oft als Ergebnis ausgewiesen wird und somit eine gute Vergleichbarkeit ermöglicht. Zudem hat *Viviroli* (2007) gezeigt, dass der prozentuale Schätzfehler beim HQ_{100} für die vorliegende Methode demjenigen kleinerer Wiederkehrperioden (HQ_{20} , HQ_{50}) sehr ähnlich ist.

Es bleibt hier dem Anwender überlassen, ob er sich an die empfohlene Obergrenze der Extrapolationsdauer halten will oder im Einzelfall eine Extrapolation darüber hinaus wagt. Dabei sollte unter anderem die Breite des Konfidenzbereichs beachtet werden; bei einem breit auffächernden Bereich sollte von einer Extrapolation unbedingt abgesehen werden. Weitere Hinweise finden sich im Regelwerk der DVWK (1999). Auf jeden Fall muss beachtet werden, dass seltene und extreme Ereignisse in einer kurzen Reihe – auch in einer simulierten – mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit enthalten sind als in einer langen Reihe. Eine Extrapolation auf grosse Wiederkehrperioden kann daher riskant sein und vermag die tatsächliche Hochwassercharakteristik eines Gebietes unter Umständen nicht treffend zu beschreiben.

6.4 Die Rolle gemessener Gebiete

Für 82 der 450 betrachteten Einzugsgebiete stehen in der Periode 1984–2003 Abflussmessreihen mit einer Länge von mindestens fünf Jahren zur Verfügung. In diesen 82 Fällen war die Kalibrierung des Modells möglich (Kapitel 2.3.1) und wurde von *Viviroli* (2007) und *Viviroli et al.* (2009b) ausführlich dokumentiert. Die regionalisierten Simulationen für diese 82 Gebiete erfolgten aber jeweils unabhängig von Beobachtung und Kalibrierung. Dies wurde bewerkstelligt, indem die Kalibrierungsergebnisse des betreffenden Gebietes jeweils vor der Parameterschätzung aus dem der Regionalisierung zur Verfügung stehenden Informationskatalog gestrichen wurden (Jackknife-Ansatz, vgl. Abbildung 6-3).

Nachfolgend wird erläutert, welche Rolle diese Gebiete bei Abschätzung und Plausibilisierung der hier vorgestellten Resultate spielen.

- Abschätzung: Wenn für das zu untersuchende Gebiet eine lange Abflussmessreihe zur Verfügung steht, ist eine Abschätzung mit Hilfe der kalibrierten oder regionalisierten Simulation von PREVAH wenig sinnvoll. Anstatt dessen sollte die vollständige Messreihe der beobachteten Abflüsse ausgewertet werden. Umfasst die Messreihe aber deutlich weniger als 20 Jahre, kann die Modellierung einen Informationsgewinn bringen, denn auf Grundlage des meteorologischen Inputs kann PREVAH den Abfluss ab 1984 simulieren. In diesem Falle sollten nicht die Resultate der regionalisierten Modellversion verwendet werden, sondern diejenigen der kalibrierten Modellversion.
- Plausibilisierung: Auch wenn die Abflussbeobachtungen nicht für die Regionalisierung verwendet wurden, stehen sie natürlich nach wie vor zur Verfügung und können verwendet werden, um die Güte der Regionalisierung objektiv zu beurteilen. Diese Beurteilung kann beispielsweise mit Hilfe der Übersichtsdarstellungen (Kapitel 5.1) vorgenommen werden, so etwa anhand des Resultatblatts zu den Kennzahlen des Abflusses (Kapitel 5.1.1 und Anhang B), wo systematische Über- oder Unterschätzungen durch Vergleich mit den allenfalls vorhandenen Beobachtungen erkannt werden können. Eingehendere Betrachtungen können dann mit Hilfe der Resultatblätter zu einzelnen Einzugsgebieten vorgenommen werden (Kapitel 5.2), wo auch die individuellen Modellgüten aufgeführt sind. Es muss aber beachtet werden, dass sich die Güte der Regionalisierung schwer beurteilen lässt, wenn in einer Region nur sehr wenig unbeeinflusste Abflussmessdaten zur Verfügung stehen, wie beispielsweise im Rheineinzugsgebiet oberhalb des Bodensees (vgl. Abbildung 2-3). Bei Anwendung des Jackknife-Prinzips auf ein gemessenes und kalibriertes Einzugsgebiet

entfällt nämlich immer eine Stützstelle der Regionalisierung, was die Ergebnisse in spärlich instrumentierten Regionen unter Umständen schlechter erscheinen lässt, als sie tatsächlich sind. Deutlich sichtbar ist dies beim grössten Einzugsgebiet der Plessur (10-274 [10-270+]), welches mit dem Pegel Plessur-Chur eine Messreihe besitzt: Bei Regionalisierung von PREVAH (Jackknife-Prinzip: die kalibrierten Parameter für Plessur-Chur werden aus dem Regionalisierungsdatensatz ausgeschlossen) wird für das HQ_{100} ein deutlich zu hoher Wert geschätzt, während die kalibrierte Modellversion einen sehr guten Schätzer liefert (vgl. Anhang B.35). Die Schätzwerte für die 8 ungemessenen Einzugsgebiete im Flussgebiet der Plessur – für welche die Modellparameter allesamt regionalisiert wurden – sind wegen der guten Übereinstimmung mit den Schätzwerten von $HQ_{\text{meso_CH}}$ ebenfalls sehr vertrauenswürdig. Etwas stärker ins Gewicht fallen dürfte der beschriebene Effekt für den Regionalisierungsansatz Kriging, welcher ausschliesslich auf der räumlichen Nähe basiert. Weniger bedeutsam ist das eben Erläuterte für die Teilansätze Nearest Neighbours und Regression. In der Anwendung auf tatsächlich ungemessene Gebiete spielen die Besonderheiten des Jackknife-Ansatzes keine Rolle.

Bei Vorliegen von Messdaten und Kalibrierungsergebnissen sind die entsprechenden Werte in allen relevanten Resultatblättern eingetragen, und zusätzlich sind die Hochwasserkennwerte der kalibrierten Modellversion als Texttabellen verfügbar (siehe auch Kapitel 7, Punkt 4).

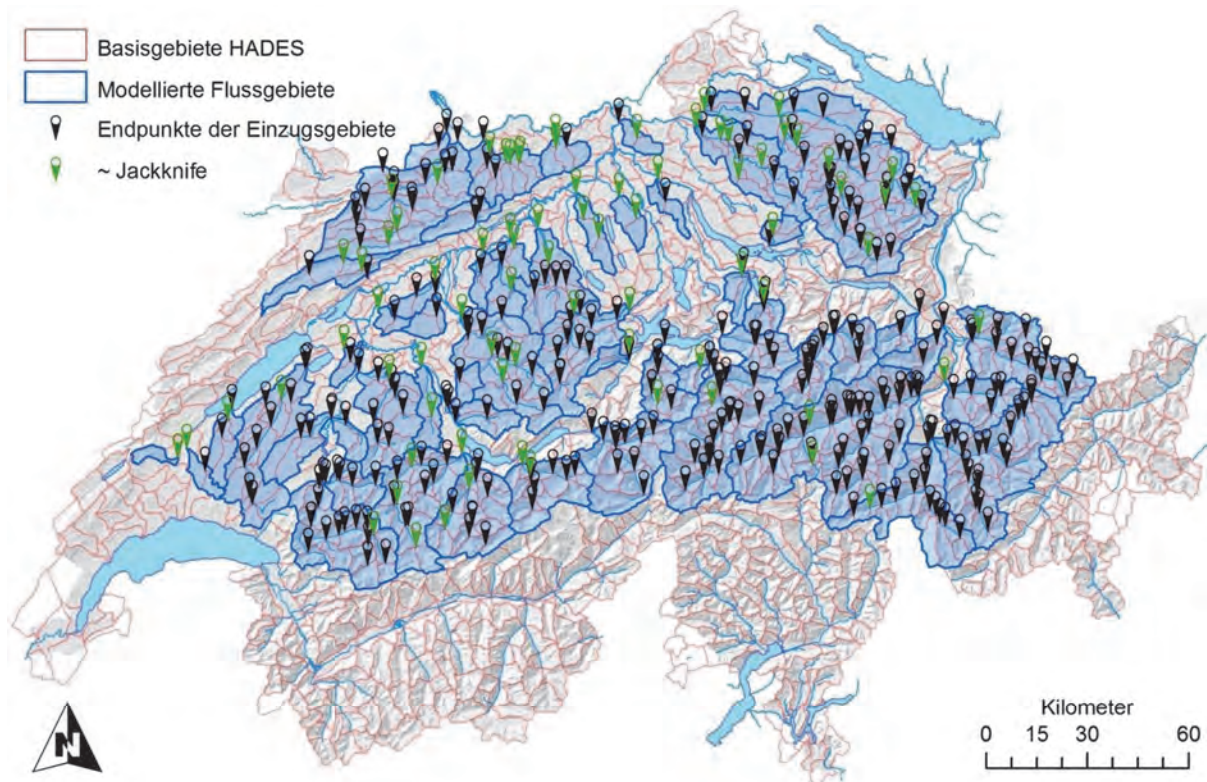


Abbildung 6-3. In diesem Bericht betrachtete Einzugsgebiete und zugehörige Endpunkte (vgl. Kapitel 2.4). Speziell gekennzeichnet sind die Endpunkte derjenigen Gebiete, für welche die freien Modellparameter unter Anwendung des Jackknife-Verfahrens geschätzt wurden. Für diese Gebiete stehen also Abflussmessungen und eine kalibrierte Modellversion zur Verfügung, wobei diese Informationen bei der Parameterschätzung nicht verwendet wurden.

6.5 Anthropogene Beeinflussungen

Unbedingt zu beachten ist, dass sich alle in diesem Bericht zusammengefassten Simulationen und Hochwasserabschätzungen auf natürliche Abflüsse beziehen, anthropogene Beeinflussungen der Abflüsse also nicht berücksichtigt sind. Solche Beeinflussungen betreffen in erster Linie Veränderungen des Abflusses durch Wasserkraftgewinnung (siehe z. B. Margot et al., 1992), während die See- und Flussregulierung in den ausgewählten Gebieten keine Rolle spielt (vgl. Kapitel 2.5).

Der Grund für die Fokussierung auf die natürlichen Abflüsse ist bei der Kalibrierungsgrundlage zu suchen, welche von Viviroli (2007) für die Parameterschätzung in ungemessenen Gebieten (Regiona-

lisierung) erstellt wurde. Sämtliche dieser 140 kalibrierten Gebiete sind unbeeinflusst, womit sich auch jede Regionalisierung auf die unbeeinflusste Situation bezieht. Mit diesem Vorgehen wurden grosse Unsicherheiten in der Parameterschätzung vermieden, da Daten zu den Turbinierungsmengen von Kraftwerken schwer erhältlich sind – insbesondere in der erforderlichen hohen zeitlichen Auflösung – und die entsprechenden Rückrechnungen auf den ursprünglichen Abflussverlauf heikel sind. Kraftwerkeinflüsse können für einzelne Gebiete aber durchaus auch im Nachhinein berücksichtigt werden, indem beispielsweise die simulierten Abflussmengen für Teilgebiete mittels eines Routingmodells mit eingebautem Kraftwerkschema zusammengefügt werden.

7 Vorgehen bei einer Abschätzung

Im Sinne einer praktischen Anleitung werden nachfolgend die wichtigsten Schritte für eine Hochwasserabschätzung aufgeführt. Das Vorgehen ist in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt. Explizit aufgeführt werden jeweils die für die Abschätzung nötigen Unterlagen (Grafiken, Dateien) sowie die Kapitel dieses Berichts, in welchen die Grundlagen (Methodik, Diskussion) nachgelesen werden können. Die erwähnten Grafiken und Dateien sind jeweils pro Einzugsgebiet in einem ZIP-komprimierten Archiv zusammengefasst, der Name der Archivdatei entspricht dem Einzugsgebietsnamen. Zusätzlich enthält jedes dieser Archive eine Datei „LIESMICH.TXT“, in welcher die grundlegenden Gebiets-eigenschaften¹ aufgelistet und die einzelnen Dateien nochmals kurz erläutert werden.

Die folgende Anleitung sollte als Zusammenfassung und Hilfestellung verstanden werden. Es liegt jedoch im Ermessen des Anwenders, sich mit den in den vorangehenden Kapiteln erläuterten Hintergründen und Besonderheiten vertraut zu machen.

1. Zu bearbeitendes Gebiet auswählen:

Mit Hilfe von Anhang A oder einer ähnlichen Grundlage (z.B. Tafel 1.2 des Hydrologischen Atlas der Schweiz, *Breinlinger et al.*, 1992) muss bestimmt werden, welches Basisgebiet dem abzuschätzenden Gebiet am ehesten entspricht. Dieses Gebiet wird im Folgenden als „xx-xxx“ bezeichnet. Denselben Namen trägt auch die Archivdatei, welche alle relevanten Resultatblätter enthält. Falls sich das abzuschätzende Gebiet über mehrere Basisgebiete erstreckt, muss nur das unterste Basisgebiet bestimmt werden. Die Einzugsgebietsbezeichnung wird dabei um ein „+“ ergänzt. In diesem Bericht wird stets ab der höchstgelegenen Wasserscheide gerechnet, so dass oberliegende Basisgebiete stets mit enthalten sind. Es ist eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen dem Pegelpunkt des abzuschätzenden Gebietes und dem Auslass des gewählten Basisgebietes anzustreben. Wo grössere Unterschiede in den jeweiligen Gebietsflächen bestehen, kann der Schätzwert in einen spezifischen Abfluss [$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$] umgerechnet. Über die Fläche des abzuschätzenden Einzugsgebietes kann dann wieder in eine Durchflussmenge [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] zurückgerechnet werden. Für die nachfolgenden Plausibilisierungen ist das Flussgebiet relevant, in welchem das gewählte Einzugsgebiet liegt (vgl. Abbildung 2-7). Dieses Flussgebiet wird im Folgenden als „yyy“ bezeichnet. In den Archivdateien sind die Daten des betreffenden Flussgebietes jeweils bereits abgelegt und mit dem vollständigen Namen bezeichnet. Wo lange Messreihen des Abflusses vorliegen, ist eine Abschätzung mit dem vorliegenden Verfahren nur für Vergleichszwecke sinnvoll. Bei kurzen Messreihen kann die Abschätzung mit der simulierten Reihe aber wertvoll sein, wenn die maximal mögliche Simulationslänge deutlich grösser als die Beobachtungsdauer ist.

Weiterführende Informationen und Daten:

→ **Unterlagen:** Anhang A

→ **Datei:** xx-xxx.zip (alle im Folgenden genannten Dateien sind in dieser Archivdatei enthalten)

→ **Grundlagen:** Kapitel 2.4 und 2.5

2. Limitierende Faktoren abklären:

Der Anwendungsbereich der hier vorgestellten Hochwasserabschätzungsmethode wird vor allem durch die Gebietsgrösse limitiert. Nur unter Vorbehalt verwertbar sind die Resultate für Einzugsgebiete mit einer Fläche von weniger als 40 km^2 , da unterhalb dieser Gebietsgrösse häufig mit Unterschätzungen gerechnet werden muss. Eine Abschätzung in diesem Skalenbereich sollte nur nach sorgfältiger Prüfung der Plausibilität (siehe folgende Punkte 3 und 5) und nur zusammen mit den Ergebnissen anderer Schätzverfahren vorgenommen werden. Ausdrücklich von einer Anwendung abgeraten wird in Einzugsgebieten mit einer Fläche von weniger als 25 km^2 , da seltene Hochwasserabflüsse mit grosser Wahrscheinlichkeit stark unterschätzt werden. Des Weiteren muss in

¹ Gebietsname, Gewässername, Koordinaten des Gebietsauslasses, unterstes Basisgebiet gemäss HADES, unterstes Bilanzierungsgebiet gemäss HADES (nur wo zutreffend), übergeordnetes Flussgebiet, Fläche, mittlere Höhe, Vergletscherungsgrad, Anteil verkarstungsfähiges Gestein, zugeordnetes kalibriertes Einzugsgebiet (nur wo zutreffend)

Gebieten mit starker Verkarstung (mehr als 50% verkarstungsfähiges Gestein gemäss *Bitterli et al.*, 2004) mit einer systematischen Überschätzung seltener Hochwasserabflüsse gerechnet werden.

Weiterführende Informationen und Daten:

→ **Unterlagen:** Anhang A

→ **Grundlagen:** Kapitel 6

3. *Plausibilität der Gesamtsimulation beurteilen:*

Die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse mittels Langzeitsimulation besitzt grössere Glaubwürdigkeit, wenn sie auf einer plausiblen Gesamtsimulation basiert und das zugrundeliegende hydrologische Modellsystem die Gebietshydrologie also sinnvoll erfasst und wiedergibt. Dabei sollte in einem ersten Schritt sichergestellt werden, dass die Hydrologie des übergreifenden Flussgebietes plausibel ist und dass das zu untersuchende Einzugsgebiet keinen Ausreisser darstellt. Dazu dienen vor allem die Resultatblätter zu den Kennzahlen des Abflusses (gegen die Gebietsfläche aufgetragene Werte für mQ , mHQ , HHQ , HQ_{100}) und zum mittleren jährlichen Niederschlag nach Höhenzone. Diese Blätter liegen für jedes der 54 bearbeiteten Flussgebiete vor. Anschliessend kann für das betrachtete Einzugsgebiet die simulierte Ganglinie überprüft werden. Eine Grafik dazu liegt für jedes der 450 bearbeiteten Einzugsgebiete vor. Die Ganglinie sollte beispielsweise den Regimeverlauf und das Verhalten vor und nach Spitzenabflüssen plausibel reproduzieren. Als Referenz können Gebiete mit Abflussbeobachtungen dienen, welche bezüglich mittlerer Höhe und Gebietsgrösse vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Ergänzend kann überprüft werden, ob die für das zu untersuchende Gebiet ermittelten freien Modellparameter von denjenigen benachbarter Gebiete signifikant abweichen oder andere Auffälligkeiten aufweisen (Parameterwerte liegen am Rand des physikalisch plausiblen Wertebereichs).

Weiterführende Informationen und Daten:

→ **Dateien:** `yyy_hydrol.pdf`, `yyy_precip.pdf`, `xx-xxx_hydrogr.pdf`, `yyy_param.pdf`

→ **Grundlagen:** Kapitel 5.1 und 5.2.1

4. *Hochwasserabschätzung vornehmen:*

Aus den simulierten Jahreshochwassern 1984–2003 wurde für den vorliegenden Bericht bereits eine erste Extrapolation vorgenommen. Sie dient vor allem zum Vergleich der Resultate verschiedener Gebiete und verschiedener Verfahren und basiert deshalb einheitlich auf der ersten Extremalverteilung, deren Parameter mit den Wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten geschätzt wurden (E1-WGM). Der Anwender kann aber auch individuelle Schätzungen nach den aktuellen Vorschriften des DVWK (1999) vornehmen. Dazu stehen pro Einzugsgebiet Tabellen mit den simulierten Jahreshochwassern 1984–2005 (sowie weiteren statistischen Kennwerten) in $[m^3 s^{-1}]$ zur Verfügung. Ein Direktimport in das Analyseprogramm HQ-EX (WASY, 1997), welches sich nach den Vorschriften des DVWK (1999) richtet, ist über die Datei des Typs `.hqx` möglich. Beachtet werden sollte die gemäss DVWK (1999) maximal zulässige Extrapolationsdauer, welche bei $n = 22$ Jahreshöchstabflüssen $3 \times n = 66$ Jahre beträgt.

Weiterführende Informationen und Daten:

→ **Dateien:** `xx-xxx_hqgraph.pdf`, `x-xxx_qstatm3s.txt2`, `xx-xxx.hqx2`

→ **Grundlagen:** Kapitel 5.1 und 5.2.1

5. *Plausibilität der Hochwasserabschätzung beurteilen:*

Die aus Punkt 4 resultierende Hochwasserabschätzung sollte unbedingt auf ihre Plausibilität hin überprüft werden, egal ob sie vom Anwender selbst erstellt wurde oder aus den für diesen Bericht bereits erstellten Abschätzungen stammt. Für eine Einordnung in die regional differenzierten Werte des Verfahrens GIUB'96(FN) steht pro Flussgebiet wiederum ein Resultatblatt zur Verfügung, in welchem die aus der Simulation 1984–2003 mit E1-WGM geschätzten Werte in die entsprechenden regionalen Diagramme von GIUB'96(FN) eingetragen sind. Als Vergleichswerte sind die Ergebnisse von `HQx_meso_CH` (5 Verfahren zur Schätzung des HQ_{100} sowie 3 Verfahren zur Schätzung des Q_{max}) sowie Extrapolationen aus allenfalls vorhandenen Beobachtungen ebenfalls aufgetragen.

Weiterführende Informationen und Daten:

→ **Dateien:** `xx-xxx_GIUB96.pdf`, `xx-xxx_hqgraph.pdf`

→ **Grundlagen:** Kapitel 5.2.2 und 5.2.3

² Für Gebiete mit kalibrierter Modellversion zusätzlich `xx-xxx_qstatm3s_kalibriert.txt` resp. `xx-xxx_kalibriert.hqx`

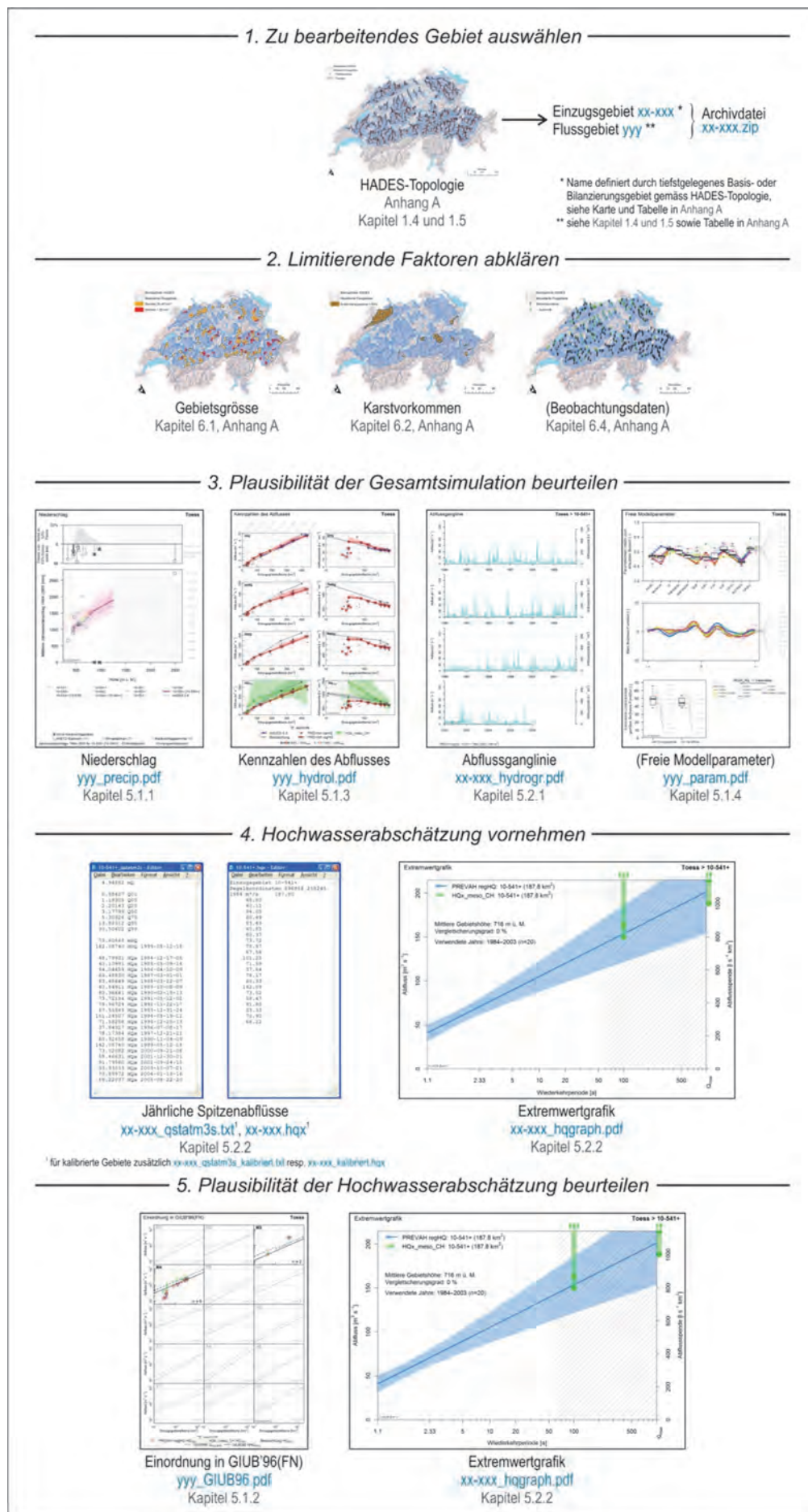


Abbildung 7-1: Vorgehen bei einer Hochwasserabschätzung gemäss Haupttext. In blau sind die jeweils relevanten Dateien (Resultatblätter, Texttabellen) angegeben, in Grau die Kapitel dieses Berichts, welche die zugehörigen Grundlagen erläutern.

Die dringend empfohlenen Plausibilisierungen (Punkte 3 und 5) mögen auf den ersten Blick etwas umständlich erscheinen. Genauer betrachtet sind sie aber ein grosser Vorteil des in diesem Bericht vorgestellten Verfahrens, denn für jedes Einzugsgebiet stehen umfassende hydrologische Hintergrundinformationen zur Verfügung, welche im Kontext des übergreifenden Flussgebietes auf ihre Plausibilität hin eingeschätzt werden können. Diese Hintergrundinformationen wurden im Rahmen des vorliegenden Berichtes für den gesamten Anwendungsraum (450 Einzugsgebiete) eingehend verglichen und diskutiert (Kapitel 4). Andere Schätzverfahren liefern oft nur einen einzelnen Wert, dessen Plausibilität für sich alleine genommen praktisch ausschliesslich durch Überprüfung und Variation der Verfahrensdetails (z.B. Abflusskoeffizient, Abminderungsfaktor) eingeschätzt werden kann. Die Festlegung dieser Details bietet jedoch einen grossen Ermessensspielraum.

Den grössten Informationswert in der Hochwasserabschätzung wird erreicht, indem die bisherigen und das hier vorgestellte neue Verfahren parallel angewendet werden und die Ergebnisse vergleichend beurteilt. Bereits bei HQx_meso_CH hat sich gezeigt, dass die Kombination verschiedener Schätzwerte von grosser Bedeutung ist, da sie zu zuverlässigeren Resultaten führt (siehe *Barben*, 2003 und *Viviroli*, 2007). Das neue Verfahren sollte in diesem Sinne als wesentliche Erweiterung der bisherigen Möglichkeiten gesehen werden, keinesfalls aber als Ersatz. Bei geschickter Anwendung und Interpretation können seine Stärken – allem voran die Prozessbasierung und die Transparenz – mit den Stärken anderer, bereits seit längerem erprobter Verfahren kombiniert werden.

Wie schon in Kapitel 1 erwähnt, sollten Hochwasserabschätzungen nur unter Einbezug von Expertenwissen vorgenommen werden. Die Schätzwerte, welche mit den oben beschriebenen Verfahren gewonnen werden, sollten dabei, wenn immer möglich, durch weitere Informationen ergänzt werden, wie etwa aus der Feldbegehung, der Identifikation dominanter Abflussprozesse oder der Auswertung historischer Hochwasser.

8 Ausblick

Die in den vorangehenden Kapiteln präsentierten Resultate belegen, dass das in diesem Bericht vorgestellte Modellsystem dazu geeignet ist, seltene Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten der Schweiz mittels Langzeitsimulation abzuschätzen. Die Schätzfehler bewegen sich im Bereich der etablierten empirischen und stochastischen Verfahren, jedoch ist die Methodik eine völlig andere, wodurch für die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten ein wesentlicher Informationsgewinn erwartet werden kann. Dieser Informationsgewinn ist am grössten, wenn die etablierten und das neue Verfahren kombiniert angewendet werden und die entsprechenden Resultate vergleichend beurteilt werden. Eine Ablösung der bisherigen Verfahren ist weder erstrebenswert noch sinnvoll.

Weil die hier vorgestellte Methode zur Hochwasserabschätzung auf einem prozessorientierten hydrologischen Modellsystem basiert, bieten sich sehr interessante Möglichkeiten zu komplementären Anwendungen und Weiterentwicklungen. Einige befinden sich in Arbeit oder sind bereits fallweise umgesetzt worden, andere stehen noch offen:

- Anwendung südlich des nördlichen Alpenkamms: Die Entwicklung einer Methode, mit welcher die freien Parameter von PREVAH für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen geschätzt werden können (Viviroli, 2007; Viviroli et al., 2009c), war eine grosse Herausforderung. Die Regionalisierung der Modellparameter wurde vorerst auf die Alpennordseite begrenzt, um die bereits grossen methodischen Herausforderungen nicht noch zusätzlich mit den klimatischen, meteorologischen und hydrologischen Besonderheiten von Wallis, Tessin und Engadin zu erweitern. Zudem stehen in diesen Regionen bedeutend weniger unbeeinflusste Abflussmessreihen zur Verfügung, anhand welcher eine Regionalisierung entwickelt werden kann. Im Rahmen der Arbeiten am BAFU-Projekt „Climate Change in Switzerland – Hydrology“ (CCHydro, s. Volken, 2010) konnten bereits knapp zwei Dutzend südlich des nördlichen Alpenkamms gelegene Einzugsgebiete kalibriert und für die Regionalisierung aufbereitet werden (Köplin et al., 2010). Diese Arbeiten werden es ermöglichen, den hier vorgestellten Ansatz auch auf der Alpensüdseite einzusetzen.
- Untersuchung meteorologischer Szenarien: Da das vorgestellte Modellsystem prozessorientiert ist, können Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen quantifiziert werden. Eine interessante Möglichkeit im Bereich Hochwasser ist die Einbindung hypothetischer Niederschlagsverläufe zur Untersuchung von Worst-Case-Szenarien oder für Sensitivitätsanalysen. Schwanbeck et al. (2007a, 2007b und 2008) haben derartige Untersuchungen bereits für das Einzugsgebiet der Sihl sowie für das Berner Oberland durchgeführt. Da die Parameter von PREVAH für ungemessene Gebiete mittels Regionalisierung geschätzt werden können, bestehen umfassende Anwendungsmöglichkeiten.
- Untersuchung von Szenarien der Klima- und Landnutzungsänderung: Der meteorologische Modellinput kann selbstverständlich auch im Sinne von Klimaänderungsszenarien modifiziert werden, um deren Auswirkungen auf den Abfluss zu untersuchen. Idealerweise sollten solche Untersuchungen kombiniert mit Szenarien der Landnutzungsänderung (z.B. Gletscher, Wald) erfolgen, um hydrologisch aussagekräftige Projektionen zu erhalten. Beide Szenarienarten können dank der Prozessorientierung von PREVAH untersucht werden. Im schon erwähnten Projekt CCHydro wird genau diese Kombination von Klima- und Landnutzungsszenarien betrachtet: Wie Köplin et al. (2010) darstellen, wird PREVAH dabei in stündlicher Auflösung auf ca. 200 Bilanzierungsgebiete angewandt, um anschliessend die Auswirkungen der angenommenen Veränderungen auf das Hochwasserverhalten zu untersuchen und sensitive Gebiete zu identifizieren. Eine umfassende Analyse von möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung hat Wehren (2010) für das Einzugsgebiet der Kander im Berner Oberland mit PREVAH durchgeführt. Unter Einsatz eines Wettergenerators wurde dabei unter anderem die Sensitivität der Hochwasserabflüsse auf Veränderungen in Temperatur und Niederschlag beurteilt. Damit ist die erwähnte Arbeit eine der ersten Studien überhaupt, welche sich mit dem herausfordernden Thema von Hochwasser und Klimaänderung in den Alpen

konsequent prozessorientiert befasst. Der Detaillierungsgrad der Resultate belegt den Wert des modellbasierten Ansatzes.

- Abschätzung seltener Durchflussvolumina: Der hier verwendete Ansatz der Langzeitsimulation liefert im Gegensatz zu allen anderen Verfahren nicht nur Schätzungen für Spitzenwerte, sondern erzeugt auch durchgehende Durchflussganglinien in stündlicher Auflösung ab 1984. Diese Ganglinien können z.B. verwendet werden, um seltene Direktabflussvolumina abzuschätzen. Letztere konnten bisher nur unzureichend abgeschätzt werden, obwohl sie für die Praxis eine grosse Relevanz besitzen, etwa für die Bemessung von Rückhalteräumen oder zur Abschätzung des Geschiebetransports. *Viviroli* (2007) konnte anhand von 49 repräsentativen Testgebieten aufzeigen, dass die Schätzung seltener Direktabflussvolumina mit der hier verwendeten Modell-Konfiguration grundsätzlich funktioniert und gute Ergebnisse liefert. Die Weiterentwicklung zu einer eigenständigen Sammlung von Schätzwerten wäre daher lohnenswert.
- Verlängerung der Simulationsdauer: Wenn es gelingt, den meteorologischen Modellantrieb für eine längere Dauer zur Verfügung zu stellen, verlängert sich auch die Zeitperiode, für welche Abflusssimulationen erstellt werden können. Damit wäre es möglich, den limitierten Extrapolationszeitraum wesentlich auszudehnen (vgl. *DVWK*, 1999). Eine Reihenverlängerung kann entweder durch Disaggregation historischer Meteodaten oder durch Erzeugung einer synthetischen Modellmeteorologie erfolgen. In diesem Zusammenhang sei beispielsweise auf die Arbeiten von *Wehren* (2010) mit einem Wettergenerator verwiesen.

Abschliessend wird nochmals explizit darauf hingewiesen, dass Daten und Werte bei allen Anwendungen des Modellsystems immer kritisch beurteilt werden sollten. Die Ergebnisse sind stets mit hydrologischem Sachverstand auszuwerten und einzuordnen.

Literaturverzeichnis

- Andrews, D.F. (1972): Plots of high-dimensional data. *Biometrics* 28, 125–136.
- ASF (Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.
- Ayros Chumplitazi, E.N. (2000): Regionalisierung extremer Abflüsse auf Grundlage statistischer Verfahren. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, 101. Stuttgart.
- Barben, M. (2003): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in der Schweiz. *Geographica Bernensia*, G71. Geographisches Institut der Universität Bern.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2010): Abflussmessdaten hydrologischer Stationen. Bern.
- Bezzola, G.R., Hegg, C., Koschni, A. (2008): Hochwasser 2005 in der Schweiz. Synthesebericht zur Ereignisanalyse. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bern.
- Beven, K.J. (2002): Towards a coherent philosophy for modeling the environment. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 458, 2465–2484.
- Beven, K.J. (2006): A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18–36.
- Beven, K.J., Binley, A.M. (1992): The future of distributed models: model calibration and uncertainty in prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279–298.
- BfS (Bundesamt für Statistik) (2003): GEOSTAT-Produkte. Lizenznummer G158000315. Neuchâtel.
- Bitterli, T., Aviolat, P., Brändli, R., Christe, R., Fracheboud, S., Frey, D., George, M., Matousek, F., Tripet, J.P. (2004): Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 8.6. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Bradley, A.A., Potter, K.W. (1992): Flood frequency analysis of simulated flows. *Water Resources Research*, 28, 2375–2385.
- Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. (1992): Kenngrößen kleiner Einzugsgebiete. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitungen des BWG. Biel.
- Criss, R.E., Winston, W.E. (2008): Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22, 2723–2735.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V.K. (1992): Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28, 1015–1031.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 251. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn.
- Eberhard, A., Diezig, R., Kan, C., Sigrist, B. (2007): Hydrologie Fließgewässer. In: Bezzola, G.R., Hegg, C. eds. Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Umwelt-Wissen, 07-07. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Frei, C., Germann, U., Fukutome, U., Liniger, M. (2008): Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. In: Bezzola, G.R., Hegg, C. eds. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Umwelt-Wissen, 08-25. Bundesamt für Umwelt, Bern, 15–32.
- Gamma, P. (1992): Beitrag zu einer hydrologischen Gliederung der Schweiz. GIS-Basierte Gewinnung von Einzugsgebietsparametern und deren multivariate Klassifikation mit TWINSpan. Diplomarbeit

der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Publikationen Gewässerkunde Nr. 131. Geographisches Institut der Universität Bern.

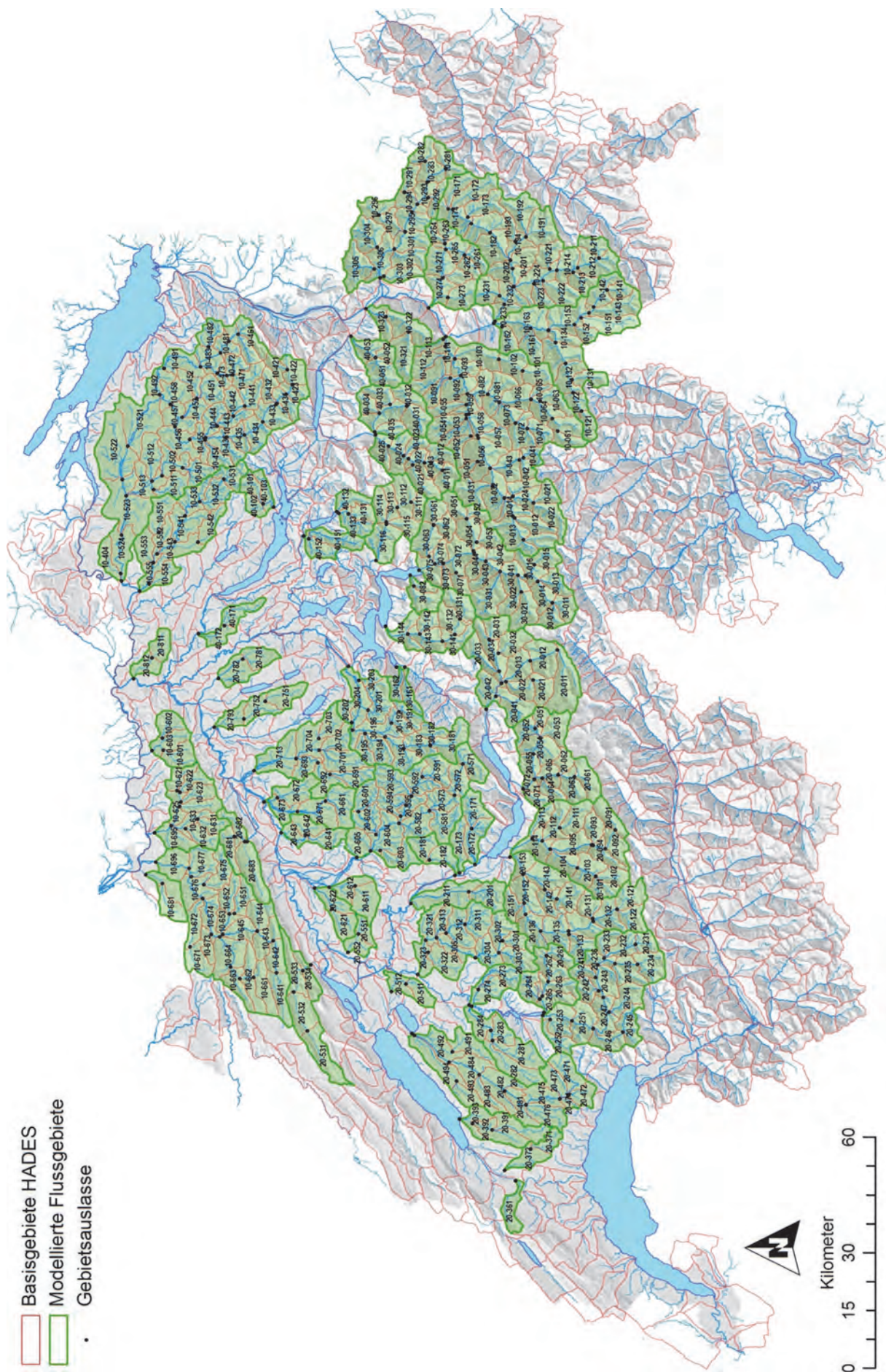
- Greis, N.P., Wood, E.F. (1981): Regional flood frequency estimation and network design. *Water Resources Research*, 17, 1167–1177.
- Greis, N.P., Wood, E.F. (1983): Correction to regional flood frequency estimation and network design. *Water Resources Research*, 19, 589–590.
- Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L., Schulla, J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 31 „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“. vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Hilker, N., Hegg, C., Zappa, M. (2008): Unwetterschäden in der Schweiz 1972–2007 mit besonderer Betrachtung des August-Hochwassers 2005. In: Mikos, M., Hübl, J., Koboltschnig, G. eds. *Interpraevent 2008 Conference Proceedings*, 1. Interpraevent, Klagenfurt, p. 99–110.
- Hundecha, Y., Bárdossy, A. (2004): Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292, 281–295.
- Kan, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Publikationen Gewässerkunde, 169. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B., Weingartner, R. (2010): How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences*, 27, 111–119.
- Lamb, R., Calver, A., Kay, A.L. (2002): A national system for flood frequency estimation in Great Britain using continuous catchment simulation: confidence and uncertainties. In: Spreafico, M., Weingartner, R. eds. *International Conference on Flood Estimation*, 6–8 March 2002, Bern, Switzerland. CHR-Report II-17. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), Lelystad, NL, p. 559–566.
- Lamb, R., Kay, A.L. (2004): Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. *Water Resources Research*, 40, W07501.
- Lang, H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: Sevruck, B. ed. *Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie*, 31. Kümmerli und Frey, Bern, 149–157.
- Madsen, H., Wilson, G., Ammentorp, H.C. (2002): Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 261, 48–59.
- Maniak, U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*. 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag.
- Margot, A., Schädler, B., Sigg, R., Weingartner, R. (1992): Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.3. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) (2005–2008): *SwissMetNet Newsletter*, 1–6. Zürich.
- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) (2009): *Meteorologische Stationsdaten*. Zürich.
- Merz, R., Blöschl, G. (2005): Flood frequency regionalisation spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, 302, 283–306.
- Naef, F., Thoma, C. (2002): Dämpfung von Hochwasserspitzen in Fliessgewässern. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.9. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models: Part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- Oudin, L.V., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Le Moine, N. (2008): Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resources Research*, 44, W03413.

- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. (2005): A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157–171.
- Peel, M.C., Chiew, F.H.S., Western, A.W., McMahon, T.A. (2000): Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments. National Land and Water Resources Audit, Theme 1 – Water Availability. Natural Heritage Trust, Canberra, Australia.
- Schädler, B., Weingartner, R. (2002): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Schwanbeck, J., Viviroli, D., Weingartner, R. (2007a): Das Hochwasser vom August 2005: Könnte es noch schlimmer kommen? *Geosciences Actuel*, 4/2007, 12–15.
- Schwanbeck, J., Viviroli, D., Weingartner, R., Röser, I., Trösch, J. (2007b): Prozessbasierte Abschätzung von Extremhochwassern im Einzugsgebiet der Sihl. Projektschlussbericht im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL). Geographisches Institut der Universität Bern und TK Consult AG, Zürich.
- Schwanbeck, J., Viviroli, D., Weingartner, R. (2008): Modellbasierte Sensitivitätsanalysen für das Berner Oberland. In: Bezzola, G.R., Hegg, C. eds. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Umwelt-Wissen, 08-25. Bundesamt für Umwelt, Bern, 48–58.
- Schwarb, M., Frei, C., Schär, C., Daly, C. (2001): Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.6. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Sefton, C.E.M., Howarth, S.M. (1998): Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, 211, 1–16.
- Seibert, J. (1999): Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff-model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98–99, 279–293.
- Spreadico, M., Aschwanden, H. (1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, 16 und 17. Schweizerische Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Spreadico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, 7 und 8. Schweizerische Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Spreadico, M., Weingartner, R., Barben, M., Ryser, A. eds. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, 4. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- Vandewiele, G.L., Elias, A. (1995): Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology*, 170, 277–291.
- Viviroli, D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für unbeobachtete Einzugsgebiete der Schweiz. Dissertation der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Geographica Bernensia, G77. Geographisches Institut der Universität Bern, ISBN 978-3905835-00-7.
- Viviroli, D., Gurtz, J., Zappa, M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. *Geographica Bernensia*, P40. Institute of Geography, University of Bern, ISBN 978-3-90583501-0.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009a): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1209–1222.
- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009b): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377, 191–207.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009c): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, 377, 208–225.

- Viviroli, D., Archer, D.R., Buytaert, W., Fowler, H.J., Greenwood, G.B., Hamlet, A.F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, I., López-Moreno, J.I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., Woods, R. (2011): Climate Change and Mountain Water Resources: Overview and Recommendations for Research, Management and Policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 471–504.
- Volken, D. (2010): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54, 143–146.
- WASY (Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH) (1997): HQ EX – Wahrscheinlichkeitsanalyse von Jahreshöchstabflüssen, Version 2.02, September 1997. Berlin.
- Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, 37. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie, Bern.
- Wehren, B. (2010): Die Hydrologie der Kander – gestern, heute, morgen. Analyse und Modellierung der Hochwasser und ihrer raum-zeitlichen Dynamik. Dissertation der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Publikationen Gewässerkunde, 460. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Young, A.R. (2006): Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-run-off model. *Journal of Hydrology*, 320, 155–172.
- Zappa, M. (2002): Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Diss. Naturwiss. ETH Zürich, 14895.

Anhang A

Lage und Eigenschaften der modellierten
mesoskaligen Einzugsgebiete



- A Bezeichnung Basisgebiet; „+“ bedeutet, dass oberliegende Gebiete enthalten sind
- B Bezeichnung Bilanzierungsgebiet; „+“ bedeutet, dass oberliegende Gebiete enthalten sind
- C Name des Gewässers
- D Name des Pegels für beobachtete Abflussdaten (nur wenn Daten nach 1984 vorhanden; Vorsicht: Messungen können wegen Wasserkraftgewinnung beeinflusst sein, während die in diesem Bericht vorgestellten Modellierungen stets die unbeeinflusste Situation abbilden)
- E Kalibriert mit PREVAH; Regionalisierung wurde mit Jackknife-Ansatz berechnet
- F Gebietsfläche [km²] (nach *Breinlinger et al.*, 1992)
- G Vergletscherte Fläche [%] (nach *Breinlinger et al.*, 1992)
- H Mittlere Gebietshöhe [m ü. M.] (nach *Breinlinger et al.*, 1992)
- I Anteil verkarstungsfähiges Gestein [%] (nach *Bitterli et al.*, 2004)
- J Zone GIUB'96 (nach *Kan*, 1995 und *Weingartner*, 1999)
- K Name des übergeordneten Flussgebiets

Die wichtigsten der hier genannten Gebietseigenschaften sind auch in der Datei „LIESMICH.TXT“ aufgeführt, welche in jeder Archivdatei mit Modellresultaten enthalten ist (vgl. Kapitel 7).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
10-011		Rein da Curnera			27.4	6.9	2436	0	A4	Vorderrhein
10-012		Rein da Nalps			31.4	4.5	2346	1.6	A4	Vorderrhein
10-013+		Vorderrhein			97.8	3.6	2249	0	A4	Vorderrhein
10-014+	10-010	Vorderrhein	Disentis		155.8	3.2	2202	0.5	S3	Vorderrhein
10-021		Rein de Cristallina	Pardatsch		27.3	7.3	2401	0	S3	Vorderrhein
10-022		Medelser Rhein			50.9	1.8	2355	2.6	S3	Vorderrhein
10-023		Rein da Plattas			22.9	15.9	2217	1.1	S3	Vorderrhein
10-024+	10-020	Medelser Rhein			128.9	6.7	2288	1.8	S3	Vorderrhein
10-031		Russeinbach			53.3	5.5	2385	11.8	S3	Vorderrhein
10-032+	10-030+	Vorderrhein			398.9	4.2	2204	2.5	S3	Vorderrhein
10-041		Somvixer Rhein	Somvix	✓	18.6	7.2	2421	4.9	S3	Vorderrhein
10-042+		Somvixer Rhein			38.9	12.4	2441	2.4	S3	Vorderrhein
10-043+	10-040	Somvixer Rhein			82.5	6	2241	1.8	S3	Vorderrhein
10-051		Ferrerabach	Trun	✓	11.4	18.6	2558	28	A4	Vorderrhein
10-052		Flem			26.2	6.5	2213	37.1	A4	Vorderrhein
10-053+		Flem			51.3	3.7	2056	26.3	A4	Vorderrhein
10-054+		Schmuer			96	4.5	2090	27.4	A4	Vorderrhein
10-055		Ual da Mulin			24.1	0.7	2050	12.8	S3	Vorderrhein
10-056+		Vorderrhein			565.4	4.3	2162	3.1	A4	Vorderrhein
10-057+		Vorderrhein			595.4	4	2161	3.2	A4	Vorderrhein
10-058+		Vorderrhein			629.5	3.8	2132	3.4	A4	Vorderrhein
10-059+	10-050+	Vorderrhein	Ilanz		773.7	3.7	2100	7	S3	Vorderrhein
10-061		Valserrhein			26.3	14.4	2591	0	S3	Vorderrhein
10-062+		Valserrhein			63.1	11.8	2515	0	S3	Vorderrhein
10-063		Peilerbach			31.2	7.1	2297	6.2	S3	Vorderrhein
10-064+		Valserrhein			131.7	7.5	2379	3.2	S3	Vorderrhein
10-065		Tomuelbach			12.1	0	2367	0	S3	Vorderrhein
10-066+	10-060	Valserrhein			184.7	5.4	2286	2.3	S3	Vorderrhein
10-071		Valserrhein			31.7	1.2	2329	4	A4	Vorderrhein
10-072+		Glogn	Lumbrein		78.2	0.6	2207	3.5	A4	Vorderrhein
10-073+	10-070	Glogn			111	0.4	2041	6.6	S3	Vorderrhein
10-081+		Glogn			347.9	3	2108	3.3	S3	Vorderrhein
10-082+	10-080+	Glogn	Castrisch		380.3	2.7	2067	3	S3	Vorderrhein
10-091		Ual Draus			23.5	10.6	2179	12	S3	Vorderrhein
10-092+		Vorderrhein			1225	3.4	2066	5.6	S3	Vorderrhein
10-093+	10-090+	Vorderrhein			1254.5	3.3	2052	5.5	S3	Vorderrhein
10-101		Rabiusa			38	0.8	2226	9.2	S3	Vorderrhein
10-102+		Rabiusa			80.9	0.6	2096	4.8	S3	Vorderrhein
10-103+	10-100	Rabiusa			136.3	0.3	1922	2.9	S3	Vorderrhein
10-111		Flem			42.1	2.7	2066	32.4	S3	Vorderrhein
10-112		Turnigla			34.7	1	2330	70	S3	Vorderrhein
10-113		Val Maliens; Lavoibach			15.8	2.6	2171	84.5	S3	Vorderrhein
10-114+	10-110+	Vorderrhein			1510.1	2.9	2038	8.4	S3	Vorderrhein
10-121		Hinterrhein			26.9	32.3	2599	0	S3	Hinterrhein
10-122+	10-120	Hinterrhein	Hinterrhein	✓	54.3	17	2385	2.3	S3	Hinterrhein
10-131		Areuerbach			31.9	5.5	2454	0	S3	Hinterrhein
10-132+		Hinterrhein			132.1	8.8	2308	0.9	S3	Hinterrhein
10-133+		Hinterrhein			194.8	6.2	2258	11.4	S3	Hinterrhein
10-134+	10-130+	Hinterrhein			218.5	5.8	2246	10.9	S3	Hinterrhein
10-141		Ragn da Ferrara			22.4	2.1	2564	2.2	S3	Hinterrhein
10-142+		Ragn da Ferrara			66.8	1.2	2495	4.1	S3	Hinterrhein
10-143+	10-140	Averserrhein	Avers		123.7	1.9	2444	9	S3	Hinterrhein
10-151		Reno di Lei			52.3	0	2384	0	S3	Hinterrhein
10-152		Ual da Niemet			21	3.6	2347	1.3	S3	Hinterrhein
10-153+	10-150+	Ragn da Ferrara			264.4	1.4	2367	13.6	S3	Hinterrhein

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
10-161		Fundogn			39.6	0.4	2306	45.8	S3	Hinterrhein
10-162		Nolla			25.8	0	1571	0	S3	Hinterrhein
10-163+	10-160+	Hinterrhein	Fuerstenau		626.7	2.9	2241	12.5	S3	Hinterrhein
10-171		Flueelabach			36.5	0.8	2332	0	A5	Albula
10-172		Dischmabach			53.1	2.2	2330	0	A5	Albula
10-173		Sertigbach			46.3	1.7	2348	19.5	A5	Albula
10-174+	10-170	Landwasser	Davos		184.7	1.2	2271	7.9	A5	Albula
10-181+		Landwasser			238	1	2242	13.7	A5	Albula
10-182+	10-180+	Landwasser			295.9	0.8	2180	25.3	A5	Albula
10-191		Albula			61.2	2.5	2354	44.9	A5	Albula
10-192		Ava da Tours			52.3	1.3	2437	13.3	A5	Albula
10-193		Ava da Stugl			16.6	0.8	2336	55.2	A5	Albula
10-194+	10-190	Albula			155.7	1.6	2315	33.4	A5	Albula
10-201+		Albula			483.2	1	2224	30.1	A5	Albula
10-202+	10-200+	Albula	Tiefencastel		524.9	0.9	2191	31.4	A5	Albula
10-211		Gelgia			28.4	0.3	2522	14.9	S1	Albula
10-212+		Gelgia			92.4	0.6	2369	7.5	S1	Albula
10-213		Ava da Faller			29.1	3.6	2499	0.8	S1	Albula
10-214+	10-210	Gelgia			165.6	1.1	2355	5.5	S1	Albula
10-221		Ragn d'Err			36.4	3.6	2416	61.3	S1	Albula
10-222		Ava da Nandro			46.8	0.1	2283	13.4	S1	Albula
10-223		Adont			22.5	0	2192	6	S1	Albula
10-224+	10-220+	Gelgia	Tiefencastel		325.9	1	2250	13.5	A5	Albula
10-231		Rain digl Lai			40.5	0	1783	14.2	A4	Albula
10-232+		Ambula			927.4	0.9	2175	23.6	S3	Albula
10-233+	10-230+	Albula			950.6	0.8	2163	23	S3	Albula
10-261		Welschtobelbach			22.4	0	2359	51.6	A5	Plessur
10-262		Plessur			20.2	0	2246	15.3	A5	Plessur
10-263		Sapuenerbach			19	0	2221	23	A5	Plessur
10-264		Fondeier Bach			18.4	0	2142	12.5	A5	Plessur
10-265+	10-260	Plessur			113.2	0	2158	27.3	A4	Plessur
10-271+		Plessur			162.3	0	2051	20.1	A4	Plessur
10-272		Sagenbach			19	0	2108	24.3	A4	Plessur
10-273		Rabiusa			46.4	0	1696	2.2	A4	Plessur
10-274+	10-270+	Plessur	Chur	✓	265.1	0	1917	14.7	A4	Plessur
10-281		Verainabach			35.2	5.9	2533	0	A5	Landquart
10-282		Verstancabach			31.2	17.8	2497	0	A5	Landquart
10-283+	10-280	Landquart	Klosters/Auelti		102.4	8	2394	0	A5	Landquart
10-291		Schlappinbach			26.4	1	2323	0	N1	Landquart
10-292		Stuetzbach			22.8	0.5	2078	5.1	A5	Landquart
10-293+		Landquart			153.5	5.4	2245	1.1	A4	Landquart
10-294+		Landquart			211.4	4	2205	2.7	A4	Landquart
10-295+		Landquart			254.5	3.4	2125	3.6	N1	Landquart
10-296		Schanielabach			36.3	0	2112	25.4	N1	Landquart
10-297+		Schanielabach			64.4	0	1929	15.3	N1	Landquart
	10-290+	Landquart			318.9	2.7	2070	6	N1	Landquart
10-301+		Landquart			360.8	2.4	2023	5.3	N1	Landquart
10-302		Furnerbach			40.1	0	1680	0	N1	Landquart
10-303		Schranggabach			31.1	0	1529	0	N1	Landquart
10-304		Schraubach			59.5	0	1679	3.4	N1	Landquart
10-305		Taschinasbach	Gruesch	✓	62.8	0	1802	13.3	N1	Landquart
10-306+	10-300+	Landquart	Felsenbach		609	1.4	1818	4.9	N1	Landquart
10-321		Tamina			55.9	3.5	2112	22.1	A4	Tamina
10-322+		Tamina			118	1.7	1881	43.2	A4	Tamina
10-323+	10-320	Tamina; Bergbach	Bad Ragaz		153.1	1.3	1788	34.3	N1	Tamina
10-404		Niederwisnenbach	Niederwisnen		31.2	0	413	0	M4	Thur
10-421		Thur	Unterwasser		20.4	0	1473	96.8	N1	Thur
10-422+		Thur	Alt St. Johann		69.9	0	1391	61.8	N1	Thur
10-423+	10-420	Thur	Stein	✓	96.5	0	1379	56.8	N1	Thur
10-431+		Thur			128	0	1336	44	N2	Thur
10-432		Luteren	Neu St. Johann		28.9	0	1190	14.3	N2	Thur
10-433+		Thur			202	0	1222	28.5	N2	Thur
10-434+		Thur			249.7	0	1137	23.2	N2	Thur
10-435+		Thur			278.5	0	1095	20.7	N2	Thur
10-436+	10-430+	Thur			319.5	0	1043	18	N2	Thur
10-441		Necker			33.8	0	1093	0	N2	Thur
10-442+		Necker			62.3	0	975	0	N2	Thur
10-443+		Necker	Mogelsberg	✓	88.3	0	932	0	N2	Thur
10-444+	10-440	Necker			126.3	0	870	0	N2	Thur
10-451		Glatt			38.9	0	830	0	N2	Thur
10-452		Dorfbach	Gossau		23.3	0	720	0	N2	Thur
10-453+		Glatt	Oberbuieren		91	0	757	0	N2	Thur
10-454		Gonzenbach	Luetisburg		28.4	0	804	0	N2	Thur
10-455+		Thur	Jonschwil	✓	499.6	0	935	11.4	N2	Thur
10-456+		Thur			552.4	0	897	10.2	N2	Thur
10-457+		Thur	Niederbuieren		690	0	838	8.2	N2	Thur
10-458+	10-450+	Thur			737.1	0	815	7.6	N2	Thur
10-461		Schwendibach; Brüelbach			35.2	0.2	1280	69.1	N2	Thur
10-462+	10-460	Sitter	Appenzell	✓	73.4	0.1	1186	41.3	N2	Thur
10-471		Urnaesch			35.3	0	1119	6.3	N2	Thur
10-472+		Urnaesch	Hundwil	✓	63.2	0	1055	3.5	N2	Thur
10-473+	10-470	Urnaesch			80.9	0	1025	2.9	N2	Thur

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
10-481+		Sitter			101.8	0.1	1068	29.9	N2	Thur
10-482		Rotbach			34.6	0	958	0	M3	Thur
10-483+	10-480+	Sitter	St. Gallen	✓	256.2	0	975	12.7	N2	Thur
10-491+		Sitter			307.1	0	930	10.6	N2	Thur
10-492+	10-490+	Sitter			339.3	0	907	9.5	N2	Thur
10-501		Murg			35.8	0	747	0	M4	Thur
10-502+	10-500	Murg	Waengi	✓	81.1	0	642	0	M3	Thur
10-511		Luetzelmurg	Aadorf	✓	38.3	0	601	0	M3	Thur
10-512		Lauche	Matzingen		51	0	531	0	M3	Thur
10-513+	10-510+	Murg	Frauenfeld	✓	218	0	569	0	M4	Thur
10-521+		Thur			1272.5	0	796	7	N2	Thur
10-522+		Thur			1400.1	0	764	6.3	M4	Thur
10-523+		Thur			1668.5	0	689	5.3	M4	Thur
10-524+	10-520+	Thur	Andelfingen	✓	1758.6	0	665	5	M4	Thur
10-531		Toess			38.9	0	924	0	M4	Toess
10-532+		Toess			80.7	0	830	0	M4	Toess
10-533+	10-530	Toess	Raemismuehle, Zell	✓	125.2	0	778	0	M4	Toess
10-541+		Toess			187.8	0	716	0	M4	Toess
10-542		Kempt	Illnau	✓	38.2	0	606	0	M4	Toess
10-543+	10-540+	Toess	Wuelflingen	✓	266	0	666	0	M4	Toess
10-551		Eulach			43.7	0	549	0	M3	Toess
10-552+		Toess	Neftenbach	✓	338.3	0	627	0	M4	Toess
10-553		Naefbach	Neftenbach	✓	33.6	0	460	0	M4	Toess
10-554		Wildbach			26.6	0	531	0	M4	Toess
10-555+	10-550+	Toess	Freienstein	✓	432.8	0	584	0	M3	Toess
10-601		Bruggbach	Gipf	✓	47.5	0	582	15.7	M5	Sissle
10-602		Sissle	Hornussen		36.7	0	519	9.1	M5	Sissle
10-603+	10-600	Sissle	Eiken	✓	121.3	0	523	12.2	M5	Sissle
10-621		Ergolz	Ormalingen	✓	28.2	0	582	14	M5	Ergolz
10-622		Eibach	Gelterkinden	✓	26.7	0	601	21.6	M5	Ergolz
10-623		Homburger Bach	Thuernen	✓	30.4	0	586	17.5	M5	Ergolz
10-624		Diegterbach	Sissach	✓	33.2	0	589	9.3	M5	Ergolz
10-625+	10-620	Ergolz	Ittingen	✓	149.3	0	574	19.1	M2	Ergolz
10-631		Vordere Frenke			25.4	0	710	30.2	M2	Ergolz
10-632		Hintere Frenke			34.5	0	600	38.3	M2	Ergolz
10-633+	10-630	Frenke			88.5	0	583	31.2	M2	Ergolz
10-641		Birs; La Trame			54.7	0	944	66.4	M1	Birs
10-642+		Birs	Court	✓	92.1	0	907	59.9	M1	Birs
10-643+		Birs; Chaliere; R. de Chaulet			139.9	0	911	61.4	M1	Birs
10-644		La Raus	Moutier	✓	41.3	0	875	54.8	M1	Birs
10-645+	10-640	Birs			217.3	0	878	58.1	M2	Birs
10-651		La Gabiare			32.6	0	875	28.6	M1	Birs
10-652		La Scheulte			37.9	0	687	34.7	M1	Birs
10-653+	10-650	La Scheulte			96.6	0	712	34.3	M2	Birs
10-661		Sorne			46.2	0	1019	68.8	M2	Birs
10-662+		Sorne			96.9	0	961	68.3	M2	Birs
10-663+		Sorne			136.9	0	913	64.5	M2	Birs
10-664+	10-660	Sorne	Delemont	✓	209.8	0	803	51.1	M2	Birs
10-671		Luetzel			44.1	0	708	72.3	M2	Birs
10-672+		Luetzel			82	0	660	72	M2	Birs
10-673		R. de Mettembert			22	0	699	46.7	M2	Birs
10-674+		Birs			587.8	0	792	50.2	M2	Birs
10-675		Luessel	Breitenbach	✓	45.8	0	757	39	M2	Birs
10-676+		Birs			771.1	0	742	51.2	M2	Birs
10-677+	10-670+	Birs			821.6	0	730	52.1	M2	Birs
10-681		Birsig			38.4	0	406	31.3	M2	Birsig
10-682+	10-680	Birsig; Binnbach	Binningen		73.1	0	394	30.7	M2	Birsig
10-695+		Ergolz			280.8	0	559	28.7	M2	Ergolz
10-696+		Birs	Muenchenstein		875.1	0	709	51.8	M2	Birs
20-011		Aare			96.8	41.7	2683	0	A3	Aare
20-012+		Aare			162.3	31.7	2570	0	A3	Aare
20-013+		Aare			278.1	26.2	2460	3.3	N1	Aare
20-021		Urbachwasser			37.7	50.3	2716	0	A3	Aare
20-022+	20-020	Urbachwasser			68.9	30.4	2441	11	N1	Aare
20-031		Gadmerwasser			32.3	31.5	2352	0	A3	Aare
20-032		Triftwasser			42.3	47.5	2601	0	A3	Aare
20-033		Gentalwasser			38.9	0	1972	45.2	A3	Aare
20-034+	20-030	Gadmerwasser			168.4	20.5	2115	16	N1	Aare
20-041		Rychenbach			58.5	15.1	1967	33.5	N1	Aare
20-042+	20-040+	Aare			551.3	21.1	2225	11.7	N1	Aare
20-051		Schwarze Luetschine			15.9	67.8	2848	16.9	A1	Luetschine
20-052+		Schwarze Luetschine			47.5	23.3	2185	16.9	A1	Luetschine
20-053		Weisse Luetschine			46.1	53.3	2748	15.6	A1	Luetschine
20-054+		Schwarze Luetschine			149.8	24.8	2141	15.4	A1	Luetschine
20-055+	20-050	Schwarze Luetschine	Guendischwand	✓	179.9	20.7	1997	16.1	A1	Luetschine
20-061		Weisse Luetschine			48.2	40.5	2620	15.3	A1	Luetschine
20-062		Truemmelsbach			23.6	29.9	2320	51.1	A1	Luetschine
20-063+		Weisse Luetschine			91.7	23.2	2308	32.7	A1	Luetschine
20-064		Sousbach			21.3	0	2226	44	A1	Luetschine
20-065+	20-060	Weisse Luetschine	Zweiluetschinen	✓	165.6	17.1	2150	33.3	A1	Luetschine
20-071		Saxetbach			22.2	0	1584	60	A1	Luetschine
20-072+	20-070+	Luetschine	Gsteig	✓	380.4	17.2	1998	26.6	A1	Luetschine

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
20-091		Kander			39.9	42.1	2704	5.1	A2	Kander
20-092+		Kander			77.8	28.2	2523	32.8	A2	Kander
20-093		Oeschibach			32	23.4	2370	47.6	A2	Kander
20-094+		Kander	Kandersteg		144.1	21.1	2368	45.4	A2	Kander
20-095+	20-090	Kander	Frutigen	✓	188.4	16.1	2160	41.7	A2	Kander
20-101		Allenbach	Adelboden	✓	30.3	0	1825	9.2	A1	Kander
20-102		Engstligenbach			29.4	5.7	2079	34.2	A1	Kander
20-103+		Engstligenbach			109	1.7	1849	19.5	A2	Kander
20-104+	20-100	Engstligenbach	Frutigen	✓	146.2	1.2	1731	18.7	A2	Kander
20-111		Gornernbach			46.6	7.6	2079	34.9	A2	Kander
20-112+		Kiene			91.7	3.9	1882	29.9	A2	Kander
20-113		Suld			25	0	1591	33.7	A1	Kander
20-114+	20-110+	Kander	Hondrich	✓	502.3	7.9	1837	28.7	A1	Kander
20-121		Simme	Oberried/Lenk	✓	44.5	27.8	2367	20.2	A1	Simme
20-122		Iffigbach			38.1	0.5	1901	26.3	A1	Simme
	20-120	Simme			82.6	15.2	2041	23	A1	Simme
20-131		Faermelbach			31.1	0	1868	5.8	A1	Simme
20-132+		Simme			162.1	7.7	1834	15	A1	Simme
20-133		Kleine Simme			36.8	0	1545	16.3	A1	Simme
20-134+		Simme	Zweisimmen	✓	205.8	6.1	1761	16.9	A1	Simme
20-135+		Simme			297.5	4.2	1650	15.7	A1	Simme
20-136+	20-130+	Simme	Oberwil	✓	349.3	3.6	1617	18.4	A1	Simme
20-141		Fildrich			41.5	0	1786	24.7	A1	Simme
20-142+		Fildrich			74	0	1736	27.5	A2	Simme
20-143	20-140	Chirel			129.3	0	1674	21.7	A1	Simme
20-151		Buuschebach			28.3	0	1615	49.1	A1	Simme
20-152+		Simme			437.9	2.9	1572	23	A1	Simme
20-153+	20-150+	Simme			596.7	2.1	1577	23	A1	Simme
20-171		Zulg			45.2	0	1256	18.3	N2	Zulg und Rotache
20-172+		Zulg			96.4	0	1100	8.9	N2	Zulg und Rotache
20-173		Rotache			39	0	909	0	N2	Zulg und Rotache
	20-170	Zulg; Rotache			135.4	0	1006	6.3	N2	Zulg und Rotache
20-181		Chise	Freimettigen		35.1	0	832	0	N2	Chise
20-182+	20-180	Chise			70.2	0	806	0	N2	Chise
20-201	20-200	Guerbe	Burgistein	✓	52.9	0	916	13.4	N2	Guerbe
20-211+	20-210+	Guerbe	Belp	✓	131.2	0	728	5.4	M1	Guerbe
20-231		Louibach			26.7	13.6	2251	12.4	A1	Saane
20-232+		Louibach	Saane	✓	62.3	5.8	1800	16	A1	Saane
20-233		Turbachbach			30	0	1739	7.5	A1	Saane
20-234		Saane			51.4	0.6	1935	8.6	A1	Saane
20-235+		Saane			99.6	0.3	1754	5	N1	Saane
20-236+	20-230	Saane	Saane		216.4	1.8	1688	8.8	N1	Saane
20-241		R. de Fenils			20.3	0	1577	2.6	N1	Saane
20-242		R. de Flendruz			27.7	0	1514	29.7	N1	Saane
20-243+		Saane			312.3	1.3	1620	11.8	N1	Saane
20-244		La Torneresse			45.8	0	1584	4.8	N1	Saane
20-245		L'Hongrin			46.1	0	1535	18.8	N1	Saane
20-246+		L'Hongrin			80.9	0	1482	38.5	N1	Saane
20-247+		Saane			408.7	1	1565	13	N1	Saane
	20-240+	Saane			489.6	0.8	1552	17.3	N1	Saane
20-251+		Saane			550	0.7	1524	20.5	N1	Saane
20-252		La Tremie			30.5	0	1166	5	N1	Saane
20-253+	20-250+	Saane	Broc, Chateau d'en Bas		632	0.6	1470	20.6	N1	Saane
20-261		La Jogne			26.4	0	1556	6.4	N1	Jogne
20-262+		La Jogne			72.9	0	1516	20.9	N1	Jogne
20-263+		La Jogne			110.2	0	1514	28.1	N1	Jogne
20-264		Le Javroz			38.2	0	1266	31	N1	Jogne
20-265+	20-260	La Jogne			185.6	0	1411	32.8	N1	Jogne
20-273		La Gerine			41.2	0	1213	0	N1	Gerine
20-274+		Saane; La Gerine			79	0	923	0	N1	Gerine
20-281		La Neirigue			57.7	0	833	0	N1	Glane
20-282		La Glane			65.7	0	755	0	N1	Glane
20-283+		La Glane			157.5	0	788	0	N1	Glane
20-284+	20-280	La Glane			195.1	0	757	0	N1	Glane
20-301		Muscheren Sense			21.5	0	1462	22.4	N1	Sense
20-302+		Kalte Sense			66.7	0	1426	19.4	N1	Sense
20-303		Warme Sense			44.9	0	1413	31.5	N1	Sense
20-304+		Sense			152	0	1329	17.8	N1	Sense
20-305+	20-300	Sense			182.3	0	1230	14.7	N2	Sense
20-311		Schwarzwasser			54.5	0	1046	0	N2	Sense
20-312+		Schwarzwasser			107.6	0	917	0	N2	Sense
20-313+	20-310	Schwarzwasser			131	0	890	0	N2	Sense
20-321+		Sense	Thoerishaus	✓	349.8	0	959	7.7	N2	Sense
20-322		Taverna			53.6	0	681	0	N1	Sense
20-323+	20-320+	Sense			438.1	0	880	6.2	N1	Sense
20-361	20-360	Le Nozon	Pre Chaillet	✓	38.1	0	920	58.4	M1	Nozon
20-371		Le Talent			25.5	0	773	0	M1	Talent
20-372+	20-370	Le Talent	Chavornay	✓	61.7	0	636	0.8	M1	Talent
20-391		La Mentue			54.3	0	742	0	M1	Mentue
20-392+		La Mentue	Yvonand	✓	108.2	0	668	0	M1	Mentue
20-393+	20-390	La Mentue			143.3	0	658	0	M1	Mentue
20-471		La Broye			48.6	0	843	3	N1	Broye

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
20-472		La Biorde	Palezieux		29.8	0	728	0	N1	Broye
20-473+		La Broye			118.5	0	821	1.3	N1	Broye
20-474		Le Grenet			10.6	0	689	0	N1	Broye
20-475+		La Broye			169.4	0	770	0.9	N1	Broye
20-476		Le Carrouge			53.1	0	755	0	N1	Broye
	20-470	La Broye			222.5	0	765	0.7	N1	Broye
20-481+		La Broye			259.7	0	756	0.6	N1	Broye
20-482+		La Broye			325.5	0	738	0.5	N1	Broye
20-483		La Lembe			27.8	0	671	0	N1	Broye
20-484+	20-480+	La Broye	Payerne	✓	404	0	717	0.4	N1	Broye
20-491		L'Arbogne			46.2	0	654	0	N1	Broye
20-492+		La Broye			502.4	0	692	0.3	N1	Broye
20-493		La Petite Glane			33.9	0	650	0	N1	Broye
20-494+	20-490+	La Broye			597.2	0	669	0.3	N1	Broye
20-511		Bibere			29.7	0	558	0	N1	Bibere
20-512+	20-510	Bibere	Kerzers	✓	55	0	536	0	M1	Bibere
20-531		La Suze	Villeret		60.9	0	1095	71.2	M1	Suze
20-532+		La Suze	Sonceboz	✓	124.2	0	1076	67.7	M1	Suze
20-533+		La Suze	Pery	✓	176	0	1054	70.3	M1	Suze
20-534+	20-530	La Suze			210.5	0	1026	71.5	M1	Suze
20-551		Lyssbach	Schuepfen		22.22	0	612	0	M1	Lyssbach
20-552+	20-550	Lyssbach	Lyss	✓	48.62	0	547	0	M1	Lyssbach
20-571		Emme			46.9	0	1485	12.2	N1	Emme
20-572+		Emme			86.4	0	1368	14.6	N2	Emme
20-573+	20-570	Emme	Eggiwil, Heidbuel	✓	126	0	1240	10.1	N2	Emme
20-581		Roetenbach	Eggiwil	✓	52.6	0	987	0	N2	Emme
20-582+	20-580+	Emme			232.4	0	1028	5.5	N2	Emme
20-591		Ilfis			44.7	0	1198	4	N2	Emme
20-592+		Ilfis			90.5	0	1041	1.9	N2	Emme
20-593		Trueb	Trub	✓	54.7	0	1024	0	N2	Emme
20-594		Gohl; Ober Frittenbach			32.2	0	931	0	N2	Emme
20-595+	20-590	Ilfis	Langnau	✓	204.5	0	986	0.9	N2	Emme
20-601		Gruene			38.9	0	995	0	M1	Emme
20-602+		Gruene			80.7	0	862	0	N2	Emme
20-603		Biglebach			40.7	0	812	0	N2	Emme
20-604+		Emme			630.6	0	945	2.3	M1	Emme
20-605+	20-600+	Emme	Burgdorf	✓	670.9	0	929	2.2	M1	Emme
20-611		Urtenen			43.1	0	558	0	M1	Urtenen
20-612+	20-610	Urtenen	Schalunen		78.9	0	543	0	M1	Urtenen
20-621		Limpach	Messen		39.4	0	521	0	M1	Limpach
20-622+	20-620	Limpach	Baetterkinden	✓	78.3	0	516	0	M1	Limpach
20-641		Oenz			36.3	0	637	0	M1	Oenz
20-642		Altache			32.6	0	555	0	M1	Oenz
20-643+	20-640	Oenz	Heimenhusen	✓	92.6	0	553	0	M2	Oenz
20-661	20-660	Langete	Huttwil, Haeberenbad	✓	57.5	0	756	0	M2	Murg
20-671+		Langete	Lotzwil		114	0	718	0	M2	Murg
20-672		Rot (Murg AG)	Roggwil	✓	57	0	582	0	M5	Murg
20-673+	20-670+	Murg	Murgenthal	✓	206.2	0	651	0	M2	Murg
20-681		Muemliiswilerbach			32.9	0	835	21.3	M2	Duennern
20-682+		Augstbach	Balsthal		61.1	0	793	19.4	M2	Duennern
20-683	20-680	Duennern	Balsthal		139	0	797	34.7	M2	Duennern
20-691		Luthern			37.1	0	901	0	M2	Wigger
20-692+		Luthern			77.7	0	740	0	M2	Wigger
20-693+	20-690	Luthern	Nebikon	✓	110	0	702	0	M5	Wigger
20-701		Wigger			54.5	0	740	0	M2	Wigger
20-702		Seewag			33	0	643	0	M2	Wigger
20-703		Rot (Wigger)			37.8	0	612	0	M5	Wigger
20-704+	20-700	Wigger	Nebikon		183.7	0	638	0	M5	Wigger
20-713+		Wigger	Zofingen	✓	370.7	0	639	0	M5	Wigger
20-751		Wyna	Reinach	✓	45.9	0	682	0	M5	Wyna
20-752+	20-750	Wyna	Unterkulm	✓	85.2	0	655	0	M5	Wyna
20-781		Buenz	Wohlen	✓	40.7	0	573	0	M5	Buenz
20-782+	20-780	Buenz; Holzbach	Othmarsingen	✓	91.4	0	509	0	M5	Buenz
20-793+		Wyna	Suhr	✓	117.8	0	614	0	M5	Wyna
20-811		Surb	Unterehrendingen	✓	36.1	0	505	7.6	M4	Surb
20-812+	20-810	Surb	Doettingen		66.8	0	494	10.7	M4	Surb
30-011		Muttenreuss			30.8	12.6	2483	0	N1	Reuss
30-012		Witenwasserreuss	Realp		28.6	17.7	2473	0.9	N1	Reuss
30-013		Gothardreuss			31.7	1.9	2329	0	N1	Reuss
30-014+		Furkareuss			93.1	10.2	2360	0.8	N1	Reuss
30-015		Unteralpreuss			31.6	4.2	2380	0	A4	Reuss
30-016+	30-010	Reuss	Andermatt		191.7	6.4	2315	0.7	N1	Reuss
30-021		Goeschenerreuss	Wiggen		52	27.4	2514	0	N1	Reuss
30-022+	30-020	Goeschenenreuss			93.2	21.7	2434	0	N1	Reuss
30-031	30-030	Meienreuss			70.6	13.8	2209	2.8	N1	Reuss
30-041+		Reuss			318.5	10.3	2311	0.4	N1	Reuss
30-042		Fellibach			23.7	1.9	2264	0	N1	Reuss
30-043+		Reuss			421.8	10.4	2260	0.8	N1	Reuss
30-044+	30-040+	Reuss			475.8	9.4	2237	0.7	N1	Reuss
30-051		Chaerstelenbach			30.6	53.4	2656	33.1	A4	Reuss
30-052		Brunnibach			17.4	28	2495	0	A4	Reuss
30-053		Chaerstelenbach			27.4	5.5	2222	0	N1	Reuss

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
30-054+	30-050	Chaerstelenbach			114.7	21.7	2273	13.8	N1	Reuss
30-061		Schaechen			32	8.6	1968	27	N1	Reuss
30-062		Schaechen			25.8	2.9	1943	45.7	N1	Reuss
30-063+	30-060	Schaechen	Buerglen		104.5	3.3	1733	23.1	N1	Reuss
30-071		Alpbach	Erstfeld	✓	20.2	27.9	2208	21	N1	Reuss
30-072+		Reuss			665.4	11.3	2201	4.8	N1	Reuss
30-073		Bockibach			13	3.3	1848	43.1	N1	Reuss
30-074+		Reuss			699.9	10.8	2175	6.5	N1	Reuss
30-075+	30-070+	Reuss	Seedorf		841.5	9.4	2081	8.8	N1	Reuss
30-081		Grosstalbach	Isenthal	✓	42.5	9.5	1808	73.2	N1	Isenthalbach
30-082+	30-080	Isenthaler Bach			60	8.2	1750	70.5	N1	Isenthalbach
30-111		Muota			20.7	0	2082	48.1	A4	Muota
30-112+		Muota			73.1	0.4	1943	55.6	N1	Muota
30-113+		Muota			99	0.3	1892	52	N1	Muota
30-114		Starzen			28.2	0.2	1507	33.9	N1	Muota
30-115		Hueribach			29.8	0.2	1894	48.3	N1	Muota
30-116+		Muota			224.5	0.1	1635	48.3	N1	Muota
30-131		Engelberger Aa			44.6	11.8	2096	23.2	A3	Engelberger Aa
30-132+	30-130	Engelberger Aa	Engelberg	✓	85.9	8.9	2017	29.1	A3	Engelberger Aa
30-141+		Engelberger Aa			118.8	7.7	1916	28	A3	Engelberger Aa
30-142		Secklisbach			26.2	1	1703	74.5	A3	Engelberger Aa
30-143+		Engelberger Aa			189.3	5	1697	38.2	A3	Engelberger Aa
30-144+	30-140+	Engelberger Aa	Buochs		230.5	4.1	1577	38	N1	Engelberger Aa
30-161		Grosse Schliere			28.9	0	1413	0	N2	Gr. u. Kl. Schliere
30-162		Kleine Schliere	Alpnach, Chli-Erli	✓	23.4	0	1397	26.7	N2	Gr. u. Kl. Schliere
	30-160	Grosse u. Kleine Schliere			52.3	0	1410	12.9	N2	Gr. u. Kl. Schliere
30-181		Waldemme			56.5	0	1440	30.2	N2	Kleine Emme
30-182		Rotbach			24.8	0	1579	12	N2	Kleine Emme
30-183+	30-180	Kleine Emme			117.3	0	1387	19.5	N2	Kleine Emme
30-191		Entlen			27.8	0	1514	10.4	N2	Kleine Emme
30-192+		Entlen			53.4	0	1327	13	N2	Kleine Emme
30-193+		Waldemme; Wiss Emme			166.5	0	1243	13.8	N2	Kleine Emme
30-194		Grosse Fontannen			38.1	0	944	0	N2	Kleine Emme
30-195		Kleine Fontannen			22.8	0	922	0	N2	Kleine Emme
30-196+	30-190+	Kleine Emme	Werthenstein / Chappelboden	✓	330.7	0	1081	9	N2	Kleine Emme
30-201		Ruemlig			58.3	0	1012	6.8	N2	Kleine Emme
30-202		Bielbach			20.5	0	704	0	N2	Kleine Emme
30-203		Raenggbach			13.9	0	1017	2.1	N2	Kleine Emme
30-204+	30-200+	Kleine Emme	Littau	✓	484.2	0	992	7.1	N2	Kleine Emme
40-011		Oberstafelbach; Bifertenbach			33	35.5	2552	45.7	A4	Linth
40-012		Limmerenbach			28.1	14	2453	70.5	N1	Linth
40-013+	40-010	Linth			80.2	19.8	2397	59.4	N1	Linth
40-021		Faetschbach			40	9.4	1931	52.8	A4	Linth
40-022+		Linth	Linthal		146.6	13.4	2087	51.4	A4	Linth
40-023		Durnagel			20.1	2	1818	0	A4	Linth
40-024+		Linth			214.2	9.6	1981	40.3	N1	Linth
40-025+	40-020+	Linth	Schwanden		248.1	8.8	1908	38.3	N1	Linth
40-031		Sernft			47.3	2.3	1923	7.3	N1	Sernft
40-032		Untertalbach			35.2	1.5	2045	5.3	N1	Sernft
40-033		Chrauchbach; Waldibachrus			32.9	0	1810	3.4	A4	Sernft
40-034		Muelibach			22.7	0	1923	3.4	A4	Sernft
40-035		Niederenbach			22.9	0	1743	1	N1	Sernft
40-036		Sernft			210.8	0.8	1810	4.2	N1	Sernft
40-051		Seez			51.7	0	1958	5.2	A4	Seez
40-052		Gufelbach			16.6	0	2026	0	A4	Seez
40-053+	40-050	Seez	Mels		105.9	0.3	1880	4.8	N1	Seez
40-101		Jona	Pilgersteg	✓	26.1	0	778	0	N2	Jona
40-102		Schwarz			21.8	0	539	0	N2	Jona
40-103+	40-100	Jona; Lattenbach			75.7	0	608	0	N2	Jona
40-131		Minster			25.2	0	1453	18.3	N1	Minster u. Sihl
40-132		Sihl			33.1	0	1328	8.4	N2	Minster u. Sihl
40-133+		Minster	Euthal	✓	62.9	0	1318	7.9	N2	Minster u. Sihl
	40-130	Minster; Sihl			96	0	1325	8.1	N2	Minster u. Sihl
40-151		Alp	Einsiedeln	✓	49.6	0	1139	2.1	N2	Alp
40-152+	40-150	Alp			81.9	0	1034	1.2	N2	Alp
40-171		Reppisch			36.4	0	615	0	M5	Reppisch
40-172+	40-170	Reppisch	Dietikon	✓	62.3	0	589	0	M4	Reppisch

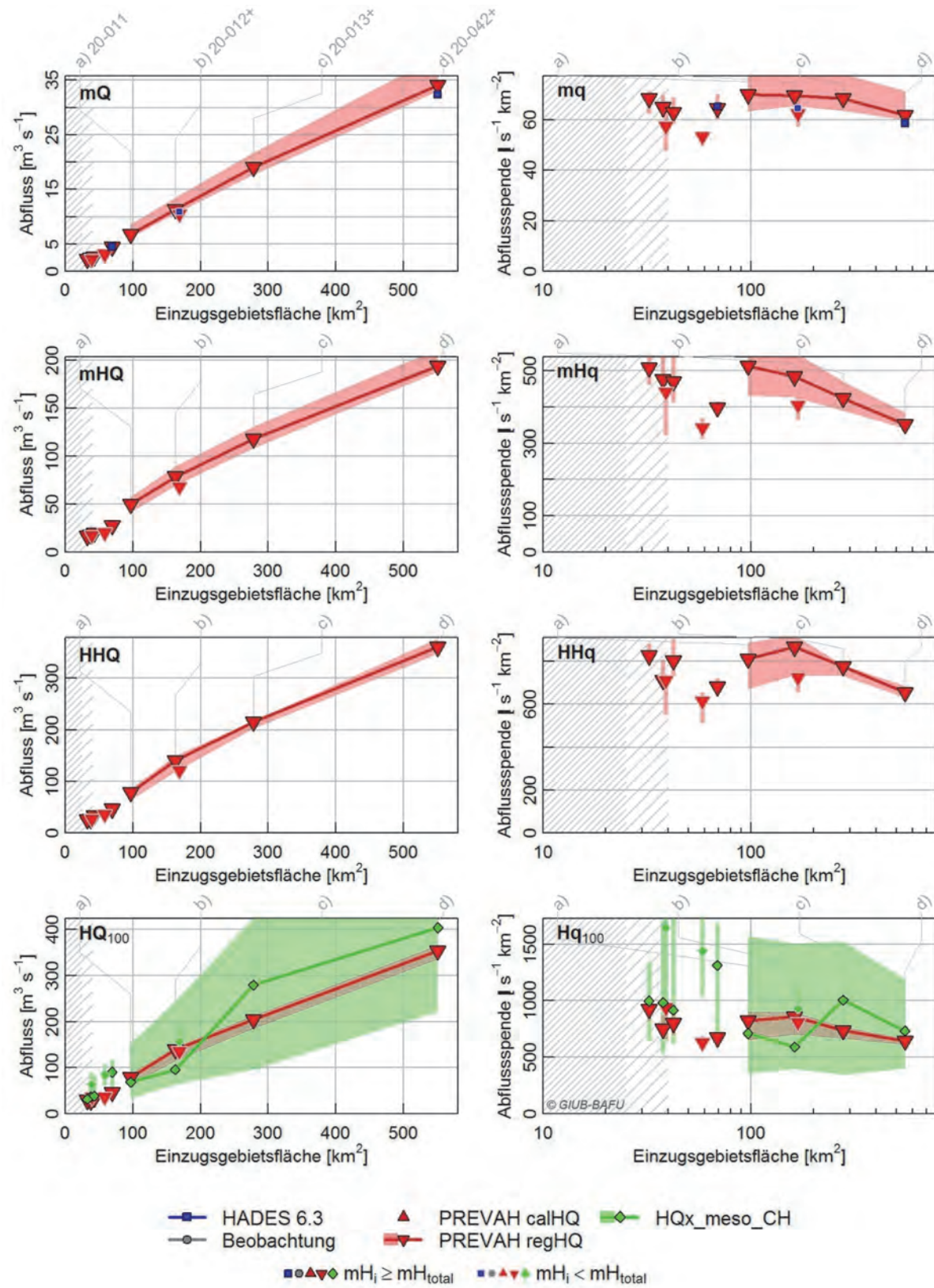
Anhang B

Übersichtsgrafiken für die 54 modellierten Flusseinzugsgebiete

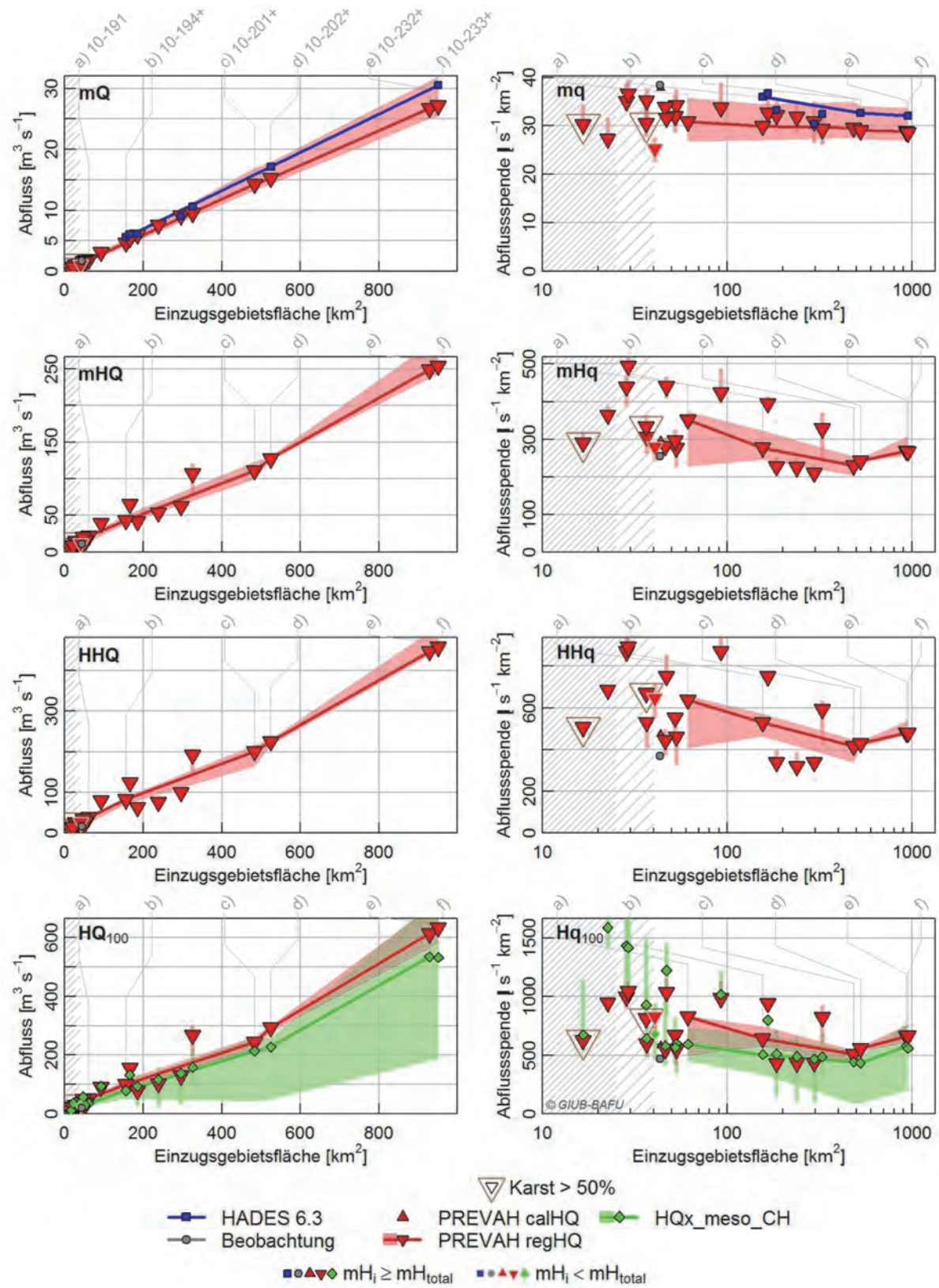
B.1	Aare	74	B.28	Lyssbach.....	101
B.2	Albula.....	75	B.29	Mentue	102
B.3	Alp.....	76	B.30	Minster und Sihl	103
B.4	Bibere	77	B.31	Muota	104
B.5	Birs.....	78	B.32	Murg (AG)	105
B.6	Birsig.....	79	B.33	Nozon.....	106
B.7	Broye	80	B.34	Oenz	107
B.8	Buenz.....	81	B.35	Plessur	108
B.9	Chise.....	82	B.36	Reppisch	109
B.10	Duennern	83	B.37	Reuss.....	110
B.11	Emme	84	B.38	Saane.....	111
B.12	Engelberger Aa.....	85	B.39	Seez.....	112
B.13	Ergolz.....	86	B.40	Sense	113
B.14	Gerine	87	B.41	Sernft	114
B.15	Glane	88	B.42	Simme.....	115
B.16	Grosse und Kleine Schliere	89	B.43	Sissle	116
B.17	Guerbe.....	90	B.44	Surb	117
B.18	Hinterrhein	91	B.45	Suze.....	118
B.19	Isenthalbach	92	B.46	Talent.....	119
B.20	Jogne	93	B.47	Tamina	120
B.21	Jona	94	B.48	Thur.....	121
B.22	Kander	95	B.49	Toess	122
B.23	Kleine Emme	96	B.50	Urtenen	123
B.24	Landquart.....	97	B.51	Vorderrhein	124
B.25	Limpach	98	B.52	Wigger.....	125
B.26	Linth	99	B.53	Wyna.....	126
B.27	Luetschine	100	B.54	Zulg und Rotache.....	127

Erläuterungen zu den Übersichtsgrafiken siehe Kapitel 5.1.1

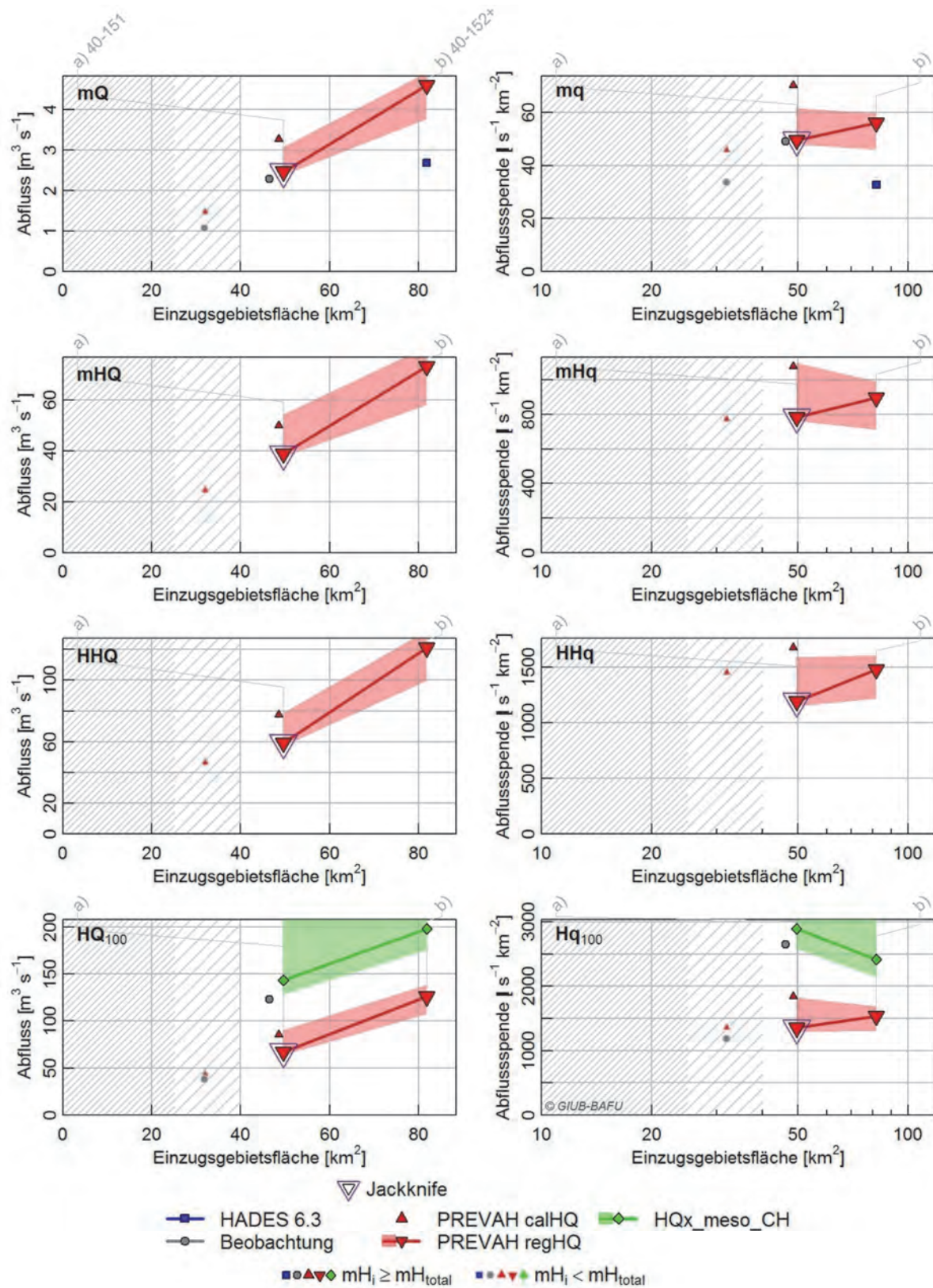
B.1 Aare



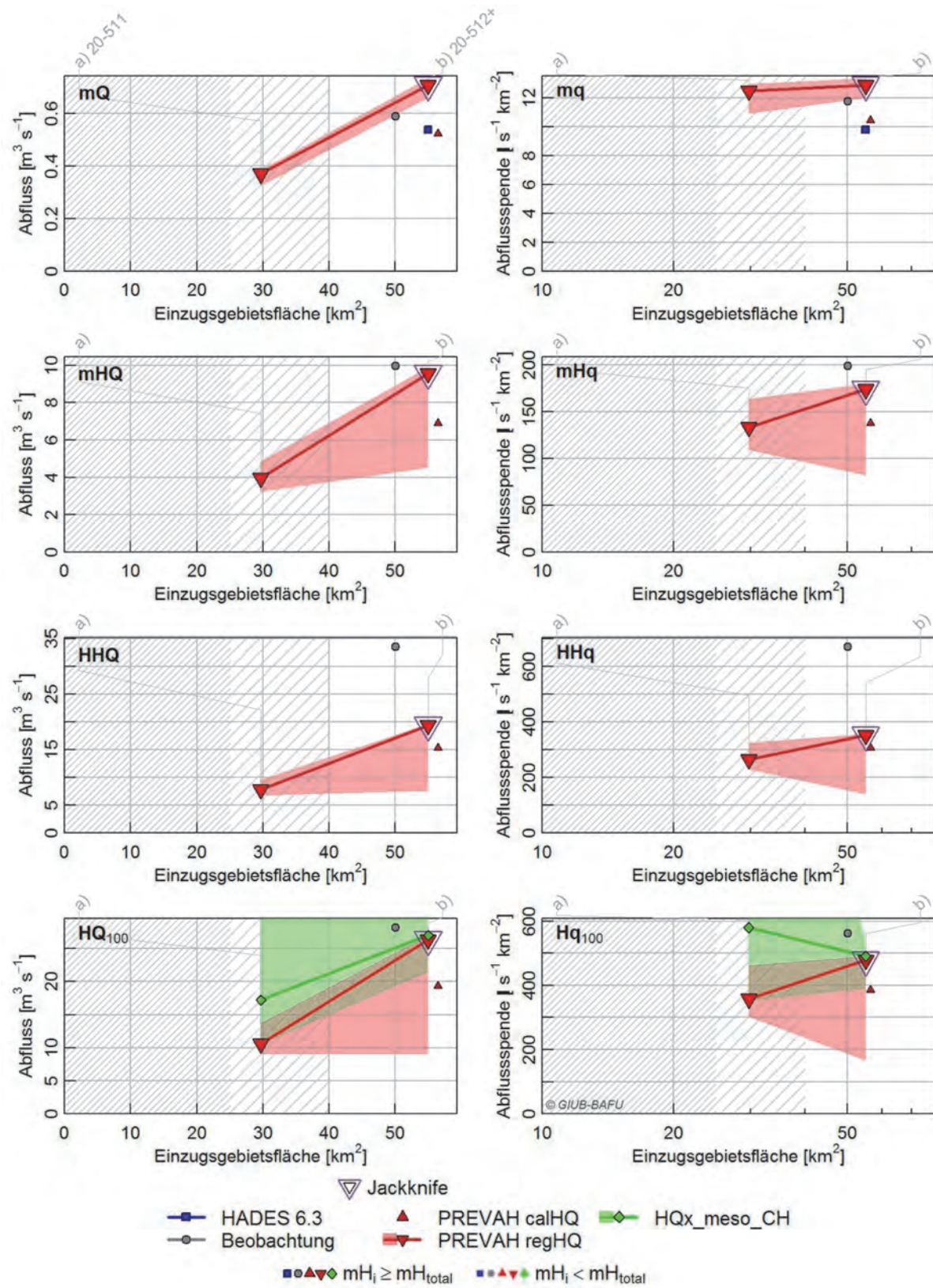
B.2 Albula



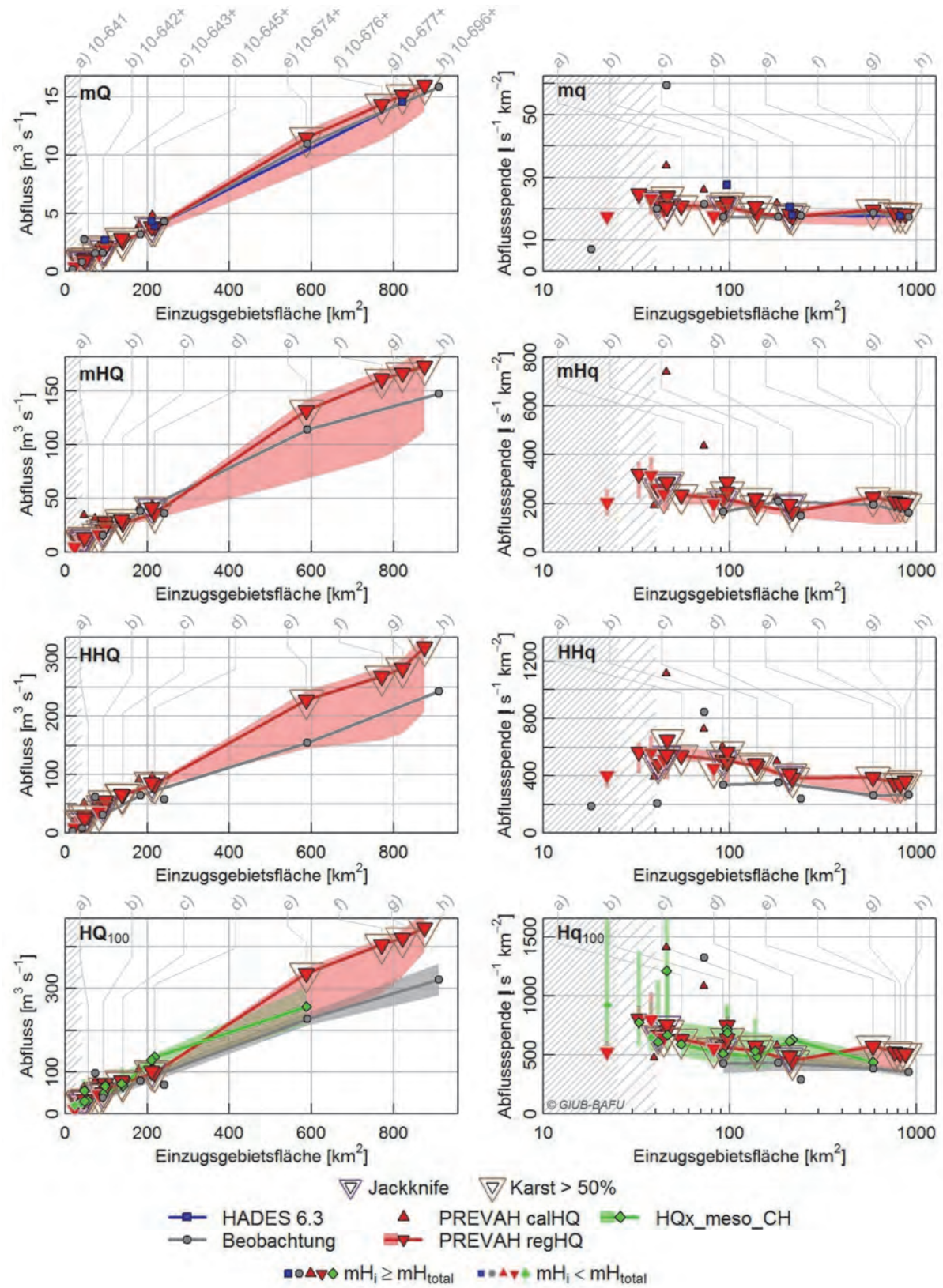
B.3 Alp



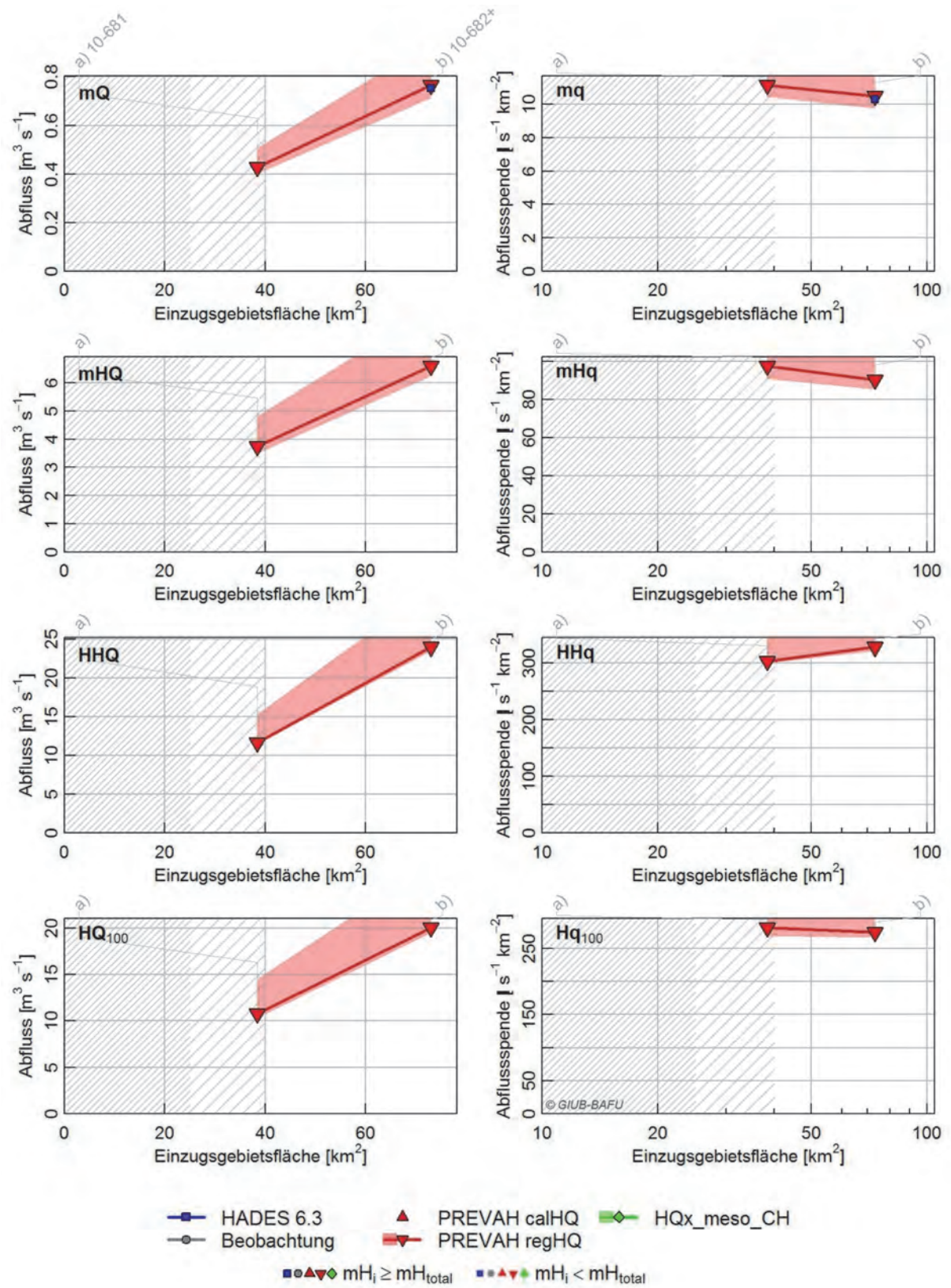
B.4 Bibere



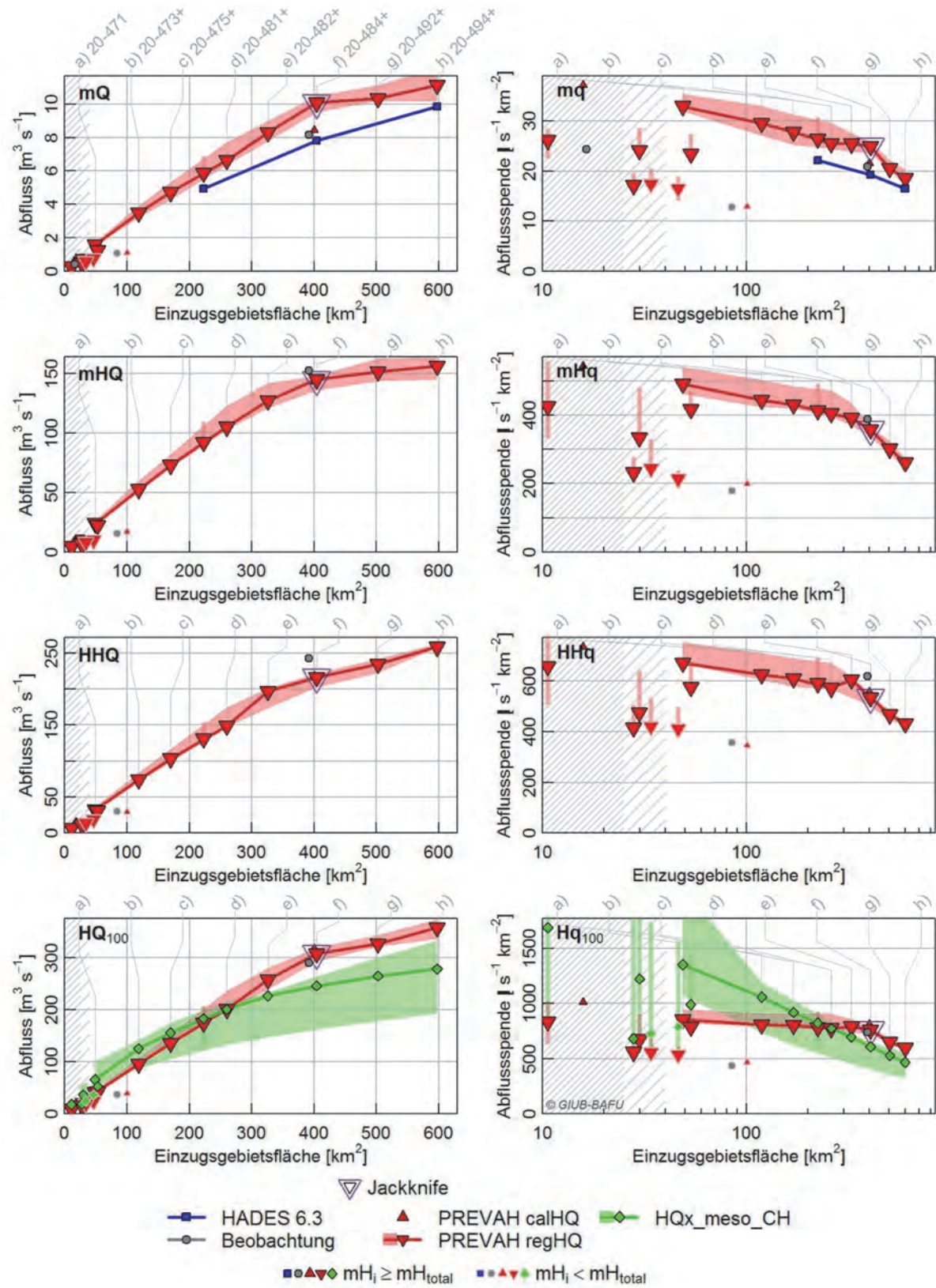
B.5 Birs



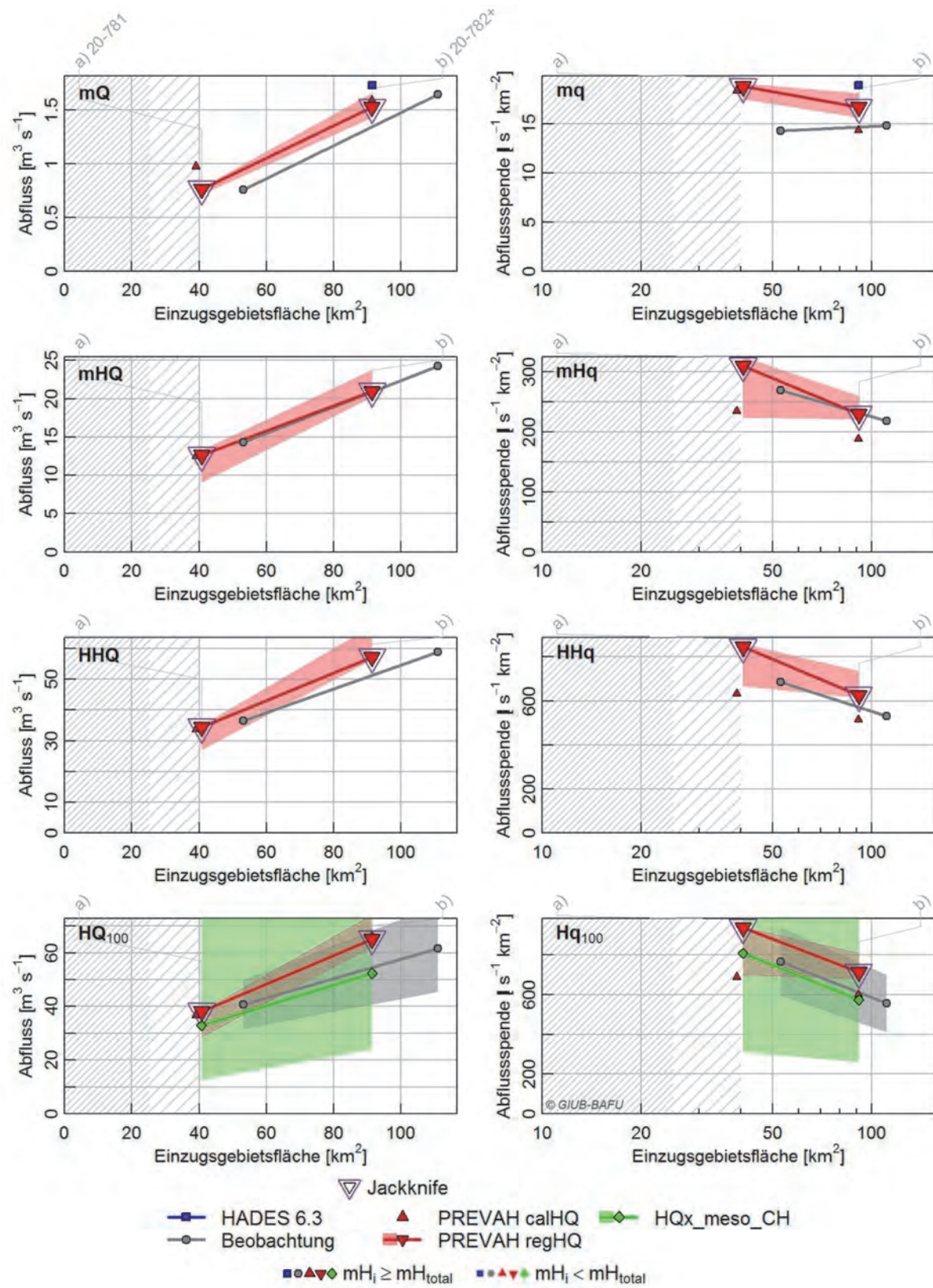
B.6 Birsig



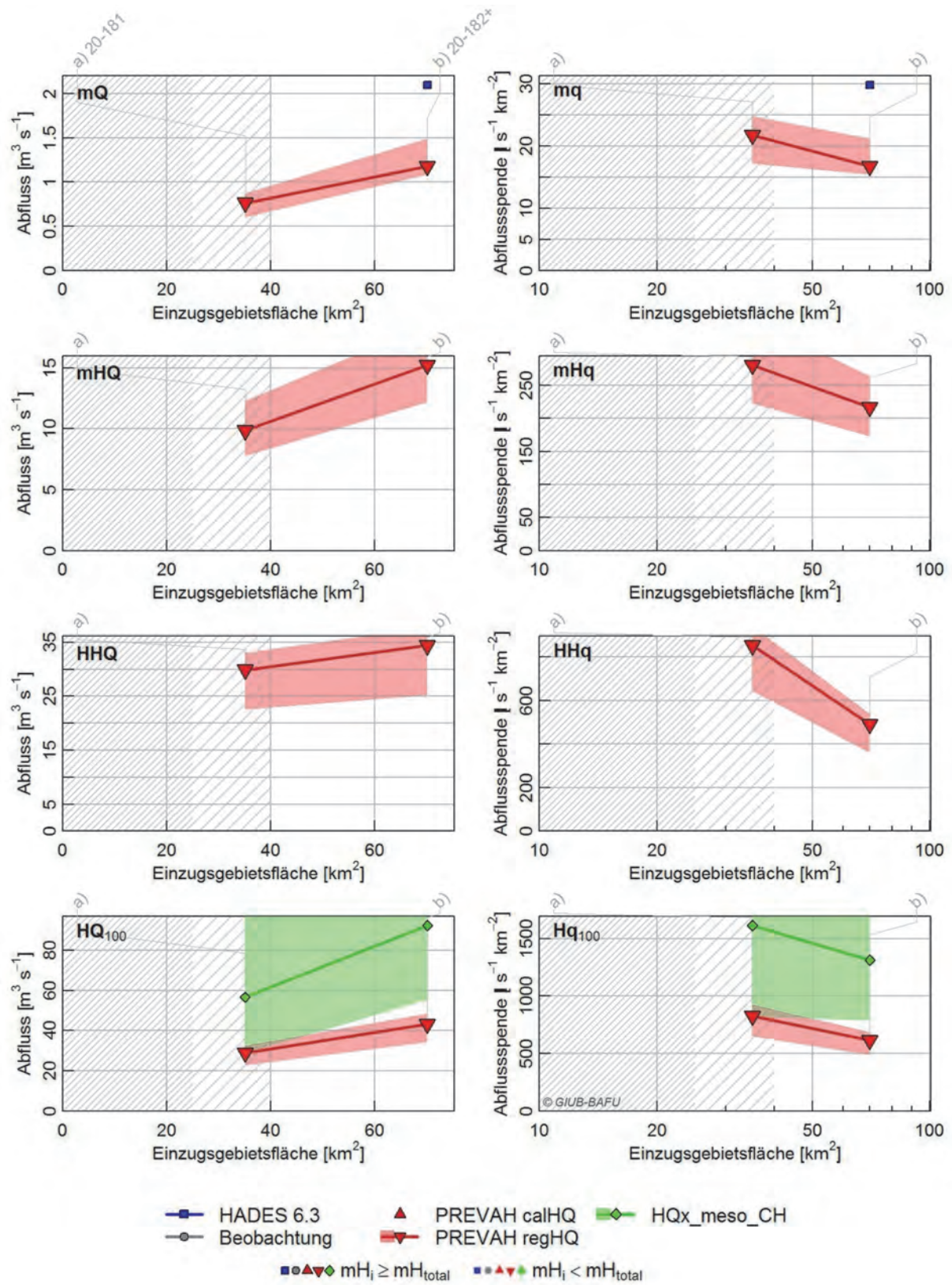
B.7 Broye



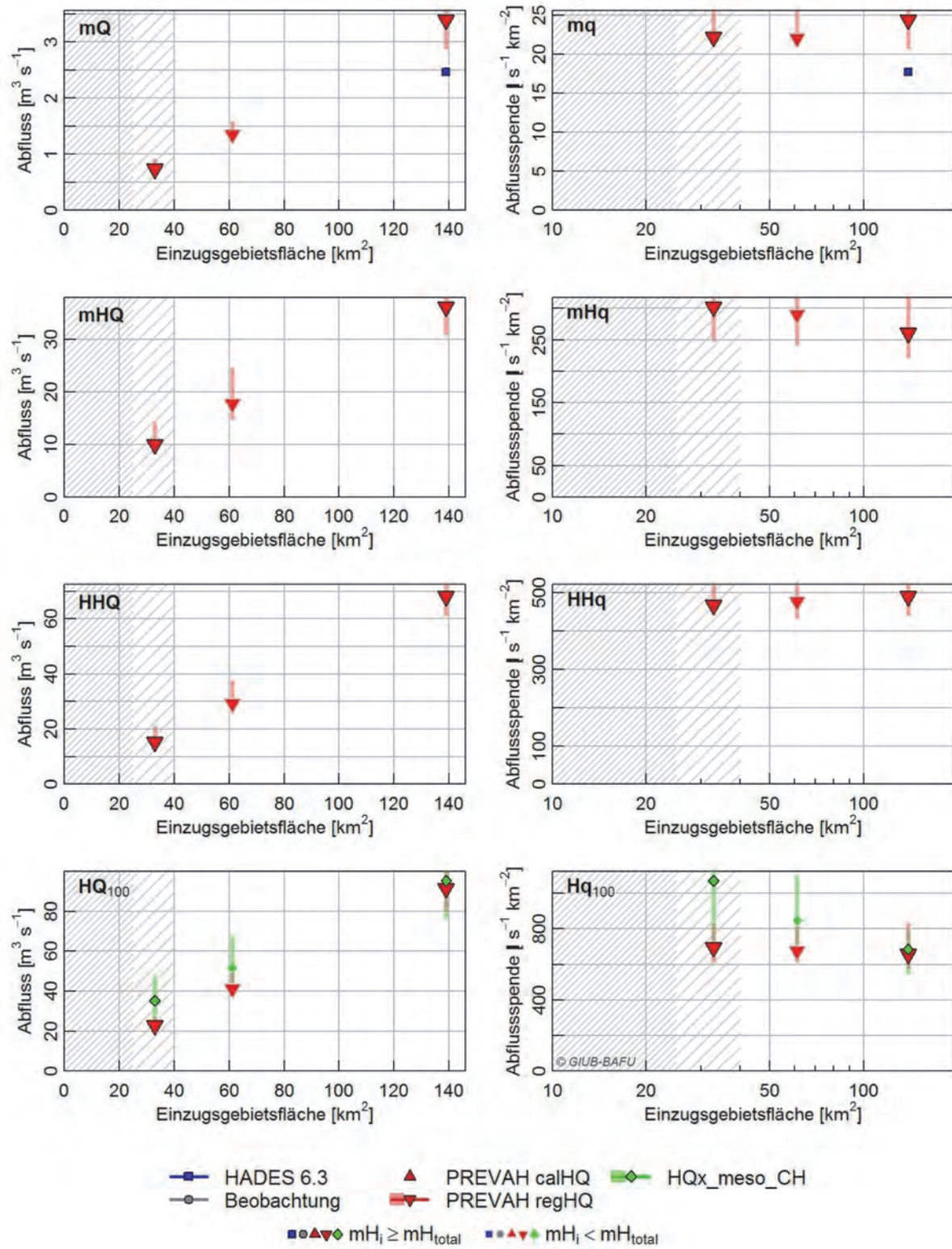
B.8 Buenz



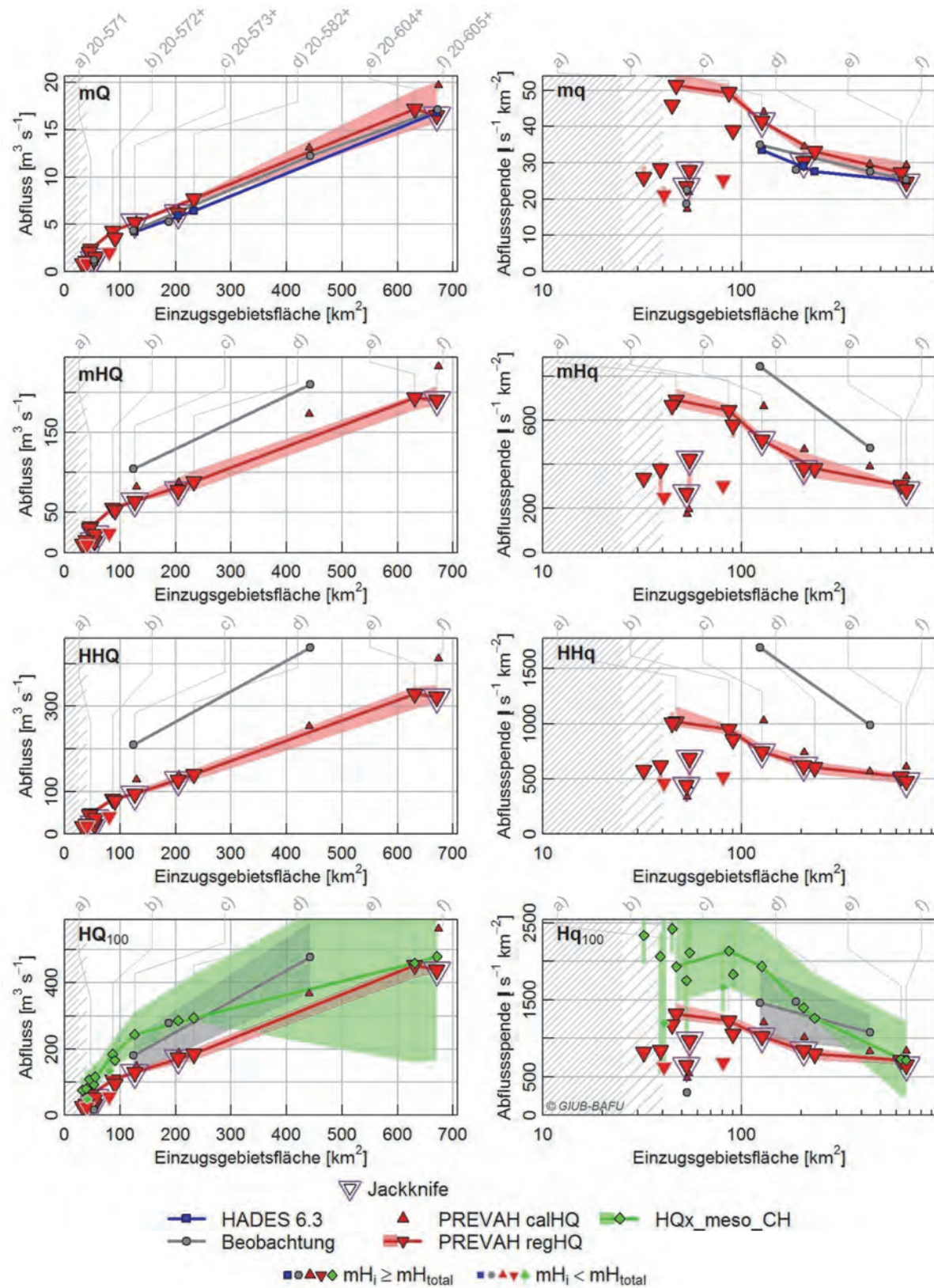
B.9 Chise



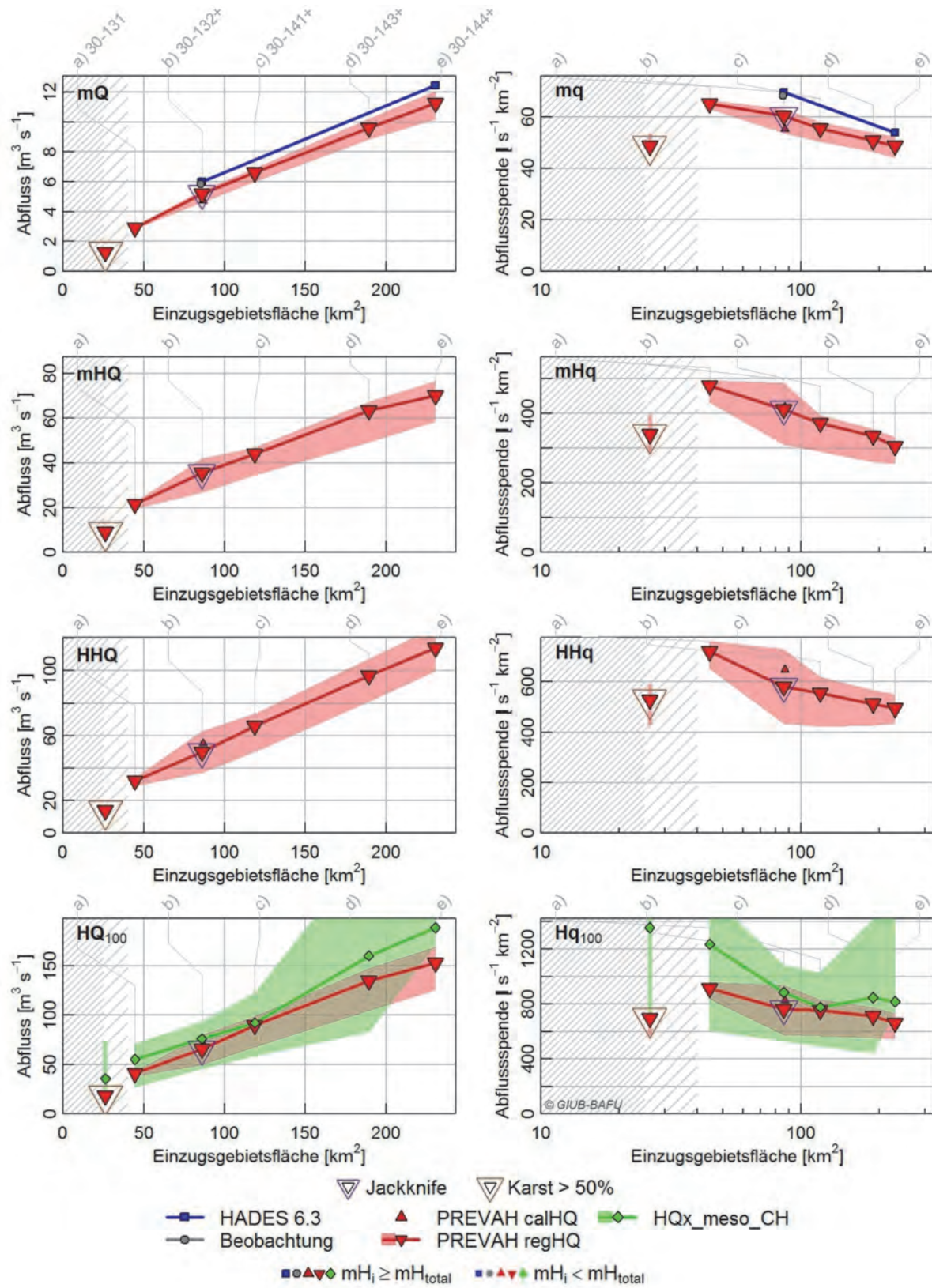
B.10 Duennern



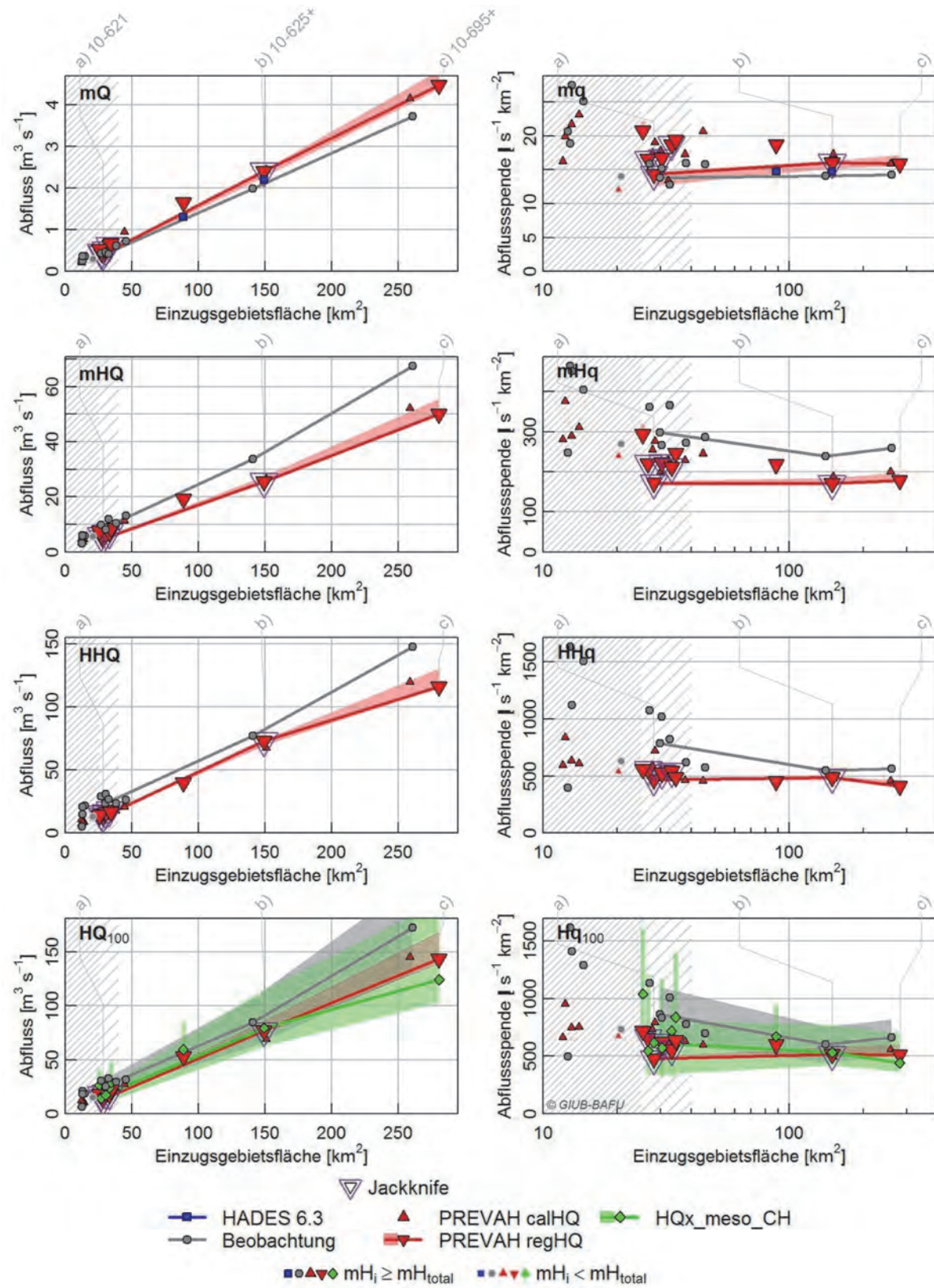
B.11 Emme



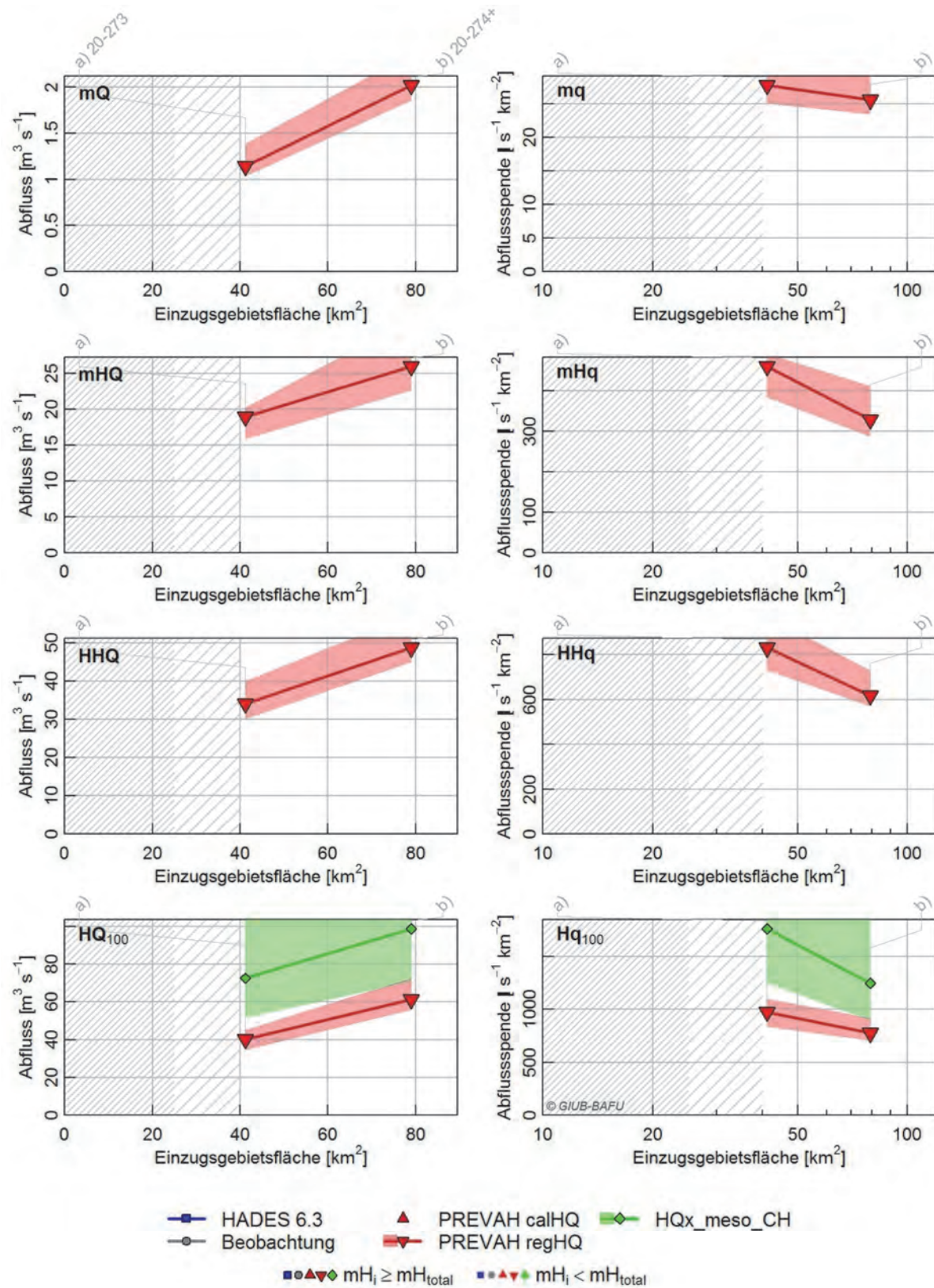
B.12 Engelberger Aa



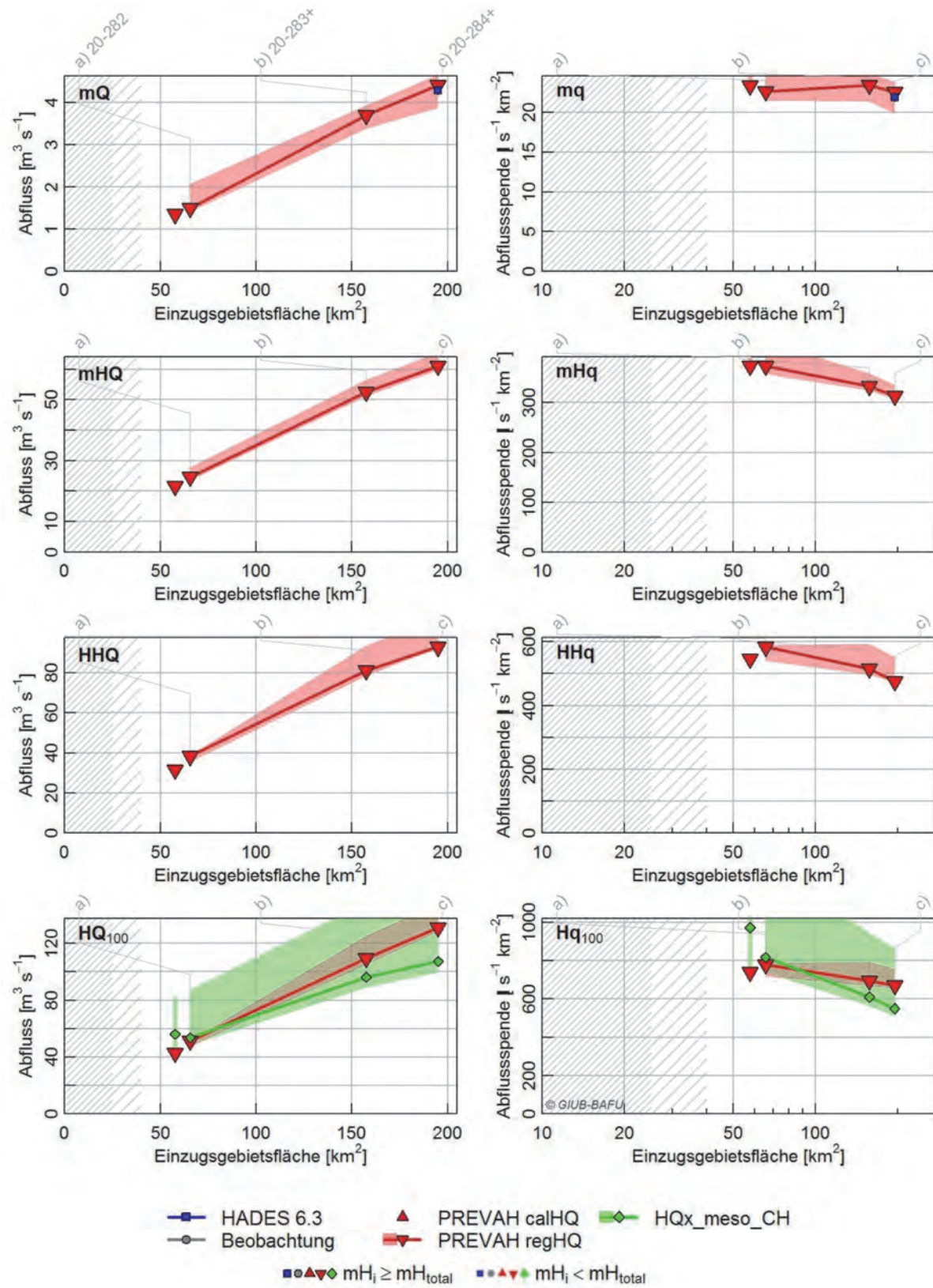
B.13 Ergolz



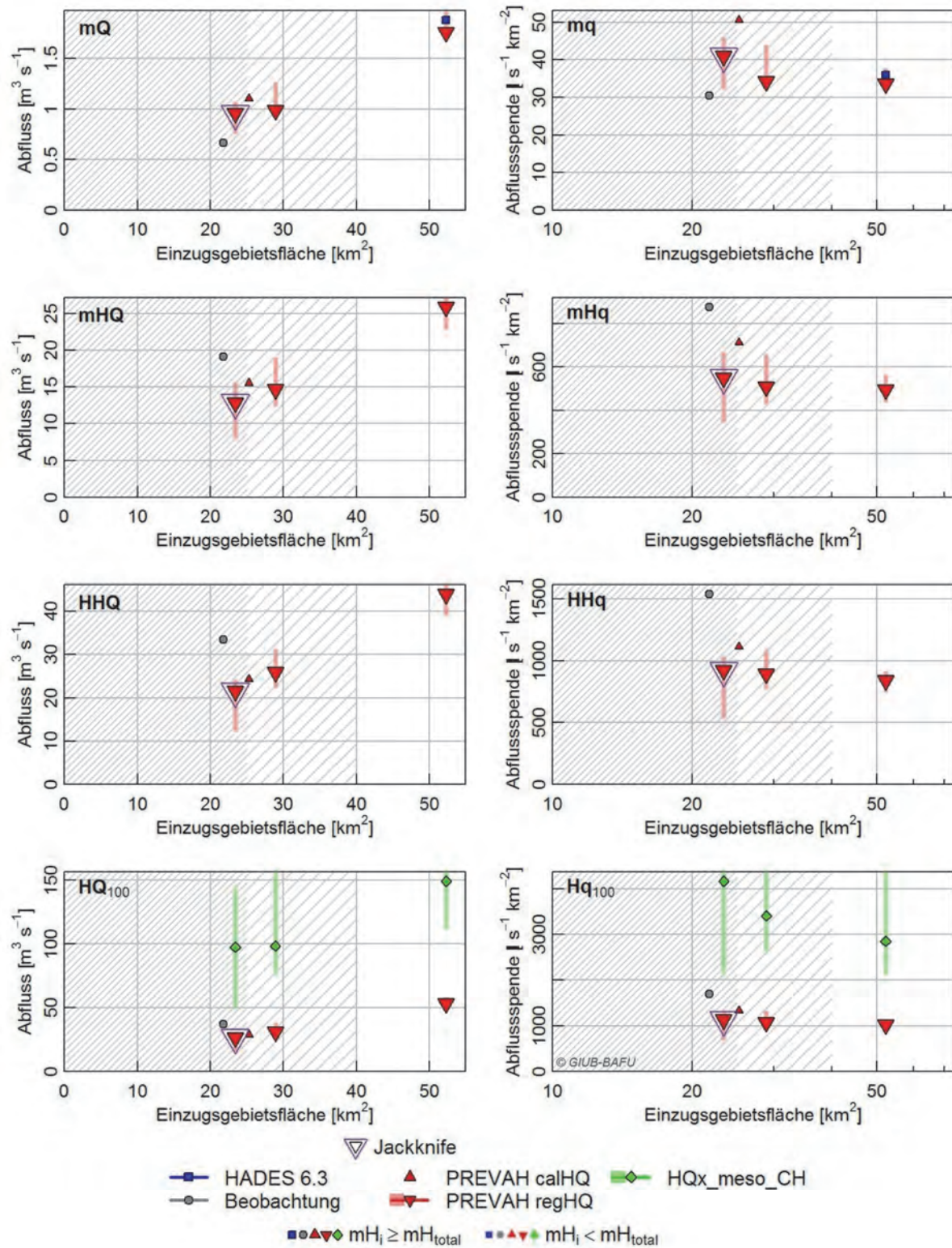
B.14 Gerine



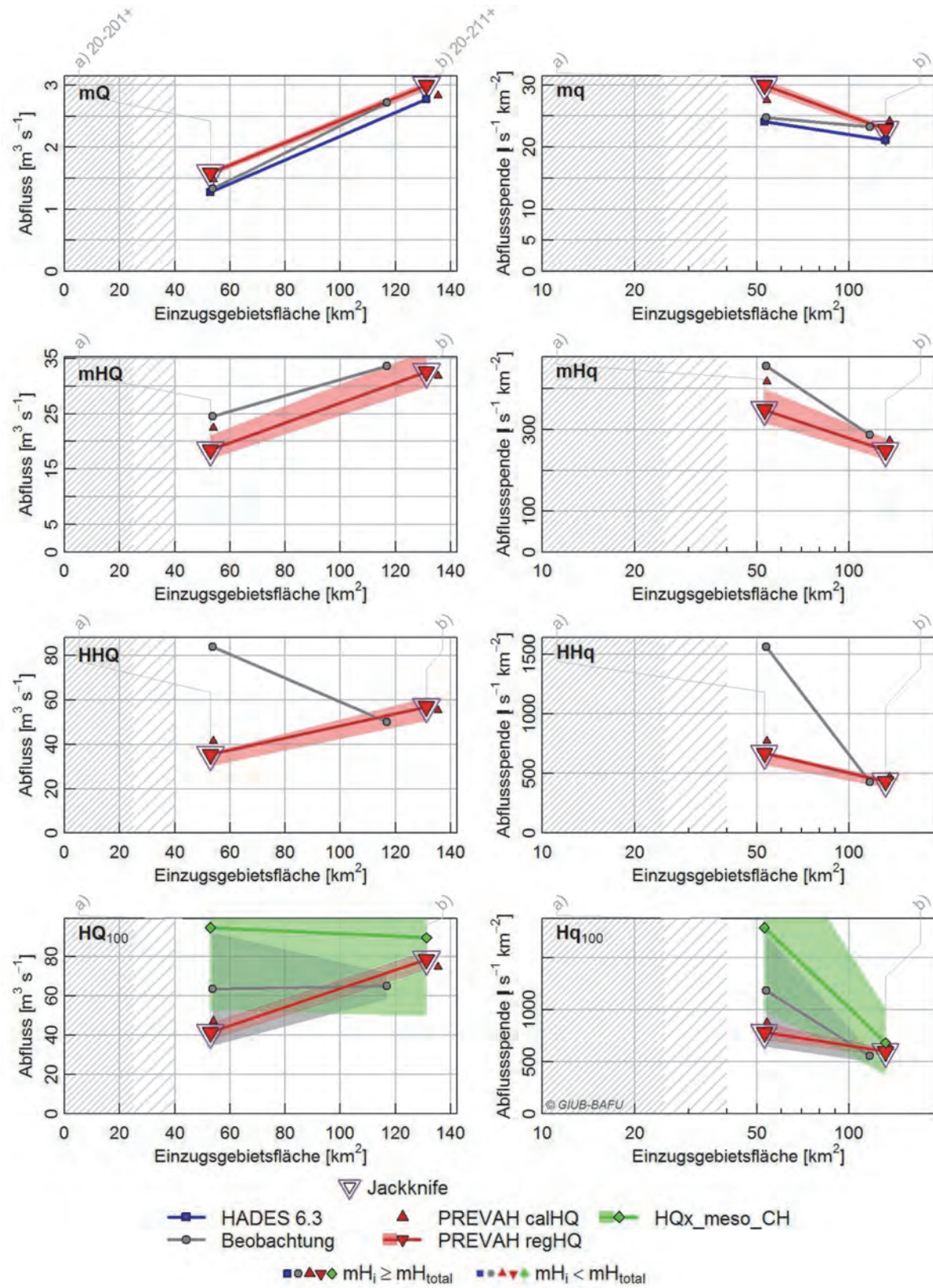
B.15 Glane



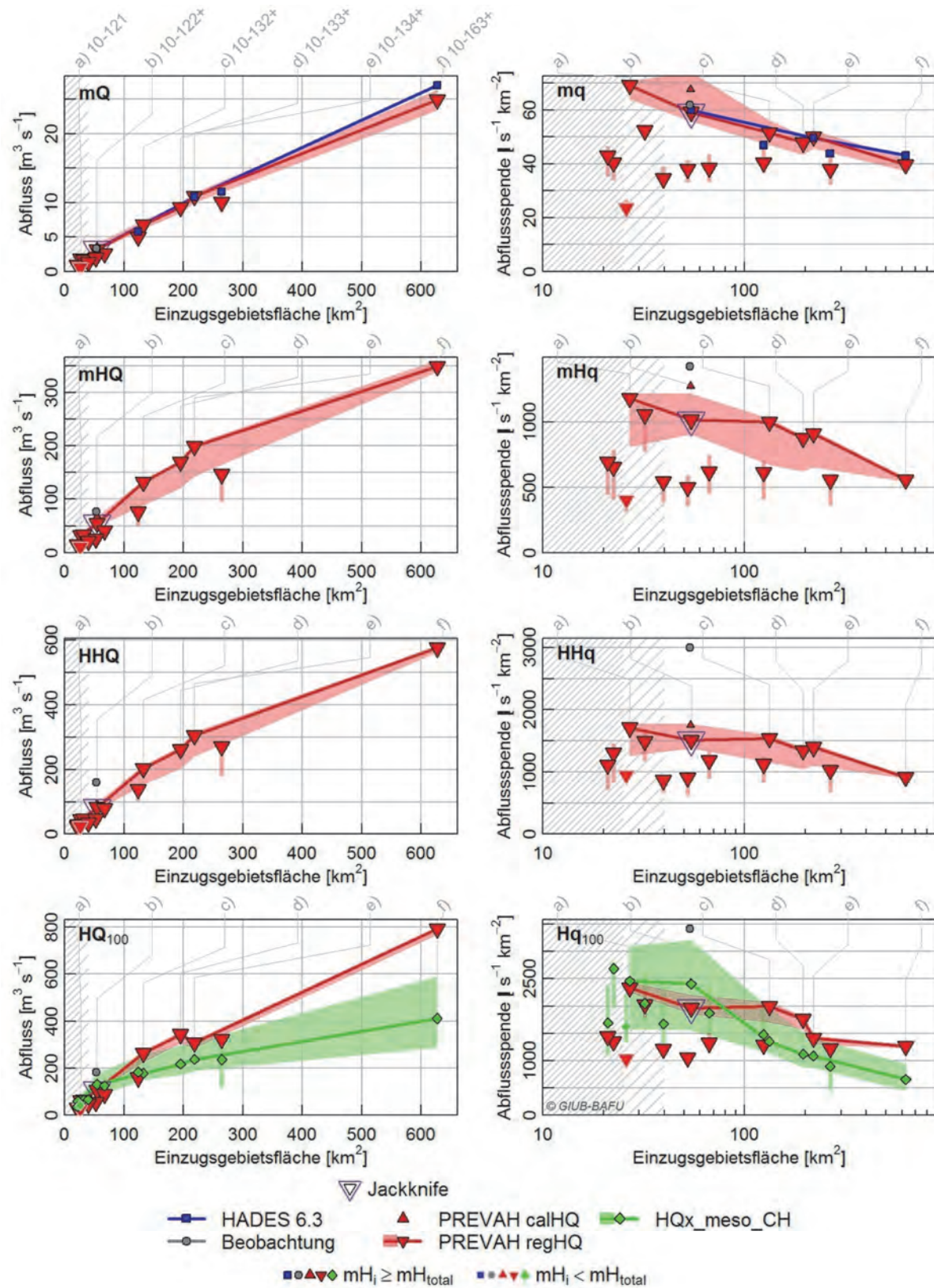
B.16 Grosse Schliere und Kleine Schliere



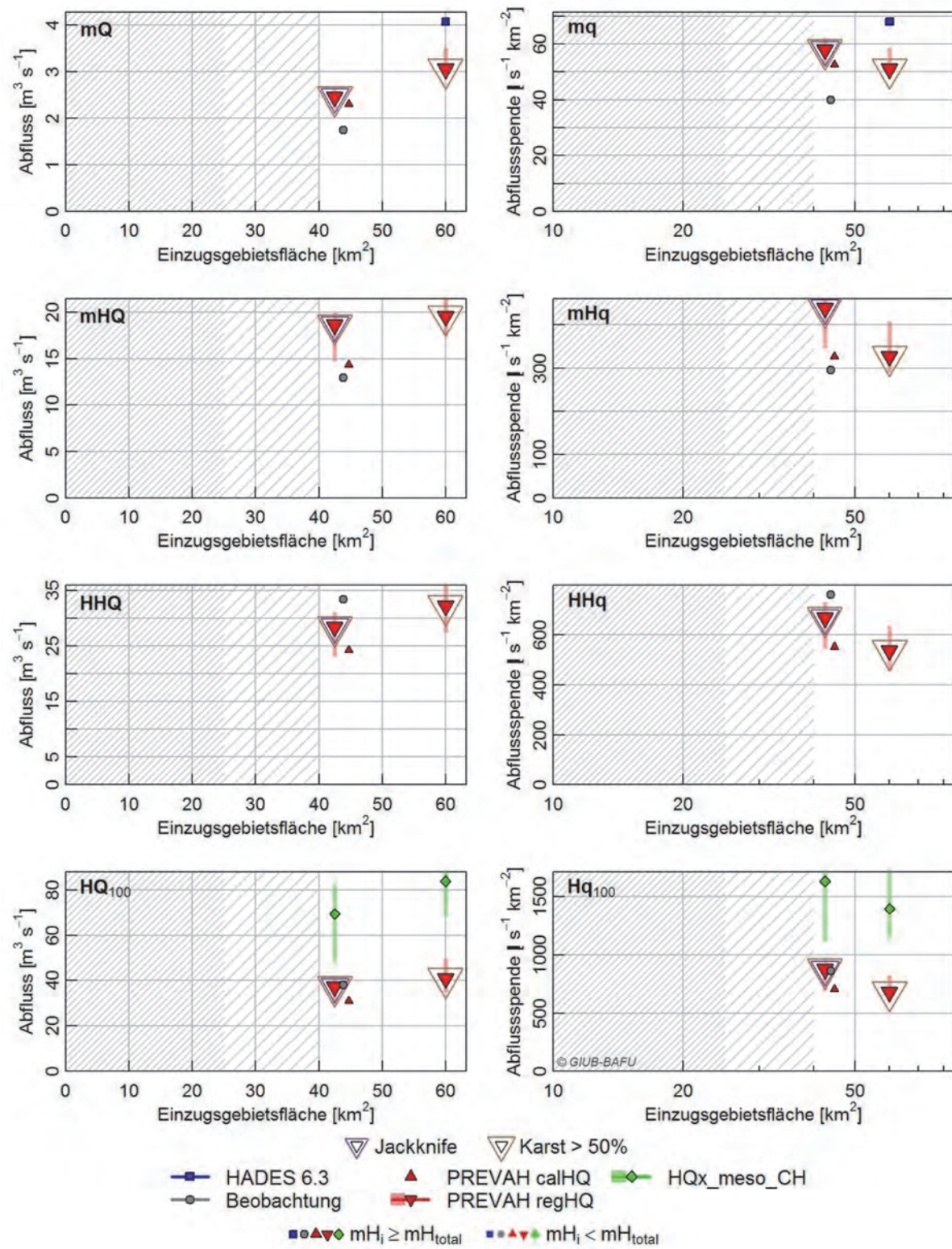
B.17 Guerbe



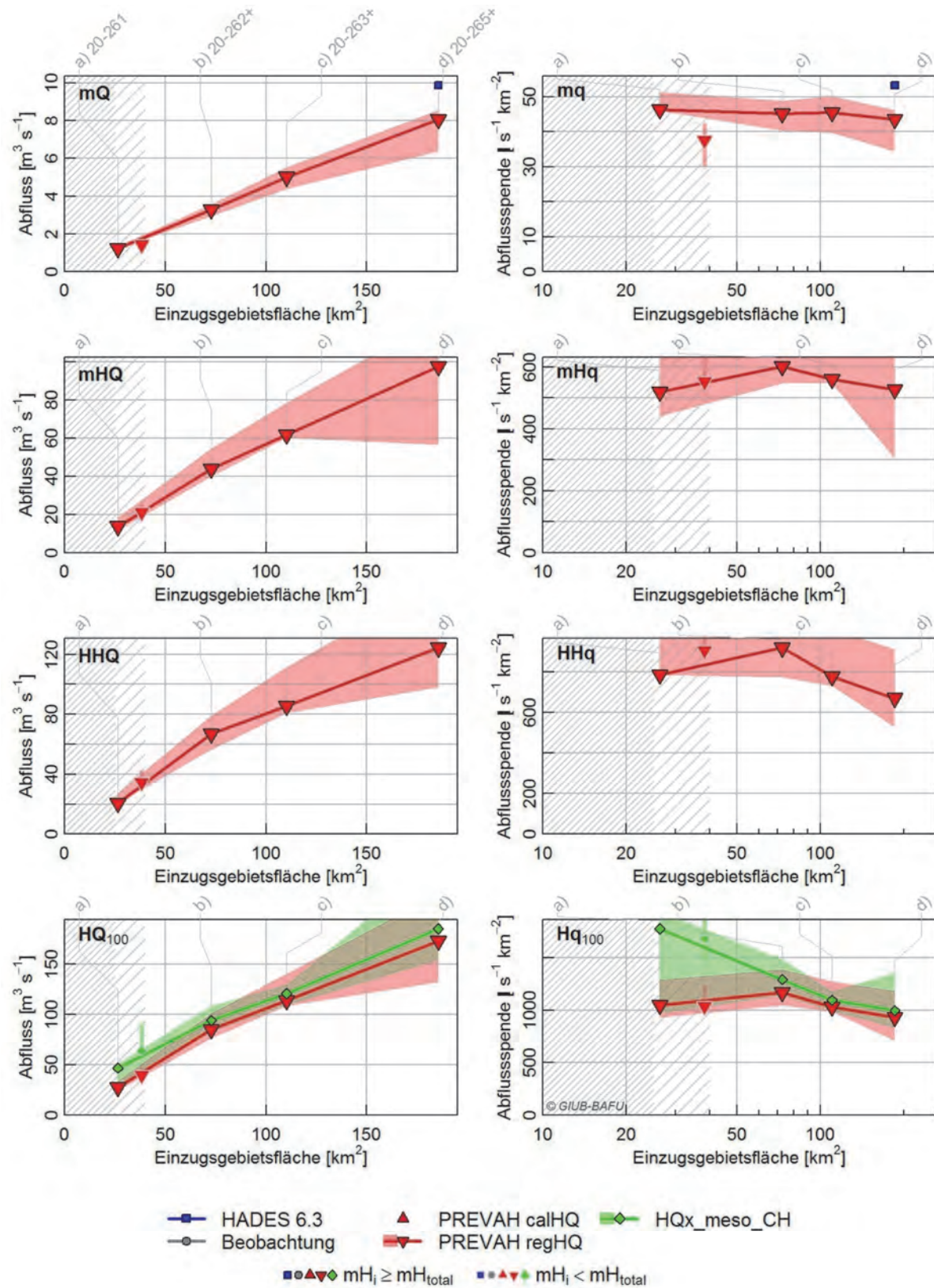
B.18 Hinterrhein

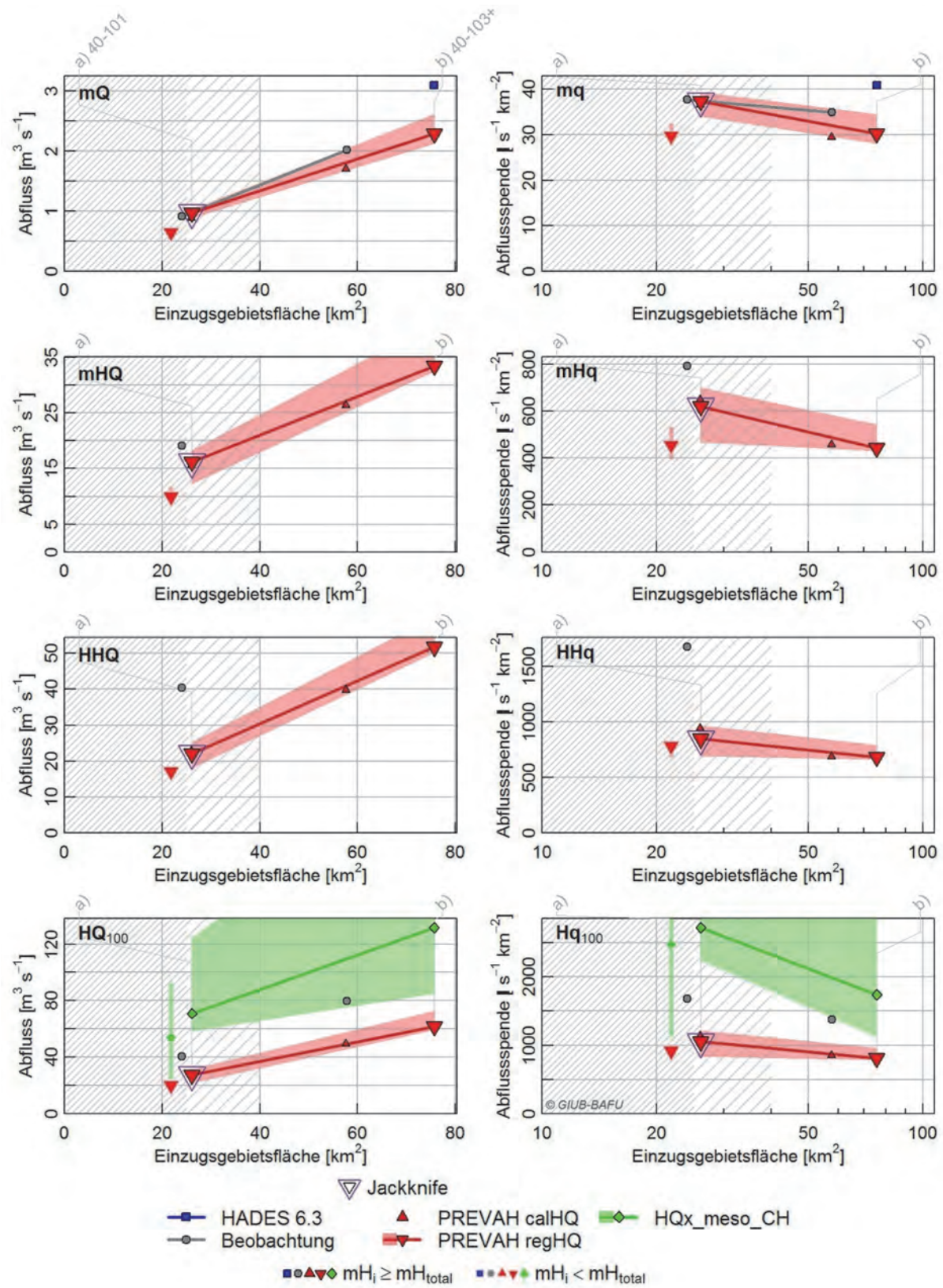


B.19 Isenthalbach

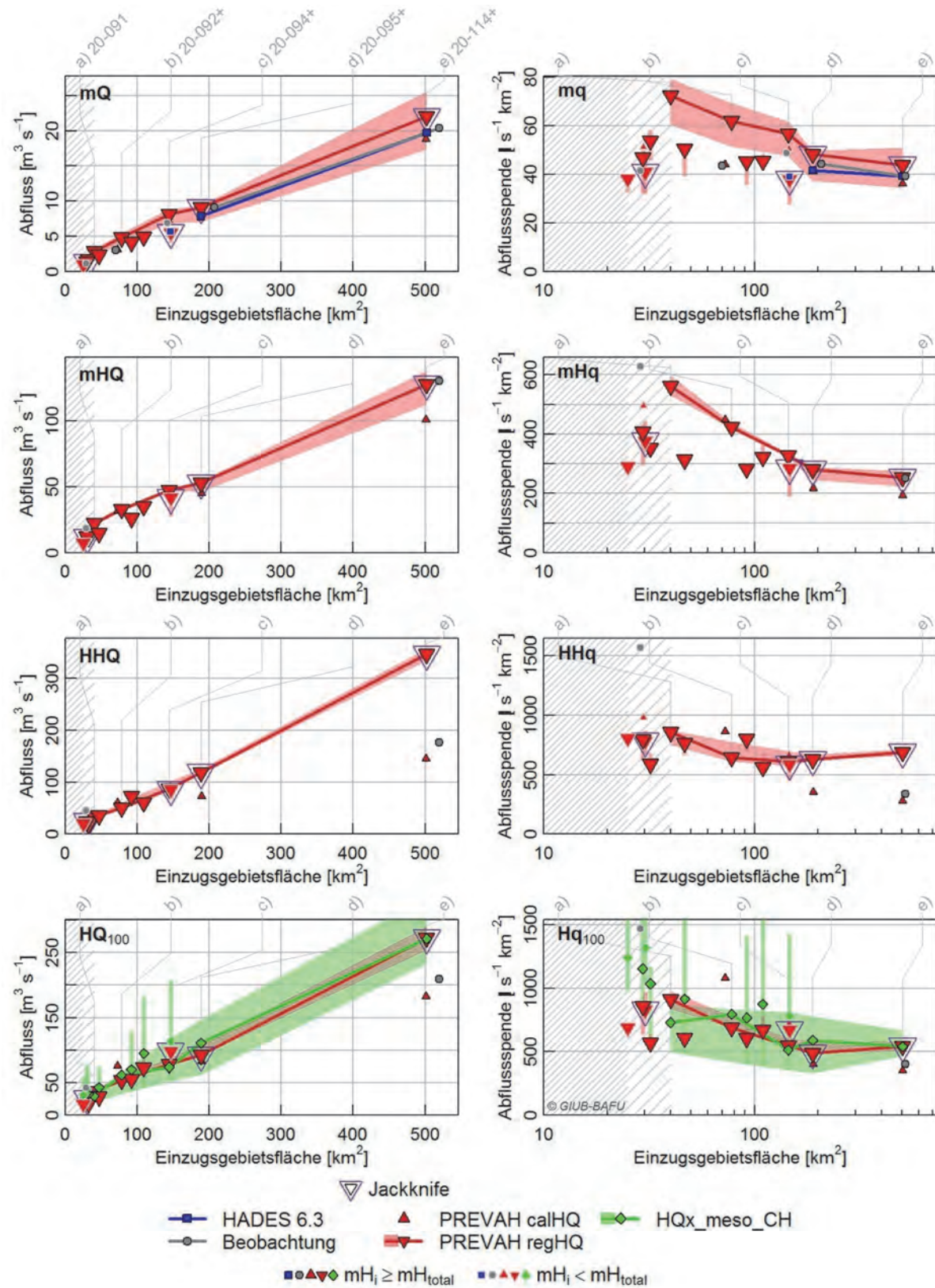


B.20 Jogne

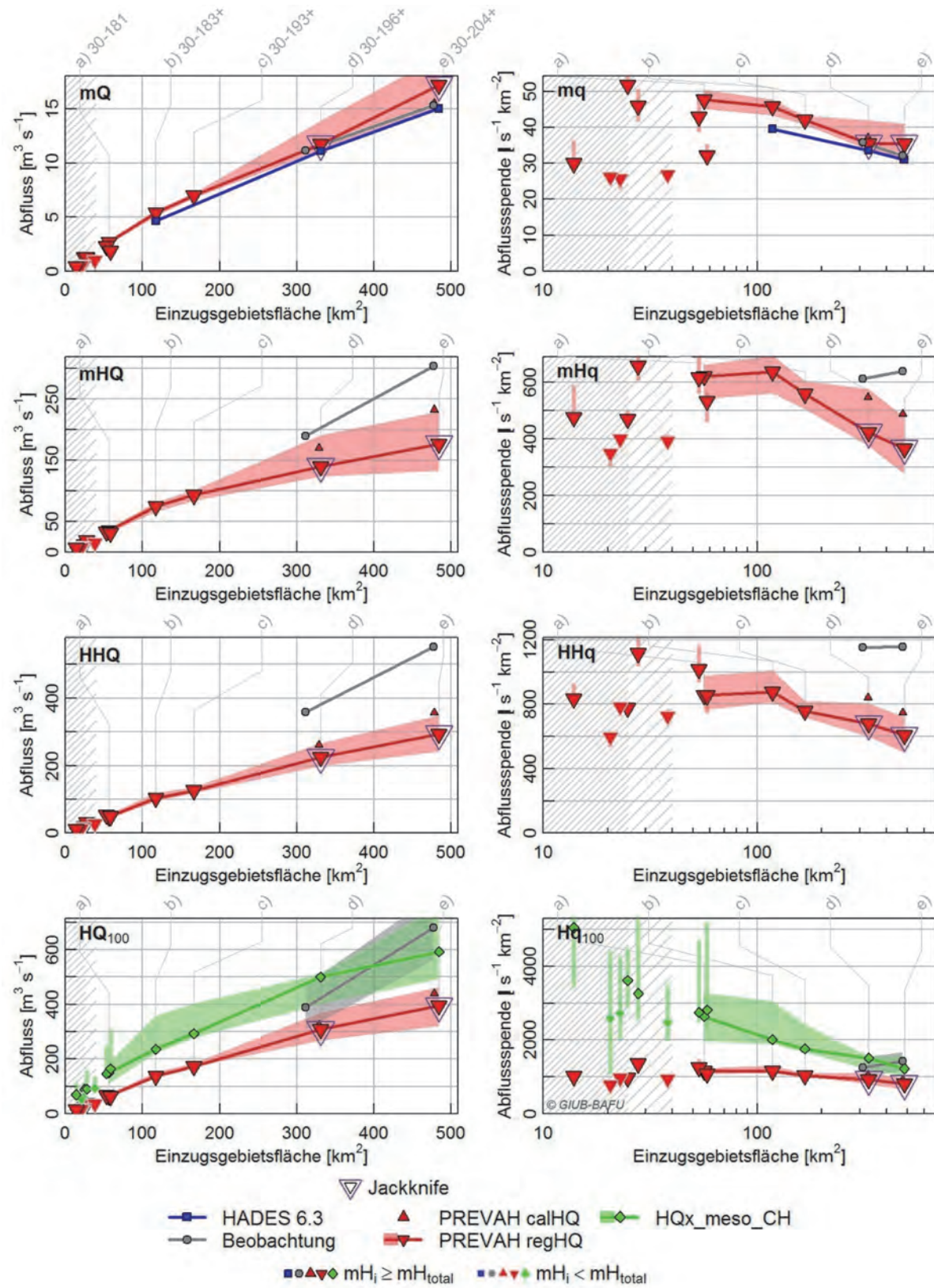




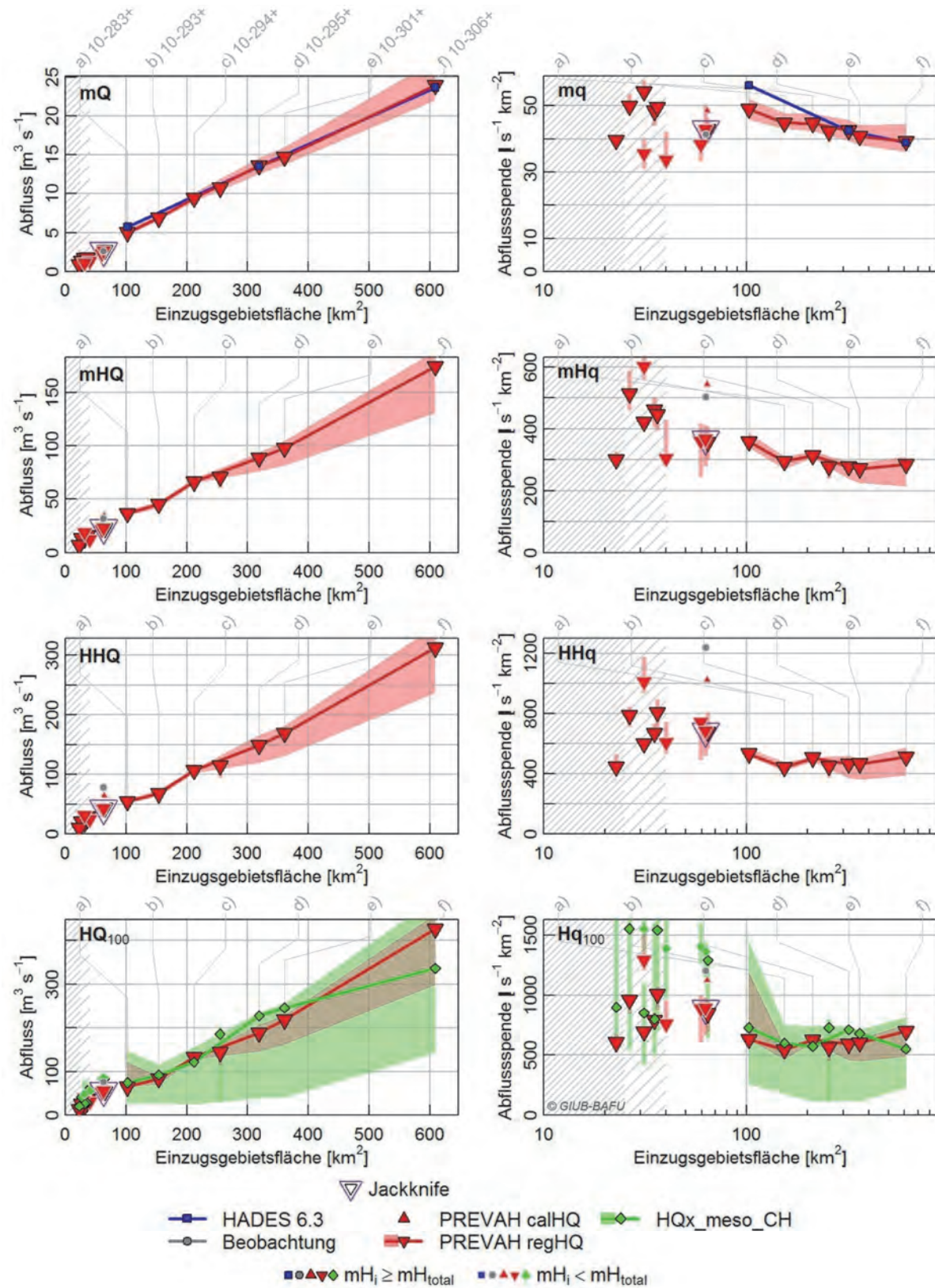
B.22 Kander



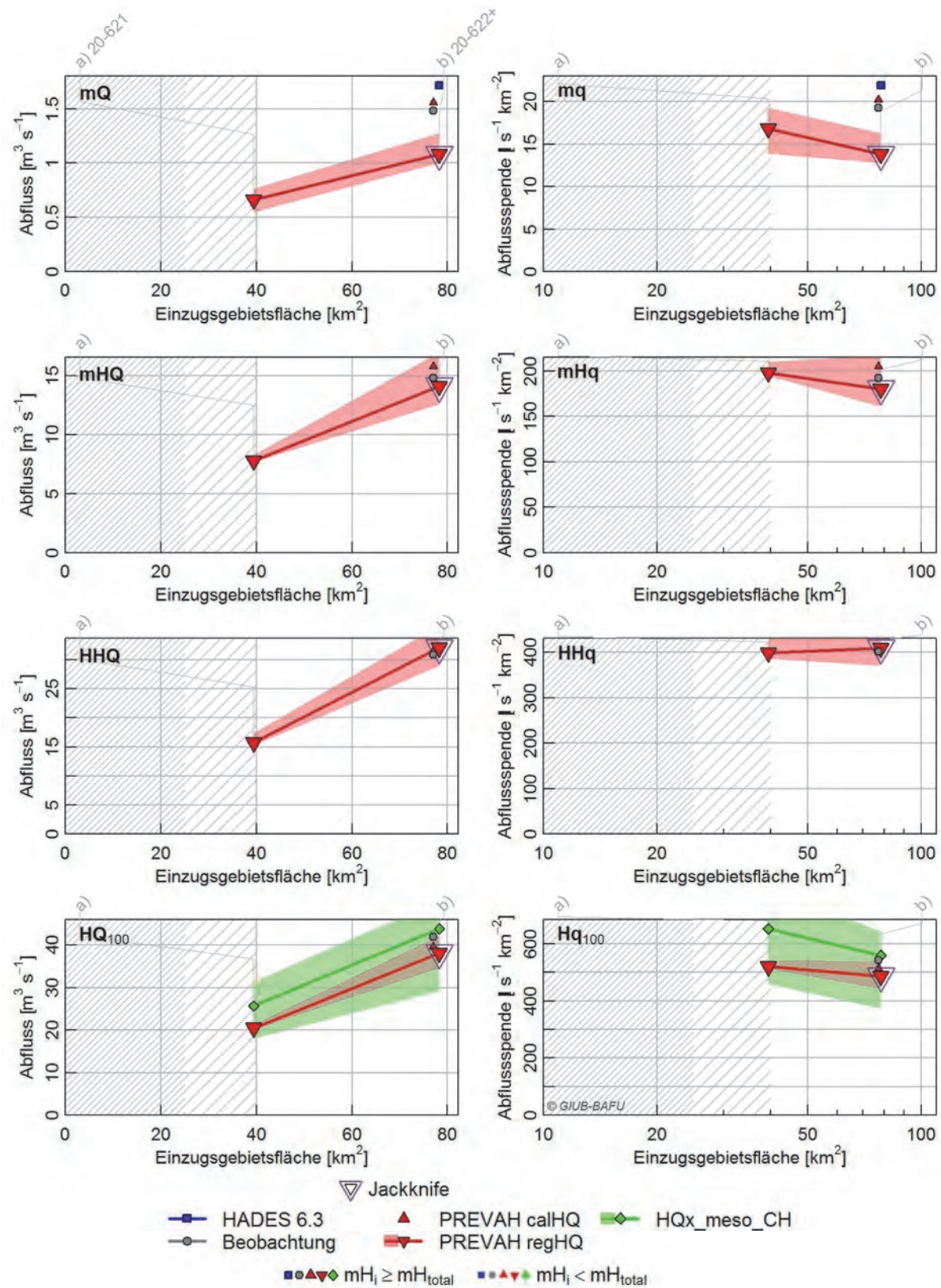
B.23 Kleine Emme



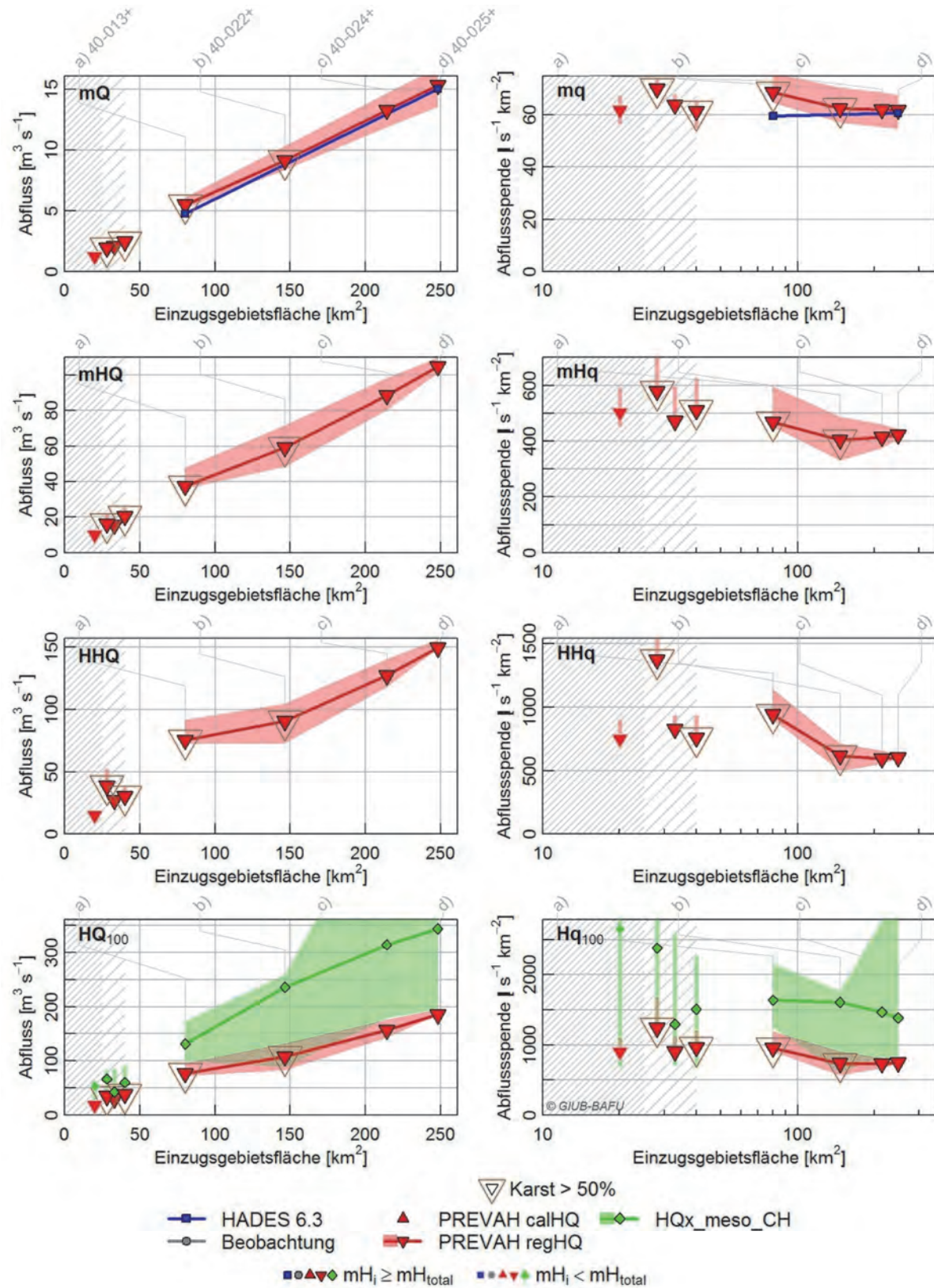
B.24 Landquart



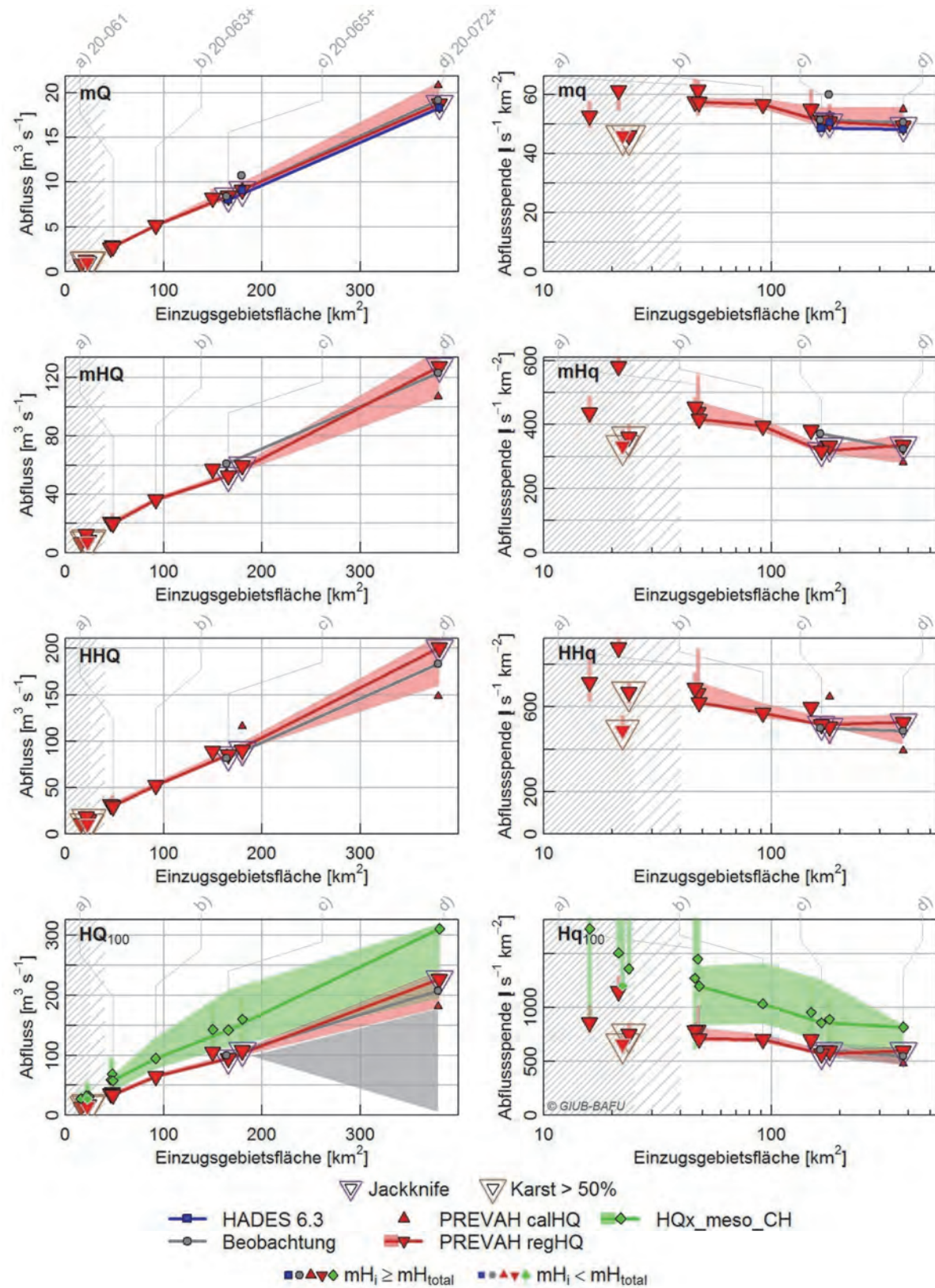
B.25 Limpach



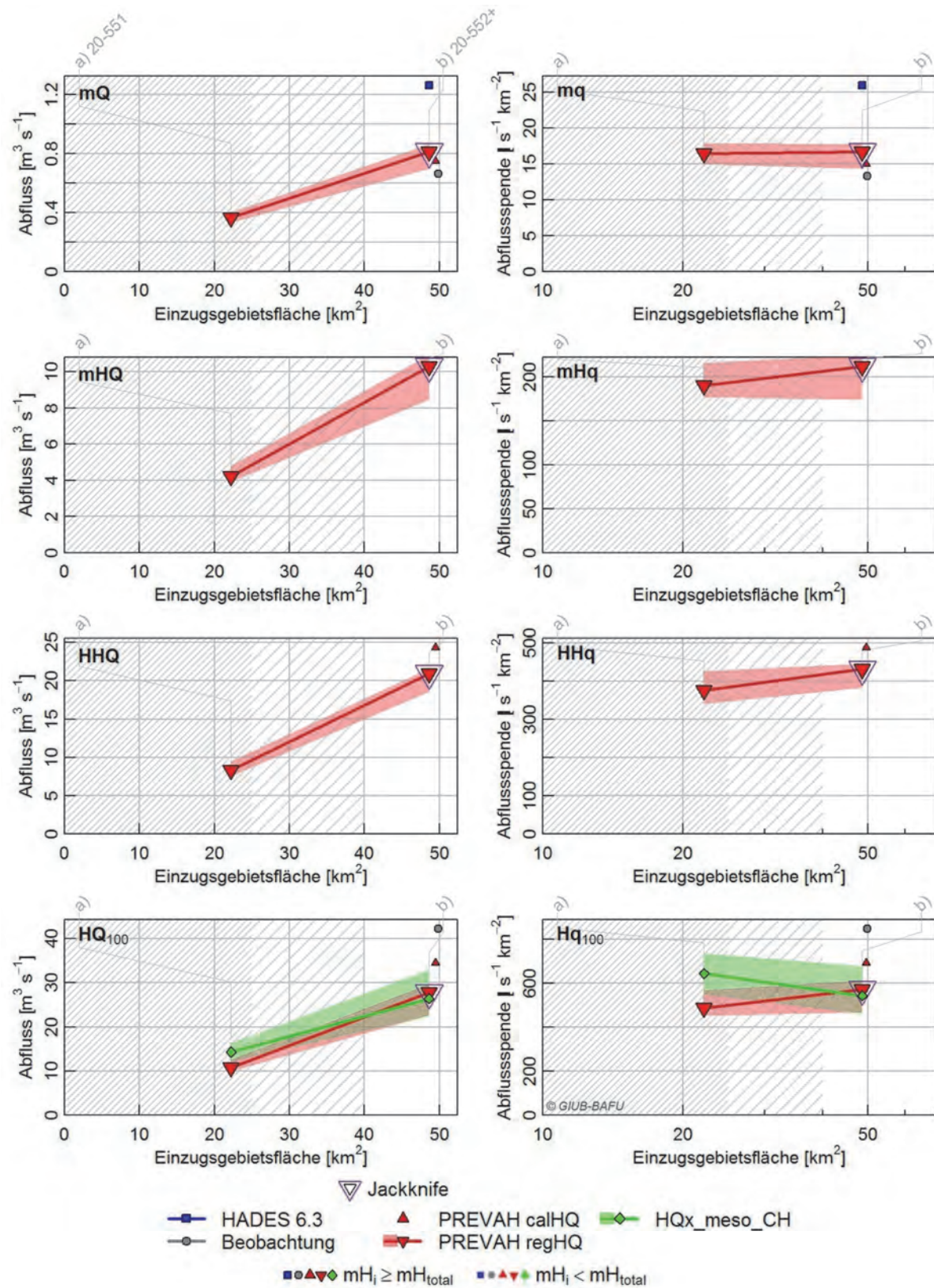
B.26 Linth



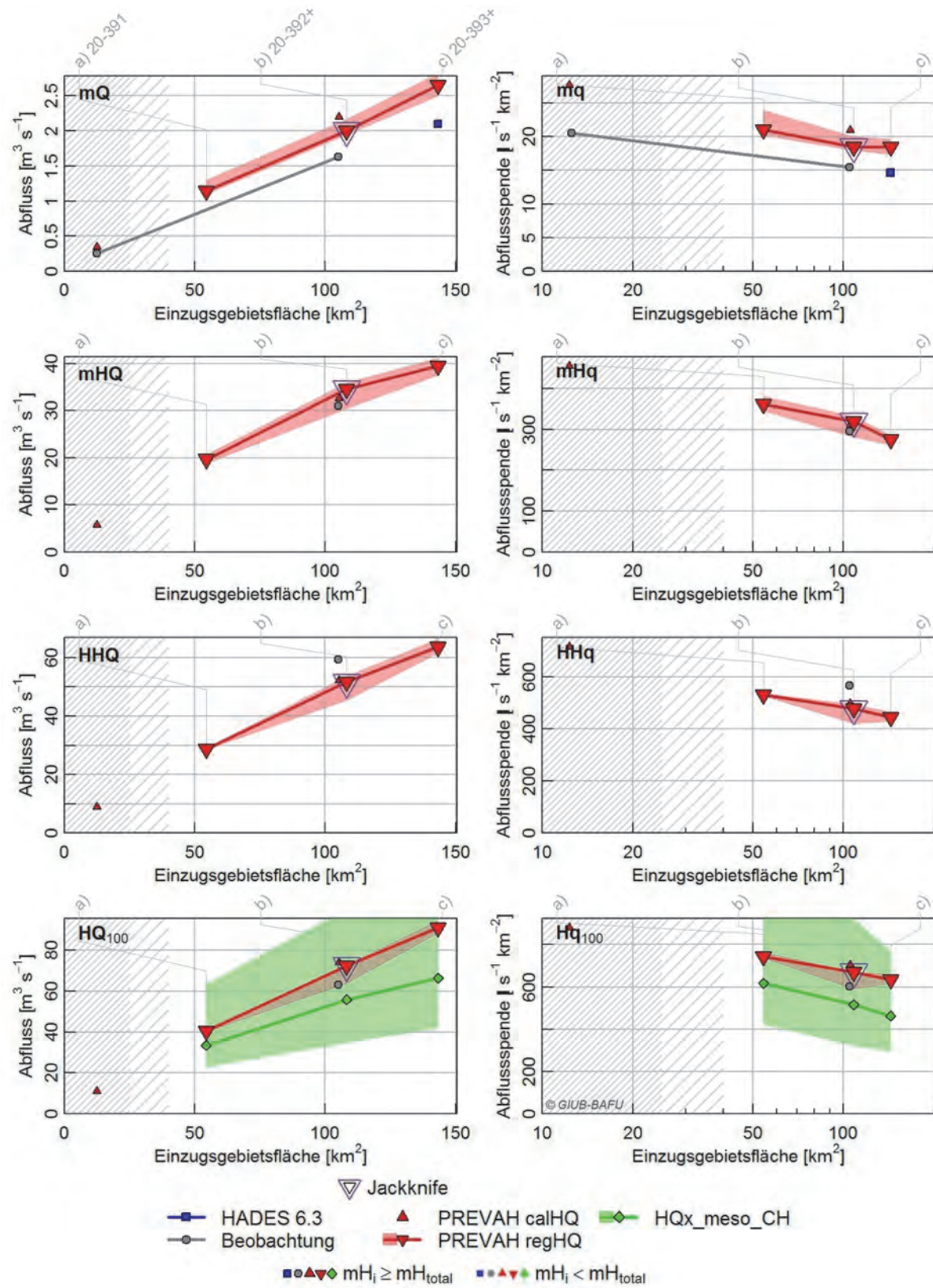
B.27 Luetschine

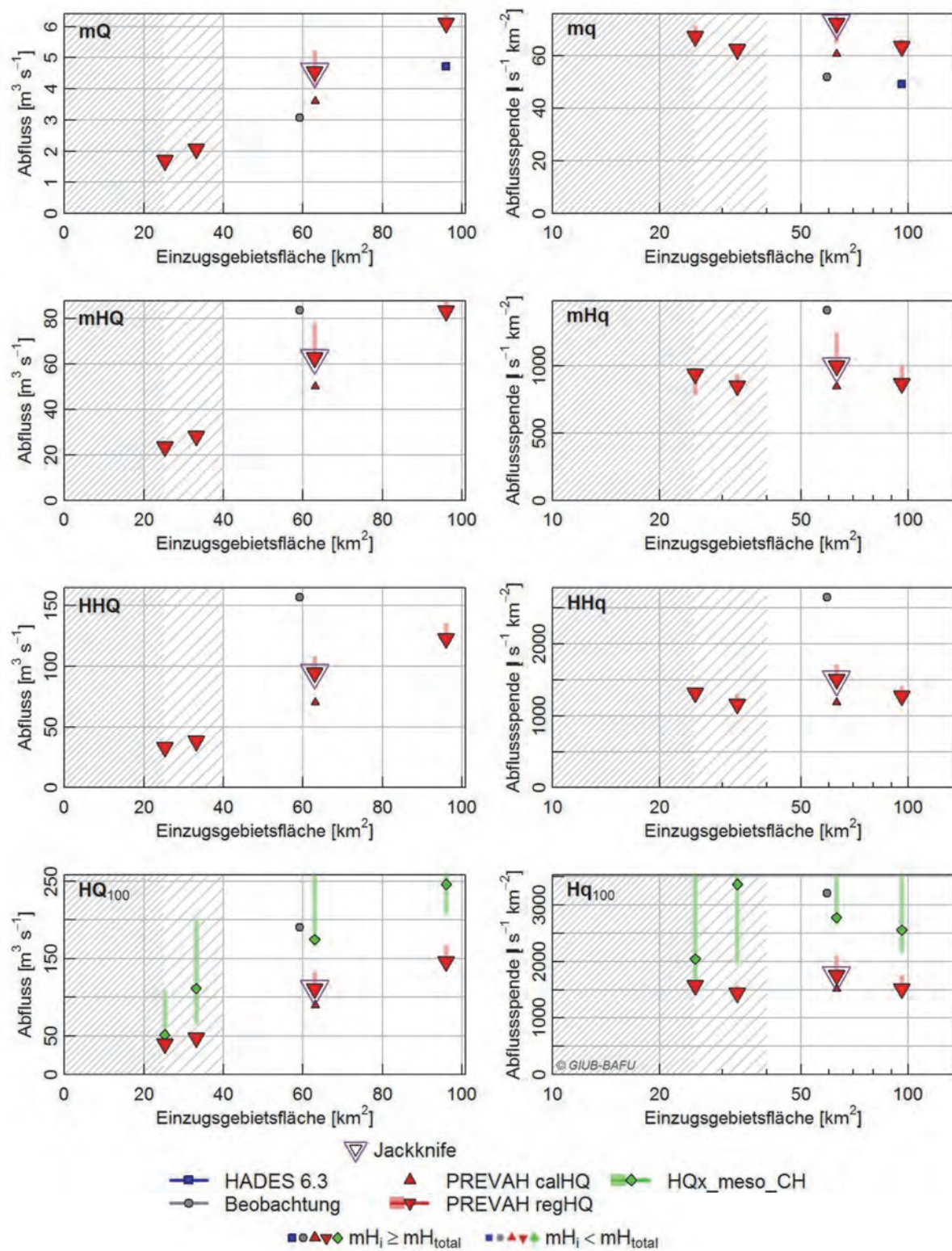


B.28 Lyssbach

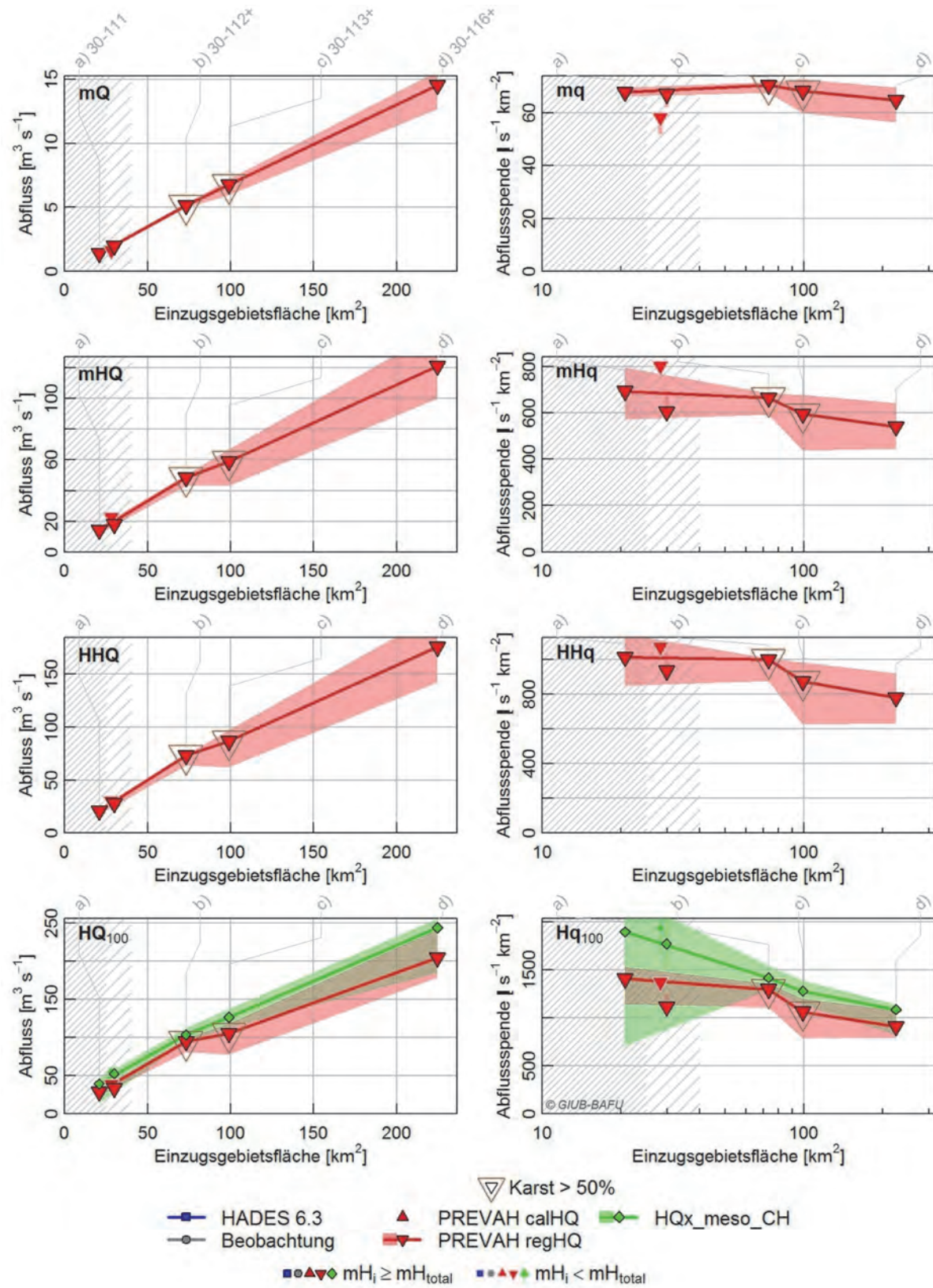


B.29 Mentue

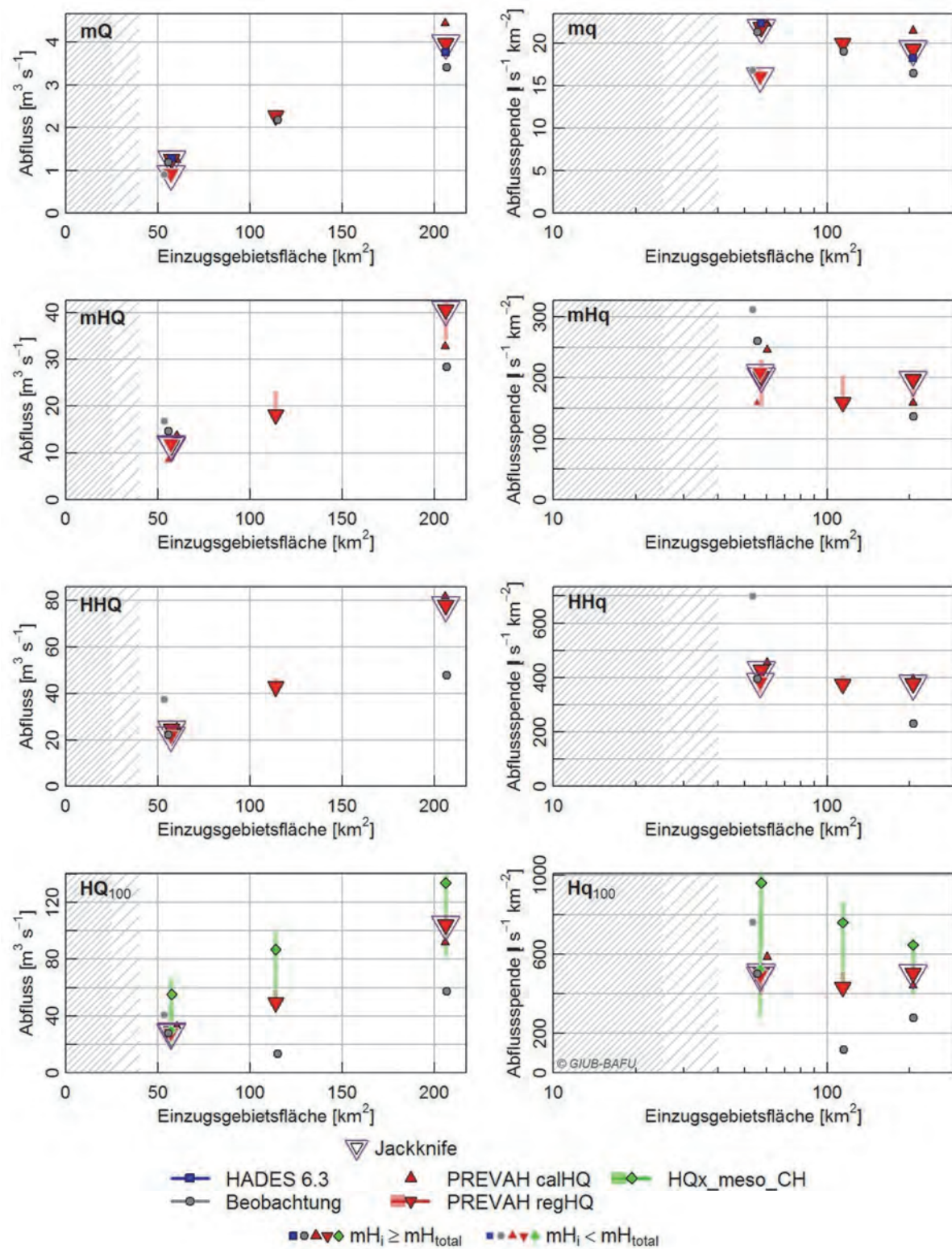




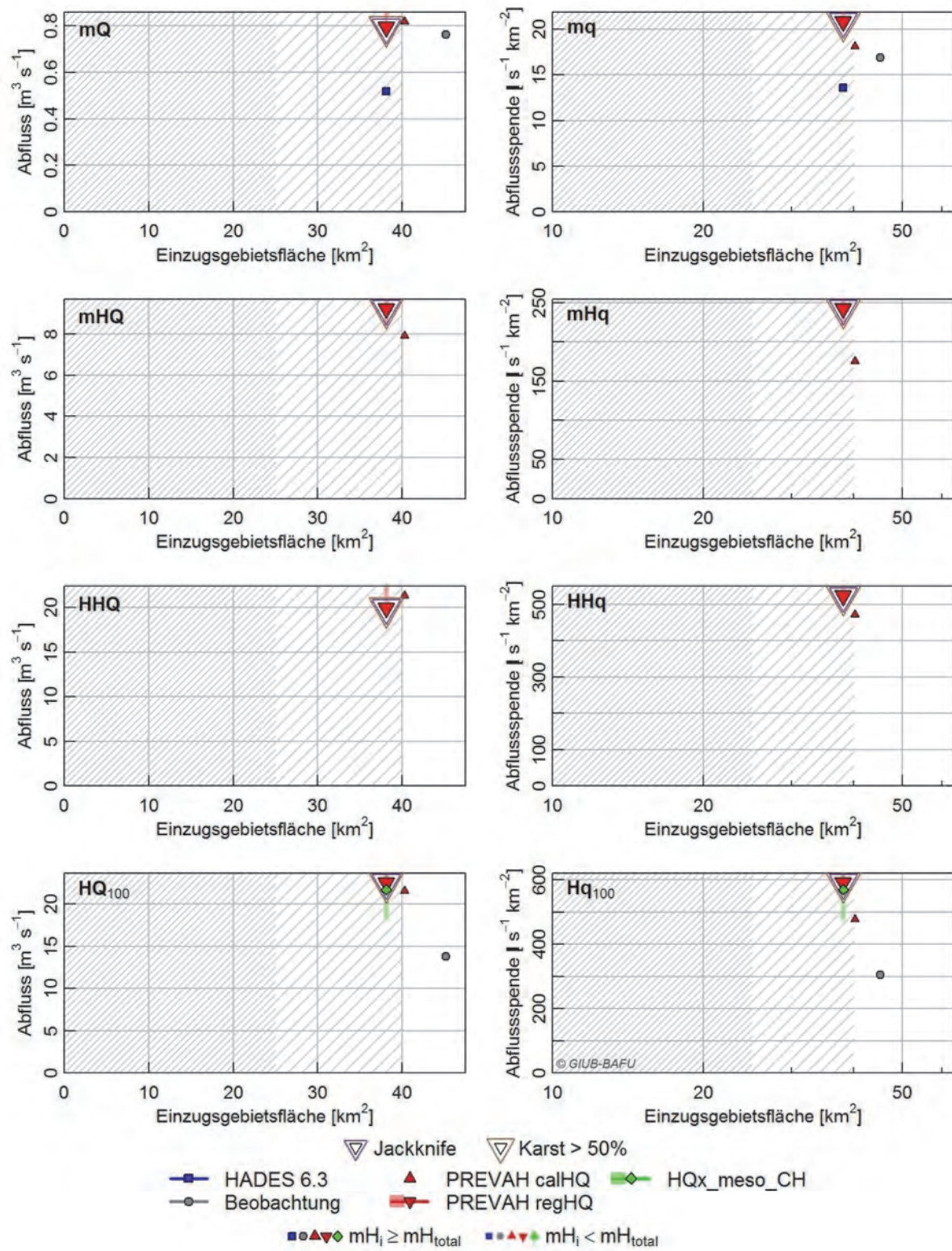
B.31 Muota



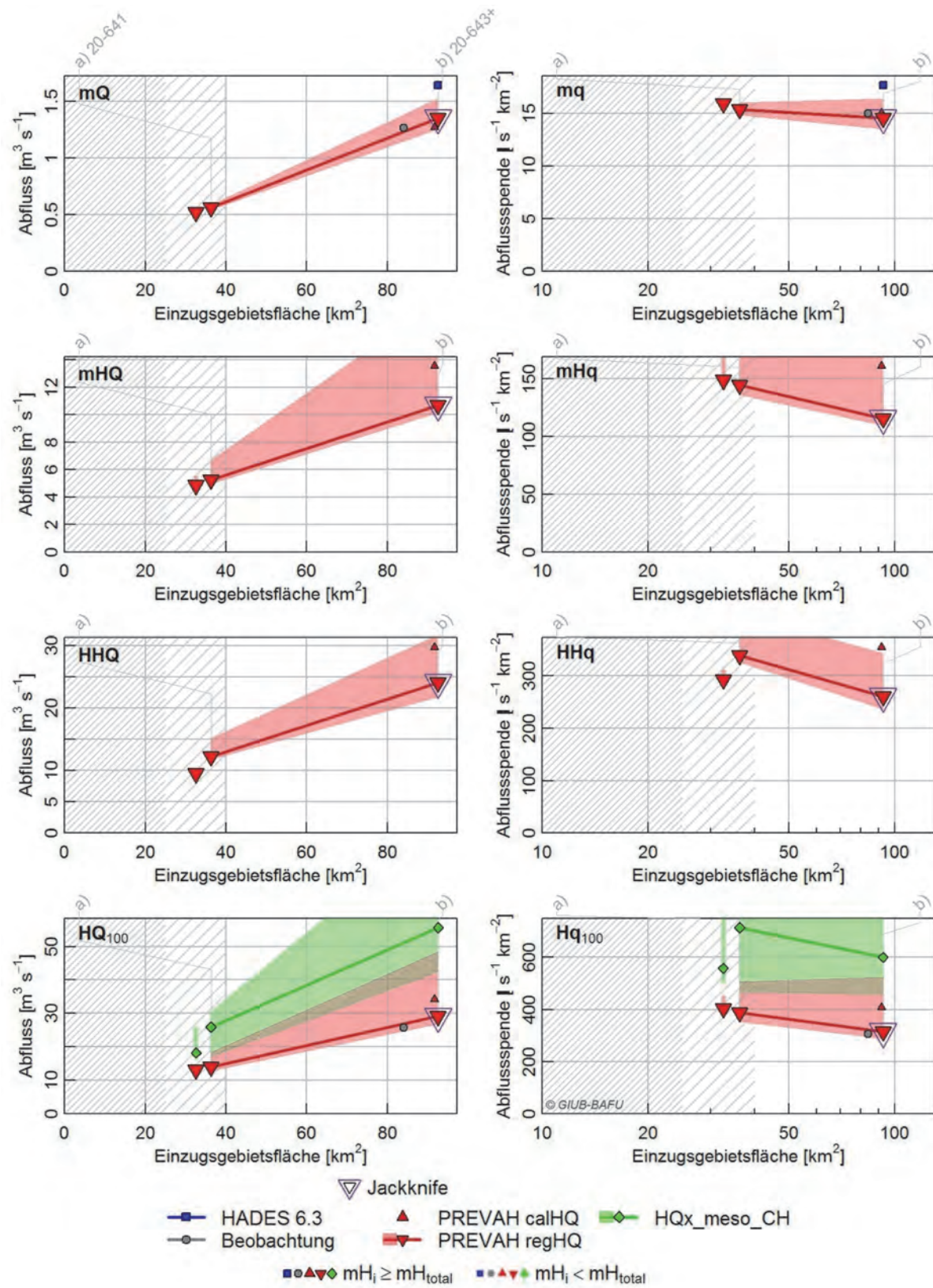
B.32 Murg (AG)



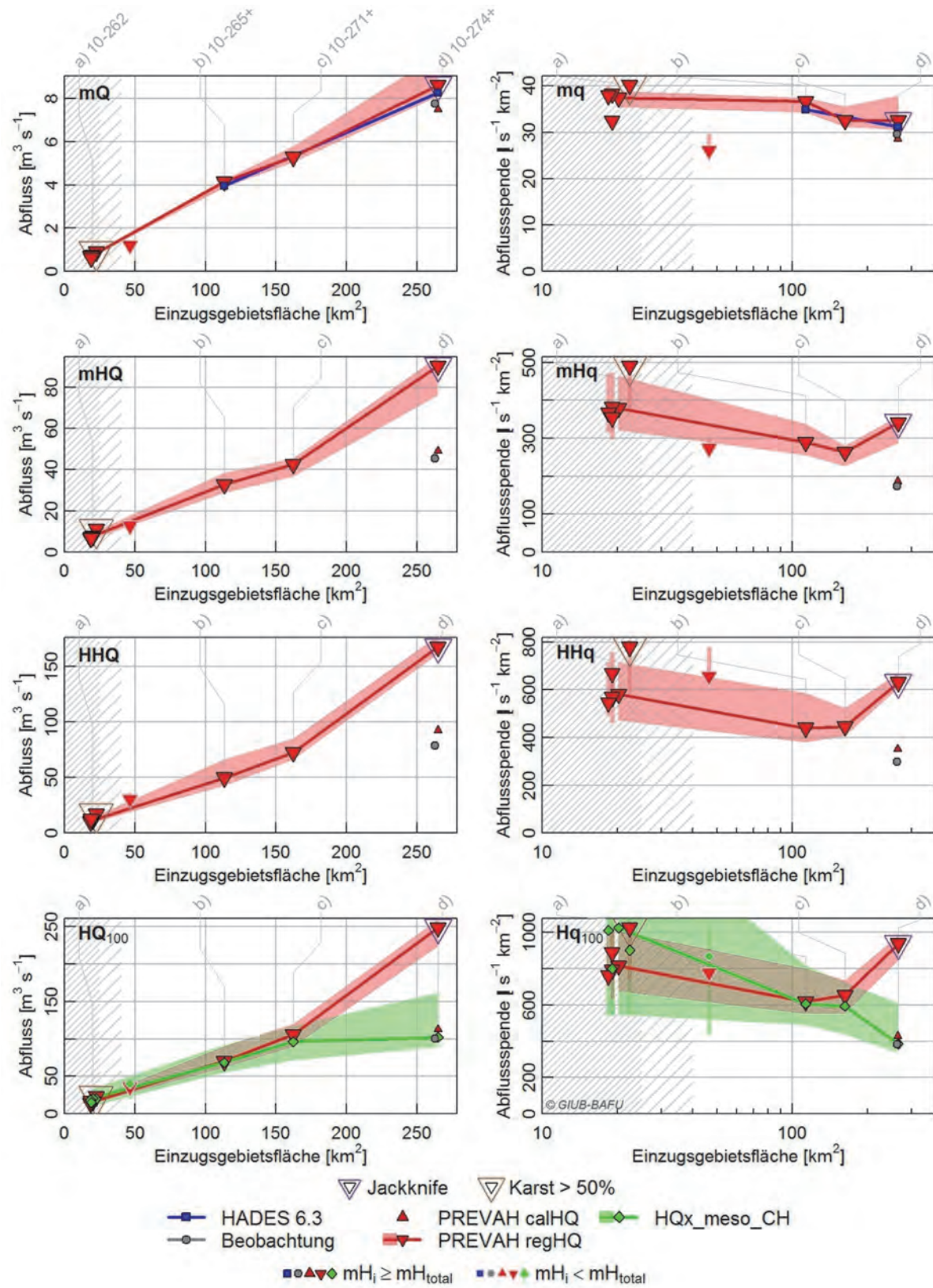
B.33 Nozon



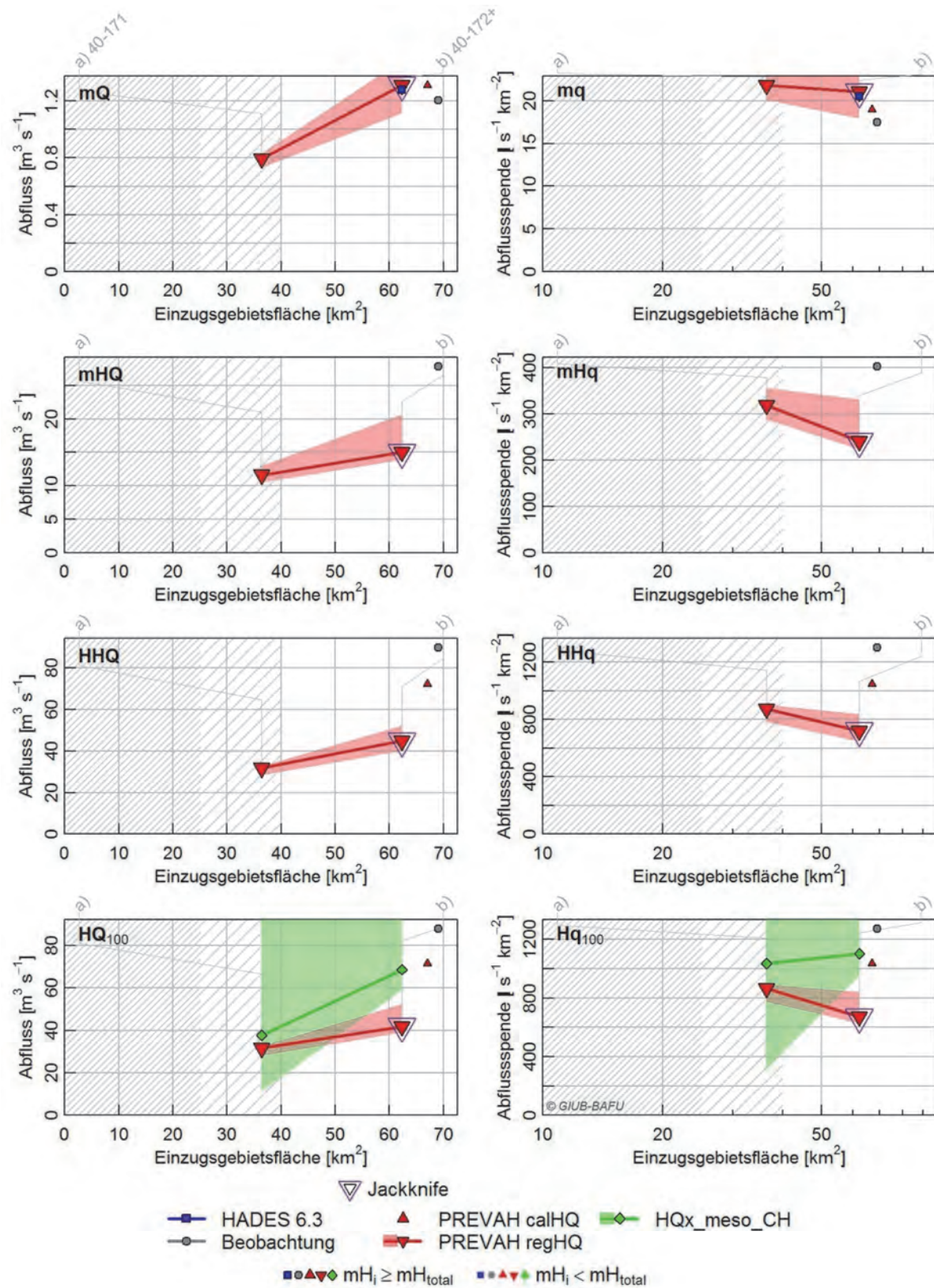
B.34 Oenz

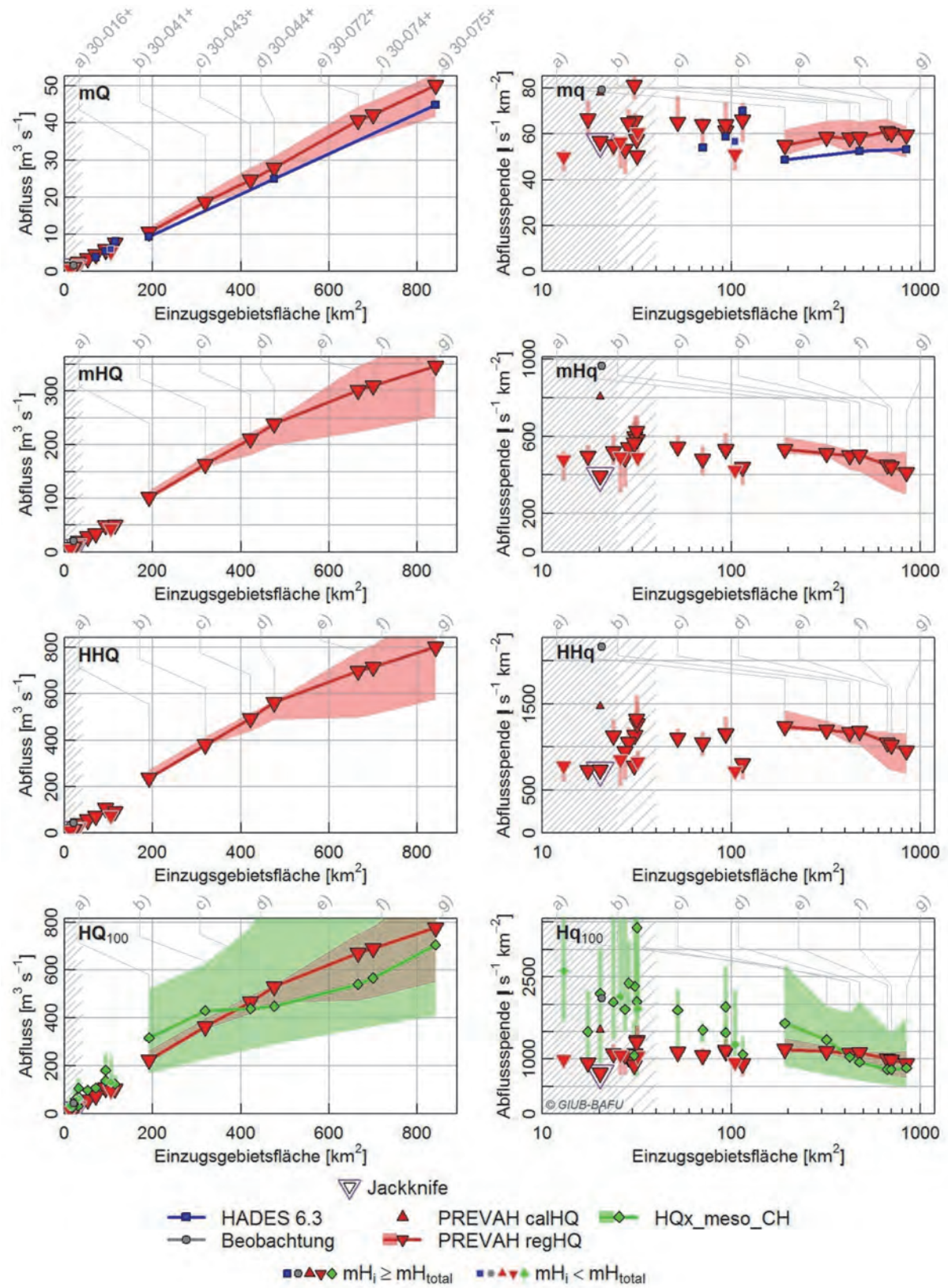


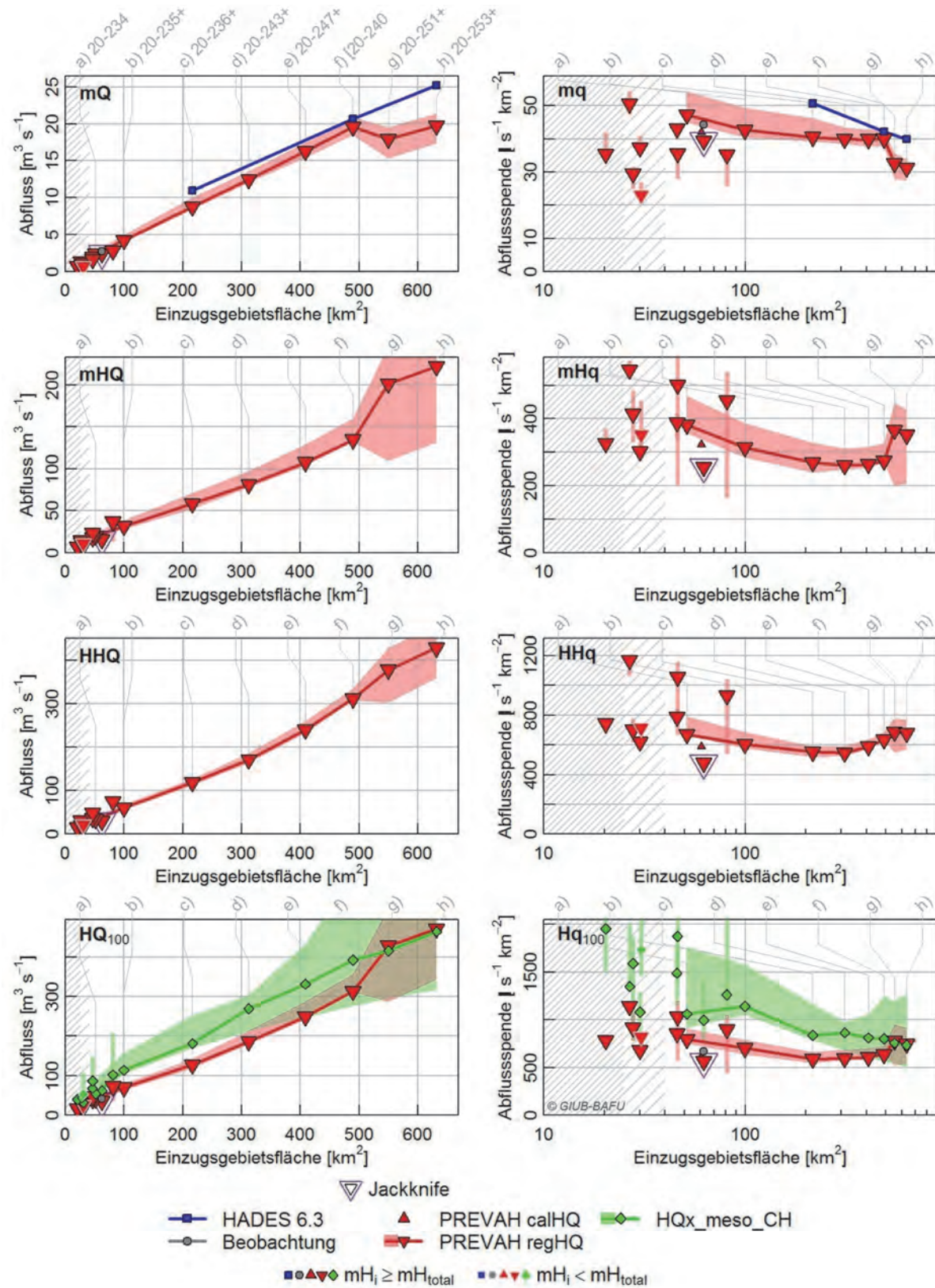
B.35 Plessur

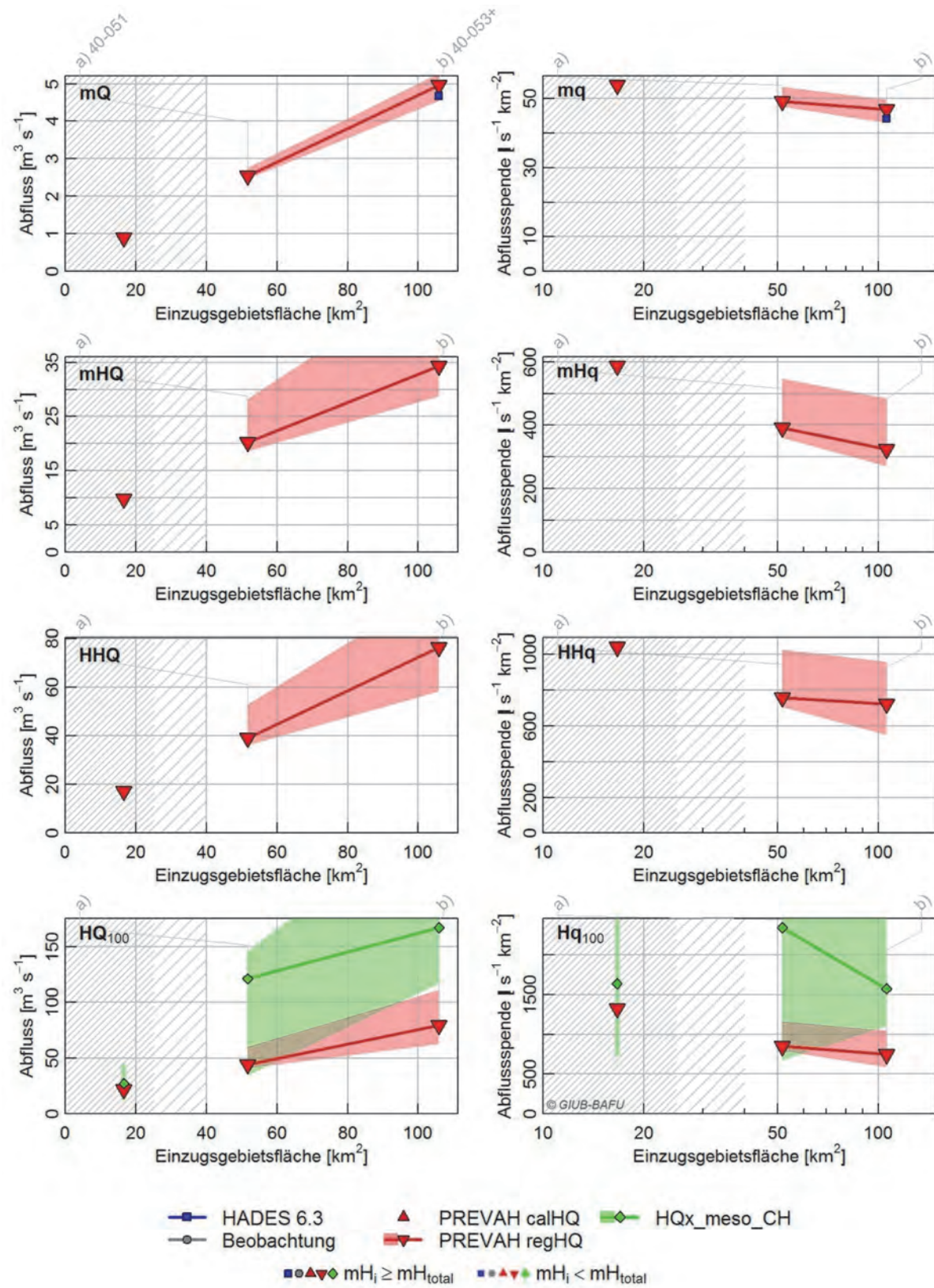


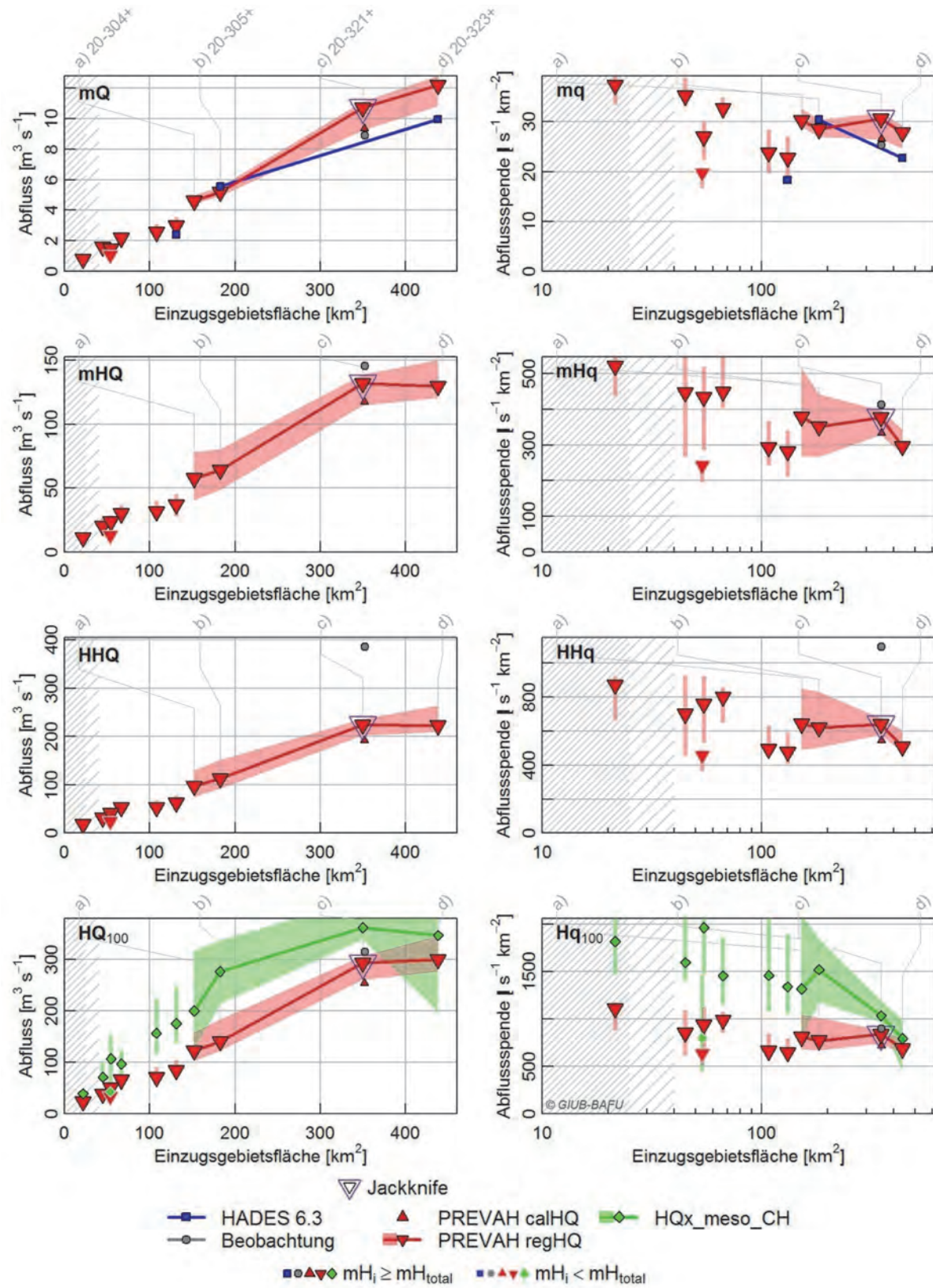
B.36 Reppisch



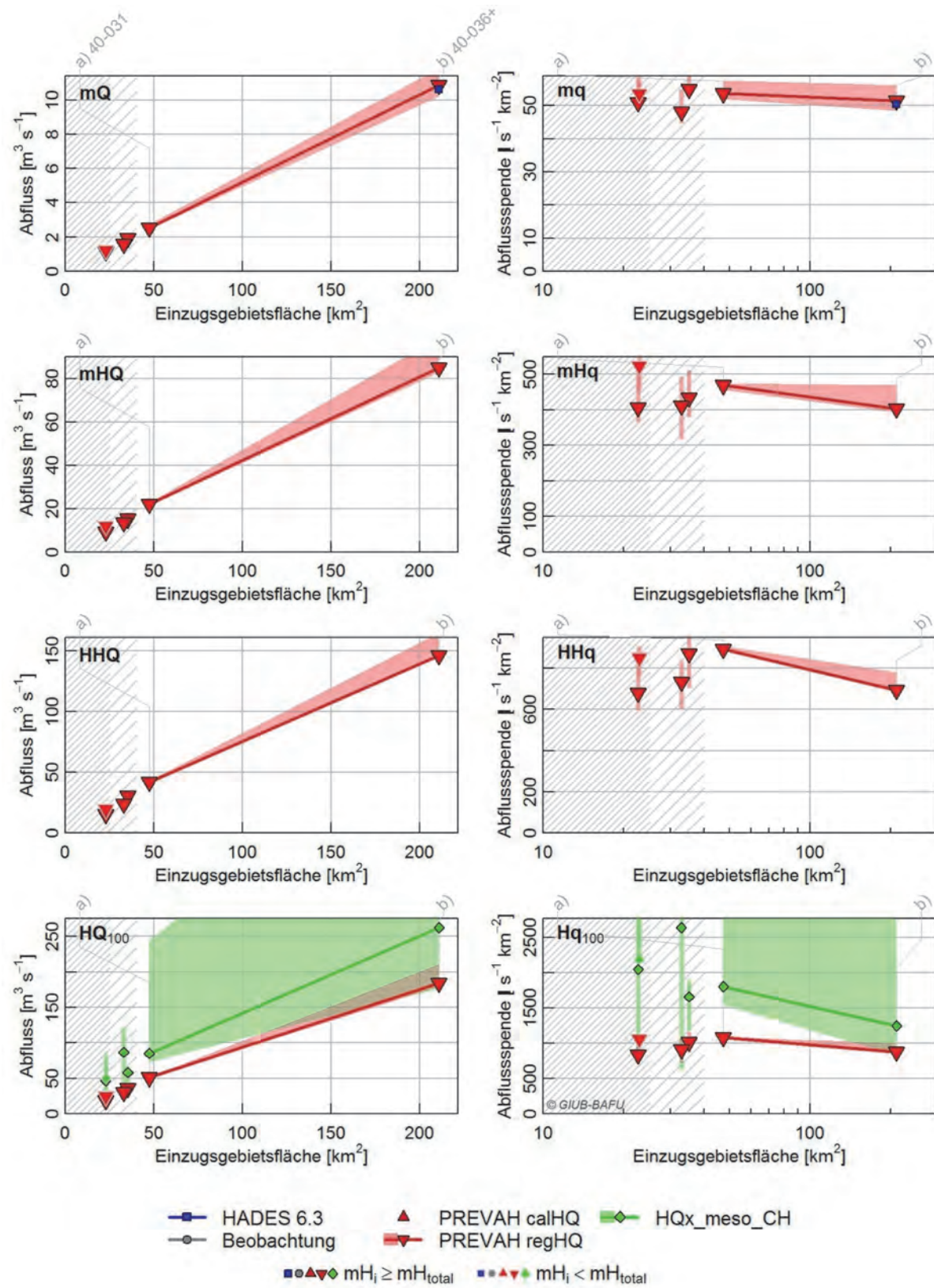




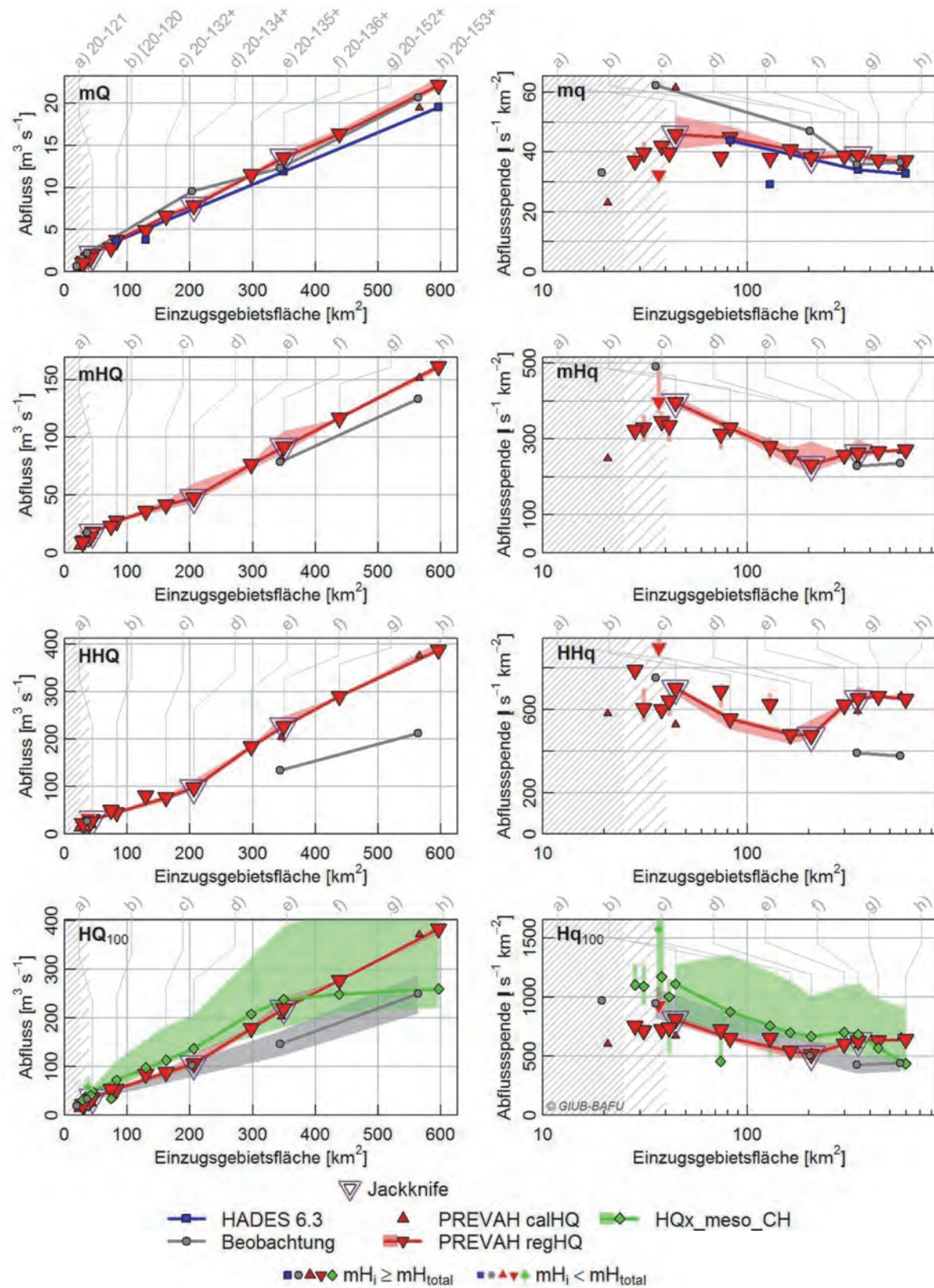




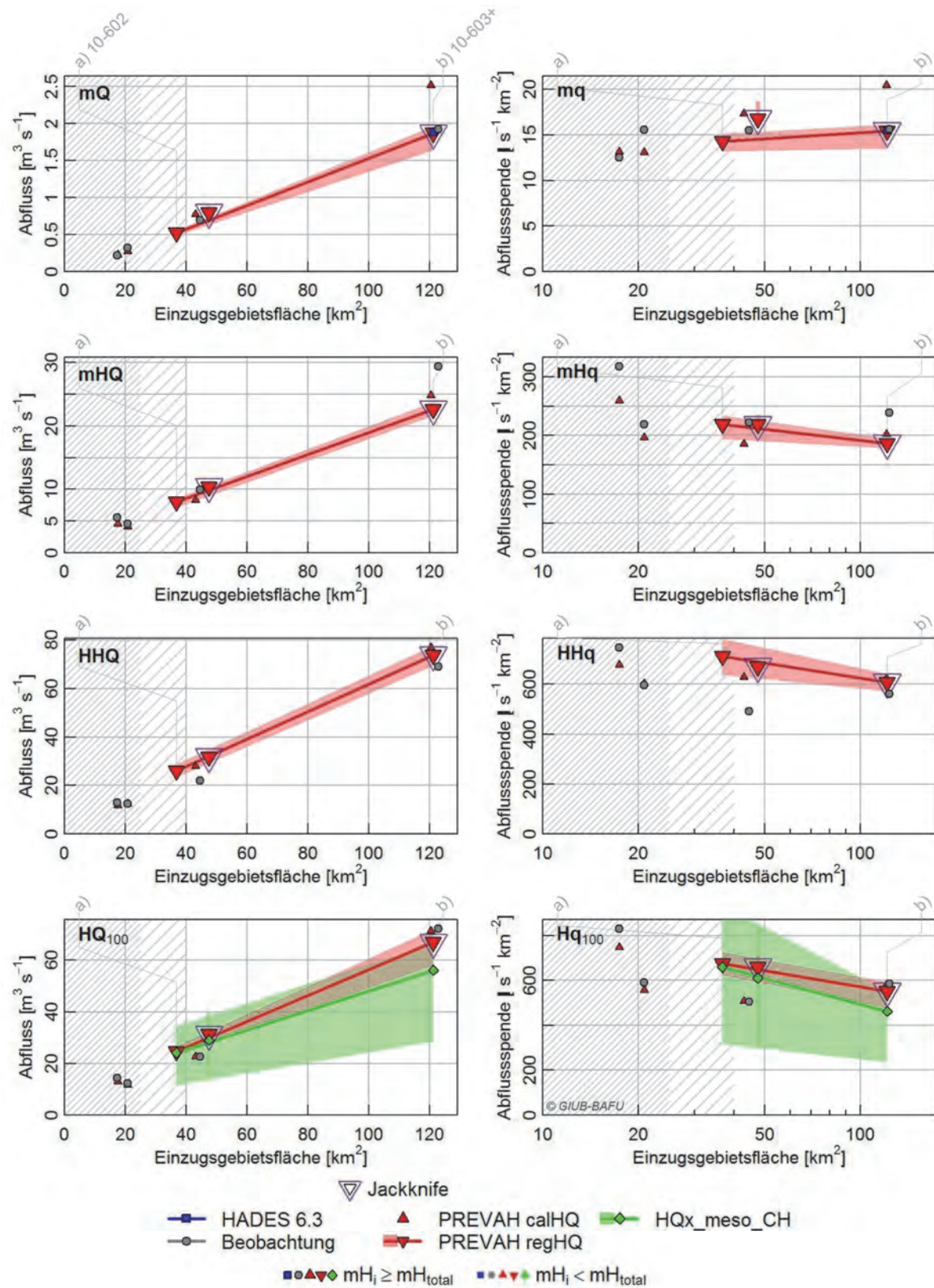
B.41 Sernft



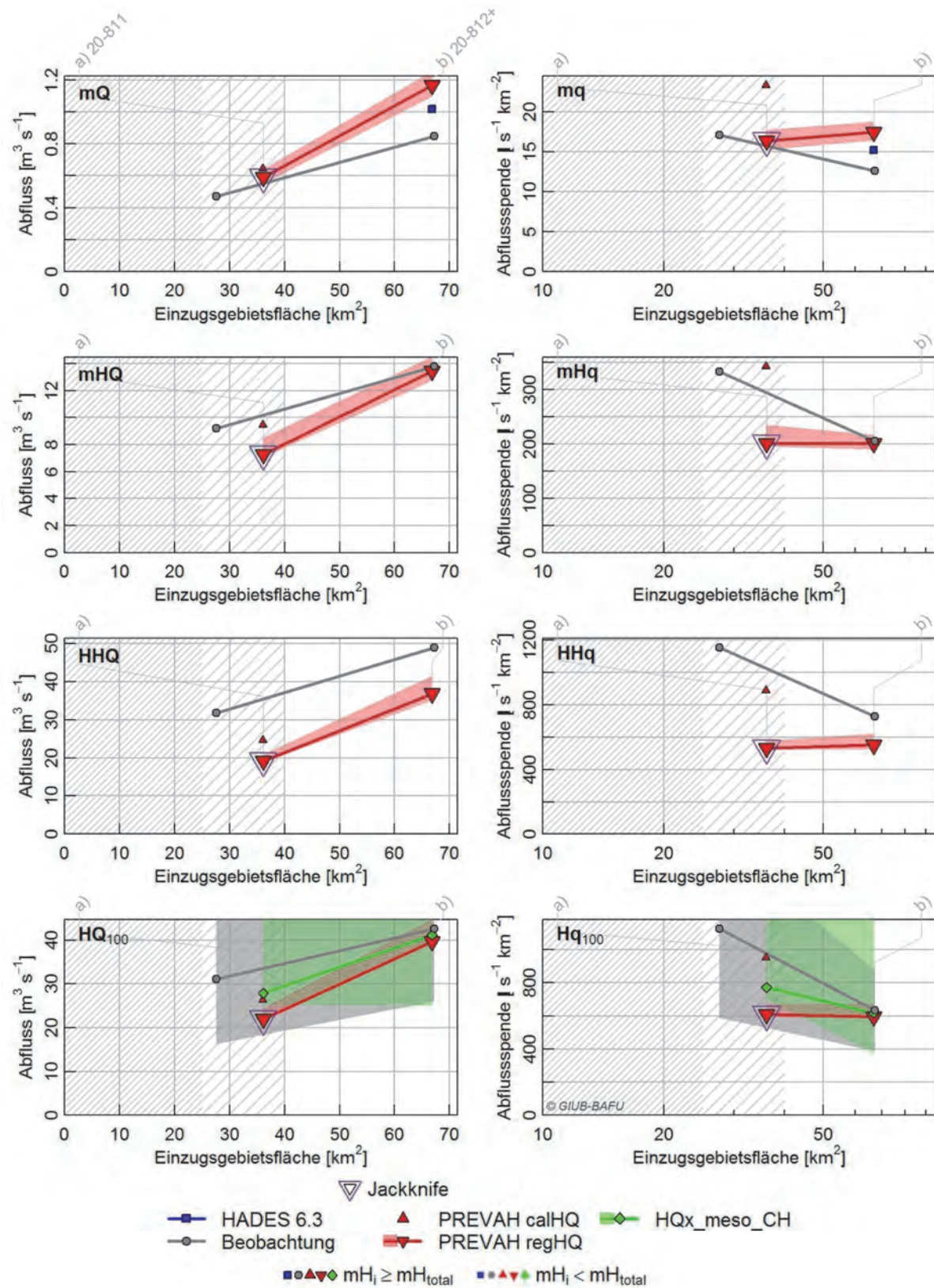
B.42 Simme

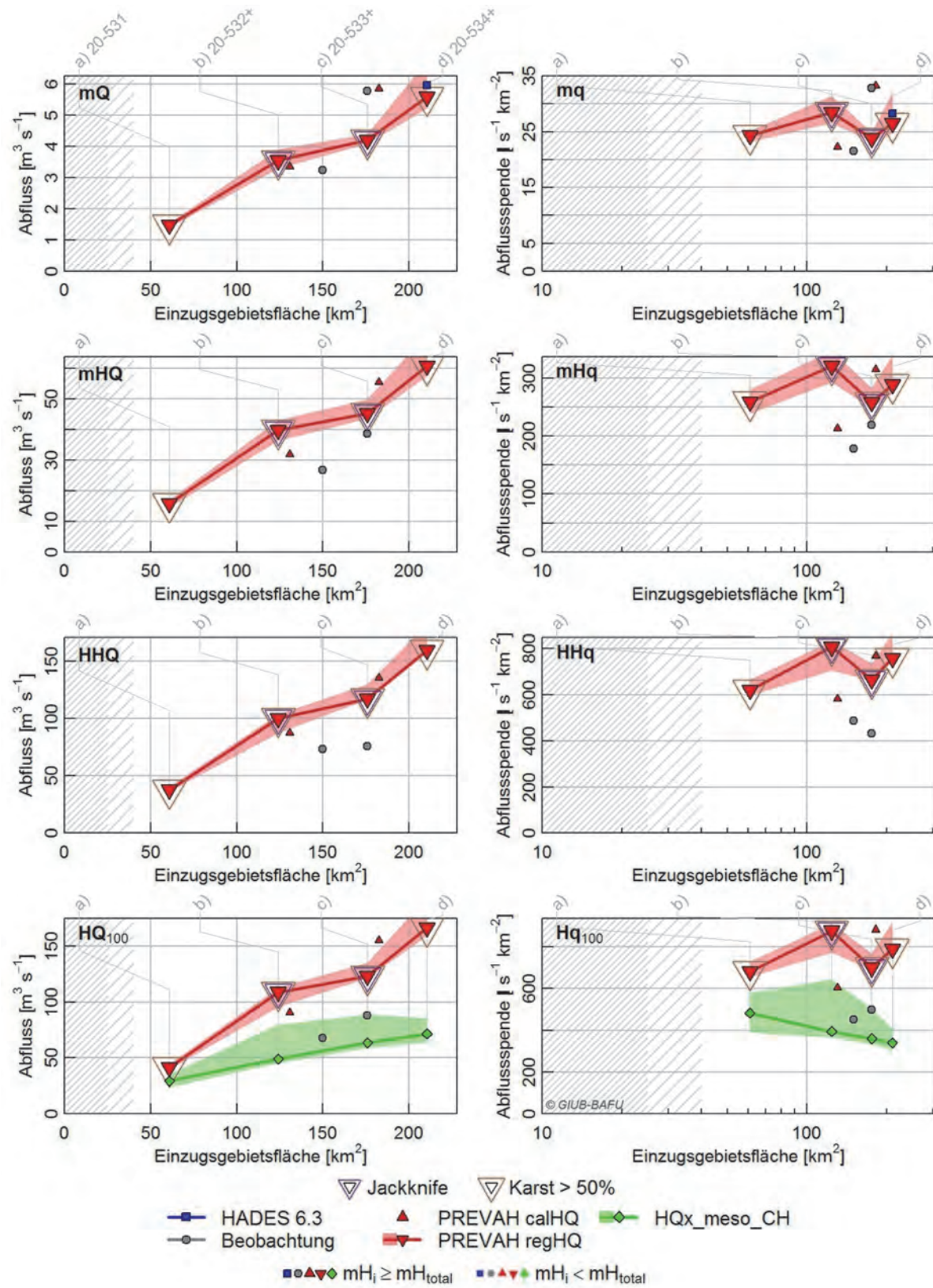


B.43 Sissle

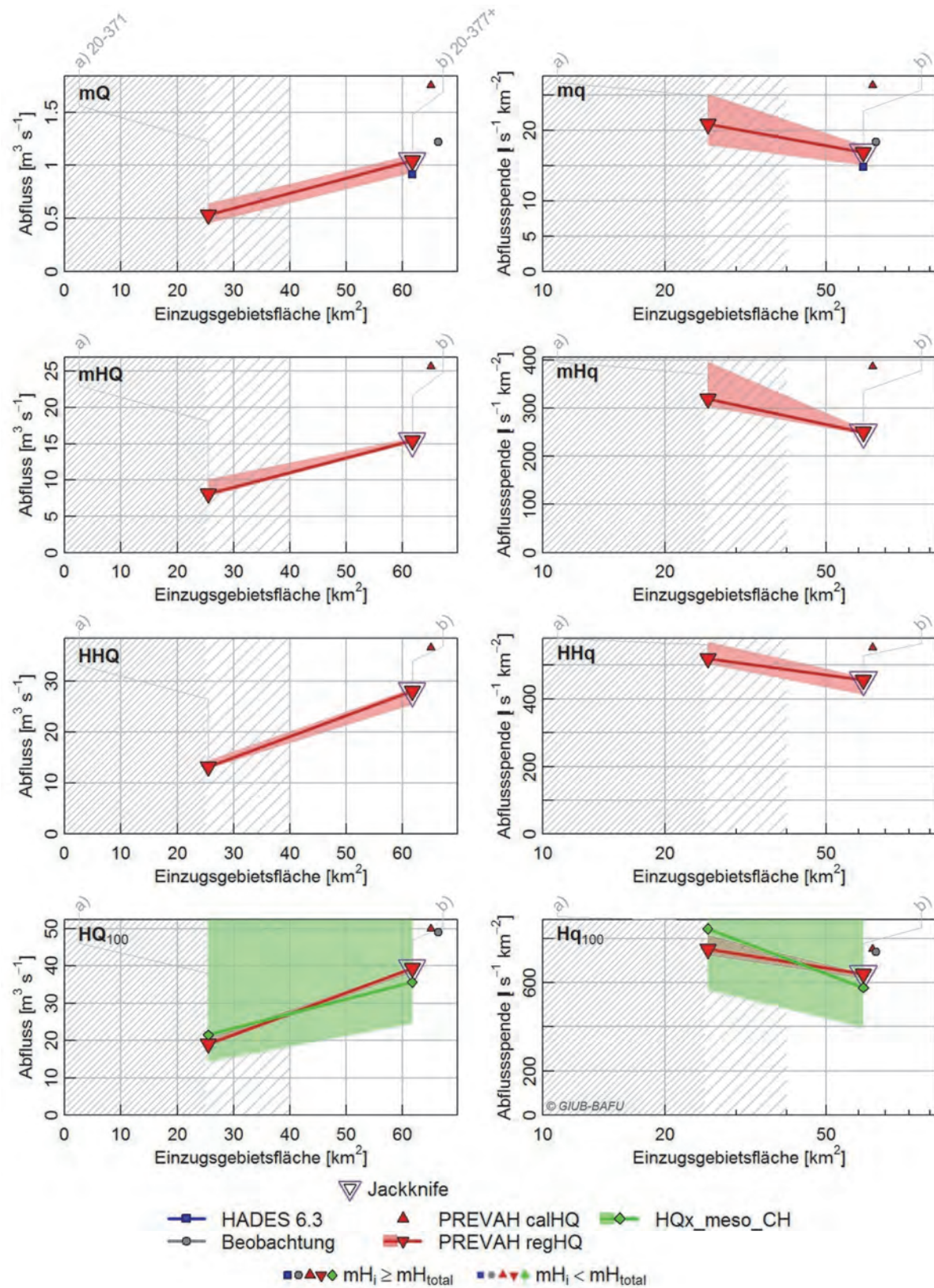


B.44 Surb

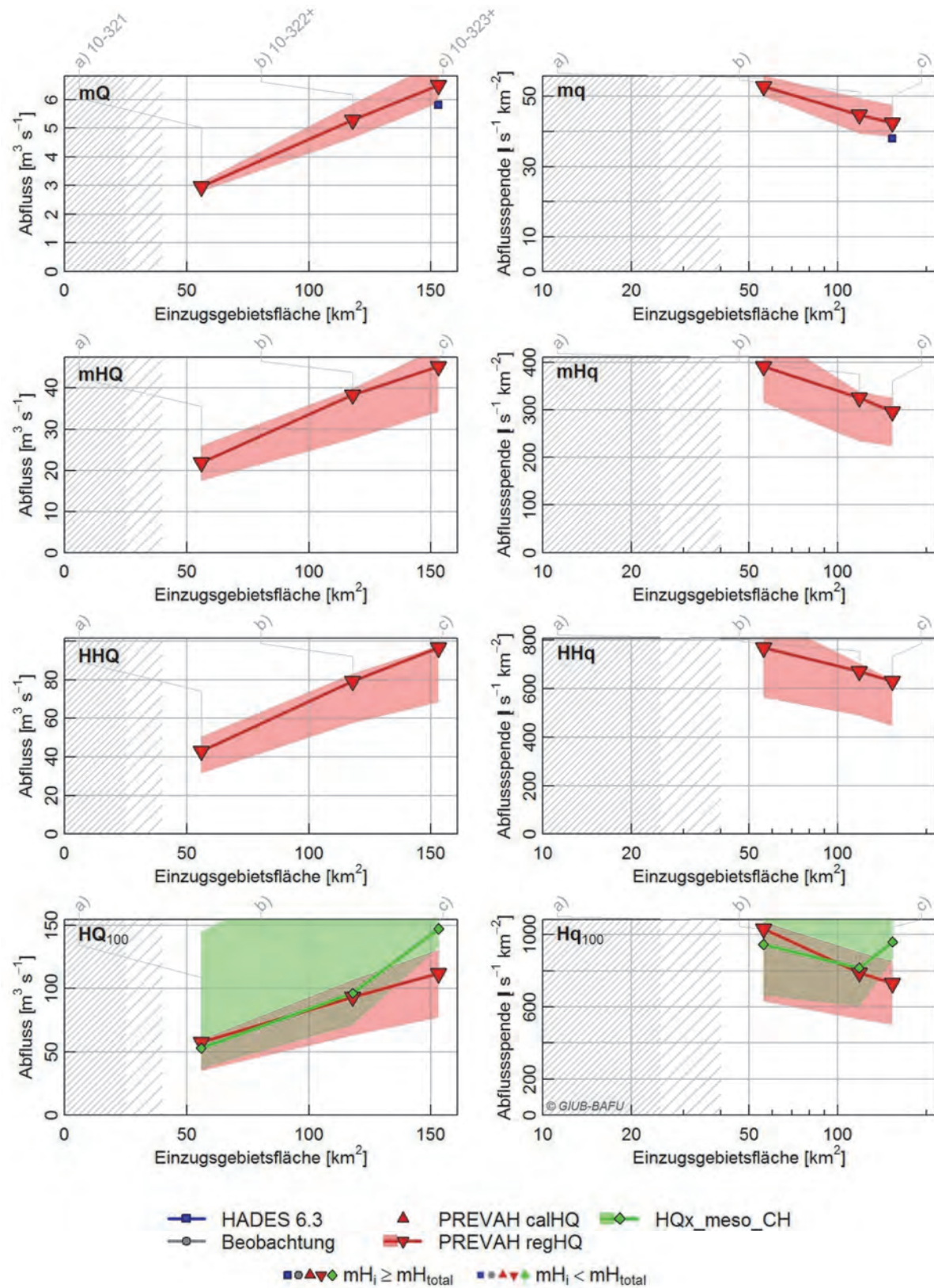


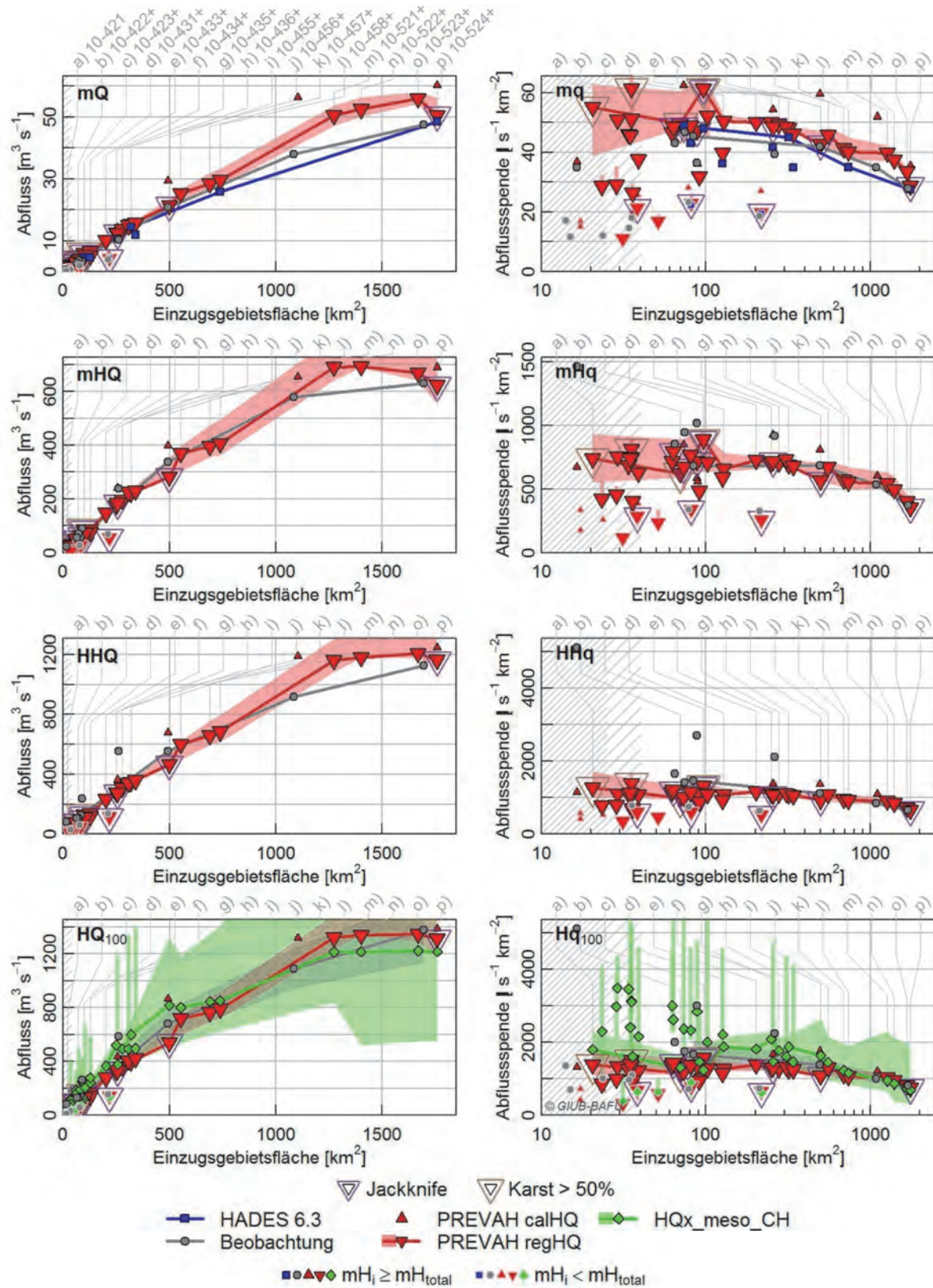


B.46 Talent

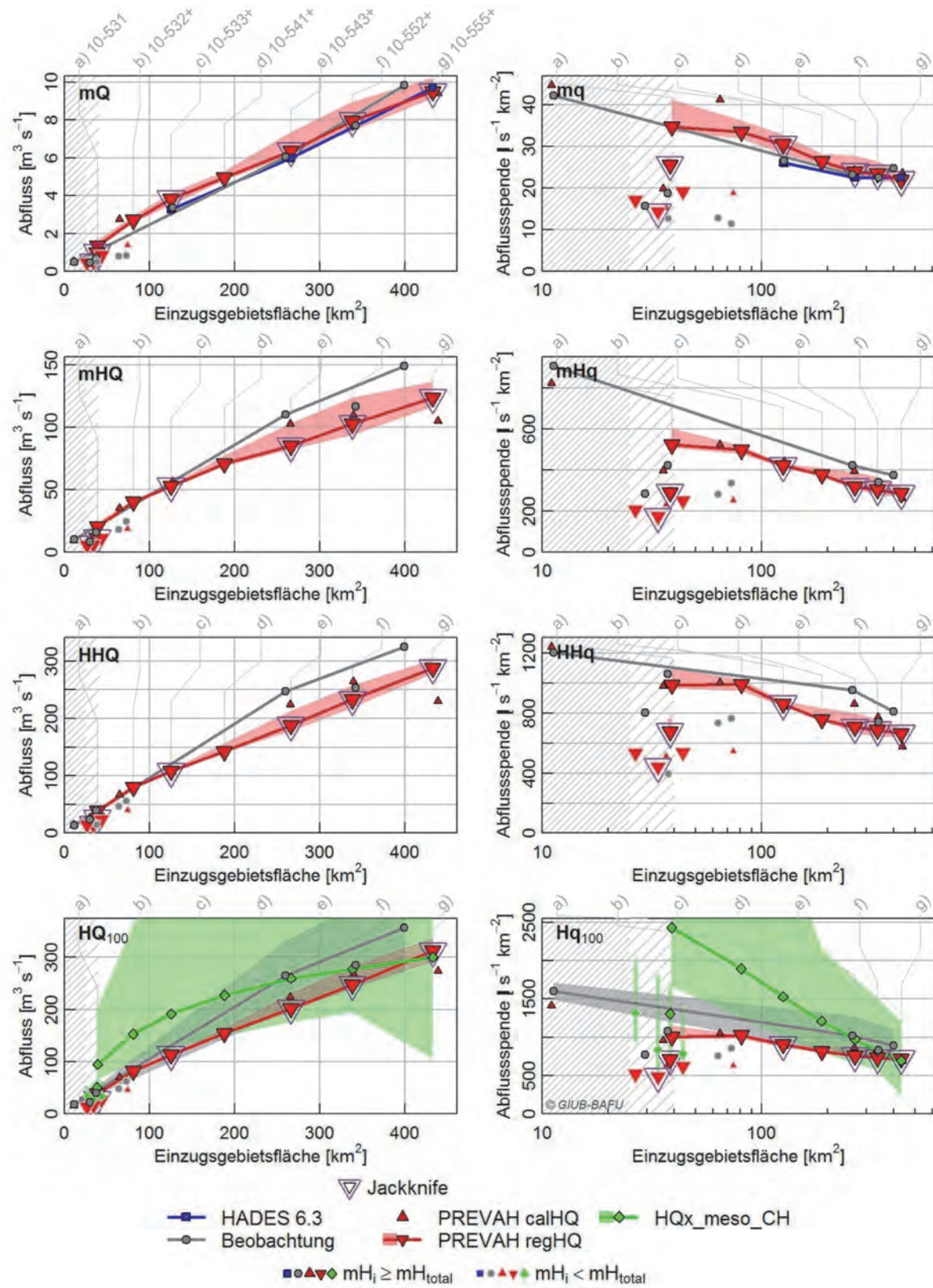


B.47 Tamina

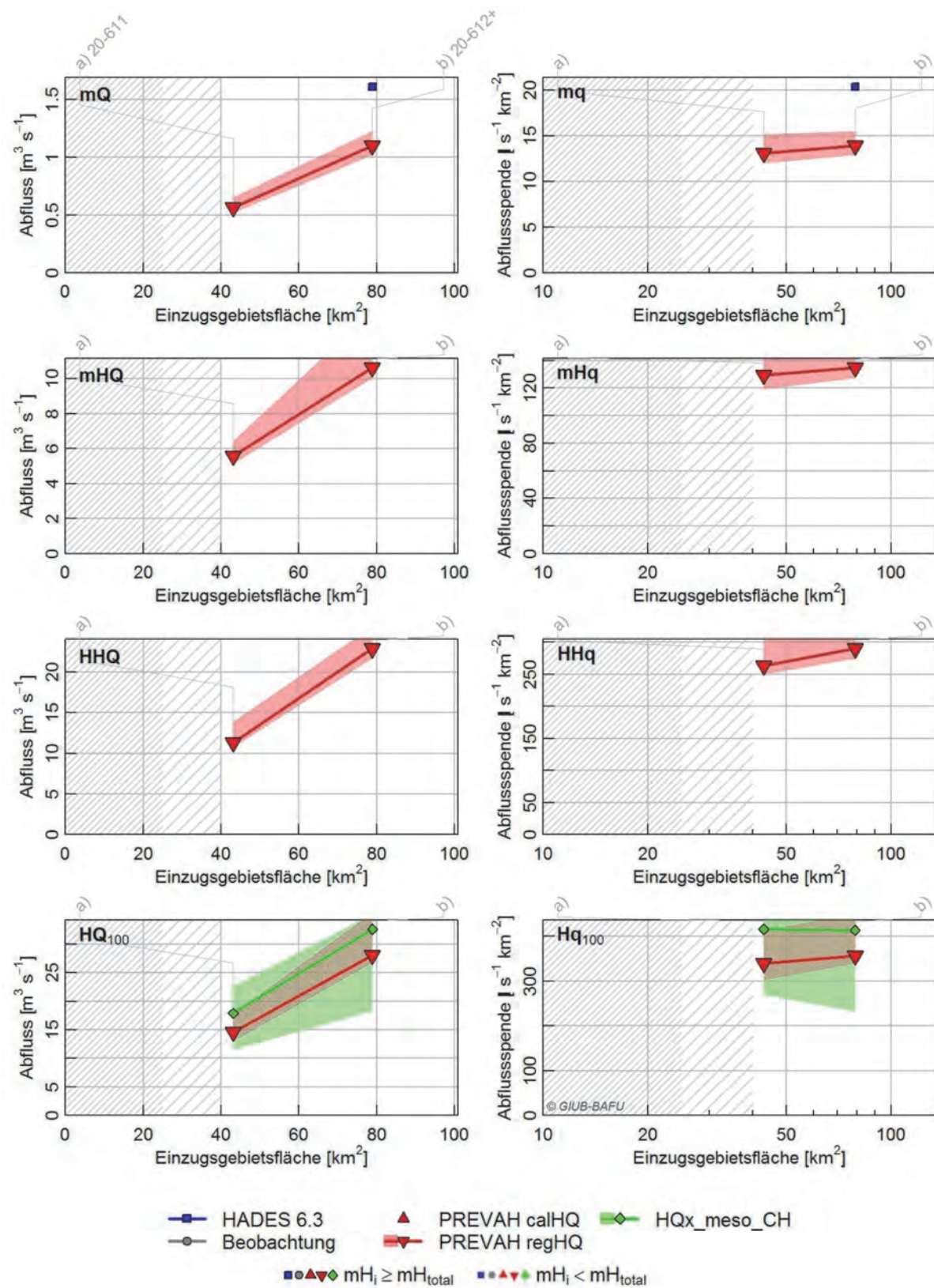




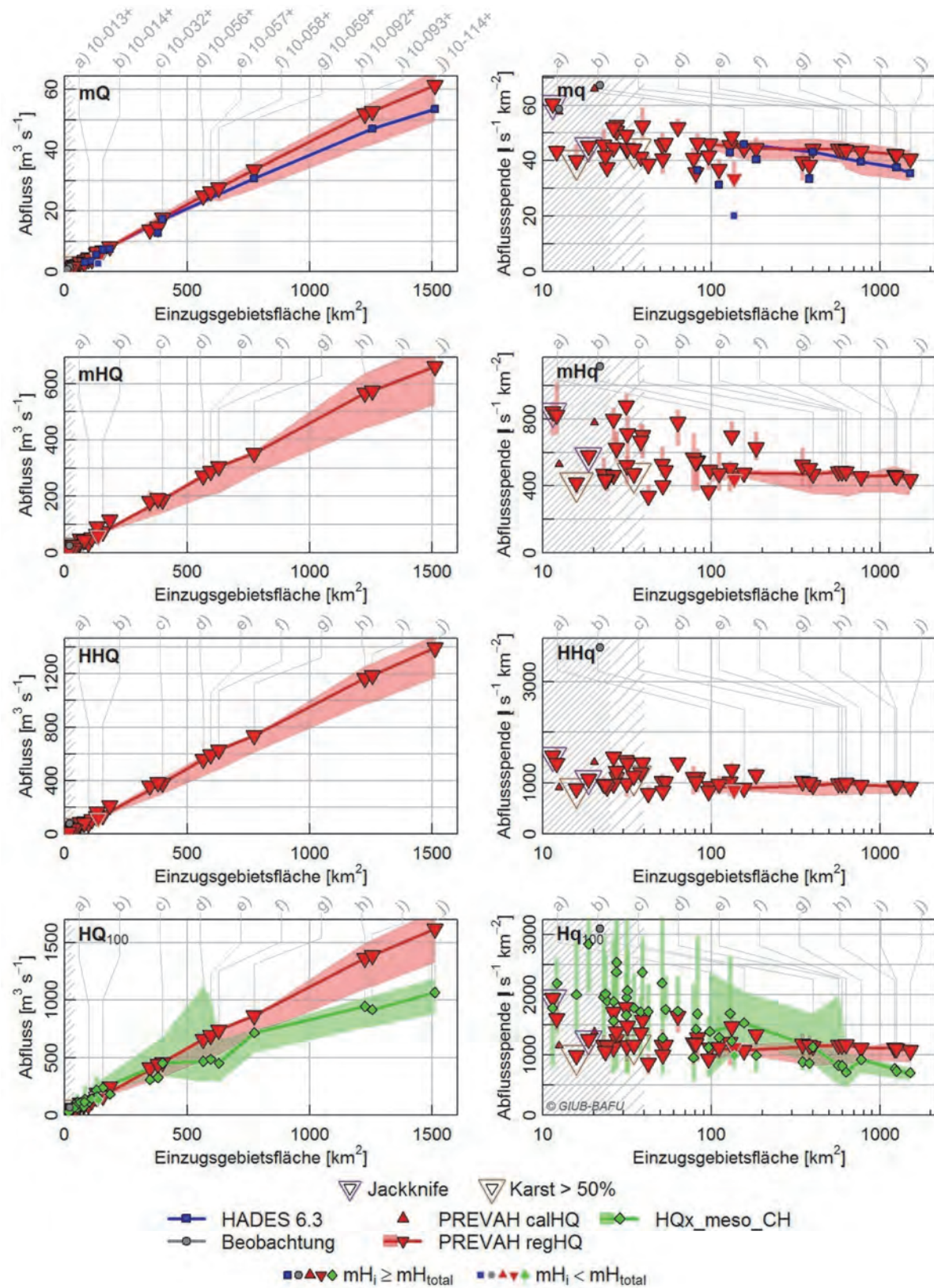
B.49 Toess

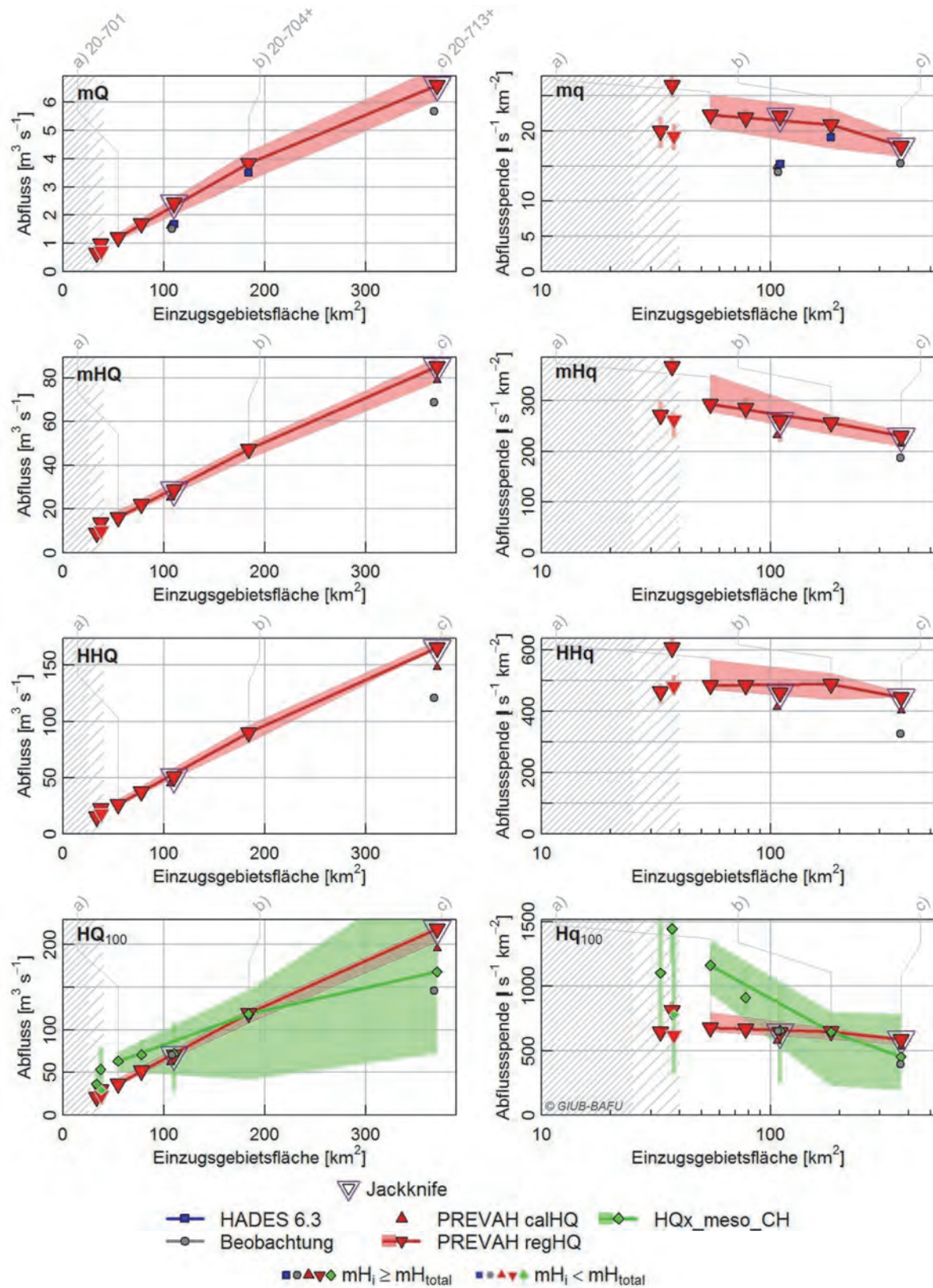


B.50 Urtenen

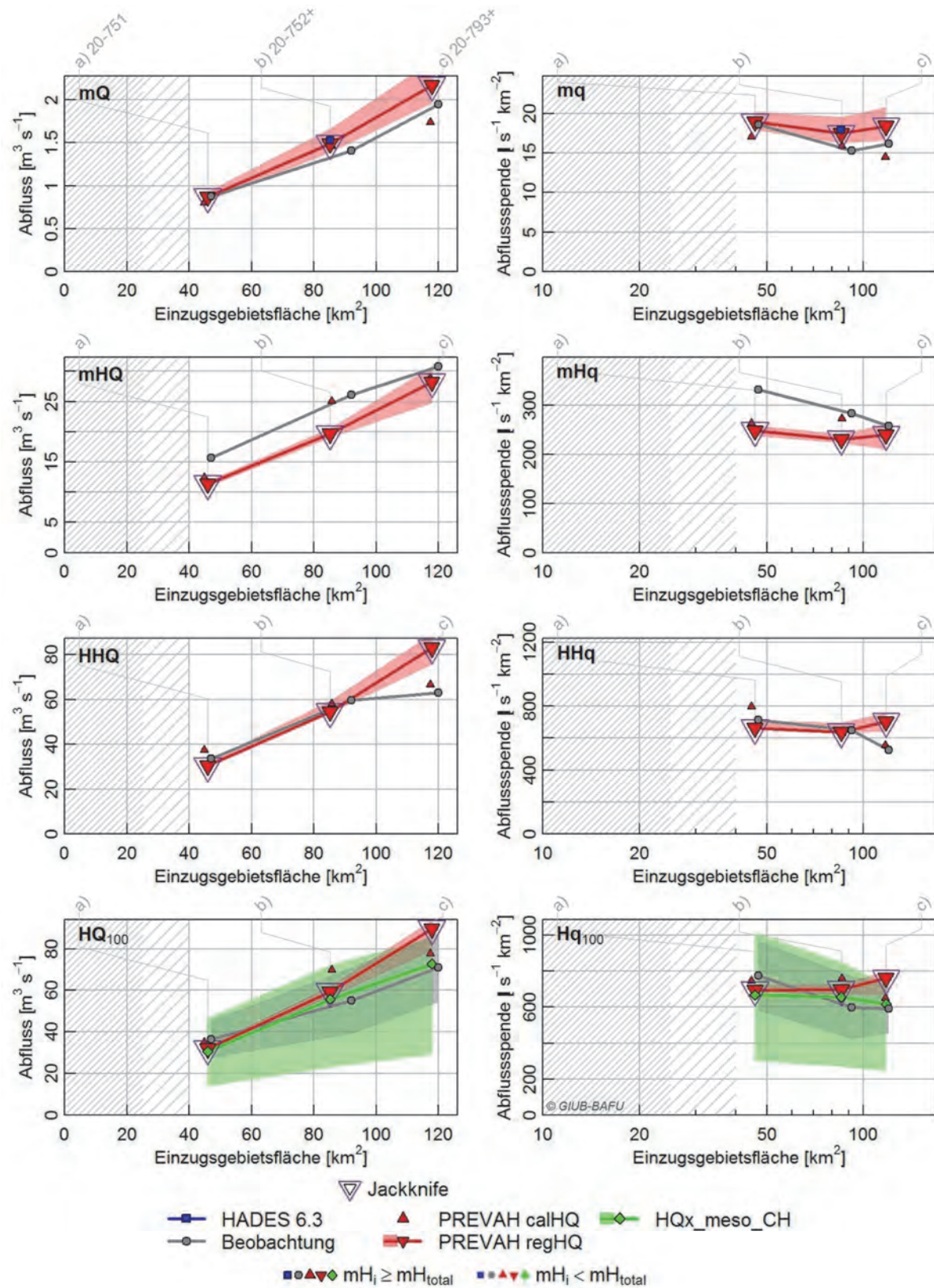


B.51 Vorderrhein





B.53 Wyna



B.54 Zulg und Rotache

