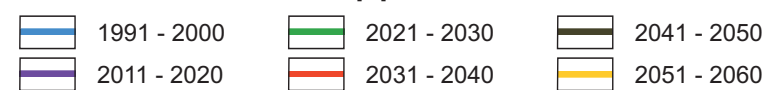


Legende:

Mittlerer Abfluss [m³/s]



Anteil der Eisschmelze am Abfluss [%]



Abbildungen 3.1.4.1 - 3.1.4.10: Mittlere Monatsmittel des Abflusses [m³/s] und relativer Anteil des Eisschmelzwassers [%] für Teileinzugsgebiete der Oberen Donau unter dem Klimatrend *REMO regional* und der Klimavariante *Baseline* (Quelle: Modellierung mit Ergebnissen aus dem statistischen Klimaerwärmungs-Generator).

3.1.4 Teilprojekt Glaziologie - Einfluss der Gletscher auf das Abflussregime und dessen Veränderung

1. Einleitung

Die Alpen werden vielfach als das „Wasserschloss“ Europas bezeichnet, denn sie prägen im Umland das Abflussregime derjenigen Flussläufe, die dort ihre Quellregion haben, und sorgen für eine zuverlässige und ausgeglichene Wasserführung. Das Wasser stammt einerseits aus dem in den Bergen erhöhten Niederschlagsangebot, andererseits speichern die Schneedecke und die Gletscher festen Niederschlag kurz- bzw. langfristig. Durch die Schmelzwasserabgabe bei hohem Energieangebot sorgen Schneedecke und Gletscher für eine Umverteilung der Abflusspende in niederschlagsarme Zeiträume mit ansonsten niedrigeren Pegelständen. Dieser als „Kompensationseffekt“ (Röthlisberger & Lang, 1987) bezeichnete Ausgleich hängt in seiner Wirksamkeit vom Anteil des Gebirges an der Gesamtläche des Einzugsgebietes, aber auch von den Anteilen an schmelzenden Oberflächen ab. Im Einzugsgebiet der Oberen Donau sind 29% der Fläche den Alpen zuzuordnen, während die Vergletscherung bei 0,5 % liegt. Den Gletschern als sehr effizienten Schmelzwasserlieferanten wird dabei eine besondere Rolle zugesprochen. Sie beinhalten eine beträchtliche Wasserressource (siehe dazu auch Kapitel 1.8), die in Phasen mit Gletscherschwund den Gebietsabfluss mit einer Gletscherspende bezuschusst, die dem Verlust an Gletschereis entspricht. Aber auch bei stagnierenden oder wachsenden Gletschern stammt ein Teil des Wassers in den Gebirgsflüssen vom Gletschereis. Am Unterlauf des Inn ist das Gletscherwasser anhand seiner charakteristischen Grünfärbung sogar visuell erkennbar, dessen Menge kann anhand von Abflussmessungen jedoch bestenfalls in den Kopfeinzugsgebieten abgeschätzt werden. Weiter flussabwärts waren quantitative Angaben zum Einfluss der Gletscher auf die Wasserführung bislang rein spekulativ bzw. beschränkten sich auf die oben erwähnte Gletscherspende (Baumgartner et al., 1983). Zur Frage, wie viel Wasser im Gerinne von Gletschern stammt, liefert DANUBIA für die Obere Donau und ihre alpinen Hauptzuflüsse Iller, Lech, Inn und Salzach neue Erkenntnisse.

Saisonal folgt der Abfluss eines Einzugsgebietes nicht allein dem aktuellen Niederschlagsangebot, sondern hängt auch von der periodischen Änderung des vorhandenen Speichervolumens ab (z.B. Schneedecke, Gletscher, Grundwasser, Speicherseen). Jeder dieser Speicher prägt in charakteristischer Weise den Abflusshydrographen eines Pegels. Der Auf- und Abbau des Schneespeichers verleiht ihm beispielsweise einen asymmetrischen dreiecksförmigen Verlauf mit einem markanten Maximum im Frühjahr zum Zeitpunkt der großräumigen Schneeschmelze in den tieferen Lagen, wie ihn typischerweise der Hydrograph von Kempten zeigt (siehe Abbildung 3.1.4.2). Im Gebirge schmilzt der Schnee über den Sommer selbst in den Hochlagen und liefert somit auch während sommerlicher Trockenperioden eine Abflusspende. Das vordergründige Kennzeichen eines nival geprägten Abflussregimes ist jedoch das Maximum im Frühjahr. Zur Veranschaulichung können in den Abbildungen 3.1.4.1 bis 3.1.4.10 die Darstellungen der Monatsmittelwerte des mittleren Abflusses in der Dekade 1991-2000 (hellblau) herangezogen werden. Mit Ausnahme der vergletscherten Kopfeinzugsgebiete (z.B. Vent, Huben) prägt somit im gesamten Einzugsgebiet der Oberen Donau der Schneespeicher den Abfluss.

Der Abfluss von den Gletschern erreicht dagegen sein Maximum in den Hochsommermonaten Juli und August, wenn große Bereiche der Eisflächen aper sind und immer noch ein hohes solares Strahlungsangebot verfügbar ist. Da die Eisschmelze wegen der bis zu vierfachen Strahlungsabsorption der Schneeoberfläche effizienter ist, ist das Abflussmaximum in der Regel höher. Ein glazial geprägtes Abflussregime zeigt daher einen symmetrischen Jahresgang mit hohen Abflüssen im Sommer und niedrigen im Winter (z.B. bei den Pegeln Vent und Huben, siehe Abbildungen 3.1.4.3 und 3.1.4.4). Die Höhe des Abflussmaximums im Verhältnis zum Minimum wird durch den Anteil von Eisschmelzwasser im Abfluss bestimmt, der sich mit wachsender Entfernung von der Quelle bzw. mit zunehmender Ein-

zugsgebietsgröße und damit abnehmendem Vergletscherungsanteil reduziert.

Bei dem derzeit anhaltenden Gletscherschwund kann die Eisschmelze als Zuschuss zum Gebietsniederschlag angesehen werden, da sie aus den langfristig angelegten Eisreserven der Gletscher stammt und direkt ins Gerinne abgegeben wird. Diese zusätzliche Gletscherspende korreliert mit der Ausdehnung der aperen Eisfläche und wird daher in der Zukunft bei schrumpfenden Eismassen und weiterer Erwärmung allmählich abnehmen (siehe Abbildung 3.1.4.11). Damit ist ein Übergang des glazialen Abflusshydrographen in den stark vergletscherten Einzugsgebieten zu einem mit nivo-pluvialer Prägung, d.h. durch Schneeschmelze und Regen charakterisierten Abflussverlauf zu erwarten.

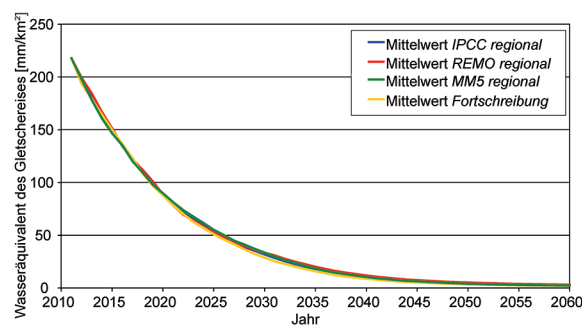


Abbildung 3.1.4.11: Veränderung des Wasseräquivalents der potentiellen Eisreserve im Einzugsgebiet der Oberen Donau am Pegel Achleiten. Gezeigt sind jeweils die vier gemittelten statistischen Klimavarianten eines Klimatrends.

Ob das Ausbleiben des Gletscherwassers auch zu einem nennenswerten Rückgang des Abflusses in den Teileinzugsgebieten führt, hängt von dessen Beitrag an der Abflussgenese ab. Der Anteil an der Abflusspende nimmt mit zunehmender Entfernung von den Gletschern ab und bildet zunächst nivo-glaziale Mischformen des Abflussregimes aus, die durch ein zweites hochsommerliches Maximum des Hydrographen durch die Eisschmelze neben dem der Schneeschmelze im Frühjahr charakterisiert sind (siehe Abbildungen 3.1.2.5 bis 3.1.2.8). Die Ausprägung und Höhe dieses sekundären Maximums wird maßgeblich durch den Anteil des Gletscherwassers in den Sommermonaten bestimmt.

Pegel größerer Teileinzugsgebiete zeigen in der Regel Überlagerungen der Anteile aus der Schneedecke, den Gletschern und dem Niederschlag. So weisen z.B. fast alle Pegel des Inn oder der Salzach ein zweites Abflussmaximum im Zeitraum Juni bis September auf, das sowohl auf die Eisschmelze, aber auch auf eine verstärkte konvektive Niederschlagsaktivität in den Bergen oder beides hinweisen könnte. Die Kenntnis über den monatlichen Anteil der Gletscherschmelze am Abfluss ist bei der Analyse sehr hilfreich.

Dem Kompensationseffekt durch die Schnee- und Eisschmelze im Gebirge wird bislang eine hohe Bedeutung zugesprochen. Er reicht über die Zubringer weit in das umliegende Tiefland und die Hauptflüsse und dämpft dort die Variabilität der Sommerabflüsse. Sein Einfluss steigt zusätzlich mit der Aridität des Klimas (Viviroli et al., 2003). Das Einzugsgebiet der Oberen Donau ist jedoch durch ein humides Klima gekennzeichnet, so dass die Wasserführung der Donau bis zur Einmündung des Inn über die Zuflüsse aus dem Gebirge nur gering beeinflusst wird. Dennoch zeigen sich erhebliche Unterschiede der saisonalen Wasserführung in Flussabschnitten, die an das „Wasserschloss“ Alpen angebunden sind und solchen, die ihre Quellregionen ausschließlich im Flachland haben. Der Pegel Heitzenhofen an der Naab (siehe Abbildung 3.1.4.1) beispielsweise zeigt in den Sommermonaten Juli und August einen signifikant niedrigen Wasserstand, der an den Pegelstellen mit Zufluss aus dem Gebirge nicht auftritt.

Der vorliegende Beitrag untersucht anhand der Modellierung mit DANUBIA und dem Gletschermodell *Surges* (siehe Kapitel 2.4.2) die Frage nach dem gegenwärtig noch vorhandenen Potential der Alpengletscher bei der Abflussgenese in Relation zu den weiteren wirksamen Prozessen wie Niederschlagseintrag und Schneedeckenspeicher. Weiterhin werden exemplarisch die lokalen saisonalen Unterschiede des Abflussre-

gimes und dessen zukünftige Veränderungen unter den Bedingungen des Klimatrends *REMO regional* und der Klimavariante *Baseline* demonstriert (siehe Karte 3.1.4.2 und Abbildungen 3.1.4.1-3.1.4.10). Das gewählte Klimaszenario ist neben einer erheblichen Zunahme des mittleren Temperaturniveaus gleichzeitig durch eine deutliche Abnahme der Sommerniederschläge gekennzeichnet, was merkliche Auswirkungen auf die Hydrologie mit sich bringt (siehe Kapitel S1 bis S4).

2. Datenaufbereitung

Die Separation des Anteils am Abfluss, der seinen Ursprung in der Eisschmelze hat, ist anhand von Beobachtungsdaten nicht möglich. Die Beträge konnten bislang anhand der wenigen verfügbaren Messdaten zu den Massenverlusten und Abflüssen der Gletscher allenfalls grob abgeschätzt werden. Das gekoppelte hydrologische Modell in DANUBIA ermöglicht dagegen ab einer Teileinzugsgebietsgröße von 100 km² eine sehr detaillierte Berechnung der Abflüsse im Gerinne. Das Gletschermodell *Surges* übergibt das von den einzelnen Gletscherflächen berechnete Schmelzwasser unmittelbar an das Gerinnesystem, wo es den im Modell berücksichtigten Prozessen der Abflussbildung unterworfen ist. Die momentane Eisschmelzwassermenge an einem beliebigen Pegel im Gewässernetz ergibt sich als Differenz des in einem Modelllauf mit Gletschereis berechneten Abflusses und dem in einem zweiten Lauf ohne Gletschereis berechneten. Das Verhältnis dieser Differenz zum Gesamt-abfluss ist ein Maß für die aktuelle Bedeutung der oberhalb befindlichen Gletscherareale für den betrachteten Flussabschnitt.

Zur Bereitstellung der Daten wurde für sämtliche verfügbaren Klimavarianten der GLOWA-Danube Klimaszenarien jeweils ein gekoppelter Modelllauf mit und ein Referenzlauf ohne Gletschereis über die Zeiträume 2011-2060 durchgeführt und dekadisch ausgewertet. Im Detail werden in diesem Beitrag ausschließlich Ergebnisse des Laufes mit dem Klimaszenario *REMO regional – Baseline* präsentiert. Vergleichbare Resultate unter dem Klimatrend *IPCC regional* und der Klimavariante *Baseline* finden sich in Weber et al., 2009.

Als Referenz für die nahe Vergangenheit dient die Modellierung des Zeitraums 1991-2000 auf der Basis von Messdaten an den Klimastationen der Wetterdienste. Für einige Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Größe und Vergletscherungsanteile im Bereich des Inn sind in Tabelle 3.1.4.1 neben den Gebietskennwerten die berechneten Jahresmittelwerte der spezifischen Abflüsse und der glazialen Komponenten über die Dekade angegeben. Sowohl die absoluten als auch die relativen Anteile des Gletscherwassers am Abfluss übersteigen die an anderer Stelle für die gleichen Einzugsgebiete für die Periode 1930-1960 publizierten Gletscherspenden (z.B. Baumgartner et al., 1983) bis um das Dreifache. Dies dokumentiert jedoch keinesfalls eine derart drastische Zunahme der Gletscherschmelze gegen Ende des Jahrtausends, sondern hat seine Ursache darin, dass in der vorliegenden Studie erstmals das gesamte von den Gletschern in das Gerinne abgegebene Eisschmelzwasser erfasst wird, während die bisherigen Studien nur den Zuschuss zum Abfluss anhand der beobachteten bzw. auf das Einzugsgebiet extrapolierten Massenverluste der Gletscher abschätzen (Lambrech & Mayer, 2009). Im Falle stagnierender oder wachsender Gletscher ergibt dieser Ansatz keine oder gar eine negative Gletscherspende. Aber selbst in diesen Phasen wird auf den Gletscherzungen im Sommer Eisschmelzwasser gebildet, welches in die Gletscherbäche eingespeist wird und dadurch die Abflüsse in dieser Zeit im Vergleich zu eisfreien Einzugsgebieten erhöht. Dieser bei der Bilanzierung allein über den Massenhaushalt nicht berücksichtigte Beitrag ist keinesfalls vernachlässigbar und nur mit dem detaillierten Gletschermodell bestimmbar. Abschätzungen der Gletscherspende einer Gebirgsgruppe basierten in der Vergangenheit auf der Verwendung eines mittleren Höhenprofils der spezifischen Massenbilanz, bestimmt anhand der wenigen verfügbaren Beobachtungsdaten, was eine erhebliche Fehlerquelle darstellt.

| Einzugsgebiet | Fläche [km ²] | davon Gletscher [%] | Gebietsabfluss 1991-2000 modelliert [mm] | Modellierte Eisschmelze [mm] | Anteil am Abfluss [%] |
|--------------------|---------------------------|---------------------|--|------------------------------|-----------------------|
| Vent/Rofenache | 98 | 35 | 1367 | 505 | 36.9 |
| Huben/Öztaler Ache | 517 | 17 | 1149 | 305 | 26.5 |
| Innsbruck/Inn | 5792 | 4 | 939 | 79 | 8.4 |
| Oberaudorf/Inn | 9715 | 3 | 1026 | 67 | 6.5 |
| Wasserburg/Inn | 11980 | 2.4 | 998 | 54 | 5.4 |
| Achleiten/Donau | 76660 | 0.5 | 639 | 10 | 1.6 |

Tabelle 3.1.4.1: Mittlere Jahresfracht an Gletscherwasser und dessen Anteil am Gebietsabfluss für Teileinzugsgebiete verschiedener Größe sowie Gletscheranteile am Abfluss für die Referenzdekade 1991-2000 als Ergebnis von Modellrechnungen mit Surges.

Surges dagegen rechnet das Höhenprofil der Massenbilanz individuell auf jedem 1 x 1 km²-Proxel, was der individuellen Bestimmung des Massenhaushalts jedes einzelnen der 550 Gletscher im Untersuchungsgebiet sehr nahe kommt.

Die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Eisschmelze bei der Abflussberechnung verdeutlicht eindrücklich die Abbildung 3.1.4.12. Das Schmelzwasser der Schneedecke genügt bei weitem nicht, um die gemessenen Werte zu reproduzieren. Erst in Kombination mit dem Gletschermodell Surges wird der Abflusshydrograph in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen berechnet.

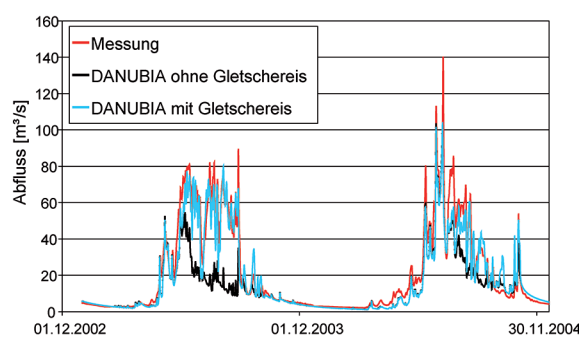


Abbildung 3.1.4.12: Vergleich der jeweils mit Gletschereis (blau) und ohne Gletschereis (schwarz) berechneten Tagesmittel der Abflüsse mit Messungen am Pegel Huben (rot).

3. Darstellung der Ergebnisse

Zur Dokumentation der räumlichen Verteilung der Bedeutung des Gletscherabflusses wurde eine Kartendarstellung des Verhältnisses des Schmelzwasseranteils zum mittleren Jahresabfluss über die Periode 1991-2000 gewählt (siehe Karte 3.1.4.1). Die zeitliche Entwicklung wird durch Diagramme mit dekadischen Monatsmittelwerten des Abflusses und dem Anteil der Eisschmelze an ausgewählten Pegelstellen im Einzugsgebiet vermittelt (siehe Abbildungen 3.1.4.1-3.1.4.10).

Die Karte 3.1.4.1 zeigt in der Farbkodierung des Regenbogenspektrums den mittleren Abfluss sowie den Anteil des Gletscherwassers am mittleren jährlichen Abfluss auf der Basis der Modellierung des Zeitraums 1991-2000 im Flussnetz des Einzugsgebietes der Oberen Donau. Sie verdeutlicht, dass nur in den Donauzubringern Inn und Salzach eine nennenswerte Menge an Schmelzwasser der Gletscher fließt, die Donau selbst ist dagegen bis zur Mündung des Inn bei Passau frei von jeglicher Gletscherschmelze. Zwar ist das Wasser von den kleinen Zugspitzgletschern dank der sehr fein gewählten Skala mehr als 50 km weit im Lauf der Partnach und der Loisach nachweisbar, mit einem mittleren Anteil von unter einem Promille des Abflusses (siehe Karte 3.1.4.1, Klasse 1, dunkelrot) ist dessen hydrologische Bedeutung jedoch vernachlässigbar. Ähnliches gilt für die Eisrelikte im Einzugsgebiet des Lech. Nahezu das gesamte Gletscherwasser im Einzugsgebiet wird dem Inn zugeführt, die maximale Menge von knapp 10% der Jahresfracht befördert er im Abschnitt zwischen Landeck und Innsbruck. Dort münden die Zuflüsse aus dem Kaunertal, dem Ötztal und dem Stubaital, den am stärksten vergletscherten Gebirgsgruppen der Ostalpen (siehe auch Kapitel 1.8). Die blaue bis grüne Färbung der Karte 3.1.4.1 verdeutlicht den außerordentlich hohen Anteil des Gletscherwassers am Abfluss aus diesen Kopfeinzugsgebieten.

Die Eisschmelze ist auf den Zeitraum der Ablationsperiode beschränkt, in denen dunkle apere Eisflächen (Blankeis) auf den Gletschern sichtbar werden. Diese dauert in der Regel von Juni bis Oktober. Die höchsten Werte der Schmelzwasserproduktion werden im Juli und August erreicht, sie erreichen dann das Doppelte bis Dreifache

des Jahresmittelwertes. Für den Ausgleich niedriger Wasserstände in Trockenperioden im August sollte dann der Anteil des Gletscherwassers im Mittel ca. 25% bis 30% betragen. Diese Bedingung ist in den blau bis grün markierten Flussabschnitten erfüllt, während in den gelb bis roten gefärbten Abschnitten der Karte 3.1.4.1 der Pegelstand durch die Gletscher kaum beeinflusst wird. Dies gilt auch für weite Strecken entlang der Salzach.

Die Diagramme 3.1.4.1-3.1.4.10 zeigen dagegen einerseits die lokale saisonale Entwicklung des Abflusses, andererseits dessen allmähliche Veränderung anhand der Mittelwerte über die Dekaden der Modelljahre 2011-2020, 2021-2030, 2031-2040, 2041-2050 und 2051-2060 unter dem Klimaszenario *REMO regional – Baseline*. Die Einzugsgebiete der Pegel Heitzenhofen (siehe Abbildung 3.1.4.1), Kempten (siehe Abbildung 3.1.4.2) und Ingolstadt (siehe Abbildung 3.1.4.9) sind frei von Gletschern, die Naab bei Heitzenhofen führt kein Wasser aus den Alpen. Der Vergleich der Diagramme untereinander zeigt in der Referenzdekade (hellblau) nur an den beiden Pegeln Vent (siehe Abbildung 3.1.4.3) und Huben (siehe Abbildung 3.1.4.4) im stark vergletscherten Ötztal ein vollständig durch die Eisschmelze geprägtes Abflussregime. Dort liefert das Schmelzwasser der Gletscher im Juli und August über 60% des Abflusses, insgesamt etwa ¼ bis der Jahressumme. Am Inn in Innsbruck (siehe Abbildung 3.1.4.5) wird das Regime nivo-glazial, d.h. die Schneeschmelze nimmt an Bedeutung zu. Der Anteil der Gletscherschmelze an der Jahresfracht reduziert sich dort auf unter 10%. Sie fällt im Zeitraum Mai bis Oktober an, im Juli/August erreicht sie einen maximalen Anteil von 20% am Abfluss. Dadurch wird der maximale Sommerabfluss mit dem der Schneeschmelze vergleichbar.

Im weiteren Verlauf des Inns bis zum Alpenrand (Oberaudorf, siehe Abbildung 3.1.4.6) nimmt die Gletscherwasserfracht mit den Zuflüssen aus dem Zillertal nur unwesentlich zu, der Abfluss verdoppelt sich aber gegenüber Innsbruck gemäß der zunehmenden Einzugsgebietsgröße. Die Bedeutung der Gletscherspende nimmt zwar weiter ab, durch ihre Konzentration auf den Hochsommer bleibt sie dennoch in den Hydrographen erkennbar.

Die im östlichen Teil am Alpenhauptkamm gelegenen Gletschergebiete entwässern über die Salzach. Die dort in den Zuflüssen dominierenden Rottöne sind das Resultat der wegen der schwächeren Vergletscherung im Einzugsgebiet geringeren Anteile an Gletscherwasser (siehe Karte 3.1.4.1). Der Pegel Wallnerau (siehe Abbildung 3.1.4.7) an der Salzach zeigt ebenfalls ein nivo-glaziales Abflussregime, nur sind dort die maximalen Anteile der Eisschmelze mit 15% kleiner als am Inn in Innsbruck. Am Unterlauf bei Laufen (siehe Abbildung 3.1.4.8) sinkt der Gletscherwasseranteil auf 7%, der Hydrograph ist mit dem nivo-pluvialen Regime von Kempten vergleichbar, das zweite Maximum ist also überwiegend durch die gegenüber dem Flachland innerhalb der Alpen ergiebigeren Sommerniederschläge bestimmt. Selbst die deutlich erhöhte Gletscherwasserfracht während der ersten Dekade 2011-2020 des Klimaszenarios zeichnet sich in den Abflüssen der Monate Juli bis August nicht ab. Während sich das Schmelzwasser am Inn im Hochsommer bis zur Mündung in Passau bemerkbar macht, ist seine Bedeutung für den Abfluss der Donau am Pegel Achleiten (siehe Abbildung 3.1.4.10) gering. Nur 1.6% der Jahresfracht stammen von den Alpengletschern, selbst im Juli/August beträgt der mittlere Anteil am Ab-

fluss über die Dekade 1991-2000 nur 7%. Er liegt damit deutlich unterhalb der Variabilität des Abflusses von Jahr zu Jahr und kann daher eventuell eintretende Niederschlagsdefizite nicht kompensieren. Im Inn ist die Fracht an Niederschlag und Schneeschmelze aus dem Gebirge deutlich größer als der Anteil an Eisschmelzwasser. Somit prägt das Gebirge durchaus den Abfluss in der Donau nach der Einmündung des Inn. Aber bereits bei Ingolstadt (siehe Abbildung 3.1.4.9) zeigt der Donauabfluss nicht das an der Naab (siehe Abbildung 3.1.4.1) charakteristische Minimum im Sommer, da Zuflüsse aus den Bergen über Lech und Iller einfließen.

Wie könnte sich das Abflussregime zukünftig durch den Gletscherschwund in und außerhalb der Alpen verändern? Wie der Abbildung 3.1.4.11 entnommen werden kann, beträgt das Gesamtpotential der Gletscherspende am Pegel Achleiten verteilt über das Einzugsgebiet etwas über 200 mm, was nur ca. 20% der durchschnittlichen Jahressumme des Gebietsniederschlags entspricht. Der Abbau dieser Reserven erfolgt in allen gemittelten Klimavarianten der vier Klimatrends ähnlich, so dass die zukünftige Entwicklung der mittleren Jahresgänge der Abflüsse nur anhand der Ergebnisse des Szenarios *REMO regional – Baseline* dargestellt wird. Dieses Klimaszenario zeichnet sich durch eine deutliche Abnahme der Sommerniederschläge (-31% im Zeitraum 1990-2100) und einer Zunahme der Niederschläge im Frühjahr (+9% im Zeitraum 1990-2100) aus (siehe Kapitel S1-S4). Letztere hat zur Folge, dass sowohl inneralpin als auch im Alpenvorland der nivale Charakter des Abflussregimes auch zukünftig erhalten bleibt. Typischerweise verbreitert sich das Maximum des Schneeschmelzabflusses, die Spitzen werden zunehmend niedriger. Die umfangreichste Umstellung erfährt das Abflussregime sowohl in den Alpen als auch im Alpenvorland durch die Abnahme der Niederschläge in den Sommermonaten Juni bis August. Hier zeigt sich gegen Ende des Simulationszeitraums ein Minimum in den Abflüssen, welches zuvor nur an Pegeln ohne Quellgebiet in den Alpen in Erscheinung trat. Der Niederschlagsrückgang entfaltet besonders in den Alpen seine Wirkung und kann zukünftig weder durch den Schneespeicher noch durch Gletscherschmelze kompensiert werden.

Die Gletscherspende nimmt in der Modelldekade 2011-2020 zunächst als Folge einer verlängerten Ablationsperiode und damit den verbundenen größeren apere Eisflächen deutlich zu. Dadurch erhöht sich der Anteil des Gletscherwassers am Abfluss im Inn und an der Salzach geringfügig. Eine signifikante Steigerung des Abflusses ergibt sich nur in den glazialen Kopfeinzugsgebieten Vent (siehe Abbildung 3.1.4.3) und Huben (siehe Abbildung 3.1.4.4). Am Pegel Achleiten (siehe Abbildung 3.1.4.10) erhöht sich der Anteil des Gletscherwassers am Abfluss nur minimal auf maximal 9%, zu wenig um das Ausbleiben der Niederschläge zu kompensieren.

Über die folgenden Dekaden nimmt die Gletscherspende mit der abnehmenden Gletscherfläche deutlich ab.

Die Kartendarstellung 3.1.4.2 zeigt dies anhand des Abflussanteils der Gletscher in der Dekade 2031-2040 analog zur Karte 3.1.4.1. Der Schmelzwasseranteil entsprechend dem Szenario *REMO regional – Baseline* ist in fast allen Flussabschnitten deutlich vermindert, erkennbar an der Rot- und Orangefärbung des Inn und der Salzach. Bereits vor Oberaudorf wird das Gletscherwasser im Inn nahezu bedeutungslos. In einigen Regionen verschwindet der Beitrag der Gletscher aufgrund des bereits vollständigen Abschmelzens der Gletscher, wie beispielsweise entlang des Lechs, aber auch im Saumnaun oder den Zillertaler Alpen. Eine blaue und grüne Färbung, die einen essentiellen Beitrag kennzeichnet, beschränkt sich auf Gipfelflagen in der Bernina, den Ötztaler Alpen sowie den Tauern- und der Sonnblickgruppe.

Dies hat zur Folge, dass sich zum Ende der Simulation an Inn und Salzach das Abflussregime vom symmetrischen glazialen bzw. doppelgipfligen nivo-glazialen zu einem asymmetrischen nivo-pluvialen Regime umwandelt (siehe Abbildungen 3.1.4.5 bis 3.1.4.8). Der Verlust der Eisreserven und damit auch die Abnahme der Zuflüsse von Gletschern an allen Pegelstellen an Inn und Salzach haben sowohl einen Rückgang der

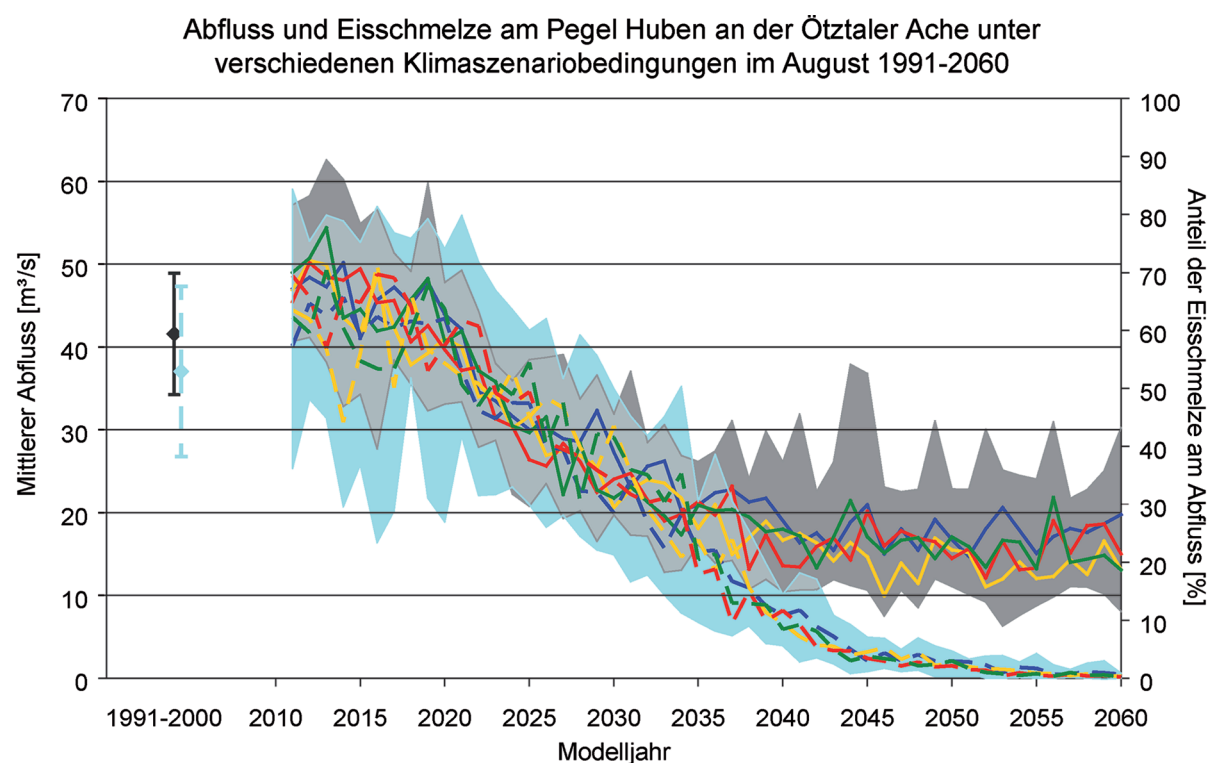


Abbildung 3.1.4.13: Mittlerer Augustabfluss und prozentualer Anteil der Gletscherschmelze für den Pegel Hohenbrunn. Die blauen Flächen stellen die Bandbreite des Anteils der Gletscherschmelze aus allen 16 statistischen Klimavarianten dar, während die grauen Flächen die Bandbreite des mittleren Augustabflusses abbilden.

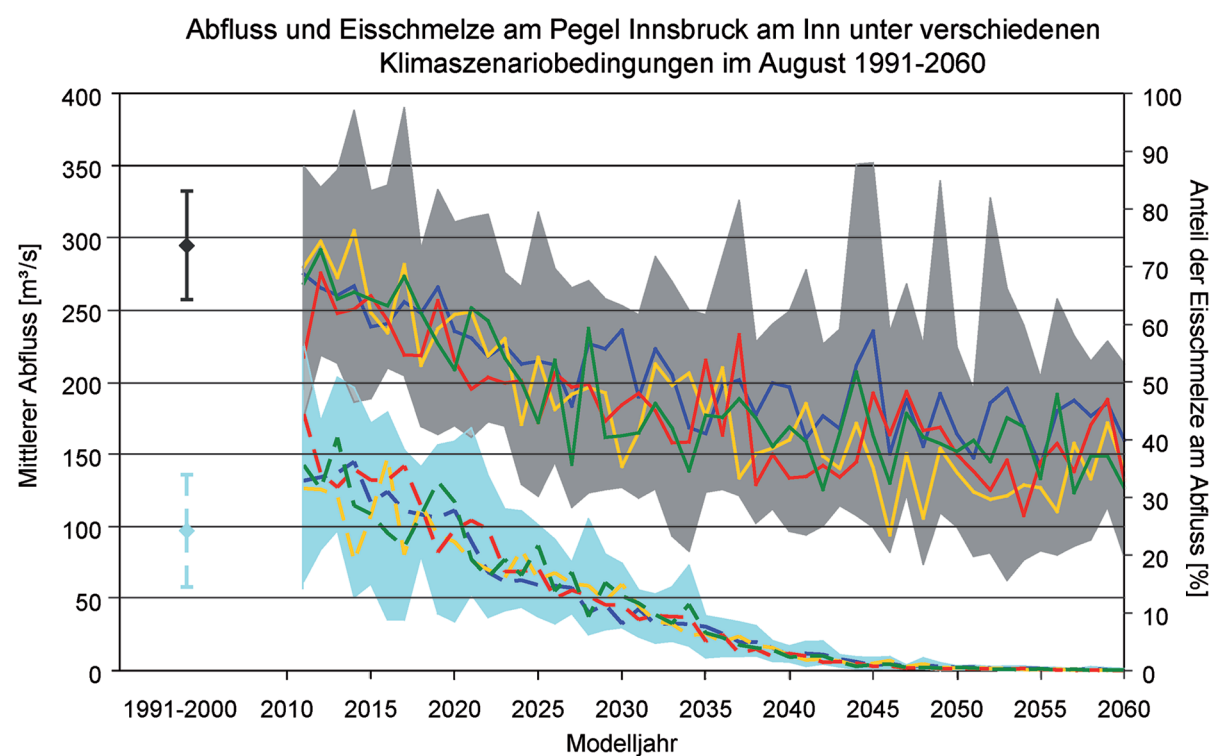


Abbildung 3.1.4.14: Mittlerer Augustabfluss und prozentualer Anteil der Gletscherschmelze für den Pegel Innsbruck. Die blauen Flächen stellen die Bandbreite des Anteils der Gletscherschmelze aus allen 16 statistischen Klimavarianten dar, während die grauen Flächen die Bandbreite des mittleren Augustabflusses abbilden.

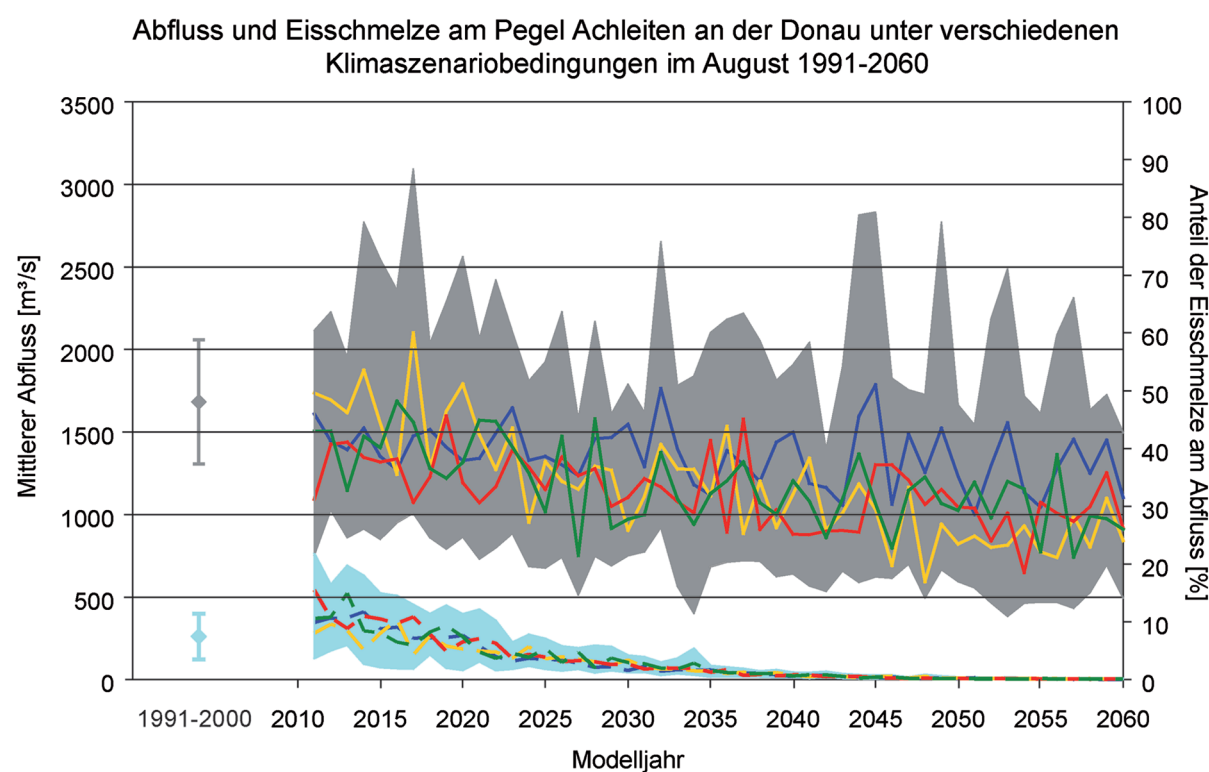


Abbildung 3.1.4.15: Mittlerer Augustabfluss und prozentualer Anteil der Gletscherschmelze für den Pegel Achleiten. Die blauen Flächen stellen die Bandbreite des Anteils der Gletscherschmelze aus allen 16 statistischen Klimavarianten dar, während die grauen Flächen die Bandbreite des mittleren Augustabflusses verdeutlichen.



Jahressumme der Abflüsse als auch von deren Maxima zur Folge. Der jährliche Abfluss nimmt in Kopfeinzugsgebieten wie Vent oder Huben zwischen 2000 und 2060 um ca. 30-35%, im restlichen Einzugsgebiet um ca. 25% ab. Dort ist die Abnahme aber hauptsächlich die Folge des Rückgangs der Niederschläge im Klimaszenario *REMO regional – Baseline*.

In den Abbildungen 3.1.4.13 bis 3.1.4.15 sind für die drei Pegel Hohenbrunn, Innsbruck und Achleiten die mittleren Monatsmittel des Abflusses und der prozentuale Anteil der Eisschmelze zusammen mit der Bandbreite aus allen Simulationen für den August angegeben, denn im August fällt in der Regel der maximale Abfluss von den Gletschern an. Während im Ötztal (siehe Abbildung 3.1.4.13) und am Inn (siehe Abbildung 3.1.4.14) ein deutlicher Rückgang der Abflüsse aufgrund der reduzierten Gletscherfläche festgestellt werden kann, ist ein solcher in Achleiten (siehe Abbildung 3.1.4.15) nicht mehr signifikant. Insbesondere am Inn ist eine Zunahme der Variabilität feststellbar, welcher auf einen Verlust des Kompensationseffektes hindeutet.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass im Einzugsgebiet der Oberen Donau eine merkliche glaziale Prägung des Abflussregimes durch die Gletscherschmelze zumindest für die Zubringerflüsse Inn und Salzach gegeben ist. Diese bleibt jedoch auf den inneralpinen Bereich beschränkt. In der Zukunft wird das Abflussregime überall einen nivo-pluvialen Charakter annehmen, wobei der inneralpin wirksame Kompensationseffekt verloren geht und damit vor allem im Sommer die Variabilität des Abflusses zunimmt. Auf die Wasserführung der Donau am Pegel Achleiten dagegen sind die Auswirkungen durch den Gletscherschwund in Relation zu den Änderungen im Gebietsniederschlag als gering einzuschätzen. Das Klimaszenario *REMO regional – Baseline* mit seinem deutlichen Rückgang der Sommerniederschläge auch im Gebirge zeigt deutlich die bisherige Wirkung des "Wasserschlosses" Alpen. Niederschlagsdefizite können durch das Schmelzen der noch vorhandenen Eisreserven nicht mehr ausgeglichen werden, insbesondere der Zufluss aus vergletscherten Kopfeinzugsgebieten wird drastisch abnehmen. Dies wird besonders die vorhandenen Wasserkraftwerke betreffen, die zwar in den nächsten 20 Jahren wegen der verstärkten Zuflüsse zu den Gewinnern gehören werden, in der späteren Phase aber ihre Speicher über den Sommer kaum noch werden füllen können (Koch, 2009). Ohne die durch das Klimaszenario vorgegebene Abnahme des Niederschlagsangebots beschränken sich die beschriebenen Auswirkungen auf den inneralpinen Bereich.

Literatur

- Baumgartner A., Reichel, E. & Weber, G. (1983): *Der Wasserhaushalt der Alpen: Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Gletscherspende im Gesamtgebiet der Alpen im Jahresdurchschnitt für die Normalperiode 1931-1960*. München, Wien, Oldenburg.
- Koch, F. (2009): *Wasserkraft und Klimawandel - Physikalisch basierte Modellierung im alpinen Einzugsgebiet des Inns*. Diplomarbeit am Department für Geographie, München.
- Lambrecht, A. & Mayer, C. (2009): *Temporal variability of the non-steady contribution from glaciers to water discharge in western Austria*. Journal of Hydrology, accepted.
- Roethlisberger, H. & Lang, H. (1987): *Glacial hydrology*. In: *Glacio-Fluvial Sediment Transfer: an Alpine Perspective* (ed. by A. M. Gurnell & M. J. Clark), 207-284. John Wiley, Chichester, UK.
- Viviroli, D., Weingartner, R. & Messerli, B. (2003): *Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains*. Mountain Research and Development, 23 (1), 32-40.
- Weber, M., Prasch, M. & Braun, L. (2009): *Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Abfluss der Donau gegenwärtig und in der Zukunft*. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Heft 86, Lebensministerium, BMLFUW, Wien.