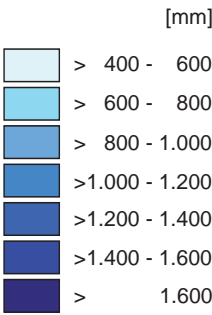
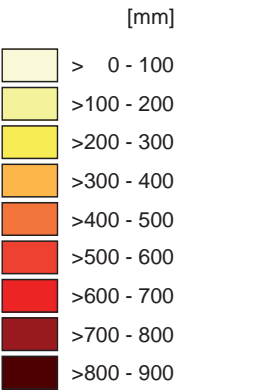


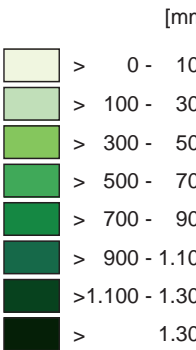
Mittlerer Niederschlag  
Karte 1a: 1971-2000  
Karte 2a: 2036-2060



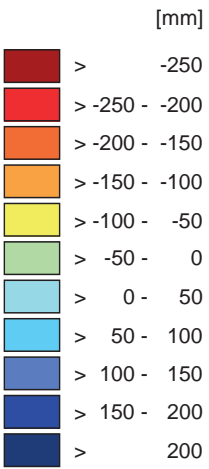
Mittlere Evapotranspiration  
Karte 1b: 1971-2000  
Karte 2b: 2036-2060



Mittlerer Abfluss  
Karte 1c: 1971-2000  
Karte 2c: 2036-2060



Niederschlagsänderung  
Karte 3a: 2036-2060  
minus 1971-2000  
Evapotranspirationsänderung  
Karte 3b: 2036-2060  
minus 1971-2000  
Abflussänderung  
Karte 3c: 2036-2060  
minus 1971-2000



## GLOBAL CHANGE ATLAS EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



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

### 3.1.1 Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung Änderung des Wasserhaushalts im Zuge des Klimawandels

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>

Maßstab: 1: 5.730.000



**Datengrundlage:**  
Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach a. Main  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, Wien  
DANUBIA-Bodenarten  
DANUBIA-Digitales Geländemodell  
DANUBIA-Landbedeckung und Landnutzung  
Ergebnisse des statistischen Klimaantriebs-Generators  
(siehe Kapitel S3): Klimatrend *REMO regional*, Klimavariante *Baseline*

**Autor:**  
F. Zabel  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München

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



# 3.1.1 Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung - Änderung des Wasserhaushalts im Zuge des Klimawandels

## 1. Einleitung

Der Wasserhaushalt eines Einzugsgebiets setzt sich aus den Elementen Niederschlag (P), Abfluss (Q) und Verdunstung (ET) zusammen. Die Wasserbilanzgleichung beschreibt deren Zusammenhänge wie folgt:

$$Q = P - ET + \Delta S$$

Für lange Zeiträume kann bei stabilem Klima davon ausgegangen werden, dass die Wasserreserven in den Speichern ( $\Delta S$ ) gleich bleiben und lediglich eine Umverteilung bei den Gliedern der Wasserbilanz erfolgt. Im Zuge des Klimawandels ist zwar mit einer Volumenänderung der Wasserspeicher zu rechnen, diese werden in diesem Artikel jedoch nicht betrachtet.

Der gefallene Niederschlag, der nicht wieder durch die Verdunstung in die Atmosphäre gelangt, fließt in einem immerwährenden "natürlichen Wasserkreislauf" dem Gelände folgend den Meeren zu. Nur dieser Teil des Wassers im "natürlichen Wasserkreislauf" steht dem Menschen für die Nutzung (z.B. für Trinkwasser- und Energiegewinnung) als Wasserdargebot zur Verfügung.

Somit charakterisiert der Wasserhaushalt die hydrologischen Eigenschaften eines Einzugsgebiets und gibt einen Überblick über die verfügbaren Wasserressourcen. Der Wasserhaushalt ist ein Resultat der gegebenen klimatischen Verhältnisse. Ändern sich diese, ändert sich auch der Wasserhaushalt eines Einzugsgebiets.

Ziel dieses Beitrags ist es deshalb, die Auswirkungen des Klimawandels an der Oberen Donau auf den Wasserhaushalt darzustellen. Dies ist für langfristige wasserwirtschaftliche Planungen von großer Bedeutung.

## 2. Wasserdargebot

Im Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 fiel im Einzugsgebiet der Oberen Donau ein mittlerer Gebietsniederschlag von 1039 mm pro Jahr (siehe Karte 1a). Die höchsten jährlichen Niederschlagsmengen sind am nördlichen Rand der Alpen sowie in den Zentralalpen zu erkennen. Deutlich fallen außerdem der Bayerische Wald im Nordosten sowie der Schwarzwald im Westen des Einzugsgebiets mit hohen Niederschlagsraten auf.

Von dem gefallenen Niederschlag verdunsteten im Gebietsmittel wiederum 388 mm/a durch die Transpiration der Vegetation, der Evaporation und der Interzeptionsverdunstung (siehe Karte 1b). Da die Verdunstung stark von der jeweiligen Landnutzung abhängig ist, verhält sie sich räumlich heterogen. Man erkennt in Karte 1b einen Höhengradienten der Verdunstung, da diese stark durch die Temperatur gesteuert wird. Bewaldete Flächen in niedriger Geländehöhe (z.B. Hofoldinger Forst, südlich von München) zeigen im Jahresmittel die höchsten Verdunstungsraten.

Bilanziert ergibt sich somit für die Vergangenheit ein Wasserdargebot von 651 mm/a im Mittel über das gesamte Einzugsgebiet (siehe Karte 1c). Eine räumlich differenzierte Betrachtung des Wasserdargebots der Vergangenheit von 1971-2000 zeigt eine sehr ungleiche Verteilung. Der südliche Teil des Einzugsgebiets (südlich von 48° N) und der Bayerische Wald sind Gebiete mit großem Wasserüberschuss. Der nördliche Teil des Einzugsgebiets (nördlich von 48° N) erhält erkennbar weniger Niederschlag und zeigt zugleich höhere Verdunstungsraten. Dies führt dazu, dass dort deutlich weniger Wasser zum Abfluss gelangt.

In Zukunft wird sich das Zusammenspiel der Elemente des Wasserhaushalts ändern. Veränderungen im Klima wirken sich direkt auf den Wasserhaushalt aus. Für eine detaillierte Szenarienanalyse wurde der Klimatrend *REMO regional* mit der Klimavariante *Baseline* (siehe Kapitel S1-S4) gewählt. In diesem GLOWA-Danube Klimaszenario fallen im Einzugsgebiet der Oberen Donau für die zweite Hälfte des Szenariozeitraums von 2036 bis 2060 im Mittel noch 984 mm Niederschlag pro Jahr. Davon verdunsteten im Gebietsmittel 435 mm. Somit gelangen noch 548 mm pro Jahr zum Abfluss (siehe Karten 2a-c). Für eine bessere Darstellung der räumlichen Änderungen des Wasserhaushalts zeigen die Karten 3a-c die Änderung der Wasserbilanz von 2036-2060 im Vergleich zu 1971-2000 als Differenz. Im gesamten Einzugsgebiet der Oberen Donau reduziert sich das Wasserdargebot im Mittel um 102 mm, verursacht durch eine Reduzierung des Gebiets-

niederschlags um 55 mm und eine Erhöhung der Gebietsverdunstung um 47 mm.

Die größten Änderungen im Wasserhaushalt sind deutlich am nördlichen Alpenrand zu erkennen. Hier wird eine erhebliche Verringerung des Wasserdargebots um bis zu 400 mm verzeichnet (siehe Karte 3c). Nicht nur die Reduktion der Niederschläge fällt hier am größten aus, auch steigt im Alpenvorland die Verdunstung der Wälder deutlich an, während die Verdunstungsmengen im Norden des Einzugsgebiets leicht zurückgehen (siehe Kapitel 3.1.6). Im Norden fällt in Zukunft zwar etwas weniger Niederschlag, durch den Rückgang der Verdunstung wird eine Verringerung des Wasserdargebots jedoch gedämpft.

## 3. Abfluss

Das zum Abfluss kommende Wasser verlässt am Gebietsauslass in Achleiten das Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Abbildung 3.1.1.1 zeigt auf der linken Seite den am Pegel Achleiten gemessenen mittleren jährlichen Abfluss (MQ) von 1971-2000. Der MQ beträgt für den vergangenen Zeitraum 1418 m³/s. Auf der rechten Seite von Abbildung 3.1.1.1 ist die zeitliche Entwicklung des Abflusses für alle vier Klimatrends, jeweils als Mittel der vier dazugehörigen Klimavarianten aus dem statistischen Klimaantriebs-Generator dargestellt. Der Schwankungsbereich zwischen den Minima und Maxima aller 16 GLOWA-Danube Klimaszenarien ist grau hinterlegt.

Für alle gemittelten Klimavarianten eines Klimatrends zeigt Abbildung 3.1.1.1 einen negativen Trend des Abflusses am Pegel Achleiten im Szenarienzeitraum von 2011-2060. Der Rückgang aus dem linearen Trend der gemittelten Klimavarianten liegt in diesem Zeitraum zwischen 60 m³/s (Klimatrend *IPCC regional*) und 370 m³/s (Klimatrend *Fortschreibung*). Der Klimatrend *REMO regional* zeigt einen Rückgang um 189 m³/s.

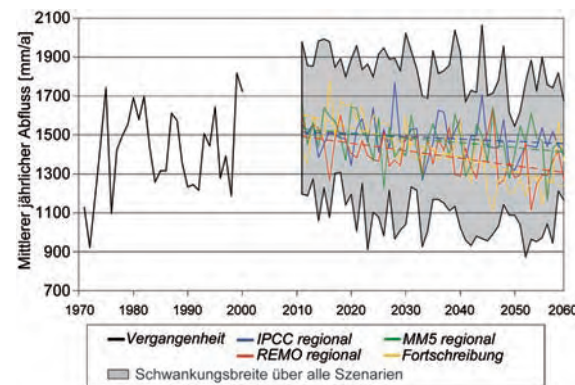


Abbildung 3.1.1.1: Zeitliche Entwicklung des Abflusses (MQ) für den Referenzzeitraum (1971-2000) sowie für die verwendeten GLOWA-Danube Klimaszenarien (2011-2060). Dargestellt sind mittlere Jahreswerte, jeweils gemittelt über die vier statistischen Klimavarianten eines Klimatrends; die gestrichelten Linien stellen lineare Trendgeraden dar.

Abbildung 3.1.1.2 zeigt, analog zu Abbildung 3.1.1.1, die Entwicklung des mittleren Abflusses in Achleiten auf der Grundlage der skalierten und biaskorrigierten Ergebnisse der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* (siehe Kapitel S1 und S5). Diese zeigen für den vergangenen Zeitraum von 1971-2000 einen mittleren Abfluss, der mit 1450 m³/s in einer ähnlichen Größenordnung liegt, wie die Messung am Pegel Achleiten.

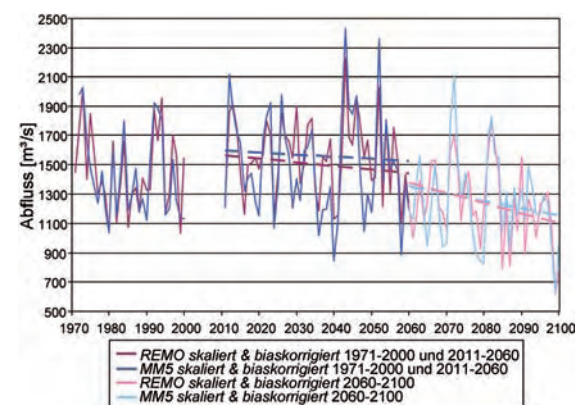


Abbildung 3.1.1.2: Mittlerer jährlicher Abfluss (MQ) am Pegel Achleiten unter Verwendung der Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert*.

Für den Szenariozeitraum bis 2060 zeigt der mit Ergebnissen der skalierten und biaskorrigierten regionalen Klimamodelle simulierte Trend der mittleren jährlichen Abflüsse ebenfalls eine Abnahme sowohl für *REMO skaliert & biaskorrigiert*

als auch für *MM5 skaliert & biaskorrigiert*. Da die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle bis 2100 vorliegen, wurde der Verlauf des mittleren Abflusses bis 2100 ergänzt. Man erkennt ein deutliches Abfallen des jährlichen Abflusses ab 2060, das bedingt ist durch den Antrieb der regionalen Klimamodelle mit dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Simulation A1B, Member 1). Zwischen 2011 und 2100 reduziert sich der Abfluss in Achleiten für die Klimavariante *REMO skaliert & biaskorrigiert* um 560 m³/s bzw. für die Klimavariante *MM5 skaliert & biaskorrigiert* um 450 m³/s.

Neben der jährlichen Betrachtung des Abflusses ergibt die Analyse des Abflussregimes wichtige Aussagen zur Entwicklung des Wasserdargebots. Abbildung 3.1.1.3 zeigt die Entwicklung der mittleren monatlichen Abflüsse für jede Dekade zwischen 1961 und 2000 sowie zwischen 2012 und 2060. Als Datengrundlage diente auch hier der Klimatrend *REMO regional* mit der Klimavariante *Baseline*.

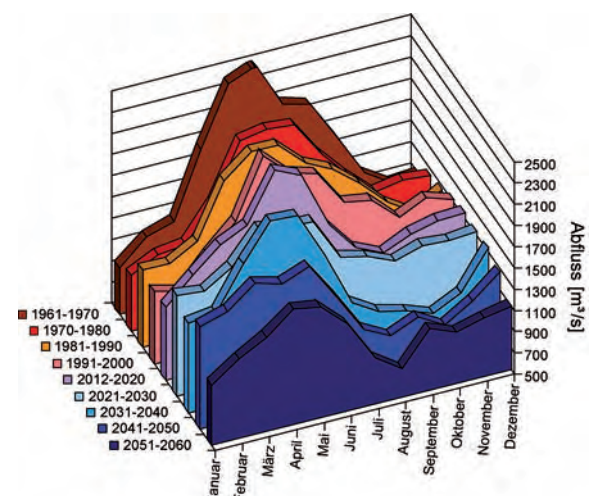


Abbildung 3.1.1.3: Dekadenmittelwerte des mittleren monatlichen Abflusses am Pegel Achleiten, ab 2012 Dekadenmittelwerte für das GLOWA-Danube Klimaszenario *REMO regional - Baseline*.

Es ist ein deutlicher und allmählicher Wechsel des Abflussregimes feststellbar. Bisher erreichten die mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Achleiten bedingt durch sommerliche Niederschläge und Schneeschmelze in den Alpen in den Sommermonaten ihr Maximum. In den Wintermonaten waren die geringsten mittleren Abflüsse zu verzeichnen. Bereits in der modellierten Vergangenheit ist eine Verschiebung des jährlichen Maximums der mittleren monatlichen Abflüsse in Richtung Frühjahr feststellbar. Bis 2060 setzt sich dieser Trend bei gleichzeitiger, stetiger Reduzierung der mittleren monatlichen Abflüsse fort. Lediglich in den Wintermonaten der Dekaden 2021 - 2050 erhöht sich der mittlere monatliche Abfluss noch einmal. Das jährliche Minimum verlagert sich von den Wintermonaten in den August. Der mittlere Abfluss reduziert sich im August von 2023 m³/s (1971-1980) auf 767 m³/s (2051-2060).

## 4. Fazit

Das Wasserdargebot wird sich in Zukunft im Einzugsgebiet der Oberen Donau je nach gewähltem Klimaszenario deutlich reduzieren. Der Süden des Einzugsgebiets hat mit einer drastischen Reduzierung des Wasserdargebots zu rechnen. Im Norden des Einzugsgebiets nimmt der Abfluss auf niedrigem Niveau nur geringfügig ab.

Die Ergebnisse der skalierten und biaskorrigierten regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* eignen sich nur bedingt für Aussagen, die den Simulationszeitraum bis 2060 betreffen. Sie zeigen zwar einen Rückgang des mittleren Abflusses bis 2060, danach aber eine abrupte Reduzierung, die bedingt ist durch den Antrieb der regionalen Klimamodelle mit dem globalen Klimamodell ECHAM5.

Die über alle Klimavarianten gemittelten Klimatrends des statistischen Klimaantriebs-Generators weisen eine Verringerung des mittleren Abflusses am Pegel Achleiten von 2011-2060 zwischen 60 und 370 m³/s auf. Mit der allgemeinen Reduzierung des Wasserdargebots geht eine gravierende Änderung im Abflussregime am Pegel Achleiten einher. Die höchsten monatlichen Pegelabflüsse verlagern sich während des Szenariozeitraums von den Sommermonaten in das Frühjahr.