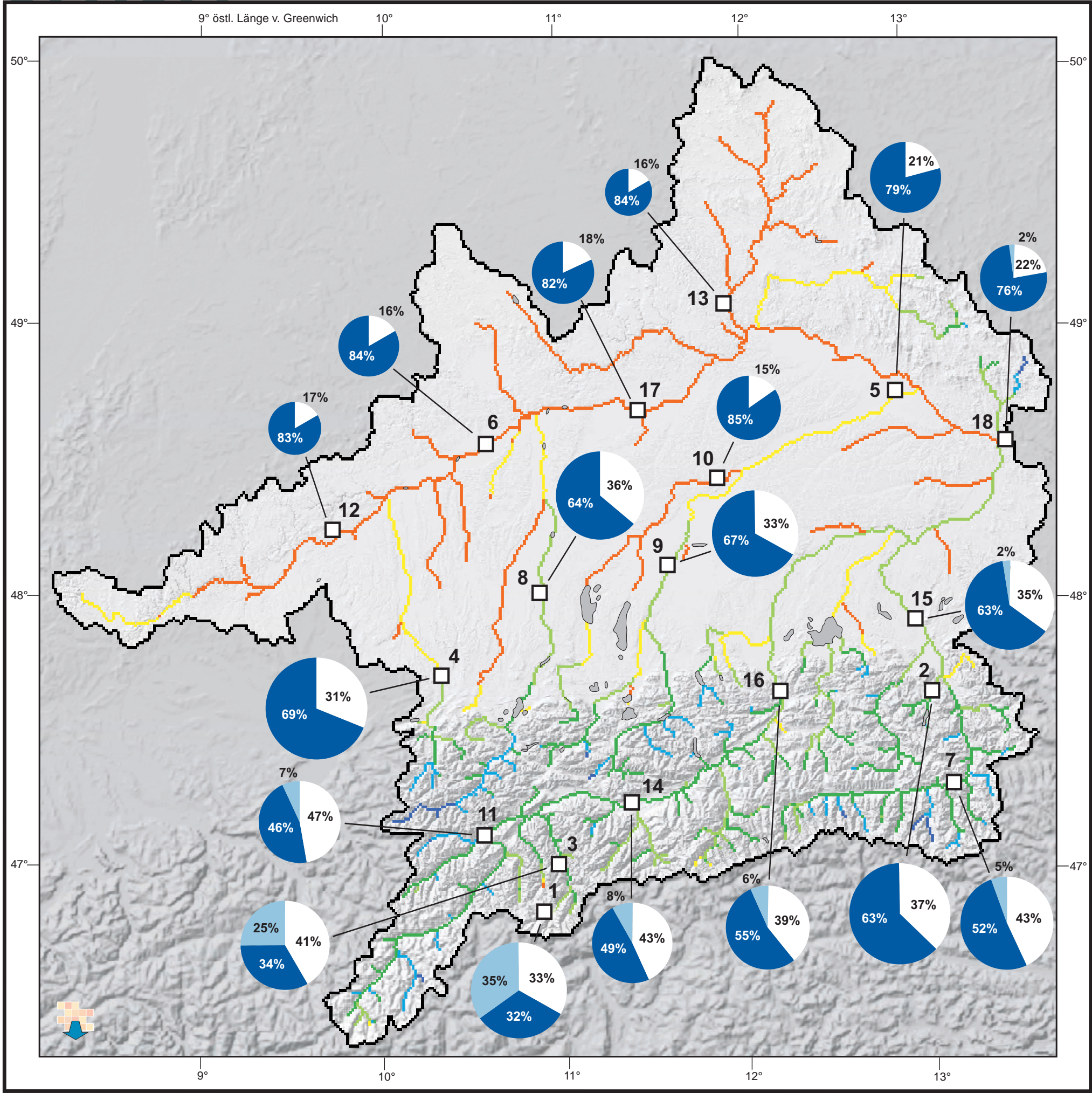


3.1.8.1



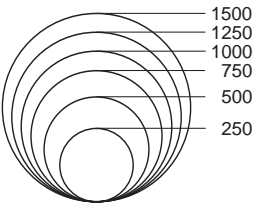
Anteil des Schneeschmelzwassers am mittleren Abfluss [%] 1991-2000



ausgewählte Pegel mit Höhen [m ü. NN]

- 1. Vent (1891)
- 2. Berchtesgaden (515)
- 3. Huben (1187)
- 4. Kempten (656)
- 5. Plattling (316)
- 6. Dillingen (415)
- 7. Wallnerau (598)
- 8. Landsberg a. Lech (582)
- 9. München (500)
- 10. Inkofen (415)
- 11. Landeck (769)
- 12. Berg (490)
- 13. Heitzenhofen (334)
- 14. Innsbruck (566)
- 15. Laufen (317)
- 16. Oberaudorf (464)
- 17. Ingolstadt (360)
- 18. Achleiten (288)

Mittlerer spezifischer Jahresabfluss [mm] und Anteil von Regen, Schnee und Gletschereis [%] am Gesamtabfluss



- Schnee
- Gletschereis
- Regen

GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU

Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

3.1.8.1 Teilprojekt Glaziologie  
Einfluss der Schneedecke auf das  
Abflussregime in der Vergangenheit

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 1.700.000

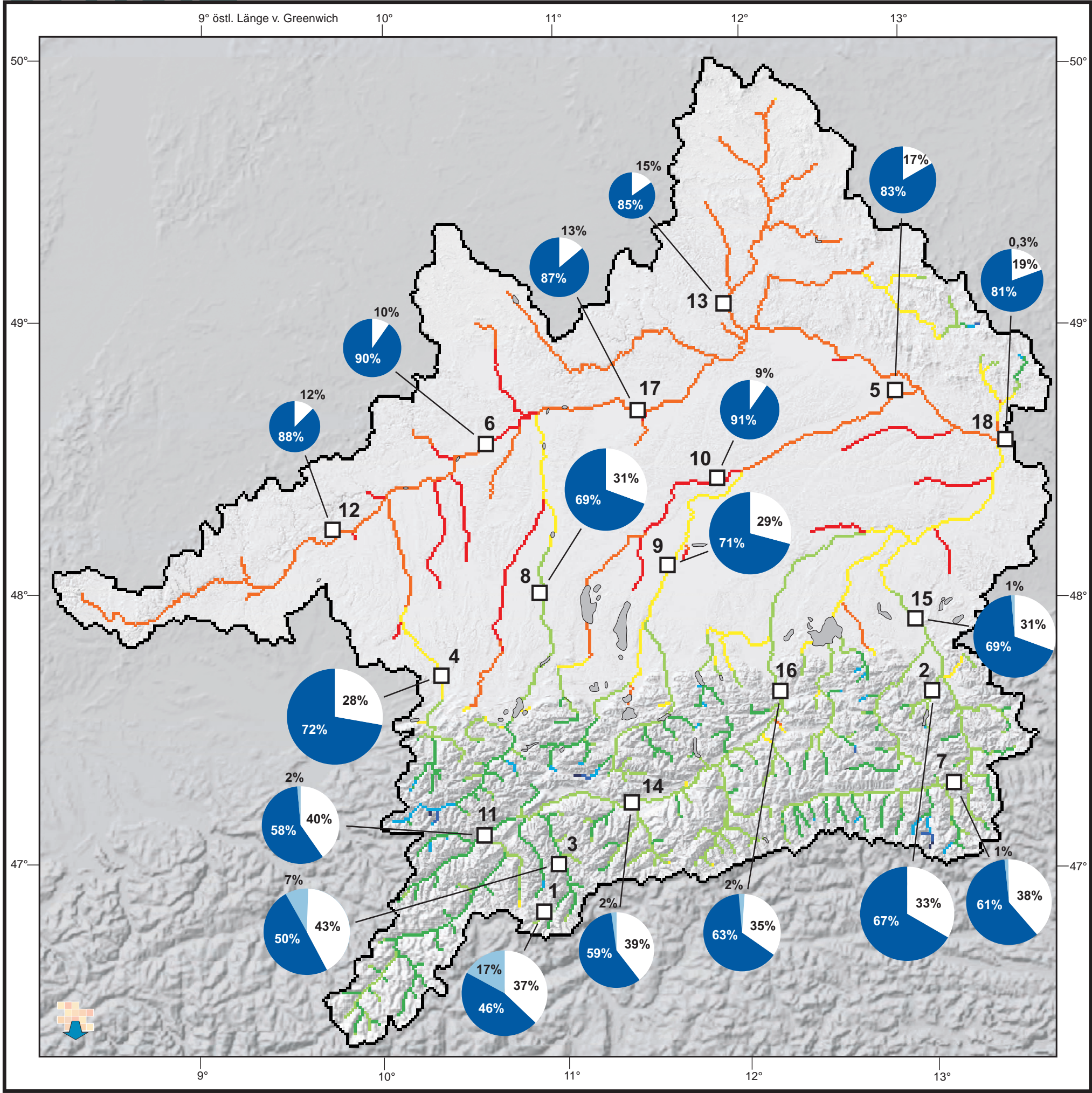
**Datengrundlage:**  
DANUBIA-DGM und daraus abgeleitetes Gewässernetz  
Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach a. Main  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, Wien

**Autoren:**  
M. Weber  
Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München  
Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck  
M. Prasch  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München

**Grafik:**  
Abt. Kartographie  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München



3.1.8.2



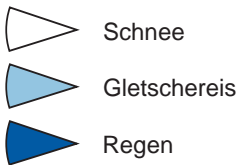
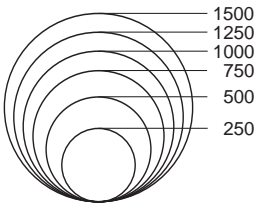
Anteil des Schneeschmelzwassers am mittleren Abfluss [%] 2031-2040



ausgewählte Pegel mit Höhen [m ü. NN]

- 1. Vent (1891)
- 2. Berchtesgaden (515)
- 3. Huben (1187)
- 4. Kempten (656)
- 5. Plattling (316)
- 6. Dillingen (415)
- 7. Wallnerau (598)
- 8. Landsberg a. Lech (582)
- 9. München (500)
- 10. Inkofen (415)
- 11. Landeck (769)
- 12. Berg (490)
- 13. Heitzenhofen (334)
- 14. Innsbruck (566)
- 15. Laufen (317)
- 16. Oberaudorf (464)
- 17. Ingolstadt (360)
- 18. Achleiten (288)

Mittlerer spezifischer Jahresabfluss [mm] und Anteil von Regen, Schnee und Gletschereis [%] am Gesamtabfluss



Die Berechnungen fanden unter dem Klimatrend REMO regional und der Klimavariante Baseline statt.

Stand: 2010

GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

3.1.8.2 Teilprojekt Glaziologie  
Einfluss der Schneedecke auf das Abflussregime in der Zukunft

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 1.700.000

Datengrundlage:  
DANUBIA-DGM und daraus abgeleitetes Gewässernetz  
Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach a. Main  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, Wien  
Ergebnisse des statistischen Klimaantriebs-Generators (siehe Kapitel S3):  
Klimatrend REMO regional, Klimavariante Baseline

Autoren:  
M. Weber  
Kommission für Glaziologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München  
Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck  
M. Prasch  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München

Grafik:  
Abt. Kartographie  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München



## 3.1.8 Teilprojekt Glaziologie - Einfluss der Schneedecke auf das Abflussregime und dessen Veränderung

### 1. Einleitung

Die saisonale Schneedecke prägt das lokale Abflussregime im Einzugsgebiet der Oberen Donau in besonderer Weise, da sich über 8% der Fläche in Höhenlagen oberhalb von 2000 m ü. NN befinden, wo die Schneedecke bis in den Frühsommer erhalten bleibt (siehe auch Kapitel 3.1.5). Die Schneedecke hält den festen Anteil am Niederschlag temporär zurück und gibt ihn mit der Schneeschmelze sukzessive wieder frei. Im Winter bedeckt sie nahezu das gesamte Einzugsgebiet, in der restlichen Jahreszeit findet Schneeakkumulation allenfalls in den obersten Höhenlagen statt. Die Schneeschmelze erfolgt großflächig und gleichzeitig im Frühjahr, so dass dann die Abflussganglinie das für ein nivales Abflussregime charakteristische breite Maximum zeigt. Mit zunehmender Höhe verschiebt sich dieses in Richtung Sommer. In vergletscherten Regionen wird das sommerliche Abflussmaximum der Schneeschmelze von der Eisschmelze überlagert, die in den Kopfeinzugsgebieten den Sommerabfluss nennenswert prägt. Ihr Anteil nimmt jedoch außerhalb des Gebirges rasch ab, wie in Kapitel 3.1.4 gezeigt wird. In den Unterläufen der Gebirgsflüsse bestimmen die Schneeakkumulation und die Schneeschmelze die saisonale Wasserführung in weit stärkerem Maße als die Gletscher. Die besonders während sommerlicher Trockenperioden wichtige Bezuschussung des Abflusses durch den gespeicherten Winterniederschlag hängt wesentlich von der Flächenausdehnung und dem Volumen der im Einzugsgebiet in dieser Zeit noch vorhandenen Schneedecke ab.

Auch über das gesamte Jahr betrachtet nimmt der Einfluss des Schneespeichers auf den Abfluss mit wachsendem Anteil am Gebietsniederschlag zu. Befinden sich im Gebiet Gletscher, muss in der Bilanz auch noch der Beitrag zum Abfluss durch die Eisschmelze berücksichtigt werden. Das Volumen des Schneespeichers ist im Bergland deutlich größer als im Flachland, denn

- im Gebirge fällt mehr Niederschlag,
- der Schneeanteil am Niederschlag steigt mit der Höhe und
- die Zeiträume mit Eis- und Schneeschmelze verkürzen sich mit der Höhe.

Damit ist das Abflussregime von Einzugsgebieten, deren überwiegender Teil im Flachland liegt, hauptsächlich von Regen, also pluvial bestimmt. Dagegen entstammt die Wasserführung der Gebirgsflüsse in höherem Maße der Schneeschmelze, das Abflussregime zeigt dort einen nivalen Charakter. Der Abfluss von Flüssen mit einer Quellregion im Gebirge kann auch nach der Schneeschmelze im Flachland noch durch die Schneeschmelzwässer aus den Bergen erhöht werden. Im Einzugsgebiet der Oberen Donau betrifft dies besonders deren Nebenflüsse Lech, Iller, Isar, bzw. Inn mit Salzach, aber auch die Zuflüsse aus dem Bayerischen Wald.

Für die quantitative Bewertung des Einflusses des Schneespeichers in Teilabschnitten des Gewässernetzes wäre eine kausale Aufteilung des Gesamtabflusses in Regen-, Schneeschmelz- und Eisschmelzabfluss wünschenswert. Während dies im Falle der Gletscherschmelze wegen deren geringerer Quantität und der direkten Einspeisung in das Gerinne mit DANUBIA relativ einfach und genau realisiert werden kann, ist der Beitrag der Schneeschmelze zum Abfluss nur näherungsweise über die Definition einer Indikatorgröße bestimmbar. Dennoch ermöglicht deren Darstellung auf dem Flusspixelnetz die zu den Gletschern analoge Visualisierung (siehe Kapitel 3.1.4) der lokalen Bedeutung des Schneespeichers für das Abflussregime in der Vergangenheit sowie ihre Veränderung in der Zukunft. In Verbindung mit den Ergebnissen zu den Gletscherabflüssen lässt sich anhand der Aufteilung der mittleren jährlichen Abflusspende aus beliebigen Teileinzugsgebieten in die Regen-, Schnee- und Eisschmelzanteile die Funktion des Gebirges als „Wasserschloss“ für das Alpenvorland auch quantitativ verdeutlichen.

### 2. Datenaufbereitung

Zur Bestimmung des Beitrags der Schneeschmelze zum Abfluss bietet sich zunächst die zur Berechnung des Anteils des Gletscherschmelzwassers analoge Vorgehensweise (siehe Kapitel 3.1.4 und Abbildung 3.1.8.1) an: man betrachtet den Unterschied im Abfluss gegenüber

einem Modelllauf mit deaktiviertem Schnee- und Eisspeicher. Das Ausblenden des Schnees lässt sich relativ einfach realisieren, indem man die Schwellentemperatur zur Differenzierung zwischen festem und flüssigem Niederschlag im Schneemodell *Snow* (siehe Kapitel 2.4.1) auf den absoluten Nullpunkt 0 K setzt. In der Folge fällt der Niederschlag im gesamten Einzugsgebiet in Form von Regen.

Abbildung 3.1.8.1 zeigt die berechneten mittleren Abflussganglinien für den Pegel Achleiten bei Passau, wie sie sich unter gleichbleibenden atmosphärischen Bedingungen ergeben, wenn in der Modellkonfiguration unterschiedliche Speicherprozesse berücksichtigt oder ausgeblendet werden. Die dunkelblaue Kurve zeigt den Abfluss, wenn der Niederschlag ausschließlich in Form von Regen fällt, im Vergleich zur schwarzen Kurve des mittleren Abflusses, der sowohl mit dem Schnee- als auch dem Eisspeicher (Gletscher) berechnet wurde. In rot ist der Abfluss ohne Eisschmelze dargestellt, die Differenz aus schwarzer und roter Kurve ergibt die isolierte Eisschmelze in hellblau. In der Zeit mit Schneedeckenaufbau (November bis März) ist der Abfluss mit Schnee niedriger, in der Zeit mit Schneeschmelze (April bis Oktober) dagegen höher als ohne Schnee. Die durch die dunkelblaue und die rote Kurve begrenzte Fläche ist somit ein gutes Maß für den relativen Beitrag der Schneeschmelze zum Abfluss.

Obwohl der Niederschlagseintrag identisch ist, unterscheiden sich die jährlichen Abflusssummen der Modellläufe mit und ohne Schnee- bzw. Eisspeicher geringfügig um bis zu 10%. Dies ist eine zwangsläufige Folge der Abflussgenese, die neben dem Eintrag durch Niederschlag und Schmelzwasser einer komplexen nichtlinearen Prozesskette im Boden und an der Oberfläche unterliegt.

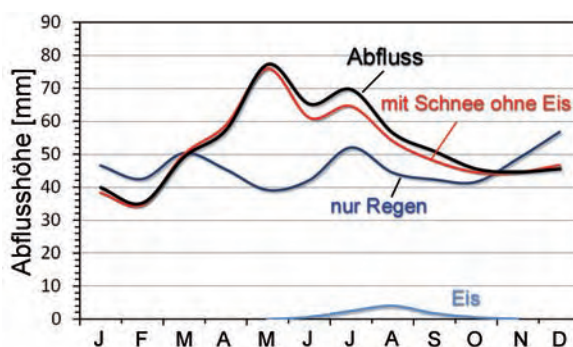


Abbildung 3.1.8.1: Mittlere monatliche Abflusshöhen am Pegel Achleiten bei Passau nach unterschiedlich konfigurierten Modellläufen für den Zeitraum 1991-2000.

Bildet man das Integral über die Beträge der Differenz aus den Modellläufen mit und ohne Schneespeicher und normiert das Ergebnis mit der Abflusssumme, erhält man mit der Indexgröße  $F_{\text{Schnee}}$  eine quantitative Maßzahl für die relative Bedeutung des Schneespeichers in der Abflussgenese. Abgesehen von den zuvor erwähnten Differenzen quantifiziert sie den Anteil der Wassermenge am Niederschlag, die den Schneespeicher durchlaufen hat. Die Berechnung von  $F_{\text{Schnee}}$  im gesamten Gerinnebereich bildet die Basis für die Darstellung in den Karten dieses Beitrags, interpretiert als prozentualer Anteil des Schneespeichers zum Jahresabfluss. In vergletscherten Kopfeinzugsgebieten ist neben der Schneeschmelze auch die Eisschmelze  $F_{\text{Eis}}$  wirksam (siehe Kapitel 3.1.4). Ihre bis zu vierfach höhere Effizienz macht sie dort mit der Schneeschmelze vergleichbar. Bei Vernachlässigung der Speicheränderungen im Boden kann die Größe

$$F_{\text{Regen}} = 100 - F_{\text{Schnee}} - F_{\text{Eis}}$$

als Beitrag des flüssigen Niederschlags (Regen) interpretiert werden. Der größte der drei Faktoren bestimmt damit den pluvialen, nivalen oder glazialen Charakter des Abflussregimes. Weiter kann anhand der Faktoren an beliebigen Pegelstellen der im zugehörigen Teileinzugsgebiet gebildete mittlere jährliche Abfluss nach seiner Herkunft (Regen, Schnee- oder Eisspeicher) aufgeteilt werden.

### 3. Darstellung der Ergebnisse

Die Karten 3.1.8.1 und 3.1.8.2 zeigen die Kartierung des zuvor erläuterten Indikators für den Anteil des Schneespeichers am Abfluss für die Dekade 1991-2000 auf der Basis von gemessenen Daten sowie für die Dekade 2031-2040, ge-

rechnet mit dem Klimaszenario *REMO regional – Baseline*. Mit einer verfahrensbedingten relativen Genauigkeit von ca. 10% entspricht dieser Index dem mittleren jährlichen prozentualen Anteil der Schneeschmelze am Abfluss.

Im Tiefland wird das Abflussregime primär durch Regen bestimmt, sichtbar an der überwiegenden Rotfärbung des Gerinnes. Von gelb über grün zu blau wächst die Bedeutung des Schneespeichers und der Anteil der Schneeschmelze am Abfluss. Zwar nimmt der nivale Charakter generell mit der Höhenlage zu, wie auch Donauzuflüsse aus dem Bayerischen Wald zeigen, er wird aber in den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten am Alpenhauptkamm von den Glazialabflüssen überlagert. Die maximale Bedeutung hat der Schneespeicher in den inneralpinen Tallagen des Inn und der Salzach, insbesondere aber am niederschlagsreichen Nordrand der Alpen in der Quellregion des Lech und der Isar. Die Fernprägung der Donauzuflüsse durch die Schneeschmelze in den Alpen ist wesentlich markanter als durch die Gletscher. Sie garantiert vor allem im Frühjahr eine überdurchschnittliche Wasserführung in den betroffenen Flussabschnitten.

Die nebenstehenden Karten wurden um Kreisdiagramme für 18 Pegel ergänzt. Sie verdeutlichen durch ihre dem spezifischen Jahresabfluss des zugehörigen Teileinzugsgebiets proportionale Fläche dessen Produktivität als Wasserquelle. Diese ist in der Regel in den inneralpinen Kopfeinzugsgebieten maximal (Pegel 1-4 und 7) und im Flachland ohne Gebirgsanbindung minimal (Pegel 12 und 13). Die Diagramme sind entsprechend der Anteile des Regen-, Schnee- oder Eisschmelzes in Segmente unterteilt. Sie zeigen, dass in hoch gelegenen vergletscherten Einzugsgebieten (z.B. Vent oder Huben) der Abfluss in etwa paritätisch aus Schneeschmelze, Eisschmelze und Regen stammt. Die maximale Bedeutung erreicht der Schneespeicher in den tieferen Lagen des Inn (z.B. Innsbruck) oder des Salzachtals. Außerhalb, z.B. in Dillingen (6), ist der Anteil des Abflusses aus Schnee im Verhältnis zu dem durch Regen relativ unbedeutend, es sei denn, der Fluss hat sein Quellgebiet in den Bergen. Ein besonders eindrückliches Beispiel für diese These zeigt das Einzugsgebiet der Amper im Alpenvorland bei München. Am Pegel Inkofen (10) beträgt der Anteil des Abflusses aus der Schneeschmelze nur 9% bei einer spezifischen Abflusshöhe von 600 mm. Dagegen zeigen die benachbarten Pegel München (9) an der Isar und Landsberg (8) am Lech mit ihrem Quellgebiet in den Alpen trotz etwas kleinerer Einzugsgebietsgrößen nicht nur deutlich mehr Abfluss, der Anteil der Schneeschmelze ist zudem mit über 30% ähnlich hoch wie in den Einzugsgebieten direkt am Alpenrand. So profitiert die Münchner Schotterebene über die Isar vom Wasser der Alpen. Aber auch am Pegel Achleiten (18) ist der Einfluss des Schnees nach der Einmündung von Isar und Inn höher als etwa in Dillingen (6), Heitzenhofen (13) oder Ingolstadt (17).

Die Darstellung des Schneeanteils am Abfluss für die Dekade 2031-2040 zeigt ähnlich wie bei den Gletschern die deutlichsten Veränderungen innerhalb der Alpen. Der starke Rückgang der Glazialabflüsse wird nur in den höchstgelegenen Kopfeinzugsgebieten teilweise durch den Schneespeicher kompensiert, dort sichtbar am Farbwechsel der hellgrünen Abschnitte nach dunkelgrün und blau. In der Regel ist jedoch auch in den höher gelegenen Einzugsgebieten eine generelle Abnahme des Schnee- zugunsten des Regenanteils zu verzeichnen. Besonders in den nordalpinen Randgebirgen und den großen Flusstälern wird der Abfluss zukünftig mehr durch den flüssigen Niederschlag als durch die Schneeschmelze bestimmt. Hier geht deren Anteil von ursprünglich örtlich über 50% auf unter 40% zurück. In der Folge wird auch die Fernwirkung der Alpenflüsse in das Alpenvorland etwas geringer. Die Donau selbst und ihre Zuflüsse aus den weniger bergigen Regionen des Einzugsgebietes ändern dagegen ihr Abflussregime nur unwesentlich, wenn auch besonders am Oberlauf ein Rückgang des Anteils der Schneeschmelze vergleichbar dem in den alpinen Einzugsgebieten erfolgt. Dort wird der Abfluss nahezu ausschließlich durch die Regenfälle bestimmt und reagiert daher vor allem auf Zu- oder Abnahme des örtlichen Niederschlags.