

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Entwicklung von Kleinwasserkraftwerken unter dem
Aspekt des Klimawandels in der Steiermark“

Verfasser

Christian Semmelrock BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Masterstudium Geographie

Betreuerin / Betreuer:

Ao.Univ. -Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann

*DU BIST NICHT TOT, DU WECHSELST NUR DIE RÄUME.
DU LEBST IN UNS UND GEHST DURCH UNSERE TRÄUME.*

*MICHELANGELO
GEWIDMET MEINER SCHWESTER ANJA,
DIE UNS VIEL ZU FRÜH VERLASSEN MUSSTE.
DU FEHLST UNS!*

Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, 12.03.2014

Vorwort

Bereits in den ersten Semestern meines Bachelor-Studiums an der Karl-Franzens-Universität Graz kam ich mit der Thematik Hydro(morpho)logie erstmals in Berührung, sie bildete sogar einen Themenschwerpunkt während meiner Studienzeit in Graz. Im Laufe zweier Praktika bei der damaligen Fachabteilung „19A – Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft“ des Landes Steiermark gewann ich einen Einblick in den Bereich der Kleinwasserkraftwerke.

Nach meinem Wechsel an die Universität Wien, der aus fachlichem Interesse vollzogen wurde, bekam ich einen Anstoß, meine Masterarbeit im Themenbereich Geomorphologie und Kleinwasserkraftwerke unter dem Aspekt des Klimawandels zu verfassen. Durch ein im Wintersemester 2012/2013 besuchtes Seminar, welches sich mit den aktuellen Problemstellungen der Hydrologie beschäftigte, wie beispielsweise dem Feststofftransport in Flüssen im Rahmen des Klimawandels und der Problematik der Stauraumverfüllung, fasste ich den Entschluss, jene zuvor genannten Teilbereiche zu verbinden und somit die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kleinwasserkraftwerke, mit einem speziellen Fokus auf die Steiermark, zu untersuchen.

Ein herzlicher Dank gilt meiner Betreuerin Frau Ao.Univ.-Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann, welche mich durch diese Masterarbeit begleitet hat und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Außerdem möchte ich Herrn Dr. Uwe Kozina, Geschäftsführer des Umwelt-Bildungs-Zentrums Steiermark, danken, denn er gab mir weitere Anstöße, diese Arbeit in Angriff zu nehmen, sowie meiner Mutter und meinem Vater für die tatkräftige Unterstützung während meines gesamten Studiums und für das intensive Korrekturlesen. Überdies gilt mein Dank auch Herrn DI Thomas Buchsbaum (Verein Kleinwasserkraft Österreich), der den in dieser Masterarbeit implementierten Fragebogen an die Betreiber von Kleinwasserkraftwerken in der Steiermark übermittelt hat.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich auch an meine Freundin Magdalena richten, die mir in der Zeit meines intensiven Arbeitens eine enorme Stütze war und die mich in guten wie in schlechten Zeiten immer ermutigt hat, meine Ziele zu verfolgen.

Zusammenfassung

Bezugnehmend auf die Forschungen des Wegener Instituts in Graz/Österreich (in der Arbeit geführt als GOBIET et al. 2012) dürften sich sowohl die Niederschlagssumme, mit Ausnahme weniger Bezirke südlich der Mur-Mürz-Furche in den Sommermonaten, als auch die Temperatur in der Steiermark bis 2050 deutlich erhöhen. Diese Veränderung könnte somit auch die Abflüsse und den Feststoffgehalt der steirischen Flüsse beeinflussen und somit zu Problemen bei Kleinwasserkraftwerken führen.

Aus diesem Grund zeigt diese Masterarbeit auf, wie sich neben dem Niederschlag sowie der Temperatur auch die Abflüsse in der Steiermark in der Periode 1981–2010 an jeweils achtzehn Messstationen bereits verändert haben und welche Änderungen hinsichtlich der Abflüsse und einhergehend des Feststoffgehalts in den steirischen Flüssen bis 2050 möglicherweise zu erwarten sind. Zudem wird erörtert, unter welchen negativen Konsequenzen steirische Kleinwasserkraftwerksbetreiber/-besitzer gegenwärtig zu leiden haben und welche Problematiken die möglichen Entwicklungen des Abflusses und des Feststoffgehalts für die Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark bis 2050 mit sich bringen könnten. Es wird außerdem gezeigt, welche alternativen Adaptionmöglichkeiten in Zukunft negative Konsequenzen an den Kleinwasserkraftwerken reduzieren und verhindern könnten.

Abstract

According to the research done by the Wegener Institute in Graz/Austria (in this thesis cited as GOBIET et al. 2012), precipitation, with the exception of some districts in the south of the Mur-Mürz-Furche during the summer, as well as temperature are expected to increase in Styria until 2050. These scenarios could also affect river discharge and sediment yields in Styrian rivers and thus lead to problems at small hydro power stations.

For this reason, this master thesis explores how precipitation and temperature, as well as river discharge, changed at eighteen different monitoring stations in Styria during the period of 1981–2010. This thesis also discusses which changes in river discharges and sediment yields could possibly appear in the years leading up to 2050. Furthermore, this thesis presents problems of Styrian small-hydropower operators/owners and also shows which negative consequences they might face under a potential higher river discharge and a higher sediment yield in the future. Some adaption possibilities will also be presented in order to show alternative ways to reduce or even prevent negative consequences.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Zusammenfassung/Abstract	9
Inhaltsverzeichnis	11
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	16
Einleitung	19
1 Theorieteil – Kleinwasserkraft	21
1.1 Definition der Kleinwasserkraft	21
1.2 Energiewirtschaftliche sowie physikalische Grundlagen der Wasserkraftnutzung	22
1.3 Die Entwicklung der Anzahl von Kleinwasserkraftwerken im Laufe der Zeit	23
1.4 Komponenten einer Wasserkraftanlage	25
1.5 Erläuterung der verschiedenen Wasserkraftwerkstypen	26
1.5.1 Einteilung nach der nutzbaren Fallhöhe	27
1.5.2 Einteilung nach der Triebwasserführung	28
1.5.3 Einteilung nach der Speichermöglichkeit	29
1.5.4 Weitere Kraftwerkstypen	31
1.6 Vorteile von Kleinwasserkraftwerken	31
1.7 Negative Auswirkungen von Kleinwasserkraftwerken	33
1.7.1 Negative Konsequenzen flussabwärts	36
1.7.2 Negative Konsequenzen flussaufwärts	38
1.7.3 Negative Konsequenzen im Stauraum	38
1.8 Mögliche ökologische Auswirkungen durch den Kraftwerksbau	39
1.9 Mögliches Konfliktpotential durch den Bau von Kleinwasserkraftwerken	39
1.10 Rechtliche Grundlagen beim Bau von Wasserkraftanlagen	40
2 Der Klimawandel in der Steiermark	41
2.1 Graz und Graz – Umgebung	43
2.2 Oststeiermark	44
2.3 Weststeiermark	45
2.4 Obersteiermark	47
2.5 Zusammenfassung der Klimaszenarien	48

3 Feststofftransport in Fließgewässern	49
3.1 Systematik	49
3.2 Feststofftransport in Flüssen	52
3.3 Der Beginn des Feststofftransports	53
3.4 Der Einfluss des Klimawandels auf die Erosionsraten und Sedimentbewegungen	56
3.4.1 Mögliche Entwicklung der Bodenerosion	56
3.4.2 Mögliche Entwicklung des Abflusses, der daraus resultierenden Erosion und des Feststoffgehalts in Flüssen	57
3.5 Änderung von Sedimentfracht und Erosionsraten – weitere Gründe	60
4 Praxisteil	63
4.1 Die Entwicklung der Temperatur, des Niederschlags und des Abflusses in der Periode 1981–2010	63
4.1.1 Datengrundlage	64
4.1.2 Methodik	65
4.2 Vergleich der Entwicklungen des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	66
4.3 Jahreszeitliche Entwicklungen des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	69
4.3.1 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Wintermonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	69
4.3.2 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Frühjahrsmonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	70
4.3.3 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Sommermonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	72
4.3.4 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Herbstmonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	73
4.4 Entwicklung des Schwebstoffgehalts in der Periode 2008–2010	74
5 Statistische Analyse	75
5.1 Korrelation zwischen Abfluss und Niederschlag	76
5.2 Korrelation zwischen Abfluss und Temperatur	80
5.3 Korrelation zwischen Abfluss und Schwebstoffgehalt	84
6 Zur Methodik der Fragebogenstudie	85
6.1 Erläuterungen zum Fragebogen	85
6.2 Präsentation der Umfrageresultate – allgemeiner Überblick	87
6.3 Präsentation der Umfrageresultate – vertiefender Teil	91

7 Mögliche Entwicklung der Abflüsse und Feststoffgehalte in steirischen Flüssen im Rahmen des Klimawandels bis 2050	97
7.1 Methodik	97
7.2 Datengrundlage	98
7.3 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts über das gesamte Jahr bis 2050	102
7.4 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Winter bis 2050	103
7.5 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Frühjahr bis 2050	104
7.6 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Sommer bis 2050	105
7.7 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Herbst bis 2050	107
7.8 Die möglichen Folgen der modellierten Abfluss- und Feststoffszenarien auf die Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark bis 2050	108
8 Alternativen zur Bekämpfung der Stauraumverfüllung	110
8.1 Minimierung des Sedimenteintrags in das Reservoir	111
8.2 Minimierung der Absetzung von Sedimenten im Stauraum	112
8.3 Ausgleich für den erlittenen Speicherverlust	114
8.4 Entfernung des Sediments aus dem Reservoir	115
9 Schlussbetrachtung	117
Literatur	123
Internetquellen und Geodatenquelle	137
Anhang	138
Fragebogen	138
Prozentuelle Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur im Vergleich zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010	140
Statistische Analysen (Regressionsanalysen)	142
Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses bis 2050 unter der Annahme der mittleren und extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)	146
Curriculum Vitae	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl der jährlich wasserrechtlich bewilligten Wasserkraftanlagen seit 1880 (Stand: 18.05.2010); Quelle: http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10177661/4748031	23
Abbildung 2: Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung über 20 kW in der Steiermark (Stand November 2013); Layout: Christian Semmelrock; Quelle - Geodaten: © GIS-Steiermark, 2013	24
Abbildung 3: Darstellung der verschiedenen Typen von Ausleitungskraftwerken; Quelle: GIESECKE und MOSONYI (2005: 93)	29
Abbildung 4: Verteilung von Sedimenten in einem Stauraum und Unterteilung des Sedimentprofils; Quelle: Mahmood (1987: 49) – eigene Ergänzungen	36
Abbildung 5: Differente Szenarien des IPCC über die Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100; Quelle: IPCC (2007: 14)	42
Abbildung 6: Schema zum Feststofftransport; Quelle: PATT et al. (1998: 167)	50
Abbildung 7: Hjulström-Diagramm; Quelle: http://www.geodsz.com/deu/d/Hjulström-Diagramm	54
Abbildung 8: Darstellung der Schubspannung; Quelle: FUB 2007 ^c	55
Abbildung 9: Zeitreihen des jährlichen Niederschlags, der Sedimentladung und des Abflusses. (a) kumulierter Abfluss und Schwebstofffracht, (b) jährliche Niederschlags-summe, (c) jährlicher Abfluss, (d) jährliche Sedimentladung; Quelle: ZHU et al. (2008: 432)	60
Abbildung 10: Entwicklung von Abfluss und Sedimentgehalt nach anthropogenem Eingriff durch Abholzung am Beispiel des Bei-Nan River; Quelle: WALLING (2009:8)	61
Abbildung 11: Verortung der benutzten Messstationen in der Steiermark; eigene Darstellung	64
Abbildung 12: Entwicklung des Abflusses in der Periode 1981–2010 (Jahresmittel) Salza (Gußwerk); Datenquelle: www.ehyd.gv.at	68
Abbildung 13: Entwicklung des Niederschlags in der Periode 1981–2010 (Jahressumme) Salza (Gußwerk); Datenquelle: www.ehyd.gv.at	68
Abbildung 14: Entwicklung der Temperatur in der Periode 1981–2010 (Jahresmittel) Salza (Mariazell); Datenquelle: ZAMG (Dr. Axel Podesser)	69
Abbildung 15: Entwicklung des Schwebstoffgehalts in der Periode 2008–2010 (Monatssumme) Sulm	75
Abbildung 16: Darstellung des Bestimmtheitsmaßes für die Frühjahrsmonate 1981–2010 (Untertalbach) Tetter; Datenquelle: www.ehyd.gv.at ; ZAMG	82
Abbildung 17: Verortung der für die Modellierungen benutzen Einzugsgebiete in der Steiermark; eigene Darstellung	101
Abbildung 18: Hydrosuction-Bypass; Quelle: SUFLITA et al. (2010: 58)	114
Abbildung 19: Vergleich "Pressure-Flushing" und "Empty-Flushing"; Quelle: WANG et al. (2009: 379)	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Wintermonate (Abfluss/Niederschlag) – eigene Erhebung	77
Tabelle 2: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Frühjahrsmonate (Abfluss/Niederschlag) – eigene Erhebung	78
Tabelle 3: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Sommermonate (Abfluss/Niederschlag) – eigene Erhebung	79
Tabelle 4: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Herbstmonate (Abfluss/Niederschlag) – eigene Erhebung	80
Tabelle 5: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Wintermonate (Abfluss/Temperatur) – eigene Erhebung	81
Tabelle 6: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Frühjahrsmonate (Abfluss/Temperatur) – eigene Erhebung	82
Tabelle 7: Auswertung Frage 2: Alter des Kraftwerks; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 8: Auswertung Frage 3: Typ des Kleinwasserkraftwerks; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 9: Auswertung Frage 5: Probleme mit Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 10: Auswertung Frage 6: Vorgehen bei Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 11: Auswertung Frage 7: Ursache von Feststoffeintrag in Fluss → Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 12: Auswertung Frage 8: Probleme, welche durch meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 13: Auswertung Frage 9: Aus Frage 9 resultierende Probleme; Quelle: eigene Erhebung	87
Tabelle 14: Auswertung Frage 10: Auslöser für Änderungen des Feststoffgehalts in der Zukunft; Quelle: eigene Erhebung	88
Tabelle 15: Auswertung Frage 11: Gedanken hinsichtlich Klimawandel; Quelle: eigene Erhebung	88
Tabelle 16: Auswertung Frage 12: Konsequenzen durch Klimawandel für Kraftwerke; Quelle: eigene Erhebung	88
Tabelle 17: Zur Abflussmodellierung benötigte Daten; Quelle: eigene Erhebung und GOBIET et al. (2012)	101

Abkürzungsverzeichnis

AW	Ausleitungskraftwerk
BGBL	Bundesgesetzblatt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
e	zu erwartende prozentuelle Änderung der Evapotranspiration (Modell nach WIGLEY und JONES 1985 in DINGMAN 2002: 82)
eHYD	elektronische hydrographische Daten
ESHA	European Small Hydropower Association
E _t	Evapotranspiration
EUREC	The Association of European Renewable Energy Research Center
FUB	Freie Universität Berlin
g	Beschleunigung durch Schwerkraft in m/sec
GWh	Gigawattstunde
h _{eff}	Nettofallhöhe des Wassers auf Turbine
HISTALP	Historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region
HQ1	1-jähriges Hochwasserevent (Hochwasserereignis, welches im 1-jährigen Rhythmus erwartet werden kann)
ICOLD	International Commission on Large Dams
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JMT	Jahresmitteltemperatur
jz	Jahreszeit
Kap.	Kapitel
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
kW	Kilowatt
KWKW	Kleinwasserkraftwerk
LW	Laufkraftwerk
m ³	Kubikmeter
m/sec	Meter pro Sekunde
m ³ /sec	Kubikmeter pro Sekunde
MW	Megawatt
n	Anzahl
NOE	Niederösterreich
η _t	hydraulische Effizienz der vorhandenen Turbine (Turbinenwirkungsgrad)

p	zu erwartende prozentuelle Änderung des Niederschlags (Modell nach WIGLEY und JONES 1985 in DINGMAN 2002: 82)
P	Leistungsabgabe einer Turbine in Watt
P_1	Precipitation/Niederschlag
ρ_w	Dichte des Wassers in kg/m^3
q	zu erwartende prozentuelle Änderung des Abflusses (Modell nach WIGLEY und JONES 1985 in DINGMAN 2002: 82)
Q	Ausbaudurchfluss
σ	Vektor, welcher im rechten Winkel zur Oberfläche hangabwärts gerichtet ist (Schubspannung)
R	runoff/Abfluss
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
r^2	Bestimmtheitsmaß
SHP	Small hydro power (station)
SRES	Special Report on Emission Scenarios
STMK12	Klimaszenarien für die Steiermark bis 2050
SW	Speicherkraftwerk
τ	parallel zur Oberfläche geführter, hangabwärtsgerichteter Vektor zur Belegung (Schubspannung)
τ_0	Schubspannung
TW	Trinkwasserkraftwerk
w	Abflussverhältnis
WRG	Wasserrechtsgesetz
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Einleitung

Infolge des Klimawandels erfahren nachhaltige Energiegewinnungssysteme vermehrt großes Interesse. Daher erlebte die Kleinwasserkraft in den letzten Jahrzehnten in Österreich wahrlich einen Aufschwung. Somit ist die Anzahl vor allem privater Kleinwasserkraftwerke in den vergangenen Jahren erheblich angewachsen.

Wie sich die Kleinwasserkraftwerke bei einem möglichen Anstieg der Niederschlagsmengen und einem damit einhergehenden größeren Abfluss sowie einer erhöhten Sedimentfracht verhalten könnten, ist bisher kaum ein Thema für die Betreiber gewesen. Der Fokus dieser Masterarbeit liegt darin, sich mit der Frage zu beschäftigen, wie sich das Klima und der Abfluss in der Steiermark in den letzten Jahrzehnten verändert haben und welche Auswirkungen der Klimawandel auf die bestehenden Kleinwasserkraftwerke bis 2050 haben könnte. Außerdem soll die vorliegende Masterarbeit aufzeigen, mit welchen negativen Konsequenzen bereits gegenwärtig die Kleinwasserkraftwerksbetreiber konfrontiert sind und auf welche Probleme man in Zukunft verstärkt zu achten haben könnte. Zudem folgen Erläuterungen zu Adaptionsmöglichkeiten, welche Managementszenarien man für ein vernünftiges Betreiben eines Kleinwasserkraftwerks in Zukunft erwägen sollte, um möglichen vermehrt vorkommenden Stauraumverfüllungen entgegenzuwirken.

Um dem Leser dieser Arbeit einen guten Überblick zu verschaffen, werden grundlegende Thematiken im ersten Teil dieser Masterarbeit genauer beleuchtet: In der Einleitung wird die Definition der Kleinwasserkraft geboten, anschließend folgt eine Darlegung der verschiedenen Typen der Kleinwasserkraftwerke sowie der unterschiedlichen Vor- und Nachteile dieser Energiegewinnungsmöglichkeit. Außerdem soll ein Hauptaugenmerk auch auf jenen Problemen liegen, die sich bereits jetzt durch den Bau von Kleinwasserkraftwerken ergeben haben, somit erfährt die Stauraumverfüllung besondere Beachtung.

Anschließend wird auf die möglichen Klimaszenarien der Steiermark, welche auf den Prognosen des Wegener Centers (in der Arbeit geführt als GOBIET et al. 2012) basieren, eingegangen. Hier liegt der Schwerpunkt darin, auf welche Art und Weise sich die einzelnen Regionen der Steiermark bis 2050 unter dem Aspekt des Klimawandels entwickeln könnten. Zudem soll kurz dargestellt werden, wie der Prozess des Feststofftransports in Flüssen von Statten geht.

Der Praxisteil dieser Masterarbeit bietet im ersten Schritt einen Überblick, inwiefern sich neben den Abflüssen der steirischen Flüsse auch die Niederschläge sowie die Temperatur in der Periode 1981–2010 entwickelt haben. Mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Statistikpro-

grammen wird untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen ansteigenden Niederschlagssummen beziehungsweise Temperaturen und einem erhöhten Abfluss sowie zwischen dem vorhandenen Abfluss und der Schwebstofffracht gibt. Im nächsten Abschnitt erfolgt die Analyse und Präsentation der Ergebnisse der an die Kleinwasserkraftwerksbesitzer ausgeteilten Fragebögen. Dadurch soll ein Überblick geschaffen werden, welche Probleme sich bereits in den letzten Jahren für die Betreiber von Kleinwasserkraftwerken in der Steiermark ergeben haben und ob regionale Unterschiede existieren. Aufbauend auf der Zusammenschau der Periode 1981–2010, der statistischen Analyse und den Auswertungen der Fragebögen wird versucht, mit Hilfe der Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012) und eines Modells von WIGLEY und JONES (1985), welches von DINGMAN (2002) zur Verfügung gestellt wird, eine Prognose zu erstellen, wie sich der Sedimentgehalt und der Abfluss der steirischen Flüsse bis ins Jahr 2050 in den vier Jahreszeiten verändern könnten. So meinten BÖHM et al. (o.J.: 21), dass die Anforderungen in Bezug auf den Sedimenthaushalt die Betreiber von Wasserkraftanlagen zukünftig vor Probleme stellen könnten.

Zur Untersuchung der zuvor präsentierten Teilbereiche stellt der Verfasser dieser Masterarbeit folgende Hypothesen auf. Es wird Gegenstand dieser Arbeit sein, diese zu bestätigen oder zu widerlegen, um in weiterer Folge Prognosen treffen zu können.

- Bereits in der Periode 1981–2010 gab es einen Anstieg der Temperatur, des Niederschlags und des Abflusses in der Steiermark.
- Es herrscht ein Zusammenhang zwischen den Niederschlagssummen und den Abflusswerten im Zeitraum 1981–2010.
- Bei nivalen Flüssen gibt es einen Zusammenhang zwischen den vorherrschenden Temperaturen und der Abflussganglinie im Zeitraum 1981–2010.
- Es herrscht ein Zusammenhang zwischen den Abflusswerten und dem Feststoffgehalt in Flüssen im Zeitraum 2008–2010.
- Im Laufe des 21. Jahrhunderts werden durch höhere Niederschlagssummen auch die Abflüsse und einhergehend der Feststoffgehalt von Flüssen ansteigen.
- Ein verstärktes Vorkommen von Feststoffen in einem Fluss erhöht die Gefahr von Stauraumverfüllungen und anderen geomorphologisch bedingten Problemen bei bestehenden Kleinwasserkraftwerken.
- Steirische Kleinwasserkraftwerksbesitzer haben sich bereits Gedanken gemacht, ob und wie sich der Klimawandel auf ihr Kraftwerk auswirken könnte.

1 Theorieteil – Kleinwasserkraft

Im ersten Teil dieser Arbeit gilt es, den Fachbereich Kleinwasserkraft und Kleinwasserkraftwerke, in Folge kurz KWKW genannt, zu definieren und genauer zu erläutern. So wird auf die unterschiedlichen Kleinwasserkraftwerktypen eingegangen und neben den positiven Begleiterscheinungen eines Kleinwasserkraftwerkbaus sollen auch die negativen erklärt werden. Außerdem liegt der Fokus des ersten theoretischen Teilbereichs dieser Arbeit auf der Entwicklung der Anzahl von Kleinwasserkraftwerken in den letzten Jahren in der Steiermark, im Zuge dessen erfolgt eine Darstellung und Besprechung der Probleme, die durch den Bau solcher Wasserkraftwerke entstehen können.

1.1 Definition der Kleinwasserkraft

Obwohl die Kleinwasserkraft weltweit mittlerweile als beliebte Energiegewinnungsmöglichkeit Verwendung findet, ergibt sich dennoch eine Problematik hinsichtlich der Definition der Kleinwasserkraft und der international unterschiedlichen Festlegung der Maximalleistung des Kraftwerks (vgl. KUCUKALI und BARIS 2009: 3872). Obgleich man vermuten könnte, dass innerhalb der EU ein einheitliches Gesetz zur Definition der Kleinwasserkraft existiert, erklärt PENCHE (1998: 16), dass es für das Wort Kleinwasserkraft keine einheitliche Abgrenzung in der Europäischen Union gibt. Während in Italien beispielsweise die Grenze bei 3 Megawatt (im weiteren Verlauf kurz MW) liegt, hat Frankreich sich auf eine Leistung von 5 MW geeinigt. Doch auch global gesehen, gibt es interessante Unterschiede bezüglich der Maximalleistung von Kleinwasserkraftwerken. So bezeichnet man in China Wasserkraftwerke mit einer maximalen Leistung von 50 MW als KWKW (vgl. ZHOU et al. 2009: 1078), in Indien beträgt die Grenze 25 MW (vgl. NAUTIYAL et al. 2011: 2024), Brasilien, die USA und Russland setzen das Limit bei 30 MW an (vgl. PANIĆ et al. 2013: 342 und MARTINS et al. 2013: 644). PELIKAN (2004: 3) ergänzt in seiner deutschen Übersetzung des Werkes von PENCHE (1998), dass Österreich die obere Grenze eines KWKWs auf 10 MW festgelegt hat. Jener Grenzwert wird im Laufe dieser Arbeit auch weiterhin zur Definition der Kleinwasserkraft herangezogen.

1.2 Energiewirtschaftliche sowie physikalische Grundlagen der Wasserkraftnutzung

Kleinwasserkraftwerke produzieren Energie, indem sie die kinetische Kraft des Wassers beim Durchfließen einer Turbine in Strom umwandeln. EGRÉ und MILEWSKI (2002: 1225) erläutern hierzu: „*Hydropower is based on a simple process, taking advantage of the kinetic energy reed by falling water.*“ Weiters ergänzt KOSNIK (2010: 5514): „*Power is produced as water runs through the system, and the amount of power is proportional to the vertical drop of the water flow (also known as 'head') and the water flow rate (or 'flow').*“ Die Autorin zeigt hierbei auf, dass die gewonnene Energie proportional zur Fallhöhe und dem vorhandenen Durchfluss ist, und nennt somit mit der Fallhöhe und dem Durchfluss die 2 wichtigsten physikalischen Komponenten, auf die sich die Wasserkraft stützt. PUROHIT (2008: 2002) berechnet die erzeugte Energie in einem Kleinwasserkraftwerk nach folgender Formel:

$$P = \eta_t \rho_w g Q h_{\text{eff}}$$

P zeigt die Leistungsabgabe der Turbine in Watt. η_t gibt die hydraulische Effizienz der vorhandenen Turbine an (Turbinenwirkungsgrad), ρ_w repräsentiert die Dichte des Wasser in kg/m^3 , g die Beschleunigung durch die Schwerkraft in m/sec , Q den Ausbaudurchfluss und h_{eff} die Nettofallhöhe des Wassers auf die Turbine, MADER und PELIKAN (vgl. 2006: Foliensatz 1) nennen dies Ausbaufallhöhe (vgl. PUROHIT 2008: 2002; MISHRA et al. 2011: 3863; PELIKAN 2004:67).

STROBL und ZUNIC (2006: 303) erklären, dass der Unterschied zwischen der geodätisch vorhandenen Bruttofallhöhe, welche PELIKAN (2004: 63) als „vertikale Distanz, die das Wasser bei der Energieproduktion überwindet, z.B. zwischen der oberen und unteren Wasserspiegelhöhe“ definiert, und der endgültig für die Energieerzeugung verfügbaren Nettofallhöhe die Reibungs- und Krümmungsverluste in den Triebwasserleitungen und auch die Einlaufverluste berücksichtigt. MADER und PELIKAN (vgl. 2006: Foliensatz 1) führen weiter aus, dass sich das Potential der Fallhöhe aus dem Gefälle eines Gewässerabschnittes ergibt. Außerdem wird festgestellt, dass es bei der punktuellen Nutzung des Potentials zu einer Fallhöhenkonzentration kommt, welche durch Aufstau oder Ausleitung beziehungsweise Umleitung gewonnen werden kann.

Unter dem zuvor erwähnten Ausbaudurchfluss verstehen GIESECKE und MOSONYI (2005: 49) jenen Durchfluss, für den ein Kraftwerk ausgelegt ist. Dies bedeutet, dass dadurch die

maximale Leistung, welche als Ausbauleistung zu verstehen ist, mit dem günstigsten Wirkungsgrad erbracht werden kann.

1.3 Die Entwicklung der Anzahl von Kleinwasserkraftwerken im Laufe der Zeit

Die Kleinwasserkraft erlebt seit der Energiekrise Mitte der 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts global einen enormen Aufwind (vgl. BLYASHKO 2010: 953 sowie RAMOS und DE ALMEIDA o.J.: 1), gilt sie doch als grüne Energie, welche dazu beiträgt, den CO₂-Haushalt zu senken. KUCUKALI und BARIS (2009: 3874) listen die Daten der Association of European Renewable Energy Research Centres (EUREC) aus dem Jahr 2002 auf und stellen dar, dass sich innerhalb der EU die genutzte Kapazität durch Kleinwasserkraftwerke von 5900 MW im Jahr 1980 auf ungefähr 10300 MW im Jahr 2005 erhöht hat. Und weltweit konnte man einen Anstieg von 19000 MW im Jahr 1980 auf 46000 MW im Jahr 2005 verzeichnen. Laut der Daten der European Small Hydropower Association (ESHA) betrieben die EU-27-Staaten im Jahr 2010 gesamt 21584 Kleinwasserkraftanlagen mit einer erzeugten Leistung von 47996 GWh pro Jahr (<http://www.streammap.eshab.be/>).

Abbildung 1 repräsentiert die Anzahl der jährlich wasserrechtlich zugelassenen Wasserkraftanlagen in der Steiermark von 1880 bis Mai 2010. Deutlich ist auch hier der Anstieg der Zulassungen ab den mittleren 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts zu erkennen, der Höchstwert wurde 1986 erreicht. Ab den frühen 90er-Jahren setzte ein kurzer Rückgang ein, ehe ab etwa 2005 wieder vermehrt Wasserkraftanlagen zugelassen wurden.

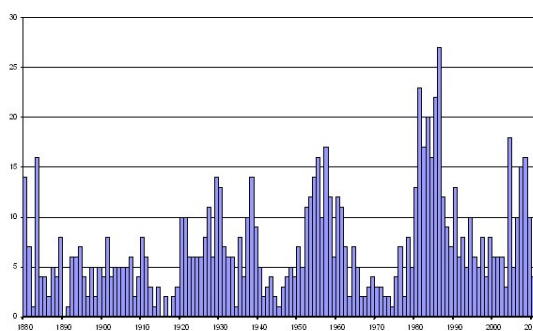


Abbildung 1: Anzahl der jährlich wasserrechtlich bewilligten Wasserkraftanlagen seit 1880 (Stand: 18.05.2010);
Quelle: <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/10177661/4748031>

Laut der offiziellen Homepage der Kleinwasserkraft Österreich gibt es in der Steiermark (Stand September 2013) rund 500 anerkannte Kleinwasserkraftwerke, welche zirka 440.000 Haushalte versorgen, somit jährlich 1,1 Millionen Tonnen CO₂, verglichen mit der Stromge-

winnung durch fossile Energieträger, einsparen und jährlich in etwa 1,55 Milliarden Kilowattstunden Ökostrom ins öffentliche Netz liefern (vgl. www.kleinwasserkraft.at/wasserkraft). Zusätzlich sollen in den kommenden Jahren alte, bereits bestehende, aber nicht mehr betriebene Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark revitalisiert werden (vgl. WEGENER ZENTRUM 2010: 54).

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark mit Stand November 2013. Viele KWKW sind in der Weststeiermark zu finden, auch in der Obersteiermark existiert eine hohe Anzahl. Deutlich rarer ist das Vorkommen der Kleinwasserkraftwerke in Graz-Umgebung. Eine große Zahl von KWKW ist auch auf den Hauptflüssen der Steiermark auszumachen, so finden sich viele an der Mürz und der Mur, auch an der Feistritz, der Raab und beispielsweise am Donnersbach gibt es so manches Kleinwasserkraftwerk. Die meisten Kleinwasserkraftwerke der Steiermark sind sogenannte Ausleitungskraftwerke (nachfolgend AW), gefolgt von Laufkraftwerken (im Folgenden LW) sowie Speicher- und Trinkwasserkraftwerken (im weiteren Verlauf SW und TW). Zusätzlich findet man in der Steiermark auch noch ein Schwellkraftwerk. Es sei hier darauf hingewiesen, dass eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Typen in Kapitel 1.5 vorgenommen wird.

Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung über 20 kW in der Steiermark (Stand November 2013)

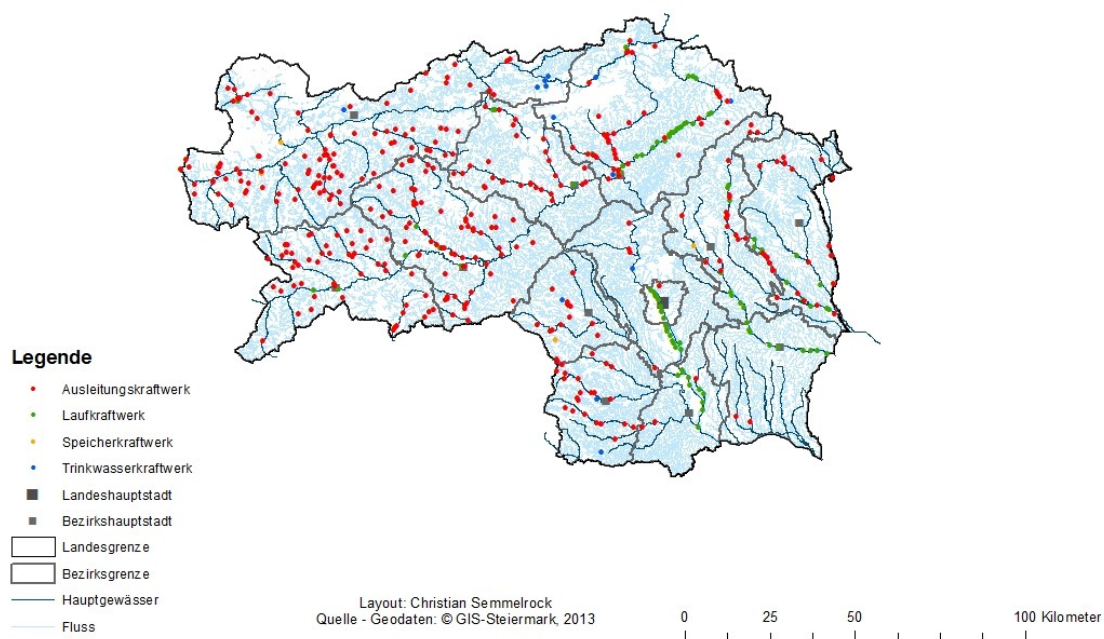


Abbildung 2: Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung über 20 kW in der Steiermark (Stand November 2013); Layout: Christian Semmelrock; Quelle - Geodaten: © GIS-Steiermark, 2013

1.4 Komponenten einer Wasserkraftanlage

PELIKAN (2004: 103) legt dar, dass Wasserkraftanlagen eine Vielzahl von Bauwerken beinhalten, welche hinsichtlich des Anlagentyps und der lokalen Verhältnisse differieren. Die wichtigsten sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Laut den Autoren SINGAL et al. (2010: 118) bestehen Kleinwasserkraftwerke des Typus Ausleitungskraftwerk aus einer Wehranlage mitsamt einer Wasserentnahmemöglichkeit, einem Entschlammungsbecken beziehungsweise Absetzbecken (vgl. OKOT 2013: 516), einem Triebwasserkanal, einem Oberwasser, einem Abwasserkanal, einer Fallleitung, einem Krafthaus und einem Unterwasserkanal. Zusätzlich zu den baulichen Maßnahmen werden ebenso technische Bestandteile, wie etwa die genutzten Turbinen und eingesetzten Generatoren sowie Transformatoren zur Umwandlung des erzeugten Stroms in die richtige Spannung benötigt. An den Wehranlagen, welche dazu dienen, den Fluss aufzustauen und diesen teilweise aus seinem natürlichen Bett in ein Wassertransportsystem auszuleiten (vgl. PELIKAN 2004:103), wird somit durch den installierten Einlauf Wasser aus dem Flusslauf entnommen.

PATT und GONSOWSKI (2011: 121) differenzieren hinsichtlich der Wehranlagen zwischen festen und beweglichen Anlagen. Zu den festen Anlagentypen, welche keine mechanischen Einrichtungen aufweisen und dadurch einen Aufstau erzeugen, zählen die beiden Autoren unter anderem das Streichwehr und das Tirolerwehr. PARTL (1982: 33) fügt hinzu, dass feste Wehre aus einem quer zum Wasserlauf erbauten Baukörper mit einer geraden oder gegen das Unterwasser hohlgekrümmten Achse bestehen. Zusätzlich ergänzt selbiger Autor, dass feste Wehre durch variierende Abflüsse unterschiedlich hoch überströmt werden. Aus diesem Grund dürfen jene Typen nur dort erbaut werden, wo eine Hebung des Hochwasserspiegels keine Schäden verursachen kann (vgl. PARTL 1982: 33). Anders als die festen Wehre werden bewegliche Wehre, es seien hier das Nadelwehr, das Klappenwehr und das Schützenwehr genannt (vgl. STROBL und ZUNIC 2006: 145–153), mit Schützen ausgestattet. Durch die Installation von jenen Schützen kann der Aufstau reguliert werden, auch kann man bei gewissen Typen durch die Öffnung der Schützen eine Stauraumpülung durchführen (vgl. PATT und GONSOWSKI 2011: 121). STROBL und ZUNIC (2006: 139) verdeutlichen einen weiteren Unterschied zwischen den beiden Wehrentypen. Während bei einem festen Wehr der Oberwasserspiegel nicht gesteuert werden kann, ist diese Steuerung bei den beweglichen Wehren durch differente Stellungen der Verschlüsse äußerst präzise umsetzbar.

Anschließend fließt das Wasser durch das zuvor genannte Absetzbecken, in welchem die Geschwindigkeit des durchfließenden Wassers reduziert wird, um allfällige Feststoffe, welche den Turbinen Schaden zufügen könnten, absetzen zu lassen (vgl. PAISH 2002: 540). Der Me-

chanismus hierbei ist der gleiche, wie er in Kapitel 1.7 hinsichtlich der Problematik der Stauraumverfüllung beschrieben wird. Nachfolgend wird das Wasser über eine Fallleitung den vorhandenen Turbinen unter Druck (Druckrohrleitung) zugeleitet (vgl. SINGAL et al. 2010: 117). Diese Turbinen erzeugen mechanische Energie, welche wiederum vom Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. KOSNIK (2008: 2) erklärt diesen Vorgang, wie folgt: *„Generators are connected to the turbines that rotate and turn the mechanical energy into electrical energy, which is then conducted along transmission lines to the ultimate point of use.“* Nachdem das Wasser die Turbinen passiert hat, wird dieses über einen Unterwasserkanal dem Fluss erneut zugeleitet (vgl. PELIKAN 2004:163).

PELIKAN (2009: 429) weist zusätzlich darauf hin, dass der Bau von sogenannten Organismenwanderhilfen, wie beispielsweise die Installation einer Fischwanderhilfe, von großer Bedeutung ist. Die ESHA (ESHA^a o.J.: 7) unterteilt solche Wanderhilfen in drei große Bereiche, die Fischleitern, Umgehungsgerinne und Fischlifte. Ebendort wird dargestellt, dass eine Fischaufstiegshilfe aus einem Einstieg, einem Fischweg, einem Becken und einem Ausstiegsbereich (Einlaufbereich) besteht, wobei bei den jeweiligen Bereichen auf unterschiedliche Kriterien geachtet werden muss.

PELIKAN (2004: 127) erwähnt zusätzlich die Anbringung von Rechen als wesentlichen Punkt, um dadurch jegliche Art von Schwemmstoffen abzuhalten und so die Wasserkraftmaschine zu schützen. Diese werden am Einlauf des Entnahgebauwerks angebracht. Ein Krafthaus dient zum Schutz und zur Unterbringung von elektromechanischen Ausrüstungen, wie beispielsweise den zuvor erwähnten Turbinen und Generatoren (vgl. PELIKAN 2004: 167). Hinsichtlich der Turbinen seien hier lediglich die unterschiedlichen Typen kurz genannt, auf die technischen Differenzen soll in dieser Arbeit nicht der Fokus gelegt werden. ANAGNOSTOPOULOS et al. (2007: 2665) und DENIS (2010: 61) nennen beispielsweise die Francis- und die Pelton-Turbine als mögliche Alternative. PAISH (2002: 543) benennt neben diesen beiden auch noch die Turgo-, die Banki- (auch als Crossflow bekannt) sowie die Propeller- und Kaplan-Turbine als weitere Varianten. Die Generatoren werden von PELIKAN (2004: 204) in Synchrongeneratoren und asynchrone Generatoren unterteilt.

1.5 Erläuterung der verschiedenen Wasserkraftwerkstypen

Kleinwasserkraftwerke können hinsichtlich verschiedener Kriterien differenziert werden. In dieser Arbeit wird die Unterteilung nach MATTHIAS und KÖNIG (1982: 55) herangezogen. Diese unterscheiden die KWKW hinsichtlich ihrer nutzbaren Fallhöhe, der Triebwasserfüh-

rung und der gegebenen Speichermöglichkeit. In den folgenden Unterkapiteln soll auf die dort aufgeführten Typen näher eingegangen werden.

1.5.1 Einteilung nach der nutzbaren Fallhöhe

Ein Unterscheidungskriterium, welches zur Klassifikation von Kleinwasserkraftwerken herangezogen wird, ist die Einteilung in unterschiedlich nutzbare Fallhöhen. So werden hierbei drei Typen differenziert. Diese sind das Niedrigdruckkraftwerk, das Mitteldruckkraftwerk sowie das Hochdruckkraftwerk. Doch stellt sich hier das Problem einer fehlenden einheitlichen Fallhöhenangabe für die jeweiligen Kraftwerke. ABBASI und ABBASI (2011: 2136) definieren Niedrigdruckkraftwerke (ultra-low-head) mit einer vorhandenen Fallhöhe von unter 3 Metern, Mitteldruckkraftwerke (low-head) werden mit einer Fallhöhe über 3 Metern und bis 40 Meter definiert. Ein Hochdruckkraftwerk, welches von den beiden Autoren als Mitteldruckkraftwerk und Hochdruckkraftwerk (Medium/high-head) zusammengefasst wird, muss eine Fallhöhe von über 40 Metern vorweisen. MATTHIAS und KÖNIG (1982: 55) stellen der Definition von ABBASI und ABBASI andere Werte entgegen, so definieren diese ein Niederdruckkraftwerk mit einer Fallhöhe bis zu 20 Metern, Mitteldruckkraftwerke werden mit einer Fallhöhe von 20 bis zu 100 Metern bestimmt und Hochdruckanlagen legen sie mit einer Fallhöhe von über 100 Metern fest. NOWOTNY (1998: 133) wiederum interpretiert die drei Typen anders. Bei Niederdruckanlagen liegt eine Fallhöhe von bis zu 10 Metern vor, Mitteldruckanlagen bestehen bei einer Fallhöhe von 10 bis 50 Metern und Hochdruckanlagen liegen dann vor, wenn die Fallhöhe 50 Meter überschreitet. GIESECKE und MOSONYI (2005: 83) klassifizieren abermals abweichend. So liegt die vorhandene Fallhöhe bei einer Niederdruckanlage bei unter 15 Metern, Mitteldruckanlagen weisen eine Fallhöhe von 15 bis 50 Metern vor und bei Hochdruckanlagen findet man ein Gefälle von über 50 Metern. Die gleiche Einteilung verwendet auch MANIAK (2005: 308f).

Nachdem die unterschiedlichen Größenordnungen und Definitionen erläutert worden sind, werden im nächsten Schritt die jeweiligen Kategorien näher betrachtet. GIESECKE und MOSONYI (2005: 85) stellen fest, dass ein Niederdruckkraftwerk zumeist als Laufwasserkraftwerk installiert ist, jedoch gibt es hierbei keine erwähnenswerte Speichermöglichkeit durch Überstauung. STROBL und ZUNIC (2006: 310) heben hervor, dass sich Niederdruckanlagen im Mittellauf von Flüssen (Flusskraftwerk) befinden und so von einem deutlich höheren Abfluss, als beispielsweise ein Hochdruckkraftwerk, profitieren. Die EUROPÄISCHE KLEINWASSERKRAFTORGANISATION (ESHA^a o.J.a: 6) verdeutlicht dies und stellt fest, dass bei Niederdruck-

anlagen eine geringe Fallhöhe mit einem hohen Durchfluss verbunden ist. MANIAK (2005: 309) erwähnt, dass Niederdruckkraftwerke nicht nur Flusskraftwerke sind, auch Ausleitungskraftwerke (siehe Kapitel 1.5.2) können zu diesem Typus gezählt werden. MATTHIAS und KÖNIG (1982: 63) erklären zudem, dass Niederdruckkraftwerke zumeist im Voralpengebiet und Flachland angesiedelt sind. Mitteldruckanlagen findet man häufig im Zusammenhang mit niedrigeren Talsperren, als dies bei Speicherkraftwerken der Fall ist, oder an höheren Wehren als bei Laufwasserkraftanlagen, bei denen ein mittlerer Betriebszufluss zur Energiegewinnung genutzt wird (vgl. GIESECKE und MOSONYI 2005: 94 sowie PARTL 1982: 21). MATTHIAS und KÖNIG (1982: 67) erläutern, dass Mitteldruckanlagen größtenteils im Voralpen- sowie im Alpengebiet vorzufinden sind. Hochdruckanlagen findet man nach STROBL und ZUNIC (2006: 318) überwiegend im Gebirge, wenn Talsperren das zufließende Wasser gesammelt und im Anschluss über einen Triebwasserstollen an ein Kraftwerk im Tal weitergeleitet haben. MATTHIAS und KÖNIG (1982: 67) zählen Hochdruckanlagen teils auch zu Speicherkraftwerken (siehe Kapitel 1.5.3). Laut der ESHA (ESHA^a o.J.: 6) liegt bei einer Hochdruckanlage ein großes Gefälle vor, der Durchfluss jedoch ist gering, somit wird die Energie weniger durch den Durchfluss gewonnen, vielmehr spielt hierbei die vorhandene Fallhöhe eine große Rolle.

1.5.2 Einteilung nach der Triebwasserführung

Bei der Einteilung der Kleinwasserkraftwerke hinsichtlich ihrer Triebwasserführung unterscheiden MATTHIAS und KÖNIG (1982: 55) zwischen Ausleitungskraftwerken, welche auch als Umleitungskraftwerke beziehungsweise Kanalkraftwerke in der Literatur Erwähnung finden, und Staukraftwerken.

STROBL und ZUNIC (2006: 313) verdeutlichen, dass bei AW das Wehr und das Kraftwerk teils kilometerweit getrennt sind. PATT und GONSOWSKI (2011: 186) präzisieren, dass bei einem Kanalkraftwerk der Fluss durch ein Wehr gestaut wird und der Abfluss durch einen installierten Kanal der Kraftwerkszentrale zugeleitet wird. Nach GIESECKE und MOSONYI (2005: 93) gilt es bei einem Ausleitungskraftwerk zwischen zwei Hauptgruppen zu differenzieren, einerseits ist dies das Kanalkraftwerk, andererseits das Schleifen- oder Schlingenkraftwerk. *„Kanalkraftwerke – [...] – finden eine Anwendung unter anderem bei stark mäandrierenden Flußläufen mit geringem Gefälle und eventuell geringerem Abfluß. Hierbei wird ein Flußabschnitt, in dem das Stauwerk angeordnet wird, durch einen künstlichen Kanal abgekürzt, damit das Gefälle an einer Stelle zusammengefaßt und in Wasserkraftanlage genutzt [...] werden kann.“* (GIESECKE und MOSONYI 2005: 93). Es wird hier somit durch den Bau eines Kanals in das natürliche Flusssystem eingegriffen. GIESECKE und MOSONYI (2005:

93) zeigen außerdem, dass Schleifenkraftwerke in eher kleinen, künstlich angelegten Flussschleifen oder Werkkanälen angeordnet sind, Schlingenkraftwerke durchschneiden kurze Flusswindungen. Die drei differenten Typen werden in Abbildung 3 wiedergegeben. Typ A repräsentiert ein Kanalkraftwerk, man erkennt deutlich den zuvor beschriebenen mäandrierenden Flusslauf und die durch den Kanal erzeugte Abkürzung. Typ B zeigt das Schleifenkraftwerk, welches in der künstlich angelegten Schleife zu finden ist. Als Typ C wird das Schlingenkraftwerk präsentiert, bei dem deutlich die Durchschneidung einer kurzen Flusswindung zu sehen ist. Eine wichtige Tatsache bei AW besteht darin, dass bei den vorhandenen Alternativen zumeist nur die Mindestwasserabgabe, welche gesetzlich geregelt ist, im ursprünglichen Flussbett überbleibt (vgl. GIESECKE und MOSONYI 2005:93).

Nach der näheren Betrachtung des Ausleitungskraftwerks soll das Augenmerk nun auf das Staukraftwerk gelegt werden. STROBL und ZUNIC (2006: 127) erläutern, dass durch ein Staukraftwerk der gewünschte Aufstau durch Wehrbauwerke erzielt wird. PARTL (1982: 21) ergänzt hierzu: *„Staukraftwerke, bei denen durch ein Stauwehr im Bach oder Fluß der Oberwasserspiegel künstlich angehoben wird, um die nötige Fallhöhe herzustellen, und das Krafthaus unmittelbar neben dem Stauwehr liegt. Diese Kraftwerksart wird im allgemeinen nur dort angewendet, wo die Ufer ausreichend hoch liegen und eine Hebung des Grundwassers im Bereich der Stauhaltung hingenommen werden kann.“*

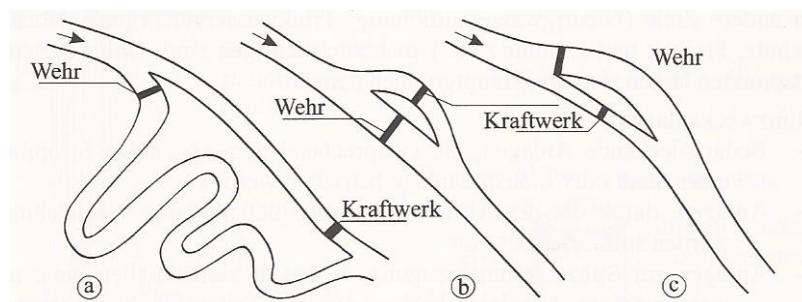


Abbildung 3: Darstellung der verschiedenen Typen von Ausleitungskraftwerken; Quelle: GIESECKE und MOSONYI (2005: 93)

1.5.3 Einteilung nach der Speichermöglichkeit

Prinzipiell gilt es zwischen den zwei großen übergeordneten Kategorien der Laufkraftwerke (oder Flusskraftwerke) und der Speicherkraftwerke zu unterscheiden. Unter einem Laufkraftwerk versteht man eine Anlage, welche das natürliche Wasserangebot ohne erwähnenswerte Speicherung nutzt, um dadurch Energie zu erzeugen (vgl. GIESECKE und MOSONYI 2005: 86). Nach PAISH (2002: 537) handelt es sich bei den meisten Kleinwasserkraftwerken um eben jene Laufkraftwerke. Er meint: *„Small hydro is in most cases 'run-of-river'; in other words any dam or barrage is quite small, usually just a weir, and generally little or no water is*

stored.“ PAISH ergänzt die eben zitierte Aussage von GIESECKE und MOSONYI, indem er hinzufügt, dass bei Laufkraftwerken die benötigten Dämme nur in kleiner Form vorhanden sind, zumeist handelt es sich hierbei nur um ein Wehr. BRÜCHER (2009: 147) erläutert zu den Laufkraftwerken: *„Laufwasser(kraft)werke nutzen das Gefälle permanenter Fließgewässer, die durch Wehre aufgestaut sind, entweder quer im Flussbett oder in einem parallelen Ausleitungskanal. Die normalerweise relativ geringe Fallhöhe wird kompensiert durch eine i.d.R.[in der Regel] ganzjährige Nutzung, wobei Leistungsschwankungen nur auf die Wasserführung zurückgehen.“* EGRÉ und MILEWSKI (2002: 1227) zeigen ergänzend auf, dass Laufkraftwerke gewöhnlich in großen Fließgewässern mit kleiner Fallhöhe oder in kleinen Flüssen jedoch mit hoher Fallhöhe gebaut werden.

Obwohl Laufkraftwerke im Bereich der Kleinwasserkraft eine größere Rolle spielen, soll dennoch kurz auf die Speicherkraftwerke eingegangen werden. Hierbei handelt es sich um einen Kraftwerktypen, welcher durch den Bau eines Damms oder einer ähnlichen Barriere einen See aufstaut (vgl. IEA 2010: 4). Sie können bei Bedarf schnell in Betrieb genommen werden. Die erzeugte Leistung definiert sich durch den vorhandenen Höhenunterschied des Stausees und des Krafthauses sowie durch den Turbinendurchfluss (vgl. www.kleinwasserkraft.at/kraftwerk-technik). Durch eine Druckrohrleitung wird das Wasser in die Tiefe geleitet und trifft dort auf die installierten Turbinen, welche wiederum durch die gewonnene Energie Strom erzeugen (<http://www.verbund.com/pp/de/speicherkraftwerk>).

PARTL (1982: 20) gibt in seinen Ausführungen zu den Speicherkraftwerken den wichtigsten Unterschied gegenüber einem Laufkraftwerk wieder, indem er darstellt, dass Speicherkraftwerke den unregelmäßigen Zufluss eines Tages, einer Woche oder gar eines Jahres in einem Staubecken sammeln und dass dadurch das Wasser bei Bedarf den Turbinen zugeleitet werden kann. Eine spezielle Form des Speicherkraftwerks ist das sogenannte Pumpspeicherkraftwerk. Die Funktionsweise ist gleich wie bei einem normalen Speicherkraftwerk, allerdings besteht die Möglichkeit, den Wasserleitungsprozess auch umgekehrt zu gestalten. Dies besagt, dass Wasser auch von einem unten liegenden Fluss oder See in den oberliegenden Stausee gepumpt werden kann.

HEITFELD (1991: 418) verweist darauf, dass ein Pumpspeicherkraftwerk aus einem Unterbecken, einem Oberbecken, beckenverbindenden Druckrohrleitungen und einem Maschinensatz besteht.

PATT und GONSOWSKI (2011: 192) zeigen auf, dass bei einem Pumpspeicherkraftwerk das Nutzwasser anfangs von dem zuvor erwähnten Unter- in das Oberbecken gepumpt wird. Der Grund für diesen Prozess ist die mögliche Speicherung von Strom. STROBL und ZUNIC (2006:

310) exemplifizieren: *„Mit Hilfe von Pumpspeicherkraftwerken lässt sich überschüssige Energie auf hervorragende Weise speichern, bis Strom in Zeiten höheren Bedarfs wieder benötigt wird.“* Das in den überliegenden Stausee gepumpte Wasser kann im nächsten Schritt erneut durch Ablassen zur Energiegewinnung herangezogen werden.

1.5.4 Weitere Kraftwerkstypen

Zusätzlich zu den von MATTHIAS und KÖNIG (1982: 55) definierten Kraftwerkstypen soll zusätzlich auf zwei weitere Arten eingegangen werden, dies ist einerseits das Trinkwasserkraftwerk und andererseits das Schwellkraftwerk. Das Schwellkraftwerk, welches eine Sonderform des Laufkraftwerks darstellt, staut bedarfsweise Wasser in einem kleinen Stauraum hinter dem Wehr auf, während das Kraftwerk nicht in Betrieb ist oder nicht benutzt wird, um dann bei Bedarf zusätzlich verwendet werden zu können (vgl. RAGHUNATH 2006: 288). Zu den Trinkwasserleitungskraftwerken erklären MÖDERL et al. (2012: 479) Folgendes: *„In Trinkwasserversorgungsnetzen treten besonders im alpinen Bereich oftmals hohe Druckverhältnisse in den Rohrleitungen auf. Die hohen Wasserdrücke werden in vielen Fällen durch Druckreduzierventile ohne Energiegewinnung auf ein für das jeweilige Leitungssystem angepasste Druckniveau verringert. Nebenbei wird Überwasser [...] oftmals ohne Energiegewinnung dem Leitungssystem entzogen. In beiden Fällen ist jedoch eine energetische Nutzung in bestehenden Systemen möglich, die [...] einen Beitrag zur Erzeugung elektrischer Energie [...] leisten.“* Die Autoren verdeutlichen somit, dass sich Trinkwasserkraftwerke der überschüssigen Energie in Trinkwasserversorgungsleitungen annehmen und dadurch Energie erzeugen. Auch besteht die Möglichkeit, durch den vorhandenen Überlauf Strom zu gewinnen.

1.6 Vorteile von Kleinwasserkraftwerken

Der wohl größte Vorteil der Kleinwasserkraft ist laut LECKSCHEIDT und TJAROKO (o.J.: 4), dass es sich bei der Wasserkraft bereits um eine bewährte Technologie handelt, welche im Laufe der Zeit einen hohen Grad an Effektivität und Betriebssicherheit erzielt hat. Sie erreichen einen sehr hohen Wirkungsgrad, dadurch entsprechen sie auch der Forderung nach einem möglichst sparsamen Umgang mit der Rohenergie (vgl. PARTL 1982: 98).

In Zeiten, in denen die nachhaltige Entwicklung auf Grund der Klimaerwärmung in den Vordergrund drängt, kommt den Kleinwasserkraftwerken vermehrt Interesse zu. Grund dafür ist der nachhaltige und umweltfreundliche Ruf der Wasserkraft. SCHWARTZ und SHAHIDEHPOUR (2006: 3) stellen hierzu fest: *„Lately, small hydro has gained popularity as a*

clean energy source that is environmental friendly, [...].“ Die beiden Autoren erklären an Hand dieses Statements, dass den KWKW eine umweltfreundliche Rolle zukommt. WIE-SINGHE und LAI (2011: 30) nehmen den gleichen Gedanken auf, weisen allerdings noch zusätzlich darauf hin, dass es sich bei der Kleinwasserkraft um eine nachhaltige Energieform handelt. Sie erläutern: *„SHP is an environmental friendly, sustainable [...] source of energy.“* Dass diese Ansicht nicht von allen geteilt wird, darauf spielen die Autoren REICHE und BECHBERGER (2004: 844) interessanterweise an, indem sie aufzeigen, dass die Kleinwasserkraftwerke in den Niederlanden von der Liste erneuerbarer Energien gestrichen wurden. NAUTIYAL et al. (2011: 2024) vertreten die Meinung, dass durch den Bau von Kleinwasserkraftwerken, im Gegensatz zu großen Kraftwerken, keinerlei Umsiedlungen durchgeführt werden müssen. Ebendort wird die Kleinwasserkraft als geringer CO₂-Produzent angesehen. In diese Richtung argumentieren auch YÜKSEK und KAYGUSUZ (2006: 290) und erklären: *„Small hydro generally produces negligible greenhouse gases compared to fossil fuel use and therefore contributes little to global warming.“* An Hand dieses Statement wird veranschaulicht, dass durch das vermehrte Ausnutzen von Wasserkraft, im Speziellen der KWKW, ein Rückgang bei der Verwendung von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung ersichtlich ist. Die ESHA (ESHA^b o.J.: 5) beschreibt das Wasser als den Treibstoff der Wasserkraft und erläutert somit die umweltfreundliche Rolle der Kleinwasserkraft. Somit ergibt sich daraus eine Verringerung an Treibhausgasen und dadurch hat die Kleinwasserkraft deutlich geringere Auswirkungen auf den Klimawandel. SHARMA et al. (2013: 468) stellen zusammenfassend fest, dass: *„ [...] it is one of the environmentally-friendly methods of electricity generation.“* Außerdem erwähnen ebendiese, dass Kleinwasserkraftwerke eine Energiequelle nutzen, die einerseits erneuerbar und andererseits reichhaltig ist. FLETEN et al. (2008: 255) heben hervor, dass es sich bei der Kleinwasserkraft um eine wichtige Quelle von erneuerbarer Energie handelt. Während YÜKSEK und KAYGUSUZ (2006: 290) lediglich erwähnen, dass es zu einem geringeren Ausstoß von Treibhausgasen kommt, argumentieren BAKIS und DEMIRBAS (2004: 1115) damit, dass es sich bei der Wasserkraft um eine umweltfreundliche Energiegewinnungsmethode handelt, die keinerlei giftige Gase freisetzt. Auch KOSNIK (2010: 5512) stellt fest, dass: *„ [...] small scale hydropower presents an alternative, win-win situation: no carbon emissions and a negligible local environmental footprint.“* Die Autorin konstatiert hier ebenso, dass nach dem Bau eines KWKWs keinerlei Emissionen freigesetzt werden.

Mit der Kleinwasserkraft kann zudem kostengünstig Strom generiert werden (vgl. ALONSO-TRISTÁN et al. 2011: 2729). So erklärt PAISH (2002: 537), dass Kleinwasserkraftwerke gerade in ruralen Gegenden weniger entwickelter Länder, aber auch in Europa, geldsparend

erbaut werden können. RAMOS (2000: 18) zeigt außerdem auf, dass Dämme auch dazu geeignet sind, Flutereignisse zu unterbinden und das Wasser aufzuhalten. Dass es durch die installierten Rechen auch zu einer Reinhaltung der Gewässer kommt, sofern das aufgefangene Schwemmgut nicht wieder in den Unterlauf eingebracht wird, darauf weist PARTL (1982: 99) in seinem Werk hin.

1.7 Negative Auswirkungen von Kleinwasserkraftwerken

In Kapitel 1.6 wurden die positiven Auswirkungen der Kleinwasserkraft erläutert, dieses Kapitel widmet sich den negativen Konsequenzen, welche sich durch den Kraftwerksbau ergeben. Es sei hier erwähnt, dass ob des zurzeit florierenden Kleinwasserkraftwerkbaus kaum negativ behaftete Literatur zum Thema KWKW zu finden ist. MALM RENÖFÄLT et al. (2010: 49) verdeutlichen jedoch: *„Hydropower production, however, fundamentally transform rivers and their ecosystems by fragmenting channels and altering river flows. These changes reduce flow velocity [...] and sediment dynamics [...]“* Das Autorenteam vertritt hiermit die Ansicht, dass die Eingriffe in den Flusslauf, welche auf Grund der Wasserkrafterzeugung getätigt werden, fundamentale Auswirkungen auf den Fluss und das Ökosystem haben, da Kraftwerke zumeist den natürlichen Flusslauf unterbrechen und dadurch in den Abfluss eingreifen. PÖPPL et al. (2013: 607) vertreten die gleiche Meinung und verdeutlichen dazu: *„The construction of dams has a major influence on the flow and sediment regimes of rivers as they significantly reduce the downstream flux of water and sediment (i.e. sediment connectivity) which further involves geomorphic channel changes (e.g. upstream aggradation and downstream degradation.“* Die Autoren konstatieren somit ebenso wie zuvor MALM RENÖFÄLT et al. (2010: 49), dass es durch den Bau von Dämmen zu Eingriffen in den Fluss kommt, und präsentieren gleichzeitig bereits zwei Exempel, welche Problematiken sich daraus ergeben können, indem sie auf die Verlandung im Oberlauf und den Abbau von Sedimenten im Flussunterlauf verweisen. Beide Problematiken werden seitens des Verfassers dieser Masterarbeit in den folgenden Kapiteln aufgearbeitet. Zudem erklären auch JESUS et al. (2004: 242): *„what really happens is that the operation of the hydroelectric power plant causes some problems in the water course.“* QUASCHNING (2010: 206) bekräftigt ebenso, dass speziell durch Laufkraftwerke wie auch durch Speicherkraftwerke negative Einflüsse auf die natürliche Umwelt ausgeübt werden. BAKKEN et al. (2012: 197) stellen gar fest, dass mehrere Kleinwasserkraftwerke mit etwa der gleichen Energiegewinnung wie drei große Wasserkraftwerke sogar höhere negative Auswirkungen sowohl im Bereich der Geomorphologie als auch der Geoökologie haben als drei Großwasserkraftwerke zusammen. Die Autoren veranschauli-

chen hierbei, dass durch drei größere Kraftwerke zwar gravierendere Änderungen der Wassertemperatur zu erwarten sind, geringere Auswirkungen gegenüber einer Vielzahl an KWKW ergeben sich jedoch im Bezug auf den unterbrochenen Sedimenttransport und die Erosion. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das Autorenteam auf gewisse Unsicherheiten anspielt. Ähnlich wie BAKKEN et al. argumentiert auch KOCH (2002: 1210), indem er mit einem weitläufig vorhandenen Missverständnis aufräumt: *„There are some widely held misconceptions [...], one ist that ‚small hydro‘ is always more benign than ‚large hydro‘, [...]. In fact, one large hydro project can well be more benign than a hundred small ones, which generate the same amount of electricity.“* Sowohl BAKKEN als auch KOCH zeigen auf, dass Kleinwasserkraftwerke nicht zwangsweise umweltfreundlicher als Großkraftwerke sind. Aktuell ist auch die Problematik des geplanten Kleinwasserkraftwerks an der Schwarzen Sulm in der Steiermark ein großes Thema in den österreichischen Medien. Gegner des Baus verharren in den Frühjahrsmonaten 2013 sogar vor Ort, um den Bau zu verhindern, da laut Aussagen von Umweltschützern der Bau eines Kraftwerks die lokale Natur teils zerstören könnte.

MEYERHOFF und PETSCHOW (1997: 6) setzen sich ebenfalls mit den negativen Konsequenzen auseinander, welche durch den Bau von Kleinwasserkraftwerken entstehen. Sie weisen darauf hin, dass durch diese Eingriffe weitreichende Folgen auf die Gewässerstruktur und die Lebensräume innerhalb des Flusssystems zu erwarten sind. Ebendiese konstatieren, dass sich Lebensbedingungen durch eine geringere Fließgeschwindigkeit deutlich verschlechtern. Außerdem ergibt sich im Speziellen bei Ausleitungskraftwerken das Problem einer eventuell geringeren Wassermenge im natürlichen Flussbett, nachdem dem Fluss Wasser entnommen wurde.

Obgleich zumeist bei Speicherkraftwerken akut, von deren Typ in der Steiermark bis in den November 2013 nur ein geringe Anzahl an Kleinwasserkraftwerken erbaut wurde, soll in diesem Kapitel hinsichtlich der negativen geomorphologischen Auswirkungen und der ungünstigen Folgen bezüglich des Sedimenttransports der Fokus im Besonderen auf die Problematik der Stauraumverfüllung und die daraus resultierenden negativen Konsequenzen gelegt werden. Dass dieses Problem nicht nur bei Speicherkraftwerken auftritt, wird in Kapitel 6.3 bei der Analyse der Antworten der ausgeschickten Fragebögen noch genauer erläutert. HAUER et al. (2013: 22) schreiben dazu: *„Kleinwasserkraftwerke führen durch den lokalen Aufstau von Fließgewässern meist zu einer Störung des longitudinalen [...] Feststoffhaushaltes beziehungsweise der Sedimenttransportkapazität. Dadurch kommt es zu den bekannten Problemen wie Sedimentüberschuss in Stauräumen [...].“* Der Vorgang der Stauraumverlandung ist ein simpler Prozess. Durch den unnatürlich entstandenen Rückstau, welcher sich flussaufwärts

hinter einem erbauten Damm oder Wehr bildet, verändert sich das Abflussregime eines Flusses radikal. Beim Eindringen des Flusses in einen Stauraum erhöht sich einerseits die Durchflussgröße, andererseits verringert sich die Durchflussgeschwindigkeit, was zum Absetzen von Feststoffen führt. Jener Punkt, ab dem es zu einer Aufstauung des Wassers kommt, wird als Stauwurzel bezeichnet. MAHMOOD (1987: 35) erläutert dazu in seinem Werk: *„As a river enters a reservoir, the cross-sectional area of flow is increased, the average velocity is decreased and sediment load starts dropping out.“*

Nun gilt beim Einbringen des Sediments in das Reservoir, dass sich die schweren Sedimente, also das Geschiebe, es sei erwähnt, dass dieser Terminus im Folgenden aus der wasserrechtlichen Sicht betrachtet wird, bereits am Anfang des Beckens abzusetzen beginnt. MAHMOOD (1987: 48) erläutert hierzu: *„The deposits start at the commencement of the back-water curve and the shape of deposit is like a delta.“* Lässt MAHMOOD in seiner Feststellung die Korngrößen noch außer Acht, ergänzen PALMIERI et al. (2003: 7) in ihren Ausführungen die Rolle des Geschiebematerials ausdrücklich: *„The coarser portion of the sediment load deposits in a delta at the upstream end of the reservoir and the finer portion deposits in reaches closer to the dam.“*

Aus dem Statement von ebendiesen Autoren ist überdies zu erkennen, dass bei der Schwebfracht hingegen die leichteren Sedimentteilchen in den Stauraum eingeschwemmt werden und sich im Laufe der Zeit erst verspätet näher an der Staumauer abzusetzen beginnen. In Abbildung 4 wird die generalisierte Verteilung der Sedimente in einem Stauraum verdeutlicht. Zusätzlich werden jene Bereiche aufgezeigt, in welche die Sedimentfracht in einem Reservoir unterteilt werden kann. Die gepunktete Fläche im oberen Bereich des Staubeckens (das orange Rechteck repräsentiert die Staumauer, die weißen Rechtecke die beiden Auslässe) spiegelt die Ablagerung des gröberen Materials wider. Wie deutlich erkannt werden kann, lagert sich das grobe Material bereits bei Eintritt in das Staubecken ab. Dieser Bereich des groben Materials wird als Deltadeckschicht, auch „Topset“, definiert, in Abbildung 4 ist dieser Bereich in Blau gehalten. Direkt an der Staumauer findet man die feinen Sedimente, jener Bereich wird in der Literatur als Bodenschicht oder auch „Bottomset“ bezeichnet. Den Übergangsbereich, bei dem das grobe Material das feinere überlagert, wird Schrägschichtung der Vorschüttungs-sedimente, oder aber auch „Foreset“, genannt. Es bildet sich hierbei förmlich eine Stirnform aus. Als Pivot-Punkt wird jener Bereich gekennzeichnet, bei dem es zu einem fließenden Überlauf des „Topsets“ in den „Foreset“ kommt. Deutlich ist auch die Bildung eines Deltas, welches sich durch die Aufschüttung von groben Sedimentteilchen erklären lässt, wie von MAHMOOD (1987: 48) erläutert, erkennbar. Außerdem wurden vom Autor

dieser Arbeit zwei Auslässe (weiße Rechtecke in Abbildung 4) hinzugefügt, dies ist jene Anzahl an Auslässen, mit denen die meisten Staumauern ausgestattet sind.

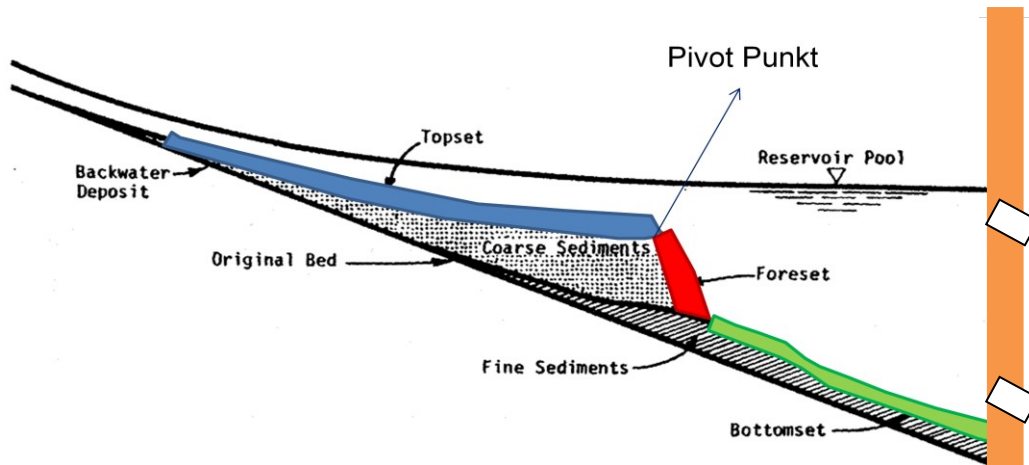


Abbildung 4: Verteilung von Sedimenten in einem Stauraum und Unterteilung des Sedimentprofils; Quelle: Mahmood (1987: 49) – eigene Ergänzungen

Durch diese Rückhaltung von Sedimenten entstehen negative Konsequenzen sowohl für den Flussunterlauf, den Flussoberlauf als auch für den Speicherraum selbst. MORRIS und FAN (1998: 23) veranschaulichen dies in ihrer Arbeit an Hand eines Vergleichs: *„All rivers transport sediment as well as water, and dam construction impacts the transport of both substances but with important differences. Because water transports much more water than sediment it takes much longer to fill a reservoir with sediment than with water, so much more than that the gradual accumulation of sediment tends to be ignored. [...] But the most important difference is this: water can be easily removed from a reservoir but sediment cannot.“* Die beiden Autoren zeigen somit die Problematik der Sedimentation in einem Stauraum gut auf, sie weisen darauf hin, dass zwar mehr Wasser als Sediment in ein Staubecken eingebracht wird, jedoch erläutern sie ebenso, dass der Sedimentgehalt, welcher sich langsam absetzt, im wahrsten Sinn des Wortes ungeachtet untergeht und dass es somit zu einer beginnenden Sedimentation im Staubecken kommt. Außerdem wird dargelegt, dass es deutlich simpler ist, Wasser aus einem Reservoir zu entfernen, als dies beim Sediment der Fall ist.

1.7.1 Negative Konsequenzen flussabwärts

Beschäftigt man sich mit den negativen Folgen der Stauraumverfüllung flussabwärts, so muss zuerst die Änderung im Strömungsregime genannt werden. Dabei können sowohl Veränderungen im Bereich der Durchflussgeschwindigkeit als auch Änderungen im Sedimenttransport beobachtet werden. XIAOQING (2003: 121) erläutert hinsichtlich der Veränderung im Bereich der Durchflussgeschwindigkeit die Hauptveränderungen: *„[...] the main changes are the*

reduction in peak discharges, an increase in the duration of medium flows, an increase in low discharges, and a decrease in the seasonal and annual variation of discharges.“

XIAOQING (2003) vertritt somit die Meinung, dass es zu einer Reduktion im Bereich des Durchflussmaximums kommt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass etwa Flutereignisse aufgefangen und nur kontrolliert wieder in den Flussunterlauf abgegeben werden. Zudem erklärt der Autor, dass es logischerweise auch zu einem Anstieg an Durchflussminima kommt. Große Probleme bereiten allerdings die saisonalen sowie jährlichen Schwankungen der Abflüsse. Hinsichtlich einer Veränderung des Sedimenthaushaltes eines Flussunterlaufs erklärt XIAOQING (2003), dass die Reduktion des Sedimentanteils und das Zurückhalten von groben Sedimenten als großes Problem gelten. SUFLITA et al. (2010: 6) haken hier ein und erläutern, dass es durch den geringen Sedimenthaushalt, teilweise sogar durch einen total sedimentfreien Abfluss des Flussunterlaufs zu Erosionen im Bereich des Flussbetts kommt: *„Clear water in the channel downstream of the dam tends to scour the streambed causing it to become incised, coarse, degrade and become amored.“* Auch KERN (1994: 37) beschreibt dies: *„Bei verringertem Geschiebenachschub, z.B. durch Talsperren, bildet sich ein Hauptgerinne aus, welches das Geschiebedefizit durch Sohlenerosion ausgleicht [...]“*. Dieser Vorgang wird von KONDOLF (1997: 535) als „hungry water“ beschrieben, in der deutschen Fachliteratur wird für diese Problematik der Ausdruck Klarwassererosion verwendet.

SUFLITA et al. (2010: 6) sagen hiermit aus, dass der geringe Sedimenthaushalt im Flussunterlauf zu einer Vertiefung des Flussbetts führt. Grobkörnigeres Sediment wird abgebaut, da der Fluss erneut Sediment aufnehmen muss. XIAOQING (2003: 104) erklärt: *„Erosion takes place below the dam where the released water is clear.“* BAKIS (2007: 262) erwähnt dieselbe Problematik, vertritt allerdings anders als die zuvor erwähnten SUFLITA et al. und XIAOQING, dass es lediglich zu einer Erosion kommen kann. Zusätzlich erhöht sich die Abflussgeschwindigkeit, was möglicherweise zu einer weiteren Vertiefung führt. Durch die Einsenkung des Flusslaufes wird der Grundwasserspiegel abgesenkt, was wiederum Auswirkungen auf die umliegenden Regionen hat. In Bezug auf Stauraumspülungen ergeben sich große Probleme für die Fischwelt, da sich durch das Abschwemmen plötzlich stark auftretende Schwebstoffvorkommen ergeben (vgl. PARTL 1982:101).

PARTL (1982: 33) weist zusätzlich auf ein interessantes Detail hinsichtlich der Probleme hin, welche im Unterlauf eines festen Wehres entstehen können. Der Autor stellt dar, dass jene Energie, welche durch den Wasserabsturz über die Grundschwelle des Wehres freigegeben wurde, in einem Sturzbett aufgehoben werden muss. Dies dient zur Verhinderung einer möglichen Entstehung von Kolken an den Ufern, was wiederum dazu führen kann, dass durch

diese Kolke eine Uferzerstörung stattfindet und das Wehr dadurch zerstört werden könnte (vgl. PARTL 1982:33).

1.7.2 Negative Konsequenzen flussaufwärts

Das auf den ersten Blick größte Problem, welches sich durch die Stauraumverfüllung für die flussaufwärts gelegene Region ergibt, ist die Möglichkeit einer Deltabildung. Wie bereits zuvor näher betrachtet und erörtert wurde, setzen sich grobe Sedimente bereits beim Eintritt des Flusses in den Stauraum ab. Aus diesem Grund kann es dazu kommen, dass sich das gröbere Material bereits immer weiter hinten abzulagern beginnt und dies so in langsamen Schritten zu einer Sedimentakkumulation im eigentlichen Flusslauf führt, was wiederum die Anhebung des natürlichen Flussbetts bedeutet. Diese Aggradation des Flusslaufes kann zu Überschwemmungen im Flussoberlauf führen. MORRIS und FAN (1998: 24) erklären: „*Channel aggradation can increase flooding of infrastructure, communities, and agricultural lands on floodplains.*“ Die beiden Autoren sprechen hier mit den Überflutungen von Ackerflächen einen interessanten Punkt an. Wie in Kapitel 3.1 erklärt wird, spielt die Bodenbedeckung hinsichtlich einer möglichen Erosion eine entscheidende Rolle. Sollte eine Überschwemmung nun eine Region betreffen, die in diesem Zeitraum gerade unbestellt ist oder gar nicht bewirtschaftet wird und total brach liegt, so ist die Gefahr einer Erosion deutlich erhöht. Das gelöste Material würde dann flussabwärts transportiert werden, das gröbere Material dürfte sich bereits im Flusslauf ablagern und so zu einer weiteren Vergrößerung des Deltas führen.

1.7.3 Negative Konsequenzen im Stauraum

Nachdem Kleinwasserkraftwerke zur Energiegewinnung erbaut wurden, liegt der Fokus hierbei vor allem auf den negativen Konsequenzen auf die Energieerzeugung. So besteht die Gefahr, dass die Sedimentteilchen die Kraftwerksturbinen beschädigen. Auch gibt es durch die Stauraumverfüllung Probleme hinsichtlich der Energiegewinnung, da nicht mehr die übliche Energie durch das Wasser erzeugt werden kann. MORRIS und FAN (1998: 24) erklären diesen Fall: „*Loss of storage eliminates the potential to capture high flows for subsequent energy generation.*“ Zusätzlich zu den bereits erläuterten Problemen kann es durch die Sedimentation in einem Stauraum zu einer Verschließung der Auslässe kommen, was vor allem bei einem benötigten Leeren des Reservoirs zu Problemen führt.

1.8 Mögliche ökologische Auswirkungen durch den Kraftwerksbau

Obgleich der Fokus dieser Arbeit primär auf die geomorphologischen Probleme, welche durch den Kleinwasserkraftwerksbau entstehen können, gerichtet ist, sollen die Beeinträchtigungen auf die Ökologie nicht außer Acht gelassen werden. ZAUGG und LEUTWILER (1996: 14) erläutern in ihrem Werk mögliche negative Konsequenzen auf Ökosysteme, die sich durch den Betrieb von KWKW ergeben. So argumentieren die beiden Autoren, dass es durch den Bau eines Wehres zur Isolation von Populationen kommen kann, da diese als Wanderungsbarriere für Wirbellose und Fische gilt. Durch das Ausleiten von Wasser in die Fallleitungen kann dies laut ZAUGG und LEUTWILER (1996: 14) außerdem zu einer Trockenlegung des Bachbettes im Bereich der Restwasserstrecke führen, zusätzlich ergibt sich auch das Problem einer Temperaturveränderung. Im Staubereich selbst besteht die Gefahr der Sauerstoffübersättigung, auch argumentieren ZAUGG und LEUTWILER (1996: 14), dass es durch das verstärkte Absetzen von Sedimenten zu einer schlechten Wasserqualität kommen könnte. Hinsichtlich der vorhandenen Turbinen ist auf die Problematik der Turbinenmortalität von Fischen hinzuweisen (vgl. ZAUGG und LEUTWILER 1996: 14).

1.9 Mögliches Konfliktpotential durch den Bau von Kleinwasserkraftwerken

Bei der Erbauung von Kleinwasserkraftwerken gilt es, kritische Punkte zu beachten. PARTL (1982: 100) stellt vier von ihnen dar: Diese sind einerseits mögliche Konflikte mit dem Landschaftsschutz, andererseits potentielle Problematiken hinsichtlich einer verpflichtenden Restwasservorschrift. Auch die Fragestellungen der Stauraumbewirtschaftung (Die Problematik der Stauraumverfüllung wurde in Kapitel 1.7 genauer erläutert.) und einer möglichen landschaftszerstörenden Bauweise gelten als Sujets mit Konfliktpotential.

Der Bau von Kleinwasserkraftwerken kann dazu führen, dass naturbelassene Landschaftsteile immer seltener werden. So erklärt PARTL (1982: 100), dass bereits schon vor der Planung von KWKW geprüft werden soll, ob ein Bau geschützten Gebieten nahe kommen könnte oder gar durch solche verlaufen würde.

Restwassermengen gelten als verpflichtend, um das biologische Gleichgewicht eines Baches aufrecht zu halten. Die sogenannte Pflichtwasserabgabe muss am Wehr an den Unterlauf erfolgen und somit geht dieses Wasser für die Wasserkraftnutzung verloren. Eine Wasserdotierung muss beispielweise verpflichtend eingeführt werden, wenn durch die Trockenlegung des Unterlaufs dort angesiedelte Lebewesen gestört werden (vgl. PARTL 1982:100–101).

1.10 Rechtliche Grundlagen beim Bau von Wasserkraftanlagen

Das wichtigste rechtliche Regelwerk für die Genehmigung eines Kleinwasserkraftwerkes stellt das Wasserrechtsgesetz, welches ein Bundesgesetz ist, dar. Sehr ausführlich sind die notwendigen Anforderungen an die Planung und Ausführung von Kleinwasserkraftwerken u.a. im Leitfaden für Kraftwerksplanungen des Landes Niederösterreich (NOE 2011) dargestellt.

Bezugnehmend auf den Leitfaden der Niederösterreichischen Landesregierung (im Folgenden kurz NOE) im Bezug auf die Kraftwerksplanung (2011: 6ff) soll hier auf die wichtigsten Punkte eingegangen werden, die hinsichtlich des Baus eines Wasserkraftwerks befolgt werden müssen. Im ersten Schritt muss man beachten, dass bei Anlagen ≤ 500 kW die Bezirksverwaltungsbehörde als Ansprechpartner gilt. Ab einer Höchstleistung von ≥ 500 kW ist der Landeshauptmann als Behörde zuständig. Bei einem Antrag hat man grundsätzliche Angaben über das Vorhaben zu liefern, beispielsweise muss das konkrete Vorhaben beschrieben und eine Lokalisierung vorgenommen werden. Zudem muss Bescheid gegeben werden, ob eine neue Anlage erbaut oder eine bestehende saniert wird. Überdies werden Angaben zur vorgesehenen Nutzung benötigt, so muss das Ausmaß der Wassernutzung (Ausbauwassermenge, Leistung und Fallhöhe) sowie der Typus definiert werden. Darüber hinaus werden die Angaben über die geplante Fischaufstiegshilfe sowie Daten über den Abfluss gefordert. Außerdem gilt es festzustellen, ob es sich bei dem benutzten Gewässer um einen natürlichen oder künstlich geschaffenen Wasserkörper handelt, obendrein müssen über den Ist-Zustand des Gewässers Informationen eingeholt werden. Diese wären beispielsweise Details zum ökologischen Zustand oder zur hydromorphologischen Belastung. Zudem muss man erörtern, ob Schutzgebiete betroffen sind, auch müssen Angaben zum Gewässertyp gemacht werden (vgl. NOE 2011: 6–8).

Nachdem die zuvor beschriebenen Schritte durchgeführt wurden, muss man folgende Fragen zur Ersteinschätzung des Vorhabens beantworten. Beispielsweise ist zu erklären, ob der geplante Bau zu einer Verschlechterung der gewässerökologischen Situation führt. Dies könnten beispielsweise Verschlechterungen aus hydromorphologischer Sicht sein. Außerdem muss ausgearbeitet werden, inwiefern eine Fischpassierbarkeit gewährleistet wird. Zudem gilt es zu konstatieren, dass ausreichend Restwasser vorhanden ist. Obendrein muss man einschätzen, ob ökologisch sensible Bereiche, wie beispielsweise Auen, durch den Bau der Wasserkraftanlage gefährdet sind. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass durch die Erbauung des

Wasserkraftwerks weder der Hochwasserschutz noch das Grundwasser beeinträchtigt wird (vgl. NOE 2011: 8–9).

Neben dem Wasserrechtsgesetz (WRG 1959 BGBl Nr.14/2011) sind auch weitere rechtliche Rahmenbedingungen zu beachten, wie etwa das Forstgesetz (Rodungen) oder aber auch landesrechtliche Rahmenbedingungen, wie z.B. die Naturschutzgesetze der einzelnen Länder (z.B. Ausweisung von Natura 2000 – Gebieten).

2 Der Klimawandel in der Steiermark

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Bundesland Steiermark bis ins Jahr 2050. Hierbei werden die unterschiedlichen Prognosen für die einzelnen Regionen beziehungsweise Bezirke der Steiermark präsentiert. Die Klimaszenarien (STMK12) zeigen Studien, die vom Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel im Auftrag des Landes Steiermark durchgeführt wurden (vgl. GOBIET et al. 2012). Die Daten setzen sich aus Ergebnissen von 24 Klimasimulationen mit einer Auflösung von 1 km x 1 km zusammen, 22 dieser Simulationen entstammen dem EU-Projekt ENSEMBLES, 2 aus dem österreichischen Projekt reclip:century. Alle 24 Klimasimulationen beziehen sich allerdings auf das SRES-Szenario A1B, welches vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) im 4. offiziellen Bericht aus dem Jahr 2007 veröffentlicht wurde. Als Vergleichszeitraum (VZ) wurde die Zeitspanne 1971–2000 gewählt. (vgl. GOBIET et al. 2012:10). Der IPCC (2007:943) definiert den Klimawandel wie folgt: *„Climate change refers to a change in the state of the climate that can be identified [e.g., by using statistical tests] by changes in the mean and/or the variability of its properties, and that persists for an extended period, typically decades or longer. Climate change may be due to natural internal processes or external forcings, or to persistent anthropogenic changes in the composition of the atmosphere or in land use.“* Beim Klimawandel handelt es sich laut IPCC somit um eine Änderung des Klimas, welches durch beispielsweise statistische Tests durch Änderungen in der Variabilität der Eigenschaften oder Änderungen der Mittelwerte gekennzeichnet ist und für einen längeren Zeitraum, meist über Dekaden, stattfindet. So kann der Klimawandel durch natürliche interne oder externe Kräfte erfolgen, jedoch auch durch den anthropogenen Eingriff, sei es durch Einwirkungen auf die Atmosphäre oder die Landnutzung, hervorgerufen werden. Abbildung 5 zeigt die verschiedenen, vom IPCC, berechneten Szenarien über die Entwicklung der durchschnittlichen globalen Temperatur bis ins Jahr 2100. Die zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnisse resultieren aus verschiedenen Berechnungen, jedoch soll hier nur kurz auf das für

die Steiermark relevante Szenario eingegangen werden. Ausgehend davon wird für das Szenario A1B, welches unter der Annahme einer ausgeglichenen Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen berechnet wird, ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um zirka 2,8°C errechnet, die Spannweite bewegt sich hierbei zwischen einer Zunahme von 1,7°C und 4,4°C. Sieht man sich nun das Jahr 2050 in der Abbildung 5 an, so erkennt man, dass die Berechnungen des IPCC für das Szenario A1B einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von knapp 1,5°C ergeben.

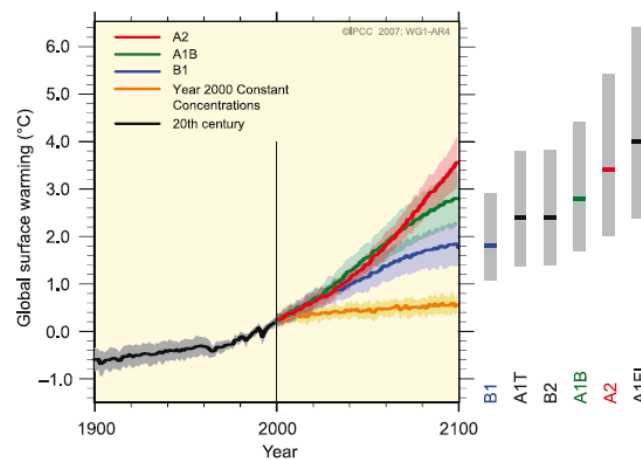


Abbildung 5: Differente Szenarien des IPCC über die Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100; Quelle: IPCC (2007: 14)

Die folgenden Zeilen sollen nun einen Überblick über die Entwicklung des Klimas in den einzelnen Regionen der Steiermark bis ins Jahr 2050 bieten. Genauer wird die Entwicklung der Temperatur, des Niederschlags, der Starkniederschläge (Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme über 30 mm), der Schneedeckentage (Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mehr als 30cm; vgl. GOBIET et al. 2012: 26) und der Trockenperioden (längster Zeitraum aufeinanderfolgender Tage mit weniger Niederschlag als 1mm) erläutert. Es sei hier für das Verständnis der folgenden Unterkapitel erwähnt, dass bezüglich der Thematik des Niederschlags auf die Jahreszeiten eingegangen wird. Das Frühjahr umfasst die Monate März, April und Mai, der Sommer Juni, Juli und August, der Herbst die Monate September, Oktober und November sowie der Winter Dezember, Jänner und Februar.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden lediglich einige Besonderheiten der einzelnen Regionen besprochen, hierbei auch auffallende Kennzeichen in den Bezirken betrachtet, alle dabei erläuterten Informationen beruhen auf der von GOBIET et al. (2012) veröffentlichten Publikation.

2.1 Graz und Graz – Umgebung

Für beide Bezirke wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur (JMT) um 1,3°C bis 2050 erwartet, die Erwärmung fällt in den Frühjahrsmonaten am geringsten, in den Wintermonaten jedoch am höchsten aus. Der Jahresmittelwert der Temperatur für die Vergleichsperiode von 1971–2000 beträgt für den Bezirk Graz 9,6°C und steigt somit bis 2050 auf 10,9°C an. Der Wert für den Bezirk Graz-Umgebung lag in der Vergleichsperiode bei 8,1 °C, für 2050 erwartet man somit eine JMT von etwa 9,4°C.

In beiden Bezirken wird die Temperatur im Dezember am deutlichsten ansteigen, in Graz wird eine Erhöhung von 0,3°C der Monatsmitteltemperatur des Vergleichszeitraums auf 1,9°C im Jahr 2050 kalkuliert, für Graz-Umgebung befürchtet man gar einen Anstieg von -0,6°C auf 1,1°C.

Betrachtet man die Änderungen hinsichtlich des Niederschlags, so kann im Fall von Graz ein mittlerer Anstieg von 5,8% bis 2050 vorausgesagt werden. Für den Bezirk Graz-Umgebung fällt das Szenario weniger drastisch aus. Man erwartet hier eine Erhöhung um 5,1% bis ins Jahr 2050. Die gravierendsten Niederschlagszunahmen finden voraussichtlich in den Herbst- und Wintermonaten statt, hierbei wird im Mittel für den Bezirk Graz eine Erhöhung von 7,2% (Herbst) bis 9,9% (Winter) und für Graz-Umgebung 6,9% (Herbst) sowie 7,7% (Winter) prophezeit. Besonders außergewöhnlich sind hierbei die Monate September (in beiden Bezirken zirka 10%) und Oktober (ebenso etwa 10%) sowie der Dezember mit bis zu etwa 17% erhöhtem Niederschlagsaufkommen. Je nach Modell wird für den Herbst und den Winter allerdings ein Anstieg der Niederschlagssumme von bis zu 25% prophezeit. So kann es im Bezirk Graz bis 2050 zu einem Anstieg der Niederschlagssumme in den Wintermonaten von 96 mm aus der Vergleichsperiode bis hin zu 112 mm im Jahr 2050 kommen, in Graz-Umgebung wird für die Herbstmonate ein Anstieg von 240 mm (1971–2000) bis hin zu 292 mm erwartet. Die beiden Exempel stellen je die Extremwerte dar, welche aus den Modellen für die beiden Bezirke berechnet wurden. Die Niederschlagssumme der Frühjahrsmonate nimmt im Vergleich dazu selbst mit den höchsten berechneten Werten deutlich geringer zu, der Monat Juli wird in beiden Bezirken einen deutlichen Rückgang des Niederschlags erfahren. Für die Sommermonate ergeben die Berechnungen für beide Bezirke nur einen leichten mittleren Anstieg der Niederschlagssumme, für den Monat Juli wird in beiden Fällen sogar von einem Rückgang ausgegangen.

Sieht man sich die Anzahl der Schneedeckentage an, so fällt Folgendes auf: In Graz erwartet man bis 2050 etwa 1,8 Tage weniger mit einer geringeren Schneedecke als 30cm, für den Bezirk Graz-Umgebung wird sogar ein Minus von 6,3 Tagen bis ins Jahr 2050 errechnet.

Auch hier ergeben unterschiedliche Modelle differente Ergebnisse. So wäre es durchaus möglich, dass im Bezirk Graz-Umgebung bis 2050 sogar zwölf Schneedeckentage weniger zu erwarten sind.

Eine Erhöhung dürfte auch die Anzahl an Starkniederschlagstagen für beide Bezirke erfahren. Graz wird im Mittel im Jahr bis 2050 etwa 0,7 Tage vermehrte Starkregenniederschläge zu erwarten haben, in Graz-Umgebung liegt der Wert mit 0,9 Tagen etwas höher. Die größten Anstiege werden in beiden Bezirken für Juni sowie die Herbstmonate prophezeit.

Auch zu erwähnen sind die Prognosen hinsichtlich der Trockenperioden, welche für beide Bezirke zwar keine zuverlässige Aussage zulassen, jedoch tendenziell eine Verlängerung der Trockenperioden im Sommer und eine Verkürzung im Winter ergeben.

2.2 Oststeiermark

Zur Region Oststeiermark zählen die Bezirke Hartberg-Fürstenfeld (vormals die separaten Bezirke Hartberg und Fürstenfeld), der Bezirk Weiz sowie der Bezirk Südoststeiermark, welcher sich seit dem 1. Jänner 2013 aus den ehemaligen Bezirken Bad Radkersburg und Feldbach zusammensetzt.

Die Jahresmitteltemperatur dürfte laut den Berechnungen bis 2050 in allen drei Bezirken um 1,3°C steigen, auch werden hier die höchsten Anstiege für die Wintermonate prophezeit. Dies ergibt für Hartberg-Fürstenfeld eine Entwicklung von 8,6°C im Jahresschnitt auf 9,9°C, für den Bezirk Südoststeiermark Werte von 9,8°C auf 11,1°C und für Weiz einen Anstieg von 7,3°C auf 8,6°C. Im Bezirk Südoststeiermark erwartet man im Februar einen Anstieg um beinahe 2°C, es wird im Jahr 2050 ein Monatsmittelwert von 2,7°C prognostiziert. In den Bezirken Hartberg-Fürstenfeld und Weiz errechnet man für den Dezember den deutlichsten Anstieg von ungefähr 1,7°C, was in Hartberg-Fürstenfeld zu Monatsmitteltemperaturen im Dezember von 1,5°C führen wird.

Für die drei Bezirke erwartet man bezüglich der Entwicklung der Niederschlagsjahresmittel Anstiege zwischen 3,2% (Südoststeiermark) und 5,7% (Hartberg-Fürstenfeld). Für den Bezirk Südoststeiermark werden allerdings Unsicherheiten hinsichtlich der Niederschlagsprognose für das Frühjahr und den Sommer erwähnt. Wie schon bei der Region Graz und Graz-Umgebung wähnt man die höchsten Anstiege sowohl in den Herbst- als auch in den Wintermonaten. So ergeben die Berechnungen deutliche Anstiege für die Monate September, Oktober und Dezember. Geht man von den Extremwerten aus, so muss man für den Bezirk Hartberg-Fürstenfeld Niederschlagszunahmen von über 24% einkalkulieren, das würde für die Herbstmonate im Bezirk Hartberg-Fürstenfeld einen Anstieg von 188 mm aus dem Ver-

gleichszeitraum auf bis zu 234 mm im Jahr 2050 bedeuten. Auch bei den Mittelwertberechnungen geht man davon aus, dass für die Herbstmonate mit einem Niederschlagsanstieg in den drei Bezirken von 4,3% (Südoststeiermark) bis hin zu 7% (Hartberg-Fürstenfeld) zu rechnen ist. Im Winter vermutet man gar einen mittleren Anstieg von 10,4% in Hartberg-Fürstenfeld. Für die Sommermonate werden, hier sei erneut auf die zuvor erwähnten Unsicherheiten hingewiesen, auch hinsichtlich der prognostizierten Mittelwerte für die Bezirke Hartberg-Fürstenfeld und Südoststeiermark Abnahmen des Niederschlags errechnet.

Erhöhte Starkregenereignisse erwartet man im Bezirk Hartberg-Fürstenfeld im Speziellen für die Monate August bis Oktober, wobei im August der Höchstwert erreicht werden dürfte. In den beiden anderen Bezirken verhält es sich beinahe ident, lediglich prophezeit man für die Südoststeiermark den höchsten Anstieg im September und für den Bezirk Weiz im Oktober. Ähnlich wie schon im Kapitel zuvor wird die Anzahl der Starkregenniederschlagstage in der Oststeiermark bis 2050 nur marginal zunehmen. Die Werte bewegen sich für diese drei Bezirke zwischen einer Zunahme von 0,5 bis 0,7 Tagen bis ins Jahr 2050.

Vergleichbar mit der Region Graz und Graz-Umgebung verhält sich auch die Abnahme der Schneedeckentage. So erwartet man im Jahresmittel hier einen Rückgang zwischen 3,3 Tagen (Hartberg-Fürstenfeld) und 9 Tagen (Weiz) bis 2050. Berechnungen hinsichtlich des schlimmsten Szenarios ergeben sogar eine Abnahme von über 15 Tagen, selbst die positivsten Szenarien zeigen eine negative Entwicklung der Schneedeckentage.

Hinsichtlich der Prognosen für die Trockenperioden, welche für die drei Bezirke zwar keine zuverlässige Aussage zulassen, ist zu erwähnen, dass es in den Bezirken Hartberg-Fürstenfeld und Weiz vermutlich zu einer Ausdehnung der trockenen Perioden in allen Jahreszeiten außer im Winter kommt, für den Bezirk Südoststeiermark wird eine Verlängerung in den Frühlings- und Sommermonaten angenommen.

2.3 Weststeiermark

Zur Region der Weststeiermark zählen die Bezirke Deutschlandsberg, Leibnitz und Voitsberg.

Auch für diese Bezirke gilt dasselbe wie schon für jene zuvor. So nimmt auch hier die Jahresmitteltemperatur bis 2050 um 1,3°C zu (Deutschlandsberg von 8,1°C auf 9,4°C, Leibnitz von 9,7°C auf 11°C und Voitsberg von 6,9°C auf 8,2°C). Ebenso ident sind die Jahreszeiten, in denen der größte Anstieg der Temperatur zu erwarten ist. Im Bezirk Deutschlandsberg ergeben die verschiedenen Klimaszenarien im Mittel für die Monate Jänner und Dezember einen Anstieg von etwa 1,7°C, das bedeutet, dass es im Jänner eine Erhöhung der Temperatur von -2°C auf -0,3°C bis ins Jahr 2050 gibt, im Dezember kalkuliert man eine Zunahme von

-1,1°C auf 0,6°C. Für den Bezirk Leibnitz gilt das Gleiche, jedoch vermutet man hier auch im Februar einen Anstieg um 1,7°C. So prophezeit man dem Dezember im Bezirk Leibnitz im Jahr 2050 Monatsmittelwerte von 1,2°C, dem Februar gar Werte von 2,4°C. Etwas geringere Erhöhungen zeigt der Bezirk Voitsberg, lediglich im Dezember wird eine Zunahme von 1,6°C auf eine Monatsmitteltemperatur von 0,1°C angenommen.

Die errechneten Niederschlagssummen im Jahr erfahren einen Anstieg von 3,7% im Jahresmittel bis hin zu 5,3%, wobei jedoch für die Bezirke Deutschlandsberg und Leibnitz Unsicherheiten bei den Berechnungen im Frühjahr und Sommer zu erwähnen sind. Sowohl für die Herbst- als auch die Wintermonate werden die höchsten Anstiege aufgezeigt, in Voitsberg konstatiert man bei den Extremwerten eine Zunahme von bis zu 25% im Herbst. Das würde für die Region bedeuten, dass der Mittelwert des Niederschlags in den Herbstmonaten von 237 mm auf 295 mm steigen würde. Die Erwartungen für die Sommermonate liegen zwar bezüglich den Extremwerten deutlich unter den Herbst- und Winterkalkulationen, es könnte möglicherweise aber auch dazu kommen, dass beispielsweise im Bezirk Deutschlandsberg der Niederschlag im Sommer von 380 mm auf 434 mm ansteigt. Nimmt man allerdings die Mittelwerte sämtlicher Klimaszenarien zur Hand, so werden die höchsten Anstiege der Niederschläge für die Monate September, Oktober und Dezember errechnet. In den Sommermonaten erwartet man in den Bezirken Deutschlandsberg und Leibnitz Rückgänge der Niederschläge, im Bezirk Voitsberg prophezeit man eine leichte Zunahme, geht allerdings auch davon aus, dass im Juli Niederschlagseinbußen zu erwarten sind.

Die Szenarien betreffend die zukünftigen Starkregenereignisse bis ins Jahr 2050 erbringen ähnliche Ergebnisse wie schon bei den Kapiteln zuvor. Die höchste Zunahme mit einem Mittelwert von 0,8 Tagen im Jahr bis 2050 wird für den Bezirk Voitsberg berechnet, die Extremwerte zeigen sogar einen möglichen Anstieg um 2 Tage. Für alle drei Bezirke werden für den September die deutlichsten Erhöhungen vermutet, allgemein kann auch hier konstatiert werden, dass die Starkregenniederschläge im Herbst am stärksten zunehmen werden.

Für den Bezirk Voitsberg werden unter den drei Bezirken dieser Region die deutlichsten Abnahmen die Schneedeckentage betreffend errechnet, so geht man im Mittel von einer Abnahme um 10,2 Tage bis 2050 aus, wobei 8,2 Tage hier in den Winter fallen. Die schlimmsten Prognosen sprechen gar von einer Abnahme von etwa 17 Tagen. Bei den positivsten Szenarien ergibt sich einzig im Bezirk Leibnitz ein möglicher Anstieg der Schneedeckentage, dieser hält sich allerdings mit 0,4 Tagen bis 2050 in Grenzen.

Auch im Bezug auf die Entwicklung der Trockenperioden erwartet man sich ähnliche Ergebnisse wie in den zuvor behandelten Regionen, im Sommer geht man von einer Zunahme aus, im Herbst und Winter jedoch von einer minimalen Abnahme.

2.4 Obersteiermark

Die Region Obersteiermark umfasst die Bezirke Bruck-Mürzzuschlag, Leoben, Liezen, Murau und Murtal (vormals Knittelfeld und Judenburg).

Während bei den zuvor erläuterten Regionen der Temperaturanstieg des Jahresmittels bis 2050 bei 1,3°C lag, kann für die Region Obersteiermark festgestellt werden, dass für diesen Bereich der Steiermark der höchste Anstieg der Jahresmitteltemperatur zu erwarten ist. Der Bezirk Murau beispielsweise erfährt nach den Prognosen im Falle der mittleren Szenarien eine Erwärmung von 1,5°C, im schlimmsten Fall sogar 2,4°C. Interessant ist auch die Tatsache, dass entgegen den zuvor bearbeiteten Regionen die größten Anstiege nicht im Herbst und Winter zu erwarten sind, sondern hier vermutlich die Sommer- und Wintermonate von einem deutlicheren Anstieg betroffen sein werden. Für den Bezirk Bruck-Mürzzuschlag wird in etwa ein Anstieg der Julitemperatur um 1,6°C prophezeit, das würde bedeuten, dass die Mitteltemperatur von 14,9°C auf 16,5°C ansteigen würde. In Leoben beispielsweise ergibt der berechnete Anstieg eine mittlere Julitemperatur von 17,7°C im Jahr 2050.

Geringe Unterschiede im Vergleich zu den vorherigen Kapiteln ergeben sich auch bei der Entwicklung der Niederschläge. Zuvor waren die höchsten prozentuellen Anstiege im Herbst und Winter anzusetzen. Nun ist festzuhalten, dass für diese Bezirke die größten Änderungen im Frühjahr und Herbst zu erwarten sind, zumindest was den mittleren Anstieg der Niederschläge betrifft. So berechnet man im Frühjahr für den Bezirk Liezen einen mittleren Anstieg um 7,6%, das bedeutet eine Erhöhung von 304 mm auf 327 mm. Interessant ist allerdings, dass die verschiedenen Klimaprognosen im Speziellen im Winter eine auffallende Uneinigkeit aufzeigen. So schwanken die Möglichkeiten hinsichtlich der Entwicklung der Niederschläge im Winter für den Bezirk Liezen zwischen einer Abnahme von knapp 23% bis hin zu einem Anstieg von etwa 27%. Nimmt man nun die ausgehenden Werte der Vergleichsperiode zur Hand, ergibt sich folgendes Bild:

Ausgehend von einem Mittelwert von 262 mm (Vergleichszeitraum 1971–2000) wäre bei einer Abnahme von 23% ein Mittelwert von 203 mm zu erwarten, bei einem Anstieg von 27% käme es zu einer Erhöhung der Niederschlagssumme auf 332 mm. Deutliche Anstiege werden auch im Bezirk Murau prognostiziert, so wird der Mittelwert für die Herbstmonate bei 8,3%

angegeben, was einen Anstieg von 300 mm auf 321 mm bedeuten würde. Die Maximalwerte ergeben sogar einen Anstieg von 26%, was wiederum eine Erhöhung auf 370 mm besagen würde. Ähnliche Bilder ergeben sich auch für die restlichen Bezirke in dieser Region, jedoch soll für genauere Informationen hier erneut auf den Anhang verwiesen werden. Für die Sommermonate wird für jeden Bezirk ein Anstieg der mittleren Niederschlagssumme errechnet, lediglich marginale Abnahmen werden im Juli erwartet.

Auch betreffend die zu erwartenden Anstiege bei den Starkregenereignissen liegt man im Schnitt etwas höher, doch zeigen sich auch hier die höchsten Werte im Herbst, wiewohl auch in den Sommermonaten durchaus ein Anstieg erwartet werden darf. Die größte Zunahme wird im Bezirk Liezen zu erwarten sein, der Maximalwert ergibt hier eine Erhöhung der Starkniederschlagstage um bis zu 2 Tage bis 2050.

Radikale Einbußen ergeben die Berechnungen jedoch für die Schneedeckentage, so zeigt der Mittelwert für den Bezirk Murtal eine Abnahme von etwa 25 Tagen bis 2050. Im Falle der schlimmsten Erwartungen kann gar mit einem Rückgang von 40 Tagen gerechnet werden. Auch für den Bezirk Bruck-Mürzzuschlag muss von einem maximalen Rückgang von etwa 39 Tagen ausgegangen werden, selbst die positivsten Berechnungen gehen bei allen 5 Bezirken von einem deutlichen Rückgang der Schneedeckentage aus, die geringsten Einbußen erwartet man in den Bezirken Bruck-Mürzzuschlag und Murau, wo man damit rechnet, dass die Verluste bei 12 Tagen liegen werden. Im Speziellen wird durchgehend der Jänner am deutlichsten betroffen sein.

Auch die Entwicklung der Trockenperioden gilt es zu beachten. So kann für alle Bezirke in dieser Region festgestellt werden, dass sich diese Perioden vor allem im Sommer etwas verlängern.

2.5 Zusammenfassung der Klimaszenarien

Laut GOBIET et al. (2012: 22) ist in der Steiermark bis 2050 für alle Monate mit einem Anstieg der Temperatur zu rechnen, wobei sich eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur im Bereich von durchschnittlich 1,4°C voraussagen lässt, auf kleinere Abweichungen hinsichtlich der regionalen und saisonalen Erstreckung sei hier jedoch hingewiesen.

Bezüglich des Niederschlags lässt sich erkennen, dass dieser im Speziellen vom Herbst bis in den Frühling um bis zu 10% im Mittel zunehmen wird, für den Sommer kann jedoch zu meist keine zuverlässige Aussage getätigt werden, man geht jedoch von einem Anstieg von Trockenperioden aus. Es soll hier außerdem nicht unerwähnt bleiben, dass hinsichtlich der Niederschlagsentwicklungen in den drei südlichen Bezirken der Steiermark, Deutschlands-

berg, Leibnitz und Südoststeiermark, keine statistisch signifikanten und repräsentativen Werte errechnet werden konnten (jene Bezirke, in denen die mittlere jährliche Veränderung des Niederschlags unter 5% liegt). Interessant ist ebenso, dass Niederschläge wider Erwarten im Herbst und Frühjahr nicht häufiger auftreten werden, vielmehr ergeben die Szenarien heftigere Niederschlagsereignisse.

Schneedeckentage werden in der Wintersaison von Dezember bis Februar teils um bis zu 50% abnehmen (vgl. GOBIET et al 2012: 21–26).

Bei der Berechnung der Entwicklung von Trockenperioden konnten keine zuverlässigen Ergebnisse erbracht werden. Laut GOBIET et al. (2012: 28) sind in der Steiermark längere Trockenperioden bis 2050 durchaus möglich, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit nicht groß. Am ehesten werden jedoch die Sommermonate von vermehrten Trockenperioden betroffen sein.

3 Feststofftransport in Fließgewässern

Nach der Betrachtung der Klimaszenarien der Steiermark bis ins Jahr 2050 wird in diesem Kapitel die Thematik des Feststofftransports in Fließgewässern genauer behandelt. Dieser Part repräsentiert einen wichtigen Teilbereich, welcher für diese Arbeit von Nutzen sein wird, um Prognosen für die Zukunft der Feststofftransporte stellen zu können. Aus diesem Grund sollen dem Leser die wichtigsten Grundprinzipien dieser Vorgänge in den nächsten Kapiteln näher gebracht werden.

3.1 Systematik

Abbildung 6 verdeutlicht die Systematik des Feststoffeintrags in das System Fluss. Ausgangslage für die mitgeführten Feststoffe, welche MANGELSDORF und SCHEURMANN (1980: 39) als alle Beimengungen des Wassers mit Ausnahme der Lösungsfracht bezeichnen, ist der sogenannte Feststoffherd. Hierbei werden durch chemische Prozesse, Erosion und die Schwerkraft Feststoffe für den Fluss gewonnen, den größten Teil der Feststoffmenge gewinnt ein Fluss bereits in seinem Oberlauf, im Mittelauf kommt es sowohl zur Erosion als auch zur Absetzung von Feststoffen, im Unterlauf schlussendlich meist nur mehr zur Absetzung. Gleichzeitig reduziert sich flussabwärts die Korngröße des mittransportierten Materials, wie auch die Sohlneigung flussabwärts kontinuierlich abnimmt (vgl. CHURCH et al. 2009: 105).

Hinsichtlich der Erosion, welche ZEPP (2002: 138) als Ablösung bezeichnet, welche Partikel vom Ufer und von der Gewässersohle aufnimmt, und deren Prozesse seien hier anfangs

zwei wichtige Typen genannt, die wesentlichen Einfluss auf den Sedimentgehalt eines Flusses aufweisen:

So handelt es sich bei der Seitenerosion um einen wesentlichen Bestimmungsfaktor bezüglich des Sedimentgehalts in einem Fluss. Gemäß der Homepage der Freien Universität Berlin (FUB 2007^b) wird bei einer Seitenerosion das Flussufer bedingt durch Erosion rückverlegt. Diese Erosionsform kann sowohl feineres Material mit sich bringen, aber auch größere Sedimente mit sich reißen (vgl. HEITFELD 1991: 297). PATT et al. (1998: 30) stellen zudem fest, dass die Seitenerosion die Bildung von Steilufern, im Speziellen an Prallhängen, fördert. Diese Steilufer werden im nächsten Schritt unterspült, brechen darauffolgend ab und stellen somit Material für den Fluss zur Verfügung (vgl. PATT et al. 1998: 30). Zusätzlich zu der zuvor erwähnten Erosion kommt auch der Tiefenerosion eine entscheidende Bedeutung zu. Hierbei handelt es sich um einen Typus von Erosion, der im Bachbett stattfindet und teils grobes Material mit sich nimmt. GALAY (1983: 1057) verdeutlicht zur Tiefenerosion noch einen entscheidenden Punkt: „*The term ‚degradation‘ implies an extensive and often progressive lowering of the river bed over a fairly long distance.*“ Der Autor verweist hierbei deutlich darauf, dass es durch den Abbau des Materials an der Sohle des Flusses zu einer Vertiefung kommt.

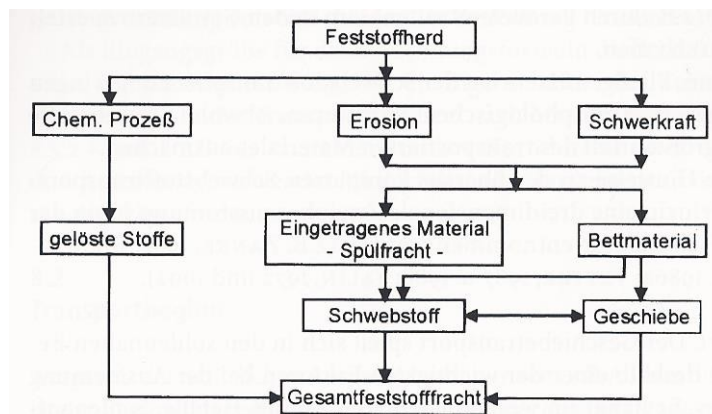


Abbildung 6: Schema zum Feststofftransport; Quelle: PATT et al. (1998: 167)

Zusätzlich zu den beiden zuvor beschriebenen Typen muss hier noch die Schichterrosion Erwähnung finden, welche feines Material von der Oberfläche abschwemmt und so in den Fluss transportiert. Diese Form findet man beispielsweise bei einer Überschwemmung vor (vgl. HEITFELD 1991: 297). Sie wird jedoch zumeist der Denudation, welche die flächenhafte Abtragung beschreibt, zugewiesen. Ein Beispiel jener Schichterrosion, der sogenannte „Splash-Effekt“, kommt im Speziellen während Niederschlagsereignissen und vorherrschenden trockenen Böden vor. Hierbei fallen Regentropfen auf den ausgetrockneten, gering be-

stellten Boden und reißen die feinen oberflächlichen Bodenpartikel mit, welche wiederum die Poren der Bodenoberfläche verstopfen können und so zu einem Oberflächenabfluss führen, welcher somit vorhandene Feststoffe mittransportieren und diese möglicherweise in einen angrenzenden Fluss einbringen kann.

Doch damit es überhaupt zu einer Erosion kommt, gibt es verschiedene geographische Einflüsse, die diese auslösen. Primär muss hier die Niederschlagsintensität und die Häufigkeit von Niederschlägen genannt werden. Je heftiger der Niederschlag, desto mehr Erosion kann erwartet werden. Zusätzlich zur Niederschlagsintensität spielt auch die Bodenbedeckung eine entscheidende Rolle. Je bewachsener ein Boden, desto kompakter ist er, dies schlägt sich auch auf die mögliche Erosion nieder. So fällt die Erosionsrate bei einem stark bewachsenen Boden, sei es ein bestellter Acker oder ein Wald, deutlich geringer aus als bei einer unbewachsenen Fläche. Natürlich hängt die Größe der Sedimente auch von dem vorhandenen Bodentypus ab. Bei einem sandigen Boden ist die Sedimentfracht eher klein, während hingegen bei beispielsweise skelettreichen Böden die Sedimentfracht größere Materialien aufweist. Aber auch die Topographie einer Region spielt bei der Erosion eine nicht unwichtige Rolle. Je steiler Hänge sind, umso stärker sind beispielsweise der Abfluss und einhergehend natürlich auch die Erosionsrate. Ebenfalls soll die Möglichkeit nicht außer Acht gelassen werden, dass sich im näheren Umkreis des Flussoberlaufes Moränenmaterial aus den ehemaligen Eiszeiten abgelagert hat, was sich somit auf die Art des erodierten Materials auswirkt.

Bei der Herkunft des Materials differenziert man zwischen eingetragenen Material, der Spülfracht, welches durch erosive oder denudative Prozesse eingetragen wird, und dem Bettmaterial (vgl. PATT et al. 1998: 167f). CHURCH (2006: 326) beschreibt die Spülfracht mit folgenden Worten: „*Wash material [...] is transported for a long distance in suspension. This material is found only in minor quantities [...] in the bed of the river, but may form a significant fraction of upper bank and floodplain deposits as the result of deposition in quiet water overbank during floods.*“ Dem Autor zufolge handelt es sich bei der Spülfracht somit um ein über eine lange Distanz als losgelöster Stoff transportiertes Material.

Bezogen auf PATT et al. (1998:168) ist das Bettmaterial (engl. bed material load) den Prozessen der Erosion, des Transports, der Sedimentation und der Resuspension ausgesetzt. Je nach Abfluss, Gefälle, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, sowie Korngröße und Verteilung wird das Bettmaterial entweder als Geschiebe oder als Schwebfracht im Fluss transportiert.

3.2 Feststofftransport in Flüssen

Flüsse führen abhängig von ihrer Örtlichkeit, dem Abflussvolumen und der Rauigkeit des Gewässerbetts eine gewisse Feststofffracht mit sich. GOUDIE (2002: 399) definiert drei Hauptarten der Sedimentfracht in Flüssen: die Lösungsfracht, die Schwebstoffe sowie die Geschiebefracht. Diese unterschiedlichen Typen sollen im Folgenden kurz erläutert werden (siehe auch Abbildung 6):

BRIERLEY und FRYIRS (2005: 60) beschreiben das Geschiebe (im Englischen „bed load“) als Feststoffe, welche sich gleitend, rollend oder saltierend (sprunghaft) an der Gewässersohle bewegen; für den Terminus Geschiebe wird in dieser Masterarbeit ebendiese wasserbautechnische Definition verwendet. Jedoch muss darauf verwiesen werden, dass sich das Geschiebe keineswegs immer bewegt, bei geringem Abfluss verharren diese Feststoffe (vgl. CHARLTON 2008: 106). Aus der Erklärung MANIAKS (2005: 465) geht obendrein hervor, dass es sich bei diesem Frachttypus um eine größere und schwerere Sedimentfracht handelt. ALEKSEEVSKIY (2004: 395) veranschaulicht dies: „*The bed load component [...] includes fractions of gravel, pebbles and boulders.*“ Der Autor zeigt hiermit auf, dass die Geschiebefracht unter anderem aus Kies (Korngröße von 2 mm bis 63 mm), Geröll und Steinen (Korngröße > 63 mm) besteht. Auch BRIERLEY und FRYIRS (2005: 60) erörtern: „*The bed material load is much coarser than material carried in suspension, [...].*“ Die Autoren weisen somit darauf hin, dass das Geschiebe im Gegensatz zur Schwebfracht grobkörniger ist. Zusätzlich sei hier erwähnt, dass der Geschiebetransport in Flachlandflüssen zumeist nur etwa 10% der Gesamtfracht ausmacht (vgl. WILHELMY 2002: 78).

Die Schwebfracht (im Englischen „suspended load“), auch Suspensionsfracht genannt, bezeichnet GOUDIE (2002: 399) als feine Ton- sowie Schluffpartikel (Korngröße Ton: <0,002 mm und Schluff: 0,002 mm – 0,063 mm), welche durch eine Aufwärtsbewegung in turbulenten Wirbeln im Wasser schwebend gehalten werden. WILHELMY (2002: 78) erklärt ferner, dass Schwebstoffe meist durch Oberflächenabfluss in einen Fluss eingebracht werden. Durch langsames Absinken können Schwebstoffe, anders als die zuvor erläuterte Geschiebefracht, über längere Distanzen transportiert werden. CHARLTON (2008: 53) demonstriert: „*This material is carried aloft, suspended above the channel bed by turbulent eddies, and is transported downstream in the main body of the flow.*“ CHURCH (2006: 326) bezeichnet die Suspensionsfracht und das Geschiebe als jene Sedimenttypen, welche hauptsächlich in Flüssen vorkommen.

BECHTELER (2006: 86) hebt überdies hervor, dass der Geschiebetransport bezogen auf die Menge in einem Fluss verglichen mit dem Schwebstofftransport deutlich geringer ist, er

jedoch einen wichtigen Einfluss auf die flussmorphologische Entwicklung und Ausbildung der Gewässersohle hat. Allerdings sollte beachtet werden, dass der Übergang von einer reinen Geschiebebewegung hin zu einer Suspension nicht durch Grenzen fixiert werden kann, da es sich hierbei vielmehr um einen fließenden Übergang handelt (vgl. HABERSACK et al. o.J: 29). AHNERT (2009: 150) weist zudem darauf hin, dass beispielsweise der Sand (Korngröße 0,063 mm – 2 mm) eine Zwischenstellung zwischen der Schwebfracht und der Geröllfracht einnimmt.

Nach der Betrachtung des Geschiebes und der Schwebfracht soll nun die Lösungsfracht (im Englischen „dissolved load“) näher betrachtet werden. Nach GOUDIE (2002: 399), handelt es sich hierbei um eine Fracht, welche hauptsächlich aus der chemischen Verwitterung von Gesteinen aus dem Einzugsgebiet und aus atmosphärischen Einträgen, wenn auch nur zum kleinen Teil, zusammengesetzt ist. Zumeist taucht dieser Typus in geringen Mengen in der Sedimentfracht auf, außer, so erklärt ebenfalls GOUDIE (2002: 399), in Gebieten mit stark löslichem Gestein, wie dies beispielsweise beim Kalk der Fall ist. Hier kann es dazu kommen, dass die Lösungsfracht gar den wesentlichen Bestandteil der Sedimentfracht darstellt.

Nicht außer Acht zu lassen sind die möglicherweise in einem Fluss vorhandenen Schwimmstoffe, welche PATT et al. (1998: 169) wie folgt definieren: *„Schwimmstoffe sind meist organischen Ursprungs und bewegen sich schwimmend auf der Wasseroberfläche oder oberflächennah mit der Strömung.“*

All diese nun behandelten Feststoffe ergeben zusammen, wie in Abbildung 6 ersichtlich, die Gesamtfeststofffracht eines Flusses.

3.3 Der Beginn des Feststofftransports

AHNERT (1996: 193) sagt aus, dass die Transportarbeit eines fließenden Gewässers eine Funktion seiner kinetischen Energie ist. Das Produkt aus Wassertiefe und Gefälle ist maßgebend für die Erosionskompetenz eines Fließgewässers, ergo für die Fähigkeit, Material in Bewegung zu setzen (vgl. AHNERT 1996: 193). Überdies erläutert RAUDKIVI (1982: 12): *„Wenn die Geschwindigkeit eines Stromes, [...], über einem ebenen Bett von Körnern langsam gesteigert wird, wird ein Zustand erreicht, in dem sich einzelne Körner in Bewegung setzen.“* Prinzipiell gilt, dass größere Körner der Strömung stärker ausgesetzt sind, sie jedoch größeren Strömungskräften standhalten, kleinere Körner werden durch den „Hiding-Effekt“ durch die größeren Teile abgeschirmt, haben allerdings einen geringeren Erosionswiderstand (vgl. PATT et al. 1998:171).

Als mathematische Grundlage können zwei Methoden zur Berechnung des Transportbeginns herangezogen werden. Dies wäre einerseits die Thematik der kritischen Geschwindigkeit, andererseits jene der kritischen Schubspannung. Beide erfahren im Folgenden genauere Betrachtung:

Hinsichtlich der Berechnung der kritischen Geschwindigkeit kann das Hjulström-Diagramm (siehe Abbildung 7) zur Hilfe gezogen werden, aus welchem sich die erforderliche Geschwindigkeit herauslesen lässt, ab welchem Zeitpunkt unterschiedliche Korngrößen transportiert beziehungsweise erneut abgesetzt werden können.

Im oberen Bereich der Abbildung 7 werden jene Geschwindigkeiten dargestellt, welche unterschiedliche Partikel abhängig von ihrer Größe erodieren. Die graue Kurve repräsentiert die kritische Erosionsgeschwindigkeit, welche deswegen als Kurve und nicht als Linie aufgetragen wird, da ein Erosionsbeginn der Feststoffe auch von deren Lagerung abhängt. Die gestrichelte Linie wiederum zeigt die kritische Linie für das Einsetzen von Ablagerungen, also jene Geschwindigkeit, ab der die transportierte Feststofffracht sedimentiert wird. Im Bereich zwischen den beiden Linien erfolgt somit der Transport von Feststoffen. Je größer dieser Bereich ist, desto kontinuierlicher findet der Transport statt (vgl. AHNERT 1996: 194).

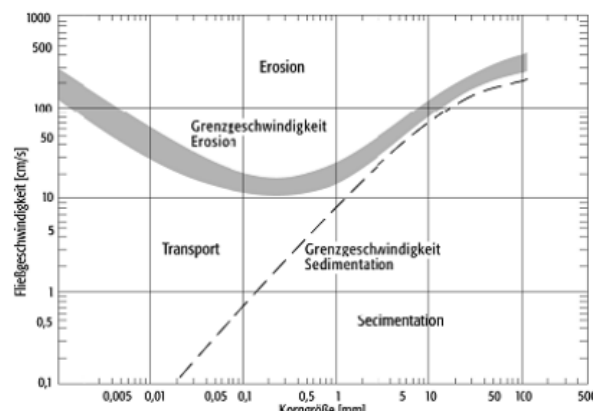


Abbildung 7: Hjulström-Diagramm; Quelle: <http://www.geodsz.com/deu/d/Hjulström-Diagramm>

Bevor anschließend der Bewegungsbeginn mit Hilfe der kritischen Schubspannung beschrieben wird, muss im ersten Schritt die Schubspannung definiert werden. Auf der Homepage der Freien Universität Berlin (FUB 2007^a) wird die Schubspannung wie folgt definiert: Wasserteilchen unterliegen der Schwerkraft, welche in Abbildung 8 auf Grund der hangparallelen Bewegung und der Last der Teilchen auf der Hangfläche in zwei Teilbereiche einzuteilen ist. τ repräsentiert hierbei einen Vektor, welcher parallel zur Oberfläche hangabwärts gerichtet ist, σ wiederum zeigt einen Vektor, der im rechten Winkel zur Oberfläche hangabwärts gerichtet ist. τ stellt nun jenen Kraftanteil der Schwerkraft dar, der die Teilchen in Bewegung setzt. Bei

PATT und GONSOWSKI (2011: 66) beschreiben den Zeitpunkt, an dem die kritische Schubspannung in Kraft tritt und somit den Feststofftransport in Gang bringt, wie folgt: „Der Gesschiebetransport setzt ein (=Transportbeginn), wenn die aktuelle Schubspannung eine kritische Größe, die sog. Grenzschubspannung (wird auch als kritische Sohlenschubspannung [...] bezeichnet) überschreitet.“ Dieser Zeitpunkt ist abhängig von der Masse sowie der Form des Gerölls, aber auch von der Lagerung im Flussbett (vgl. AHNERT 1996: 193).



55

3.4 Der Einfluss des Klimawandels auf die Erosionsraten und Sedimentbewegungen

Wie im vorhergehenden Kapitel 2 erläutert, ändern sich im Rahmen des Klimawandels sowohl die Temperatur- als auch die Niederschlagsverhältnisse in der Steiermark, dies wiederum hat Einfluss auf die Landbedeckung, die Vegetation und das hydrologische Regime. Diese Änderungen beeinflussen im Anschluss die Erosionsprozesse an Böden und Hängen und führen somit zu veränderten Feststoffgehalten von Flüssen (vgl. ASSELMAN et al. 2003: 3226). In diesem Kapitel wird der Einfluss des Klimawandels auf die Erosionsraten und Sedimentbewegungen näher erläutert. Mit Hilfe dieser Erläuterungen soll somit der Bogen zum darauf folgenden Praxisteil gespannt werden.

3.4.1 Mögliche Entwicklung der Bodenerosion

Der Boden bildet einen wichtigen Feststoffherd, je nach Niederschlagsaufkommen, Bodenbestellung und Vegetation kann unterschiedlich viel Material abgetragen werden. Bezüglich des Niederschlagsaufkommens vertreten ZUAZO et al. (2011: 1) die Meinung, dass im Rahmen des Klimawandels *„changes in natural rainfall regimes have taken place and erosion will be expected to become more pronounced in future decades.“* Die Autoren stellen mit Hilfe dieses Statements dar, dass durch die Änderungen der Niederschlagsregime in Folge des Klimawandels mit vermehrten Erosionen zu rechnen sein wird. Dies hat naturgemäß auch Einfluss auf den Feststoffeintrag in Flüssen, sollte die vorherrschende Morphologie den Transport ins Gewässer erlauben. Wie sich die Bodenerosion im Laufe des Klimawandels verändern könnte, soll in den nächsten Zeilen aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden. Einerseits ist dies eine mögliche Entwicklung unter der Annahme einer steigenden Niederschlagsintensität und andererseits unter der Annahme einer eventuellen Zunahme der Niederschlagssumme.

Dass ausgehend durch einen Anstieg der Niederschlagsintensität eine erhöhte Bodenerosion erwartet werden kann, zeigen beispielsweise MICHAEL et al. (2005: 163) auf: *„The impact of expected increase of precipitation intensities leads to increasing soil loss.“* Genauso argumentieren ASSELMAN et al. (2003: 3236), indem sie feststellen: *„[...] under the expected climate-change scenarios, rainfall intensities are expected to increase, which enhances soil erosion.“* Auch LEE et al. (1996: 504) erläutern, dass die Bodenerosion durch die Niederschlagsintensität direkt beeinflusst wird. Wie jedoch bereits in den in Kapitel 2 erläuterten Klimaszenarien erwähnt, ergeben die Berechnungen des Wegener Centers (vgl. GOBIET et al. 2012) bis ins Jahr 2050 keine erwähnenswerten Zunahmen der Starkregenniederschläge.

Dass aber nicht nur die Niederschlagsintensität Auswirkungen auf die Bodenerosion hat, darauf verweisen FAVIS-MORTLOCK und BOARDMAN (1995: 366), indem sie erläutern, dass jeder Anstieg des Niederschlags, sei es die Summe, die Intensität oder die Häufigkeit, welcher im Zuge des Klimawandels aufkommt, einen direkten Einfluss auf die Erosion hat. Diese Meinung vertreten auch LEE et al. (1996: 504). NEARING et al. (2005: 144) führen beispielsweise dazu aus, dass: „[...] *erosion should increase as the driving force (rainfall) increases* [...]“. Auch MUKUNDAN et al. (2013: 118) sowie PRUSKI und NEARING (2002^a: 34–10 und 2002^b: 11) vermuten durch ansteigende Niederschlagssummen eine zunehmende Bodenerosion.

3.4.2 Mögliche Entwicklung des Abflusses, der daraus resultierenden Erosion und des Feststoffgehalts in Flüssen

Neben der Bodenerosion werden zudem durch erhöhte Niederschläge und Temperaturen auch steigende Abflüsse erwartet (vgl. THODSEN 2007: 237). DÖLL und MÜLLER SCHMIED (2012: 6) sagen beispielsweise aus, dass die sich ändernden Temperaturen im Speziellen in den Wintermonaten eine Änderung des Abflusses herbeiführen werden, da der Niederschlag häufiger in flüssiger Form, das heißt in Form von Regen, fallen wird und somit nicht mehr als Schnee zwischengespeichert wird. Der zu erwartende Temperaturanstieg in den Wintermonaten hat zusätzlich Auswirkungen auf die Abflüsse in den Frühjahrsmonaten, da die Schneeschmelze geringer ausfallen dürfte (vgl. ARNELL und REYNARD 1996: 422). LABAT et al. (2004: 631) demonstrieren in ihrer weltweiten Erforschung der Abflussentwicklung unter dem Aspekt des Klimawandels, dass sich durch einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von 1°C der globale Abfluss um 4% erhöht.

THODSEN et al. (2008: 769) betrachten die mögliche Entwicklung des Abflusses unter der Annahme einer Erhöhung des jährlichen Niederschlagsmittels und konstatieren, dass sich der mittlere jährliche Abfluss gleichzeitig mit dem mittleren jährlichen Anstieg der Niederschläge erhöht. Weitere Autoren wie beispielsweise WETHERALD und MANABE (2002: 7–6), WIGLEY und JONES (1985: 150), FALLOON und BETTS (2006: 63) und GEDNEY et al. (2006: 835) verdeutlichen, dass sich durch einen Anstieg der Niederschlagssumme der Abfluss erhöhen wird. Nicht unerwähnt bleiben soll hier jedoch, dass sich im Zuge des Klimawandels auch die Evapotranspiration (E_t) erhöhen könnte, welche speziell in den Sommermonaten einen Einfluss auf den Abfluss haben könnte. WIGLEY und JONES (1985: 150) vertreten dazu jedoch die Meinung, dass der Abfluss immer stärker auf Änderungen des Niederschlags als auf Änderungen der Evapotranspiration reagiert, wobei die Zunahme des Abflusses dabei immer größer ist als die Zunahme des Niederschlags.

Der erhöhte Abfluss hat seinerseits wiederum Einfluss auf die Tiefen- sowie Seitenerosion (vgl. ASHMORE und CHURCH 2001 zitiert nach GOUDIE 2006: 390). Durch einen steigenden Abfluss kann bereits abgesetztes Sediment nach Überschreitung der kritischen Geschwindigkeit (siehe Kapitel 3.3) erneut weitertransportiert, sowie gröbere, im Flussbett vorkommende Feststoffe können in Bewegung gesetzt werden. Zusätzlich werden dadurch die Ufer der Flüsse ausgespült, was ferner Feststoffmaterial in die Gewässer einbringt.

Wie in den vorherigen Absätzen aufgezeigt, erhöhen sich im Zuge des Klimawandels durch steigende Temperaturen, Niederschläge sowie den Abfluss die Erosionsraten, einhergehend wird sich somit auch der Feststoffgehalt von Flüssen im Rahmen dieser Entwicklung ändern. THODSEN et al. (2008: 764) führen dazu in ihrer Arbeit aus: *„Climate change will have both direct and indirect effects on suspended sediment transport, through changes in erosivity, transport capacity and indirectly on the erodibility through changes in land cover and management. The direct effects of climate change on suspended sediment transport are changes in the intensity of the erosion and sediment-transport-related processes caused by precipitation [...], river discharge [...] and snowmelt.“* Die Autoren weisen in ihrer Aussage im Speziellen darauf hin, dass die Schwebstofffracht im Rahmen des Klimawandels durch vermehrte Erosionsvorgänge, vermehrte Niederschläge und einen erhöhten Abfluss zunehmen wird, allerdings wird hier auch noch auf den Punkt der Landnutzung und der Landbedeckung hingewiesen, welcher sich durch das veränderte Klima wandeln könnte. Auf diesen zusätzlich wichtigen Punkt soll im nachstehenden Kapitel 3.5 ausführlicher eingegangen werden. Ein weiterer wichtiger Punkt, der in diesem Statement erwähnt wird, ist die Änderung der Schneeschmelze. Diese könnte, ob der möglicherweise milderen Temperaturen im Winter und der damit einhergehenden geringeren Speicherung von Niederschlag, den Abfluss in den Frühjahrsmonaten teils negativ beeinflussen. Auch WALLING und FANG (2003: 120) bestätigen, dass sich bereits in den letzten Jahren erste Anzeichen ergeben haben, welche darauf schließen lassen, dass durch höhere Niederschlagssummen auch ein höherer Abfluss zu erwarten ist, der wiederum zu einer Erhöhung des Sedimenttransports in einem Fluss führt.

Während THODSEN et al. (2008: 764) in der vorherigen Aussage darauf hinweisen, dass alleine durch den vermehrt auftretenden Niederschlag auch ein höherer Sedimentgehalt zu erwarten sei, behaupten ZHU et al. (2008: 440): *„It is the combination of the changes in temperature and rainfall that determines the change of sediment flux in a river. Higher rainfall does not necessarily result in higher sediment flux. In general, higher sediment flux is expected to appear under wetter and warmer climate, when higher transport capacity is accompanied by higher erosion rate.“* Die Autoren weichen hier von der Darstellung von THODSEN

et al. (2008: 440) ab und sagen aus, dass nur eine Kombination aus einem feuchteren und wärmeren Klima den Sedimenthaushalt in Flüssen ansteigen lassen kann. Beide Tatsachen treffen auf die Steiermark bis ins Jahr 2050 zu. ZHU et al. (2008: 438) argumentieren damit, dass bei der Kombination aus einer höheren Temperatur und einem höheren Niederschlag neben der höheren Transportkapazität auch eine höhere Erosionsrate vorherrscht. ZHU et al. (2008: 438) stellen dazu fest: „*A change in temperature may influence the sediment transportation capacity by affecting runoff and, meantime, may also change the soil erosion rate through its influence on vegetation and weathering.*“ Die Autoren legen somit dar, dass eine Temperaturänderung durch eine Abänderung des Abflusses die Kapazität des Sedimenttransports in einem Fluss erhöht. Zusätzlich könnte es durch den Anstieg der Temperatur, welche sich wiederum möglicherweise auf die vorherrschende Vegetation und Verwitterung auswirken könnte, auch zu einer Änderung der Bodenerosionsrate kommen. Auch LAWLER et al. (2003: 3218) erzielen bei ihren Berechnungen durch einen Anstieg der Temperatur, des Niederschlags und des Abflusses eine erhöhte Schwebstoffkonzentration in den Flüssen.

ZHU et al. (2008: 436) stellen außerdem fest, dass es durch einen Anstieg des Niederschlags, selbst bei gleichbleibender Temperatur, zu einem Anstieg des Sedimentgehalts in Flüssen kommt. Auch durch einen Anstieg der Temperatur und eine gleichzeitige Erhöhung der Niederschlagsereignisse prophezeien die Autoren einen Anstieg der Sedimentfracht.

Abbildung 9 veranschaulicht einen Zusammenhang zwischen Niederschlagsaufkommen, Abflussverhalten und der transportierten Sedimentmenge. Obwohl die Tendenz der jährlichen Durchflussmenge über den gesamten Untersuchungszeitraum ebenso wie die jährliche Niederschlagssumme sinkend ist, die Sedimentfracht jedoch zunimmt, zeigen sich speziell zwischen den Jahren 1960 und 1990 gut vergleichbare Entwicklungen zwischen den drei Variablen. Auffallend hierbei ist, dass sich in einem Jahr, welches eine höhere Niederschlagssumme aufweist, sowohl die Abflussmenge als auch der Sedimentgehalt des Flusses beinahe ident verhalten, was sich beispielsweise im Jahr 1967 deutlich zeigt. Auch in den trockeneren Jahren sieht man vergleichbare Entwicklungen von Abflusssummen und Sedimentladungen, hier kann als Exempel das Jahr 1990 herangezogen werden. Ab dem Jahr 1990 erkennt man in Abbildung 9 c und d einen deutlichen Anstieg des Abflusses und des Sedimenttransports, ohne dass sich jedoch das Niederschlagsverhalten signifikant geändert hat (siehe Abbildung 9 b). Dies könnte möglicherweise auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen sein, welche in Kapitel 3.5 ausführlicher erläutert werden.

In einem Statement, welches hohe Relevanz für diese Masterarbeit hat, besagt BOOKHAGEN (2012: 15), dass es durch das sich ändernde Klima zu signifikanten Änderungen des

Sedimenttransports in Flüssen kommen wird, wobei er im Speziellen die Herausforderungen ins Zentrum rückt, welche für die bereits erbaute Infrastruktur zu erwarten sind.

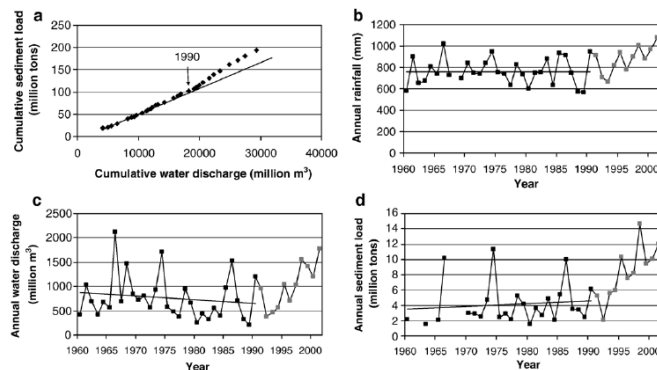


Abbildung 9: Zeitreihen des jährlichen Niederschlags, der Sedimentladung und des Abflusses. (a) kumulierter Abfluss und Schwebstofffracht, (b) jährliche Niederschlagssumme, (c) jährlicher Abfluss, (d) jährliche Sedimentladung; Quelle: ZHU et al. (2008: 432)

3.5 Änderung von Sedimentfracht und Erosionsraten – weitere Gründe

Nicht nur der Klimawandel hat Einfluss auf den Sedimenthaushalt von Flüssen sowie die Erosionsraten. Aus diesem Grund soll hier darauf verwiesen werden, dass im Speziellen anthropogene Eingriffe Abänderungen herbeiführen und diese nur schwer von den Einflüssen des Klimawandels zu differenzieren sind. A priori soll allerdings festgehalten werden, dass es sowohl Änderungen gibt, welche den Feststoffgehalt in einem Fluss erhöhen, als auch solche, welche eine Reduktion des Feststoffgehalts herbeiführen; beide Fälle werden aber durch menschliche Eingriffe verursacht. Dazu meinen etwa FARNSWORTH und MILLIMAN (2003: 56): „*Man has proved to be an effective geologic agent in altering the landscape and therefore river erosion [...].*” Stellvertretend dafür soll hier nochmals die, auf der vorherigen Seite, zitierte Aussage von THODSEN et al. (2008: 764) aufgegriffen werden: „*Climate change will have both direct and indirect effects on suspended sediment transport, through changes in erosivity, transport capacity and indirectly on the erodibility through changes in land cover and management.*” Neben den direkten Einflüssen auf den, in diesem Fall, Schwebstofftransport werden in diesem Statement auch indirekte Einflüsse an Hand der Beispiele Landnutzungsänderung und Änderungen der Landbedeckung erwähnt. Als Exempel seien hier stellvertretend Abänderungen im Einzugsgebiet genannt. Diese können beispielsweise durch Entwaldung geschehen (vgl. WALLING 2009: 5). Durch die Abholzung bestehender Wälder kommt es zu einer Erhöhung der Bodenerosion (vgl. MOHAMMED und ADAM 2010: 102).

Dazu nehmen etwa OWENS et al. (2005: 696) Stellung und sagen aus: „*Excessive sediment inputs to rivers due to increased erosion (e.g. due to deforestation, [...]) [...] can cause [...] sedimentation in [...] reservoirs [...].*“ Die Autoren weisen hier bereits auf die denkbaren Auswirkungen, die Stauraumverfüllung, hin, welche durch den vermehrten Eintrag durch Erosionen, herbeigeführt durch Abholzung, entstehen können. WALLING (2006: 196–202) führt zudem aus: „*The sediment loads of many rivers are known to be changing in response to, for example, [...] land use change [...] which can cause increased sediment loads.*“ WANG et al. (2012: 3591) stellen dar, dass durch die Änderung der Landnutzung einer vormals bewaldeten Fläche hin zu einer Weidefläche beziehungsweise Ackerfläche die Bodenerosion deutlich zunimmt. In Abbildung 10 wird ein Beispiel dargestellt, wie sich diese Änderungen auswirken. So erkennt man, dass der Abfluss im Untersuchungsraum zurückgegangen, der Sedimentgehalt des Flusses jedoch gestiegen ist. In diesem Exempel wurde beispielsweise intensive Abholzung betrieben.

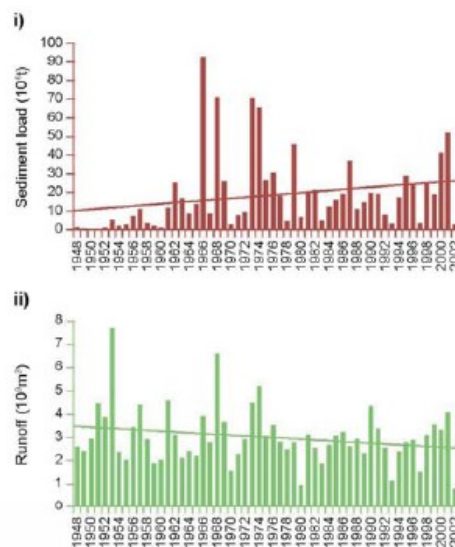


Abbildung 10: Entwicklung von Abfluss und Sedimentgehalt nach anthropogenem Eingriff durch Abholzung am Beispiel des Bei-Nan River; Quelle: WALLING (2009:8)

Weitere Einflüsse auf den Sedimenttransport gibt es durch den Bau von Dämmen. Die negativen Konsequenzen, welche sich aus dem Dammbau ergeben, wurden bereits in Kapitel 1.7 ausführlich dargestellt. Der grundsätzliche Unterschied zu den zuvor beschriebenen Landnutzungsänderungen liegt darin, dass sich durch den Bau von Dämmen die Sedimentfracht eines Flusses deutlich reduziert. Einen weiteren sedimentreduzierenden Faktor stellen laut WALLING (2009: 8) Programme zur Bodenerhaltung und Sedimentkontrolle dar. Er erklärt hierzu: „*[...], the active implementation of soil and water conservation and sediment control programmes in river basins can [...] result in reduced sediment loads [...].*“

4 Praxisteil

Um aufzeigen zu können, wie sich die Temperatur, der Niederschlag und der Abfluss in der Vergangenheit entwickelt haben, wird nach dem einleitenden Theorieteil, der sich neben der Thematik der Kleinwasserkraft auch mit dem Feststofftransport befasst hat, im folgenden Praxisteil im ersten Schritt auf die Entwicklung der drei Bereiche im Zeitraum von 1981–2010 in der Steiermark eingegangen. Zusätzlich wird in Kapitel 4.4 erläutert, wie sich der Feststofftransport, der Fokus liegt hierbei auf den Schwebstoffen, in den Jahren 2008–2010 verändert hat. Um den Einfluss des Niederschlags und der Temperatur auf den Abfluss sowie dessen Einfluss auf den Feststofftransport darstellen zu können, wurden mit diesen Daten Regressionsanalysen durchgeführt und deren Ergebnisse in Kapitel 5 dargelegt.

Ferner werden in den Kapiteln 6.2 und 6.3 Fragebögen ausgewertet, die auf Vermittlung des Vereins „Kleinwasserkraft Österreich“ an Betreiber von Kleinwasserkraftwerken per E-Mail ausgeschickt wurden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf Betreibern, die bereits mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen hatten, und auf die von ihnen angewandten Adaptionmöglichkeiten.

Nach der Analyse der Antworten wird mit Hilfe eines Modells von WIGLEY und JONES (1985) eine Prognose gewagt, wie sich der Feststofftransport und der Abfluss in den steirischen Flüssen bis 2050 entwickeln und welche Konsequenzen dies für die bestehenden Kleinwasserkraftwerke haben könnte (Kapitel 7.3 bis Kapitel 7.8). Hierbei soll die Entwicklung in den einzelnen Jahreszeiten dargestellt und bei Besonderheiten auch auf einzelne Monate Bezug genommen werden.

Im abschließenden Teil (Kapitel 8) werden darüber hinaus Adaptionmöglichkeiten erläutert, die bei bestehenden, aber auch geplanten Kleinwasserkraftwerken eingesetzt werden könnten, um der möglicherweise erhöhten Gefahr vermehrt vorkommender Stauraumverfüllungen entgegen zu wirken.

4.1 Die Entwicklung der Temperatur, des Niederschlags und des Abflusses in der Periode 1981–2010

Im ersten Kapitel des Praxisteils wird dem Leser verdeutlicht, wie sich die Abflüsse, der Niederschlag und die Temperatur in der Steiermark bereits in der Periode von 1981–2010 gewandelt haben, wobei versucht wird, dass jene Flüsse und Regionen eine Betrachtung erfahren, aus denen Fragebögen retourniert wurden (18 Messstationen). Hinsichtlich der Entwicklung der Feststoffe sei zudem nochmals erwähnt, dass im Speziellen auf die Entwicklung der Schwebstoffe hingewiesen wird, da seitens des Landes Steiermark keine Geschiebe-

messungen durchgeführt werden. Nach Betrachtung der Entwicklungen der unterschiedlichen Parameter und der statistischen Analysen soll gemeinsam mit der in den Kapiteln 6.2 und 6.3 durchgeführten Fragebogenanalyse eine Basis für den nächsten Schritt, nämlich eine Prognose für die Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts bis ins Jahr 2050 erstellen zu können (siehe Kapitel 7.3 bis 7.7), geschaffen werden.

4.1.1 Datengrundlage

Die für die unterschiedlichen Analysen verwendeten Abflussdaten wurden dem eHYD (www.ehyd.gv.at) entnommen. Von derselben Datenquelle stammen auch die Daten der Niederschläge und des Schwebstoffgehalts der Flüsse, lediglich für die Temperatur wurden zum Teil Werte der HISTALP-Datenbank (siehe Internetquellen) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet, zusätzlich wurden von Dr. Axel Podesser, Leiter der ZAMG in Graz, Unterlagen zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden sowohl bezüglich der Abflussdaten (an elf Flüssen), der Niederschlagsdaten und der Temperaturdaten (wobei hier auch Messstationen anderer Bundesländer verwendet wurden, z.B. Radstadt und Tamsweg im Bundesland Salzburg und Wörterberg im Bundesland Burgenland) achtzehn Pegelmessstationen herangezogen. Für die Entwicklung des Schwebstoffgehalts in den steirischen Flüssen konnten auf Grund fehlender Messstationen lediglich vier Stationen als Datengrundlage verwendet werden. Abbildung 11 zeigt die jeweiligen Messstationen, die vom Autor dieser Masterarbeit verwendet wurden.

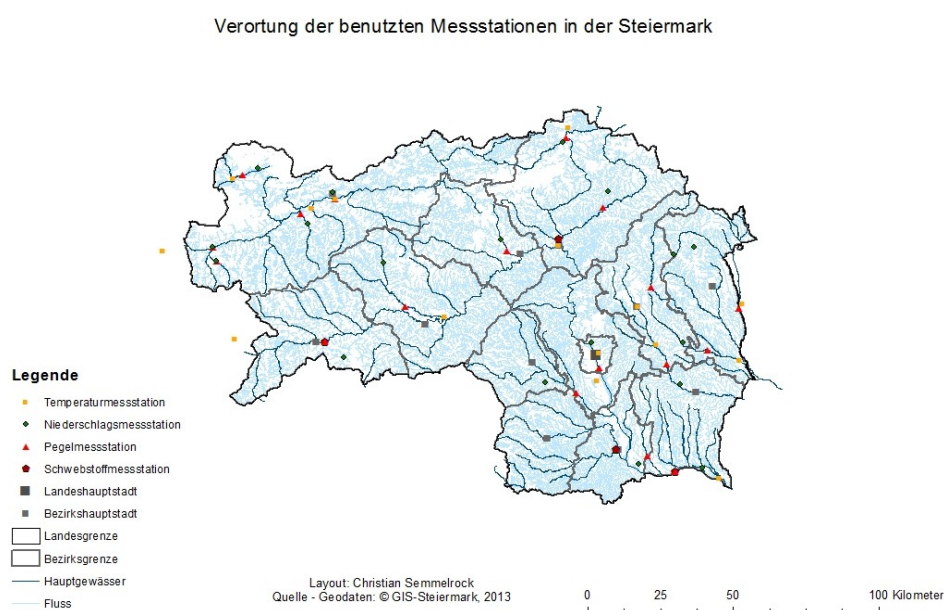


Abbildung 11: Verortung der benutzten Messstationen in der Steiermark; eigene Darstellung

4.1.2 Methodik

Die Daten wurden zunächst auf mögliche Fehler und auf Vollständigkeit geprüft, anschließend folgte die Aufbereitung aller Daten, wie es für die vorliegende Masterarbeit von Nutzen war. Vorab soll die Entwicklung während der 30-jährigen Periode (1981–2010) aufgezeigt werden. Um dies möglichst repräsentativ zu veranschaulichen, wurde diese Zeitspanne in zwei gleich lange Abschnitte, nämlich 1981–1995 und 1996–2010, unterteilt und die errechneten Werte anschließend einander gegenübergestellt.

Betreffend die Entwicklung der Abflüsse wurden im ersten Schritt aus den vorhandenen Tagesmittelwerten Monatsmittelwerte errechnet. Hierauf erfolgte die Einteilung dieser Monatsmittelwerte in die zwei zuvor genannten fünfzehnjährigen Perioden, im Folgenden wurde für diese beiden Perioden jeweils der Mittelwert errechnet und diese Werte miteinander verglichen. Zudem errechnete der Autor aus den vorliegenden Monatsmittelwerten jeweils zusätzlich noch die Jahresmittelwerte, überdies wurde das gleitende 3-jährige Mittel berücksichtigt.

Als Basis für die Berechnung der Niederschlagsentwicklung dienten die für das Einzugsgebiet der Flüsse repräsentativen Niederschlagsmessstationen. Fortführend wurden aus den vorhandenen Tagesniederschlagssummen Monatsniederschlagssummen errechnet, diese erneut in die zwei 15-jährigen Perioden unterteilt, für die jeweilige Zeitspanne die Summe errechnet, um schlussendlich durch eine Gegenüberstellung der gewonnenen Daten eine Entwicklung ableiten zu können. Außerdem errechnete der Verfasser dieser Arbeit aus den gewonnenen Monatssummen ebenfalls die Jahressumme des Niederschlags und zusätzlich, wie schon bei der Berechnung des Abflusses, das gleitende 3-jährige Mittel.

Nach der Betrachtung der Abfluss- und Niederschlagsentwicklung wird nun kurz auf jene der Temperatur eingegangen. Im Einzugsgebiet der Pegelmessstationen wurden für die Betrachtung der Temperaturentwicklung repräsentative Messstationen ausgewählt, sämtliche Daten stammen, wie schon in Kapitel 4.1.1 erwähnt, von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und wurden einerseits aus der HISTALP-Datenbank der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik entnommen und andererseits dankenswerterweise von Herrn Dr. Axel Podesser zur Verfügung gestellt. Um die Entwicklung darstellen zu können, wurden aus den erhaltenen Tagesmittelwerten im ersten Schritt Monatsmittelwerte erstellt, welche anschließend in die Perioden 1981–1995 und 1996–2010 unterteilt wurden. Die weitere Berechnung erfolgt analog, wie bereits oben geschildert (Jahresmittelwert, gleitendes Mittel), – die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

Nach der Darlegung der Entwicklung im Vergleich der beiden fünfzehnjährigen Perioden als Gesamtes stellt der Autor im nächsten Schritt die jeweiligen Jahreszeiten der Periode 1981–1995 jenen der Periode 1996–2010 gegenüber.

Betreffend den Abfluss wurde für jede Periode der jahreszeitliche Mittelwert gebildet, beim Niederschlag die Monatssummen der jeweiligen Zeitabschnitte addiert und bezüglich der Temperatur erneut die mittlere Temperatur der Jahreszeiten der zwei unterschiedlichen Perioden errechnet und die gewonnenen Werte im Anschluss einander vergleichsweise gegenübergestellt (Ergebnisse siehe Kapitel 4.3). Diese eben erläuterte Methodik fand für die erste Sichtung des Datenmaterials Verwendung.

Alle in diesen Kapiteln dargestellten Diagramme wurden mit dem Programm Microsoft Excel 2007 erstellt.

4.2 Vergleich der Entwicklungen des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Die Berechnungen der achtzehn untersuchten Pegelmessstationen erbrachten an elf Messstationen eine Zunahme des mittleren Abflusses im Zeitraum von 1996–2010 gegenüber jenem von 1981–1995, an sieben Pegelstationen wurde ein Rückgang verzeichnet. Wohlgedenkt gilt dies über die gesamten fünfzehn Jahre, die Entwicklungen der unterschiedlichen Jahreszeiten werden in den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.4 erläutert. Betrachtet man lediglich jene Flüsse, an denen der durchschnittliche Durchfluss abgenommen hat, erkennt man, dass diese Rückgänge relativ different ausgefallen sind (Rückgang um 0,5% am Pölsfluss [8,55 m³/sec auf 8,51 m³/sec und Rückgang um 15% an der Lafnitz [3,67 m³/sec auf 3,12 m³/sec]). Auffällig ist, dass sich die zunehmenden Abflüsse über die Gesamtsteiermark erstrecken, die stärksten Anstiege verzeichnen jedoch jene Flüsse, die dem nivalen Flussregime zuzuordnen sind. Bei den Flüssen (beispielsweise Kainach und Lafnitz), die einen Rückgang des mittleren Abflusses aufweisen, wurden in der Periode 1981–2010 Kleinwasserkraftwerke erbaut, welche somit eventuell auch die Abflussmenge bedingt haben könnten.

Vergleicht man somit im nächsten Schritt die Entwicklung des Niederschlagsaufkommens der beiden Vergleichsperioden, wird festgestellt, dass sich an vierzehn Messstationen die Periodensumme im Vergleich zur Zeitspanne 1981–1995 erhöht hat. Teilweise ergab sich sogar ein Anstieg von knapp 1100 mm, wohlgedenkt bezieht sich diese Menge als Gesamtsumme auf die fünfzehnjährige Zeitspanne. An vier Messstationen gab es im Zeitabschnitt 1996–2010 eine Reduktion der Niederschlagssumme, notabene befinden sich all jene Stationen in den südlichen Bezirken der Steiermark. Auch hier zeigt sich hinsichtlich der räumli-

chen Verteilung, dass beinahe in der gesamten Steiermark die Niederschlagsmengen angestiegen sind, lediglich im Süden des Bundeslandes (beispielsweise in Mureck) gab es einen Rückgang zu verzeichnen.

Stellt man nun im nächsten Schritt den mittleren Abfluss der Niederschlagssumme gegenüber, wird verdeutlicht, dass sich an neun Messstationen sowohl der Niederschlag als auch der Abfluss erhöht haben, in zwei Regionen war neben der Niederschlagssumme auch der Abfluss rückläufig. Bei sieben Messstationen gab es uneinheitliche Entwicklungen, so nahm an fünf Messstationen die Niederschlagssumme im Zeitraum 1996–2010 verglichen mit jener von 1981–1995 zu, der mittlere Abfluss hingegen ab, an zwei Stationen war das Gegenteil der Fall.

Bei Betrachtung der Temperaturdaten fällt auf, dass an allen achtzehn verwendeten Messstationen in der Steiermark die durchschnittliche Temperatur der Periode 1996–2010 deutlich höher war als jene der Zeitspanne 1981–1995. So hat sich beispielsweise die Durchschnittstemperatur 1996–2010 an der Station Flughafen Graz gegenüber der durchschnittlichen Temperatur 1981–1995 um $1,3^{\circ}\text{C}$ [$+0,5\%$] erhöht.

Vergleicht man nun die Entwicklung der Mitteltemperatur mit jener des mittleren Abflusses, erbringt dies an elf Messstationen sowohl einen Anstieg der Temperatur als auch einen Anstieg des Abflusses, an sieben Stationen kommt es zu einer Zunahme der Temperatur und einer Abnahme des Abflusses.

Im Anhang werden zusätzlich die prozentuellen Entwicklungen des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur zwischen den beiden fünfzehnjährigen Zeitspannen wiedergegeben.

Um diese eben ausgeführten Entwicklungen aufzeigen zu können, dient Abbildung 12 als ein repräsentatives Exempel. Es werden hier zwar nicht die Entwicklungen zwischen den beiden Perioden erläutert, aber es wird verdeutlicht, dass sich am Beispiel der Salza am Pegelmessstand Gußwerk im Bezirk Bruck-Mürzzuschlag das Jahresmittel des Abflusses seit 1981 bis ins Jahr 2010 kontinuierlich erhöht hat. Vergleicht man dazu zusätzlich die Entwicklung der Jahressumme des Niederschlags und der Jahresdurchschnittstemperatur (Abbildung 13 und 14), so geht deutlich hervor, dass der Anstieg des Abflusses mit den beiden Variablen kohärent ist.

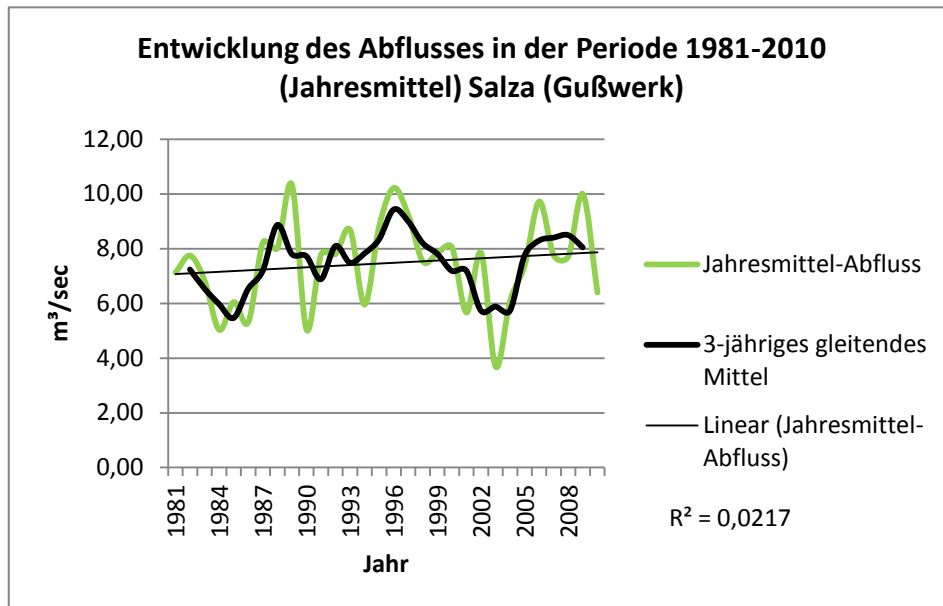


Abbildung 12: Entwicklung des Abflusses in der Periode 1981–2010 (Jahresmittel) Salza (Gußwerk); Datenquelle: www.ehyd.gv.at

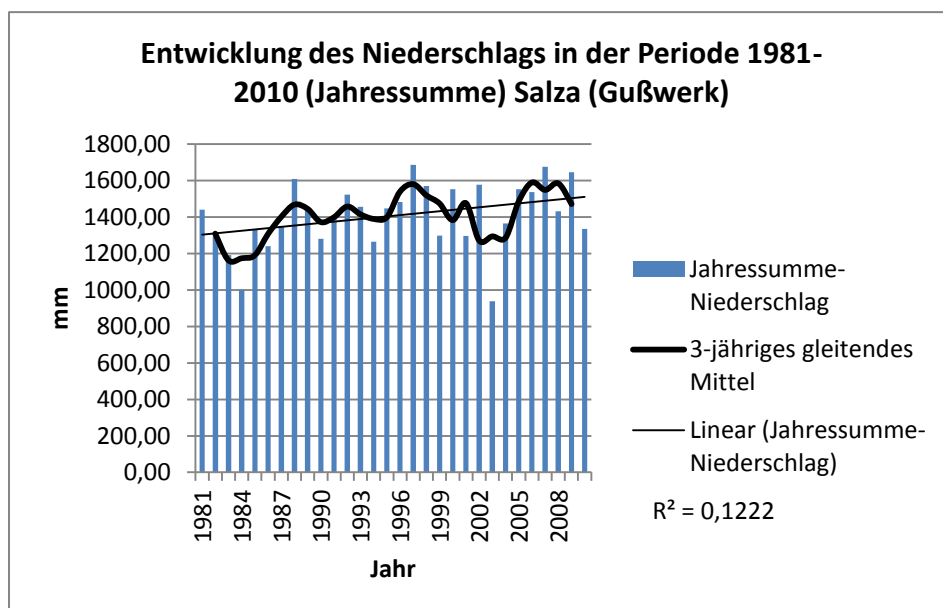


Abbildung 13: Entwicklung des Niederschlags in der Periode 1981–2010 (Jahressumme) Salza (Gußwerk); Datenquelle: www.ehyd.gv.at

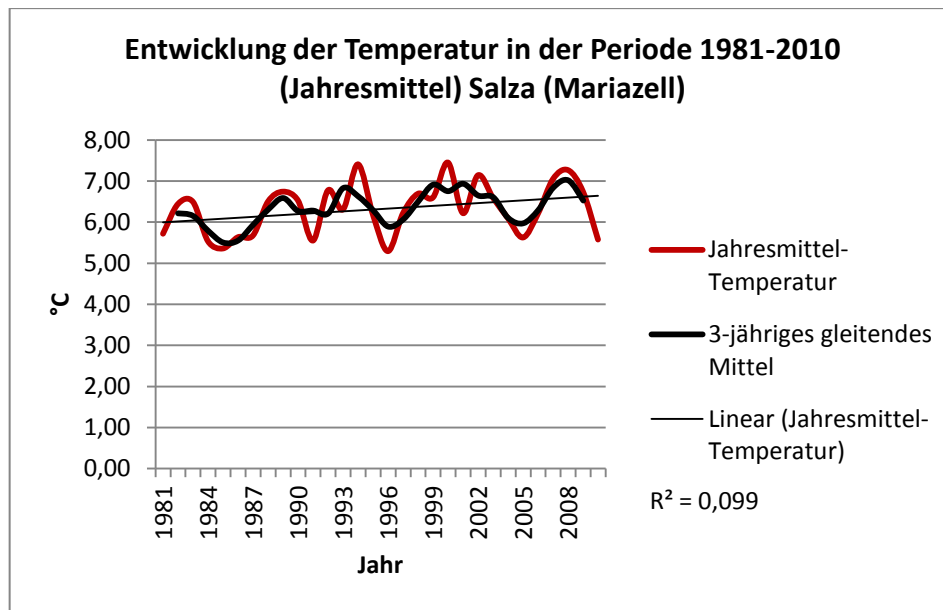


Abbildung 14: Entwicklung der Temperatur in der Periode 1981–2010 (Jahresmittel) Salza (Mariazell); Datenquelle: ZAMG (Dr. Axel Podesser)

4.3 Jahreszeitliche Entwicklungen des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Im nächsten Schritt soll nun die jahreszeitliche Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur wieder im Vergleich 1981–1995 mit 1996–2010 aufgezeigt werden. Dieser Schritt basiert auf der Überlegung, dass die Betrachtung des Jahresmittels oder der Jahressummen wohl einen guten Überblick über das Geschehene bietet. Die Beleuchtung dieser Thematik mit Hilfe der Jahreszeiten bietet allerdings zusätzlich den Vorteil, dass genau erkannt werden kann, in welcher Jahreszeit in der 30-jährigen Periode die gravierendsten Änderungen stattgefunden haben. Zusätzlich wird in den Kapiteln 7.4 bis 7.7 darauf eingegangen, wie sich der Abfluss und der Feststofftransport bis 2050 in den unterschiedlichen Jahreszeiten entwickeln könnten. Somit sind jene nachfolgenden Betrachtungen von enormer Wichtigkeit. Es sei darauf hingewiesen, dass die Entwicklungen aller achtzehn Messstationen im Anhang für die vier Jahreszeiten präsentiert werden.

4.3.1 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Wintermonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Zunächst werden die Wintermonate (Dezember, Jänner, Februar) verglichen und die Ergebnisse näher betrachtet. An elf Pegelstationen nahm der Abfluss in der Periode 1996–2010 gegenüber jenem von 1981–1995 ab, an sieben gab es einen Anstieg. Bei den Abnahmen liegen die errechneten Differenzen der Mittelwerte zwischen -2% am Beispiel der Feistritz in

Anger [Rückgang von 5,95 m³/sec auf 5,59 m³/sec] und -25% am Ilzbach [Rückgang von 1,16 m³/sec auf 0,82 m³/sec], bei den Zunahmen sticht vor allem die Mur heraus, welche an der Messpegelstation Gestüthof 20% an Durchfluss über fünfzehn Jahre zugenommen hat [Zunahme von 14,38 m³/sec auf 17,29 m³/sec]. Wie schon zuvor bei der Betrachtung des ganzjährigen Abflussmittels gibt es auch hinsichtlich der Wintermonate keine einheitliche räumliche Verteilung jener Flüsse, die einen Abflussanstieg aufweisen.

Deutlich einheitlichere Ergebnisse zeigen sich bei der Gegenüberstellung der Winterniederschläge. Hierbei kann festgestellt werden, dass in dem Zeitraum 1996–2010 an allen achtzehn Messstationen die Niederschlagssumme gegenüber 1981–1995 teils deutlich, am Beispiel von Schladming um 33% (Niederschlagssumme der Wintermonate in der Zeit 1981–1995: 3308mm; Niederschlagssumme der Wintermonate in der Zeitspanne 1996–2010: 2200mm) über den fünfzehnjährigen Zeitraum abgenommen hat. Errechnet man aus diesem Wert den jährlichen Rückgang, so ergeben sich ca. 74mm. Stellt man nun die Entwicklungen der Abflüsse in den Wintermonaten jenen der Niederschläge gegenüber, erkennt man, dass in elf Fällen sowohl die Niederschläge als auch die Abflüsse rückläufig waren. An sieben Messstationen zeigte sich ein Anstieg des Abflusses, aber ein Rückgang des Niederschlags.

Betrachtet man im nächsten Schritt die Entwicklung des Temperaturmittelwertes der Wintermonate, so zeigen die Ergebnisse, dass an allen achtzehn Messstellen die mittlere Temperatur der Periode 1996–2010 gegenüber der mittleren Temperatur der Zeitspanne 1981–1995 zwischen 0,003% (Salza – Mariazell; Zunahme von -2,09°C auf 2,08°C) und 0,4% (Kainach – Flughafen Graz; Durchschnittstemperatur der Wintermonate in der Periode 1981–1995: -1,39°C; Durchschnittstemperatur der Wintermonate in der Periode 1996–2010: -0,36°C) angestiegen ist. Bei der Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit jenen der Abflüsse fällt auf, dass an sieben Messstellen sowohl die Temperatur als auch der Abfluss in den Wintermonaten angestiegen sind, an elf jedoch gab es einen Rückgang des Abflusses, aber eine Zunahme der Temperatur. Nimmt man nun die Niederschlagsdaten zur Hand und vergleicht diese mit den Temperaturwerten, nahm an allen achtzehn Messstationen die Temperatur zu und der Niederschlag ab.

4.3.2 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Frühjahrsmonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Um die Entwicklung der unterschiedlichen Variablen in den Frühjahrsmonaten zu untersuchen, wurden die Monate März, April und Mai für die zwei fünfzehnjährigen Perioden aus den gesammelten Daten herausgefiltert. Wie schon zuvor in Kapitel 4.1.2 beschrieben, ver-

wendete der Autor für die Gegenüberstellung des Abflusses den jeweiligen Mittelwert der beiden Perioden, für den Niederschlag die Summe der Monate sowie für die Temperatur den Mittelwert.

Bei der im ersten Schritt durchgeführten Betrachtung der Daten hinsichtlich der Abflussentwicklung nahm an elf von achtzehn Messpegeln der Abfluss in den Frühjahrsmonaten in der Periode 1996–2010 gegenüber der Periode 1981–1995 ab, sieben Messstationen verzeichneten für die spätere Periode eine Zunahme. Die Rückgänge liegen zwischen 1% an der Mur in Graz [Rückgang von 146,49 m³/sec auf 145,12 m³/sec] und -29% am Ilzbach [Rückgang von 1,16 m³/sec auf 0,82 m³/sec].

Bezüglich der Zunahmen sticht der Untertalbach an der Messstation Tetter hervor. So war der Mittelwert des Abflusses an dieser Pegelstation in der Phase von 1996–2010 entgegen der Zeitspanne 1981–1995 um 14% höher (Abflussmittelwert der Frühjahrsmonate in der Periode 1981–1995: 2,95 m³/sec; Abflussmittelwert der Frühjahrsmonate in der Periode 1996–2010: 3,36 m³/sec).

Bei der Niederschlagsentwicklung für die Frühjahrsmonate fällt auf, dass an acht Stationen die Niederschlagssumme in der zweiten Phase entgegen der ersten Phase rückgängig war, an zehn Stationen gab es einen Anstieg des Niederschlags zu verzeichnen. Außerdem sticht hier auch die unterschiedliche örtliche Verteilung der Niederschlagsentwicklung hervor. Während Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche in den Frühjahrsmonaten eine rückgängige Niederschlagsentwicklung aufweisen – als Beispiel soll hier Graz mit einem Rückgang von etwa -9% über fünfzehn Jahre erwähnt werden (Niederschlagssumme der Frühjahrsmonate in der Periode 1981–1995: 2828mm; Niederschlagssumme der Frühjahrsmonate in der Periode 1996–2010: 2577mm) – erfuhren die nördlich davon gelegenen Regionen einen Anstieg von bis zu 18% über die fünfzehnjährige Zeitspanne (Beispiel Mürz/Veitsch: Niederschlagssumme der Frühjahrsmonate in der Periode 1981–1995: 2705mm; Niederschlagssumme der Frühjahrsmonate in der Periode 1996–2010: 3187mm).

Vergleicht man nun die beiden Ergebnisse, erkennt man zudem deutlich, dass an sieben von zehn Stationen, welche nördlich der Mur-Mürz-Furche liegen, sowohl der Niederschlag als auch der Abfluss in den Frühjahrsmonaten zugenommen sowie an acht von acht Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche einerseits der Niederschlag und andererseits der Abfluss abgenommen haben.

Hinsichtlich der Entwicklung der Mitteltemperatur der beiden Perioden in den Frühjahrsmonaten kann erneut nachgewiesen werden, dass die mittlere Temperatur 1996–2010 an allen achtzehn Messstationen zwischen 0,2% (Mariazell: Mittelwert-Temperatur der Frühjahrsmo-

nate in der Periode 1981–1995: 5,61°C; Mitteltemperatur der Frühjahrsmonate in der Periode 1996–2010: 6,04°C) und 0,5% (Flughafen Graz: Mittelwert-Temperatur der Frühjahrsmonate in der Periode 1981–1995: 9,24°C; Mittelwert-Temperatur der Frühjahrsmonate in der Periode 1996–2010: 10,65°C) im Verhältnis zu jener von 1981–1995 zugenommen hat.

Vergleicht man nun die Entwicklungen der Temperatur und des Abflusses in den Frühjahrsmonaten, zeigen sieben Messstationen sowohl einen Anstieg der Temperatur als auch eine Erhöhung des Durchflusses (in den Bezirken Bruck-Mürzzuschlag, Liezen, Leoben, Murau und Murtal), an elf Stationen wurde eine Erhöhung der Temperatur, aber ein Rückgang des Abflusses konstatiert – all diese liegen, mit Ausnahme des Donnersbachs, südlich der Mur-Mürz-Furche.

4.3.3 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Sommermonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Zur vergleichsweisen Darstellung der unterschiedlichen Variablen in den Sommermonaten wurden die Monate Juni, Juli und August für die zwei fünfzehnjährigen Perioden aus den Daten extrahiert. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert, verwendete der Autor für die Gegenüberstellung des Abflusses den jeweiligen Mittelwert der beiden Perioden, für den Niederschlag die Summe der Monate sowie für die Temperatur den Mittelwert.

Vergleicht man die Mittelwerte der Perioden 1981–1995 und 1996–2010 hinsichtlich der Abflussentwicklung in den Sommermonaten, weisen die Daten an neun Stationen einen Anstieg des Mittelwertes in der Phase von 1996–2010 auf, an neun Stationen nahm der Wert hingegen ab. Sechs der neun Stationen, an denen sich der mittlere Durchfluss erhöht hat, liegen südlich der Mur-Mürz-Furche.

Interessante Ergebnisse zeigen sich bei der Betrachtung der Niederschlagsentwicklung. An allen achtzehn Stationen nahm die Niederschlagssumme in den Sommermonaten in der Periode 1996–2010 entgegen der Zeitspanne 1981–1995 zu, teils sogar um über 1000mm in den fünfzehn Jahren, was pro Sommer etwa einem Anstieg von 67mm entspricht (Beispiel Pölsfluss: Niederschlagssumme der Sommermonate in der Periode 1981–1995: 4914,8mm; Niederschlagssumme der Sommermonate in der Periode 1996–2010: 6024,2mm [Anstieg von etwa 23%]).

Bei der Gegenüberstellung der Niederschlagsdaten und der Abflussdaten ergibt dies an neun Stationen eine Verminderung der Abflüsse und gleichzeitig einen Rückgang der Niederschlagssumme, an neun Messstationen nahm der Durchfluss hingegen gleich wie der Niederschlag zu. Der Rückgang des Abflusses bei einer ansteigenden Niederschlagssumme ist in den Sommermonaten möglicherweise auf die vorhandene Vegetationsdecke (Interzeption etc.)

zurückzuführen. Sieht man sich allerdings dazu noch die Entwicklung der Temperatur an, so könnte auch eine verstärkte Verdunstung auf Grund der deutlich erhöhten mittleren Temperatur der Periode 1996–2010 entgegen jener von 1981–1995 einen Einfluss auf diese Entwicklung haben. So nahm ebenso wie in den vorangegangenen Jahreszeiten, welche in den vorigen Kapiteln erläutert wurden, auch in den Sommermonaten an allen achtzehn Messstationen die Mitteltemperatur gegenüber der Periode 1981–1995 deutlich zu. Die Werte befinden sich in einer Skala von 0,2% (Aigen-Donnersbach: Mittelwert-Temperatur der Sommermonate in der Periode 1981–1995: 16,01°C; Mittelwert-Temperatur der Sommermonate in der Periode 1996–2010: 16,53°C) bis 0,5% (Kainach-Graz-Flughafen: Mittelwert-Temperatur der Sommermonate in der Periode 1981–1995: 18,56°C; Mittelwert-Temperatur der Sommermonate in der Periode 1996–2010: 20,07°C).

4.3.4 Die Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags sowie der Temperatur in den Herbstmonaten zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Die Monate September, Oktober und November sind als Herbstmonate zusammengefasst. Hinsichtlich der Entwicklung des mittleren Abflusses wurde errechnet, dass dieser sich an vierzehn der achtzehn Stationen in den Herbstmonaten der Periode 1996–2010 entgegen jener von 1981–1995 erhöht hat, an lediglich vier Messstellen fand eine Reduzierung des Durchflusses statt. Wie schon in den zuvor betrachteten Jahreszeiten befinden sich unter diesen vier Pegelmessstationen jene der Kainach und der Lafnitz. Hier soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass an beiden Flüssen in den Jahren 1996–2010 Kleinwasserkraftwerke erbaut wurden. Interessante Zahlen zeigen sich jedoch bei der Betrachtung jener Messstationen, an denen der Abfluss angestiegen ist. So erbrachten die Kalkulationen an der Messstation Liezen (Enns) einen Anstieg des mittleren Abflusses von 34% in der Periode 1996–2010 entgegen jener von 1981–1995 (Abflussmittelwert der Herbstmonate in der Periode 1981–1995: 45,35m³/sec; Abflussmittelwert der Herbstmonate in der Periode 1996–2010: 60,91m³/sec). An der Mur in Graz wurde beispielsweise eine Zunahme von 24% errechnet (von Abflussmittelwert 96,01m³/sec auf 119,9m³/sec), auch bei den übrigen Pegelmessstationen zeigten die Berechnungen die größten Zunahmen durchgehend für die Herbstmonate.

Zieht man nun die Daten der Niederschlagsentwicklung heran, ergeben diese, dass an neun Stationen die Niederschlagssumme der Periode 1996–2010 über jener von 1981–1995 liegt, an ebenfalls neun Stationen, wohlgermerkt liegen acht davon südlich der Mur-Mürz-Furche, kam es zu einem Rückgang. Als Beispiel für einen Anstieg soll hier die Station Gössl der Grundlseer-Traun genannt werden, dort nahm der Niederschlag um etwa 16% in den Herbstmonaten in der Zeitspanne 1996–2010 zu (Niederschlagssumme der Herbstmonate der Perio-

de 1981–1995: 5154,7mm; Niederschlagssumme der Herbstmonate der Periode 1996–2010: 5999,8mm) , an der Messstation Ligist (Kainach) hingegen gab es einen Rückgang um etwa 8% (von 3547,8mm in der Periode 1981–1995 auf 3314,2mm in der Periode 1996–2010).

Dass die Anstiege der Abflüsse in den Herbstmonaten so markant sind, liegt einerseits daran, dass in diesem Zeitraum auch der Niederschlag deutlich zugenommen hat (siehe vorheriger Absatz), doch auch die äußeren Einflüsse, sei es durch eine hohe Evapotranspiration oder eine vorherrschende Vegetation, sind in diesen Monaten gering. Bei der Gegenüberstellung des Abflusses und des Niederschlags ergaben die Daten an neun Stationen sowohl einen Anstieg des Durchflusses als auch eine Zunahme der Niederschlagssumme, an vier Stationen zeigt sich für beide Variablen ein Rückgang und an fünf Stationen erfolgte eine Zunahme des Abflusses bei einer Abnahme der Niederschlagssumme (Feistritz, Mur [Graz und Mureck], Mürz und Raab).

Neben den zuvor betrachteten Entwicklungen des Niederschlags sowie des Abflusses stieg an allen achtzehn Messstationen in den Herbstmonaten der Periode 1996–2010 auch die mittlere Temperatur entgegen jener von 1981–1995 an. Allerdings halten sich die Veränderungen, ähnlich wie im Winter, in Grenzen.

Die Zunahme des Temperaturmittelwertes für die Monate September, Oktober und November in der Periode 1996–2010 entgegen jener von 1981–1995 lag zwischen 0,01% (Mariazell von 6,74°C auf 6,78°C) und 0,4% (Flughafen-Graz von 8,81°C auf 10,02°C).

4.4 Entwicklung des Schwebstoffgehalts in der Periode 2008–2010

Für die Entwicklung der Schwebstoffgehalte in den steirischen Flüssen kann lediglich knapp eine Handvoll Messstationen ausgewertet werden, weil seitens der Steirischen Landesregierung erst ab 2008 tägliche Schwebstoffmessungen an Flüssen durchgeführt werden. Am Beispiel der Sulm in Abbildung 15 erkennt man, dass in diesem dreijährigen Zeitraum eine leichte Erhöhung des Sedimentgehalts stattgefunden hat, ob der kurzen Messperiode muss diese Entwicklung jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

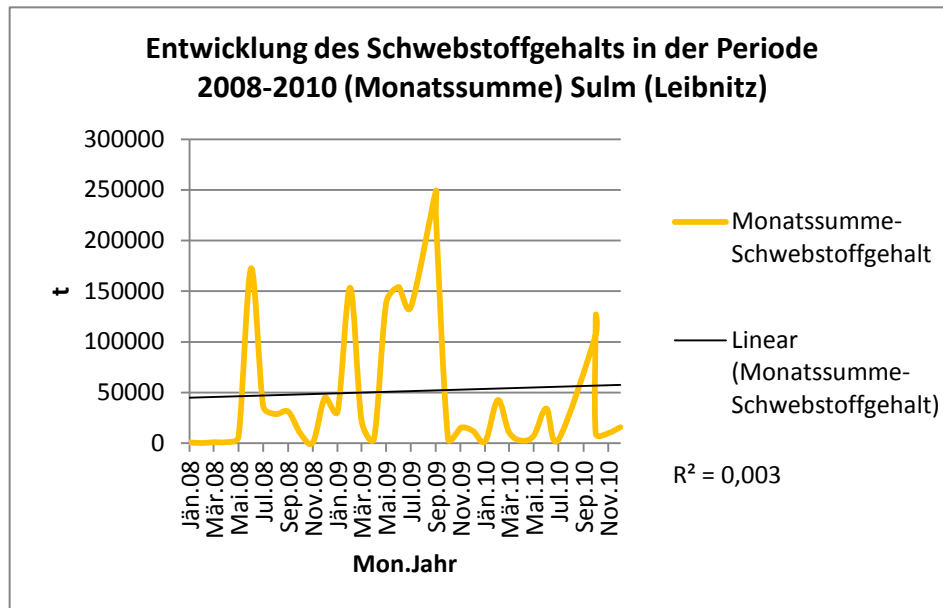


Abbildung 15: Entwicklung des Schwebstoffgehalts in der Periode 2008–2010 (Monatssumme) Sulm (Leibnitz); Datenquelle: www.ehyd.gv.at

5 Statistische Analyse

Da die in den Kapiteln 4.2 und 4.3 zuvor dokumentierten Ergebnisse als Basis für eine zukünftige Prognose des Abflusses und des Feststoffgehalts bis 2050 herangezogen werden, wurde vorab noch eine statistische Analyse durchgeführt. Einleitend soll somit mit Hilfe der bisherigen Entwicklungen der Zusammenhang zwischen Abflussverhalten, Niederschlag und Temperatur dargestellt werden. Die Bezugsberechnungen wurden sowohl in Microsoft Office Excel 2007 als auch im Statistikprogramm „R“ getätigt. Dazu wurde in Excel das Regressionsanalysetool verwendet, um aufzeigen zu können, ob die Variablen *Niederschlag* und *Temperatur* mit dem *Abfluss* und die Variable *Abfluss* mit dem *Sedimentgehalt* eines Flusses korrelieren, in „R“ wurden die Werte mit Hilfe der dazu benötigten Befehle berechnet. Der Abfluss sowie der Sedimentgehalt stellen in den Berechnungen die abhängige Variable dar, Niederschlag und Temperatur sowie bei der Berechnung des Sedimentgehalts auch der Abfluss sind somit die unabhängigen Werte. Mit Hilfe des Pearson-Koeffizienten (im weiteren Verlauf „r“ genannt) wird versucht, den Grad des Zusammenhangs der abhängigen und unabhängigen Variablen darzustellen. Der Korrelationskoeffizient wirft Werte zwischen -1, welcher einen perfekten negativen Zusammenhang aufzeigt, und +1, welcher einen perfekten positiven Zusammenhang darlegt, aus. FLIRI (1972: 75) sagt dazu: „Der Wert ist positiv, wenn wachsenden X- auch wachsende Y-Werte entsprechen, negativ, wenn steigende X- fallende Y-

Werte oder umgekehrt zugehören.“ Laut KOHN (2005: 129) lassen sich die Größen der Korrelationskoeffizienten wie folgt eingliedern:

$0 - < 0,5$	schwache Korrelation
$\leq 0,5 - < 0,8$	mittlere Korrelation
$\leq 0,8 - \leq 1$	starke Korrelation

Zusätzlich wird bei der statistischen Analyse das Bestimmtheitsmaß (im weiteren Verlauf „ r^2 “) herangezogen, welches aussagt, wie viel Prozent der untersuchten Werte auf der Trendlinie liegen. Nach diesen Berechnungen wurde mit Hilfe des Signifikanztests untersucht, ob die Zusammenhänge systematisch oder zufällig zustande kamen. Dazu wurde der bei der Regressionsanalyse ausgeworfene p-Wert verwendet. So handelt es sich bei einem p-Wert $\leq 0,05$ um einen signifikanten Zusammenhang, bei einem p-Wert von $\leq 0,01$ liegen sehr signifikante Ergebnisse vor und bei einem p-Wert von $\leq 0,001$ sind die Ergebnisse höchst signifikant.

Es sei hier vorab erwähnt, dass die beiden verwendeten Programme (Microsoft Excel, „R“) hinsichtlich der Berechnung der Korrelation und des Bestimmtheitsmaßes sehr ähnliche Ergebnisse erbrachten, lediglich bei der Berechnung des Signifikanzniveaus ergaben sich bei den höchst signifikanten Zusammenhängen teilweise Unterschiede, die sich allerdings nicht auf die finale Aussage auswirken. Beispielsweise errechnete Excel für die Messstation Salza bei der Regressionsanalyse zwischen dem vorhandenen Niederschlag und dem Abfluss für die Sommermonate den p-Wert 2,9407E-17, während „R“ einen p-Wert von 2.2E-16 ausgab. Die in den folgenden Kapiteln in den Tabellen dargestellten Werte zeigen jene, die mit Excel errechnet wurden. Im Anhang werden zusätzlich die gesammelten Ergebnisse der Regressionsanalysen dem Leser zur Verfügung gestellt.

5.1 Korrelation zwischen Abfluss und Niederschlag

Die Korrelationsberechnungen zwischen Abflussdaten und Niederschlagsdaten wurden für die vier Jahreszeiten separat durchgeführt und erbrachten höchst unterschiedliche Ergebnisse. Es sei hier erwähnt, dass für die Berechnungen die monatlichen Mittelwerte der Abflüsse den monatlichen Niederschlagssummen gegenübergestellt wurden; dies deshalb, da Berechnungen mit Tageswerten keine repräsentativen Werte ergaben, da sich die Abflusswerte immer erst ein bis zwei Tage nach einem Niederschlagsereignis dementsprechend erhöhen.

So ergaben sich für die Wintermonate nach Durchführung der Regressionsanalyse r-Werte zwischen $r=0,1$ und $r=0,5$, was somit auf eine schwache beziehungsweise mittlere Korrelation schließen lässt. Die unterschiedlichen Werte im Winter ergeben sich aus den differenten örtlichen Verteilungen der Flüsse, so erbrachten beispielsweise die Korrelationsberechnungen für Flüsse in der Obersteiermark (zum Beispiel Enns an der Pegelstation Liezen) die geringsten Werte, Flüsse wie etwa die Mur an der Pegelstation Mureck oder der Schwarzaubach im Bezirk Südoststeiermark die höchsten. Die ungleiche Verteilung der Werte lässt sich jedoch einfach erklären. Der Niederschlag fällt in den Wintermonaten in der Obersteiermark zumeist in fester Form und wird gewöhnlich für einen längeren Zeitraum als Schnee gespeichert. Die südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Bezirke der Steiermark erfahren im Winter deutlich weniger Schnee, auch wird der gefallene feste Niederschlag nur über einen kürzeren Zeitraum gespeichert.

Bei der Untersuchung des Bestimmtheitsgrades erbrachten die Berechnungen für die Wintermonate Werte zwischen $r^2=0,01$ und $r^2=0,2$. Zudem zeigten die Kalkulationen der Signifikanzniveaus Werte zwischen $6,2594E-06$ und $0,4$, dies bedeutet, dass für manche Flüsse die Berechnungen höchst signifikante Werte ergaben (Beispiel Mur-Mureck $r=0,5$; $r^2=0,2$; p-Wert= $0,0000063$), andere Ergebnisse wiederum weisen keine Signifikanz auf (Beispiel Untertalbach $r=0,1$; $r^2=0,02$; p-Wert= $0,2$). Es soll hier zudem Erwähnung finden, dass die statistische Analyse an lediglich vier von achtzehn Pegelmessstationen keine Signifikanz nachwies. Tabelle 1 zeigt stellvertretend für ausgewählte Messstationen die kalkulierten Werte.

Tabelle 1: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Wintermonate (Abfluss/Niederschlag) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r²	p-Wert
Grundlseer-Traun	0,5	0,2	4.8074E-06
Donnersbach	0,3	0,1	0,01
Mur/Mureck	0,5	0,2	6,2594E-06
Untertalbach	0,1	0,02	0,2

Ähnlich wie die Wintermonate verhalten sich auch die Werte im Frühjahr. So ergaben die Analysen Korrelationen zwischen $r=0,03$ (Grundlseer-Traun) und $r=0,6$ (Mur-Graz), was im Falle der Grundlseer-Traun auf einen schwachen Zusammenhang und in Graz auf eine mittlere Korrelation schließen lässt. Die äußerst geringen Werte, wie jener eben an der Grundlseer-

Traun, lassen sich jedoch recht einfach erklären. Der Fluss liegt in den schneereichen Bezirken der Obersteiermark und speichert somit den im Winter gefallenen Niederschlag zumeist als Schnee. In den Frühjahrsmonaten setzt die Schneeschmelze ein und erhöht somit die Abflusswerte. Nun kommt es beispielsweise dazu, dass im März eine Niederschlagssumme von 50mm fällt und der mittlere Abfluss auf Grund der Schneeschmelze bei 5m³/sec liegt. Im Monat Mai jedoch findet man ebenso einen mittleren Abfluss bei 5m³/sec vor, jedoch hat sich die Niederschlagssumme auf 100mm erhöht. Dies bedeutet, dass gerade bei den nivalen Flüssen in den Frühjahrsmonaten geringe Korrelationen die Regel sind.

Zieht man nun die Bestimmtheitsgrade als repräsentative Zahl in Betracht, so erfahren die geringen r-Werte, siehe die zuvor genannte Grundlseer-Traun, auch dementsprechend niedrige r²-Werte (0,001), am Beispiel der Mur in Graz jedoch werden r²-Werte von 0,3 errechnet. Dasselbe Bild erbringen die Berechnungen des Signifikanzniveaus, es sei hier wieder auf das Beispiel der Grundlseer-Traun hingewiesen, welcher einen p-Wert von 0,7 aufweist, was somit nicht signifikant ist (Grundlseer-Traun r=0,03; r²=0,001; p-Wert=0,7). Am Beispiel der Mur in Graz wiederum konnte ein p-Wert von 1,9423E-08 errechnet werden, was bedeutet, dass der errechnete r-Wert und r²-Wert höchst signifikante Werte darstellen (Mur-Graz r=0,6; r²=0,3; p-Wert=1,9423E-08). An sechs Pegelstationen ergaben sich keinerlei signifikante Ergebnisse in den Frühjahrsmonaten, alle sechs befinden sich in der Region der Obersteiermark und sind dem nivalen Abflusstyp zuzuordnen. Wie bereits erwähnt, dürften sich diese Werte auf Grund der in diesem Zeitraum stattfindenden Schneeschmelze ergeben.

Tabelle 2 repräsentiert wiederum für ausgewählte Messstationen die Ergebnisse der Regressionsanalyse.

Tabelle 2: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Frühjahrsmonate (Abfluss/Niederschlag) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r²	p-Wert
Enns/Schladming	0,03	0,001	0,7
Kainach	0,5	0,2	6,8746E-07
Mur/Graz	0,6	0,3	1,9423E-08
Grundlseer-Traun	0,03	0,001	0,7

In der Folge wird nunmehr der Sommers analysiert, wobei sich, dies sei vorab bereits erwähnt, deutlich repräsentativere Werte ergeben. Die berechneten r-Werte werfen Zahlen zwischen 0,2 am Untertalbach und 0,7 am Ilzbach oder der Salza aus, ersterer Wert zeigt somit eine schwache Korrelation (an acht weiteren Pegelstationen werden schwache Korrela-

tionen errechnet), zweiterer repräsentiert eine mittlere Korrelation (an sieben weiteren Pegelstationen werden mittlere Korrelationswerte ausgeworfen). In den Sommermonaten muss beachtet werden, dass die erhöhte Verdunstung, welche auf Grund der höheren Temperaturen stattfindet, direkt den gefallenen Niederschlag beeinflusst. Dies zeigt somit in gewissem Maße Auswirkungen des Niederschlags auf den Abfluss. Zusätzlich zu der verstärkten Verdunstung wird der gefallene Niederschlag teils auch von der vermehrt vorkommenden Vegetationsdecke aufgenommen, auch dies hat Einfluss auf die direkten Auswirkungen des Niederschlags auf den Abfluss. Die Berechnungen des Bestimmtheitsmaßes (r^2) ergaben stark differierende Werte, beispielsweise wird für den Donnersbach ein r^2 -Wert von 0,1 kalkuliert, an der Salza jedoch zeigt sich ein r^2 -Wert von 0,6, was wiederum bedeutet, dass 60% der Werte an der Trendlinie liegen. Betrachtet man abschließend die p-Werte, kann festgestellt werden, dass sich für alle Pegelstationen Werte zwischen 0,02 (Untertalbach) und 2.9407E-17 (Salza/Gußwerk) bewegen. Dies lässt auf höchst signifikante Ergebnisse schließen. In Tabelle 3 sind vier Messstationen als Beispiele für die Ergebnisse der Sommermonate aufgelistet.

Tabelle 3: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Sommermonate (Abfluss/Niederschlag) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r²	p-Wert
Ilzbach	0,7	0,4	3,433E-12
Pölsfluss	0,4	0,1	0,0003
Salza	0,7	0,6	2,9407E-17
Untertalbach	0,2	0,1	0,02

Die Korrelationsmaße zeigen auch für die Herbstmonate unterschiedliche Ergebnisse, so werden Werte zwischen 0,3 an der Mur in Mureck und 0,8 an der Pegelstation Gußwerk an der Salza errechnet. Zieht man alle Pegelstationen in Betracht, ergeben sich für drei Stationen schwache Korrelationen, an dreizehn Stationen eine mittlere Korrelation und an zwei Stationen ein starker Zusammenhang. Diese durchwegs positiven Ergebnisse können darauf zurückgeführt werden, dass in den Herbstmonaten die geringsten äußeren Einflüsse auf den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss wirken, so ist beispielsweise die Verdunstung deutlich geringer als in den Sommermonaten, die Vegetation ist zusätzlich nicht mehr so stark ausgeprägt und zudem wird der gefallene Niederschlag nicht als Schnee zwischengespeichert. All diese Faktoren ergeben einen deutlich höheren direkten Einfluss des Niederschlags auf den vorhandenen Abfluss. Tabelle 4 gibt die Ergebnisse repräsentativer Messstationen in den Herbstmonaten wieder.

Tabelle 4: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Herbstmonate (Abfluss/Niederschlag) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r²	p-Wert
Mur/Mureck	0,3	0,1	0,001
Raab	0,4	0,2	0,0001
Salza	0,8	0,6	2,7226E-19
Vordernberger-Bach	0,6	0,4	5,169E-10

5.2 Korrelation zwischen Abfluss und Temperatur

Die Kalkulationen zwischen Abflussdaten und Temperaturdaten wurden ebenso wie jene zwischen Abflussdaten und Niederschlagsdaten (siehe Kapitel 5.1) für die 4 Jahreszeiten separat durchgeführt und erbrachten ebenfalls höchst unterschiedliche Ergebnisse. Es sei hier erwähnt, dass für die Berechnungen die monatlichen Mittelwerte der Abflüsse den monatlichen Temperaturmittelwerten gegenübergestellt wurden.

So belaufen sich nach der Regressionsanalyse für die Wintermonate r-Werte auf 3,7875E-05 (Lafnitz) und 0,4 (Salza), was lediglich auf eine schwache Korrelation, im Falle der Messstation Lafnitz gar auf keinen Zusammenhang, schließen lässt. Die unterschiedlichen Werte ergaben sich wie schon zuvor bei der Korrelationsberechnung zwischen Abflüssen und Niederschlagsdaten auf Grund der geographischen Lage der Messstationen. In den nördlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Messstationen wurden beispielsweise höhere r-Werte, als dies an den südlich davon gelegenen Stationen der Fall ist, errechnet (Beispiel Grundlseer-Traun $r=0,4$; Ilzbach $r=0,02$). Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Abfluss in den nival geprägten Flussregimen stärker von der vorherrschenden Temperatur beeinflusst wird. Wenn die Wintermonate wärmer ausfallen, fällt der Niederschlag weniger oft in fester Form und wird aus diesem Grund auch in geringerem Ausmaß gespeichert. Dadurch erhöht sich folglich der direkte Einfluss der Temperatur auf den Abfluss. Betrachtet man nun das Bestimmtheitsmaß, wird aufgezeigt, dass jene Messstationen, welche bereits geringe r-Werte erfahren haben, auch dementsprechend niedrige r^2 -Werte aufzuweisen haben, – auch hier sei erneut das Beispiel des Ilzbachs genannt, für dessen Messstation in Neudorf an der Ilz ein r^2 -Wert von 0,0003 ermittelt wurde.

Die Berechnungen des Bestimmtheitsmaßes erbrachten Werte zwischen 0,0003 und 0,2. Zudem zeigten die Kalkulationen der Signifikanzniveaus Werte zwischen 0,0001 und 0,6. Dies bedeutet, dass für manche Flüsse die Berechnungen höchst signifikante Werte lieferten

(Beispiel Grundlseer-Traun $r=0,4$; $r^2=0,1$; $p\text{-Wert}=0,0002$), andere Ergebnisse wiederum zeigen keine Signifikanz (Beispiel Feistritz $r=0,1$; $r^2=0,02$; $p\text{-Wert}=0,2$). Es soll hier zudem Erwähnung finden, dass die statistische Analyse an elf von achtzehn Pegelmessstationen keine Signifikanz nachwies. Tabelle 5 stellt einige repräsentative Beispiele der durchgeführten Regressionsanalyse dar.

Tabelle 5: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Wintermonate (Abfluss/Temperatur) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r²	p-Wert
Enns/Liezen	0,4	0,2	0,0001
Grundlseer-Traun	0,4	0,1	0,0002
Lafnitz	3,7875E-05	1,4345E-09	1
Raab	0,2	0,02	0,2

Nach den Wintermonaten sollen nun die Frühjahrsmonate näher betrachtet werden. So ergeben sich hierbei r-Werte zwischen 0,04 (Lafnitz) und 0,9 (Untertalbach). Sieben von achtzehn Messstationen zeigen eine starke Korrelation zwischen Temperaturen und Abflussdaten, drei lieferten mittlere, die restlichen acht schwache Zusammenhänge. Jene zehn Messstationen, die starke beziehungsweise mittlere Korrelationen aufweisen, liegen allesamt nördlich der Mur-Mürz-Furche. Dass sich hier solch positive Zusammenhänge ergeben, lässt sich einfach erklären. Beinahe all jene Messstationen, die bei der Regressionsanalyse zwischen Niederschlagsdaten und Abflussdaten schwach korrelieren, zeigen nun hohe Werte. Erklärbar ist dies dadurch, dass es sich hier zum Großteil um nivale Flussregime handelt, das heißt, dass in den Frühjahrsmonaten die Schneeschmelze einsetzt. Im Endeffekt tritt hier genau der umgekehrte Fall ein, wie er zuvor für die Wintermonate beschrieben wurde. Die höhere Temperatur in den Monaten März, April und Mai führt zum Abschmelzen des Schnees und erhöht dadurch den Abfluss. Somit können beispielsweise trotz geringer Niederschlagsmengen die Abflüsse gerade im März oder April ähnliche Mittelwerte aufweisen, wie dies beispielsweise im Mai der Fall ist, wo dann allerdings wieder eine höhere Beeinflussung durch den Niederschlag vorherrscht.

Die Bestimmtheitsmaßkalkulationen erbringen Werte zwischen $r^2= 0,001$ (Lafnitz) und $r^2=0,9$ (Untertalbach), wobei hier abermals jene Stationen einen hohen Wert erfahren, welche auch starke Korrelationen aufweisen. Abbildung 16 verdeutlicht den r^2 -Wert für den Untertalbach an der Messstation Tetter im Bezirk Liezen.

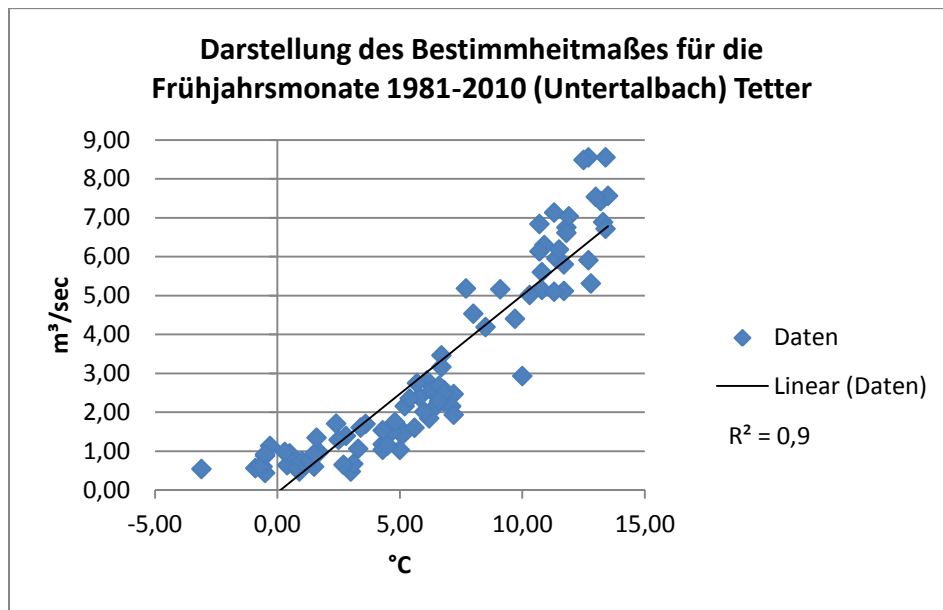


Abbildung 16: Darstellung des Bestimmtheitsmaßes für die Frühjahrsmonate 1981–2010 (Untertalbach) Tetter;
Datenquelle: www.ehyd.gv.at; ZAMG

Zieht man nun die Kalkulationen bezüglich des Signifikanzniveaus heran, liegen die errechneten Werte zwischen $1,1492E-38$ (Untertalbach) und 0,7 (Lafnitz), es handelt sich somit teils um höchst signifikante Ergebnisse, teils wiederum liegt keinerlei Signifikanz vor. Für jene zehn Stationen, welche neben starken Zusammenhängen auch ein hohes Bestimmtheitsmaß aufweisen, ergeben sich ebenso höchst signifikante Werte, was somit auf einen systematischen Zusammenhang schließen lässt. Jene Stationen, die an pluvial beeinflussten Flüssen liegen, zeigen bei der Regressionsanalyse für die Frühjahrsmonate keinerlei Signifikanz, die errechneten r - sowie r^2 -Werte zeigen somit einen zufälligen Zusammenhang. In Tabelle 6 können ausgewählte Werte, die bei der Regressionsanalyse errechnet wurden, ausgemacht werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Frühjahrsmonate (Abfluss/Temperatur) – Darstellung ausgewählter Messstationen; Quelle: eigene Erhebung

Pegel-/Messstation	r	r^2	p-Wert
Grundlseer-Traun	0,9	0,8	6,1896E-32
Feistritz	0,2	0,05	0,04
Pölsfluss	0,8	0,7	2,9851E-24
Salza	0,1	0,01	0,3

Für die Sommermonate erbrachte die Regressionsanalyse r-Werte zwischen 0,2 (z.B. Raab) und 0,5 (z.B. Pölsfluss), was somit auf einen geringen bis mittleren Zusammenhang schließen lässt. Die r^2 -Werte zeigen ebenso geringe Werte, so gibt es hier eine Spanne zwischen $r^2=0,08$ (z.B. Feistritz) und $r^2=0,3$ (z.B. Grundlseer-Traun), was bedeutet, dass zwischen 8% und 30% der Werte auf der Trendlinie liegen. Alle kalkulierten Werte sind jedoch signifikant bis höchst signifikant.

Zuletzt soll nun der Zusammenhang zwischen der vorherrschenden Monatsmitteltemperatur und dem mittleren Monatsabfluss für die Herbstmonate untersucht werden, wobei auch hier die r-Werte lediglich eine schwache bis mittlere Korrelation auswerfen. Die errechneten Werte des Bestimmtheitsmaßes zeigen ebenso nur einen äußerst geringen Prozentanteil an Daten, die sich an der Trendlinie befinden. Interessant ist lediglich, dass die Berechnungen des Signifikanzniveaus teils höchst signifikante Werte ergeben, die Mehrheit jedoch Werte aufweist, die auf einen zufälligen Zusammenhang des Einflusses der Temperatur auf den Abfluss in den Herbstmonaten hinweisen.

Auf Grund der geringen Zusammenhänge wurde seitens des Autors auf die tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Sommer- als auch der Herbstmonate verzichtet.

Resümierend kann somit festgehalten werden, dass bei den Regressionsanalysen für die Wintermonate sowohl bei den Berechnungen des Einflusses des Niederschlags auf den Abfluss als auch hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf den Niederschlag lediglich ein geringer Zusammenhang aufgezeigt werden konnte. Dies kann, wie schon zuvor erwähnt, damit begründet werden, dass der Niederschlag im Winter in Form von Schnee fällt und zumeist zwischengespeichert wird und somit nicht direkt in den Abfluss gelangt. Diese Aussage gilt im Speziellen für die in den obersteirischen Bezirken gelegenen Messstationen.

In den Frühjahrsmonaten erbrachten die statistischen Analysen jedoch eine teils starke Korrelation zwischen der vorherrschenden Temperatur und dem Abfluss, die Analysen betreffend des Einflusses des Niederschlags auf den Abfluss ergaben lediglich einen schwachen Zusammenhang. Dieses Ergebnis erklärt sich dadurch, dass durch die höheren Temperaturen im Frühjahr die Schneeschmelze ausgelöst wird, welche dadurch einen Einfluss auf den Abfluss hat. Gerade in den obersteirischen Bezirken ergaben sich hierbei starke Zusammenhänge, während in den südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Bezirken die Niederschläge einen höheren Einfluss auf den Abfluss hatten als die Temperatur.

In den Sommermonaten ergeben sich teils mittlere Zusammenhänge zwischen Niederschlagsaufkommen und dem Abfluss, dennoch werfen die Korrelationsberechnungen sowohl für den Temperatureinfluss als auch für den Niederschlagseinfluss auf den Abfluss zum Groß-

teil schwache Korrelationen auf. Dies erklärt sich damit, dass in den Sommermonaten die Evapotranspiration hoch ist, es somit vermehrt zu Verdunstungen kommt und ebenso ein Teil des Niederschlags von den Pflanzen aufgenommen wird.

Für die Herbstmonate zeigen hingegen die meisten Analysen, dass der Einfluss des Niederschlags entgegen jenem der Temperatur auf den Abfluss deutlich höher ist, wiewohl die Werte zumeist von mittleren Zusammenhängen, in einigen Fällen jedoch auch von starken Korrelationen ausgehen.

5.3 Korrelation zwischen Abfluss und Schwebstoffgehalt

Nachdem, wie bereits zuvor berichtet, die tageweise verfügbaren Schwebstoffdaten der Steirischen Landesregierung nur bis ins Jahr 2008 (und dies nur bei zwei Stationen) zurückreichen, muss die Prognose über die Entwicklung der Schwebstoffe seit 1981 auf die Entwicklung des Niederschlags bezogen werden. Aus diesem Grund wurde, wie schon zuvor für die Variablen Niederschlag, Temperatur und Abfluss eine Regressionsanalyse durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen dem vorhandenen *Abfluss* und den transportierten *Schwebstoffen* erklären soll.

Um nun die Korrelation der beiden Variablen aufzeigen zu können, zog der Autor dieser Masterarbeit die beiden Stationen in Betracht, welche die längsten durchgehenden Daten aufweisen. Dies ist einerseits die Messstation Mureck an der Mur und andererseits die Messstation Leibnitz an der Sulm. Im Zuge der Regressionsanalyse wurden die monatlichen Mittelwerte des Abflusses den Monatssummen der Schwebstofffracht gegenübergestellt und neben dem Korrelationswert und dem Bestimmtheitsmaß auch die Signifikanz der Ergebnisse errechnet.

Für beide Messstationen ergaben sich r -Werte zwischen 0,8 (Sulm) und 0,9 (Mur). Es zeigt sich an Hand der beiden Korrelationswerte, dass es zwischen der Höhe des mittleren monatlichen Durchflusses und der Gesamtsumme der transportierten Schwebstofffracht einen starken Zusammenhang gibt. Auch hinsichtlich der r^2 -Werte, also des Bestimmtheitsmaßes, liegen eindeutige Ergebnisse vor, so ergaben diese einen Zustand von 0,8 (Mur) und 0,6 (Sulm). Bei der Kalkulation des Signifikanzniveaus wurden Werte zwischen $8,7313\text{E-}09$ (Sulm) und $8,1354\text{E-}12$ ausgeworfen, beide lassen Rückschlüsse darauf zu, dass die errechneten Werte höchst signifikant sind und der Zusammenhang nicht zufällig, sondern systematisch zustande gekommen ist.

6 Zur Methodik der Fragebogenstudie

Als Basis für die Erstellung des Fragebogens dienten die im Laufe der Literaturrecherche gewonnenen Informationen hinsichtlich der Thematiken Stauraumverfüllung, Klimawandel in der Steiermark, Sedimenttransport in Flüssen und Erosionstypen.

Der Fragebogen, welcher im Anhang zu finden ist, umfasst dreizehn Fragen, welche einen Überblick über den Status Quo von Kleinwasserkraftwerken (und deren Betreibern) in der Steiermark geben sollen. Die Fragen wurden so gestellt, dass sie entweder mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten waren oder Informationen ausgefüllt beziehungsweise aus vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ausgewählt werden konnten. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Befragung zwar anonym erfolgte, aber sich jeder der Befragten trotzdem zu erkennen gab.

6.1 Erläuterungen zum Fragebogen

Frage 1 ist seitens des Autors von großer Wichtigkeit, gilt es für den Verfasser zu erforschen, wie sich beispielsweise Probleme in zwei differenten Bezirken unterscheiden. Als Beispiel seien hier die Bezirke Leibnitz und Liezen genannt. Während ersterer durch enorme landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet ist, herrschen im Bezirk Liezen zum Großteil alpine Verhältnisse. Dies könnte sich auch in den Problematiken für Kleinwasserkraftwerke widerspiegeln. Fragen 2 bis 4 zielen darauf ab, Basisinformationen über das Kleinwasserkraftwerk zu erlangen. Die Fragen 5 und 6 sollen aufzeigen, ob es bereits jetzt bei den Kleinwasserkraftwerken in der Steiermark zu Problemen mit Stauraumverfüllungen kommt, und sollte dies der Fall sein, wie die Betroffenen dagegen vorgehen, wobei bei Frage 6 Mehrfachnennungen möglich waren. Die vorgegebenen Antwortmöglichkeiten bei Frage 6 stellen dabei mögliche Alternativen dar, wie man gegen die Stauraumverfüllung vorgehen kann. Zudem gelten diese Adaptionismöglichkeiten auch als denkbare Alternative, sollte es in Zukunft vermehrt zu Problemen von Stauraumverlandungen kommen. Die genannten Alternativen werden in Kapitel 8 noch genauer erläutert. Frage 7 soll einen kurzen Überblick geben, ob sich die Betreiber im Klaren sind, wie es überhaupt zu einem Eintrag von Feststoffen in einen Stauraum kommt beziehungsweise was denn überhaupt der Feststoffherd für das im Staubecken verlandete Sediment ist. Es wurden mehrere Antwortmöglichkeiten angegeben, wobei hier im Speziellen auf die Kombination der Antworten geachtet werden soll. Auch hier waren Mehrfachnennungen möglich. Beispielsweise ist es von Interesse, ob sich die Betreiber dessen auch bewusst sind, dass durch vermehrt auftretende trockene Böden und steigende Niederschläge, respektive mögliche vermehrt vorkommende Starkregenereignisse, ein Anstieg der Feststoffeinträge in einen Fluss erklärbar ist. Die Fragen 8 und 9 zielen darauf ab, ob

Kleinwasserkraftwerksbetreiber bereits in den letzten Jahren Probleme mit meteorologischen Extremereignissen gehabt haben, und sollte dies der Fall sein, welche Konsequenzen diese auf das Kraftwerk hatten. Auch bei Frage 9 konnten mehrere Antworten ausgewählt werden. Mit Hilfe der Frage 10 wird versucht, dem Kleinwasserkraftwerksbetreiber mehrere Möglichkeiten anzubieten, welche in Zukunft Einfluss auf den Feststofftransport haben könnten. Frage 11 und Frage 12 sollen Aufschluss darüber geben, ob sich die Betreiber von KWKW bereits Gedanken darüber gemacht haben, ob ihr Kraftwerk vom Klimawandel betroffen sein könnte, und sollte dies der Fall sein, welche Auswirkungen dies hätte beziehungsweise welche Vorgehensweise jene Kraftwerksbetreiber für nötig halten, wobei bei Frage 12 ebenfalls eine Mehrfachnennung möglich war. Frage 13 wurde nachträglich noch jenen Personen gestellt, die dem Autor dieser Arbeit die Fragebögen zurückgesandt hatten. Sie dient dazu, wenn möglich, für jene Flüsse die Entwicklungen der Abflussdaten beziehungsweise Schwebstoffdaten darstellen zu können, welche für die Probanden wichtig sind.

Der im Anhang angeführte Fragebogen wurde über den Verein „Kleinwasserkraft Österreich“ an 175 dort registrierte Kleinwasserkraftwerksbetreiber in der Steiermark per E-Mail versendet. Zusätzlich erfuhren die Befragten in einem Begleitbrief, welche Motivation hinter dieser Masterarbeit steckt. Außerdem wurde über den Nutzen dieses Fragebogens Auskunft gegeben. Nach einer 3-wöchigen Wartephase retournierten 32 von den 175 befragten Kraftwerksbetreibern die Fragebögen, was einer Rückflussrate von 18,3% und somit den Erwartungen entsprach.

Der Rücklauf erbrachte Antworten von 20 (62,5%) Kleinwasserkraftwerken aus der Obersteiermark, die höchste Anzahl derer findet man im Bezirk Murau mit 6 (18,75%) KWKW vor, zudem wurden aus den Bezirken Bruck-Mürzzuschlag (n=4), Leoben (n=1), Liezen (n=4) und Murtal (n=5) ausgefüllte Fragebögen zurückgeschickt. Dies ist bei den folgenden Betrachtungen von Bedeutung, könnte es hier doch gravierende Unterschiede im Vergleich zu den südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Regionen geben. Die restlichen 12 Fragebögen (37,5%) teilen sich auf die Bezirke Hartberg-Fürstenfeld (n=5), Leibnitz (n=1), Südoststeiermark (n=1) und Weiz (n=5) auf. Aus den Bezirken Deutschlandsberg, Graz, Graz-Umgebung sowie Voitsberg wurden keine Fragebögen von Kraftwerksbetreibern zurückgeschickt.

6.2 Präsentation der Umfrageresultate – allgemeiner Überblick

Die Ergebnisse der Umfrage sollen im Folgenden als Tabelle wiedergegeben werden, um dem Leser einen ersten guten Überblick zu verschaffen. Anschließend werden die gewonnenen Ergebnisse aufgearbeitet und die unterschiedlichen Antworten verknüpft.

Tabelle 7: Auswertung Frage 2: Alter des Kraftwerks; Quelle: eigene Erhebung

	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100	>100
Anzahl	7	6	9	3	1	0	1	0	1	1	3

Tabelle 8: Auswertung Frage 3: Typ des Kleinwasserkraftwerks; Quelle: eigene Erhebung

	Ausleitungs-KW	Lauf-KW	Speicher-KW	Trinkwasser-KW	Schwell-KW	kA
Anzahl	16	16	0	0	1	0

Tabelle 9: Auswertung Frage 5: Probleme mit Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung

	Ja	Nein	kA
Anzahl	25	7	0

Tabelle 10: Auswertung Frage 6: Vorgehen bei Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung

	Stauraum-spülung	Sediment-durchreiche	Schuttsperre	Sediment-Umleitung	Ausbaggerung	Sonstiges
Anzahl	21	0	0	0	21	2

Tabelle 11: Auswertung Frage 7: Ursache von Feststoffeintrag in Fluss → Stauraumverfüllung; Quelle: eigene Erhebung

	Starkregen-niederschlag	Trockenperioden u. trockene Böden	Externer Eintrag von z.B. Acker-flächen	Erosionen im Flussbett	Erosionen an Flussufern	kA
Anzahl	22	0	2	14	9	6

Tabelle 12: Auswertung Frage 8: Probleme, welche durch meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden; Quelle: eigene Erhebung

	Ja	Nein	Keine Angabe
Anzahl	18	14	0

Tabelle 13: Auswertung Frage 9: Aus Frage 9 resultierende Probleme; Quelle: eigene Erhebung

	Verklausung der Rechenanlage	Abrupter Stau-raumverlust	Schäden an der Turbine	Geringer Wassereinzug	Sonstiges
Anzahl	14	9	1	12	12

Tabelle 14: Auswertung Frage 10: Auslöser für Änderungen des Feststoffgehalts in der Zukunft;
Quelle: eigene Erhebung

	Klimawandel	Änderungen im Einzugsgebiet zB. durch Abholzung	Bau von Wasserkraftwerken im Flussoberlauf	Sonstiges	Keine Angabe
Anzahl	14	22	10	8	7

Tabelle 15: Auswertung Frage 11: Gedanken hinsichtlich Klimawandel; Quelle: eigene Erhebung

	Ja	Nein	Keine Angabe
Anzahl	19	13	0

Tabelle 16: Auswertung Frage 12: Konsequenzen durch Klimawandel für Kraftwerke; Quelle: eigene Erhebung

	Mögliche Schäden an Turbine	Möglichkeit der Stauraumverfüllung	Höherer Betreuungsaufwand	Mögliche Schäden an Rechenanlagen	Außerbetriebnahme der Anlage	Bauliche Anpassung der Anlage	Sonstiges
Anzahl	1	14	16	13	12	13	10

Auf die Verteilung der Örtlichkeit der Kraftwerke wurde bereits zuvor eingegangen. Blickt man nun auf die Frage 2 (Tabelle 7), so kann festgestellt werden, dass mit 22 (68,75%) Kraftwerken der Großteil der KWKW in den letzten 30 Jahren erbaut wurde. Dies deckt sich mit dem in Kapitel 1.3 erwähnten Anstieg der Kleinwasserkraftwerke seit den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts (siehe dazu Abbildung 1). Hinsichtlich des Kraftwerkstyps (siehe Tabelle 8) verhält sich die Anzahl von Ausleitungskraftwerken (n=16) und Laufkraftwerken (n=16) ident. Aus den obersteirischen Bezirken wurde mehrheitlich von Laufkraftwerksbetreibern geantwortet, aus der Ost- beziehungsweise Weststeiermark hingegen zumeist von Betreibern von Ausleitungskraftwerken. Diese Verteilung erscheint nachvollziehbar, so sei hier auf die Definition von GIESECKE und MOSONYI in Kapitel 1.5.2 hingewiesen, wonach Ausleitungskraftwerke zumeist an mäandrierenden Flussläufen mit geringem Gefälle erbaut werden. Gerade diese Voraussetzungen findet man in den Bezirken Hartberg-Fürstenfeld oder Weiz am Beispiel der Lafnitz oder der Feistritz. Laufkraftwerke liegen nach EGRÉ und MILEWSKI (siehe Kapitel 1.5.3) an großen Flüssen mit geringer Fallhöhe (beispielsweise Mürz, Mur, Enns). Zusätzlich soll nicht unerwähnt bleiben, dass ein Ausleitungskraftwerk in Form eines Schwellkraftwerks betrieben wird.

Hinsichtlich der Problematik der Stauraumverfüllung lässt sich in Tabelle 9 erkennen, dass 25 (78,1%) Probanden diesbezüglich bereits Probleme hatten, an lediglich 7 Kleinwasserkraftwerken wurden seitens der Betreiber keine Komplikationen erwähnt. Jene Angaben müssen jedoch hinterfragt werden, denn es handelt sich bei diesen KWKW teils um bis zu 400 Jahre alte Bauwerke. Es darf bezweifelt werden, dass sich über einen solch langen Zeitraum keine Stauraumverfüllung ereignet hat. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass

der aktuelle Besitzer beziehungsweise Betreiber bis dato mit keinerlei Komplikationen zu kämpfen hatte.

Interessante Ergebnisse erbrachte die Frage bezüglich der Vorgehensmaßnahmen bei Stauraumverfüllungen (siehe Tabelle 10). So gaben je 21 (84%) Befragte an, dass sie bei Aufkommen dieser Problematik ihren Stauraum entweder ausbaggern lassen oder diesen ausspülen. Hierbei sei nochmals auf die Problematiken hingewiesen, welche sich durch die Stauraumspülung für den im Unterlauf liegenden Flusslauf ergeben können (siehe Kapitel 1.7.1). Da aus den vorgegebenen Antwortmöglichkeiten lediglich zwei ausgewählt wurden, soll hier kurz darauf verwiesen werden, dass in Kapitel 8 zusätzlich noch auf die beiden gängigsten Ausspülungsvarianten eingegangen wird.

Bei der nächsten Frage, wie es zum vermehrten Feststoffeintrag in einen Fluss und dadurch zu einer Stauraumverfüllung kommen kann, wurde von 22 Befragten (68,75%) die Problematik der Starkregenereignisse genannt. Mögliche trockene Böden, von denen bei Starkregenereignissen eine hohe Gefahrenquelle für eine Oberflächenerosion ausgeht, wurden jedoch von keinem Kraftwerksbetreiber als mögliche Feststoffquelle angegeben. Externe Einträge, zum Beispiel von flussnahen Ackerflächen, wurden von zwei Personen (6%) als mögliche Quelle genannt, vierzehn (43,8%) KWKW-Betreiber gaben an, dass sich durch Erosionen im Flussbett der Feststoffgehalt in Flüssen erhöhen und es somit zu einer Stauraumverfüllung kommen könnte. Neun (28,1%) hingegen sehen die Ursache bei den möglichen Erosionen an den Flussufern. Sechs Probanden (18,8%) beantworteten die Frage nicht (siehe Tabelle 11).

Blickt man auf Tabelle 12, so erkennt man, dass sich an achtzehn (56,2%) Kleinwasserkraftwerken bereits Probleme durch meteorologische Extremereignisse ergaben, an vierzehn kam es zu keinerlei Komplikationen. Tabelle 13 listet die sich aus den Extremereignissen ergebenden Konsequenzen auf. Darin lässt sich feststellen, dass die Mehrheit von vierzehn Kraftwerksbetreibern (77,8%) mit Verklausungen an den Rechenanlagen (zum Beispiel durch Stürme hervorgerufenem Windwurf) konfrontiert war, an neun (50%) KWKW gab es abrupte Stauraumverluste, an einem Kraftwerk (5,6%) traten Schäden an den Turbinen auf, zwölf Kleinwasserkraftwerksbetreiber (66,7%) mussten gegen die Problematik des geringen Wassereinzuges ankämpfen (Trockenperioden). Außerdem wurden einzelne Komplikationen gemeldet, welche sich durch die Vereisung der Anlage durch Sulzeis ergaben. Ein weiteres Problem ist der durch die Extremereignisse hervorgerufene höhere Betreuungsaufwand des Kraftwerks. Zudem gab es in letzter Zeit auch ab und zu Probleme, welche zu einer Außerbetriebnahme des Kraftwerks führten: So wurden Wassermängel oder zu hoher Sedimenttrans-

port als Beispiele genannt, was dazu führte, dass deutlich geringere Stromerträge erzielt werden konnten.

Tabelle 14 zeigt die Anzahl der Antworten für jene Frage auf, wodurch sich der Feststoffgehalt eines Flusses in Zukunft wandeln könnte. 22 Befragte (68,8%) gaben an, dass sich ihrer Meinung nach durch Änderungen im Einzugsgebiet, sei es beispielsweise durch Abholzung oder Nutzungsänderung, der Feststoffgehalt eines Flusses ändern könnte. Vierzehn Kleinwasserkraftwerksbetreiber (43,8%) sehen im Klimawandel den Grund, welcher negative Konsequenzen nach sich ziehen könnte. Zehn Befragte (31,3%) führen mögliche Veränderungen des Feststoffgehaltes eines Flusses auf den Bau von neuen Wasserkraftwerken im Flussoberlauf zurück. Acht weitere Personen (25%) gaben beispielsweise an, dass auch durch andersartige Spülkonzepte bei bereits bestehenden Kleinwasserkraftwerken, zum Beispiel durch häufigeres Stauraumspülen bei Abflüssen unter HQ1 und durch die Erhöhung der Restwassermenge durch Vorgaben des nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans geänderte Bedingungen im Feststoffgehalt von Flüssen erwartet werden können. Sieben Befragte (21,9%) wollten oder konnten sich zu dieser Thematik nicht äußern.

Wie aus Tabelle 15 abgelesen werden kann, haben sich bereits neunzehn Kleinwasserkraftwerksbetreiber Gedanken darüber (56,3%) gemacht, ob sich hinsichtlich des Klimawandels durch erhöhte Niederschlagssummen und einen dadurch erhöhten Feststofftransport Probleme für das eigene Kraftwerk ergeben könnten. Dreizehn Betreiber haben diesbezüglich noch keine Überlegungen angestellt. Welche Problematiken sich für die KWKW aus Sicht der Kraftwerksbetreiber ergeben könnten, ist in Tabelle 16 ersichtlich. Fünfzehn Probanden (83,3%) sehen einen eventuell erhöhten Betreuungsaufwand des Kleinwasserkraftwerks als größtmögliches Problem. Am zweithäufigsten wird die eventuelle Gefahr von Stauraumverfüllungen genannt (n=14 – 77,8%), dreizehnmal (72,2%) wurde die Antwortmöglichkeit der potentiellen Schäden an Rechenanlagen angekreuzt. Für zwölf Befragte (66,7%) wäre es auch denkbar, das bestehende Kleinwasserkraftwerk auf Grund des Klimawandels baulich anzupassen, sei es durch Erhöhung der Wehranlagen oder Erneuerung der Rechenanlagen. Elf KWKW-Betreiber (61,1%) sind zudem der Meinung, dass es durch zu erwartende Problematiken, welche ihren Auslöser im Klimawandel finden, zu einer Außerbetriebnahme des Kleinwasserkraftwerks kommen könnte. Ferner gaben einzelne Betreiber an, dass sie die Gefahr einer niedrigeren Jahresstromerzeugung sehen, auch werden höhere Betriebskosten genannt. Zudem werden eventuelle Adaptierungen des Geschiebemanagements oder Anpassungen der Restwassermenge an die tatsächlichen Niederschläge als mögliche Problematiken genannt.

6.3 Präsentation der Umfrageresultate – vertiefender Teil

Nachdem Kapitel 6.2 einen allgemeinen Überblick über die Umfrageresultate geboten hat, soll nun in diesem Kapitel auf spezielle, für den Verfasser dieser Arbeit relevante, Fragestellungen eingegangen werden. Hierauf erfolgen die Auswertung und die Präsentation der Ergebnisse.

- a) *Die erste Fragestellung umfasst die Analyse aus den Antworten jener Kleinwasserkraftwerksbetreiber, welche bereits mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen hatten.*

Seitens des Autors wird untersucht,

- um wie viele Kraftwerke/Betreiber es sich handelt,
- in welchen Bezirken diese Kraftwerke liegen,
- wie alt diese sind,
- um welchen Typus es sich handelt,
- wie gegen die Problematik der Stauraumverfüllung vorgegangen wird,
- worin die Probanden die Ursache eines erhöhten Feststoffeintrags sehen, welcher in der Folge zu einer Stauraumverfüllung führen könnte,
- ob sich die Betreiber, die bereits mit Stauraumverfüllungen konfrontiert waren, bereits Gedanken gemacht haben, ob es durch den Klimawandel negative Auswirkungen auf ihr Kraftwerk geben könnte und wenn ja, welche dies sein könnten.

Wie bereits im vorherigen Kapitel näher erläutert wurde, hatten 25 Befragte bereits Probleme mit einer Stauraumverfüllung an ihrem Kraftwerk. Achtzehn, dies bedeutet 72%, der betroffenen KWKW liegen in den obersteirischen Bezirken, wobei hier die höchste Anzahl ($n=5$) im Bezirk Murtal zu finden ist. In Bruck-Mürzzuschlag, Liezen und Murau existieren je vier sowie im Bezirk Leoben ein Kleinkraftwerk, an welchem es bereits Schwierigkeiten mit Verfüllungen der Reservoirs gegeben hat. Vergleicht man nun die Anzahl der bereits von Stauraumverfüllungen betroffenen Kleinwasserkraftwerke in der Obersteiermark mit der Gesamtzahl der Kleinwasserkraftwerke (Anzahl der retournierten Fragebögen $n=20$) aus dieser Region, zeigt sich, dass bereits 90% der Kraftwerksbetreiber in der Obersteiermark mit einer Stauraumverfüllung zu kämpfen hatten.

Die restlichen sieben Kleinwasserkraftwerke verteilen sich auf die beiden Bezirke Hartberg-Fürstenfeld ($n=3$ – 60% der Gesamtzahl) und Weiz ($n=4$ – 80% der Gesamtzahl), dies bedeutet, dass von den zwölf Kleinwasserkraftwerken, die in den übrigen Regionen der Stei-

ermark angesiedelt sind, sich ca. 58% der Kraftwerksbetreiber bereits mit der Problematik der Stauraumverfüllung auseinandersetzen mussten.

Vergleicht man nun die beiden Prozentwerte der Region Obersteiermark (90%) und der Regionen Ost- sowie Weststeiermark (58,3%), lässt sich erkennen, dass in den obersteirischen Bezirken bereits jetzt die Stauraumverlandung ein größeres Problem darstellt, als dies in den nicht alpin geprägten Bezirken beziehungsweise Regionen der Steiermark der Fall ist. Diese Tatsache kommt keineswegs überraschend, sie ist vielmehr logisch zu erklären: Einerseits findet man in der Obersteiermark zumeist Gebirgsflüsse oder Wildbäche, welche ein größeres Gefälle vorweisen, als dies bei Flüssen im Flachland der Fall ist, was somit zu einer erhöhten Abflussgeschwindigkeit führt und als Folge in einer erhöhten Erosion im Bachbett oder einer Seitenerosion gipfelt. DEDKOV und MOSZHERIN (1992: 32) beispielsweise verweisen darauf, dass: „ [...] *erosion in mountain areas is 27 times greater than in lowland areas.*“ Andererseits liegt ein Grund für einen höheren Sedimentgehalt in Gebirgsflüssen darin, dass in den hochgelegenen Quellgebieten dieser Gebirgsflüsse der Erosionsschutz durch Vegetation selten gegeben ist und dadurch gerade in der Zeit der Schneeschmelze eine starke Abtragung stattfinden kann. LENZI und MARCHI (2000: 271) erklären dazu, dass durch die Schneeschmelze im Speziellen der Schwebstoffanteil eines Flusses erhöht wird. LENZI und MARCHI (2000: 272) sagen außerdem, dass in den Monaten der Schneeschmelze die Erosionsprozesse in erster Linie durch Oberflächenabflüsse lockeres beziehungsweise feinkörniges Sediment ablösen und so in die Flussläufe einbringen. Überdies stellen die beiden Autoren (2000: 271) fest, dass in Jahren, in denen früher Schneefall einsetzt, eine durchgehende Schneedecke in den Wintermonaten vorhanden ist und zudem noch eine langsame graduelle Schneeschmelze stattfindet, der Schwebstoffanteil in Flüssen in den Frühjahrsmonaten gering ist. Umgekehrt wiederum kommt es zu einem überproportional hohen Schwebstoffvorkommen in jenen Frühjahrsmonaten, welche milden Wintern folgen, in denen der Schneefall erst spät einsetzt und die Böden nicht permanent mit einer Schneedecke bedeckt sind. Durch diesen Zustand entstehen häufig Frostsprengungen, welche anschließend ihren Teil dazu beitragen, dass vermehrt Feststoffe für einen Transport zur Verfügung gestellt werden. Diese eben beschriebenen Vorgänge spielen in der Steiermark zwar eine untergeordnete Rolle, da der Großteil des transportierten Sediments durch Muren und Rutschungen zustande kommt. Dennoch sei die Darstellung von LENZI und MARCHI (2000: 271) hier erwähnt, da diese im Zuge der Klimaerwärmung in der Steiermark an Bedeutung gewinnen könnte.

Nach der Betrachtung der räumlichen Verteilung der Kraftwerke mit bereits offensichtlicher Stauraumverfüllung soll nun auf die betroffenen Anlagentypen eingegangen werden.

Hier ergibt sich nach Auswertung der Fragebögen folgendes Bild: Von den 25 Kleinwasserkraftwerken, die bereits mit Stauraumverlandungen konfrontiert waren, sind elf der Kategorie des Ausleitungskraftwerks zuzuordnen, was einem Anteil von 44% entspricht. Die restlichen vierzehn Kraftwerke, sprich 56%, sind vom Typus Laufkraftwerk. Von diesen vierzehn Laufkraftwerken findet man wiederum elf in den obersteirischen Bezirken, auch sieben der elf Ausleitungskraftwerke liegen in dieser Region.

Wie bereits in Kapitel 1.7 erläutert, stellt die Stauraumverfüllung zumeist ein Problem bei Speicherkraftwerken dar, doch ergab die Fragebogenanalyse erwartungsgemäß, dass diese auch bei Laufkraftwerken beziehungsweise Ausleitungskraftwerken eine Schwierigkeit darstellen kann. Der Grund dafür liegt darin, dass auch bei Lauf- beziehungsweise Ausleitungskraftwerken der Fluss durch ein Wehr aufgestaut werden muss und sich somit ein Staubereich bildet, der durch den Eintrag von Feststoffen verfüllt wird.

Interessante Ergebnisse liefern auch die Informationen hinsichtlich des Alters der betroffenen Kleinwasserkraftwerke. So hatten beispielsweise sechs Kleinwasserkraftwerke, welche in den letzten zehn Jahren erbaut wurden, Probleme mit Stauraumverlandungen, fünf dieser KWKW sind dem Typus „Laufkraftwerk“ zuzuordnen. Dass diese Antwort von vielen Betreibern relativ neu erbauter Kleinwasserkraftwerke stammt, lässt darauf schließen, dass sich in diesem Zeitraum entweder große Sedimenteinträge in den jeweiligen Einzugsgebieten ereigneten oder man gewisse Planungsnotwendigkeiten noch nicht berücksichtigte. 20 der betroffenen 25 Kleinwasserkraftwerke wurden erst in den letzten 40 Jahren erbaut.

Noch deutlicher zeigen sich die Ergebnisse, wenn man die in den letzten 30 Jahren erbauten KWKW ansieht. Hierbei kann erkannt werden, dass von den betroffenen Kraftwerken (n=17) sich alle in den obersteirischen Bezirken befinden. Hier sei nochmals auf die zuvor besprochenen Unterschiede zwischen Gebirgsflüssen und Flüssen im Flachland hingewiesen. Die restlichen acht Kraftwerke, die bereits mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen hatten, weisen ein Alter zwischen 30 und über 100 Jahren auf und liegen mit Ausnahme eines einzigen Kraftwerks allesamt in den Bezirken der Region Oststeiermark (Weiz n=4; Hartberg-Fürstenfeld n=3). Die vom Autor dieser Masterarbeit zuvor getätigte Aussage, dass die in der Obersteiermark gelegenen Kraftwerke vermehrt mit Stauraumverfüllungen konfrontiert sind, wird durch die Tatsache des Alters der KWKW bestätigt. So sind beispielsweise die Kraftwerke in der Oststeiermark, die bereits Stauraumverfüllungen erlittenen haben, deutlich älter als jene, die davon in den obersteirischen Bezirken betroffen sind.

Betreffend Bekämpfung der Stauraumverfüllungsproblematik antworteten 92% der Befragten, dass sie gegen dieses Problem mit Ausbaggerungen vorgehen. 84% gaben an, dass sie bei

Bedarf eine Stauraumpülung durchführen, eine betroffene Person gab bezüglich der Vorgehensweise keine Auskunft.

In Bezug auf die Ursachen für Feststoffeinträge in den Fluss und die daraus möglicherweise resultierenden Stauraumverfüllungen antworteten 80% der Befragten (n=20), dass Starkregenereignisse dafür verantwortlich sind. Vier Prozent gaben an, dass ein externer Eintrag beispielsweise von Ackerflächen zu einer Erhöhung des Feststoffgehalts in Flüssen führt. 52% der Probanden vermuten eine Möglichkeit der vermehrt aufkommenden Feststoffe darin, dass dies durch Erosionen im Flussbett ausgelöst wird, 32% sehen die Ursache in den Erosionen an den Flussufern. 8% gaben keine Auskunft über die mögliche Ursache für Feststoffeinträge in die Flüsse. Die Ergebnisse geben genau jene Thematiken wieder, die seitens des Autors im Kapitel 3.1 aufgezeigt wurden, und verdeutlichen, dass sich die Kraftwerksbetreiber bewusst sind, wie Feststoffe in einen Fluss eingebracht werden.

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob sich die bereits mit Stauraumverfüllungen konfrontierten Kleinwasserkraftwerksbetreiber bis dato Gedanken gemacht haben, ob sich aufgrund des Klimawandels (weitere) Probleme für ihr Kraftwerk ergeben könnten. 64% (n=16) beantworteten diese Frage mit einem „Ja“, 36 % (n=9) mit einem „Nein“. Interessant hierbei ist, dass von den 36%, die sich noch keine Gedanken bezüglich möglicher Konsequenzen im Rahmen des Klimawandels gemacht haben, alle KWKW in den obersteirischen Bezirken liegen und knapp 56% dieser Kleinwasserkraftwerke jünger als zehn Jahre alt sind beziehungsweise 78% dem Typus des Ausleitungskraftwerks zuzuordnen sind. Alle Kleinwasserkraftwerksbetreiber, die in den oststeirischen Bezirken ihr Kraftwerk betreiben, haben sich bezüglich eventueller Folgen bereits Gedanken gemacht.

Auf die Frage, welche Probleme auf sie beziehungsweise ihr Kleinkraftwerk zukommen könnten, vermutet lediglich ein Betreiber, dass in Zukunft vermehrt mögliche Schäden an den Turbinen auftreten könnten. 81% der Befragten, dies sind dreizehn Personen, geben an, dass sie im Zuge des Klimawandels vermehrt mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen haben werden, 88% sehen mögliche Konsequenzen in einem höheren Betreuungsaufwand des Kleinwasserkraftwerks. Mit eventuell vermehrt vorkommenden Schäden an Rechenanlagen rechnen 75% der Probanden, etwa 56% befürchten gar, dass ihre Anlage häufiger oder möglicherweise ganz außer Betrieb genommen werden muss. Bauliche Anpassungen an die zukünftigen Gegebenheiten sehen 67% der Befragten als plausible Alternative. 56% der Befragten gaben zusätzlich noch Alternativantworten. So wird befürchtet, dass es zu höheren Betriebs-

kosten kommen könnte und durch rechtliche Vorgaben die Restwassermenge an die tatsächlichen Niederschlagssummen angepasst werden muss.

- b) *Die zweite vertiefende Auswertung der Fragebögen analysiert die Antworten jener Kleinwasserkraftwerksbetreiber, die sich bereits Gedanken hinsichtlich möglicher Konsequenzen, resultierend aus dem Klimawandel, gemacht haben.*

Seitens des Autors wird untersucht,

- um wie viele Kraftwerke/Betreiber es sich hierbei handelt,
- in welchen Bezirken diese Kraftwerke liegen,
- wie alt diese sind,
- um welchen Typus es sich handelt,
- ob die Problematik einer Stauraumverfüllung in der Vergangenheit bereits akut war,
- ob die Betreiber bereits Probleme durch meteorologische Extremereignisse hatten und wenn ja, welche dies waren.

So haben sich neunzehn der 32 Probanden, dies entspricht 56%, bereits Gedanken darüber gemacht, welche Probleme sich für ihr Kraftwerk im Zuge eines sich wandelnden Klimas ergeben könnten. Von je vier Probanden befindet sich das Kleinwasserkraftwerk in den Bezirken Bruck-Mürzzuschlag, Hartberg-Fürstenfeld und Weiz, je zwei Befragte betreiben ihr KWKW in den Bezirken Liezen und Murau und je ein Kraftwerk liegt in den Bezirken Leibnitz, Leoben und Murtal. Betrachtet man das jeweilige Alter des Kraftwerks, erkennt man, dass lediglich zwei Kraftwerke ein Alter zwischen 0 und 10 Jahren aufweisen (knapp 11%). Wenn man bedenkt, dass in der zuvor getätigten Untersuchung erörtert wurde, dass sechs Kraftwerke, die jünger als zehn Jahre alt sind, bereits mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen hatten, ist der hier präsentierte Anteil gering.

Bei der Betrachtung der Kraftwerkstypen zeigt sich, dass sich zwölf Betreiber von Ausleitungskraftwerken und sieben von Laufkraftwerken bereits Gedanken hinsichtlich möglicher Konsequenzen, welche sich unter dem Aspekt des Klimawandels ergeben könnten, gemacht haben.

Von den neunzehn Probanden, die sich bereits mit möglichen Zukunftsszenarien auseinandergesetzt haben, hatten bis dato fünfzehn mit Stauraumverfüllungen zu kämpfen, vier waren jedoch mit dieser Problematik noch nicht befasst. Von diesen vier Personen erfuhren jedoch

drei Schwierigkeiten, die durch meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden. Es scheint möglich, dass diese Befragten in Zukunft vermehrt mit Extremereignissen, resultierend aus dem Klimawandel, rechnen und aus diesem Grund sich bereits Gedanken bezüglich zukünftiger Konsequenzen gemacht haben. Alles in allem hatten fünfzehn der neunzehn Probanden (79%) bereits negative Erfahrungen mit meteorologischen Extremereignissen, darunter auch Kraftwerksbetreiber, deren Kraftwerke jünger als 20 Jahre alt sind. Ausgehend von den fünfzehn Probanden, die bereits mit Auswirkungen meteorologischer Extremereignisse zu kämpfen hatten, waren elf (73%) mit Verklausungen an den Fein- oder Grobrechen konfrontiert. Acht Probanden (53%) erfuhren bereits einen abrupten Stauraumverlust, vier dieser Kraftwerke liegen in den obersteirischen Bezirken, die restlichen vier im Bezirk Weiz. Die Stauraumverluste an den obersteirischen Kraftwerken lassen sich möglicherweise durch aufgetretene Murenabgänge erklären, jene in Weiz könnten eventuell durch Rutschungsvorgänge ausgelöst worden sein.

Interessanterweise musste lediglich eine der betroffenen Personen Schäden an den Kraftwerksturbinen hinnehmen, dafür hatten zehn Betreiber (66,7%) mit geringen Wassereinzügen, resultierend aus Trockenperioden, zu kämpfen. 73% der Probanden (n=11) machten zudem zusätzlich Angaben, so konnten beispielsweise Betreiber ihre Anlage über einen längeren, nicht genau definierten, Zeitraum lediglich im Minimalleistungsbereich betreiben oder mussten die Anlage gar über einen Zeitraum von vier Wochen stilllegen. Wiederum andere Betreiber mussten sich mit Verklausungen an den Wehranlagen auseinandersetzen, andere erlitten durch Sulzeis Vereisungen an der Anlage.

Resümierend sollen nach Auswertung der Fragebögen die wichtigsten Ergebnisse festgehalten werden. So divergieren in der Steiermark die verschiedenen Typen von Kleinwasserkraftwerken nach geografischen Gegebenheiten, beispielsweise findet man in der Obersteiermark zumeist Laufkraftwerke vor, südlich der Mur-Mürz-Furche wurden, gerade an kleineren Flüssen, Ausleitungskraftwerke gebaut. Deutlich zeigte sich zudem, dass durch die Umfrage bestätigt werden kann, dass in den letzten dreißig Jahren vermehrt Kleinwasserkraftwerke erbaut wurden, so gaben 69% der Probanden an, dass ihr KWKW zwischen 0–30 Jahre alt ist. Überdies wurde verdeutlicht, dass an den steirischen Kleinwasserkraftwerken die Problematik der Stauraumverfüllung akut ist, knapp 78% der Befragten hatten bereits damit zu kämpfen, zumeist findet man die betroffenen Kraftwerke in den obersteirischen Bezirken. Interessante Ergebnisse erbrachten die Befragungen der Vorgehensweise mit vorkommenden Stauraumverfüllungen, so wurden mit dem Verfahren der Stauraumverfüllungen und der Ausbaggerung lediglich zwei Varianten aufgezählt.

Lediglich etwa 59% der Befragten haben sich bis dato Gedanken dazu gemacht, ob möglicherweise erhöhte Niederschlagssummen und ein dadurch erhöhter Abfluss beziehungsweise Feststofftransport bis 2050 negative Konsequenzen auf bestehende Kleinwasserkraftwerke haben könnten. Von diesen 59% vermutet der überwiegende Teil, dass mit einem erhöhten Betreuungsaufwand zu rechnen sein wird, etwa 74% befürchten zudem eine mögliche erhöhte Gefahr von Stauraumverfüllungen.

7 Mögliche Entwicklung der Abflüsse und Feststoffgehalte in steirischen Flüssen im Rahmen des Klimawandels bis 2050

In den Kapiteln 4.2 und 4.3 wurde durch den Vergleich der Perioden 1981–1995 und 1996–2010 aufgezeigt, wie sich der Abfluss in den einzelnen Jahreszeiten an achtzehn Messstationen in der Steiermark entwickelt hat.

In den folgenden Kapiteln soll nun mit Hilfe der von GOBIET et al. (2012) erstellten Klimaszenarien für die Steiermark eine Prognose versucht werden, welche Änderungen sich bezüglich des Abflusses in den unterschiedlichen Jahreszeiten zukünftig – nämlich bis 2050 ergeben könnten.

Die in der Folge (Kapitel 7.3 bis Kapitel 7.7) getätigten, auf den Ergebnissen des Modells von WIGLEY und JONES (1985) beruhenden Prognosen, dürfen, obwohl die beiden Autoren die Meinung vertreten, dass dieses Programm für Berechnungen an allen Flüssen herangezogen werden kann, deren Abflussverhältnisse bekannt sind (vgl. WIGLEY und JONES 1985: 152), nicht als unumstößlich angenommen werden. Sie zeigen vielmehr mögliche Entwicklungen auf, denen die Abflüsse und einhergehend der Feststoffgehalt ausgewählter steirischer Flüsse bis ins Jahr 2050 sowohl über ein ganzes Jahr betrachtet, wie auch in den einzelnen Jahreszeiten, unterworfen sein könnten.

7.1 Methodik

Um diese Prognose durchführen zu können, wurde vom Verfasser dieser Arbeit ein Modell verwendet, welches von WIGLEY und JONES (1985) zur Berechnung der Auswirkungen von Niederschlägen auf den Abfluss erstellt wurde. DINGMAN (2002: 82), welcher die Meinung vertritt, dass dieses Modell zwar relativ simpel ist, aber in seinen Ergebnissen komplexen Modellen um nichts nachsteht (vgl. DINGMAN 2002: 80), nahm sich dieses Modells, welches von der Wasserhaushaltsgleichung $R = P_1 - E_t$ (siehe Abkürzungsverzeichnis) ausgeht, an und stellt dieses in Form einer CD zur Verfügung.

Das Modell berechnet im ersten Schritt die lokalen Werte der Evapotranspiration (E_0), indem es den Wert des Gebietsabflusses von jenem des Niederschlags abzieht, zudem wird das Abflussverhältnis (w) kalkuliert, indem der Gebietsabfluss durch den Niederschlag dividiert wird. Anschließend errechnet man durch die Angabe der prozentuellen Erhöhung jeweils die zukünftige Niederschlagssumme sowie die zu erwartende Evapotranspiration, wobei hier darauf geachtet werden muss, dass ein gleichbleibender Wert mit der Zahl 1 angegeben wird. Eine beispielsweise achtprozentige Erhöhung fließt mit 1,08 in die Berechnung ein, eine zehnprozentige Abnahme mit der Zahl 0,9. Damit errechnet das Modell durch die Subtraktion der zukünftigen Evapotranspiration von der zukünftigen Niederschlagssumme den möglichen künftigen Gebietsabfluss und durch die Division des zu erwartenden Gebietsabflusses durch die zukünftige Niederschlagssumme das mögliche Abflussverhältnis. Abschließend wirft das Programm dem Benutzer den prozentuellen Wert aus, um den sich der Abfluss bis zum Endpunkt der hier getätigten Prognose (2050) entwickeln könnte, indem der künftige Gebietsabfluss durch den gegenwärtigen dividiert wird.

Untenstehende Formel, die von DINGMAN (2002: 82) präsentiert wird, bietet einen Überblick über den Berechnungsvorgang, mit dem das Programm arbeitet, und der zur Hand genommen werden kann, sollte das Programm nicht zur Verfügung stehen:

$$q = \frac{p - e * (1 - w)}{w}$$

q stellt in diesem Fall die zukünftig zu erwartende prozentuelle Veränderung des Abflusses dar, p die prozentuelle Änderung des Niederschlags (ergibt sich aus der Division der zukünftigen Niederschlagssumme durch die gegenwärtige), e die prozentuelle Änderung der Evapotranspiration (1 gleichbleibend, bei Veränderungen selber Vorgang wie im vorherigen Absatz erläutert) und w das Abflussverhältnis.

7.2 Datengrundlage

Um die zukünftige Entwicklung der Abflüsse errechnen zu können, benötigt das Modell neben den aktuellen Niederschlags- auch die Gebietsabflussdaten (mm/Jahreszeit), die zuvor noch aus den vorliegenden Abflussdaten, welche in m^3/sec -Werten angegeben werden, berechnet werden mussten. Dies geschah in folgenden Schritten:

Zuerst wurde aus den vorliegenden Jahreszeitenmittelwerten, in m^3/sec -Werten vorliegend, die $\text{m}^3/\text{Jahreszeit}$ ausgerechnet, dies bedeutet, dass der vorhandene Durchflusswert mit der Sekundenanzahl der jeweiligen Jahreszeit multipliziert wurde. Anschließend wurden für die

jeweiligen Messstationen die Einzugsgebietsdaten in km² recherchiert, welche im folgenden Schritt in m² umgerechnet wurden. Nachfolgend musste der gewonnene m³/Jahreszeitwert durch den eben erhaltenen m²-Wert des Einzugsgebietes dividiert werden, was somit den Gebietsabfluss in m erbrachte. Um nun im letzten Schritt auf den benötigten Gebietsabfluss in mm zu kommen, musste der Gebietsabfluss in m lediglich mal 1000 multipliziert werden. Die anschließenden Berechnungsschritte des Gebietsniederschlags für die Wintermonate am Beispiel des Donnersbachs sollen das eben Erklärte verdeutlichen.

1. Schritt: $1,28 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot 7776000 \text{ sec} = 9953280 \text{ m}^3/\text{jz}$
2. Schritt: $194,3 \text{ km}^2 \cdot 1000000 = 194300000 \text{ m}^2$
3. Schritt: $9953280 \text{ m}^3/\text{jz} : 194300000 \text{ m}^2 = 0,051 \text{ m}$
4. Schritt: $0,05\text{m} \cdot 1000 = 51 \text{ mm}$

Hinsichtlich der aktuellen Niederschlagsdaten wurde der Mittelwert der Niederschlagssummen der Periode 1981–2010 der jeweiligen Messstation für die jeweilige Jahreszeit sowie über das gesamte Jahr verwendet.

Anschließend wird in das Programm eingegeben, wie sich der Niederschlag prozentuell in Zukunft entwickeln wird, wobei hier auf die auf Bezirksebene erstellten Prognosen von GOBIET et al. (2012: 31ff) zurückgegriffen wird. Diese basieren zwar auf der Vergleichsperiode 1971–2000, doch wurden seitens des Autors hinsichtlich der Niederschlagsmittelwerte von 1971–2000 und 1981–2000 keine gravierenden Unterschiede entdeckt, worauf diese prozentuellen Vorhersagen übernommen wurden. Die Angabe bezüglich der prozentuellen Entwicklung wird ebenso bei der zukünftigen Entwicklung der Evapotranspiration durchgeführt. Hierbei stellt sich jedoch das Problem, dass es bezüglich einer möglichen Änderung der Evapotranspiration unterschiedliche Szenarien gibt. So zeigen beispielsweise PETERSON et al. (1995: 687), dass die E_t in den USA über 50 Jahre kontinuierlich abgenommen hat. GABRECHT et al. (2004: 360) wiederum erforschten, dass bei einem Anstieg der jährlichen Niederschlagssumme von 12% die Evapotranspiration um 5% zugenommen hat. CALANCA et al. (2006: 76) berechneten mögliche Szenarien, wie sich die Evapotranspiration in den Sommermonaten in den Alpen bis 2100 entwickeln könnte, und bekamen je nach verwendetem Modell unterschiedliche Ergebnisse. So erbrachte beispielsweise ein Modell einen Anstieg von E_t über den gesamten Alpenraum in den Sommermonaten, ein weiteres Modell jedoch kalkulierte einen Anstieg in den südlichen Alpen, aber einen Rückgang der Evapotranspiration in den Inneralpen und in den nördlichen voralpinen Regionen. BOÉ und TERRAY (2008: 2)

erkundeten ebenso die mögliche Entwicklung der Evapotranspiration für die Sommermonate bis ins Jahr 2099 und präsentierten in ihrem Bericht, dass sich die mittlere Sommer-Evapotranspiration bis in die Periode 2079–2099 entgegen jener von 1961–1990 um etwa 0,1 – 0,2 mm erhöhen wird. WALTER et al. (2004: 407) hingegen halten fest, dass es über einen Untersuchungszeitraum von 50 Jahren zu einem Anstieg der Evapotranspiration gekommen ist, sie weisen jedoch auch darauf hin (vgl. WALTER et al. 2004: 406), dass dieser Anstieg äußerst marginal ausfällt (55mm über 50 Jahre). Nachdem sich somit nach der Durchsicht diverser fachliterarischer Berichte kein eindeutiges Bild hinsichtlich einer möglichen Entwicklung der Evapotranspiration bietet oder die gewonnenen Ergebnisse lediglich eine leichte Erhöhung erbrachten, wird für die folgenden Berechnungen von einer gleichbleibenden Evapotranspiration in allen Jahreszeiten für das mittlere Szenario bis ins Jahr 2050 ausgegangen. Für die Prognosen, die mit den möglichen Maximalwerten von GOBIET et al. (2012: 31ff) berechnet wurden, wurde jedoch immer von einer Erhöhung der Evapotranspiration von 5% ausgegangen.

Um aufzeigen zu können, wie sich der Schwebstoffgehalt der steirischen Flüsse entwickeln könnte, wurden als Basis die in Kapitel 5.3 aufgezeigte statistische Analyse zwischen dem Abflussaufkommen und dem Feststoffgehalt verwendet, welche einen sehr hohen Korrelationswert aufweist und somit auf einen starken Zusammenhang zwischen dem Abfluss und den im Fluss enthaltenen Feststoffen schließen lässt. Obwohl diese Werte eine starke Korrelation der beiden Variablen erklären und dieser Zusammenhang in den folgenden Kapiteln als zwingend angesehen wird, muss hier dennoch darauf hingewiesen werden, dass, ob der erst seit einem relativ kurzen Zeitraum durchgehenden Messung der Schwebstoffe, Unsicherheiten hinsichtlich des Einflusses des Abflusses auf den Schwebstoffgehalt bestehen.

Für die Kalkulationen der zukünftigen Abflüsse wurden fünf Flüsse ausgewählt, die Einzugsgebiete zwischen 129,5 km² (Schwarzaubach) und 422 km² (Pölsfluss) aufweisen. Durch die Auswahl dieser fünf relativ kleinen Einzugsgebiete, die in Abbildung 17 präsentiert werden, erhofft sich der Autor dieser Masterarbeit repräsentative Aussagen über die möglichen Entwicklungen der Abflüsse, da in diesen Gebieten mit geringen Beeinflussungen zu rechnen ist. Zudem wurden die Prognosen mit zwei Szenarien gerechnet, eine davon orientiert sich an der mittleren Zunahme der Niederschläge, die zweite an der maximalen (vgl. GOBIET et al. 2012: 31ff). Die jeweiligen Ergebnisse sollen in den folgenden Kapiteln kontrastiv gegenübergestellt werden.

In Tabelle 17 können die für die Modellierung benötigten Daten, die für die Berechnungen der Abflussentwicklung für das gesamte Jahr Verwendung fanden, abgelesen werden.

Tabelle 17: Zur Abflussmodellierung benötigte Daten; Quelle: eigene Erhebung und GOBIET et al. (2012)

Fluss	EZ-Gebiet in km ² ⁽¹⁾	Mittlere jährliche Nieder- schlags- summe in mm in der Periode 1981–2010 ⁽²⁾	Mittlerer jährlicher Gebiets- abfluss in mm in der Periode 1981–2010 ⁽²⁾	Mittlere jährliche Evapo- transpirati- on in mm in der Periode 1981–2010 ⁽³⁾	Mittlere Nieder- schlags- zunahme in % nach Gobiet et al. (2012) bis 2050 ⁽⁴⁾	Extreme Nieder- schlags- zunahme in % nach Gobiet et al. (2012) bis 2050 ⁽⁴⁾
Donnersbach	194,3	1117,3	412	705,3	5	11
Ilzbach	190,1	766,2	159,3	606,9	6	17
Pölsfluss	422,1	911	638	273	5	13
Schwarzaubach	129,5	897,3	236,4	660,9	4	16
Vordernberger- Bach	167,3	801	602	199	5	10

(1) erhobene Werte – (2) vom Autor berechnete Werte – (3) vom Modellierungsprogramm berechnete Werte – (4) von GOBIET et al. (2012) gegebene Werte

Verortung der für die Modellierungen benutzten Einzugsgebiete in der Steiermark

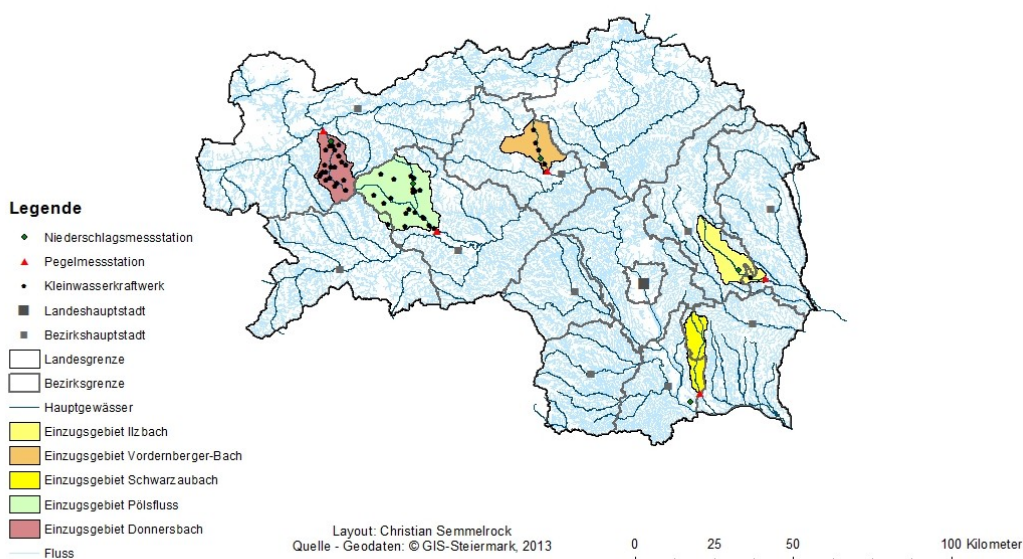


Abbildung 17: Verortung der für die Modellierungen benutzten Einzugsgebiete in der Steiermark; eigene Darstellung

7.3 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts über das gesamte Jahr bis 2050

Zunächst sollen die möglichen Entwicklungen des Abflusses und des Schwebstoffgehalts über das gesamte Jahr bezogen auf das Prognosejahr 2050 aufgezeigt werden. Betrachtet man im ersten Schritt die Mittelszenarien bezüglich der Entwicklung der Niederschläge bis 2050 auf jährlicher Basis von GOBIET et al. (2012: 31ff), so liegen diese Werte für die Bezirke, in denen sich die fünf untersuchten Flüsse befinden, zwischen einer Zunahme von 3,7% und 5,7%, was wiederum zu unterschiedlichen Abflussentwicklungen führt. So dürfte sich beispielsweise der Gebietsabfluss des Schwarzaubachs im Bezirk Leibnitz bei einem Anstieg des Niederschlags von 3,7% um 14% bis 2050 erhöhen. Rechnet man den daraus resultierenden Wert in m^3/sec um, so könnte sich der mittlere Jahresabfluss 1981–2010 von $0,97 \text{ m}^3/\text{sec}$ im Mittel auf $1,1 \text{ m}^3/\text{sec}$ erhöhen. Einhergehend dürfte sich bis ins Jahr 2050 mit der eventuellen Erhöhung des Abflusses auch der Schwebstoffgehalt des Flusses vergrößern. Sieht man sich zudem die etwaigen Entwicklungen der Abflüsse der restlichen untersuchten Flüsse an, so fällt auf, dass an allen Flüssen über das gesamte Jahr der Abfluss zwischen 7% (Vordernberger-Bach) und 29% (Ilzbach) zunehmen dürfte. Sollte die Prognose des Ilzbachs tatsächlich eintreffen, so wird auf die Kraftwerksbetreiber an diesem Fluss neben einem steigenden Abfluss auch ein deutlich erhöhter Schwebstoffgehalt des Flusses zukommen.

Blickt man im nächsten Schritt auf die möglichen Maximalszenarien, so wurde für die Bezirke, von welchen die untersuchten Flüsse durchflossen werden, von GOBIET et al. (2012: 31ff) eine Zunahme der Niederschlagssumme zwischen 10,3% und 16,7% über das gesamte Jahr bis 2050 errechnet. Hier wird stellvertretend für die restlichen untersuchten Flüsse genauer auf den Pölsfluss (Bezirk Murtal) eingegangen.

Mit dem Prozentsatz der maximalen Zunahme des Niederschlags könnte sich der Abfluss des Pölsflusses bis ins Jahr 2050 bei einem Anstieg der Niederschlagssumme um etwa 13% (vgl. GOBIET et al. 2012: 86) um 16% erhöhen. Umgerechnet auf m^3/sec -Werte bedeutet dies, dass sich der mittlere jährliche Abfluss von $8,54 \text{ m}^3/\text{sec}$ der Periode 1981–2010 auf etwa $9,9 \text{ m}^3/\text{sec}$ erhöhen könnte, was wiederum einhergehend auch zu einem vermehrten Vorkommen von Schwebstoffen im Pölsfluss führen wird. Sieht man sich zusätzlich noch die möglichen Entwicklungen der restlichen untersuchten Flüsse unter den Maximalszenarien an, so dürfte der Anstieg des jährlichen mittleren Abflusses zwischen einer Zunahme von 12% (Vordernberger-Bach) und 63% (Ilzbach) liegen, was somit beruhend auf die in Kapitel 5.3 getätigte Regressionsanalyse gleichzeitig wieder einen Anstieg der Schwebstoffteile in den Flüssen bedeutet.

7.4 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Winter bis 2050

Nach der Betrachtung der ganzjährigen Änderungen des Niederschlags und des Schwebstoffgehalts soll in den folgenden Kapiteln auf die unterschiedlichen Veränderungen in den einzelnen Jahreszeiten eingegangen werden.

GOBIET et al. (2012: 31ff) zeigen für die in der Abflussprognose im Fokus stehenden Bezirke in der Steiermark im Mittel einen Anstieg der Niederschläge im Winter zwischen 4,6% (Leibnitz) und 10,4% (Hartberg-Fürstenfeld).

Hinsichtlich der Entwicklung der Temperatur ergeben sich für die Regionen Anstiege zwischen 1,5°C und 1,6°C, die Abnahme der Schneetage beträgt in den nördlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Bezirken 16,7 Tage, in den südlichen Regionen lediglich knapp 5 Tage. Nimmt man nun jene Daten als Basis, kann angenommen werden, dass sich durch die erhöhte Temperatur im Winter die Niederschläge vermehrt von festem hin zu feuchtem Niederschlag verändern und somit weniger Speicherung in Form von Schnee stattfindet.

Nach SCHÖNER et al. (2011: 1–7) könnte sich der Abfluss im Winter gar um 20% bis 2050 erhöhen, WAGNER et al. (2012: 7) – die ihre Klimadaten aus neunzehn regionalen Klimamodellszenarien von Giorgi und Mearns aus den Jahren 1991 und 1999 aus dem ENSEMBLES Projekt entnahmen und deren Berechnungen auf dem GR2M-Modell von Mouelhi et al. 2006 basieren und zusätzlich um ein Schneemodell von Xu et al. 1996 ergänzt wurden – weisen darauf hin, dass die Stromerzeugung aus den Wasserkraftwerken in den Wintermonaten zunehmen könnte, was somit auch auf einen erhöhten Abfluss rückschließen lässt. Zudem erforschten LETTENMAIER et al. (1994: 606) die Entwicklung von Abflüssen in den USA über einen 40-jährigen Zeitraum und konnten feststellen, dass bereits in dieser Zeitspanne gravierende Anstiege in den Winterabflüssen stattgefunden haben.

In den Regionen der Ost- und Weststeiermark werden sich durch die erhöhten Niederschläge in den Wintermonaten stärkere Abflüsse ergeben. So könnte sich der Abfluss des Schwarzaubachs im Bezirk Leibnitz bei einem Anstieg der Winterniederschläge um 7% um 16% erhöhen, am Beispiel des Ilzbachs ergaben die Berechnungen gar einen möglichen Anstieg von 24%. Für die Region Obersteiermark können ebenso Änderungen des Abflusses prognostiziert werden.

Vor allem die starke Abnahme der Schneedeckentage dürfte die Abflusswerte beeinflussen, auch könnte ein Teil der vermehrt auftretenden Niederschläge durch die steigenden Temperaturen dazu führen, dass sich Niederschlagsereignisse direkt auf den Abfluss auswirken. Die eben präsentierten Vermutungen von SCHÖNER et al. (2011: 1–7) konnten mit Hilfe des

Modells von WIGLEY und JONES (1985) auch für die obersteirischen Bezirke bestätigt werden, so erbrachten beispielsweise Kalkulationen für den Donnersbach im Bezirk Liezen einen Anstieg des Winterabflusses von etwa 17% bei einer Zunahme des Niederschlags um 5%. Dieser Anstieg würde bedeuten, dass der mittlere Winterabfluss aus der Periode 1981–2010 von 1,28 m³/sec auf 1,49 m³/sec ansteigen könnte, was gleichzeitig mit einer Vermehrung der Schwebstoffe im Fluss verbunden sein wird.

Nach der Betrachtung der möglichen Abflussänderungen mit den prozentuellen Trends der Mittelszenarien nach GOBIET et al. (2012: 31ff) soll nun noch auf die eventuellen Abflussentwicklungen bis 2050 unter der Annahme der Extremszenarien – am Beispiel des Pölsflusses – eingegangen werden. Die maximale prozentuelle Erhöhung des Niederschlags im Bezirk Murtal liegt nach den Berechnungen von GOBIET et al. (2012: 86) bei 19%, was bei einer gleichzeitigen, vom Autor dieser Arbeit angenommenen Erhöhung der Evapotranspiration von 5% (angelehnt an GABRECHT et al. 2004: 360) zu einem Anstieg des Abflusses um 27% führen und einhergehend den Schwebstoffgehalt im Fluss vergrößern dürfte. Je nach Prognose der Niederschlagsentwicklung könnten sich die Winterabflüsse der restlichen untersuchten Flüsse zwischen 26% (Vordernberger-Bach) und 82% (Donnersbach) erhöhen, was somit auch eine massive Veränderung des Schwebstoffvorkommens in den Flüssen bedeutet.

7.5 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Frühjahr bis 2050

Auch in den Frühjahrsmonaten werden für jene Bezirke der Steiermark, in denen die untersuchten Flüsse liegen, bis 2050 sowohl ein Anstieg der Temperatur als auch eine Zunahme der Niederschläge erwartet. Bei den mittleren Szenarien prophezeien GOBIET et al. (2012: 31ff) in diesen Bezirken einen Anstieg zwischen 3,5% in Leibnitz und 7,6% in Liezen.

Als Beispiel soll hier der Donnersbach im Bezirk Liezen betrachtet werden, bei dem sich der Abfluss bei einem etwaigen Anstieg der Niederschlagssumme von etwa 8% um knapp 12% erhöhen dürfte – was somit den Abflussmittelwert der Frühjahrsperiode 1981–2010 von 3,85 m³/sec auf 4,3 m³/sec im Jahr 2050 ansteigen lässt. Ändern dürfte sich zudem, ob der höchstwahrscheinlich ansteigenden Temperaturen, die eine geringere Schneedecke(ndauer) zur Folge haben, gerade in den von Schneefall geprägten Gebieten der Zeitpunkt der Schneeschmelze (vgl. STEWART et al. 2005: 1136). Dies hat wiederum unmittelbare Auswirkungen auf das Abflussverhalten in den Frühjahrsmonaten. Durch die steigenden Abflüsse könnte sich überdies auch, wie bereits zuvor erläutert, der Schwebstoffgehalt erhöhen. So gilt es, wie bereits in Kapitel 6.3 erläutert, zu beachten, dass es nach einem milden Winter, in dem der

Schneefall erst spät einsetzt und die Böden nicht permanent mit einer Schneedecke bedeckt sind, zu einem überproportional hohen Schwebstoffvorkommen in den Frühjahrsmonaten kommt. Dieser Zustand führt häufig zu Frostsprengungen, welche anschließend ihren Teil dazu beitragen, dass vermehrt Feststoffe für den Transport zur Verfügung gestellt werden (vgl. LENZI und MARCHI 2000: 271). Diese Szenarien könnten in Zukunft bis 2050, nimmt man die mögliche Entwicklung der Temperatur von GOBIET et al. (2012: 31ff) als gegeben an, durchaus Realität werden.

Nach der Betrachtung der mittleren Szenarien soll nun auf die möglichen Abflussentwicklungen unter der Annahme der Maximalszenarien der Niederschlagsänderung bis 2050 von GOBIET et al. (2012: 31ff) eingegangen werden. Für den Bezirk Leibnitz, u.a. durchflossen vom Schwarzaubach, wird bis 2050 im Extremszenario für die Frühjahrsmonate ein Anstieg des Niederschlags um 16% errechnet (vgl. GOBIET et al. 2012: 62), welcher wiederum zu einem Anstieg des Abflusses von 35% führen könnte. Somit ergäbe sich ein mittlerer jahreszeitlicher Durchfluss von 1,56 m³/sec in den Frühjahrsmonaten bis 2050. Bei der Betrachtung der übrigen fünf untersuchten Flüsse ergaben sich für diese unter der Annahme der maximalen Zunahme der Niederschläge Anstiege zwischen 12% (Vordernberger-Bach) und 50% (Ilzbach), wobei die Flüsse, die nördlich der Mur-Mürz-Furche liegen, einen deutlich geringeren Anstieg der Abflüsse zu erwarten haben, als dies bei den Flüssen südlich zu vermuten ist. Daraus folgernd dürfte es damit im Fall des Schwarzaubachs und des Ilzbachs zu einem deutlichen Anstieg des Schwebstoffgehalts kommen.

7.6 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Sommer bis 2050

Während die Temperaturen in den Sommermonaten in den jeweiligen Bezirken zunehmen dürften, zeigt sich bei der möglichen Entwicklung der Niederschläge ein anderes Bild. Nach GOBIET et al. (2012: 31ff) werden diese sich im mittleren Szenario bis 2050 in den südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Bezirken etwas reduzieren. In den obersteirischen Bezirken wird jedoch ein leichter Anstieg der Niederschlagssumme prognostiziert. Geht man somit von diesen beiden Szenarien aus, kann darauf geschlossen werden, dass sich hinsichtlich des Abflusses eine unterschiedliche Entwicklung ergeben könnte. So dürften sich südlich der Mur-Mürz-Furche die Abflüsse in den Sommermonaten bis 2050 etwas verringern. Dies ergeben auch die Modellierungen, die seitens des Autors durchgeführt wurden. Am Beispiel des Schwarzaubachs wird von GOBIET et al. (2012: 62) berechnet, dass sich in der Region der

Niederschlag bis 2050 in den Sommermonaten um 1% reduzieren dürfte, dies würde somit ebenso zu einem verringerten Abfluss von etwa 6% führen. Auch am Ilzbach, der ebenfalls südlich der Mur-Mürz-Furche liegt, könnte es gemäß der Modellierungen zu einer minimalen Abnahme des Abflusses in den Sommermonaten bis 2050 kommen, folglich dürfte auch der Sedimentgehalt der Flüsse gleichbleiben oder gar etwas zurückgehen. Ähnliche Ergebnisse errechneten auch WAGNER et al. (2012: 7), die besagten, dass sich die Stromgewinnung in Teilen Österreichs in den Sommermonaten bis 2050 reduzieren könnte. Aus dieser Aussage kann einhergehend abgeleitet werden, dass sich auch der Abfluss verringern dürfte.

Anders hingegen präsentieren sich die möglichen Abflussentwicklungen der Flüsse nördlich der Mur-Mürz-Furche. Demgemäß könnte sich am Beispiel des Pölsflusses bei einem 2%igen Anstieg der Niederschlagssumme der Abfluss um 3% erhöhen, selbiges würde auch am Vordernberger-Bach der Fall sein. Somit dürfte sich auch an diesen Flüssen der Schwebstoffgehalt marginal erhöhen.

Nach der Betrachtung der mittleren prozentuellen Niederschlagsentwicklungsszenarien von GOBIET et al. (2012: 31ff) werden nun die Ergebnisse erläutert, die sich aus den Modellierungen anhand der Maximalszenarien von GOBIET et al. (2012: 31ff) ergeben haben. Stellvertretend soll hier die mögliche Abflussentwicklung des Vordernberger-Bachs genauer betrachtet werden. GOBIET et al. (2012: 68) kalkulierten für den Bezirk Leoben einen maximalen Anstieg der Sommerniederschläge von 21%, was gemäß den Berechnungen des Autors dieser Arbeit zu einer Erhöhung des Abflusses um 35% führen könnte. Diese Erhöhung würde den mittleren Abfluss der Sommermonate von 3,72 m³/sec aus der Zeitspanne 1981–2010 auf 5,02 m³/sec im Jahr 2050 ansteigen lassen. Auch hätte dies zu bedeuten, dass der Schwebstoffanteil in diesem Gewässer deutlich zunehmen würde. Anders als bei den Abflussberechnungen mit Hilfe der mittleren Entwicklungsszenarien von GOBIET et al. (2012: 31ff), könnten sich die Abflüsse der Flüsse südlich der Mur-Mürz-Furche bei der Annahme der Maximalszenarien deutlich erhöhen. Sollte sich dies bewahrheiten, könnte sich beispielsweise der Abfluss des Schwarzaubachs bei einem eventuellen Anstieg des Niederschlags von 14% um 59% vergrößern. Diese Annahme ergäbe, dass der mittlere Durchfluss von 0,91 m³/sec der Periode 1981–2010 auf 1,41 m³/sec im Jahr 2050 ansteigen könnte.

7.7 Mögliche Entwicklung des Abflusses und des Schwebstoffgehalts im Herbst bis 2050

Nach den Berechnungen von GOBIET et al. (2012: 31ff) werden sich in der gesamten Steiermark die Niederschläge sowohl im Mittelszenario als auch im extremen Szenario in den Herbstmonaten bis 2050 erhöhen. Wie sich dies auf die Abflüsse auswirken könnte, wurde seitens des Autors erneut für die fünf Untersuchungsgebiete erforscht. Als Beispiel dafür, basierend auf dem mittleren Szenario für die Niederschlagsentwicklung von GOBIET et al. (2012: 86), soll der Pölsfluss dienen. So dürfte sich gemäß GOBIET et al. (2012: 86) die Niederschlagssumme im Bezirk Murtal in den Herbstmonaten bis 2050 für das mittlere Szenario um 7% erhöhen, was somit auch zu einem Anstieg des Durchflussmittels um 11% führen würde. Belegt man dies mit absoluten Zahlen, so könnte sich der mittlere Abfluss der Vergleichsperiode 1981–2010 von 7,52 m³/sec auf 8,32 m³/sec erhöhen. Gleichzeitig könnte auch der Schwebstoffgehalt im Pölsfluss ansteigen (siehe Kapitel 5.3). Auch die restlichen Berechnungen erbrachten in den Herbstmonaten, ausgehend von den mittleren Niederschlagsszenarien von GOBIET et al. (2012: 31ff), durchwegs einen Anstieg des Durchflussmittelwertes bis 2050, wobei die Flüsse südlich der Mur-Mürz-Furche einen etwas höheren Anstieg gegenüber jenen nördlich davon aufweisen werden.

Blickt man nun abschließend noch auf die Entwicklung der Abflüsse unter den extremen Niederschlags-Entwicklungs-Szenarien von GOBIET et al. (2012: 31ff), so werden auch hier durchgehend Anstiege in den Herbstmonaten zu erwarten sein. Am Beispiel des Schwarzaubachs würde es getreu den Modellierungen bei einem Anstieg des Niederschlags von 19% (vgl. GOBIET et al. 2012: 62) und bei einer einhergehenden Erhöhung der Evapotranspiration von 5% zu einer Steigerung des Abflusses um 69% bis 2050 kommen. Dies würde bedeuten, dass der mittlere Durchfluss der Vergleichsperiode 1981–2010 von 0,86 m³/sec auf 1,46 m³/sec ansteigen würde. Somit ist auch damit zu rechnen, dass sich in allen anderen Untersuchungsgebieten neben dem Abfluss auch der Schwebstoffgehalt der Flüsse in den Herbstmonaten bis 2050 erhöhen könnte.

Diese Ergebnisse sind konträr zu jenen von WAGNER et al. (2012: 7), die in ihren Berechnungen eine Reduzierung der Stromgewinnung in den Herbstmonaten konstatieren, was somit auch erklärt, dass die Abflüsse laut dem Autorenteam abnehmen dürften.

Im Anhang werden dem Leser dieser Arbeit zusätzlich noch die gesammelten Ergebnisse der Abfluss-Modellierung (Abfluss und Niederschlag) in tabellarischer Form zur Verfügung gestellt.

7.8 Die möglichen Folgen der modellierten Abfluss- und Feststoffszenarien auf die Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark bis 2050

Wie in den vorherigen Kapiteln 7.3 bis 7.7 an Hand des Modells von WIGLEY und JONES (1985) erläutert, könnten sich die Abflüsse der steirischen Flüsse bis 2050 beinahe über das gesamte Jahr, sowohl unter der Annahme der mittleren Niederschlagsentwicklungsszenarien als auch unter den maximalen von GOBIET et al. (2012: 31ff) erhöhen. Einzige Ausnahme könnten in den Sommermonaten jene Flüsse bilden, die südlich der Mur-Mürz-Furche gelegen sind. Diese beinahe durchgehende Erhöhung der Abflüsse dürfte, beruhend auf der Korrelationsanalyse zwischen dem Abfluss und dem Schwebstoffgehalt eines Flusses, besprochen in Kapitel 5.3, auch für eine Erhöhung des Schwebstoffanteils in den steirischen Flüssen sorgen. Dies wiederum könnte negative Konsequenzen für die bestehenden steirischen Kleinwasserkraftwerke und seine Betreiber mit sich bringen. Welche Konsequenzen dies sein könnten, soll nun in den folgenden Zeilen kurz erläutert werden.

Gerade in den Wintermonaten könnten es ob der zu erwartenden höheren Abflüsse (vgl. dazu SCHÖNER et al. 2011: 1–7; WAGNER et al. 2012: 7 und seitens des Autors getätigte Modellierungen in Kapitel 7.4) und der gleichzeitig erhöhten Schwebstoffanteile in den steirischen Flüssen vermehrt zu einer Eintragung von Schwebstoffen in bestehende Stauräume kommen, was somit auch, zumindest bei kleineren Reservoirs, zu Verfüllungen dieser führen könnte. Dies würde somit neben der Möglichkeit einer Stauraumverlandung auch gleichzeitig zu einem erhöhten Betreuungsaufwand der Wasserkraftanlage führen. Zudem besteht die Gefahr, dass durch vermehrt mitgeführte Schwebstoffe auch Schäden an den Turbinen zu erwarten sein könnten.

Auch die Blockade der Auslässe könnte ein etwaiges Problem darstellen. Nachdem DINGMAN (2002: 80) überdies die Meinung vertritt, dass es in zukünftigen Wintern vermehrt zu Winterfluten kommen könnte, besteht obendrein die Gefahr, dass durch gröberes, in der Flut mitgeführtes Material Schäden an den installierten Rechenanlagen auftreten könnten. Nebenbei sei kurz erwähnt, obwohl dies nicht die Thematik dieser Masterarbeit repräsentiert, dass trotz all dieser möglichen negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Kleinwasserkraft in den Wintermonaten es zumindest aus monetärer Sicht auch zu einem positiven Nebeneffekt kommen könnte. Wie bereits zuvor erwähnt, konstatierten WAGNER et al. (2012: 7), dass durch die zu erwartenden höheren Abflüsse in den Wintermonaten die Stromproduktion ansteigen dürfte.

Wie in Kapitel 7.5 seitens des Autors dieser Arbeit ausgeführt wurde, dürften sich auch in den Frühjahrsmonaten die Abflüsse sowie der Schwebstoffanteil der Flüsse in der gesamten Steiermark bis 2050 erhöhen, was somit auch zu Problemen bei den bestehenden Kleinwasserkraftwerken führen könnte. Es ist anzunehmen, dass diese Schwierigkeiten sich ähnlich jenen in den zuvor beschriebenen Wintermonaten entwickeln werden. Mit schwerwiegenden Komplikationen ist in den nördlich der Mur-Mürz-Furche liegenden Kraftwerken zu rechnen. So erwähnte der Autor dieser Masterarbeit bereits, dass beispielsweise LENZI und MARCHI feststellten (2000: 271), dass es nach milderem Winter, in denen die Böden nicht permanent mit Schnee bedeckt sind, zu einem opulenten Schwebstoffvorkommen in den Frühjahrsmonaten kommen könnte. Der Grund dafür liegt in der vermehrt auftretenden Frostsprengung, durch die noch mehr Material zur Verfügung gestellt wird. Gerade in den Bezirken der Obersteiermark könnte es somit bis 2050 zu einem starken Anstieg des Schwebstoffanteils in Flüssen kommen, was somit zu einer erhöhten Gefahr der Stauraumverlandung führt und auch einen höheren Betreuungsaufwand mit sich bringt. Kurz soll noch Erwähnung finden, obwohl nicht Ziel dieser Arbeit, dass auch in den Frühjahrsmonaten, aufgrund der erhöhten Abflussmenge mit einer erhöhten Stromproduktion bis 2050 gerechnet werden kann (vgl. WAGNER et al. 2012: 7).

Mögliche negative Konsequenzen, die sich durch den Klimawandel in den Sommermonaten für die Kleinwasserkraft ergeben könnten, sind ob der potentiellen geringfügigen Änderungen der Abflüsse schwer abzuschätzen. In den südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Bezirken der Steiermark dürfte sich laut den in Kapitel 7.6 getätigten Modellierungen der durchschnittliche Abfluss marginal reduzieren, dies könnte gerade bei kleineren Flüssen möglicherweise zu einer extrem geringen Wasserführung führen. Dies wiederum würde bedeuten, dass sich das mitgeführte Sediment zum Beispiel bei Ausleitungskraftwerken eventuell vor den Wasserentnahmestellen absetzen und so bei einem erneuten Einsetzen diese Stellen verstopfen könnte. Zudem dürfte sich auch die Stromgenerierung etwas reduzieren, im schlimmsten Falle könnten möglicherweise Außerbetriebnahmen der Anlagen von Nöten sein. In den obersteirischen Bezirken hingegen wird gemäß den in Kapitel 7.6 getätigten Modellierungen mit einem leichten Anstieg der Abflüsse zu rechnen sein. Diese Erhöhung des Durchflusses und der einhergehende wahrscheinliche größere Schwebstoffanteil dürften ob der geringen Zunahme keinerlei Komplikationen bringen.

Anders als WAGNER et al. (2012: 7) vermuten, dürfte es in der gesamten Steiermark in den Herbstmonaten bis 2050 durch die ansteigenden Niederschlagssummen gemäß den Modellierungen des Autors dieser Arbeit (siehe Kapitel 7.7) sowohl zu einer Erhöhung des Abflusses

als auch zu einem Anstieg des Schwebstoffgehalts in Flüssen kommen. Diese Entwicklung könnte somit auch negative Konsequenzen für die Kleinwasserkraftwerke und deren Betreiber bedeuten. Es ist anzunehmen, dass dies zu einem vermehrten Eintrag von Schwebstoffen in die bestehenden Reservoirs der Kleinwasserkraftwerke und somit zu einem Voranschreiten der Verlandung dieser führen könnte. Zusätzlich resultieren daraus eventuelle Verstopfungen an den Auslässen. Beide Szenarien würden in einem erhöhten Betreuungsaufwand enden.

Die seitens des Autors in den vorherigen Zeilen aufgezeigten möglichen negativen Konsequenzen, die durch den Klimawandel auf die steirischen Kleinwasserkraftwerksbetreiber und Besitzer zukommen könnten, verdeutlichen, dass bei bestehenden Kleinwasserkraftwerken in Zukunft durchaus mit Problemen zu rechnen sein wird. Man könnte resümierend prognostizieren, dass es durch den Klimawandel vermehrt zu einem Schwebstoffeintrag in bestehende Stauräume kommen dürfte, was wiederum einen erhöhten Betreuungsaufwand für den Betrieb des Kleinwasserkraftwerkes bedeutet.

Die eben präsentierten möglichen Konsequenzen können jedoch nicht als absolut gesichert angesehen werden. Vielmehr sei hier vom Autor dieser Masterarbeit nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hier um *prognostizierte* Entwicklungen handelt.

8 Alternativen zur Bekämpfung der Stauraumverfüllung

Nachdem durch die zu erwartenden höheren Niederschlagssummen auch die Abflüsse und einhergehend der Sedimentgehalt der steirischen Flüsse bis 2050 ansteigen dürften und sich auch bei der Auswertung der Umfragen unter Kleinwasserkraftwerksbetreibern ergeben hat, dass die Problematik der Stauraumverfüllung auch an den steirischen Kleinwasserkraftwerken gegenwärtig bereits akut ist, werden auf die Kraftwerksbetreiber bis 2050, wie in Kapitel 7.8 beschrieben, vermehrt Stauraumverlandungsprobleme zukommen.

Aus der vertiefenden Analyse der Fragebögen ergab sich außerdem, dass in der Steiermark lediglich mit Hilfe der Stauraumspülung oder der Ausbaggerung der Problematik der Stauraumverfüllung entgegengewirkt wird. Es scheint, dass in diesem Bereich Nachholbedarf einerseits hinsichtlich der Nachhaltigkeit, andererseits bezüglich der Bekämpfung der Problematik vorhanden ist. PALMIERI et al. (2003: Vorwort: v) sind in ihrer Arbeit der Meinung, dass „*the objective will be to convert today's inventory of non-sustainable reservoirs into sustainable infrastructures for future generations.*“ Sie vertreten somit die Meinung, dass in

der Vergangenheit Staudämme, ohne große Überlegungen anzustellen, erbaut wurden und somit die Thematik der Nachhaltigkeit vernachlässigt wurde.

Aus diesem Grund soll abschließend auf verschiedene alternative Managementstrategien eingegangen werden, welche die Problematik der Stauraumverfüllung verringern könnten. Manche wurden im Fragebogen als Alternative angeboten. Zudem erfahren die beiden unterschiedlichen Arten der Ausspülung, die gemäß der Fragebogenauswertung eine gegenwärtige Adaptionsmöglichkeit darstellen, eine genauere Betrachtung. SUFLITA et al. (2010: 44–45) beispielsweise definieren in ihrer Arbeit über Stauraum-Management-Strategien in Utah vier große Hauptgruppen, welche sie noch in weitere Unterpunkte gliedern. Zu diesen großen Management-Gruppen zählen die Minimierung des Sedimenteintrags in das Reservoir, das Minimieren der Absetzung von Sedimenten im Stauraum, die Entfernung der Sedimente aus dem Reservoir sowie ein möglicher Ausgleich für den erlittenen Speicherverlust. Allerdings soll anfangs gleich darauf hingewiesen werden, dass Absetzungsprozesse in Stauräumen nie gänzlich verhindert werden können, es kann lediglich darauf geachtet werden, dass es zu keiner Verfüllung im extremen Ausmaß kommt.

8.1 Minimierung des Sedimenteintrags in das Reservoir

Der wohl wichtigste Bereich im Rahmen des Stauraummanagements ist die Verminderung des Sedimenteintrags in das Reservoir, welcher sich in mehrere Optionen unterteilt. Zunächst soll das Hauptaugenmerk auf das „Watershed Management“, also das Managen des Einzugsgebiets, gelegt werden. So nennen beispielsweise auch HAREGEWEYN et al. (2012: 301) das „Watershed Management“ als eine plausible Lösung, den Sedimenteintrag in ein Reservoir zu verringern. SUFLITA et al. (2010: 46) gehen noch einen Schritt weiter und meinen hierzu: „*Watershed Management is the single most important sediment management practice.*”

Wie bereits in Kapitel 3.5 erwähnt, hängt die Menge des zur Erosion gelangenden Materials auch von der Bewirtschaftung des Einzugsgebiets ab und genau an diesem Punkt setzt das „Watershed Management“ an. Es geht hier um die richtige Bewirtschaftung eines Einzugsgebiets, um dadurch die Erosionsrate zu reduzieren. Dies kann etwa durch eine Aufforstung oder eine Landnutzungsänderung im Einzugsgebiet erzielt werden. Grund dafür ist die einhergehende Verfestigung des Bodens, welcher bei einem möglichen Starkregenereignis oder einer etwaigen Überschwemmung kompakter ist als ein unbestelltes Landstück. Durch diese Kompaktheit können weniger Sedimente mitgerissen werden und somit kommt es zu einem geringeren Sedimenteintrag in den Fluss und demgemäß ebenso zu einem verringerten Eintrag in ein Reservoir. Hier gilt es jedoch laut HARTMANN (2004: 41) zu beachten, dass es je nach

Lage des Kraftwerks unterschiedliche Methoden gibt. Er stellt dar, dass „*Conservation programmes by cultivating vegetation can only be applied in lower elevation areas with moderate temperatures while in upper parts changes of slopes by forming terraces may reduce soil erosion.*“ HARTMANN (2004: 41) weist mit Hilfe dieser Feststellung nach, dass in tiefer gelegenen Regionen das Einzugsgebietsmanagement durch Bepflanzungen am besten funktioniert, dies allerdings in höheren Lagen nicht möglich ist. Aus diesem Grund schlägt der Autor vor, dass man in alpinen Regionen durch Anpassungen der Hänge, indem man beispielsweise Terrassen anlegt, die Bodenerosion deutlich reduzieren könnte. PALMIERI et al. (2003: 16) befinden in ihrer Arbeit: „*Where properly undertaken, watershed management has been effective in reducing soil erosion and therefore it is seen as an effective way of reducing sedimentation rates also.*“

Neben dem richtigen Managen des Einzugsgebiets gibt es allerdings noch weitere effektive Möglichkeiten, den Sedimenteintrag in ein Staubecken zu reduzieren. So gibt es beispielsweise die Variante, Schuttsperren oberhalb eines Reservoirs zu erbauen. MAHMOOD (1987) bringt den Vorzug dieser Managementstrategie mit seiner Erklärung auf den Punkt: „*The concept of a debris dam is to control the sediment inflow into a reservoir by damming up one or more of its main sediment contributing tributaries.*“ (MAHMOOD 1987: 82)

Eine Schuttsperre wird den Worten von MAHMOOD (1987: 82) nach dazu genutzt, um Sedimente bereits vor dem Einbringen in ein Reservoir abzufangen. Besonders grobkörniges Material soll hierbei aufgefangen werden, allerdings muss man darauf verweisen, dass bei einer Schuttsperre für diese selbst ein Managementprogramm durchgeführt werden muss. Sollte dies nämlich nicht der Fall sein, kann es dazu kommen, dass diese Sperre überfüllt ist und beispielsweise bei nachkommenden Flutereignissen mit hohem Sedimentgehalt das Sediment nicht mehr aufhalten kann und somit die Gefahr besteht, dass die gesamte Sperre mitsamt gespeichertem Material flussabwärts transportiert wird. Prinzipiell gilt, je größer die Sedimentlast, desto geringer ist die Lebensdauer einer Schuttsperre (vgl. MAHMOOD 1987: 82), wobei sich somit die Frage der Wirtschaftlichkeit stellt, denn PALMIERI et al. (2003: 9) legen dar, dass die Lebensdauer einer Schuttsperre gering und die Effektivität eingeschränkt ist.

8.2 Minimierung der Absetzung von Sedimenten im Stauraum

Als zweiter wichtiger Ansatzpunkt hinsichtlich des richtigen Managements von Sedimenten in einem Stauraum gilt die Minimierung der Absetzung von Sedimenten. Das erste nennenswerte Beispiel eines solchen Managementszenarios ist die sogenannte Sediment-Durchreiche

(Sediment Pass-Through/Sediment sluicing). Obwohl in der Literatur unterschiedliche Bezeichnungen vorzufinden sind, gehen die Definitionen der Experten in dieselbe Richtung. SUFLITA et al (2010: 52) konkretisieren die Sedimentdurchreiche als eine Möglichkeit, Hochwasserereignisse, welche automatisch einen hohen Sedimentgehalt vorweisen, durch partielles, vorheriges Leeren des Stauraumes durch das Reservoir zu leiten. Somit kann sich im Speziellen grobes Sediment nicht, oder nur schwer, absetzen und wird somit in den Unterlauf weitergeleitet. MAHMOOD (1987: 93) legt dar, dass es sich hierbei um ein Managementszenario handelt, bei dem das einkommende Sediment durch das Reservoir durchgelassen wird.

In gleicher Weise äußern sich PALMIERI et al. (2003: 63), zudem erklären sie (2003: 12), dass die Effektivität der Sedimentdurchreiche vom Abflussvorkommen abhängt. Beide lassen jedoch unerwähnt, dass ein teilweises Auslassen des Reservoirs notwendig ist, um mit dieser Managementstrategie Erfolg zu haben. Zusätzlich muss erwähnt werden, dass durch das partielle oder gar ganze Leeren des Stauraums die Möglichkeit gegeben ist, dass bereits abgesetztes Sediment erneut aufgenommen und somit aus dem Staubecken transportiert werden kann. Wichtig jedoch ist, dass die erbaute Staumauer einen unteren Auslass hat, um so das Sediment zu entfernen. Da das Sediment, wie eben erwähnt, durch den unteren Auslass ausgeführt wird, kann es dazu kommen, dass sich über einen Zeitraum das Sediment vor der Öffnung absetzt und diese langsam zu verschließen beginnt. Hier sollten also neben dieser Sediment-Durchreich-Variante weitere Managementszenarien angewandt werden.

Im nächsten Schritt soll auf die Variante der Sediment-Umleitung (im Englischen: sediment-bypass) eingegangen werden. An sich ist diese Variante einfach zu erklären, handelt es sich hierbei um eine simple „Umschiffung“ des Reservoirs. Rechnet man also nach Starkregenereignissen mit erhöhtem Abfluss und einem einhergehenden hohen Sedimentgehalt, so kann versucht werden, das ankommende Wasser mittels eines Kanals oder einer Pipeline um das Reservoir zu transportieren. Um diese enormen Wassermassen wirklich abkoppeln zu können, muss vor dem Reservoir eine geeignete Infrastruktur geschaffen werden. Der Vorteil dieser Methode ist die Gegebenheit, dass der natürliche Sedimentgehalt tatsächlich in den unterliegenden Flusslauf gelangt. Eine Unterart des Sediment-Bypasses ist der sogenannte Hydrosuction-Bypass. Der Unterschied liegt allerdings darin, dass bei dem Hydrosuction-Bypass ein Rohr direkt durch das Staubecken gelegt werden muss. Hierbei wird vor dem Reservoir ein Auffangbecken installiert, von welchem aus das Sediment durch das vorhandene Rohr in den Flussunterlauf weitergeleitet wird. Diese Variante kann jedoch, so vermutet der Autor dieser Masterarbeit, nur bei neu erbauten Stauräumen durchgeführt werden, da eine Installation dieses Rohrs im Nachhinein schwierig erscheint. Abbildung 18 gibt die Möglich-

keit des Hydrosuction-Bypasses bildlich wieder. Man erkennt deutlich das Auffangbecken (in rot) und das verlegte Rohr. Vorteil dieser Variante ist, wie schon beim Sediment-Bypass, dass keinerlei Sediment in den Stauraum gelangt. Der zweite, in Abbildung 18 gut erkennbare Vorteil liegt darin, dass keinerlei Auslass des Beckens bei dieser Managementmöglichkeit von Nöten ist.

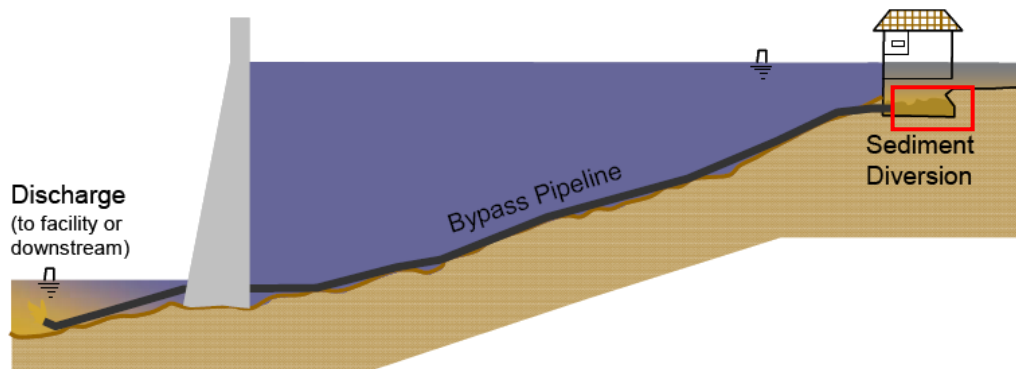


Abbildung 18: Hydrosuction-Bypass; Quelle: SUFLITA et al. (2010: 58)

8.3 Ausgleich für den erlittenen Speicherverlust

PALMIERI et al. (2003: 8) differenzieren dabei zwischen den drei Möglichkeiten eines Damrneubaus, einer Dammerhöhung und einer Außerbetriebnahme eines Damms. Als erstes Beispiel soll hier die Vergrößerung des Damms betrachtet werden. SUFLITA et al. (2010: xvi) erwähnen jedoch, dass es sich bei einem Ausbau eines Damms nur um eine temporäre Managementmöglichkeit handelt. Dies ist darin begründet, dass zwar in kurzer Zeit mehr Stauraum geschaffen werden kann, nichtsdestoweniger muss darauf geachtet werden, dass trotzdem in den weiteren Schritten richtiges Management in oder um den Stauraum betrieben wird. Sollte dies nicht eingehalten werden, wird sich die Erweiterung des Damms nicht rentieren, da der neue vorhandene Speicherraum durch nachkommendes Sediment über einen gewissen Zeitraum verloren gehen wird.

Nach der Beschreibung der Dammerweiterung soll nun der Damrneubau kurz beleuchtet werden. SUFLITA et al. (2010: 66) demonstrieren hierzu: „*There are several issues that limit construction of new dams to replace sedimentation losses. Because of environmental protections and the costs of mitigating the affects of dams on the environment it has become more complex and difficult to build new dams either on- or off-stream.*”

Die Autoren weisen darauf hin, dass es in der heutigen Zeit durchaus Probleme bei dem Bau eines neuen Damms gibt. Dies liegt unter anderem auch an den Kosten, die durch jene Maßnahmen auftreten, die negative Auswirkungen von Dammbauten auf die Umwelt mildern

sollen. So vertreten sie zusätzlich die Meinung, dass die Umsetzung eines Dammbaus sowohl direkt am Fluss als auch „off-stream“ immer komplexer und schwieriger umsetzbar sein wird.

Als letzter Managementpunkt wird nun die Möglichkeit einer Außerbetriebnahme des Damms veranschaulicht. PALMIERI et al. (2003: 14) meinen hierzu, dass dies nun der allerletzte Ausweg sein kann, betrachten hierbei jedoch nur den totalen Abbau eines Damms und weisen zusätzlich darauf hin, dass weltweit bereits kleine Dämme (unter einer Mindesthöhe von 15m oder unter einem Staubeckenvolumen von unter 3 Millionen m³ – Definition der ICOLD; vgl. dazu Homepage ICOLD) zur Gänze abgebaut wurden. SUFLITA et al. (2010: 66) verstehen unter einer Außerbetriebnahme den teilweisen Abbau eines Damms oder die Möglichkeit, einen Damm als solchen beruhen zu lassen und lediglich die Auslässe zu öffnen.

8.4 Entfernung des Sediments aus dem Reservoir

Als Beispiel für die Entfernung des abgesetzten Sediments aus einem Reservoir dient die Stauraumpülung. Der Vorteil einer Ausspülung liegt darin, dass bereits abgelagertes Material remobilisiert und im Anschluss durch die vorhandenen Auslässe entfernt werden kann (vgl. SUFLITA et al. 2010: 59). Während SUFLITA et al. (2010: 59), COKER et al. (2009: 817), XIAO-QING (2003: 103) und MAHMOOD (1987: 83) nur jeweils eine Form des Ausspülens erwähnen, unterscheiden WANG et al. (2009: 371) hier zwischen zwei differenten Arten. Einerseits gilt es, das „Pressure-Flushing“, andererseits das „Empty-Flushing“ näher zu betrachten. Abbildung 19 zeigt die beiden im Vergleich, der linke Teil repräsentiert die Möglichkeit des „Pressure-Flushings“, der rechte jene des „Empty-Flushings“. Auch PALMIERI et al. (2003: 12) teilen die Ansichten von WANG et al. (2009: 371), sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Benennung. So bezeichnen PALMIERI et al. (2003: 12) das „Pressure-Flushing“ als „Partial draw-down-Flushing“, das „Empty-Flushing“ definieren sie als „Complete draw-down-Flushing“.

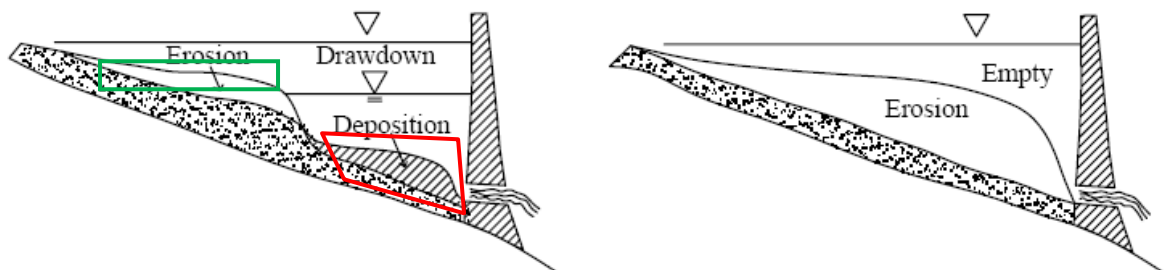


Abbildung 19: Vergleich "Pressure-Flushing" und "Empty-Flushing"; Quelle: WANG et al. (2009: 379)

Den Unterschied der beiden Ausspülverfahren verdeutlichen WANG et al. (2009: 379–380) darin, dass bei der Anwendung des „Pressure-Flushing“ der Wasserspiegel nur partiell gesenkt wird, die unteren Auslässe geöffnet werden, um das nun teils freiliegende Sediment mit Hilfe der nachkommenden Wassermassen ablassen zu können. Der in Abbildung 19 gezeigte grüne Bereich ist jener freiliegende Sedimentteil, der durch die Senkung des Wasserspiegels freigelegt wurde und durch die nachkommenden Wassermassen durch den unteren Auslass entfernt werden soll. Das große Problem bei dieser Variante besteht jedoch darin, dass sich möglicherweise vor diesen Auslässen das Material erneut ablagert und dies so zu einer Verstopfung der Auslässe führt (die mögliche Verstopfung wird im roten Kästchen der Abbildung 19 gezeigt). Im Gegensatz zum „Pressure-Flushing“ kommt es beim „Empty-Flushing“ zu einem kompletten Auslassen des Stauraums. Die Definition „Complete draw-down-Flushing“ von PALMIERI et al. (2003: 12) würde hier die Wirkungs- sowie Vorgehensweise eventuell besser wiedergeben. Dieses totale Auslassen des Reservoirs zur Ausspülung der abgesetzten Sedimente findet immer in den Flutzeiten statt. In Abbildung 19 ist deutlich erkennbar, dass bei einem totalen Leeren des Staubeckens das gesamte Sediment freiliegt. So kann das Sediment bei gleichzeitigem Öffnen der unteren Auslässe und mit Hilfe der enormen Wassermassen perfekt in den unterliegenden Flusslauf abtransportiert werden. Durch die extreme Kraft des Wassers wird tatsächlich das komplette Sediment mitgerissen. WANG et al. (2009: 379) verdeutlichen jedoch, dass *„Because of the high sediment concentration that can be released during the flushing period, the downstream channel must be able to transport high sediment concentration load.“*

WANG et al. (2009: 379) bringen zum Ausdruck, dass durch die enormen Wassermassen bei Flutereignissen klarerweise auch ein erhöhter Sedimentgehalt einhergeht. Zusätzlich zu diesem wird das gesamte, im Reservoir abgelagerte Sediment mittransportiert. Aus diesem Grund muss der Flussunterlauf in der Lage sein, hohe Abflüsse mit hohem Sedimentgehalt problemlos transportieren zu können.

Aus dem Vergleich der beiden Ausspülvarianten kann geschlossen werden, dass das „Empty-Flushing“ deutlich effektiver ist als das „Pressure-Flushing“, gelingt es dem „Empty-Flushing“ doch tatsächlich, das gesamte abgesetzte Sediment aus dem Reservoir zu entfernen, während hingegen das „Pressure-Flushing“ nur geringe Sedimentmengen abtransportieren kann und zusätzlich noch ein erhöhtes Risiko einer möglichen Verstopfung der unteren Auslässe besteht.

9 Schlussbetrachtung

Seit den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts erlebt der Kleinwasserkraftwerksbau – obwohl damit sowohl geomorphologische als auch ökologisch negative Auswirkungen verbunden sein können– aufgrund seiner nachhaltigen Energiegewinnung weltweit einen erheblichen Aufschwung. Auch in der Steiermark wurden an zahlreichen Flüssen Kraftwerke, von denen die meisten Ausleitungs- oder Laufkraftwerke sind, neu erbaut. Ob es durch den Klimawandel zu möglichen negativen Auswirkungen auf die Kleinwasserkraftwerke kommen könnte, darüber machten sich gemäß einer getätigten Fragebogenumfrage knapp 60% der Befragten Kleinwasserkraftwerksbetreiber bereits Gedanken.

Resümiert man die vom Wegener Center (GOBIET et al. 2012) berechneten möglichen mittleren und extremen Klimaszenarien für die Steiermark bis 2050, zeigen sich für die unterschiedlichen steirischen Regionen eindeutige Entwicklungen. Bezüglich der Niederschläge wird sowohl nördlich der Mur-Mürz-Furche als auch südlich davon in den Winter- und Herbstmonaten ein deutlicher Anstieg erwartet, auch die Frühjahrsmonate könnten gemäß den Szenarien von GOBIET et al. (2012) einen Anstieg der Niederschlagssummen erfahren. Einzig in den Sommermonaten werden unterschiedliche Prognosen errechnet, so dürfte es in den Bezirken nördlich der Mur-Mürz-Furche zu einem marginalen Anstieg der Niederschläge kommen, während hingegen südlich davon ein geringer Rückgang prophezeit wird. Hinsichtlich der Starkregenereignisse erwartet man bis 2050 wenige Änderungen.

Zusätzlich zu den sich ändernden Niederschlägen vermuten GOBIET et al. (2012), dass sich die Temperatur in allen vier Jahreszeiten in der gesamten Steiermark bis 2050 erhöht, Trockenperioden dürften allerdings keine große temporale Ausbreitung erfahren. Es ist anzunehmen, dass durch den Anstieg der Temperaturen die Schneedeckentage – dies sind jene Tage mit einer Schneehöhe von mehr als 30cm (vgl. Gobiet et al. 2012: 26) – deutlich abnehmen werden. Hier sind im Speziellen die obersteirischen Bezirke betroffen. Diese eben aufgezeigten potentiellen Szenarien bestätigten jene Kleinwasserkraftwerksbetreiber, die sich bereits Gedanken hinsichtlich denkbarer negativer Konsequenzen gemacht haben.

Um eine Basis für die Untersuchung möglicher Abfluss- und Schwebstoffentwicklungen der steirischen Flüsse unter dem Klimawandel bis 2050 zu schaffen, erfolgten a priori Analysen, wie sich das Klima und der Abfluss in der Periode 1981–2010 entwickelt haben. Dazu wurden für achtzehn Untersuchungsgebiete die Entwicklungen von Abfluss und Niederschlag als auch Temperatur in der Zeitspanne 1981–2010 aufgezeigt. Um den Verlauf darstellen zu können, wurde die 30-jährige Zeitspanne in zwei fünfzehnjährige Phasen (1981–1995 und 1996–2010) unterteilt. Anschließend erfolgte ein Vergleich der jeweiligen Perioden und auch

der unterschiedlichen Jahreszeiten. Die durchgeführten Untersuchungen der beiden Zeitspannen ergaben, dass sich an elf Flüssen der Abfluss in der Periode 1996–2010 gegenüber jenem aus 1981–1995 erhöht hat, an sieben zeigten sich marginale Abnahmen. Zusätzlich erhöhte sich die Niederschlagssumme an vierzehn Messstationen im Vergleich zur Phase 1981–1995, lediglich an vier Stationen war die Niederschlagssumme rückgängig. Darüber hinaus stieg an allen achtzehn Messstationen die Temperatur an.

Bei der Erforschung der jahreszeitlichen Entwicklung ergab sich in den Wintermonaten an elf Flüssen eine Abnahme des mittleren Durchflusses, an sieben jedoch ein Anstieg. Zusätzlich konnte an allen achtzehn untersuchten Standorten ein Rückgang des Niederschlags verzeichnet werden. Einen durchgehenden Anstieg an allen Stationen erfuhr hingegen die Temperatur.

In den Frühjahrsmonaten erbrachte die Datenauswertung an elf Pegelmessstationen eine Reduzierung des Abflusses der Periode 1996–2010 im Vergleich zu jener von 1981–1995, während an sieben Stationen ein Anstieg konstatiert werden konnte. An zehn Stationen nahm der Niederschlag zu, acht wiesen einen Rückgang der Niederschlagssummen auf. Für die Frühjahrsmonate zeigte sich jedoch je nach geographischer Lage der Messstation eine unterschiedliche Entwicklung. So nahmen in den obersteirischen Bezirken, bis auf drei Ausnahmen, sowohl der Abfluss als auch der Niederschlag zu, südlich der Furche gab es an allen Stationen einen Rückgang. Auch in den Frühjahrsmonaten erhöhte sich die Temperatur an allen Messstationen in der Zeitspanne 1996–2010 gegenüber jener von 1981–1995.

Für die Sommermonate zeigten die Analysen an je neun Pegelmessstationen einen Anstieg (zumeist an den Flüssen südlich der Mur-Mürz-Furche) beziehungsweise eine Abnahme des Durchflusses (zumeist an den obersteirischen Flüssen), an achtzehn Stationen konnte ein Anstieg der Niederschlagssumme in der Zeitspanne 1996–2010 im Vergleich zur Phase 1981–1995 aufgezeigt werden. Zudem stieg an allen achtzehn Messstationen auch die Temperatur an.

Eine deutliche Entwicklung der Abflüsse zeigt die Datenauswertung für die Herbstmonate: In diesem Zeitraum erfolgte an vierzehn Messstationen ein Anstieg in der Periode 1996–2010 gegenüber 1981–1995. Neun Stationen weisen zudem eine höhere Niederschlagssumme auf, alle davon liegen in den obersteirischen Bezirken. Darüber hinaus nahm, wie schon zuvor, an allen Messstationen die Temperatur zu.

Somit konnte die in der Einleitung definierte Hypothese, dass sich in der Periode 1981–2010 der Abfluss, die Niederschlagssumme und die Temperatur in der Steiermark erhöht haben, teilweise bestätigt werden.

Um die Zusammenhänge der drei Variablen aufzeigen zu können, wurden die gewonnenen Daten statistisch analysiert. Dabei ergaben sich hinsichtlich der Korrelation der Niederschlagssumme und des Abflusses unterschiedliche Ergebnisse. Während in den Winter- und Frühjahrsmonaten die Korrelationswerte (r-Werte), im Speziellen in den obersteirischen Bezirken, relativ gering sind, zeigen sich teilweise für den Sommer mittlere Korrelationen mit hoher Signifikanz. Die schwachen Korrelationswerte der obersteirischen Flüsse in den Winter- beziehungsweise Frühjahrsmonaten können jedoch damit erklärt werden, dass der Niederschlag in den Wintermonaten zumeist in Form von Schnee fällt und dieser somit zwischengespeichert wird. In den Frühjahrsmonaten führt die Schneeschmelze zu einem höheren mittleren Abfluss bei teils geringem Niederschlag und der Abfluss weist somit ähnliche Durchflusswerte auf, wie dies bei niederschlagsreichen Frühjahrsmonaten der Fall ist. Die durchwegs repräsentativen Signifikanzwerte (p-Werte) der Herbstmonate werden darauf zurückgeführt, dass in diesen Monaten dem Niederschlag die geringsten Einflüsse entgegenwirken (z.B. geringere Evapotranspiration als in den Sommermonaten, weniger Wasseraufnahme der Pflanzen etc.). Anhand der vorliegenden Erläuterungen kann die Hypothese, dass der Niederschlag einen Einfluss auf den Abfluss hat, nur teilweise bestätigt werden. Für die unterschiedlich starken Zusammenhänge der einzelnen Jahreszeiten finden sich jedoch Erklärungen.

Bei den Regressionsanalysen, welche den Einfluss der Temperatur auf den Abfluss untersuchen, erbrachten die statistischen Auswertungen lediglich in den Frühjahrsmonaten – und dies beinahe auch nur in den obersteirischen Bezirken – starke Zusammenhänge mit einer hohen Signifikanz. Dies kann damit erklärt werden, dass die höheren Temperaturen in den Frühjahrsmonaten die Schneeschmelze fördern, welche anschließend den Abfluss erhöhen, und dass die Temperatur somit einen höheren Einfluss auf den Durchfluss zeigt als der Niederschlag. Die aufgestellte Hypothese, wonach die Temperatur einen Einfluss auf den Abfluss von nivalen Flüssen hat, kann demgemäß nur bedingt bestätigt werden.

Starke Korrelationswerte ergaben die Analysen der Zusammenhänge zwischen dem vorhandenen Abfluss und der transportierten Schwebstofffracht in den steirischen Flüssen und diese bestätigten somit die in der Einleitung aufgestellte Annahme, dass der Abfluss eine Auswirkung auf die Feststofffracht eines Flusses hat.

Mit Hilfe einer Fragebogenanalyse fand überdies eine Bestandsaufnahme der derzeitigen Situation der steirischen Kleinwasserkraftwerke statt. So divergieren beispielsweise in der Steiermark die verschiedenen Typen von Kleinwasserkraftwerken je nach örtlichen Gegebenheiten: Man findet in der Obersteiermark zumeist Laufkraftwerke vor, südlich der Mur-Mürz-Furche wurden, gerade an kleineren Flüssen, Ausleitungskraftwerke erbaut. Deutlich ging

zudem hervor, dass man in den letzten dreißig Jahren vermehrt Kleinwasserkraftwerke errichtete, so gaben 69% der Probanden an, dass ihr KWKW zwischen 0–30 Jahre alt ist. Überdies wurde verdeutlicht, dass an den steirischen Kleinwasserkraftwerken die Problematik der Stauraumverfüllung akut ist, knapp 78% der Befragten hatten bereits damit zu kämpfen – zumeist findet man die betroffenen Kraftwerke in den obersteirischen Bezirken. Interessante Ergebnisse erbrachten die Befragungen im Bezug auf die Vorgehensweise bei vorkommenden Stauraumverfüllungen, so wurden mit dem Verfahren der Stauraumverfüllungen und der Ausbaggerung lediglich zwei Varianten genannt.

Etwa 59% der Befragten haben sich bis dato mit der Frage beschäftigt, ob möglicherweise erhöhte Niederschlagssummen und ein dadurch erhöhter Abfluss beziehungsweise Feststofftransport bis 2050 negative Konsequenzen auf bestehende Kleinwasserkraftwerke haben könnten. Von diesen 59% vermuten 84%, dass mit einem erhöhten Betreuungsaufwand zu rechnen sein wird, etwa 74% nehmen eine mögliche erhöhte Gefahr von Stauraumverfüllungen an. Somit kann die in der Einleitung aufgestellte Hypothese bestätigt werden, wonach sich die steirischen Kleinwasserkraftwerksbesitzer und Betreiber bereits Gedanken gemacht haben, ob und wie sich der Klimawandel auf ihr Kraftwerk auswirken könnte.

Mit Hilfe des Modells von WIGLEY und JONES (1985), welches von DINGMAN (2002) bereit gestellt wurde, konnte, basierend auf den mittleren und extremen Klimaszenarien vom Wegener Center (GOBIET et al. 2012), durch Berechnungen aufgezeigt werden, wie sich die Abflüsse von fünf Flüssen der Steiermark bis 2050 verändern könnten. Unter der Heranziehung der mittleren Niederschlagsszenarien von GOBIET et al. (2012) ergaben sich für alle Jahreszeiten Anstiege der Abflüsse bis ins Jahr 2050, lediglich in den Sommermonaten dürfte es in den südlich der Mur-Mürz-Furche gelegenen Regionen zu einer Abnahme kommen. Somit kann prophezeit werden, dass dies neben einem Anstieg des Abflusses auch zu einer Zunahme des Schwebstoffgehalts in den fünf untersuchten Flüssen führen könnte. Diese Annahme beruht auf der getätigten Regressionsanalyse zwischen dem Abflussaufkommen und dem Schwebstoffgehalt. Bei der Betrachtung der extremen Niederschlagsszenarien von GOBIET et al. (2012) erbrachten die Modellierungen für alle Jahreszeiten teils gravierende Anstiege des Abflusses bis 2050, was somit auch den Schwebstoffgehalt der Flüsse deutlich erhöhen wird. Laut der Forschungsarbeit in facheinschlägigen Artikeln wurde zudem aufgezeigt, dass sich durch die eventuell höheren Niederschlagssummen auch die Bodenerosion verschlimmert, was somit zusätzlich den Feststoffgehalt der Flüsse vergrößern könnte. Somit konnte anhand der getätigten Modellierungen, die seitens des Autors dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, die in der Einleitung aufgestellte Annahme, dass es bis 2050 zu einer

Erhöhung des Abflusses und des Feststoffgehalts in steirischen Flüssen kommen wird, bestätigt werden.

Basierend auf diesen Berechnungen besteht Grund zur Annahme, dass sich für die Kleinwasserkraftwerksbetreiber der Steiermark bis 2050 möglicherweise vermehrt Problematiken an ihren Kleinwasserkraftwerken ergeben werden. So ist es sehr wahrscheinlich, dass es zukünftig im Speziellen in der Obersteiermark verstärkt zu Stauraumverfüllungen kommen könnte. Dies würde gleichzeitig auch einen erhöhten Betreuungsaufwand für die Betreiber bedeuten, auch häufigere Schäden an den Turbinen oder Verstopfungen der Auslässe können nicht ausgeschlossen werden. Somit bestätigt sich die in der Einleitung getätigte Hypothese, dass man zukünftig vermehrt mit Stauraumverfüllungen und anderen negativen Konsequenzen am Kleinwasserkraftwerk rechnen muss.

Wie bereits zuvor erläutert, erbrachte die Analyse des Fragebogens, dass unter den befragten Kleinwasserkraftwerksbetreibern in der Steiermark lediglich zwei Methoden angewandt werden, um Stauraumverfüllungen zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde eine Recherche durchgeführt, die mögliche Alternativen diesbezüglich anbietet und mit deren Hilfe aufgezeigt werden konnte, dass es neben der Stauraumspülung und der Ausbaggerung effizientere Möglichkeiten gibt, dass Stauraumverfüllungen gerade bei Neubauprojekten in Zukunft, trotz einer möglichen Erhöhung des Schwebstoffgehalts, reduziert werden könnten.

Abschließend wird seitens des Verfassers dieser Masterarbeit darauf hingewiesen, dass in dieser Abschlussarbeit ein Überblick geschaffen wurde, wie sich die Abflüsse steirischer Flüsse in der Vergangenheit verändert haben und sich möglicherweise bis 2050 wandeln. Zusätzlich konnte aufgezeigt werden, welche Konsequenzen dies für die Kleinwasserkraftwerksbetreiber mit sich bringen könnte. Durch die Auswertung der Fragebögen ergab sich ein Überblick, wie sich die gegenwärtige Situation der Kleinwasserkraftwerke in der Steiermark darstellt.

Interessant wäre es, im Rahmen einer etwaigen Dissertation ein Einzugsgebiet, möglicherweise in den obersteirischen Bezirken, genauer in Betracht zu ziehen und die potentiellen Abflussszenarien mit Hilfe noch detaillierterer Klimaprognosen zu erforschen.

Literatur

- ABBASI, T., und ABBASI, S.A., 2011, *Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 15, 2134–2143
- AHNERT, F., 1996, *Einführung in die Geomorphologie*, 4. Auflage, Verlag Eugen Ulmer – Stuttgart
- AHNERT, F., 2009, *Einführung in die Geomorphologie*, 4. Auflage, Verlag Eugen Ulmer – Stuttgart
- ALEKSEEVSKIY, N., 2004, *Movement of bed forms and sediment yield of rivers*, in: GOLOSOV, V. et al., 2005, *Sediment transfer through the Fluvial System*, International Association of Hydrological Sciences 2004 (IHAS Press), 395–403
- ALONSO-TRISTÁN, C. et al., 2011, *Small hydropower plants in Spain: A case study*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 15, 2729–2735
- ANAGNOSTOPOULOS, J.S. et al., 2007, *Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant*, Elsevier (Energy Conversion and Management), Vol. 48, 2663–2670
- ARNELL, N.W. und REYNARD, N.S., 1996, *The effects of climate change due to global warming in river flows in Great Britain*, Elsevier (Journal of Hydrology), Vol. 183, 397–424
- ASHMORE, P. und CHURCH, M. 2001, *The impact of climate change on rivers and river processes in Canada*, zitiert nach: GOUDIE, A.S., 2006, *Global warming and fluvial geomorphology*, Elsevier (Geomorphology), Vol. 79, 384–394
- ASSELMAN, N.E.M. et al, 2003, *The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the river rhine*, Wiley & Sons, Ltd. (Hydrological Processes), Vol. 17, 3225–3244

- BAKIS, R., 2007, *The current status and future opportunities of hydroelectricity*, Taylor & Francis (Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy), 2:3, 259–266
- BAKIS, R. und DEMIRBAS, A., 2004, *sustainable development of small hydropower plants (SHPs)*, Taylor & Francis (Energy Sources), 26:12, 1105–1118
- BAKKEN, T.H. et al., 2012, *Development of small versus large hydropower in Norway-comparison of environmental impacts*, Elsevier (Energy Procedia), Vol. 20, 185–199
- BECHTELER, W., 2006, *ALPRESERV Sustainable Sediment Management of Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects – Sedimentquellen und Transportprozesse*, Institut für Wasserwesen Universität der Bundeswehr München
- BLYASHKO, Y.I., 2010, *Modern trends in the development of small hydro power around the World and in Russia*, Pleiades Publishing (Thermal Engineering), Vol. 57, 953–960
- BOÉ, J. und TERRAY, L., 2008, *Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change*, John Wiley & Sons, Ltd (Geophysical Research Letters), Vol. 35, 1–5
- BÖHM, R. et al., o.J., *Mögliche Klimafolgen für die Wasserwirtschaft in Österreich*, in: BÖHM, R. et al., o.J., *Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Österreichische Wasser- und Abfallverband (ÖWAV), 7–25
- BOOKHAGEN, B., 2012, *Changes in sediment transport rates through time. What are the linkages among sediment transport, climate, and climate change?*, Mountain Research Initiative Newsletter, No. 7
- BRIERLEY, G.J. und FRYIRS, K.A., 2005, *Geomorphology and river management – Applications of the River Styles Framework*, Blackwell Publishing – Malden, Oxford, Carlton

- BRÜCHER, W., 2009, *Energiegeographie, Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik*, Gebr. Borntraeger – Berlin, Stuttgart
- CALANCA, P. et al., 2006, *Global warming and the summertime evapotranspiration regime of the Alpine region*, Springer Science + Business Media (Climatic Change), Vol. 79, 65–78
- CHARLTON, R., 2008, *Fundamentals of fluvial geomorphology*, Routledge – Abingdon, New York
- CHURCH, M., 2006, *Bed material transport and the morphology of alluvial river channels*, The Annual Review of Earth Planetary Science, Vol. 34, 325–354
- CHURCH, M. et al., 2009, *Rivers*, in: SLAYMAKER, O., SPENCER, T., EMBLETON-HAMANN, C., 2009, *Geomorphology and global environmental change*, Cambridge University Press – Cambridge et al.
- COKER, H.E. et al., 2009, *Conversion of a Missouri river dam and reservoir to a sustainable system: sediment management*, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 45, No. 4, 815–827
- DEDKOV, A.P. und MOSZHERIN, V.I., 1992, *Erosion and sediment yield in mountain regions of the world*, in: WALLING, D.E. et al., 1992, *Erosion, debris flows and environment in mountain regions*, International Association of Hydrological Sciences 1992 (IAHS Press), No. 209, 29–36
- DENIS, V., 2010, *Petite hydroélectricité de la théorie à la pratique*, Technologie Kleinwasserkraft/Technologie petite hydraulique, Vol.5, 61–65
- DINGMAN, L.S., 2002, *Physical Hydrology*, 2. Auflage, Prentice–Hall – New Jersey
- DÖLL, P. und MÜLLER SCHMIED, H., 2012, *How is the impact of climate change on river flow related to the impact mean annual runoff? A global-scale analysis*, IOP Publishing Ltd (Environmental Research Letters), Vol. 7, 1–12

- EGRÉ, D. und MILEWSKI, J.C., 2002, *The diversity of hydropower projects*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 30, 1225–1230
- ESHA^a, o.J, *Umweltverträglichkeit von Kleinwasserkraftwerken*, European Small Hydropower Association, 1–20
- ESHA^b, o.J, *State of the art of small hydropower in EU–25*, European Small Hydropower Association, 1–20
- FALLOON, P.D. und BETTS. R.A., 2006, *The impact of climate change on global river flow in HadGem I simulations*, John Wiley & Sons, Ltd. (Atmospheric Science Letters), Vol. 7, 62–68
- FARNSWORTH, K.L. und MILLIMAN, J.D., 2003, *Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas River example*, Elsevier (Global and Planetary Change), Vol. 39, 53–64
- FAVIS-MORTLOCK, D. und BOARDMAN, J., 1995, *Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a modelling study on the UK South Downs*, Elsevier (Catena), Vol. 25, 365–387
- FLETEN, S.-E. et al., 2008, *Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects*, Elsevier (European Journal of Operational Research), Vol. 190, 255–267
- FLIRI, F., 1972, *Statistik und Diagramm*, hrsg. von FELS, E.; WEIGT, E. und WILHELMY, H. (Das geographische Seminar. Praktische Arbeitsweisen), Georg Westermann Verlag – Braunschweig
- GABRECHT, J. et al., 2004, *Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States*, American Society of Civil Engineers (Journal of Hydrology), Vol. 9, Issue 5, 360–367
- GALAY, V.J., 1983, *Causes of river bed degradation*, American Geophysical Union (Water Resources Research), Vol. 19, No. 5, 1057–1090

- GEDNEY, N. et al., 2006, *Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records*, Nature Publishing Group (Nature), Vol. 439, 835–838
- GIESECKE, J. und MOSONYI, E., 2005, *Wasserkraftanlagen Planung, Bau und Betrieb*, 4. Aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg
- GOBIET, A. et al., 2012, *Klimaszenarien für die Steiermark bis 2050 – Eine Studie des Wegener Zentrums für Klima und Globalen Wandel im Auftrag des Landes Steiermark*, Amt der Steiermärkischen Landesregierung – Abteilung 15 – Fachabteilung Energie und Wohnbau, 1–110
- GOUDIE, A., 2002, *Physische Geographie. Eine Einführung*, Sonderausgabe 2007, Spektrum – Akademischer Verlag – Heidelberg
- HABERSACK, H. et al., o.J., *Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf – Feststofftransport und Gewässermorphologie*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 1–259
- HAREGEWEYN, N. et al., 2012, *Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia)*, Springer-Verlag (J Soils Sediment), No. 12, 291–305
- HARTMANN, S., 2004, *Sediment management of alpine reservoirs considering ecological and economical aspects*, Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, 18.–21. Oktober 2004, Yichang, China, 38–45
- HAUER, C. et al., 2013, *Bedeutung von Feststoffen & Optimierung von gewässermorphologischen Strukturen*, in: Wasserkraft. Das Magazin des Vereins Kleinwasserkraft Österreich, Ausgabe 40, Juni 2013
- HEITFELD, K.-H. 1991, *Talsperren*, Lehrbuch der Hydrogeologie Band 5, Gebr. Borntrager – Berlin, Stuttgart
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)., 2010, *Renewable Energy Essentials: Hydropower*, 1–4

- IPCC, 2007, *Climate Change 2007 – The physical science basis – Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press – Cambridge et al., 1–1007

- JESUS, T. et al., 2004, *Impact evaluation of the Vila Viçosa small hydroelectric power plant (Portugal) on the water quality and on the dynamics on the benthic macroinvertebrate communities of the Ardena river*, Asociación Española de Limnología (Limnetica), Vol. 23 (3–4), 241–256

- KERN, K., 1994, *Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg

- KOCH, F.H., 2002, *Hydropower – the politics of water and energy: Introduction and overview*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 30, 1207–1213

- KOHN, W., 2005, *Statistik. Datenanalysis und Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg

- KONDOLF, G.M., 1997, *Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels*, Springer-Verlag (Environmental Management), Vol. 21, No. 4, 533–551

- KOSNIK, L., 2008, *The potential of water power in the fight against global warming in the US*, Elsevier (Energy Policy), Article in press, 1–14

- KOSNIK, L., 2010, *The potential for small scale hydropower development in the US*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 38, 5512–5519

- KUCUKALI, S. und BARIS, K., 2009, *Assessment of small hydropower (SHP) development in Turkey: Laws, regulations and EU policy perspective*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 37, 3872–3879

- LABAT, D. et al., 2004, *Evidence for global runoff increase related to climate warming*, Elsevier (Advances in Water Resources), Vol. 27, 631–642

- LAWLER, D.M. et al., 2003, *Influence of atmospheric circulation changes and regional climate variability on river flow and suspended sediment fluxes in southern Iceland*, John Wiley & Sons, Ltd. (Hydrological processes), Vol. 17, 3195–3223

- LECKSCHEIDT, J. und TJAROKO, T.S., o.J., *Overview of mini and small hydropower in Europe*, 1–5, abgerufen von: http://ec-asean-greenippnetwork.net/documents/tobedownloaded/knowledgemaps/KM_overview_small_hydro_Europe.pdf (abgerufen am 18.09.2013)

- LEE, J.L. et al., 1996, *Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂: II. Soil Erosion and Organic Carbon*, Elsevier (Agricultural Systems), Vol. 52, 503–521

- LENZI, M.A und MARCHI, L., 2000, *Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy)*, Elsevier (Catena), Vol. 39, 267–282

- LETTENMAIER, D.P. et al, 1994, *Hydro-climatological trends in the continental united states, 1948–88*, American Meteorological Society (Journal of Climate), Vol. 7, 586–607

- MADER, H. und PELIKAN, B., 2006, *Kleinwasserkraftwerke. Projektierung und Entwurf. LVA Nr. 816.314, Foliensatz 1, Wintersemester 2006/2007, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau – IWHW, Universität für Bodenkultur Wien*

- MAHMOOD, K., 1987, *Reservoir Sedimentation: Impact, Extent, and Mitigation*, World Bank Technical Paper Number 71, The World Bank – Washington, D.C., 1–134

- MALM RENÖFÄLT, B. et al., 2010, *Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverin ecosystems*, Blackwell Publishing Ltd (Freshwater Biology), Vol. 55, 49–67

- MANGELSDORF, J. und SCHEURMANN, K., 1980, *Flußmorphologie für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, Oldenbourg Verlag – München, Wien

- MANIAK, U., 2005, *Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure*, 5. bearbeitet und erweiterte Auflage, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg
- MARTINS, D.E.C. et al., 2013, *The importance of clean development mechanism for small hydro power plants*, Elsevier (Renewable Energy), Vol. 60, 643–647
- MATTHIAS, H.-B. und KÖNIG, W., 1982, *Entwicklungstendenzen bei Wasserturbinen und Überlegungen zur Erneuerung von Kleinwasserkraftwerken* in: Österreichische Investitionskredit Aktiengesellschaft, 1982, *Kleinwasserkraftwerke*, Schriftenreihe der Österreichischen Investitionskredit Aktiengesellschaft, Neue Folge, Band 9, invest kredit
- MEYERHOFF, J. und PETSCHOW, U., 1997, *Umweltverträglichkeit kleiner Wasserkraftwerk. Zielkonflikte zwischen Klima- und Gewässerschutz*, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – Wasserwirtschaft, 1–170
- MICHAEL, A. et al., 2005, *Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss – results of comparative model simulations*, Elsevier (Catena), Vol. 61, 155–164
- MISHRA, S. et al., 2011, *Optimal installation of small hydropower plant – A review*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 15, 3862–3869
- MÖDERL, M. et al., 2012, *Örtliche Sensitivitätsanalyse zur Identifikation von effizienten Standorten für Trinkwasserkraftwerke*, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Springer-Verlag, 479–484
- MOHAMMED, A.G. und ADAM, M.A., 2010, *The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses*, Elsevier (Catena), Vol. 81, 97–103
- MORRIS, G.L. und FAN, J., 1998, *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill Book and Co., New York - Electronic version of the original 1998 publication by McGraw-Hill Book Co. This fully-searchable version contains minor corrections., 1–805

- MUKUNDAN, R. et al., 2013, *Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA*, Elsevier (Geomorphology), Vol. 183, 110–119

- NACHTNEBEL, H.P., 2007, *Hydrologie und Flussgebietsmanagement*, LVA-Nr. 816.101, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau – Lehrveranstaltungsskriptum

- NAUTIYAL, H. et al., 2011, *Small hydropower for sustainable energy development in India*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 15, 2021–2027

- NEARING, M.A. et al., 2005, *Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover*, Elsevier (Catena), Vol. 61, 131–154

- NIEDERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG (NOE)., 2011, *Leitfaden für Kraftwerksplanungen. Wasserwirtschaft und Gewässerökologie*, Amt der NÖ Landesregierung – Gruppe Wasser – Abt. Wasserwirtschaft

- NOWOTNY, G., 1998, *Gesamtplanung, Reparaturen, Generalüberholung*, in: PÁLFFY, S.O., 1998, *Wasserkraftanlagen. Klein und Kleinstkraftwerke*, 4. Auflage, Expert-Verlag – Renningen-Malmsheim, et al., 123–160

- OKOT, D.K., 2013, *Review of small hydropower technology*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 26, 515–520

- OWENS, P.N. et al., 2005, *Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues*, Wiley & Sons, Ltd. (River research and applications), Vol. 21, 693–717

- PAISH, O., 2002, *Small hydro power: technology and current status*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 6, 537–556

- PALMIERI, A. et al., 2003, *Reservoir Conservation Volume I, THE Rescon Approach*, The International Bank for Reconstruction and Development, 1–102

- PANIĆ, M. et al., 2013, *Small hydropower plants in Serbia: Hydropower potential, current state and perspective*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 23, 341–349
- PARTL, R., 1982, *Kleine Wasserkraftwerke*, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik – Wien
- PATT, H. et al., 1998, *Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg
- PATT, H und GONSOWSKI, P., 2011, *Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg
- PELIKAN, B., 2004, *Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftwerken*, European Small Hydropower Association, 1–329
- PELIKAN, B., 2009, *Technologische und konzeptive Entwicklung in der Kleinwasserkraft*, Springer-Verlag (Elektrotechnik & Informationstechnik), Jahrgang 126, Heft 12, 427–431
- PENCHE, C., 1998, *Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site*, European Small Hydropower Association, 1–266
- PETERSON, T.C. et al., 1995, *Evaporation losing its strength*, Nature Publishing Group (Nature), Vol. 377, 687–688
- PÖPPL, R.E. et al., 2013, *Impacts of dams, dam removal and dam-related river engineering structures on sediment connectivity and channel morphology of the Fugnitz and the Kaja Rivers*, Conference Volume – 5th Symposium for Research in Protected Areas, ©Hohe Tauern National Park, 607–614
- PRUSKI, F.F. und NEARING, M.A., 2002^a, *Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations*, American Geophysical Union (Water resources research), Vol. 38, N. 12, 34–1 – 34–11

- PRUSKI, F.F. und NEARING, M.A., 2002^b, *Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: a computer simulation study*, Soil and water conservation society (Journal of Soil and Water Conservation), Vol. 57, No. 1, 7–16
- PUROHIT, P., 2008, *Small hydro power projects under clean development mechanism in India: A preliminary assessment*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 36, 2000–2015
- QUASCHNING, V., 2010, *Renewable energy and climate change*, Wiley & Sons, Ltd – Chichester
- RAGHUNATH, H.M., 2006, *Hydrology: Principles, Analysis and Design*, 2. Auflage New Age International Publishers – Neu-Delhi,
- RAMOS, H., 2000, *Guidelines for design of small hydropower plants*, WREAN (Western Regional Energy Agency & Network) und DED (Department of Economic Development), Belfast
- RAMOS, H. und DE ALMEIDA, A.B., o.J, *Small hydro as one of the oldest renewable energy sources*, Technical University of Lisbon, 1–9
- RAUDKIVI, A.J., 1982, *Grundlagen des Sedimenttransports*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg, New York
- REICHE, D. und BECHBERGER, M., 2004, *Policy differences in the promotion of renewable energies in the EU member states*, Elsevier (Energy Policy), Vol. 32, 843–849
- SCHÖNER, W. et al., 2011, *Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 1–486
- SCHWARTZ, F.H. und SHAHIDEHPUR, M., 2006, *Small Hydro As Green Power*, EIC Climate Change Technology, 2006 IEEE

- SHARMA, N.K. et al., 2013, *A comprehensive analysis of strategies, policies and development of hydropower in India : Special emphasis on small hydro power*, Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), Vol. 18, 460–470
- SINGAL, S.K. et al., 2010, *Analysis for cost estimation of low head run-of-river small hydropower schemes*, Elsevier (Energy for Sustainable Development), Vol. 14, 117–126
- STEWART, I.T. et al., 2005, *Changes toward earlier streamflow timing across western north America*, American Meteorological Society (Journal of Climate), Vol. 18, 1136–1155
- STROBL, T. und ZUNIC, F., 2006, *Wasserbau. Aktuelle Grundlagen. Neue Entwicklungen*, Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg
- SUFLITA, M., 2010, *Managing sediments in Utah's reservoirs*, Utah Division of Water Resources, Utah State Water Plan, 1–194
- THODSEN, H., 2007, *The influence of climate change on stream flow in Danish rivers*, Elsevier (Journal of Hydrology), Vol. 333, 226–238
- THODSEN, H. et al., 2008, *The influence of climate change on suspended sediment transport in Danish rivers*, Wiley & Sons, Ltd. (Hydrological Processes), Vol. 22, 764–774
- WAGNER, T. et al., 2012, *Auswirkungen des Klimawandels auf Abfluss und Wasserkrafterzeugung österreichischer Flüsse. Niederschlags-Abfluss-Modellierung basierend auf vier Klimaszenarien bis 2050*, Wasserbausymposium 212, 1–8
- WALLING, D.E., 2006, *Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers*, Elsevier (Geomorphology), Vol. 79, 192–216
- WALLING, D.E., 2009, *The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation – Paris, 1–30

- WALLING, D.E. UND FANG, D., 2003, *Recent trends in the suspended loads of the world's rivers*, Elsevier (Global and Planetary Change), Vol. 39, 111–126
- WALTER, M.T. et al., 2004, *Increasing evapotranspiration from the conterminous united states*, American Meteorological Society (Journal of Hydrometeorology), Vol. 405–408
- WANG, G. et al., 2012, *Evaluating the effect of land use changes on soil erosion and sediment yield using a grid-based distributed modelling approach*, John Wiley & Sons, Ltd. (Hydrological Processes), Vol. 26, 3579–3592
- WEGENER ZENTRUM, TU GRAZ, JOANNEUM RESEARCH., 2010, *Erläuterungen zum Klimaschutzplan Steiermark, 2010, Teil 6: Energiebereitstellung*, Studie im Auftrag der Steiermärkischen Landesregierung, Graz, Mai 2010
- WETHERALD, R.T. und MANABE, S., 2002, *Simulation of hydrological changes associated with global warming*, American Geophysical Union (Journal of Geophysical Research), Vol. 107, No. D19, 7–1 – 7–15
- WIGLEY, T.M.L. und JONES, P.D., 1985, *Influences of precipitation changes and direct CO₂ effects on streamflow*, Nature Publishing Group (Nature), Vol. 314, 149–152
- WIJESINGHE, A. und LAI, L.L., 2011, *Small Hydro Power Plant Analysis and Development*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1–6
- WILHELMY, H., 2002, *Geomorphologie in Stichworten. 2. Exogene Morphodynamik: Abtragung – Verwitterung – Tal- und Flächenbildung*. 6., überarbeitete Auflage/von Bauer, B. und Fischer, H., Borntraeger – Berlin, Stuttgart
- XIAOQING, Y., 2003, *Manual on sediment management and measurement*, World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report No. 47, 1–176
- YÜKSEK, Ö. und KAYGUSUZ, K., 2006, *Small hydropower plants as a new and renewable energy source*, Taylor & Francis (Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy), 1:3, 279–290

- ZAUGG, C. und LEUTWILER, H., 1996, *Kleinwasserkraftwerke und Gewässerökologie. Situationsanalyse*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, unter Mitarbeit des Bundesamtes für Wasserwirtschaft und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landwirtschaft, Bern
- ZEPP, H., 2002, *Grundriß Allgemeine Geographie: Geomorphologie*, Verlag Ferdinand Schöningh GmbH – Paderborn
- ZHOU, S. et al., 2009, *The trend of small hydropower development in China*, Elsevier (Renewable Energy), Vol. 34, 1078–1083
- ZHU, Y.-M. et al., 2008, *Sediment flux sensitivity to climate change : A case study in the Longchuanjiang catchment of the upper Yangtze River, China*, Elsevier (Global Planetary Change), Vol. 60, 429–442
- ZUAZO, V.H.D. et al., 2011, *Soil erosion: Causes, processes and effects*, in: FOURNIER, A.J., *Soil erosion: Causes, processes and effects*, Nova Science Publishers, Inc. – New York

Internetquellen und Geodatenquelle

Geodatenquelle

- @ GIS-Steiermark 2013
www.gis.steiermark.at

Internetquellen

- www.ehyd.gv.at abgerufen am 21.09.2013
- FUB http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/pg- abgerufen am 08.09.2013
2007^a net/themenbereiche/geomorphologie/fluvialmorph
ologie/flusserosion/schubspannung/
- FUB http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/pg- abgerufen am 04.02.2014
2007^b net/themenbereiche/geomorphologie/fluvialmorph
ologie/flusserosion/fluviale_erosionsprozesse/seite
nerosion/
- FUB http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/pg- abgerufen am 08.09.2013
2007^c net/themenbereiche/hydrogeographie/hydraulische
_grundlagen/flie__prozess/
- http://www.geodsz.com/deu/d/Hjulström- abgerufen am 10.09.2013
Diagramm
- HISTALP http://www.zamg.ac.at/histalp/dataset/station/csv. abgerufen am 22.09.2013
php
- ICOLD http://www.icold- abgerufen am 10.01.2014
cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp
- http://www.kleinwasserkraft.at/kraftwerk-technik abgerufen am 14.09.2013
- http://www.kleinwasserkraft.at/wasserkraft abgerufen am 14.09.2013
- http://www.streammap.esha.be/ abgerufen am 12.10.2013
- http://www.verbund.com/pp/de/speicherkraftwerk abgerufen am 27.09.2013
- http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/bei abgerufen am 10.09.2013
trag/10177661/4748031

Anhang

Fragebogen

- 1) In welchem Bezirk befindet sich Ihr Kraftwerk?
- 2) Alter des Kraftwerks:Jahr(e)
- 3) Typ des Kleinwasserkraftwerks (Ausleitungs-, Laufkraftwerk etc.):
- 4) Leistung des Kraftwerks:kW oder MW
- 5) Haben/Hatten Sie bereits Probleme mit einer Stauraumverfüllung? JA/NEIN
- 6) Wenn ja, welche, wie gehen Sie mit dieser Problematik um?
 - ☐ Stauraumspülung
 - ☐ Sedimentdurchreiche
 - ☐ Schuttsperre
 - ☐ Sediment-Umleitung
 - ☐ Ausbaggerung
 - ☐ Sonstiges: _____
- 7) Worin sehen Sie die Ursache von Stauraumverfüllungen?
 - ☐ Starkregenniederschläge
 - ☐ Trockenperioden und dadurch trockene Böden
 - ☐ Externer Eintrag von z.B. Ackerflächen
 - ☐ Erosionen im Flussbett
 - ☐ Erosionen an den Flussufern
- 8) Hatten Sie in den letzten Jahren bereits Probleme bei Ihrem Kleinwasserkraftwerk, welche durch meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden? Ja/Nein
- 9) Wenn ja, welche Probleme ergaben sich daraus?
 - ☐ Verklausung der Feinrechen oder Grobrechen
 - ☐ Abrupter Stauraumverlust
 - ☐ Schäden an der Turbine
 - ☐ Geringer Wassereinzug
 - ☐ Sonstiges: _____

10) Wodurch könnte sich Ihrer Meinung nach der Schwebstoffgehalt eines Flusses in der Zukunft ändern?

- Klimawandel
- Änderungen im Einzugsgebiet durch z.B. Abholzung oder Nutzungsänderungen
- Bau von Wasserkraftwerken im Flussoberlauf
- Sonstiges: _____

11) Haben Sie sich bereits Gedanken gemacht, ob sich hinsichtlich des Klimawandels durch möglicherweise erhöhte Niederschlagssummen und einen dadurch eventuell erhöhten Feststofftransport Probleme für Ihr Kraftwerk ergeben könnten? Ja/Nein

12) Wenn ja, welche Konsequenzen hat dies für Ihr Kraftwerk?

- Mögliche Schäden an Turbinen
- Eventuelle Möglichkeit der Stauraumverfüllung
- Höherer Betreuungsaufwand des Kleinwasserkraftwerks
- Mögliche Schäden an Rechenanlagen
- Außerbetriebnahme der Anlage
- Bauliche Anpassungen der Anlage
- Sonstiges: _____

13) An welchem Fluss liegt Ihr Kraftwerk?

Prozentuelle Entwicklung des Abflusses, des Niederschlags und der Temperatur im Vergleich zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010

Abflussentwicklung an ausgewählten steirischen Pegelmessstationen im Vergleich zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010 in Prozent (gerundet)						
Fluss	Messstation Fluss	Gesamt	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst
Stationen in der Obersteiermark						
Donnersbach	Irdning	-4%	-10%	-8%	-11%	+27%
Enns	Liezen	+7%	-2%	+4%	-1%	+34%
Enns	Schladming	+1%	-10%	+1%	-4%	+18%
Grundlseer-Traun	Archkogel	-2%	-17%	+4%	-12%	+23%
Mur	Gestüthof	+6%	+20%	-2%	-5%	+30%
Mürz	Kindthal	+12%	+2%	+6%	+20%	+21%
Pölsfluss	Pöls	-0,5%	+9%	-10%	-7%	+21%
Salza	Gußwerk	+6%	-15%	+6%	+12%	+21%
Untertalbach	Tetter	+7%	+10%	+14%	-3%	+24%
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	+12%	+2%	+9%	+9%	+35%
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche						
Feistritz	Anger	+2%	-2%	-6%	+10%	+8%
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	-14%	-25%	-29%	+21%	-14%
Kainach	Lieboch	-9%	-5%	-24%	-1%	-4%
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	-15%	-21%	-19%	-11%	-11%
Mur	Graz	+6%	+5%	-1%	+3%	+24%
Mur	Mureck	+2%	+0,03%	-6%	+1%	+16%
Raab	Takern II	+3%	-2%	-13%	+19%	+6%
Schwarzaubach	Lipsch	-12%	-5%	-28%	+6%	-11%

Niederschlagsentwicklung an ausgewählten steirischen Niederschlagsmessstationen im Vergleich zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010 in Prozent (gerundet)						
Fluss	Messstation Niederschlag	Gesamt	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst
Stationen in der Obersteiermark						
Donnersbach	Donnersbach	+7%	-15%	+16%	+9%	+12%
Enns	Liezen	+6%	-19%	+15%	+8%	+20%
Enns	Schladming	+1%	-33%	+15%	+7%	+13%
Grundlseer-Traun	Gößl	+3%	-17%	+15%	+2%	+16%
Mur	St. Lambrecht	+8%	-21%	+1%	+16%	+9%
Mürz	Veitsch	+4%	-19%	+18%	+11%	-0,2%
Pölsfluss	St. Johann am Tauern	+17%	-5%	+21%	+23%	+21%
Salza	Brunngraben	+8%	-10%	+17%	+12%	+15%
Untertalbach	Tetter	+8%	-23%	+18%	+12%	+18%
Vordernberger-Bach	Trofaiach	+6%	-18%	+9%	+15%	+5%
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche						
Feistritz	Kreuzwirt	+1%	-21%	-5%	+17%	-5%
Ilzbach	Sinabelkirchen	+2%	-9%	-3%	+12%	-3%
Kainach	Ligist	-3%	-7%	-12%	+7%	-8%
Lafnitz	Vorau	-1%	-18%	-4%	+13%	-13%
Mur	Andritz	+0,1%	-4%	-9%	+10%	-7%
Mur	Unterpurkla	-2%	-8%	-10%	+8%	-5%
Raab	Rohr an der Raab	-3%	-13%	-11%	+7%	-4%
Schwarzaubach	Straß	+3%	-6%	-7%	+16%	-2%

Temperaturentwicklung an ausgewählten steirischen Temperaturmessstationen im Vergleich zwischen den Perioden 1981–1995 und 1996–2010 in Prozent (gerundet) – Zur Berechnung der prozentuellen Unterschiede wurden die vorliegenden Temperaturwerte von °C in Kelvin umgerechnet)						
Fluss	Messstation Temperatur	Gesamt	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst
Stationen in der Obersteiermark						
Donnersbach	Aigen im Ennstal	+0,2%	+0,2%	+0,2%	+0,2%	+0,1%
Enns	Liezen	+0,2%	+0,1%	+0,2%	+0,3%	+0,1%
Enns	Radstadt	+0,3%	+0,3%	+0,4%	+0,3%	+0,1%
Grundlseer-Traun	Bad Aussee	+0,2%	+0,1%	+0,3%	+0,2%	+0,1%
Mur	Tamsweg	+0,3%	+0,3%	+0,3%	+0,4%	+0,2%
Mürz	Bruck an der Mur	+0,2%	+0,2%	+0,3%	+0,3%	+0,1%
Pölsfluss	Zeltweg	+0,2%	+0,2%	+0,3%	+0,3%	+0,1%
Salza	Mariazell	+0,1%	+0,003%	0,2%	+0,2%	+0,01%
Untertalbach	Radstadt	+0,3%	+0,3%	+0,4%	+0,3%	+0,1%
Vordernberger-Bach	Bruck an der Mur	+0,2%	+0,2%	+0,3%	+0,3%	+0,1%
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche						
Feistritz	Weiz	+0,2%	+0,1%	+0,3%	+0,3%	+0,2%
Ilzbach	Fürstenfeld	+0,3%	+0,3%	+0,3%	+0,3%	+0,2%
Kainach	Graz Flughafen	+0,5%	+0,4%	+0,5%	+0,5%	+0,4%
Lafnitz	Wörterberg	+0,2%	+0,02%	+0,2%	+0,2%	+0,2%
Mur	Graz Universität	+0,2%	+0,2%	+0,3%	+0,3%	+0,2%
Mur	Bad Radkersburg	+0,3%	+0,3%	+0,3%	+0,3%	+0,3%
Raab	Gleisdorf	+0,3%	+0,2%	+0,3%	+0,4%	+0,2%
Schwarzaubach	Graz Flughafen	+0,5%	+0,4%	+0,5%	+0,5%	+0,4%

Statistische Analysen (Regressionsanalysen Niederschlag – Abfluss)

Regressionsanalyse zwischen Niederschlagswerten und Abflusswerten für die Wintermonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Niederschlag	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Donnersbach	0,3	0,1	0,01
Enns	Liezen	Liezen	0,2	0,1	0,02
Enns	Schladming	Schladming	0,3	0,1	0,003
Grundlseer-Traun	Archkogel	Göbl	0,5	0,2	4,8074E-06
Mur	Gestüthof	St. Lambrecht	0,2	0,04	0,06
Mürz	Kindthal	Veitsch	0,1	0,01	0,3
Pölsfluss	Pöls	St. Johann am Tauern	0,1	0,01	0,2
Salza	Gußwerk	Brunngraben	0,4	0,1	0,0004
Untertalbach	Tetter	Tetter	0,1	0,02	0,2
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Trofaiach	0,1	0,01	0,4
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Kreuzwirt	0,2	0,1	0,05
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Sinabelkirchen	0,4	0,2	1,9775E-05
Kainach	Lieboch	Ligist	0,4	0,2	7,7909E-05
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Vorau	0,4	0,1	0,0004
Mur	Graz	Andritz	0,3	0,1	0,002
Mur	Mureck	Unterpurkla	0,5	0,2	6,2594E-06
Raab	Takkern II	Rohr an der Raab	0,4	0,2	3,8489E-05
Schwarzaubach	Lipsch	Straß	0,5	0,2	6,1773E-06

Regressionsanalyse zwischen Niederschlagswerten und Abflusswerten für die Frühjahrsmonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Niederschlag	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Donnersbach	0,2	0,02	0,1
Enns	Liezen	Liezen	0,01	0,02	0,2
Enns	Schladming	Schladming	0,03	0,001	0,7
Grundlseer-Traun	Archkogel	Göbl	0,03	0,001	0,7
Mur	Gestüthof	St. Lambrecht	0,6	0,3	6,7148E-09
Mürz	Kindthal	Veitsch	0,1	0,02	0,2
Pölsfluss	Pöls	St. Johann am Tauern	0,4	0,2	1,8487E-05
Salza	Gußwerk	Brunngraben	0,1	0,01	0,3
Untertalbach	Tetter	Tetter	0,3	0,1	0,009
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Trofaiach	0,4	0,2	4,2392E-05
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Kreuzwirt	0,4	0,04	0,0003
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Sinabelkirchen	0,3	0,1	0,001
Kainach	Lieboch	Ligist	0,5	0,2	6,8746E-07
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Vorau	0,3	0,1	0,002
Mur	Graz	Andritz	0,6	0,3	1,9423E-08
Mur	Mureck	Unterpurkla	0,5	0,2	1,2311E-06
Raab	Takkern II	Rohr an der Raab	0,4	0,2	3,2385E-05
Schwarzaubach	Lipsch	Straß	0,4	0,2	8,6654E-06

Regressionsanalyse zwischen Niederschlagswerten und Abflusswerten für die Sommermonate der Periode 1981–2010

Fluss	Messstation Fluss	Messstation Niederschlag	r	r ²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Donnersbach	0,4	0,1	0,0003
Enns	Liezen	Liezen	0,4	0,2	1,1839E-05
Enns	Schladming	Schladming	0,3	0,1	0,001
Grundlseer-Traun	Archkogel	Göbl	0,4	0,2	6,6932E-05
Mur	Gestüthof	St. Lambrecht	0,3	0,08	0,007
Mürz	Kindthal	Veitsch	0,5	0,3	1,168E-07
Pölsfluss	Pöls	St. Johann am Tauern	0,4	0,1	0,0003
Salza	Gußwerk	Brunngraben	0,7	0,6	2,9407E-17
Untertalbach	Tetter	Tetter	0,2	0,1	0,02
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Trofaiach	0,3	0,1	0,001
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Kreuzwirt	0,4	0,2	1,0082E-05
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Sinabelkirchen	0,7	0,4	3,433E-12
Kainach	Lieboch	Ligist	0,6	0,3	1,2588E-09
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Vorau	0,6	0,3	1,8934E-09
Mur	Graz	Andritz	0,5	0,2	1,9997E-06
Mur	Mureck	Unterpurkla	0,5	0,2	6,15E-07
Raab	Takkern II	Rohr an der Raab	0,5	0,3	2,47603E-08
Schwarzaubach	Lipsch	Straß	0,6	0,3	5,3869E-09

Regressionsanalyse zwischen Niederschlagswerten und Abflusswerten für die Herbstmonate der Periode 1981–2010

Fluss	Messstation Fluss	Messstation Niederschlag	r	r ²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Donnersbach	0,6	0,4	2,0544E-10
Enns	Liezen	Liezen	0,7	0,4	8,0462E-13
Enns	Schladming	Schladming	0,7	0,5	1,4507E-14
Grundlseer-Traun	Archkogel	Göbl	0,8	0,7	4,4699E-23
Mur	Gestüthof	St. Lambrecht	0,6	0,4	4,5896E-11
Mürz	Kindthal	Veitsch	0,7	0,5	2,556E-13
Pölsfluss	Pöls	St. Johann am Tauern	0,6	0,3	1,5268E-09
Salza	Gußwerk	Brunngraben	0,8	0,6	2,7226E-19
Untertalbach	Tetter	Tetter	0,7	0,5	3,7831E-14
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Trofaiach	0,6	0,4	5,169E-10
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Kreuzwirt	0,6	0,4	2,757E-10
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Sinabelkirchen	0,6	0,3	1,2202E-08
Kainach	Lieboch	Ligist	0,6	0,4	6,1001E-10
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Vorau	0,6	0,4	4,2629E-12
Mur	Graz	Andritz	0,4	0,2	9,7483E-06
Mur	Mureck	Unterpurkla	0,3	0,1	0,00134062
Raab	Takkern II	Rohr an der Raab	0,4	0,2	0,00012427
Schwarzaubach	Lipsch	Straß	0,6	0,3	7,2765E-09

Statistische Analysen (Regressionsanalysen Temperatur – Abfluss)

Regressionsanalyse zwischen Temperaturwerten und Abflusswerten für die Wintermonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Temperatur	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Aigen im Ennstal	0,1	0,02	0,2
Enns	Liezen	Liezen	0,4	0,2	0,0001
Enns	Schladming	Radstadt	0,1	0,004	0,6
Grundlseer-Traun	Archkogel	Bad Aussee	0,4	0,1	0,0002
Mur	Gestüthof	Tamsweg	0,1	0,02	0,2
Mürz	Kindthal	Bruck an der Mur	0,1	0,02	0,2
Pölsfluss	Pöls	Zeltweg	0,2	0,02	0,14
Salza	Gußwerk	Mariazell	0,4	0,2	0,0001
Untertalbach	Tetter	Radstadt	0,3	0,089	0,004
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Bruck an der Mur	0,3	0,1	0,001
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Weiz	0,1	0,02	0,2
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Fürstenfeld	0,02	0,0003	0,9
Kainach	Lieboch	Graz Flughafen	0,2	0,05	1
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Wörterberg	3,7875E-05	1,4345E-09	1
Mur	Graz	Graz Universität	0,3	0,07	0,0098
Mur	Mureck	Bad Radkersburg	0,3	0,08	0,007
Raab	Takkern II	Gleisdorf	0,2	0,02	0,2
Schwarzaubach	Lipsch	Graz-Flughafen	0,1	0,02	0,2

Regressionsanalyse zwischen Temperaturwerten und Abflusswerten für die Frühjahrsmonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Temperatur	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Aigen im Ennstal	0,7	0,6	5,0202E-17
Enns	Liezen	Liezen	0,8	0,7	2,3501E-25
Enns	Schladming	Radstadt	0,8	0,7	6,3058E-26
Grundlseer-Traun	Archkogel	Bad Aussee	0,9	0,8	6,1896E-32
Mur	Gestüthof	Tamsweg	0,9	0,7	1,408E-26
Mürz	Kindthal	Bruck an der Mur	0,4	0,1	0,0004
Pölsfluss	Pöls	Zeltweg	0,8	0,7	2,9851E-24
Salza	Gußwerk	Mariazell	0,1	0,01	0,3
Untertalbach	Tetter	Radstadt	0,9	0,9	1,1492E-38
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Bruck an der Mur	0,7	0,5	1,3869E-15
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Weiz	0,2	0,05	0,04
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Fürstenfeld	0,4	0,1	0,0004
Kainach	Lieboch	Graz Flughafen	0,09	0,009	0,7
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Wörterberg	0,04	0,001	0,7
Mur	Graz	Graz Universität	0,8	0,6	1,2796E-20
Mur	Mureck	Bad Radkersburg	0,7	0,5	7,5321E-14
Raab	Takkern II	Gleisdorf	0,2	0,03	0,1
Schwarzaubach	Lipsch	Graz-Flughafen	0,4	0,2	0,0002

Regressionsanalyse zwischen Temperaturwerten und Abflusswerten für die Sommermonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Temperatur	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Aigen im Ennstal	0,3	0,1	0,001
Enns	Liezen	Liezen	0,5	0,2	9,0793E-07
Enns	Schladming	Radstadt	0,5	0,3	2,50022E-07
Grundlseer-Traun	Archkogel	Bad Aussee	0,5	0,3	6,9096E-08
Mur	Gestüthof	Tamsweg	0,5	0,2	5,9301E-06
Mürz	Kindthal	Bruck an der Mur	0,2	0,06	0,02
Pölsfluss	Pöls	Zeltweg	0,5	0,3	4,1094E-07
Salza	Gußwerk	Mariazell	0,3	0,1	0,002
Untertalbach	Tetter	Radstadt	0,5	0,2	1,15887E-06
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Bruck an der Mur	0,4	0,2	2,0452E-05
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Weiz	0,3	0,08	0,007
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Fürstenfeld	0,2	0,05	0,03
Kainach	Lieboch	Graz Flughafen	0,2	0,04	0,0002
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Wörterberg	0,4	0,1	0,0002
Mur	Graz	Graz Universität	0,5	0,2	2,1271E-06
Mur	Mureck	Bad Radkersburg	0,4	0,2	7,3321E-05
Raab	Takkern II	Gleisdorf	0,2	0,05	0,04
Schwarzaubach	Lipsch	Graz-Flughafen	0,2	0,006	0,02

Regressionsanalyse zwischen Temperaturwerten und Abflusswerten für die Herbstmonate der Periode 1981–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Temperatur	r	r²	p-Wert
Stationen in der Obersteiermark					
Donnersbach	Irdning	Aigen im Ennstal	0,3	0,1	0,01
Enns	Liezen	Liezen	0,4	0,1	0,00064
Enns	Schladming	Radstadt	0,4	0,2	9,6296E-06
Grundlseer-Traun	Archkogel	Bad Aussee	0,2	0,06	0,02
Mur	Gestüthof	Tamsweg	0,3	0,1	0,008
Mürz	Kindthal	Bruck an der Mur	0,2	0,04	0,06
Pölsfluss	Pöls	Zeltweg	0,3	0,09	0,005
Salza	Gußwerk	Mariazell	0,1	0,01	0,4
Untertalbach	Tetter	Radstadt	0,6	0,3	0,08
Vordernberger-Bach	St. Peter Freienstein	Bruck an der Mur	0,2	0,05	0,04
Stationen südlich der Mur-Mürz-Furche					
Feistritz	Anger	Weiz	0,1	0,02	0,2
Ilzbach	Neudorf bei Ilz	Fürstenfeld	0,005	2,1876E-05	1
Kainach	Lieboch	Graz Flughafen	0,2	0,04	0,05
Lafnitz	Wörth an der Lafnitz	Wörterberg	0,1	0,004	0,6
Mur	Graz	Graz Universität	0,3	0,1	0,002
Mur	Mureck	Bad Radkersburg	0,3	0,1	0,007
Raab	Takkern II	Gleisdorf	0,1	0,02	0,2
Schwarzaubach	Lipsch	Graz-Flughafen	0,03	0,001	0,8

Statistische Analysen (Regressionsanalysen Abfluss – Schwebstoffgehalt)

Regressionsanalyse zwischen Abflusswerten und Schwebstoffwerten für Periode 2008–2010					
Fluss	Messstation Fluss	Messstation Schwebstoff	r	r²	p-Wert
Mur	Mureck	Mureck	0,9	0,8	8,1354E-12
Sulm	Leibnitz	Leibnitz	0,8	0,6	8,7313E-09

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (ganzjährig) bis 2050 unter der Annahme der mittleren Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere jährliche Nieder- schlags- summe in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere jährliche Nieder- schlags- summe 2050 in mm	Veränderung des Nieder- schlags in % (mittlere Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer jährlicher Abfluss in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer jährlicher Abfluss 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	1117,3	1173	5	2,54	2,9	14
Ilzbach	766,2	812	6	0,96	1,24	29
Pölsfluss	911	957	5	8,54	9,14	7
Schwarzaubach	897,3	933	4	0,97	1,12	15
Vordernberger- Bach	801	841	5	3,19	3,41	7

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (ganzjährig) bis 2050 unter der Annahme der extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere jährliche Nieder- schlags- summe in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere jährliche Nieder- schlags- summe 2050 in mm	Veränderung des Nieder- schlags in % (extreme Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer jährlicher Abfluss in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer jährlicher Abfluss 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	1117,3	1240	11	2,54	3,07	21
Ilzbach	766,2	896	17	0,96	1,56	63
Pölsfluss	911	1029	13	8,54	9,91	16
Schwarzaubach	897,3	1041	16	0,97	1,43	47
Vordernberger- Bach	801	881	10	3,19	3,57	12

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Wintermonate) bis 2050 unter der Annahme der mittleren Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Winter in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Winter 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (mittlere Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Winter in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Winter 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	179,04	188	5	1,28	1,5	17
Ilzbach	91,3	100	10	0,93	1,15	24
Pölsfluss	128,3	135	5	4,45	4,81	8
Schwarzaubach	126,4	135	7	0,95	1,1	16
Vordernberger-Bach	108	113	5	1,74	1,86	7

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Wintermonate) bis 2050 unter der Annahme der extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Winter in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Winter 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (extreme Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Winter in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Winter 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	179,04	227	27	1,28	2,32	82
Ilzbach	91,3	113	24	0,93	1,4	51
Pölsfluss	128,3	153	19	4,45	5,65	27
Schwarzaubach	126,4	154	22	0,95	1,36	43
Vordernberger-Bach	108	131	21	1,74	2,19	26

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Frühjahrsmonate) bis 2050 unter der Annahme der mittleren Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Frühjahr in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Frühjahr 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (mittlere Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Frühjahr in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Frühjahr 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	237,6	257	8	3,85	4,31	12
Ilzbach	168,6	179	6	0,99	1,23	24
Pölsfluss	198,9	211	6	10,97	11,63	6
Schwarzaubach	194,9	203	4	1,16	1,29	11
Vordernberger-Bach	166,9	177	6	4,61	4,89	6

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Frühjahrsmonate) bis 2050 unter der Annahme der extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Frühjahr in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Frühjahr 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (extreme Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Frühjahr in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Frühjahr 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	237,6	283	19	3,85	4,85	26
Ilzbach	168,6	196	16	0,99	1,49	50
Pölsfluss	198,9	229	15	10,97	12,62	15
Schwarzaubach	194,9	226	16	1,16	1,57	35
Vordernberger-Bach	166,9	190	14	4,61	5,16	12

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Sommermonate) bis 2050 unter der Annahme der mittleren Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Sommer in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Sommer 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (mittlere Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Sommer in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Sommer 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	445,6	450	1	3,1	3,22	4
Ilzbach	316,4	316,4	0	1	1	0
Pölsfluss	364,6	372	2	11,18	11,52	3
Schwarzaubach	335,6	332	-1	0,91	0,86	-6
Vordernberger-Bach	333,14	340	2	3,72	3,87	4

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Sommermonate) bis 2050 unter der Annahme der extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Sommer in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Sommer 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (extreme Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Sommer in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Sommer 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	445,6	499	12	3,1	4,03	30
Ilzbach	316,4	354	12	1	1,58	58
Pölsfluss	364,6	416	14	11,18	13,53	21
Schwarzaubach	335,6	383	14	0,91	1,45	59
Vordernberger-Bach	333,14	403	21	3,72	5,02	35

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Herbstmonate) bis 2050 unter der Annahme der mittleren Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Herbst in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Herbst 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (mittlere Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Herbst in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Herbst 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	255,2	273	7	1,92	2,36	23
Ilzbach	190	203	7	0,92	1,24	35
Pölsfluss	219,1	235	7	7,52	8,35	11
Schwarzaubach	240,5	255	6	0,86	1,1	28
Vordernberger-Bach	193	207	7	2,66	2,95	11

Mögliche Entwicklung des Niederschlags und des Abflusses (Herbstmonate) bis 2050 unter der Annahme der extremen Klimaszenarien von GOBIET et al. (2012)

Fluss	Mittlere Niederschlags-summe im Herbst in mm in der Periode 1981–2010	Mittlere Niederschlags-summe im Herbst 2050 in mm	Veränderung des Niederschlags in % (extreme Zunahme nach Gobiet et al. 2012)	Mittlerer Abfluss im Herbst in m³/sec in der Periode 1981–2010	Mittlerer Abfluss im Herbst 2050 in m³/sec	Veränderung des Abflusses in %
Donnersbach	255,2	314	23	1,92	3,15	64
Ilzbach	190	236	24	0,92	1,84	100
Pölsfluss	219,1	269	23	7,52	10	33
Schwarzaubach	240,5	286	19	0,86	1,45	69
Vordernberger-Bach	193	234	21	2,66	3,46	30

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name	Christian Semmelrock
Geburtsdatum/Ort	16. Nov 1986/Graz
Nationalität	Österreich

Ausbildung

1993 – 1997	Volksschule in Seiersberg, Österreich
1997 – 2005	Bundesgymnasium Oeversee in Graz, Österreich
2006 – 2007	Diplomstudium Jus an der Karl-Franzens Universität Graz, Österreich
2007 – 2011	Bachelorstudium Geographie an der Karl-Franzens Universität Graz, Österreich
02/2010 – 07/2010	Erasmussemester an der Universität Genf, Schweiz
2011 – 2014	Masterstudium Geographie an der Universität Wien, Österreich

Facheinschlägige Berufserfahrung

07/2005	Ferialarbeit bei der Abteilung “19A-Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft“ der Steiermärkischen Landesregierung
WiSe 2009	Teilnahme an einem European Virtual Seminar an der Open University Netherlands zum Thema „Sustainable Development“
08/2010	Ferialarbeit bei der Abteilung “19A-Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft“ der Steiermärkischen Landesregierung
09 – 11/2011	Werkvertrag bei “Forum Schulatlas”: “Endredaktionelle Durchsicht des SCHULATLAS STEIERMARK 2011 (Textteil und Kartenteil)“
02 – 06/2012	Werkvertrag bei „Umwelt-Bildungszentrum Steiermark“: „Erstellung einer digitalen Karte von Atomkraftwerken im Umkreis von bis zu 1000 km rund um die Steiermark mit Darstellung der Erdbebenregionen Europas“; „Erstellung von digitalen Bodenkarten für das Projekt „Natur Scouts Steiermark“
04 – 05/2012	Werkvertrag bei „Forum Schulatlas“: „Endredaktionelle Durchsicht des SCHULATLAS STEIERMARK 2011 (Textteil und Kartenteil)“
SoSe 2013	Tutorium bei Frau Ao.Univ.-Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann im Rahmen der Lehrveranstaltung „STEOP: Einführung in die Physiogeographie“
SoSe 2013	Tutorium bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Erich Mursch-Radlgruber im Rahmen der Lehrveranstaltung „Übungen zur Klimageographie“

WiSe 2014	Tutorium bei Frau Ao.Univ.-Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann im Rahmen der Lehrveranstaltung „STEOP-Einführung in die Physiogeographie“
SoSe 2014	Tutorium bei Frau Ao.Univ.-Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann im Rahmen der Lehrveranstaltung „STEOP: Einführung in die Physiogeographie“
SoSe 2014	Tutorium bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr.phil. Erich Mursch-Radlgruber im Rahmen der Lehrveranstaltung „Übungen zur Klimageographie“

Sprachkenntnisse/Qualifikationen

Deutsch	Muttersprache
Französisch	gut in Wort und Schrift
Englisch	sehr gut in Wort und Schrift
Spanisch	Basiskenntnisse
EDV-Kenntnisse	ECDL (European Driving Licence/2005), regelmäßige Verwendung von MS-Office Word, Excel, Powerpoint, Outlook Express/Outlook; regelmäßige Verwendung von Adobe Illustrator, ArcGIS Grundkenntnisse in Access, SPSS, Erdas Imagine, Adobe Photoshop, Adobe InDesign, Adobe Flash, SAGA, Cinema4d, ILWIS, Google SketchUp, R, Morph Age Pro, Omni Suite Pro, Pano2VR