



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung



Von der Europäischen Union kofinanziert
Transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-V)

Donauausbau Straubing-Vilshofen

Variantenunabhängige Untersuchungen zum Ausbau der Donau
zwischen Straubing und Vilshofen – 2007-DE-18050-S

Abschlussberichte – B.I. Bericht zum Ist-Zustand

**Anlage I.4 Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das
Abflussregime im Donau-Abschnitt Straubing-
Vilshofen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts
(Bundesanstalt für Gewässerkunde)**

Hinweise:

1. Die Durchführung der Untersuchungen und die Erstellung der Berichte wurden von der EU finanziell unterstützt.
2. Die Ausführungen in den Berichten und deren Anlagen binden nur die jeweiligen Verfasser, nicht aber die Europäische Kommission, die auch nicht für die weitere Nutzung der darin enthaltenen Informationen haftet.

Kurzbericht

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime im Donau-Abschnitt Straubing – Vilshofen bis zur Mitte des 21.-Jahrhunderts

Auftraggeber: WSD Süd

Anzahl der Seiten: 25

Aufgestellt durch: B. Klein, T. Maurer, E. Nilson und P. Krahe



gez. Klein

Koblenz, November 2012

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung	3
2. Einleitung.....	4
3. Charakteristika des Abflussregimes.....	6
4. Datengrundlagen.....	7
4.1 Beobachtungsdaten.....	7
4.2 Klimaprojektionen.....	7
5 Beobachtete Änderungen im 20. Jahrhundert	8
6 Modellerte Änderungen des Abflussregimes in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts	12
6.1 Modellsystem COSERO	12
6.2 Methodik KLIWAS	13
6.3 Methodik GLOWA-Danube	14
6.4 Projizierte Änderungen bis zur Mitte des 21ten Jahrhunderts.....	16
6.5 Vergleich der Ergebnisse aus KLIWAS und GLOWA Danube.....	20
7 Zusammenfassung.....	22
Literaturverzeichnis.....	24

1. Veranlassung

Die Bundeswasserstraße Donau ist bis auf den Abschnitt Straubing – Vilshofen staugeregelt. Diese Strecke stellt den entscheidenden Hauptengpass für die Schifffahrt im deutschen Abschnitt der Donau dar. Anders als in den staugeregelten Abschnitten können natürliche und durch den zukünftigen Klimawandel bedingte mögliche Änderungen der Abflussverhältnisse in diesem Bereich die Wasserstände und damit die Abladetiefe und Schiffbarkeit an der deutschen Donau beeinflussen.

Im Rahmen der EU-Studie werden unter anderem die Auswirkungen unterschiedlicher Ausbauvarianten auf die Ökologie, Flussmorphologie, Grundwasserverhältnisse und Hochwasserwirkung untersucht. Im Rahmen der Untersuchungen sind auch mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse der Donau im Abschnitt Straubing – Vilshofen darzulegen.

Vor diesem Hintergrund stellt die vorliegende Studie den aktuellen Stand des Wissens der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zu den möglichen Auswirkungen an der Donau zusammen. Dabei wird auf aktuelle Ergebnisse laufender Forschungsprojekte zurückgegriffen. Die relevanten Untersuchungspegel in diesem Abschnitt sind die Donau-Pegel Pfelling und Hofkirchen jeweils vor und nach der Isarmündung in die Donau sowie der Isar-Pegel Plattling.

2. Einleitung

Im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) wird der Einfluss möglicher klimabedingter Änderungen auf die Abflüsse und Wasserstände der Bundeswasserstraßen untersucht (BMVBS, 2012). Das Untersuchungsgebiet an der oberen Donau ist das Einzugsgebiet bis zum Pegel Achleiten an der deutsch-österreichischen Grenze (Abbildung 1). Es umfasst eine Einzugsgebietsfläche von 76 600 km² (Klein et al., 2011b).

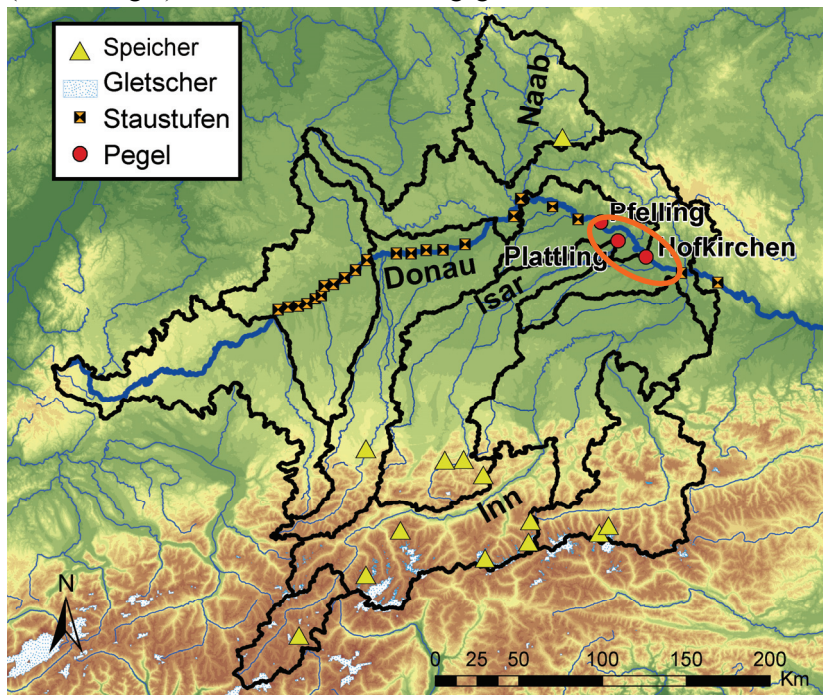


Abbildung 1: KLIWAS-Untersuchungsgebiet obere Donau bis zum Pegel Achleiten, der Abschnitt Straubing-Vilshofen ist orange markiert

Neben diesen Untersuchungen werden im Rahmen des EU-Projektes ECCONET (Effects of climate change on the inland waterway networks) unter BfG-Beteiligung die Auswirkungen des Klimawandels auf das europäische Binnenwasserstraßennetz, mit dem Rhein-Main-Donau Korridor als Fallbeispiel, untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie sind in Klein et al., 2010; Klein et al., 2012a; Nilson et al., 2012b; Schweighofer et al., 2010; Schweighofer et al., 2012 zusammen gefasst.

Neben KLIWAS und ECCONET gibt es eine Reihe weiterer Projekte, die das Themenfeld Klimawandel im Donaauraum untersucht haben, bzw. untersuchen. In der im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie der Internationalen Kommission zum Schutz der Donau ICPDR erstellten Studie „Danube Study – Climate Change Adaptation“ (LMU, 2012), finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, findet sich eine Zusammenstellung dieser Projekte.

Für den deutschen Abschnitt der Donau von besonderer Bedeutung sind hierbei das Kooperationsvorhaben KLIWA¹ (Klimaänderung und Wasserwirtschaft) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst DWD und das Projekt GLOWA-Danube (GLOWA-Danube-Projekt, 2010), das mit verschiedenen Szenarien den Einfluss des Klimawandels, der Bevölkerungsentwicklung und der Landnutzung auf die Wasserressourcen der Oberen Donau untersucht hat. Im Rahmen des EU-Projektes AdaptAlp wurde unter BfG-Beteiligung unter Anderem eine umfangreiche Analyse der verfügbaren Regionalen Klimaprojektionen im Alpenraum durchgeführt (Nilson et al., 2012a).

¹ <http://www.kliwa.de/>

3. Charakteristika des Abflussregimes

Das Abflussregime beschreibt das Gesamtverhalten von Fließgewässerabflüssen hinsichtlich des vieljährig gemittelten Jahresgangs, sowie der kennzeichnenden Entwicklungen extremer Hoch- und Niedrigwasser-Situationen. Im Donaeinzugsgebiet überlagern sich verschiedene Abflussregime. Das Abflussregime der oberen Donau ändert sich in Fließrichtung durch die südlichen alpinen Zuflüsse (Iller, Lech, Isar und Inn) von einem Regen-dominierten (pluvialen) Abflussregime zu einem Schnee-dominierten (nivalen) Abflussregime. Insbesondere der Inn führt zu einer starken Änderung des Abflussregimes, da er bei der Mündung einen vergleichbaren mittleren Abfluss wie die Donau selbst hat. Bei einem Regen-dominierten Abflussregime zeigt sich eine Dominanz von Winterhoch- und Sommerniedrigwassern, bei einem Schnee-dominierten Abflussregime zeigt sich eine Dominanz von Winterniedrig- und Sommerhochwasserereignissen. Bei den beiden Donau-Pegeln Pfelling und Hofkirchen zeigt sich die Überlagerung der beiden Abflussregime (siehe Abbildung 2). Der alpine Zufluss der Isar mit einem nivalen Abflussregime führt zu einer Abflachung und einer Mehrgipfligkeit des Abflussregimes am Pegel Hofkirchen.

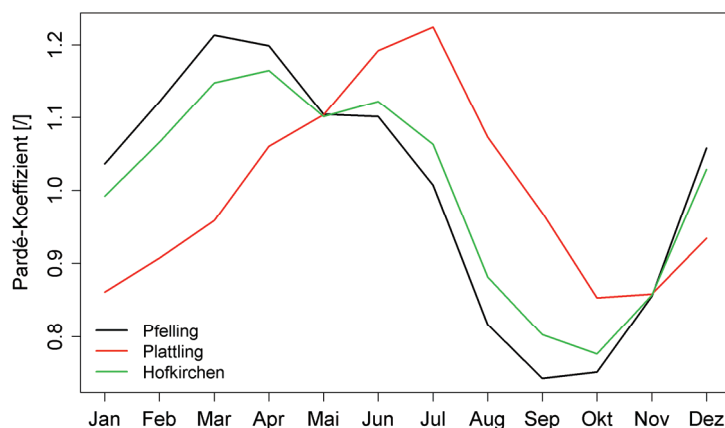


Abbildung 2: Abflussregime der Pegel Pfelling (Donau), Plattling (Isar), Hofkirchen (Donau) nach Pardé², Referenzzeitraum 1971-2000

² Pardé-Koeffizient = Verhältnis von vieljährigem Monats-Abfluss zu vieljährigem Jahresabfluss

4. Datengrundlagen

Für die in diesem Kurzbericht dargestellten Untersuchungen zu den beobachteten Änderungen in der Vergangenheit (Kapitel 5) und den möglichen Änderungen der Zukunft (Kapitel 6) wurden folgende Datengrundlagen verwendet.

4.1 Beobachtungsdaten

Für Niederschlag und Temperatur stehen Daten durch das Projekt HISTALP³ der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) ab Mitte des 18. Jahrhunderts in Monatschritten von ausgewählten Stationen frei zur Verfügung (Böhm et al., 2009). Da die Stationsdichte von HISTALP nicht sehr hoch ist, wurden zusätzlich die Karten des mittleren Jahresniederschlages der Periode 1961 bis 1990 des hydrologischen Atlas HAÖ (Kling et al., 2005) und der „Basin-Wide Water Balance in the Danube Basin“ (Petrovic, 2006) verwendet. Für die statistischen Auswertungen der Vergangenheit sowie für die Kalibrierung und Validierung des Wasserbilanzmodells COSERO stehen für den Pegel Hofkirchen mittlere tägliche Abflusswerte ab dem Jahr 1901, für den Pegel Pfelling und den Pegel Plattling ab 1921 zur Verfügung. Die Daten für den Pegel Plattling wurden freundlicherweise durch das Bayerische Landesamt für Umwelt zur Verfügung gestellt.

4.2 Klimaprojektionen

Als meteorologische Eingangsdaten für die Wasserhaushaltssimulationen der Zukunft bis zum Jahr 2100 wurden Niederschlag und Temperatur der dynamischen regionalen Klimaprojektionen aus dem EU-Projekt ENSEMBLES verwendet (ENSEMBLES, 2009). Die Modellkette der insgesamt 23 regionalen Klimaprojektionen besteht aus Kombinationen von 12 regionalen Klimamodellen (RCM) und 7 globalen Klimamodellen (GCM), die alle durch das IPCC Emissionsszenario A1B angetrieben werden (Darstellung der verwendeten Modellketten siehe Klein et al., 2012b). Nach einer detaillierten Analyse der Klimaprojektionen wurden drei Klimaprojektionen nicht für weitere Analysen verwendet (siehe Klein et al., 2012b). Die Ergebnisse aus dem Projekt GLOWA Danube für die Pegel Hofkirchen und Pfelling (Abflusssimulationen der Vergangenheit und die mit dem statistischen Klimagenerator simulierten Abflussprojektionen der Zukunft) wurden freundlicherweise von Prof. Dr. Wolfram Maurer, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München zur Verfügung gestellt.

³ HISTALP – Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region. <http://www.zamg.ac.at/HISTALP/>

5 Beobachtete Änderungen im 20. Jahrhundert

Bevor mit hydrologischen Modellsystemen mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime untersucht werden, ist es wichtig an Hand von Messdaten das meteorologische und hydrologische System der Vergangenheit zu untersuchen. Wurden schon in der Vergangenheit Änderungen in den Lufttemperaturen, Niederschlägen oder Abflüssen beobachtet?

Abbildung 3 zeigt die Jahresmittelwerte der aufbereiteten historischen HISTALP Daten der Periode 1887 bis 2007 für das Donaueinzugsgebiet bis Hofkirchen für die Temperatur und Niederschlag sowie den mittleren jährlichen Abfluss am Pegel Hofkirchen.

Auffallend ist der starke Temperaturanstieg seit ca. 1980. Die Jahre 1994, 2000, 2002 und 2007 waren die wärmsten Jahre. Die Variabilität im Niederschlag, bei dem eine leichte Zunahme über die gesamte Periode 1887 bis 2007 erkennbar ist, überträgt sich direkt auf den Abfluss und lässt die Abhängigkeit zwischen diesen beiden Variablen erkennen. Die Jahreswerte des Abflusses zeigen keinen Trend. Die Temperaturerhöhung der letzten hundert Jahre hat vermutlich zu einer Erhöhung der potentiellen Verdunstung geführt und mit dem vermehrten Niederschlagsangebot hat auch die tatsächliche Verdunstung zugenommen. Dies ist auch am zeitlichen Verlauf der Unterschiedshöhe (Differenz zwischen Niederschlagshöhe und Abflusshöhe) in Abbildung 3 zu erkennen. Die über einen längeren Zeitraum gemittelte Unterschiedshöhe ist ein Maß für die tatsächliche Verdunstung.

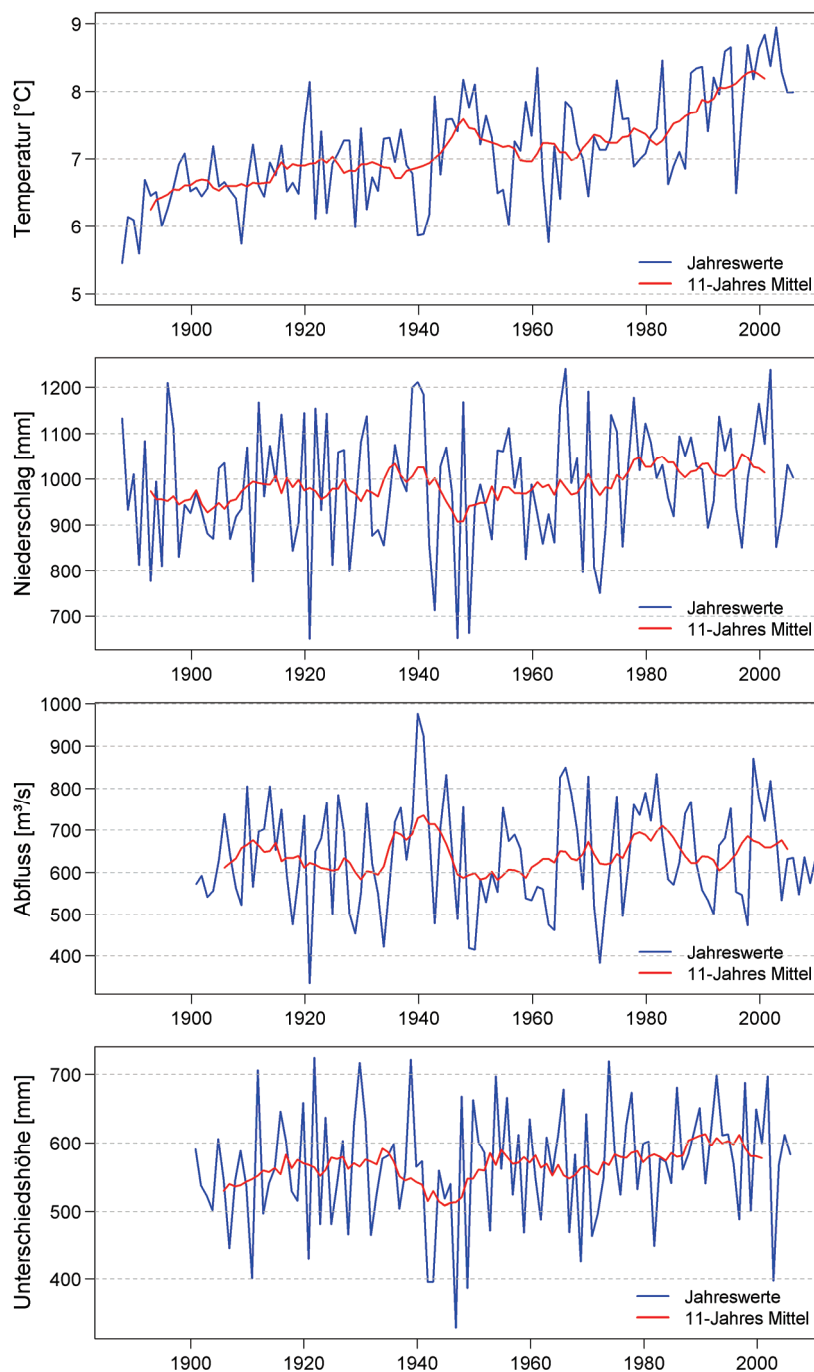


Abbildung 3: Aufbereitete historische Messdaten für das Donaeinzugsgebiet bis zum Pegel Hofkirchen. Blau Jahresmittel, bzw. -summen (Niederschlag), rot gleitendes Mittel über 11 Jahre. Von oben nach unten: Temperatur, Niederschlag, Abfluss, Unterschiedshöhe (Differenz aus Niederschlags- und Abflusshöhe).

Abbildung 4 zeigt die zeitliche Entwicklung der mittleren Abflüsse MQ im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr. Am Pegel Hofkirchen und Pegel Pfelling ist keine statistisch signifikante Zu- und Abnahme (Mann-Kendall Trendtest zum Signifikanzniveau 0,05) über die Zeit zu erkennen.

Bei der zeitlichen Entwicklung der niedrigsten 7-Tagesmittel der Abflüsse NM7Q im hydrologischen Sommer- und im Winterhalbjahr (Abbildung 5) zeigt sich für den Pegel Hofkirchen, dass die Abflusswerte der winterlichen Niedrigwasserabflüsse über die Zeit signifikant

(Mann-Kendall Trendtest zum Signifikanzniveau 0,05) zugenommen haben, die Niedrigwassersituation in dieser Jahreszeit sich also verbessert hat. Bei dem Pegel Pfelling und beim Pegel Hofkirchen im Sommerhalbjahr ist kein statistisch signifikanter Trend zu erkennen (Mann-Kendall Trendtest zum Signifikanzniveau 0,05).

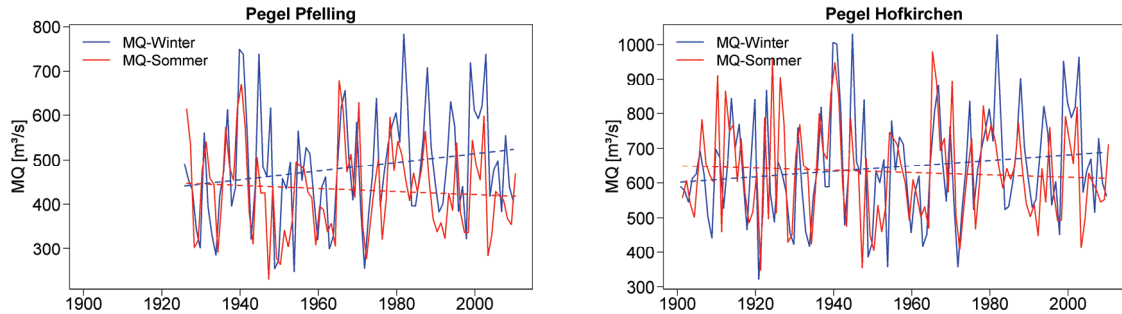


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der mittleren Abflüsse MQ im hydrologischen Sommer- und im Winterhalbjahr am Pegel Pfelling und Pegel Hofkirchen

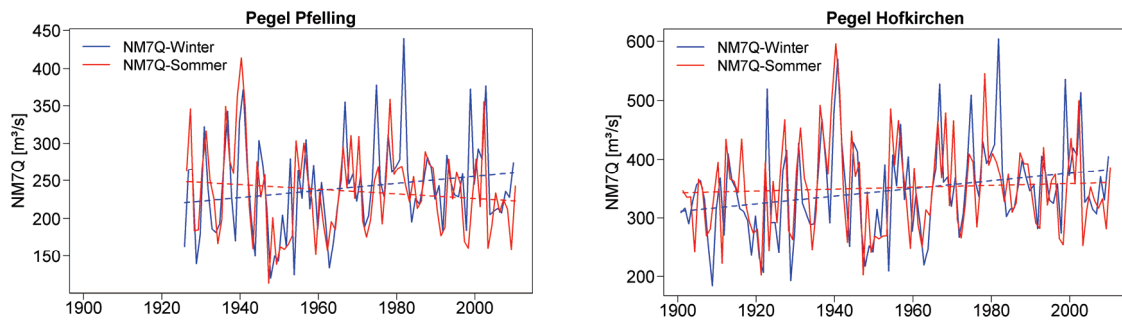


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der niedrigsten 7-Tagesmittel der Abflüsse NM7Q im hydrologischen Sommer- und im Winterhalbjahr am Pegel Pfelling und Pegel Hofkirchen

Werden die Änderungen hydrologischer Kennwerte für den Pegel Hofkirchen und meteorologischer Kennwerte für das Donaeinzugsgebiet oberhalb des Pegels Hofkirchen zwischen dem Zeitraum 1901-1930 am Anfang und dem Zeitraum 1971-2000 am Ende des letzten Jahrhunderts ausgewertet, ergeben sich die Änderungssignale in Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Erhöhung der mittleren Temperatur beträgt für alle meteorologischen Jahreszeiten ca. 1°C. Die Niederschläge haben bis auf den meteorologischen Sommer in allen Jahreszeiten zugenommen, die Sommerniederschläge haben sich nicht verändert. Bei den ausgewerteten hydrologischen Kennwerten zeigt sich bis auf den mittleren Abfluss im Sommerhalbjahr bei allen Kenngrößen eine Erhöhung der Werte am Pegel Hofkirchen zwischen 10% und 20%.

Tabelle 1: Vieljährige Mittelwerte der Lufttemperatur T2m zu Beginn (1901-1930) und Ende des 20. Jahrhunderts (1971-2000) sowie die Änderungen zwischen diesen Zeiträumen für das Einzugsgebiet des Pegels Hofkirchen (Donau). Die Farbkodierungen zeigen die Änderungssignale. Blau bedeutet abnehmende Tendenz (kleiner als -0.5°C, hier nicht vorhanden), grau keine Tendenz (zwischen 0.5°C and -0.5°C, hier nicht vorhanden) und orange zunehmende Tendenz (größer als 0.5°C) der Temperatur

Kennwert	1901-1930	1971-2000	Änderung [°C]
T2m [°C]			
meteorologischer Winter (DJF)	-1.6	-0.8	+0.8
T2m [°C]			
meteorologischer Frühling (MAM)	6.7	7.5	+0.8
T2m [°C]			
meteorologischer Sommer (JJA)	15.2	16.2	+1.1
T2m [°C]			
meteorologischer Herbst (SON)	6.8	7.7	+0.9

Tabelle 2: Vieljährige Mittelwerte des Gebietsniederschlags (SumhN), des Mittel- (MQ) und Niedrigwasserabflusses (NM7Q) sowie die 90% und 95% Quantile der mittleren täglichen und der mittleren monatlichen Abflüsse zu Beginn (1901-1930) und Ende des 20. Jahrhunderts (1971-2000) sowie prozentuale Änderungen zwischen diesen Zeiträumen für den Pegel Hofkirchen (Donau). Die Farbkodierungen zeigen die Änderungssignale. Blau bedeutet steigende Tendenz (größer als 5%), grau keine Tendenz (zwischen 5% and -5%) und orange abnehmende Tendenz (kleiner als -5%, hier nicht vorhanden) des jeweils betrachteten Parameters

Kennwert	1901-1930	1971-2000	Änderung [%]
SumhN [mm]			
meteorologischer Winter (DJF)	172	186	+8.4
SumhN [mm]			
meteorologischer Frühling (MAM)	208	225	+8.2
SumhN [mm]			
meteorologischer Sommer (JJA)	367	365	-1.1
SumhN [mm]			
meteorologischer Herbst (SON)	224	235	+5.1
MQ [m3/s]			
hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	637	616	-3.3
MQ [m3/s]			
hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	605	671	+10.9
NM7Q [m3/s]			
hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	329	356	+8.3
NM7Q [m3/s]			
hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	310	373	+20.2
FC90 [m3/s]			
der Tagesmittelwerte des Abflusses	320	364	+13.8
FC95 [m3/s]			
der Tagesmittelwerte des Abflusses	284	329	+15.8
FC90 [m3/s]			
der Monatsmittelwerte des Abflusses	350	405	+15.7
FC95 [m3/s]			
der Monatsmittelwerte des Abflusses	304	356	+17.1

Die Ursachen für eine Änderung der Abflusskennwerte am Pegel Hofkirchen können in einer Veränderung des Schnee- und Niederschlagsregime in der Vergangenheit, aber auch in anthropogenen Einflüssen wie Talsperren- und Speicherausbau liegen. Die Größe des Einflusses der unterschiedlichen Faktoren kann nicht über eine statistische Analyse alleine, sondern nur in Verbindung mit einem detaillierten, räumlich verteilten Wasserhaushaltsmodell ermittelt werden.

6 Modellierete Änderungen des Abflussregimes in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts

6.1 Modellsystem COSERO

Um Aussagen über die möglichen Änderungen des Wasserhaushalts treffen zu können, wurde im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS (2009-2013) bisher für das Gebiet der deutschen oberen Donau das Wasserbilanzmodell COSERO (Kling et al., 2011; Kling et al., 2012) aufgebaut. In dem Modell sind Gletscher über ein negatives Massenbilanzverfahren und die größten Talsperren und Speicher berücksichtigt. Die zeitliche Diskretisierung des Modells sind Monatsschritte, wobei das Modell eine interne zeitliche Disaggregation zur Berechnung von Interzeption, Schneefall und Schneeschmelze verwendet. Als räumliche Diskretisierung wird ein halb-verteilter Ansatz verwendet.

Dieser Ansatz wurde im Rahmen von KLIWAS bewusst gewählt, um durch die zeitliche (Monatswerte) und räumliche (größere Teilgebiete) Aggregation robuste Aussagen über mögliche Änderungen im Wasserhaushalt treffen zu können.

Das Gebiet der oberen Donau wurde hierzu in 12 Teileinzugsgebiete (siehe Abbildung 1), die jeweils in Höhenzonen unterteilt wurden, eingeteilt (Klein et al., 2011a; Kling et al., 2011). Durch die räumliche Unterteilung der Gebiete in Höhenzonen wurden insgesamt 45 so genannte Hydrological Response Units (HRU) im Modell berücksichtigt.

Als Beobachtungsdatensatz wurden die Monatswerte von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der Stationen des HISTALP Datensatzes (Böhm et al. 2009) verwendet. Da sowohl diese meteorologischen Beobachtungsdaten als auch Abflusszeitreihen für einige Pegel im Gebiet für einen langen Zeitraum verfügbar sind, wurde die Wasserbilanzsimulation der Vergangenheit für den Zeitraum von 1887-2007 durchgeführt.

Durch die Validierung des aufgebauten Wasserbilanzmodells für diesen langen Zeitraum konnte eine gute Anpassung der simulierten monatlichen Abflüsse an die beobachteten Abflüsse für vom Kalibrierungszeitraum 1961-1990 unabhängige Zeiträume nachgewiesen werden. In Abbildung 6 sind die simulierten und beobachteten monatlichen Verteilungen der mittleren monatlichen Abflüsse am Anfang (1901-1930) und am Ende (1971-2000) des letzten Jahrhunderts als Box-Whisker-Plots⁴ dargestellt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die hydrologische Simulation für diese beiden Perioden mit unterschiedlichen meteorologischen Randbedingungen (siehe Abbildung 3, Tabelle 1, Tabelle 2) eine ähnlich gute Güte aufweist. Auch für den Pegel Pfelling zeigen die simulierten Werte eine sehr gute Anpassung an die beobachteten Werte (Abbildung 7).

⁴ Box-Whisker-Plot: Box 25% bis 75% Quartil, Median als durchgezogener Strich, Antennen (Whisker) bis zum größten Wert innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilsabstandes, Werte außerhalb des 1,5-fachen des Interquartilabstandes (Ausreißer) werden als Punkte dargestellt.

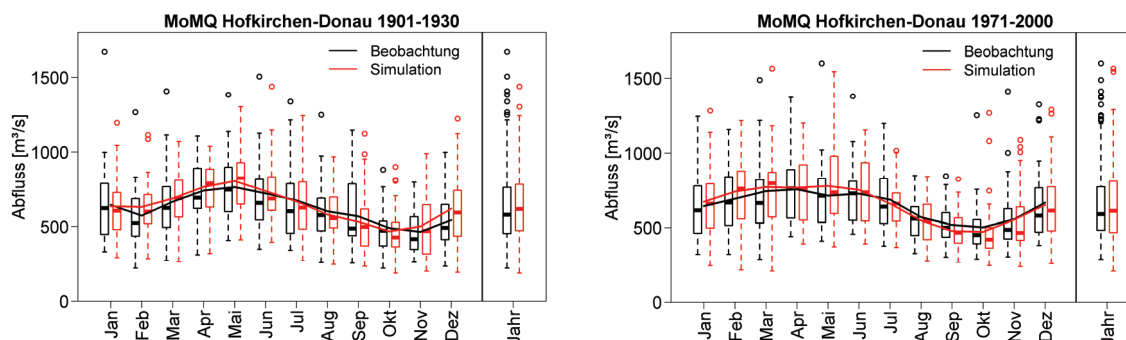


Abbildung 6: Vergleich der simulierten und beobachteten langjährigen mittleren monatlichen Abflüsse und die Verteilung der mittleren monatlichen Abflüsse in jedem Monat als Box-Whisker Plot am Pegel Hofkirchen für die unterschiedliche Zeiträume 1901-1930 und 1971-2000

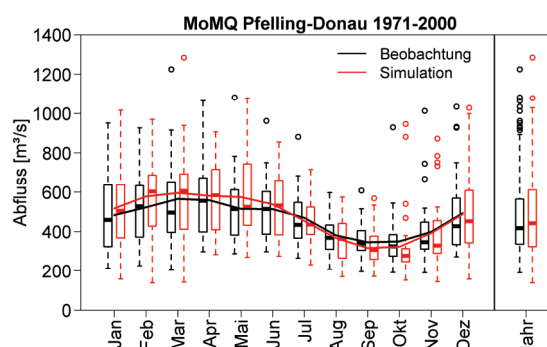


Abbildung 7 Vergleich der simulierten und beobachteten langjährigen mittleren monatlichen Abflüsse und die Verteilung der mittleren monatlichen Abflüsse in jedem Monat als Box-Whisker Plot am Pegel Pfelling für den Zeitraum 1971-2000

6.2 Methodik KLIWAS

Insgesamt wurden im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS (2009-2013) bisher 23 regionale Klimaprojektionen des EU-Projektes ENSEMBLES für die Analysen der möglichen Änderungen des Abflussregimes verwendet (siehe Kapitel 3). Trotz der stetigen Verbesserungen in den letzten Jahren weisen die Klimamodelle bei der Nachbildung der Vergangenheit systematische Abweichungen („Bias“) zu den Beobachtungen auf. Daher können die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle nicht direkt als Eingangsgröße in das Wasserbilanzmodell verwendet werden (siehe Klein et al., 2012b), sondern es muss ein Korrekturverfahren angewendet werden, um diesen systematischen Fehler zu korrigieren (Mudelsee et al., 2010).

Abbildung 8 zeigt die durch die regionalen Klimamodelle projizierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen für die nahe Zukunft (2021-2050) für das Donau Einzugsgebiet oberhalb des Pegels Hofkirchen wie sie im Rahmen von KLIWAS zur Anwendung kamen. Die projizierte Temperaturerhöhung liegt für alle meteorologischen Jahreszeiten (Dreimonatsperioden DJF, MAM, JJA, SON) zwischen 0 und 2,5°C. Bei dem Niederschlag ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

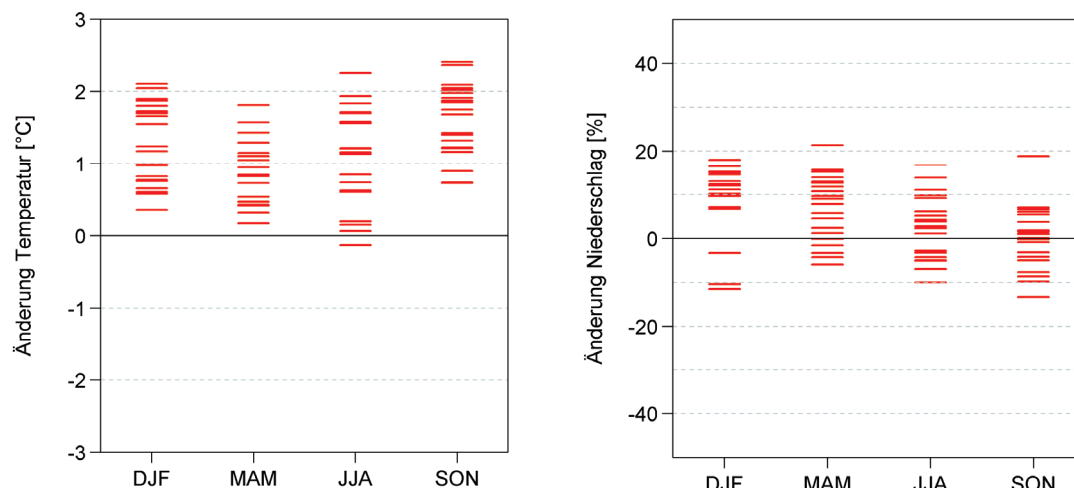


Abbildung 8: Projizierte Änderungssignale der Lufttemperatur und des Niederschlags für das Donaeinzugsgebiet oberhalb des Pegels Hofkirchen für die vier meteorologischen Jahreszeiten (Dreimonatsperioden DJF, MAM, JJA, SON) für die nahe Zukunft (2021-2050) im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971-2000). Jeder Strich entspricht der projizierten Änderung einer Modellkette (20 Klimaprojektionen)

Bei den bisher mit Hilfe dieser Klimaprojektionen an der Donau im Rahmen von KLIWAS durchgeführten Wasserbilanzmodellierungen wurde der Delta Change Ansatz (z.B. Fowler et al., 2007) angewendet, bei dem für die Teilgebiete die monatlichen Änderungssignale von Temperatur und Niederschlag in der Zukunft auf die aus den Messwerten der Vergangenheit ermittelten Gebietsmittelwerte aufgeprägt werden. Bei drei der 23 Klimaprojektionen war der systematische Fehler so groß, dass sie nach einer ausführlichen Validierung in den weiteren Untersuchungen nicht mehr verwendet wurden. Aktuell werden im Rahmen von KLIWAS weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Korrekturverfahren durchgeführt, um den Einfluss der Korrekturverfahren zu untersuchen.

Im Folgenden werden Änderungssignale zwischen den 30-jährigen Zeiträumen der simulierten Gegenwart (1971-2000) und der Mitte (2021-2050, Projektion der "nahen Zukunft") des 21. Jahrhunderts betrachtet. Es kann keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einzelner Projektionen getroffen werden, da es sich um eine szenarienbasierte Analyse handelt. Die Auswertungen signalisieren lediglich die derzeit bekannte Sensitivität des regionalen Klimas und der Donauabflüsse gegenüber einem fortgesetzten Anstieg der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen.

Die Auswertungen erfolgten in Anlehnung an das Schema der „Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins“ der internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR, 2011).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die obere Donau wurden zwischen 2001-2010 auch im Rahmen des BMBF-Forschungsprogramms GLOWA-Danube untersucht (GLOWA-Danube-Projekt, 2010). Im vorliegenden Bericht werden die in KLIWAS bisher erzielten Ergebnisse im Kontext mit den GLOWA Ergebnissen diskutiert.

6.3 Methodik GLOWA-Danube

Im Rahmen des Forschungsprojektes GLOWA-Danube wurden die Auswirkungen des Klimawandels bis zum Jahr 2060 für die obere Donau untersucht (GLOWA-Danube-Projekt,

2010). Der Großteil der GLOWA-Klimaszenarien (insgesamt 18 Klimaszenarien, bei zwei Klimaszenarien wurden die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle MM5 und REMO als meteorologische Eingangsgrößen verwendet) wurde über einen statistischen Klima-antriebsgenerator erzeugt. Vier Klimatrends, die unterschiedlich hinsichtlich der Temperatur- und Niederschlagsänderung sind, wurden in dem in GLOWA-Danube verwendeten statistischen Klima-antriebsgenerator berücksichtigt (siehe Tabelle 3).

Von jedem Klimatrend wurden mit dem statistischen Klima-antriebsgenerator 5000 Realisierungen der Zukunft generiert, aus denen mit Hilfe festgelegter Kriterien (siehe GLOWA-Danube-Projekt, 2010) jeweils 4 Klimavarianten ausgewählt wurden (Baseline, 5 warme Winter, 5 heiße Sommer, 5 trockene Jahre). Insgesamt wurden also 16 mit dem statistischen Klima-antriebsgenerator generierte Klimaszenarien verwendet.

Tabelle 3: Im Klima-antriebsgenerator verwendete Klimatrends für die Gebietsmittel der oberen Donau (GLOWA-Danube-Projekt, 2010)

Klimatrend	Temperaturtrend 1990-2100	Rel. Niederschlagstrend 1990-2100	Jährlicher Niederschlagstrend
1. IPCC regional	+3,3 °C Winter	+7 % Winter	-4,4 %
	+3,3 °C Sommer	-14 % Sommer	
2. REMO regional	+6,8 °C Winter	-4,9 % Winter	-12,6 %
	+3,7 °C Frühling	+9,1 % Frühling	
	+5,3 °C Sommer	-31,4 % Sommer	
	+5,1 °C Herbst	-14,5 % Herbst	
3. MM5 regional	+5,2 °C Winter	+7,7 % Winter	-3,5 %
	+3,2 °C Frühling	+13,1 % Frühling	
	+5,8 °C Sommer	-28,7 % Sommer	
	+4,8 °C Herbst	-1 % Herbst	
4. Fortschreibung	+5,2 °C Winter	+47 % Winter	-16,4 %
	+5,2 °C Sommer	-42 % Frühling	
		-69 % Sommer	
		-2 % Herbst	

Ein unmittelbarer Vergleich zwischen Abbildung 8 und Tabelle 3 ist nicht möglich, da die in GLOWA verwendeten Klimatrends bis zum Jahr 2100 angesetzt wurden, während die KLIWAS-Änderungssignale in Abbildung 8 nur für den Zeitraum 2021-2050 gelten. Dennoch ist erkennbar, dass insbesondere der „Fortschreibung“ genannte Niederschlagstrend in Tabelle 3 gegenüber den KLIWAS-Änderungssignalen wesentlich ausgeprägter ist: unter Annahme eines linearen Anstiegs werden bis 2050 im Winter Niederschlagszunahmen von etwa 20 % bis 25 % und demgegenüber im Frühling und Sommer Abnahmen zwischen ca. 20 % und 35 % angesetzt. Damit werden gegenüber den in KLIWAS verwendeten Klimaszenarien des EU-Projektes ENSEMBLES in GLOWA-Danube im Sommerhalbjahr auch wesentlich trockenere Niederschlagsszenarien verwendet.

Die hydrologische Modellierung in GLOWA-Danube wurde mit dem Modell PROMET (Mauser & Bach, 2009) durchgeführt. Die mit dem internen Berechnungszeitschritt von 1 h simulierten Abflusszeitreihen werden auf einen Tag aggregiert. Im Rahmen von GLOWA Danube wurde auf eine Kalibrierung des Modells verzichtet, d.h., dass die Werte der Modellparameter aus Gebietseigenschaften abgeleitet und nicht durch Optimierung an gemessenen Abflüssen an Pegeln bestimmt wurden. Mit PROMET wurden ohne Kalibrierung für das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau die Wasserflüsse für den meteorologischen Zeitraum 1970 bis 2003 modelliert und an Pegeln mit Beobachtungsdaten verglichen. Die Validierung hat gezeigt, dass PROMET die räumliche und zeitliche Variabilität der Wasserflüsse im Einzugsgebiet der Oberen Donau mit hoher Genauigkeit wiedergeben kann (GLOWA-Danube-Projekt, 2010).

6.4 Projizierte Änderungen bis zur Mitte des 21^{ten} Jahrhunderts

In den Abbildungen der im Folgenden dargestellten Auswertungen der KLIWAS Ergebnisse werden die Bandbreiten und die Änderungssignale aus GLOWA-Danube zum Vergleich in blauen Farbtönen mit dargestellt. Für eine einheitliche Vergleichsbasis wurden dazu die Tageswerte der Abflüsse aus GLOWA-Danube auf Monatswerte aggregiert und analog zu den Ergebnissen von COSERO ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus KLIWAS und GLOWA Danube werden in Kapitel 6.5 diskutiert.

Bei der Interpretation der simulierten Abflusswerte in Abbildung 9 bis Abbildung 12 ist zu beachten, dass die Werte der simulierten Zukunft immer mit der jeweiligen simulierten Referenz der Vergangenheit verglichen werden. Die KLIWAS-Simulationen der Zukunft (Ockertöne) sind also mit der KLIWAS-Simulation der Vergangenheit (rote Linie), die GLOWA-Simulationen der Zukunft (helles Blau) mit der GLOWA-Simulation der Vergangenheit (blaue gestrichelte Linie) ins Verhältnis zu setzen. Auf Grund der unterschiedlichen Simulationsergebnisse der Vergangenheit kann ein direkter Vergleich der absoluten Werte von KLIWAS und GLOWA oder der direkte Vergleich mit der Beobachtung (schwarze Linie) zu Missinterpretationen führen. Die relativen Änderungssignale zwischen den Simulationen der Zukunft und der jeweiligen Simulation der Vergangenheit sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. An dem Vergleich der Simulationen der Vergangenheit (KLIWAS: rote Linie, GLOWA: blaue gestrichelte Linie) mit der Beobachtung (schwarze Linie) kann die Güte der Simulation der Vergangenheit bewertet werden.

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den Vergleich der Bandbreiten der projizierten langjährigen mittleren monatlichen Abflüsse an den Pegeln Pfelling und Hofkirchen für die nahe Zukunft zusammen mit den simulierten und beobachteten Werten der Vergangenheit (1971-2000). Die Spannweite der KLIWAS Ergebnisse ist durch das Minimum, das Maximum, die 25 %- und 75 % Quartile sowie den Median aus den Werten der unterschiedlichen regionalen Klimaprojektionen gekoppelt mit COSERO für jeden Monat dargestellt (Ockertöne).

Für die nahe Zukunft zeigen die Ergebnisse eine moderate Abnahme der mittleren Abflüsse im Spätsommer und Herbst. Das Unsicherheitsband von 25 % – 75 %, in dem die Ergebnisse von 50 % der Abflussprojektionen liegen, ist relativ schmal.

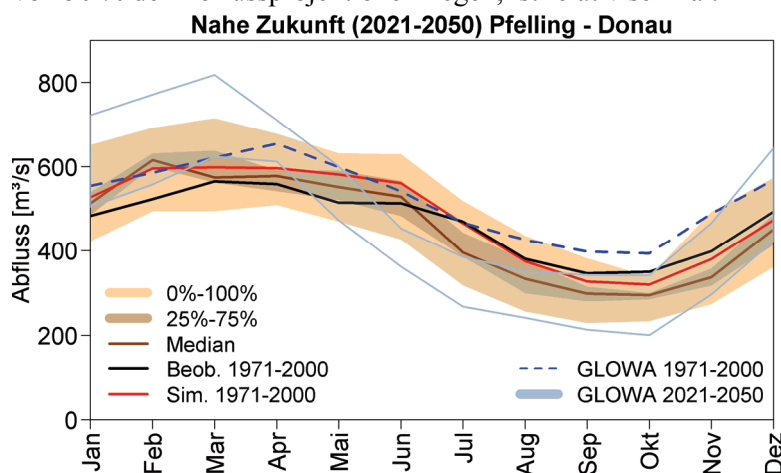


Abbildung 9: Quartile der 20 KLIWAS-Abflussprojektionen(Ockertöne) und Bandbreite (Min. – Max.) der 16 GLOWA-Danube Abflussszenarien der simulierten langjährigen Monatsmittelwerte (Blauton) der nahen Zukunft (2021-2050) verglichen mit den jeweils simulierten und beobachteten Werten des Referenzzeitraums (1971-2000) für den Pegel Pfelling.

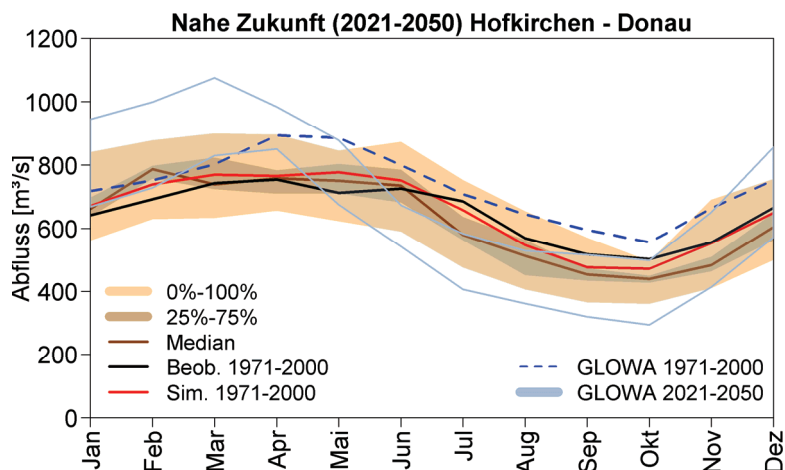


Abbildung 10: Quartile der 20 KLIWAS-Abflussprojektionen (Ockertöne) und Bandbreite (Min. – Max.) der 16 GLOWA-Danube Abflussszenarien der simulierten langjährigen Monatsmittelwerte (Blauton) der nahen Zukunft (2021-2050) verglichen mit den jeweils simulierten und beobachteten Werten des Referenzzeitraums (1971-2000) für den Pegel Hofkirchen.

Um Tendenzen über mögliche Änderungen im Bereich niedriger Abflüsse zu analysieren, wurden in Abbildung 11 und Abbildung 12 die Quartile der Dauerkurve der monatlichen Werte der Abflussprojektionen im Bereich großer Überschreitungs-, bzw. kleiner Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, für die nahe Zukunft (2021-2050) im Vergleich mit den beobachteten und simulierten Werten des Referenzzeitraums (1971-2000) dargestellt. An dem Vergleich der Simulation (rote Linie) und Beobachtung (schwarze Linie) für den Referenzzeitraum ist gut zu erkennen, dass das Modell COSERO die niedrigen mittleren monatlichen Abflüsse um ca. 10-20 m³/s unterschätzt, im Extrembereich sogar um ca. 50 m³/s. Da bei der Analyse der Änderungen immer die Werte der simulierten Zukunft mit den Werten der simulierten Vergangenheit verglichen werden (Klimasignal), wird diese Unterschätzung der niedrigen Abflüsse jedoch zumindest teilweise kompensiert. Dennoch wird das Modell aktuell im Rahmen von KLIWAS überarbeitet, um möglichst auch im extrem niedrigen Abflussbereich eine bessere Modellgüte zu erreichen. Die Bandbreite der möglichen Abnahmen in diesem Bereich liegt zwischen ca. 0 und -100 m³/s an beiden Pegeln.

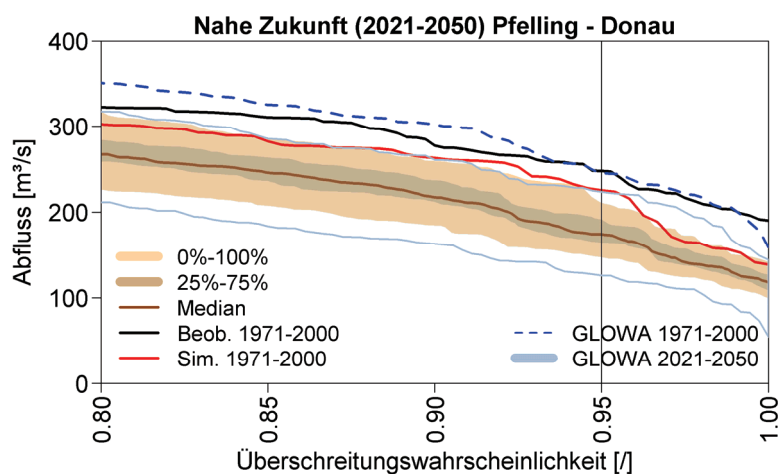


Abbildung 11: Quartile der Dauerkurve der mittleren monatlichen Werte der 20 KLIWAS-Abflussprojektionen (Ockertöne) und Bandbreite (Min. – Max.) der 16 GLOWA-Danube Abflussszenarien (Blauton) der nahen Zukunft (2021-2050) im Bereich hoher Überschreitungswahrscheinlichkeiten verglichen mit den jeweils simulierten und beobachteten Werten des Referenzzeitraums (1971-2000) für den Pegel Pfelling

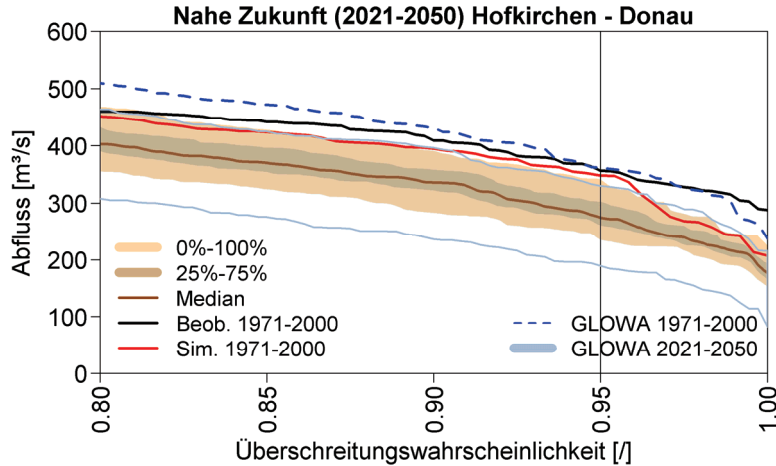


Abbildung 12: Quartile der Dauerkurve der mittleren monatlichen Werte der 20 KLIWAS-Abflussprojektionen (Ockertöne) und Bandbreite (Min. – Max.) der 16 GLOWA-Danube Abflussszenarien (Blauton) der nahen Zukunft (2021-2050) im Bereich hoher Überschreitungswahrscheinlichkeiten verglichen mit den jeweils simulierten und beobachteten Werten des Referenzzeitraums (1971-2000) für den Pegel Hofkirchen

Werden die prozentualen Änderungssignale verschiedener Abflusskennwerte zwischen der nahen Zukunft und dem Referenzzeitraum für die einzelnen Klimaprojektionen ausgewertet, ergeben sich die Änderungen in Abbildung 13 und Abbildung 14.

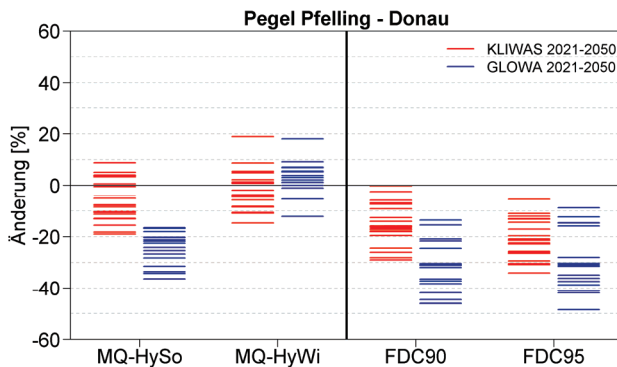


Abbildung 13 Änderungssignale der mittleren monatlichen Abflüsse im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr und der 90% und 95%-Quantile der monatlichen Abflussdauerkurve für den Pegel Pfelling. Jeder Strich entspricht der projizierten Änderung einer Modellkette (KLIWAS 20 Abflussprojektionen, GLOWA-Danube 16 Abflussszenarien) gegenüber der Simulation im Referenzzeitraums(1971-2000)

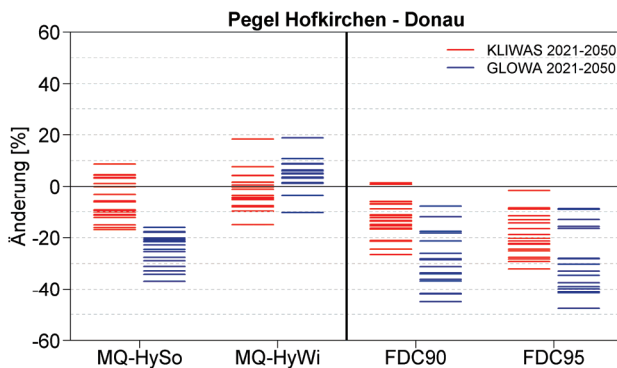


Abbildung 14 Änderungssignale der mittleren monatlichen Abflüsse im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr und der 90% und 95%-Quantile der monatlichen Abflussdauerkurve für den Pegel Hofkirchen. Jeder Strich entspricht der projizierten Änderung einer Modellkette (KLIWAS 20 Abflussprojektionen, GLOWA-Danube 16 Abflussszenarien) gegenüber der Simulation im Referenzzeitraums(1971-2000)

In Tabelle 4 sind die aus den Ergebnissen von KLIWAS ermittelten Bandbreiten der projizierten Änderungen zwischen der nahen Zukunft und dem Kontrolllauf für unterschiedliche hydrologische Kennwerte zusammengefasst. Die Wertebereiche repräsentieren nicht den vollständigen Umfang des ausgewerteten "Modell-Ensembles", sondern je Pegel und Kennwert nur den Bereich, der besonders oft durch die verschiedenen Modellketten simuliert wurde (sog. Szenarienkorridore, "innere" Bandbreiten, Verdichtungszone). Das Vorgehen zur Definition des Bereiches ist bei Nilson & Krahe (2012) erläutert. Ausreißer werden dabei außer Acht gelassen.

Für die tageswertbezogenen Parameter NM7Q (langjähriges Mittel der in jeder Saison niedrigsten 7-Tagesmittel des Abflusses) sowie die Änderungen der 90% und 95%-Quantile der Dauerkurve der mittleren täglichen Abflüsse können derzeit noch keine Aussage getroffen werden, da aus den Wasserbilanzsimulationen mit COSERO nur Monatswerte verfügbar sind. (Bis Projektende 2013 werden entsprechende Aussagen jedoch mit dem dann verfügbaren Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME möglich sein.)

Für die mittleren Abflüsse im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr gibt es keinen eindeutigen Trend. Bei den 90%- und 95%-Quantilen der Dauerkurven der mittleren monatlichen Abflüsse weisen alle Projektionen für beide Pegel auf eine Abnahme zwischen 0% und 30% hin.

Tabelle 4: Prozentuale Änderungen des Mittelwasser- (MQ) und der Quantile (FDC90%, FDC95%) der mittleren monatlichen Abflüsse zwischen 30-jährigen Zeiträumen der mit COSERO simulierten Gegenwart (1971-2000) und der nahen Zukunft (Zeitraum 2021-2050). Die Farbkodierungen blau bedeutet einen zunehmenden Trend (die überwiegende Mehrzahl der Projektionen (~80%) zeigt eine zunehmende Tendenz, hier nicht vertreten), grau bedeutet keine eindeutige Tendenz (etwa gleich viele Projektionen zeigen eine Zu- bzw. Abnahme, orange bedeutet eine abnehmende Tendenz (die überwiegende Mehrzahl der Projektionen (~80%) zeigt eine abnehmende Tendenz) für den betrachteten Kennwert

Kennwert	Pegel	Szenarienkorridore	
		Nahe Zukunft (2021-2050)	
MQ [m3/s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	Pfelling		-15% bis +5%
	Hofkirchen		-15% bis +5%
MQ [m3/s] hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	Pfelling		-10% bis +10%
	Hofkirchen		-10% bis +10%
NM7Q [m3/s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)		Aus Monatswertsimulationen nicht ermittelbar	
NM7Q [m3/s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)		Aus Monatswertsimulationen nicht ermittelbar	
FDC90 [m3/s] der Tagesmittelwerte des Abflusses		Aus Monatswertsimulationen nicht ermittelbar	
FDC95 [m3/s] der Tagesmittelwerte des Abflusses		Aus Monatswertsimulationen nicht ermittelbar	
FDC90 [m3/s] der Monatsmittelwerte des Abflusses	Pfelling		-30% bis 0%
	Hofkirchen		-25% bis -5%
FDC95 [m3/s] der Monatsmittelwerte des Abflusses	Pfelling		-30% bis -10%
	Hofkirchen		-30% bis -10%

Neben der Änderung des Abflusswertes des 90% und 95%-Quantils der Dauerkurve der mittleren monatlichen Abflüsse ist bei der Betrachtung von Niedrigwassersituationen die Änderung der Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95%-Quantils der Dauerkurve der mittleren monatlichen Abflüsse der Referenzperiode (1971-2000) in der nahen Zukunft (2021-2050) relevant.

Abbildung 15 zeigt diese Änderung für die Pegel Pfelling und Hofkirchen. Alle Projektionen zeigen eine mehr oder weniger starke Abnahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit in der nahen Zukunft. Nach diesen Ergebnissen wird das 95% Quantil der mittleren Monatswerte von 1971-2000 zukünftig also in mehr Monaten unterschritten.

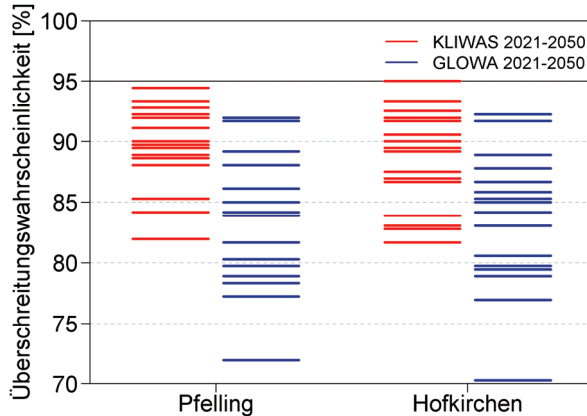


Abbildung 15 Überschreitungswahrscheinlichkeit der 95%-Quantile der simulierten Abflussdauerkurve der mittleren monatlichen Abflüsse des Zeitraums 1971-2000 in der nahen Zukunft 2021-2050 für die Pegel Pfelling und Hofkirchen. Jeder Strich entspricht der Überschreitungswahrscheinlichkeit einer Modellkette (20 Klimaprojektionen + COSERO)

6.5 Vergleich der Ergebnisse aus KLIWAS und GLOWA Danube

Bei den projizierten Änderungen der Abflussverhältnisse im Abschnitt Straubing – Vilshofen gibt es keine grundsätzlichen aber doch gewisse Unterschiede zwischen den Projekten KLIWAS und GLOWA Danube.

Die von GLOWA Danube projizierte deutliche Veränderung der Saisonalität der langjährigen Monatsmittelwerte in Abbildung 9 und Abbildung 10 ist bei den Ergebnissen von KLIWAS nicht zu erkennen. Insbesondere das Abflussmaximum im März und das -minimum im Oktober sind hierbei deutlich ausgeprägter. Diese höhere projizierte Abnahme der Abflüsse im Sommer zeigt sich auch an der gegenüber den Ergebnissen aus KLIWAS deutlichen Abnahme des mittleren Abflusses im Sommerhalbjahr in Abbildung 13 und Abbildung 14.

Eine Ursache für diesen starken Rückgang im Sommer könnten die in GLOWA Danube angesetzten Klimatrends sein (siehe Tabelle 3 und dazugehörige Diskussion). Bei allen angesetzten Trends wird ein starker Rückgang der sommerlichen Niederschläge angenommen, der sich in den Änderungssignalen bei den im Rahmen von KLIWAS verwendeten regionalen Klimaprojektionen bis zur Mitte des 21^{ten} Jahrhunderts nicht widerspiegelt (siehe Abbildung 8).

Beim Vergleich der projizierten Dauerkurven der mittleren monatlichen Abflüsse ist im Bereich kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten (z.B. 90% und 95% Überschreitungswahrscheinlichkeit) die Bandbreite der möglichen Änderungen von GLOWA-Danube deutlich breiter (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12). Im Bereich der niedrigen Abflüsse weisen die Ergebnisse von GLOWA-Danube insgesamt geringere Werte auf als die KLIWAS-Projektionen. Sowohl KLIWAS- als auch GLOWA-Ergebnisse weisen auf ausgeprägtere Niedrigwasserverhältnisse in diesem Abschnitt der Donau hin, ausgeprägter in den GLOWA-Projektionen. Dies zeigt sich noch besser in den Änderungssignalen in Abbildung 13 und

Abbildung 14 sowie der Änderung der Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95% Quantils der mittleren monatlichen Werte des Zeitraum 1971-2000 in der nahen Zukunft (2021-2050) in Abbildung 15. Bei vergleichbaren Streubreiten der Änderungssignale zeigen die Bandbreiten bei GLOWA im Vergleich zu KLIWAS insgesamt eine etwas stärkere Abnahme der verschiedenen Kennwerte.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen resultieren aus den unterschiedlichen methodischen Ansätzen (GLOWA-Danube: statistischer Klimagenerator, KLIWAS: dynamische regionale Klimaprojektionen als Grundlage der meteorologischen Randbedingungsdaten der Wasserhaushaltsmodelle) und damit zusammenhängend den unterschiedlichen angesetzten Temperatur- und Klimatrends und deren saisonale Verteilung für die Zukunft (vgl. Tabelle 3 und dazugehörige Diskussion) sowie den unterschiedlichen hydrologischen Modellansätzen. Das bei GLOWA Danube verwendete Wasserhaushaltsmodell PROMET rechnet zeitlich (1 h) und räumlich (1 km Raster) hoch aufgelöst, das bei dem im Rahmen von KLIWAS verwendeten Modell COSERO berechnet die Wasserbilanz räumlich (Teilgebiete) und zeitlich (1 Monat) aggregiert.

7 Zusammenfassung

Die Analyse der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Donau im Rahmen der BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS und des FP7 EU-Projektes ECCONET wurde mit einem Multi-Modell-Ansatz durchgeführt. Nur mit einem derartigen Ansatz lassen sich die Unsicherheiten über die mögliche Entwicklung des Klimas in der Zukunft berücksichtigen und quantifizieren. Für die vorliegende Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Donau wurde das Wasserbilanzmodell COSERO verwendet. Das Modell liefert Aussagen über mittlere monatliche Abflüsse. Bei der Simulation der Vergangenheit von 1887-2007 zeigte sich, dass das Modell in der Lage ist, hydrologische Kennwerte in unterschiedlichen Bezugszeiträumen plausibel abzubilden.

Bei der Auswertung der gemessenen mittleren täglichen Abflüssen der Vergangenheit an den Pegeln Pfelling und Hofkirchen hat sich keine signifikante Änderung der Abflüsse im Mittel- und Niedrigwasserbereich gezeigt, bzw. teilweise wurde eine Erhöhung der Niedrigwasserkennwerte im letzten Jahrhundert beobachtet (deren Ursachen jedoch nicht ohne Weiteres geklärt werden können).

Die Simulationsergebnisse mit regionalen Klimaprojektionen zeigen für die nahe Zukunft (2021-2050) keine signifikanten Veränderungen des mittleren jährlichen Abflusses. Auch bei der getrennten Analyse der Änderung der mittleren Abflüsse im Sommer- und Winterhalbjahr ergaben sich durch die Abflussprojektionen für die nahe Zukunft keine klare Tendenz hinsichtlich einer Zu- bzw. Abnahme.

Da bisher Monatswerte untersucht wurden, können mit den Ergebnissen keine Aussagen über Hochwasser und nur indirekte Aussagen über Niedrigwasserhäufigkeiten (z.B. über die Dauerlinie der Monatswerte) in der Zukunft getroffen werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes GLOWA und anderen Projekten (siehe Literaturverweise in Nilson et al., 2012b) zeigten sich für größere Gebiete an der Donau keine signifikante Erhöhungen der Hochwasserabflüsse bis zur Mitte des Jahrhunderts.

Werden die Änderungen der 90% und 95%-Quantile der Dauerkurven der mittleren monatlichen Abflüsse ausgewertet, zeigen alle Abflussprojektionen eine Abnahme dieser Niedrigwasserindikatoren zwischen 0% und 30%. Da die Quantile der Dauerkurven der täglichen Werte und der monatlichen Werte korreliert sind, ist zu erwarten, dass sich die Änderung der Quantile der Tageswerte in einen ähnlichen Bereich bewegen. Die Ergebnisse weisen also auf eine Abnahme des schiffahrtsrelevanten Kennwert RNQ⁵ (94% Quantil der Abflussdauerkurve) zwischen 0% und 30% in der nahen Zukunft hin.

Die projizierten Änderungen der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GLOWA-Danube sind von der Tendenz her vergleichbar mit den Ergebnissen von KLIWAS (Abnahme der mittleren Abflüsse im Spätsommer und Herbst, Abnahme der mittleren monatlichen Abflüsse im Bereich hoher Überschreitungswahrscheinlichkeiten). Allerdings weisen die Ergebnisse

⁵ RNQ ist der zum Regulierungswasserstand RNW gehörige Abfluss, der an 94% der Tage einer Periode (z.B. Jahresreihe 1961/1990) erreicht oder überschritten wurde, das entspricht 343 Überschreitungstagen im Jahr

von GLOWA Danube eine deutlich höhere Abnahme, insbesondere im Bereich der niedrigen Abflüsse auf (projizierte Abnahme der 90% und 95% Quantile der Dauerkurve der mittleren monatlichen Abflüsse zwischen -10% bis -50%). Die Unterschiede zwischen diesen beiden Projekten resultieren aus den unterschiedlichen Ansätzen in der Generierung der Zukunftsszenarien des Klimas sowie der hydrologischen Modellierung.

Eine detaillierte Analyse und damit Aussagen über die Änderung der Kennwerte auf Tageswertbasis werden erst mit dem momentan im Rahmen von KLIWAS im Aufbau befindlichen zeitlich und räumlich detaillierten Wasserhaushaltsmodell LARSIM_ME möglich sein. Diese Ergebnisse werden voraussichtlich Mitte 2013 vorliegen.

Literaturverzeichnis

- BMVBS (2012): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Tagungsband der 2. Statuskonferenz am 25. und 26. Oktober 2011, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- Böhm, R., I. Auer, W. Schöner, M. Ganekind, C. Gruber, A. Jurkovic, A. Orlik & M. Ungersböck (2009): Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts-Klimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. In: Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage. Wiener Mitteilungen, Band 216.
- ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. Final report ENSEMBLES.
- Fowler, H. J., S. Blenkinsop & C. Tebaldi (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27(12), 1547-1578
- GLOWA-Danube-Projekt (2010): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau, LMU München, München.
- IKSR (Hrsg.) (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. Bericht 188d.
- Klein, B., B. Gnandt, I. Lingemann, T. Prozny & G. Szepszo (2010): Definition of Climate Change Scenarios. Deliverable 1.2, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.
- Klein, B., P. Krahe, I. Lingemann, E. Nilson, H. Kling & M. Fuchs (2011a): Assessing Climate Change Impacts on Water Balance in the Upper Danube Basin based on a 23 Member RCM Ensemble. XXVth Conference of the Danubian Countries, 1-11, Budapest, Hungary.
- Klein, B., I. Lingemann, P. Krahe & E. Nilson (2011b): Mögliche Änderungen des Abflussregimes an der Donau im 20. und 21. Jahrhundert. Tagungsband 2. KLIWAS Statuskonferenz, 111-116, BMVBS, Berlin.
- Klein, B., I. Lingemann, E. Nilson, G. Balint & B. Gnandt (2012a): Climate Change Effects on Hydrology. Deliverable 1.3 (Restricted to other Programme Participants), ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.
- Klein, B., I. Lingemann, E. Nilson, P. Krahe, T. Maurer & H. Moser (2012b): Key concepts for the analysis of climate change impacts for river basin management in the River Danube. *River Systems* 20(1-2), 7-21
- Kling, H., M. Fuchs & M. Paulin (2011): Wasserbilanzmodellierung und Auswirkung der Klimaänderung für den deutschen Abschnitt der Donau. Hydrologische Studie, Endbericht, Pöyry Energy GmbH.
- Kling, H., M. Fuchs & M. Paulin (2012): Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424, 264-277

- Kling, H., H. P. Nachtnebel & J. Fürst (2005): Mittlere jährliche aktuelle Gebietsverdunstung aus der Wasserbilanz - Mean annual areal actual evapotranspiration using water balance data. Karte 3.3. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Ed.): Hydrologischer Atlas Österreichs, Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.
- LMU (2012): Danube Study - Climate Change Adaptation. Final Report, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Mausser, W. & H. Bach (2009): PROMET - Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology* 376(3-4), 362-377
- Mudelsee, M., D. Chirla, T. Deutschländer, C. Döring, J. Härter, S. Hagemann, H. Hoffmann, D. Jacob, P. Krahe, G. Lohmann, C. Moseley, E. Nilson, O. Panferov, T. Rath & B. Tinz (2010): Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. *Mitteilungen DMG 03 / 2010* www.dmg-ev.de Heft 03
- Nilson, E. & P. Krahe (2012): Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum. *FORUM FÜR HYDROLOGIE UND WASSERBEWIRTSCHAFTUNG* 31, 287-293
- Nilson, E., P. Krahe & K. Görden (2012a): Climate Projections for the Greater Alpine Region - An evaluation of selected regional climate simulations with respect to hydrometeorological variations., Bericht BfG-1749, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Nilson, E., I. Lingemann, B. Klein & P. Krahe (2012b): Impact of Hydrological Change on Navigation Conditions. Deliverable 1.4, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.
- Petrovic, P. (2006): Basin - Wide Water Balance in the Danube River Basin. . The Danube and its Basin - Hydrological Monograph, Follow-up Volume VIII, Regional Co-operation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO and Water Research Institute Bratislava, Slovakia.
- Schweighofer, J., T. Hartl, E. Nilson, B. Klein, A. Klein Tank, T. Prozny, G. Balint, B. Gnant, A. Horanyi & G. Szepszo (2010): Selected Navigation Routes and Present Climate Conditions. Deliverable 1.1, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.
- Schweighofer, J., E. Nilson, B. Klein, I. Lingemann, P. Krahe, G. Balint, B. Gnant, A. Horanyi & G. Szepszo (2012): Impact of Hydrological Change on Hydrological Conditions of Navigation - Consolidated Workpackage Report. Deliverable 1.5, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.