

# Hydrologische Ökosystemleistungen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme

## Quantitative Erfassung und Darstellung mit Bayes'schen Netzwerken



### **Masterarbeit (GEO 511)**

April 2014

Autor:

**Bruno Adank**

07-704-539

Betreuer:

Andrea Ryffel, Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung PLUS, ETH Zürich, ryffel@nsl.ethz.ch  
Prof. Dr. Jan Seibert, Gruppe Hydrologie und Klima H2K, Geographisches Institut, Universität Zürich

Fakultätsvertreter:

Prof. Dr. Jan Seibert, Gruppe Hydrologie und Klima H2K, Geographisches Institut, Universität Zürich

Kontakt: Bruno Adank, Schwellstrasse 35, 8052 Zürich, badank@hotmail.com

## Zusammenfassung

Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung beeinflussen Funktion und Leistungsfähigkeit der Ökosysteme. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob sich Landnutzungs- und Klimaänderungen auf die Bereitstellung von hydrologischen Ökosystemleistungen auswirken, sich mit der Simulation langer Zeitreihen hydrologische Ökosystemleistungen quantifizieren lassen und *Bayes'sche Netzwerke* sich zur Erfassung und Darstellung hydrologischer Ökosystemleistungen der Kleinen Emme eignen.

Mittels quantitativer Methoden werden hydrologische Simulationsdaten aus zwei Klimaszenarien und drei Landnutzungsszenarien des Nationalen Forschungsprojekts 61 aufbereitet, analysiert und kategorisiert. Die Wirkungsgefüge der Ökosystemleistungen werden unter Verwendung *Bayes'scher Netzwerke* erfasst.

Die *Ökosystemleistungen Wasserkraft* und *Trinkwasser* der kleinen Emme können in *Bayes'schen Netzwerken* abgebildet werden. *Bayes'sche Netzwerke* können zur Quantifizierung der künftigen Leistungsfähigkeit angewandt werden. Aus den Prognosen für das 21. Jahrhundert kann am Untersuchungsstandort durch die *Ökosystemleistung Wasserkraft* während 87% des Jahres Strom produziert werden. Basierend auf dem heutigen Strompreis entspricht dies einer jährlichen Wertigkeit von 356'000-1'949'000 Schweizer Franken (CHF). Die *Ökosystemleistung Trinkwasser* erreicht bei minimalen und maximalen Leistungsszenarien einen monatlichen Wertebereich von 15'000-18'000 CHF bzw. 78'500-93'700 CHF.

Durch Verwendung dieser *Bayes'scher Netzwerke* zur Quantifizierung des Einflusses der künftigen Simulationsszenarien auf die Ökosystemleistungen kann gefolgert werden, dass sich die Klimaänderung auf die monatliche und saisonale Leistungsfähigkeit der hydrologischen Ökosysteme auswirkt, im Gegensatz dazu ist eine Beeinflussung durch die Landnutzungsänderungen nicht erkennbar.

# Inhalt

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>I</b>
<b>INHALT</b>	<b>II</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>VI</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1. Forschungsstand	1
1.2. Motivation und Forschungsfragen	5
<b>2. METHODEN</b>	<b>6</b>
2.1. Untersuchungsgebiet und seine Ökosystemleistungen	6
2.2. Hydrologische Modellierung	8
2.3. Bayes'sches Netzwerk	10
2.4. Strukturelle Erfassung der Ökosystemleistungen	12
2.5. Software	15
<b>3. HYDROLOGISCHE SIMULATION</b>	<b>16</b>
<b>4. DATENAUFBEREITUNG UND IMPLEMENTIERUNG</b>	<b>19</b>
4.1. Abfluss	19
4.2. Grundwasserneubildung	20
4.3. Hochwasser	26
<b>5. RESULTATE UND DISKUSSION</b>	<b>30</b>
5.1. Auswirkungen der Landnutzungsszenarien auf den Abfluss	30
5.2. Auswirkung der Klimaszenarien auf den Niederschlag	31
5.3. Vereinfachter Ansatz zur Hochwasserprognose	36
5.3.1. Quantil Methode	36
5.3.2. Johnson Verteilung	39
5.3.3. Vergleich mit Referenzwerten	40
5.3.4. Diskussion zur Verwendung vereinfachter Prognoseansätzen	41
5.4. Hydrologische Ökosystemleistung Wasserkraft	43
5.4.1. Bayes'sche Netzwerkstruktur	43
5.4.2. Kategorisierung des Abflusses	44
5.4.3. Vom Niederschlag zur Stromproduktion	46
5.4.4. Diskussion der Resultate in einem weiteren Kontext	48
5.5. Hydrologische Ökosystemleistung Trinkwasser	50
5.5.1. Bayes'sche Netzwerkstruktur	50
5.5.1. Vom Niederschlag zum Trinkwasser	53

5.5.2.	Monetarisierung	59
5.5.3.	Diskussion der Resultate in einem weiteren Kontext	60
<b>5.6.</b>	<b>Beurteilung zur Implementierung Bayes'scher Netzwerke</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>VERBESSERUNGSANSÄTZE UND WEITERE FORSCHUNGSFRAGEN</b>	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>FAZIT</b>	<b>69</b>
	<b>SCHLUSSWORT UND DANK</b>	<b>72</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>73</b>
	<b>PERSÖNLICHE ERKLÄRUNG</b>	<b>83</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kaskadensystem zur Verlinkung des Ökosystems mit dem menschlichen Wohlbefinden (adaptiert nach Haines-Young und Potschin (2010) und Maltby (2009) in de Groot et al. (2010)).....	3
Abbildung 2: Übersicht über das hydrologische Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Roter Punkt = Rasterzelle 7985. Blauer Punkt = Standort der Grundwasserbilanzierung (Quelle: Bundesamt für Landestopografie).....	7
Abbildung 3: Landnutzungsszenarien der veränderten Waldflächen mit 20% und 40% zusätzlicher Waldfläche im Einzugsgebiet des Oberlaufs (Quelle: Andrea Ryffel).....	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges der Ökosystemleistung Wasserkraft.....	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges Wirkungsgefüge der Ökosystemleistung Trinkwasser.....	15
Abbildung 6: Conditional Probability Table des Knotens MonatsGWNeubildung mit manuell erfolgter Anpassung der bedingten Wahrscheinlichkeiten.....	23
Abbildung 7: CPT des Knotens GWBereitstellung mit manuell erfolgter Anpassung der bedingten Wahrscheinlichkeiten.....	24
Abbildung 8: Pseudo Skript zur Implementierung der Johnson Verteilung zur Berechnung von Hochwasserabflüssen bei zu erwartenden Wiederkehrintervallen.....	29
Abbildung 9: Einfluss der Landnutzungsszenarien auf die nutzbare Abflussklasse 3-100m <sup>3</sup> /s unter dem Klimaszenario regcm3 ab 2050 (Simulationsjahr 1).....	30
Abbildung 10: Einfluss der Landnutzungsszenarien auf die nutzbare Abflussklasse 3-100m <sup>3</sup> /s unter dem Klimaszenario remo ab 2050 (Simulationsjahr 1). .....	31
Abbildung 11: Vergleich von Niederschlagszeitreihen der Klimaszenarien von 2000-2100.....	32
Abbildung 12: Jahresverteilung des mittleren Monatsniederschlag des Klimaszenarios regcm3 mit Simulationsbedingter Streuung.....	32
Abbildung 13: Jahresverteilung des mittleren Monatsniederschlags des Klimaszenarios remo mit Simulationsbedingter Streuung.....	33
Abbildung 14: Vergleich der mittleren Monatsniederschläge aus den Simulationsdaten für die beiden Klimamodelle regcm3 und remo zu Normperioden (MeteoSchweiz, 2014a, 2014b).....	34

Abbildung 15: Vorhersage der Niederschlagsentwicklung in Prozent der vier Jahreszeiten (DJF: Dezember-Januar-Februar; MAM: März-April-Mai; JJA: Juni-Juli-August; SON: September-November)mit den Zeiträume 2020-2049 (blau), 2045-2074 (orange) und 2070-2099 (grün)(Quelle: CH2011). .....	35
Abbildung 16: Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft mit allen beteiligten Nodes. ....	43
Abbildung 17: Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft mit Resultat unter Berücksichtigung aller Szenarien. ....	47
Abbildung 18: Bayes'sches Netzwerk der Bereitstellungsseite der Grundwasserbilanzierung. ....	50
Abbildung 19: Bayes'sches Netzwerk der Verbraucherseite der Grundwasserbilanzierung mit Grundwasserbilanzierung. ....	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Szenarien der Simulierung .....	17
Tabelle 2: Niederschlagsklassen zur Berechnung Niederschlagsklassenverteilung. ....	21
Tabelle 3: Niederschlagsklassenverteilung aller Monate unter Klimaszenarios regcm3 und remo und heutigem Landnutzungsszenario current. Die Parametrisierung der 50 Simulationsdurchläufe führt zu Variabilität der Kategorisierung.....	23
Tabelle 4: Zusammenstellung Wasserverbrauch Schweizer Haushalte (Bundesamt für Statistik BFS, 2013; Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW & Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 2001).....	24
Tabelle 5: CPT des Knoten Monatswasserverbrauch. Zustand Sparpotential_140 entspricht einem Pro Kopf Wasserverbrauch von 4258l/Monat. Dem gegenüber steht der Heute_160 Zustand von 4928l/Monat. ....	24
Tabelle 6: Versorgungspotential des Grundwasserbilanzierungsabschnitts VI. Berechnet auf Grundlage "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme" (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990). ....	25
Tabelle 7: CPT des Knotens GWBalance. Enthält die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bereitstellungs- und Nachfrageseite.....	26
Tabelle 8: Übersicht der Hochwasser-Wiederkehrintervalle, deren Überschreitungswahrscheinlichkeit und entsprechendes Quantil.....	28
Tabelle 9: Mittlere Monatsniederschläge der Klimaszenarien regcm3 und remo, Normperiode 1961-1990 und Normperiode 1981-2010 (MeteoSchweiz, 2014a, 2014b).....	34
Tabelle 10: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr_regcm3.....	37
Tabelle 11: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus20_regcm3.....	37
Tabelle 12: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus40_regcm3.....	37
Tabelle 13: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr_remo.....	38

Tabelle 14: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus20_remo.....	38
Tabelle 15: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus40_remo.....	38
Tabelle 16: Hochwasserabflüsse nach Johnson Verteilung für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr_regcm3.....	39
Tabelle 17: Hochwasserabflüsse nach Johnson Verteilung für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr_remo.....	40
Tabelle 18: Hochwasserabflussmengen für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall berechnet mit AMF Methode mit GEV Kurvenanpassung (Eppler 2014) und AMF Methode mit Log-Pearson-III (Bundesamt für Umwelt BAFU 2013).....	41
Tabelle 19: Mittelwerte der Abflussklassierung aller Szenarien über ein Jahr.....	44
Tabelle 20: Standardisierte Mittelwerte der Abflussklassen aller Szenarien.....	45
Tabelle 21: Wasserkraftanlagen an der Kleinen Emme (mündliche Information von M. Scherrer (Wasserkraftwerk Ettisbühl), 21.11.2013; H.U. Ledermann (Wasserkraftwerk Thorenberg), 22.11.2013; Bundesamt für Energie BFE (2013)).....	46
Tabelle 22: Bildung Abflussklassen aus Abflussmenge.....	47
Tabelle 23: Monetarisierung der Ökosystemleistung Wasserkraft durch Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft.....	48
Tabelle 24: Grundwasserbilanzierung des Monats April bei hohen Niederschlägen.....	54
Tabelle 25: Grundwasserbilanzierung des Monats Juni bei hohen Niederschlägen.....	54
Tabelle 26: Grundwasserbilanzierung des Monats August bei hohen Niederschlägen.....	54
Tabelle 27: Grundwasserbilanzierung des Monats September bei hohen Niederschlägen.....	55
Tabelle 28: Grundwasserbilanzierung des Monats Mai bei mittleren Niederschlägen.....	55
Tabelle 29: Grundwasserbilanzierung des Monats Juli bei mittleren Niederschlägen.....	56
Tabelle 30: Grundwasserbilanzierung des Monats Oktober bei mittleren Niederschlägen.....	56
Tabelle 31: Grundwasserbilanzierung des Monats Januar bei tiefen Niederschlägen.....	57
Tabelle 32: Grundwasserbilanzierung des Monats Februar bei tiefen Niederschlägen.....	57
Tabelle 33: Grundwasserbilanzierung des Monats März bei tiefen Niederschlägen.....	57
Tabelle 34: Grundwasserbilanzierung des Monats November bei tiefen Niederschlägen.....	58

Tabelle 35: Grundwasserbilanzierung des Monats Dezember bei tiefen Niederschlägen. ....	58
Tabelle 36: Grundwasserneubildung gemäss Schlussbericht "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme" (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990). ....	59
Tabelle 37: Grundwasserverlust gemäss Schlussbericht "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme"(Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990). ....	59
Tabelle 38: Monetarisierung der maximalen, ausgeglichenen und minimalen Grundwasserneubildungsmenge aller Szenarien. ....	60

## 1. Einleitung

Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung beeinflussen auf direkte und indirekte Weise die Ökosysteme der Erde (TEEB 2009; IPCC 2007; Brauman, Daily, Duarte & Mooney 2007). Die veränderten Rahmenbedingungen beeinflussen Funktion und Leistungsfähigkeit der Ökosysteme. Grunewald & Bastian (2013), Millenium Ecosystem Assessment (2005) und TEEB (2010) weisen auf die Bedeutung der Erfassung von Ökosystemfunktionen und-leistungen zur Prognose künftiger Änderungen hin. Des Weiteren weisen sie auf die methodische Vielfalt der Vorgehensweisen zur Umsetzung ihrer konzeptionellen Grundstrukturen hin. Durch limitiertes Prozessverständnis und Defizite der Datenqualität und- verfügbarkeit entstehen Unsicherheiten.

Zur quantitativen Erfassung und Darstellung hydrologischer Ökosystemleistungen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme werden teilweise hydrologische Simulationsdaten aus den im Rahmen des Nationalen Forschungsprojekts 61 (NFP 61) durchgeführten hydrologischen Simulationen des Zeitraum 2000-2100 verwendet (Schweizerischer Nationalfonds SNF 2014). Die dabei verwendeten Modelle dienen zur Simulation der Auswirkungen eines stattfindenden Klimawandels und der damit verbundenen Landnutzungsveränderungen auf die hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes. Die Simulationen führen zu einer hohen zeitlichen und räumlichen Datenauflösung. Diese regionalisierten Informationen zu Dauer und Intensität der Niederschläge ermöglichen, Abflussganglinien und Grundwasserneubildung abzuschätzen.

Zur Erfassung und Quantifizierung mit Unsicherheiten behafteter Ökosystemleistungen schreiben Landuyt et al. (2013) und Nash (2013) der Methode der *Bayes'scher Netzwerke* ein hohes Potential zu. Der Aufbau und die Umsetzung räumlich spezifischer *Bayes'scher Netzwerke* ermöglicht die strukturelle Nachahmung komplexer Wirkungsgefüge. Dadurch sollen Ökosystemleistungen und deren Veränderungen quantifiziert und durch passende Bewertungsmethoden mit einem realen Gegenwert in Verbindung gebracht werden.

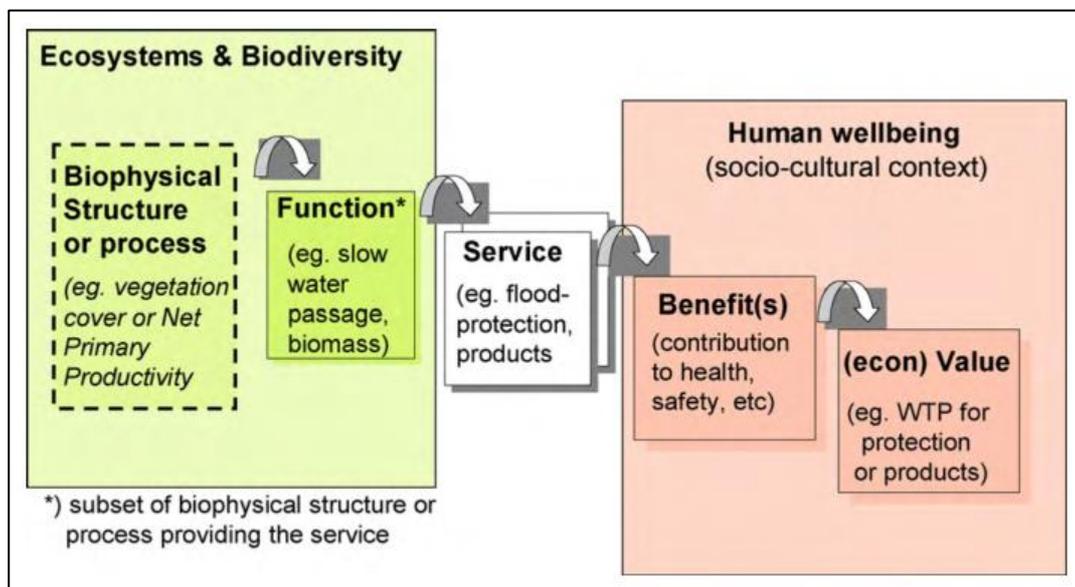
### 1.1.Forschungsstand

Um die Klimaentwicklung in ihrer Grösse und Richtung besser abschätzen zu können, werden die historischen klimatischen Veränderungen auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Ebenen untersucht (Casty, Wanner, Luterbacher, Esper, et al. 2005; Zhang, Liu, Xu, Xu, et al. 2006). Es wird eine möglichst exakte Prognose für die

Entwicklung der Parameter Temperatur, Niederschlag und Strahlungsbilanz angestrebt (Bosshard, Kotlarski, Ewen & Schär 2011; CH2011 2011; Christensen & Christensen 2002; IPCC 2007; Milly, Wetherald, Dunne & Delworth 2002; Scherrer 2004; Stakhiv & Stewart 2010; Viviroli, Zappa, Schwanbeck, Gurtz, et al. 2009). Der Einsatz hochkomplexer Modelle zur Verarbeitung umfangreicher Daten aus Zeitreihen führt zu einem Konsens über die Richtung der Klimaentwicklung. Das unterschiedliche Prozessverständnis sowie die divergierenden Untersuchungsansätze und Datengrundlagen sowie führen zu grossen Streuungen des Ausmasses und des zeitlichen Ablaufs der Klimaentwicklung (Allen, Stott, Mitchell, Schnur, et al. 2000; Dessai, Hulme, Lempert & Pielke 2009; Gyalistras 2002; Jones, Cox & Huntingford 2003; Palmer 2000). Die Kombination globaler und regionaler Klimamodelle führt zu einer Steigerung der räumlichen und zeitlichen Modellauflösung. Über die Temperaturentwicklung haben sich verlässliche regionale Voraussagen etabliert. Trotz Anwendung leistungsfähigerer numerischer Wettervorhersagemodelle zur Simulation des hydrologischen Kreislaufes sind Parameter wie Grundwasser und Bodensättigung schwer prognostizierbar. Die Modellierungsunsicherheiten, verursacht durch die lokalen klimatischen und topographischen Gegebenheiten, erschweren die Quantifizierung der Entwicklung von Niederschlag, Schneefall, Abfluss und Grundwasser (Beniston 2012; Palmer et al. 2005). Als besonders problematisch stufen Kavetski et al. (2003) dabei die Prognostizierbarkeit von Niederschlagsdauer und -intensität ein. Trotz limitierter punktueller Erfassung fließen die Daten in hydrologische Modelle ein. Beim Vergleichen beobachteter und simulierter Abflussmengen wird häufig unterschlagen, dass die Methode zur Messung des Niederschlags bereits grosse Unsicherheiten mit sich bringt.

Trotz Anwendung derselben Klimamodellierungsmethode führt die Verwendung unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Ausgangsszenarien zu divergierenden Resultaten. Durch Einführung der auf der Bayes'schen Statistik beruhenden Methoden zur Unsicherheitsanalyse wird es möglich, Simulationsresultate besser zu quantifizieren und zu vergleichen (Jin, Xu, Zhang & Singh 2010; Kavetski, Kuczera & Franks 2006; Min, Hense, Paeth & Kwon 2004; Min 2005; Rogelj, Meinshausen & Knutti 2012; Tomassini, Reichert, Knutti, Stocker, et al. 2007). Die Bayes'schen Verfahren ermöglichen selbst bei unvollständiger Datengrundlage eine qualitative Parameterabschätzung. So können Hochwasser-Modellierungen in Gebieten mit ungenügender Anzahl an Messstationen oder zu kurzen Messreihen durchgeführt werden (Engeland & Gottschalk 2002; Gaume et al. 2010; Papadakis & Tsionas 2012; Reis & Stedinger 2005).

Mit der hauptsächlich in den 1990er Jahren an Bedeutung gewinnenden Thematik der Ökosystemleistungen wird eine vielschichtige und interdisziplinäre Betrachtungsweise der physischen Umwelt initiiert (de Groot, Alkemade, Braat, Hein, et al. 2010). Es sind die natürlichen Ökosysteme und ihre Arten, die die Auswirkungen des Menschenlebens zu ertragen haben und es überhaupt erst ermöglichen. Das Konzept der Ökosystemleistungen beinhaltet Abgabe, Bereitstellung, Schutz und Erhaltung von Gütern und Leistungen, deren Vorhandensein vom Menschen als notwendig erkannt wird (Daily 1997). Eine häufig aufgegriffene Thematik behandelt das Verständnis über die Verbindung zwischen Ökosystemfunktionen und dem menschlichen Wohlbefinden. So verweist Grunewald & Bastian (2013) auf den von Haines-Young & Potschin (2010) und Maltby (2009) eingeführten Ansatz des Kaskadensystems (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Kaskadensystem zur Verlinkung des Ökosystems mit dem menschlichen Wohlbefinden (adaptiert nach Haines-Young und Potschin (2010) und Maltby (2009) in de Groot et al. (2010)).**

Gemäss deren Feststellungen erfüllen Ökosysteme und Biodiversität durch ihre biophysikalischen Strukturen und Prozesse spezifische Funktionen, die als Zwischenschritte zur Generierung der Leistungen einzuordnen sind. Erst die Nachfrage oder Inanspruchnahme dieser Leistungen durch eine Gesellschaft erzeugt einen Nutzen und eine damit verbundene Inwertsetzung der Ökosystemleistung (de Groot, Alkemade, Braat, Hein & Willemsen 2010; Grunewald & Bastian 2013). Die entstehenden Ökosystemleistungen lassen sich in vier Klassen eingliedern: (1) Versorgungsleistungen, (2) Regulationsleistungen, (3) kulturelle Dienstleistungen und (4) unterstützende Leistungen (Millenium Ecosystem Assessment 2005). Gemäss Grunewald und Bastian (2013) unterliegt die Bereitstellung von Ökosystemleistungen den sich ständig

verändernden, geobiophysikalischen Strukturen und Prozessen. Dieser Wandel wird durch Landnutzungsänderungen und sich ändernde klimatische Rahmenbedingungen initiiert. Für tiefergehende Ausführungen zu den bei Erfassung von Ökosystemleistungen herangezogenen Indikatoren Systemen und Bewertungsmethoden wird auf Chee (2004), de Groot et al. (2010), Grunewald & Bastian (2013), Staub & Ott (2011) und TEEB (2010) verwiesen.

Brauman et al. (2007) zufolge lässt sich jede hydrologische Ökosystemleistung durch die vier hydrologischen Eigenschaften: (1) Quantität, (2) Qualität, (3) Ort und (4) Timing erfassen. Darauf aufbauend können die räumlich und zeitlich ungleichen Auswirkungen der veränderten Ökosystemleistungen beurteilt werden. Während eine monetäre Inwertsetzung nicht zwingend angestrebt wird, erweist sie sich aber als nützliches Instrument zur Vergleichbarkeit von Szenarien (Brauman, Daily, Duarte & Mooney 2007).

Die *Bayes'schen Netzwerke* finden nicht nur Anwendung bei der Quantifizierung von Klimamodellierungsunsicherheiten. Die klimawandelbedingten Veränderungen der physischen Umwelt drücken sich auch durch Wandlungen in Gefährdungsbereich-, intensität und -häufigkeit aus. So befassen sich zum Beispiel Grêt-Regamey & Straub (2006) mit der Möglichkeit zur Bewertung des Lawinenrisikos durch Verbindung eines *Bayes'schen Netzwerks* mit einem Geographischen Informationssystem. Andere Forschungsansätze gehen dahin, auftretende Unsicherheiten der Klimamodellierungen und Hochwasserabschätzungen zu beziffern (Engeland & Gottschalk 2002; Kavetski, Franks & Kuczera 2003; Reis & Stedinger 2005).

Insbesondere beim Management natürlicher Ressourcen greifen Entscheidungsträger zunehmend auf die Fähigkeiten der Entscheidungshilfen *Bayes'scher Netzwerke* zurück. So finden sich zu unterschiedlichen Ökosystemen Forschungsansätze, deren Ziel es ist, trotz einer raren Datengrundlage und eines unvollständigen Prozessverständnisses, durch *Bayes'sche Netzwerke* eine nachhaltigere Ressourcennutzung zu erzielen (Daily et al. 2009; Grêt-Regamey & Kytzia 2007; Grêt-Regamey, Brunner, Altwegg & Bebi 2013; de Groot, Alkemade, Braat, Hein & Willemsen 2010; Kosoy, Martinez-Tuna, Muradian & Martinez-Alier 2007; Kuikka et al. 1999; McCann, Marcot & Ellis 2006; Nash et al. 2013).

## 1.2. Motivation und Forschungsfragen

Zur Quantifizierung einer Ökosystemleistung muss deren Struktur richtig erkannt und erfasst werden. Bei einer Abbildung der Realität entstehen durch fehlendes Wissen und Prozesssimplifizierung Unsicherheiten. Diese wirken sich direkt auf die Quantifizierung aus. Dies auszublenden, wäre unangebracht, müssen doch vielmehr Methoden gefunden werden, um mit diesen Unsicherheiten möglichst einfach und zielorientiert umzugehen. Ein dabei immer häufiger angewandter Ansatz zur Erfassung von Ökosystemleistungen und ihren variierenden Rahmenbedingungen bedient sich der Vorteile der Bayes'schen Statistik und *Bayes'scher Netzwerke*.

Landuyt et al. (2013) vergleichen diverse Bayes'sche Netzwerkansätze zur Erfassung und Quantifizierung von Ökosystemleistungen miteinander, indem sie deren Stärken, Schwächen, Gefahren und Optionen aufzeigen. Trotz einer Zunahme der Forschungstätigkeit in dieser Disziplin bleibt die explizite räumliche Anwendung dieser Methoden nahe zu unerforscht.

In der vorliegenden Arbeit werden dazu die folgenden Fragenkomplexe untersucht:

1. Wirken sich Landnutzungs- und Klimaänderungen auf die Bereitstellung von hydrologischen Ökosystemleistungen aus?
2. Wie lassen sich mit der Simulation langer Zeitreihen hydrologische Ökosystemleistungen quantifizieren?
3. Eignen sich *Bayes'sche Netzwerke* zur Erfassung und Darstellung hydrologischer Ökosystemleistungen der Kleinen Emme?

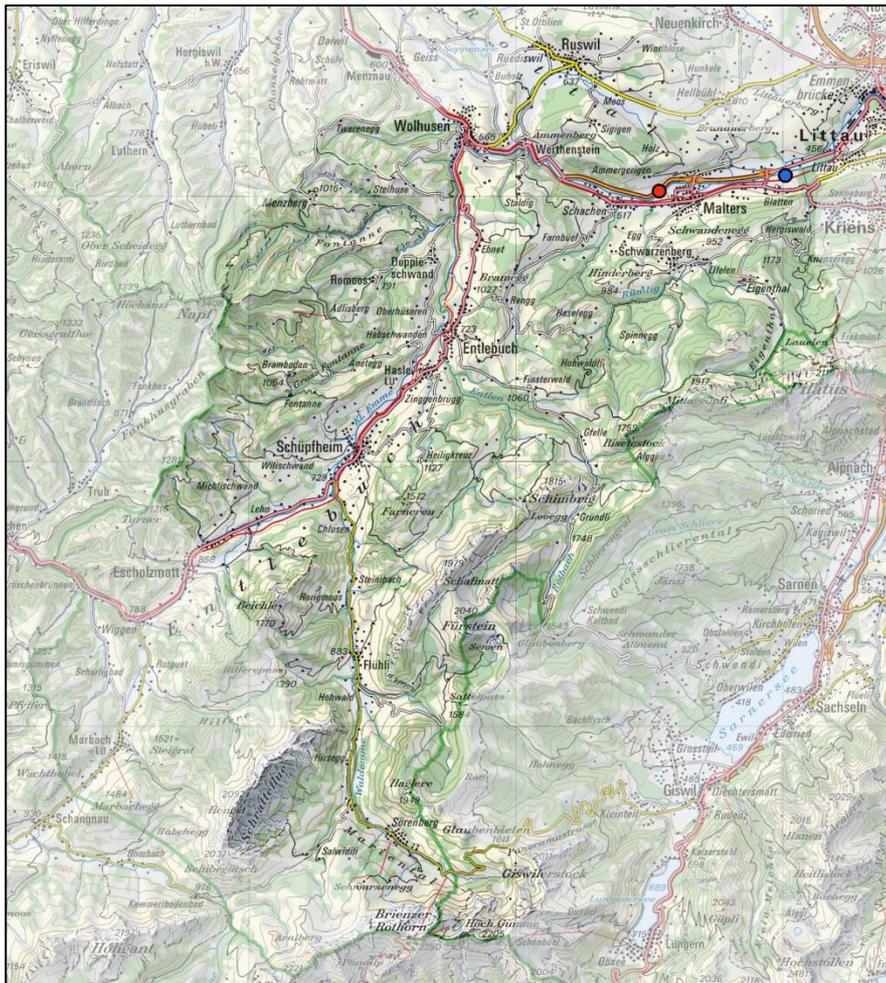
## 2. Methoden

Um dieser Arbeit zugrunde liegende Fragestellungen zu erarbeiten werden verschiedene Methoden angewendet. Die Auswirkungen der verwendeten Klima- und Landnutzungsszenarien auf die hydrologischen Parameter Niederschlag und Abfluss werden durch zeitliche und quantitative Analysen festgehalten. Dies erlaubt eine quantitative Erfassung der Ökosystemleistung. Dabei erkannte Muster und Schwellenwerte werden für die Weiterführung der Arbeit benötigt. Das vorhandene hydrologische Prozessverständnis ermöglicht den Aufbau spezifischer *Bayes'scher Netzwerke* mit deren Hilfe es möglich wird, die komplexen Wirkungsgefüge graphisch darzustellen und die Szenarien bedingten Veränderungen der Ökosystemleistungen zu quantifizieren. Dabei ist es möglich, aus empirischen Daten gewonnenes Wissen mit Expertenwissen zu Bereichen mit ungenügender Datenverfügbarkeit zu kombinieren. Die Auslese einer adäquaten Monetarisierungsmethode befähigt den quantifizierten Ökosystemleistungen, einen realen Gegenwert zu zusprechen.

### 2.1. Untersuchungsgebiet und seine Ökosystemleistungen

Die Beschreibung des Untersuchungsgebietes stützt sich in weiten Teilen auf Stadelmann & Lovas (2000). Das voralpine Fließgewässer *Kleine Emme* verläuft ausgehend vom Quellgebiet am Briener Rothorn auf 2350m.ü.M. entlang dem Talverlauf des Entlebuch und entströmt nach 60 Kilometern bei Emmenbrücke in die Reuss. Durch ihre Zuflüsse aus Waldemme, Wiss Emme, Entlen, Fontannen, Rümpling und Rängenbach umfasst sie ein Einzugsgebiet von 478km<sup>2</sup>, was einem viertel der Fläche des Kantons Luzern entspricht. Dieses Gebiet bietet Lebens- und Arbeitsraum für 35'000 Personen (Umwelt und Energie UWE 2014). Der Oberlauf der *Kleinen Emme* weist eine geringe bis mittlere anthropogene Beeinflussung auf und trägt mit seinen teilweise noch ursprünglichen Charakter viel zu einem natürlichen Landschaftsbild bei. Zusammen mit dem im Rahmen des UNESCO-Biosphäre-Entlebuch Projekt aktiv stattfindenden Erleben des Gewässers als natürlicher Lebens- und Erholungsraumes kommt es zu einer gesteigerten *Ökosystemleistung Erholung* der *Kleinen Emme*. Die langfristige Nutzung des Potentials zur Energiegewinnung durch Wasserkraftanlagen löst eine gesteigerte anthropogene Beeinflussung des Unterlaufes ab Wolhusen aus. Die *Ökosystemleistung Wasserkraft* im Gebiet der *Kleinen Emme* wird hauptsächlich durch die klimatisch bedingte Quantität der Abflussmengen geprägt. Gerade die besonderen geologischen Gegebenheiten der Talschaft Entlebuch beeinflussen weitere Ökosystemleistungen. Reagiert doch der Wildbach *Kleine Emme* mit geringer bis mittlerer Wasserführung durch die lehmigen

Flyschböden des Entleuchs bei plötzlichen Starkniederschlägen mit rasantem Anschwellen der Abflussmengen (Umwelt und Energie UWE 2014). Die Entwicklung der *Ökosystemleistung natürliche Abflussregulierung* ist unsicher, da einerseits die künftige Niederschlagsvariabilität der Einzugsgebiete durch regionale Schwankungen geprägt sind und der Effekt der Landnutzungsänderungen auf das Abflussverhalten nicht eindeutig bestimmt ist (Beniston 2012; Gyalistras 2002; MeteoSchweiz 2013; Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.) 2011). Aufgrund der geologischen Entstehungsgeschichte werden im Bereich der Gemeinde Malters und Littau mächtige Schotterablagerungen vermutet (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990), deren Vorhandensein sich positiv auf die *Ökosystemleistung Trinkwasser* auswirken. Als treibende Kraft der Grundwasserbildung werden der Gebietsniederschlag und damit verbundener Abflussmenge identifiziert.



**Abbildung 2: Übersicht über das hydrologische Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Roter Punkt = Rasterzelle 7985. Blauer Punkt = Standort der Grundwasserbilanzierung (Quelle: Bundesamt für Landestopografie).**

## 2.2. Hydrologische Modellierung

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Szenarien entstammen dem Projekt HYDROSERV, das Teil des Nationalen Forschungsprogramm 61 ist.

### Landnutzungsszenarien

In den Landnutzungsszenarien wurde nur die potenzielle Veränderung der Waldfläche im Oberlauf der Kleinen Emme berücksichtigt, wo eine Ausdehnung der Waldfläche am wahrscheinlichsten ist. Ausgehend von der heutigen Waldfläche von 35% erarbeitete Andrea Ryffel drei Szenarien mit 20%, 40% und 60% zusätzlicher Waldfläche. Die Szenarien wurden mit einer räumlich expliziten multikriteriellen Entscheidungsanalyse berechnet. Gestützt auf Literatur und Expertenwissen wurden klimatische, topografische, ökologische und sozioökonomische Faktoren berücksichtigt. Wegen des grossen Rechenaufwandes wurde die hydrologische Modellierung mit TOPKAPI nur für die Szenarien *current* (112km<sup>2</sup> Wald), *plus20* (134.4km<sup>2</sup> Wald) und *plus40* (156.8 km<sup>2</sup> Wald) durchgeführt (schriftliche Information von Andrea Ryffel, 11.04.2014).

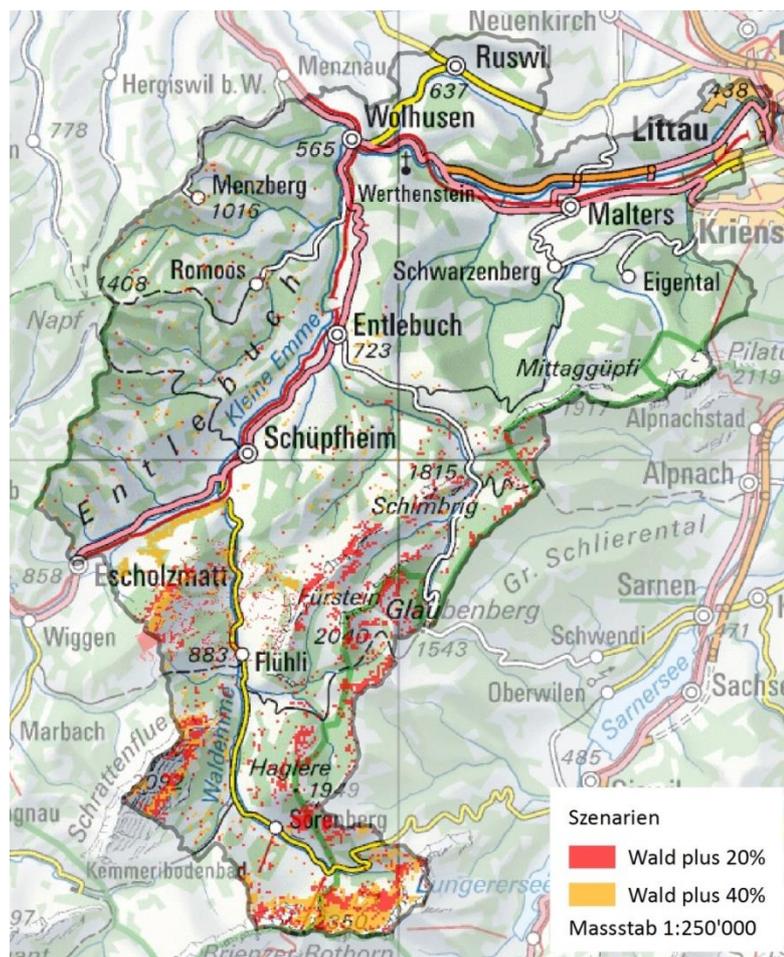


Abbildung 3: Landnutzungsszenarien der veränderten Waldflächen mit 20% und 40% zusätzlicher Waldfläche im Einzugsgebiet des Oberlaufs (Quelle: Andrea Ryffel).

### *Klimaszenarien*

Unter Verwendung des hydrologischen Modelles *TOPKAPI* wurden zwei sich unterscheidende regionale Klimamodelle *regcm3* und *remo* verwendet, welche auf dem globalen Klimamodell *ECHAM5* basieren (Bosshard, Kotlarski, Ewen & Schär 2011). Die regionalen Klimamodelle verwenden das Emissionsszenario A1B, das einer Klimaprognose mit raschem Wirtschaftswachstum entspricht. Zudem wird die Weltbevölkerung ab Mitte des 21. Jahrhunderts abnehmen und eine schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien vollzogen. Weiter wird dem Szenario eine ausgeglichene Energiezusammensetzung nachgesagt (IPCC 2007). Erst die Verwendung regionaler Klimamodelle erlaubt (1) eine angemessene Wiedergabe der regionalen, klimatischen Variationen, (2) die Berücksichtigung komplexer Topographien ohne auftreten von Glättungseffekten und (3) eine genügend feinkalierte Modellierungsauflösung der kleinräumigen, atmosphärischen Prozesse, wie Niederschlag und Wetterfronten (CH2011 2011). Für weiterführende Literatur zu physikalischen Parametrisierung und Entwicklungsgeschichte der Klimaszenarien *regcm3* und *remo* wird auf Jacob (2001), Jacob & Podzun (1997) und Pal et al. (2007) verwiesen. Eine Gegenüberstellung geläufiger Downscaling Methoden bei hydrologischen Modellierungen findet sich in Fowler, Blenkinsop & Tebaldi (2007).

Diese Klimaszenarien kennzeichnen sich durch Niederschlagsregime, deren zeitliche Verteilung und Intensität sich in ihrer Ausprägung unterscheiden. Der hydrologische Parameter Niederschlag wird zur Datenaufbereitung aus den Simulationsdaten für den Untersuchungsstandort (siehe Abbildung 2: Rasterzelle 7985) extrahiert. Durch ein entsprechend konstruiertes R-Skript werden die Niederschlagswerte aller sechs Szenarien aus der Spalte *Perc* entnommen. Eine Anpassung der Schleifen-Funktion ermöglicht eine effiziente Dataframe-Erstellung. Diese Datenframes enthalten nur noch die Niederschlagswerte der 50 Simulationen. Die zugehörigen Zeitstempel bestehen aus den vier Spalten Jahr, Monat, Tag und Stunde werden angehängt. Dies lässt eine zeitliche Aggregation entlang der Zeitreihen zu. Das geschriebene R-Skript summiert die auf Stundenbasis simulierten Niederschlagsereignisse zu mittleren Monatsniederschlägen mit der Einheit [mm/m<sup>2</sup>/Monat] auf. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wird nur der für beide Klimaszenarien verwendete Simulationszeitraum der Jahre 2050-2100 untersucht.

Gerade der Parameter Niederschlag weist eine grosse natürliche Variabilität auf. Diese Schwankung kann dem klimawandelbedingten Entwicklungstrend entsprechen oder

diesen gar übertreffen. Dieser Effekt der Modellunsicherheit ist bis ins Jahr 2050 erkennbar (CH2011 2011; Hawkins & Sutton 2009).

## 2.3. Bayes'sches Netzwerk

### *Bayes'sche Statistik*

Die in diesem Abschnitt aufgegriffenen mathematischen und statistischen Grundlagen basieren auf der Arbeit „Essay Towards Solving A Problem In Doctrine Of Chances“ des englischen Mathematikers Thomas Bayes (1702-1761) (Bayes 1763). Entgegen des von Cox (1946) in seiner Arbeit „Wahrscheinlichkeit, Häufigkeit und begründeten Erwartungen“ verwendeten frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriffs beruft sich Bayes (1763) auf einen Wahrscheinlichkeitsbegriff der relativen Häufigkeiten. Die damit verbundene Einführung des *Bayes'schen Wahrscheinlichkeitsbegriff* und des *Bayes Theorem* bilden eine hervorragende Basis, um mit Modellen zu arbeiten, welche mit Unsicherheiten behaftet sind. Aus diesem Grund werden solche Modelle auch unter den Begriffen Bayes'sche- oder Wahrscheinlichkeitsnetzwerke verwendet (Kjaerulff & Madsen 2013; Pearl 1988).

### *Bayes'scher Wahrscheinlichkeitsbegriff*

Die drei Basis-Axiome der Wahrscheinlichkeitstheorie werden übernommen:

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (1)$$

$$P(\text{tritt sicher ein}) = 1 \quad (2)$$

$$P(A \text{ oder } B) = P(A) + P(B) \quad \text{bei sich gegenseitig ausschliessenden } A \text{ und } B \quad (3)$$

Unter der Voraussetzung, dass  $A$  und  $B$  unabhängig von einander sind

$$P(A|B) = P(A) \quad (4)$$

und  $A$  und  $B$  als bedingt unabhängig erkannt werden

$$P(A|B, C) = P(A|C) \quad (5)$$

kann die bedingte Wahrscheinlichkeit folgendermassen formuliert werden:

$$P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)} \quad (6)$$

### *Bayes'sches Theorem*

Gemäss Bayes (1763), Kjaerulff & Madsen (2013), Schamm (2014) und Pearl (1988) beschreibt das Bayes'sche Theorem den Zusammenhang mehrerer Zufallsvariablen und ihren bedingten Abhängigkeiten mit folgender Formel:

$$P(C|D) = \frac{P(D|C) \cdot P(C)}{P(D)} \quad (7)$$

Wobei

$P(C D)$	bedingte Wahrscheinlichkeit für Eintreten von Event C unter Annahme D A-posteriori Wahrscheinlichkeit
$P(D C)$	bedingte Wahrscheinlichkeit für Eintreten von Event D unter Annahme C
$P(C)$	A-priori-Wahrscheinlichkeit für Vorhanden sein von Event C
$P(D)$	A-priori-Wahrscheinlichkeit für Vorhanden sein von Event D

Die Umkehrbarkeit des Bayes'schen Theorems ermöglicht es, Schlussfolgerungen in beide Richtungen vorzunehmen (Bayes 1763; Kjaerulff & Madsen 2013; Schamm 2014; Pearl 1988).

### *Bayes'sches Netzwerk*

Ein *Bayes'sches Netzwerk*, bestehend aus zwei Strukturelementen, wird als ein azyklischer, gerichteter Graph beschrieben. Die enthaltenen *Nodes* (Variablen) werden durch ihre Ausprägung der *States* (Zustände) beschrieben. *Edges* (Kanten) verbinden und beschreiben Kausalzusammenhänge und Richtung der Abhängigkeit zwischen *Nodes*. Das *Bayes'sche Netzwerk* wird zur Darstellung von unabhängigen und bedingt unabhängigen Variablen verwendet, deren Beziehungen zueinander eindeutig, aber deren Kausalzusammenhänge nicht immer eindeutig quantifizierbar sind. Dabei kann bei fehlenden empirischen Daten ausweicherweise auf Erfahrungswerte und Wissen von

Fachleuten, dem sogenannten Expertenwissen zur Quantifizierung, zurückgegriffen werden. Die Struktur eines solchen Netzwerkes erlaubt es, qualitative Zusammenhänge aller Variablen mittels bedingter Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu quantifizieren. Die dazu vorausgesetzte direkte Abhängigkeit wird als eine *Parent-Child* Verbindung beschrieben. Jeder *Child Node* wird durch eine *Conditional Probability Table (CPT)* in seiner Beziehung zu seinem oder seinen *Parent Node(s)* mit Wertebereich von 0- 1 Wahrscheinlichkeit beschrieben. So muss in der *CPT* die Wahrscheinlichkeit aller instanziierten *States* Kombinate der *Parent Nodes* definiert sein und aufsummiert dem Wert 1 entsprechen. Selbst die *Root Nodes* enthalten eine Prior Wahrscheinlichkeit. Die Grösse einer *CPTs* ist exponentiell zur Anzahl *Parent Nodes*. Beim *Belief Updating* (Schlussfolgern) im *Bayes'schen Netzwerk* wird durch *Evidence Nodes* die posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung der *Query Nodes* während einer Abfrage berechnet. Dieser Prozess kann den *Edges* entlang in beide Richtungen laufen. *Bayes'sche Netzwerke* zeichnen sich folglich dadurch aus, dass es durch die automatisierte Anwendung des Bayes'schen Theorems möglich ist, die Wahrscheinlichkeiten von *Nodes*, deren *States* nicht bekannt sind, zu berechnen. Dies geschieht durch die Kombination des qualitativen Wissens über die direkten Abhängigkeiten und die quantitative Stärke dieser Verbindungen, welche durch die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden. Dadurch gelingt es, die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller *Nodes* möglichst kompakt wiederzugeben (Berger 1985; Hahn & Shapiro 1967; Kjaerulff & Madsen 2013; Korb & Nicholson 2004; Pearl 1988).

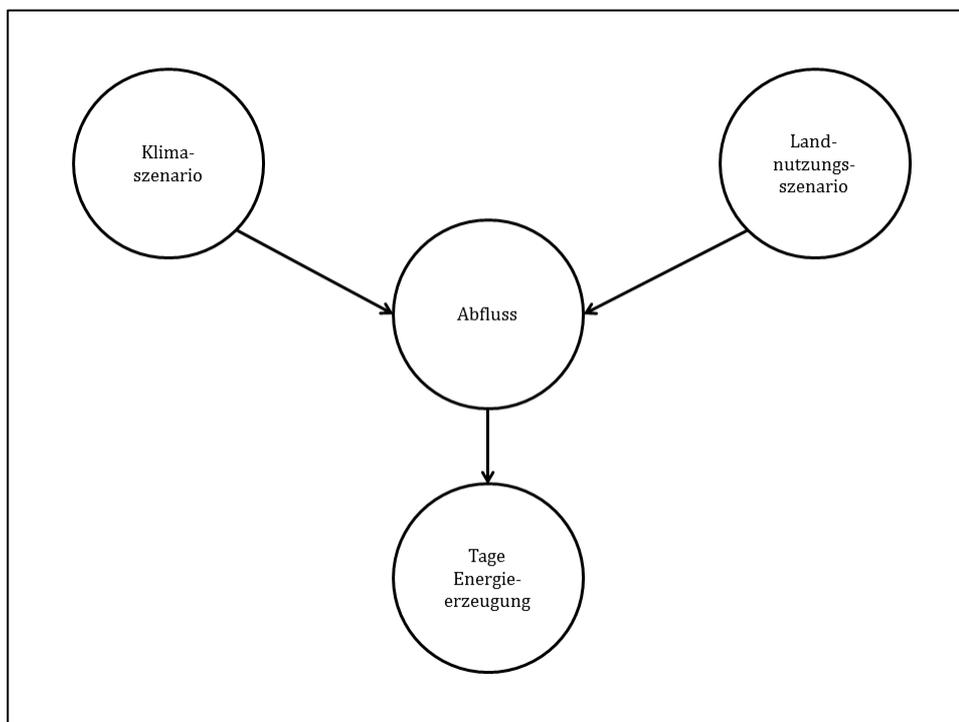
## 2.4. Strukturelle Erfassung der Ökosystemleistungen

Zur Repräsentation eines Wirkungsgefüges der realen Welt durch ein *Bayes'sches Netzwerk* bedarf es einer strukturellen Erfassung aller bekannten Kausalzusammenhänge. Erst dieses Wissen erlaubt eine Quantifizierung und ermöglicht Untersuchungen zur Sensibilität eines Systems auf Veränderungen der Rahmenbedingungen. Diese Veränderungen können sich gegebenenfalls in der Leistung eines Ökosystems widerspiegeln. Im Rahmen dieser Arbeit werden die beiden *Ökosystemleistungen Wasserkraft und Trinkwasser* durch *Bayes'sche Netzwerke* dargestellt.

### *Ökosystemleistung Wasserkraft*

Bei der Erfassung des Wirkungsgefüges *Ökosystemleistung Wasserkraft* in Abbildung 4 wird davon ausgegangen, dass in einem expliziten Einzugsgebiet eines Gewässers die Abflussmenge direkt und indirekt mit dem Niederschlag und der vorherrschenden Landnutzung zusammenhängt. Die Niederschläge werden auf ober- und unterirdischen

Transportwegen ins Gewässernetz des Einzugsgebietes geleitet. Die Abflussmenge des Gewässers hängt trotz zeitlicher Verzögerung und Verluste, durch Verdunstung und anthropogene Nutzung direkt von der Niederschlagsmenge ab (Stakhiv & Stewart 2010; Strahler & Strahler 2002). Die Niederschläge werden als auslösende Variable des Kausalzusammenhangs erkannt. Die klimatischen Rahmenbedingungen und die vorherrschende Landnutzungsform bestimmen die Quantität der Bereitstellung von Wasser zur Energieerzeugung. Die Verarbeitungskapazitäten der Wasserkraftanlagen sowie Bestimmungen zu Hochwasser und Gewässerschutz wirken zudem einschränkend auf die Stromproduktion. Durch Verbindung der Quantität der Bereitstellungsseite mit der Limitierung in der Nutzbarkeit kann eine Aussage über das Verhältnis von Zeiten mit möglicher Stromproduktion zu solchen ohne Möglichkeit zur Stromproduktion gemacht werden. Stellt man diesen Quantitäten noch eine Wertigkeit gegenüber, kann die *Ökosystemleistung Wasserkraft* quantifiziert und Veränderungen erkannt werden.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges der Ökosystemleistung Wasserkraft.**

### *Ökosystemleistung Trinkwasser*

Zur Untersuchung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* wird das Augenmerk auf die Bereitstellung und den Verbrauch von Grundwasser in Privathaushalten gelegt. Wie sich Änderungen auf den beiden Seiten auswirken, kann durch einen Grundwasserbilanzierung geklärt werden.

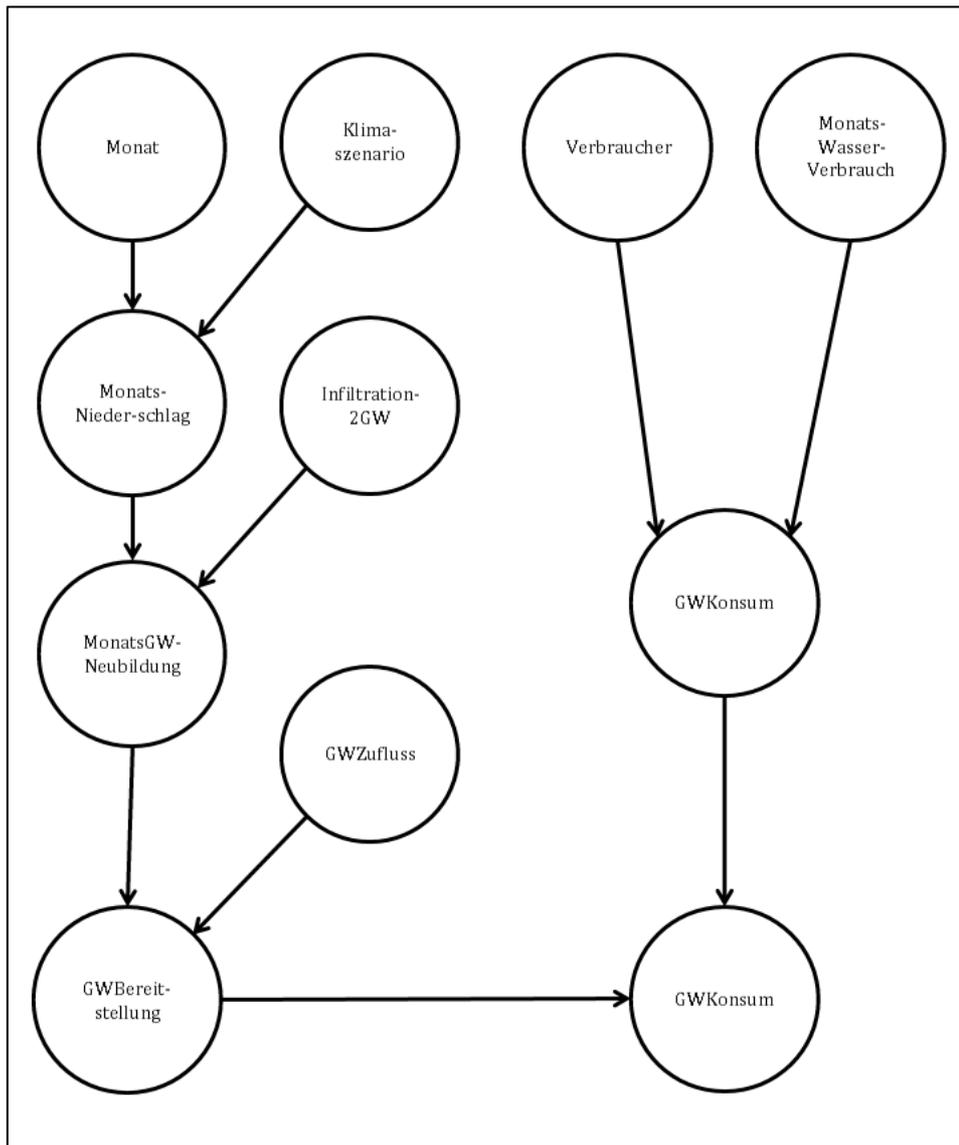
Die Grundwasserbereitstellungsseite am Untersuchungsstandort setzt sich aus drei Komponenten zusammen. (1) Der Grundwasserzufluss eines bereits bestehenden Grundwasserstroms, dessen Grundwasserbildung an einem flussaufwärts liegenden Punkt stattfindet, wird miteinbezogen. Um diesen Zufluss verlässlich zu quantifizieren, bedarf es grossangelegter geologischer und hydrologischer Untersuchungen des entsprechenden Gebietes. Die Grundwasserneubildung am Untersuchungsstandort wird durch (2) Infiltration von Niederschlagswasser über den Boden und (3) Austauschprozesse am anliegenden Gewässerraum beeinflusst (Strahler & Strahler 2002). Zur Beurteilung des Einflusses der zeitlichen Niederschlagsverteilung werden die mittleren Monatsniederschläge untersucht. Diese sind stark durch die klimatischen Gegebenheiten beeinflusst. Zur Quantifizierung der dabei stattfindenden Infiltration ins Grundwasser muss auf Referenzwerte bereits durchgeführter Untersuchungen zurückgegriffen werden. Den Einfluss eines anliegenden Gewässers lässt sich durch die von Darcy (1856) eingeführte Gesetzmässigkeit zur Berechnung der Wassermenge, die durch ein poröses Medium strömt, berechnen. Der dazu benötigte hydraulische Gradient wird durch den Flusspegel und den Grundwasserpegel bestimmt. Durch hydrogeologische Untersuchungen kann der notwendige Durchlässigkeitsbeiwert ermittelt werden. Diese drei erörterten Prozesse ergeben zusammen die Grundwasserbereitstellung am Untersuchungsstandort.

Das beschriebene Wirkungsgefüge der *Ökosystemleistung Trinkwasser* bildet mit seiner endgültigen Struktur (Abbildung 5) die Ausgangslage zur Darstellung mit einem *Bayes'schen Netzwerk*.

### *Monetarisierung von Ökosystemleistungen*

Bei der Wahl der Monetarisierungsmethode wird auf Grunewald & Bastian (2013) und Heal (2000) bezuggenommen. Zur Monetarisierung der Ökosystemleistungen wird deren Nutzwert versucht zu erfassen. Güter und Leistungen, welche die Natur direkt bereitstellt und vom Menschen in einer Form direkt konsumiert oder verwertet werden, können - sofern sie auch marktmässig gehandelt werden - durch die Marktpreismethode bewertet werden. Vorausgesetzt werden eine gleichbleibende Angebotsqualität und eine vergleichbare Nachfragesituation. Eine Mehrheit der mit Ökosystemen erarbeiteten Produkte ist mit Arbeits- und Kapitaleinsatz verbunden.

Zur Bewertung einer veränderten Ökosystemleistung kann es notwendig sein, die Markterlöse den mit der Bereitstellung einhergehenden Kosten gegenüberzustellen oder zumindest für eine tiefere Analyse mit einzubeziehen (Heal 2000; Grunewald & Bastian 2013).



**Abbildung 5: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges der Ökosystemleistung Trinkwasser.**

## 2.5. Software

Die Datenaufbereitung erfolgt unter Verwendung von R über die freiverfügbare Benutzeroberfläche „RStudio“ und Microsofts „Excel 2010“. Die Erstellung der Baye’schen Netzwerke wird über das von der Abteilung Decision Systems Laboratory an der Universität von Pittsburgh entwickelte Softwarepaket „GeNIe“ realisiert. Die verwendeten R-Skripte und GeNIe-Dateien sind der Arbeit in digitaler Form angehängt.

### 3. Hydrologische Simulation

Bereits in der Einleitung wird kurz erwähnt, dass die hydrologischen Simulationen durch Christoforos Pappas an der Professur für Hydrologie und Wasserwirtschaft (IfU) der ETH Zürich durchgeführt werden. Teil seiner Arbeit ist die Koppelung zweier bis anhin unabhängiger Modelle.

So verwendet er zum einen das LPJ-GUESS Modell zur objektorientierten Modellierung der Dynamik der Ökosystemstruktur und -funktion auf variierenden Prozessebenen (Smith, Prentice & Sykes 2008). Dies erlaubt die Entwicklung und Verbreitung der Vegetationsgruppen in einem Untersuchungsgebiet auf unterschiedlichen Skalen und Abstraktionslevels zu untersuchen. Das Modell von Smith, Prentice & Sykes (2008) ermöglicht ein umfassendes Verständnis sowie die Steuerbarkeit der Flora und ihrer Wandelbarkeit in Vorkommen und Verteilung in einem Untersuchungsgebiet.

Zum andern verwendet Christoforos Pappas die Softwareapplikation *TOPKAPI* (Topographic Kinematic Approximation and Integration) der italienischen Firma Progea Srl. Dabei handelt es sich gemäss Progea (2014) um ein vollumfänglich physikalisch basiertes hydrologisches Modell. Dessen Anwendungsbereiche umfassen Einzugshydrologie, Hochwasserprognose, Wasserressourcenmanagement, Landnutzung und Klimawandel, Bewässerung und Trockenheit sowie Erdbeben. Damit diese Themenbereiche realitätsnahe erforscht werden können, lassen sich mit TOPKAPI folgende Wasserkreislaufkomponenten simulieren: Oberflächenabfluss, unterirdischer Abfluss, Flussabfluss, Infiltration, Versickerung, Evapotranspiration und Schneeschmelze. Es gilt hervorzuheben, dass eine Kalibrierung der bedeutenden physikalischen Parameter durch digitale Geländemodelle, Bodenkarten, Landnutzungs- und Vegetationskarten durchführbar ist. Die Hauptresultate von TOPKAPI umfassen eine Wasserbilanz auf verschiedenen Skalenebenen sowie umfangreiche Zeitreihen mit einer Vielzahl von hydrologischen Quantitäten für jede Zelle im Modell (Progea 2014).

Da Christoforos Pappas seine Simulation für das gesamte Einzugsgebiet der Kleinen Emme im luzernischen Entlebuch durchführte, steht theoretisch jede Rasterzelle des Simulationsgebietes zur Verwendung in dieser Arbeit zur Verfügung.

Zur Reduktion des Rechenaufwandes muss bereits vor Simulationsbeginn eine der Fragestellung entsprechende Auswahl an Punkten definiert werden. Da die Wahl dieser Punkte zu einem sehr frühen Stadium der Arbeit erfolgt, müssen die Punkte so gewählt werden, dass sie das Einzugsgebiet möglichst gut abdecken. Alle verwendeten Punkte befinden sich im Flussbett der Kleinen Emme. Wie sich im weiteren Verlauf der Arbeit

herauskristallisiert, eignet sich der Standort der Rasterzelle 7985 (Abbildung 2) am besten zur Erarbeitung der Forschungsfragen.

### *Hydrologische Simulationsdaten*

Die Verwendung von zwei Klimaszenarien und drei Landnutzungsszenarien führte dazu, dass insgesamt sechs unterschiedliche Szenarien aufbereitet und analysiert werden müssen. In Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die Simulationsauflösung von einer Stunde je nach Simulationsdauer zu 876'578 und 447050 Einträgen führt. Bei allen Szenarien werden jeweils 67 Parameter ausgegeben. Anzuführen bleibt, dass jede Szenarien Kombination aus 50, sich in ihrer Parametrisierung unterscheidenden, Simulationsdurchläufen besteht.

Landnutzungsszenario	Klimaszenario	Simulationsdauer [Jahre]	Simulationsdurchläufe	Einträge	Parameter
CURRENT	REGCM3	100	50	876578	67
	REMO	100	50	876578	67
PLUS20	REGCM3	50	50	447050	67
	REMO	50	50	447050	67
PLUS40	REGCM3	50	50	447050	67
	REMO	50	50	447050	67

**Tabelle 1: Übersicht über die Szenarien der Simulation**

Nach diesem Überblick auf die Szenarien wird in den kommenden Abschnitten auf die Datenaufbereitung der benötigten Parameter eingegangen. Sofern nicht speziell darauf hingewiesen wird, kann davon ausgegangen werden, dass das Vorgehen für alle sechs Szenarien identisch ist. Wie die Angaben der Tabelle 1 schon erahnen lassen, handelt es sich bei den Simulationsdaten um grosse Datenmengen. Die beiden 100-jährigen Simulationen haben ein Datenvolumen von je ~500 Gigabyte und die vier 50-jährigen weisen eine Grösse von je ~250 Gigabyte auf. Um mit diesen Datenmengen sinnvoll arbeiten zu können, wird auf das Softwarepaket *R* zurückgegriffen. Dabei werden zur besseren Handhabung der grossen Datenmengen die verschiedenen simulierten, physikalischen Parameter in jeweils eigenständigen *R*-Projekten behandelt. Bei allen durchzuführenden Analysen müssen gleich zu Beginn die hydrologischen Parameter Abfluss und Niederschlag extrahiert werden. Das entsprechende genaue Vorgehen dazu wird in den kommenden Abschnitten ausführlicher erläutert.

Es ist aber bereits an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Extraktion der Parameter für Daten einer 50-jährigen Simulation mehr als 60 Minuten dauern kann und bei Daten mit 100-jährigen Simulationsdauern über 120 Minuten eingerechnet werden müssen, bis weitergearbeitet werden kann. Will man einen Simulationsparameter für sämtliche

Szenarien (drei Landnutzungsszenarien mit jeweils zwei Klimamodellen) an einer Rasterzelle analysieren, benötigt allein das Herauslösen aus den ursprünglichen Simulationsdaten über acht Stunden. Die Analyse beliebig vieler Rasterzellen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, so dass jeweils nur diejenigen Daten mit der höchsten Eignung für eine spezifische Fragestellung extrahiert wurden.

## 4. Datenaufbereitung und Implementierung

### 4.1. Abfluss

Für das *Bayes'sche Netzwerk Wasserkraft* werden die Simulationsdaten der Rasterzelle 7985 verwendet. Die Eignung dieses Punktes ergibt sich hauptsächlich dadurch, dass er am Unterlauf der Kleinen Emme liegt und genügend Abfluss zur Stromproduktion vorhanden ist. Das grosse Einzugsgebiet oberhalb dieses Punktes lässt auf hohe Abflüsse schliessen. Zudem befindet sich in unmittelbarer Nähe das Flusskraftwerk Ettisbühl.

#### *Quantifizierung der Ökosystemleistung Wasserkraft*

Zu Beginn der Datenaufbereitung des hydrologischen Parameters Abfluss muss aus den Simulationsdaten die entsprechenden Werte herausgelesen werden. Dabei handelt es sich um den Simulationsparameter *QoutCH*, welcher dem Abfluss an der entsprechenden Rasterzelle entspricht. Die simulierte Abflussmenge wird mit der Einheit [m<sup>3</sup>/s] angegeben. Das Herauslösen aus den Simulationsdaten ist zur Verkleinerung des Datenvolumens notwendig und verkürzt in darauffolgenden Arbeitsschritten die Rechenzeiten der R-Skripte. Unter Verwendung einer Schleifen-Funktion wird erreicht, dass die Simulationswerte sämtlicher 50 Simulationsdurchläufe eines Szenarios in einem eigenständigen Dataframe hinterlegt werden und als Grundlage für die folgenden Schritte bereitstehen. Die hohe zeitliche Simulationsauflösung von einer Stunde des Flussabflusses [m<sup>3</sup>/s/h] wird für das *Bayes'sche Netzwerk Wasserkraft* reduziert, wozu die in der Software R bereitgestellte Aggregationsfunktion implementiert wird. Da es sich beim Flussabfluss um ein nahezu kontinuierliches Phänomen handelt, ist es naheliegend, auf eine Mittelwert-orientierte Aggregationsmethode zurückzugreifen. Die zeitliche Auflösung wird durch die Bildung von Tagesmittelwerten [m<sup>3</sup>/s/d] um den Faktor 24 reduziert. Nachdem eine als angemessen anzunehmende zeitliche Auflösung erreicht ist, wird mittels Histogramm-Funktion mit manuellen Klassengrenzen erstmalig eine inhaltliche Aggregation durchgeführt. Zur Erhöhung der Prozesseffizienz wird die Histogramm-Funktion in eine Schleifen-Funktion eingebaut. Daraus resultiert ein Dataframe mit den Klassenverteilungen. Die Wahl der Klassengrenzen wird in Abschnitt 5.4.2 näher erläutert.

Bis zu diesem Arbeitsschritt werden die 50 Simulationsdurchläufe eines jeden Szenarios getrennt von einander bearbeitet. Erst zum Schluss werden die Klassenverteilungen der 50 Simulationsdurchläufe zusammengefasst. Zur verbesserten Nachvollziehbarkeit der Teilresultate werden diese zusätzlich auf eine jährliche Verteilung herunter gebrochen.

## 4.2. Grundwasserneubildung

An dieser Stelle wird auf die Datenaufbereitung des in Abschnitt 2.4. eingeführten *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasser* eingegangen. Der Vollständigkeit halber wird die Grundwasserneubildung durch das Fließgewässer *Kleine Emme* in seinen Grundzügen erläutert sowie auf die verfügbaren und nicht verfügbaren Daten eingegangen.

### *Grundwasserneubildung an Fließgewässern mit DARCY*

Eine häufig zur Berechnung von Grundwasserneubildung genannte Methode beruht auf *Darcy's Gesetz* (Scanlon, Healy & Cook 2002). Der Ansatz von Darcy wird als praktischer und einfacher Ansatz beschrieben, ist aber auf Grund der benötigten spezifischen Forschungsausrüstung und entsprechendem Personalaufwand äusserst arbeitsaufwendig und kostspielig. Zudem haben dadurch gezogene Schlüsse eine sehr standortbezogene Gültigkeit (Sophocleous 1991).

Basierend auf den Experimenten von Darcy kann zur Berechnung des Durchflusses durch einen porösen Körper folgende Formel verwendet werden (Brown 2002; Darcy 1856):

$$Q = A \cdot K \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (7)$$

Wobei

$Q$  = Durchflussrate [m<sup>3</sup>/s]

$A$  = Flächenquerschnitt [m<sup>2</sup>]

$K$  = Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

$h$  = Pegelstand [m]

$L$  = Länge [m]

Für weitergehende Erläuterungen zu Darcys Gesetz wird auf Fetter (2001) verwiesen. Die exakte Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit  $K$  wird als äusserst schwierig eingestuft (Sophocleous 1991; Weinzettel & Usunoff 2002). Dennoch macht die ganzjährige Anwendbarkeit der Darcy Methode sie zu einer sehr guten Variante bei der Quantifizierung der Grundwasserneubildung durch Fließgewässer (Scanlon, Healy & Cook 2002).

### *Grundwasserbildung durch Niederschlag*

In Abhängigkeit der geologischen Beschaffenheit und dem Pegelstand des anliegenden Gewässers kann Grundwasser durch anliegende Gewässer beeinflusst werden. Dabei sind die Geologie und die Abflussmenge am entsprechenden Flussabschnitt entscheidend dafür, ob es zu einer Zu- oder Abnahme von Grundwasser kommt. Gemäss dem in Abschnitt 2.4 erläuterten Aufbau des *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasserversorgung* wird in dieser Arbeit die Grundwasserneubildung aus Niederschlag explizit implementiert, wobei es für weitere Forschungszwecke wünschenswert wäre, auch den Effekt des anliegenden Gewässers explizit zu implementieren.

Zur Berechnung der mittleren Monatsniederschläge wird auf die bereits verwendeten Niederschlagsdaten zurückgegriffen. Ausgehend von diesen gemittelten Tagesniederschlagswerten wird durch Bildung von Klassen und damit einhergehender Anwendung der Histogramm-Funktion und den effizienzsteigernden Schleifen eine Simplifizierung der Ausgangsdaten erreicht. Die Bildung der drei Niederschlagsklassen basiert auf dem klimabedingten Wandel der Niederschlagshäufigkeit und deren Intensität (Beniston 2012; Casty, Wanner, Luterbacher, Esper & Böhm 2005; Dirnböck, Dullinger & Grabherr 2003). Zur besseren Abschätzbarkeit der Niederschlagsmengen und deren zeitlichen Verteilung werden unterschiedliche Datenquellen verglichen. So werden Erkenntnisse aus den in Abschnitt 5.2 durchgeführten Analysen der Niederschlagsvariabilität der beiden verwendeten Klimaszenarien an dieser Stelle zur Ermittlung der Klassengrenzen verwendet. Ziel der generierten Niederschlagsklassen ist es, den Effekt der Niederschlagsvariabilität auf die Grundwasserneubildung untersuchen zu können. Dabei wird durch die Wahl der Klassengrenzen versucht, (1) niederschlagsarme Monate, (2) Monate mit mittlerem Niederschlag und (3) Monate mit hohen Niederschlägen zu erfassen. Ausgehend von den Analysen in Abschnitt 5.2 und weiteren Quellen langfristiger Niederschlagsentwicklungsuntersuchungen (Binggeli 1974; Bundesamt für Statistik BFS 2013; Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012a; Kanton Luzern & Kanton Aargau 2013; MeteoSchweiz 2013) können folgende Niederschlagsklassen (Tabelle 2) erarbeitet werden.

Zeitraum	Niederschlagsklasse [mm]		
	Mittlerer Jahresniederschlag	< 1200	1200-1600
Mittlerer Monatsniederschlag	< 100	100-133	> 133

**Tabelle 2: Niederschlagsklassen zur Berechnung Niederschlagsklassenverteilung.**

### *Quantifizierung der Ökosystemleistung Trinkwasserversorgung*

Durch die in Abschnitt 2.4 vorgestellte Variante der Quantifizierung von Variabilität und Leistung der *Ökosystemleistung Trinkwasserversorgung* werden im Zuge der Vereinfachung des *Bayes'schen Netzwerks* nur die Simulationsdaten des heutigen Landnutzungsszenarios *current* verwendet. Zumal sich bei der Aufarbeitung der Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf den Niederschlag und das *Bayes'sche Netzwerk Wasserkraft* bemerkbar macht, dass die verschiedenen Landnutzungsszenarien keinen grossen Einfluss auf die Quantifizierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* haben. Die Wasserspeicher der Schweiz, zu denen auch das Grundwasservorkommen zählt, zeigen kaum langfristige Veränderungen und unterliegen einer saisonalen Variabilität (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012a). Die in Tabelle 2 enthaltenen Niederschlagsklassen werden zur Erarbeitung der Niederschlagsklassenverteilung mittlerer Monatsniederschläge verwendet. Unter Anwendung eines entsprechenden R-Skripts und zusätzlicher Kontrolle durch eine Excel Tabelle können Niederschlagsklassenverteilungen berechnet werden. Nachdem in vorangehenden zeitlichen Aggregationsschritten eine Mittelung der 100-jährigen Simulation zu Monatsniederschlägen erarbeitet wird, kann nun eine abschliessende thematische Analyse durchgeführt werden. Dabei werden die bereits eingeführten Niederschlagsklassen auf die 50 Simulationsdurchläufe eines jeden Monates verwendet. So kann die Variabilität der Parametrisierung der Ursprungssimulation erhalten bleiben. Bei den ersten Datenaufbereitungsversuchen wurde dieser Klassierungsschritt zu einem früheren Zeitpunkt gemacht, wodurch die gesuchte Variabilität der verschiedenen Simulationsdurchläufe zunichte gemacht wurde.

Die in Tabelle 3 enthaltenen Eintretenshäufigkeiten der Niederschlagsklassen werden im *Bayes'schen Netzwerk Trinkwasserversorgung* beim Knoten *MonatsNiederschlag* in die *CPT* an den entsprechenden Stellen eingefügt.

Kategorisierung der 50 Simulationsdurchläufe						
Monat	curr_regcm3			curr_remo		
	Niederschlagsklasse			Niederschlagsklasse		
	<100	100-133	>133	<100	100-133	>133
Januar	50	0	0	50	0	0
Februar	50	0	0	50	0	0
März	50	0	0	35	15	0
April	0	0	50	0	24	26
Mai	0	39	11	4	46	0
Juni	0	0	50	0	30	20
Juli	10	40	0	0	48	2
August	0	32	18	0	21	29
September	0	0	50	0	47	3
Oktober	0	44	6	20	30	0
November	0	50	0	50	0	0
Dezember	50	0	0	50	0	0

**Tabelle 3: Niederschlagsklassenverteilung aller Monate unter Klimaszenarios regcm3 und remo und heutigem Landnutzungsszenario current. Die Parametrisierung der 50 Simulationsdurchläufe führt zu Variabilität der Kategorisierung.**

Entsprechend der Struktur des *Bayes'schen Netzwerk Trinkwasserversorgung* muss der Einfluss des Chance-Knoten *Infiltration2GW* auf den Chance-Knoten *MonatsGWNeubildung* festgelegt werden. Dazu wird von einer in der Literatur und Praxis abgestützten Infiltrationsrate von 30% ausgegangen (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990; Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2003; Eawag (Hrsg.) 2000). Die Abbildung 6 zeigt die entsprechende *CPT*, welche folgende Anforderungen erfüllt: (1) sowohl zunehmende Niederschlagsmenge als auch (2) eine zunehmende Infiltrationsrate sollen sich automatisch positiv auf die Grundwasserneubildung auswirken.

MonatsNiede...	weniger_100mm			zwischen_100_133mm			mehr_133mm		
Infiltration2GW	Prozent25	Prozent30	Prozent35	Prozent25	Prozent30	Prozent35	Prozent25	Prozent30	Prozent35
tief	0.9	0.8	0.7	0.3	0.15	0.05	0.1	0.05	0.025
normal	0.075	0.15	0.2	0.6	0.7	0.75	0.2	0.15	0.075
hoch	0.025	0.05	0.1	0.1	0.15	0.2	0.7	0.8	0.9

**Abbildung 6: Conditional Probability Table des Knotens MonatsGWNeubildung mit manuell erfolgter Anpassung der bedingten Wahrscheinlichkeiten.**

Durch Einbindung des in Abbildung 7 repräsentierten Knotens *GWBereitstellung* wird die Angebotsseite abgeschlossen. Zu erwähnen ist, dass nur ein Zustand des *GWZufluss* Knotens, dessen Quantität durch „Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme“ (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990) bekannt ist, verwendet wird. Grundsätzlich

bestünde hier die Möglichkeit, weitere Entwicklungsszenarien einzubauen, wobei auf diesen Schritt zu Gunsten der Reduktion der Netzwerkkomplexität verzichtet wird.

MonatsGWNe...	tief		normal		hoch	
	GWZufluss	Nichts	GWZufluss	Nichts	GWZufluss	Nichts
▶ tief_total	0.45	0.45	0.25	0.25	0.1	0.1
normal_total	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6
hoch_total	0.15	0.15	0.25	0.25	0.3	0.3

**Abbildung 7: CPT des Knotens GWBereitstellung mit manuell erfolgter Anpassung der bedingten Wahrscheinlichkeiten.**

### Quantifizierung Trinkwassernachfrage

Zur Implementierung der in Abschnitt 2.4 eingeführten Quantifizierung der Trinkwassernachfrage werden die Entscheidungsknoten *MonatsWasserverbrauch* und *Verbraucher* verwendet. Aufbauend auf den Werten des schweizerischen Wasserverbrauchs (Tabelle 4) werden zwei Zustände für den Knoten *MonatsWasserverbrauch* umgesetzt (Tabelle 5).

Wasserverbrauch Schweizer Haushalte				
Bezugsgrösse		Jahr [m3/Person]	Monat [l/Person]	Tag [l/Person]
Haushalt	Schweiz	59	4928	162
Haushalt & Kleingewerbe	CH min	85	7083	233
	CH max	135	11250	370

**Tabelle 4: Zusammenstellung Wasserverbrauch Schweizer Haushalte (Bundesamt für Statistik BFS, 2013; Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW & Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 2001).**

Ausgehend von den heutigen Wasserverbrauchsmengen wird ein Wert von 160 l/Tag pro Person als Ist-Zustand verwendet. In nach heutigen Massstäben ausgestatteten Haushalten ist das Wassersparpotential mehrheitlich ausgeschöpft.

▶ Sparpotential_140	0.3
Heute_160	0.7

**Tabelle 5: CPT des Knoten MonatsWasserverbrauch. Zustand Sparpotential\_140 entspricht einem Pro Kopf Wasserverbrauch von 4258l/Monat. Dem gegenüber steht der Heute\_160 Zustand von 4928l/Monat.**

Markante Einsparungen können derzeit nur durch Verhaltensänderungen herbeigefügt werden. So zieht eine konsequente Anwendung der Spül-Stopp-Taste der Toilettenspülung eine Einsparung von 14 l pro Tag und Person nach sich

(Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW & Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft BUWAL 2001). Die kombinierte Umsetzung dieser Massnahme mit einem bewussteren Wasserkonsum begründet den zweiten Zustand für *MonatsWasserverbrauch* mit 140 l/Tag pro Person. Die in Tabelle 5 ersichtliche Wahrscheinlichkeitsverteilung obliegt der Vermutung einer schlechten Umsetzung der Sparmassnahmen.

Zur realitätsnahen Implementierung der Trinkwasserversorgung muss eine dem Untersuchungsstandort angepasste Anzahl Verbraucher ermittelt werden. Erst dadurch lässt sich die Grundwasserbilanzierung durchführen und den Einfluss der zeitlichen Niederschlagsvariabilität erfassen. Die Resultate des Berichtes „Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme“ (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990) bieten sich dafür an. So wird, wie in Tabelle 6 festgehalten, ausgehend von der für den Grundwasserbilanzierungsabschnitt VI berechneten Grundwasserneubildungsmenge mit den zwei Wasserverbrauchsszenarien das Grundwasserversorgungspotential des Standortes ermittelt.

Versorgungspotential Grundwasserbilanzierungsabschnitt VI		Versorgungspotential [Person]
GWNeubildung [l/Monat]	3240000	
Wasserverbrauch pro Kopf (Sparpotential_140) [l/Monat]	4258	761
Wasserverbrauch pro Kopf (Heute_160) [l/Monat]	4867	666

**Tabelle 6: Versorgungspotential des Grundwasserbilanzierungsabschnitts VI. Berechnet auf Grundlage "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme" (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990).**

Beim heutigen Wasserverbrauch pro Kopf kann mit der bestehenden Grundwasserneubildungsmenge des *Bayes'schen Netzwerk Trinkwasser* der Grundwasserbedarf von maximal 764 Personen gedeckt werden. Durch Einführung von drei *States* (Zustände) am Entscheidungsknoten *Verbraucher* können alle Szenarien der Grundwassernachfrage simuliert werden.

### Grundwasserbilanzierung

Der Knoten *GWBalance* vereint die Bereitstellungs- und Nachfrageseiten des *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasser* und beschreibt das Verhältnis dieser beiden Seiten zueinander. Die in Tabelle 7 aufgeführte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände *positiv* und *negativ* bewirkt, dass (1) eine höhere Bereitstellung als eine positive Grundwasserbilanz ausgegeben wird, (2) höhere Nachfrage zu negativer Grundwasserbilanz führt und (3) Ausgeglichenheit erkannt wird.

GWKonsum	tief			normal			hoch		
	tief_total	normal_total	hoch_total	tief_total	normal_total	hoch_total	tief_total	normal_total	hoch_total
► positiv	0.5	1	1	0	0.5	1	0	0	0.5
negativ	0.5	0	0	1	0.5	0	1	1	0.5

**Tabelle 7: CPT des Knotens GWBalance. Enthält die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Bereitstellungs- und Nachfrageseite.**

### 4.3.Hochwasser

In dieser Arbeit werden zwei *Bayes'sche Netzwerke* zur Quantifizierung hydrologischer Ökosystemleistungen umgesetzt. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Datenaufbereitung für ein weiteres *Bayes'sches Netzwerk Hochwasserschutz*, für dessen Erfassung und Darstellung Andrea Ryffel (Institut für Raumplanung- und Landschaftsentwicklung, ETH Zürich) verantwortlich ist. Teil der vorliegenden Arbeit behandelt die Auf- und Bereitstellung von Hochwasserdaten anhand vereinfachter Methoden, da die aufgrund zeitlich kurzer Messreihen hochkomplexen statistischen Verfahren, welche üblicherweise zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwasserevents beigezogen werden, den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden (Strahler & Strahler 2002).

Basierend auf dem Merkblatt „Statische Analysen von Hochwasserabflüssen“ (DVWK 1999) hat Eppler (2014) Berechnungen zu Hochwasserabflüssen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme durchgeführt. Unter anderem dank dieser Arbeit von Eppler können in der vorliegenden Arbeit unkonventionellere Ansätze aufgegriffen werden. Das von Andrea Ryffel behandelte *Bayes'sche Netzwerk Hochwasser* zeichnet sich auch dadurch aus, dass es unterschiedliche Hochwasserabfluss-Berechnungsmethoden berücksichtigen und deren Resultate abhängig von ihrer Plausibilität unterschiedlich stark gewichten kann.

Entgegen der in Spreafico & Viviroli (2013) beschriebenen Verfahren wird in dieser Arbeit ein Versuch zur einfachen Abschätzung von Hochwasserabflusswerten vorgenommen. Das Vorgehen ist an das vom Deutschen Verband für Wasserwirtschaft

und Kulturbau (DVWK) veröffentlichte Merkblatt „Statische Analysen von Hochwasserabflüssen“ (DVWK 1999) angelehnt. Die darin enthaltene *Methode der Jahresmaximalreihe* verlangt nach der Extraktion der Jahresmaximalreihen nach weiteren Arbeitsschritten. Die empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung muss der Datengrundlage und dem Untersuchungsziel entsprechend angeglichen werden. Danach wird das Verfahren zur Parameterschätzung angewandt, bevor abschliessend die theoretischen Verteilfunktionen den gemessenen Abflusswerten entsprechend angepasst werden. Nach Abschluss dieser Anpassungen kann der Abfluss für ein anzunehmendes Wiederkehrintervall berechnet werden (DVWK 1999). Basierend auf diesem Vorgehen wird in dieser Arbeit eine vereinfachte *Quantil Methode* eingeführt, deren Ablauf im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Die verwendeten hydrologischen Simulationsdaten entsprechen den bereits in Abschnitt 4.1 verwendeten Daten, was eine Verringerung des Datenaufbereitungsaufwandes mit sich bringt. Bei den übertragenen Daten handelt es sich um die auf Stundenbasis simulierten Abflusswerte der Landnutzungsszenarien *current*, *plus20* und *plus40* und die dazugehörigen Klimaszenarien *regcm3* und *remo*. Es wird darauf hingewiesen, dass zur Handhabung der 50 variablen Simulationsdurchläufe alle in R durchgeführten Schritte, wenn notwendig mit Konstruktion von Schleifen, in ihrer Effizienz verbessert werden. Zur Verwendung der *Quantil Methode* ist eine Datenaggregation notwendig. Dieser Schritt entspricht dem Vorgehen der oben genannten *Methode der Jahresmaximalreihe*. Durch folgendes Vorgehen wird für sämtliche Szenarien eine Jahresmaximalreihe erstellt.

Auf der ersten Stufe wird mittels einer Aggregationsfunktion die zeitliche Auflösung von stündlichen Abflusswertsimulationen auf deren Tagesmittelwerte zusammengefasst, was gleichzeitig zu einer Reduktion der Datenpunkte führt. Diese Aggregation ist aus hydrologischer Sicht unproblematisch, da diese zeitlich fein skalierten Tagesabflüsse gegenüber Monatsabflüssen höhere Hochwasserabflüsse aufweisen und stromabwärts verheerende Folgen haben können (Weingartner & Pearson 2001). Auf der zweiten Stufe kommt es zur Extraktion der Jahresmaximalabflüssen, wobei die Datenreihe mindestens 10 Jahre, besser 30 Jahre umfasst (DVWK 1999). Da bei der Datenaufbereitung ohne Ausschlusskriterien aus jedem Jahr ein Maximalwert extrahiert wird, ist diese Voraussetzung bei 50- respektive 100-jährigen Simulationen erfüllt. Basierend auf einer der Fragestellungen wird nun vom Pfade der klassischen *Methode der Jahresmaximalreihe* abgewichen. Davon ausgehend, dass die langen Simulationsreihen sich zur Anwendung einer einfachen *Quantil Methode* eignen werden die Jahresmaximalreihen der Szenarien durch Verwendung einer Quantil Funktion der R Software bearbeitet.

Basierend auf den in Tabelle 8 enthaltenen Informationen über den Zusammenhang von Wiederkehrintervall, Überschreitungswahrscheinlichkeit und entsprechendem Quantil werden die zu erwartenden Hochwasserabflüsse für die Wiederkehrintervalle von 10, 30, 50 und 100 Jahren berechnet.

Wiederkehrintervall [Jahre]	Überschreitungswahrscheinlichkeit [ $P_{\bar{u}}$ ]	Quantil [%]
10	0.1	90
30	0.0333	96.67
50	0.02	98
100	0.01	99

**Tabelle 8: Übersicht der Hochwasser-Wiederkehrintervalle, deren Überschreitungswahrscheinlichkeit und entsprechendes Quantil.**

Nebst der Umsetzung der *Quantil Methode* wird ein weiterer ungewöhnlicher Ansatz geprüft. Nachdem in Eppler (2014) bereits mit den in DVWK (1999) aufgeführten Verteilungen zur Anpassung von Extremwert-Verteilungen gearbeitet wird, bietet es sich an, in der vorliegenden Arbeit eine weitere Verteilung anzuwenden. In der Literatur zu Verteilungen tauchen in unterschiedlichen Zusammenhängen die *Weibull Verteilung* und *Pearson Verteilung* mit der *Johnson Verteilung* zusammen auf (Gadow 1984; Johnson 1949; Simonato 2011). In diesen Arbeiten werden die *Weibull Verteilung*, die *Pearson Verteilung* und die *Johnson Verteilung* in unterschiedlichen thematischen Zusammenhängen miteinander verglichen. Zudem beschreibt Johnson (1949) das Johnson System als sehr flexibel zur Beschreibung statistischer Verteilungen. Obwohl die Literaturrecherche bezüglich Anwendung der *Johnson Verteilung* im Bereich der hydrologischen Modellierung keine nennenswerten Ergebnisse aufzeigt, wird ein Versuch zur Berechnung von Hochwasserabflüssen mit einem definierten Wiederkehrintervall unternommen.

Als Ausgangsdaten werden die *Jahresmaximalreihen* der *Quantil Methode* verwendet. Mit dem *R Package SuppDists* findet sich eine anwenderorientierte Implementation der *Johnson Verteilung* (Wheeler 2009). Das Vorgehen wird anhand des in Abbildung 8 enthaltenen Pseudo Skripts beschrieben. Nach Laden des auf von Bob Wheeler (Wheeler 2009) entwickelten *R Package SuppDists* wird aus den bereits für die *Quantil Methode* verwendeten Jahresmaximalreihen durch die Definition von *SimNr* der gewünschte Simulationsdurchlauf ausgewählt. Die darauffolgende Funktion *JohnsonFit* generiert die beschreibenden statistischen Parameter der Verteilung in der Liste *parms*. Bei diesen Parametern handelt es sich um Mittelwert, Varianz, Schiefe und Wölbung der zu beschreibenden Verteilung (Johnson 1949).

Die Berechnung des Hochwasserabflusses mit einem definierten Wiederkehrintervall wird mit Hilfe der in Tabelle 8 bereitgestellten Überschreitungswahrscheinlichkeiten und der Funktion  $qJohnson$  durchgeführt. Diese Funktion entspricht der Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion  $pJohnson$ .

```

#-----
# The Johnson distribution "Pseudo Skript"
#-----
# Start
library(SuppDists)

# SimNr wählen für entsprechenden Simulationsdurchlauf [1:50]
Jahresmaximalreihe_SimNr <- Jahresmaximalreihe[,SimNr]

# JohnsonFit berechnet die Funktionsparameter in Liste "parms"
Jahresmaximalreihe_SimNr_parms <- JohnsonFit(t=Jahresmaximalreihe_SimNr)

# Berechnung Hochwasserabfluss für p()
# 100aEvent
# qJohnson for p(0.99) gibt Hochwasserabfluss [m3/s] 100a event
qJohnson(0.99,Jahresmaximalreihe_SimNr_parms)

# 50aEvent
# qJohnson for p(0.98) gibt Hochwasserabfluss [m3/s] 50a event
qJohnson(0.98,Jahresmaximalreihe_SimNr_parms)

# 30aEvent
# qJohnson for p(0.9667) gibt Hochwasserabfluss [m3/s] 30a event
qJohnson(0.9667,Jahresmaximalreihe_SimNr_parms)

# 10aEvent
# qJohnson for p(0.9) gibt Hochwasserabfluss [m3/s] 10a event
qJohnson(0.9,Jahresmaximalreihe_SimNr_parms)
# Stop
#-----

```

**Abbildung 8: Pseudo Skript zur Implementierung der Johnson Verteilung zur Berechnung von Hochwasserabflüssen bei zu erwartenden Wiederkehrintervallen.**

Die Implementierung des vorliegenden Pseudo Skriptes (Abbildung 8) gelingt nur teilweise. Die Automatisierung der  $qJohnson$  Funktion scheitert daran, dass die Wahl des zu bearbeitenden Simulationsdurchlaufs mit einer Schleifenfunktion nicht automatisiert werden kann.

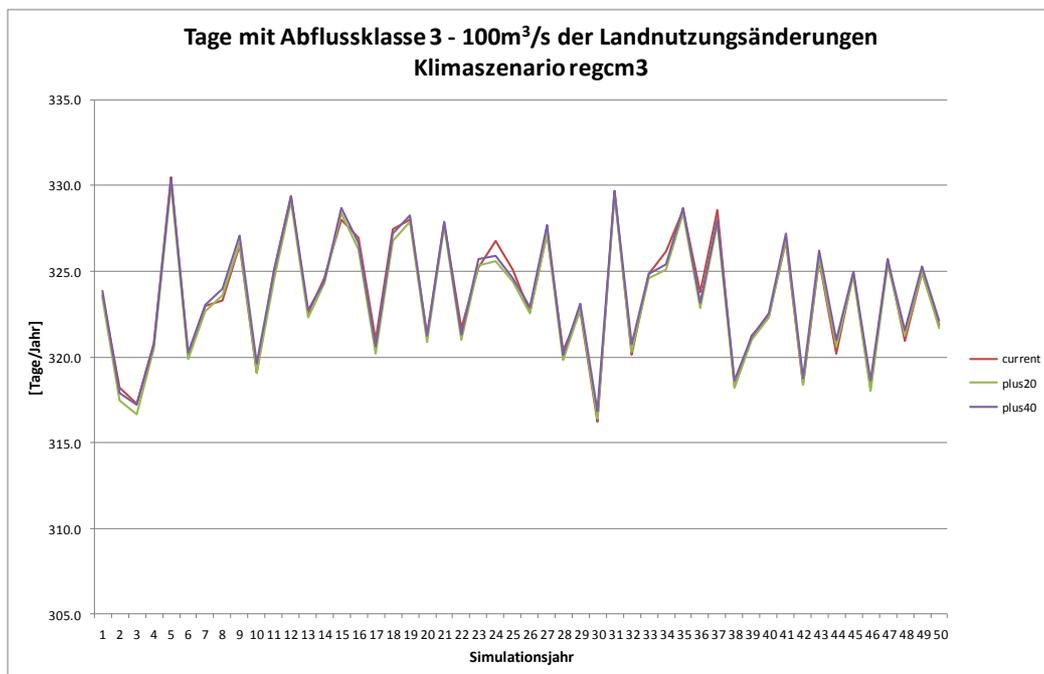
Da es sich bei der Anwendung der *Johnson Verteilung* um einen explorativen Versuch handelt, wird eine eingeschränkte Anzahl Simulationsdurchläufe (1, 5,10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) als Datengrundlage verwendet. Zudem beschränkt man sich auf die beiden Szenarien der heutigen Landnutzung *curr\_regcm3* und *curr\_remo*.

## 5. Resultate und Diskussion

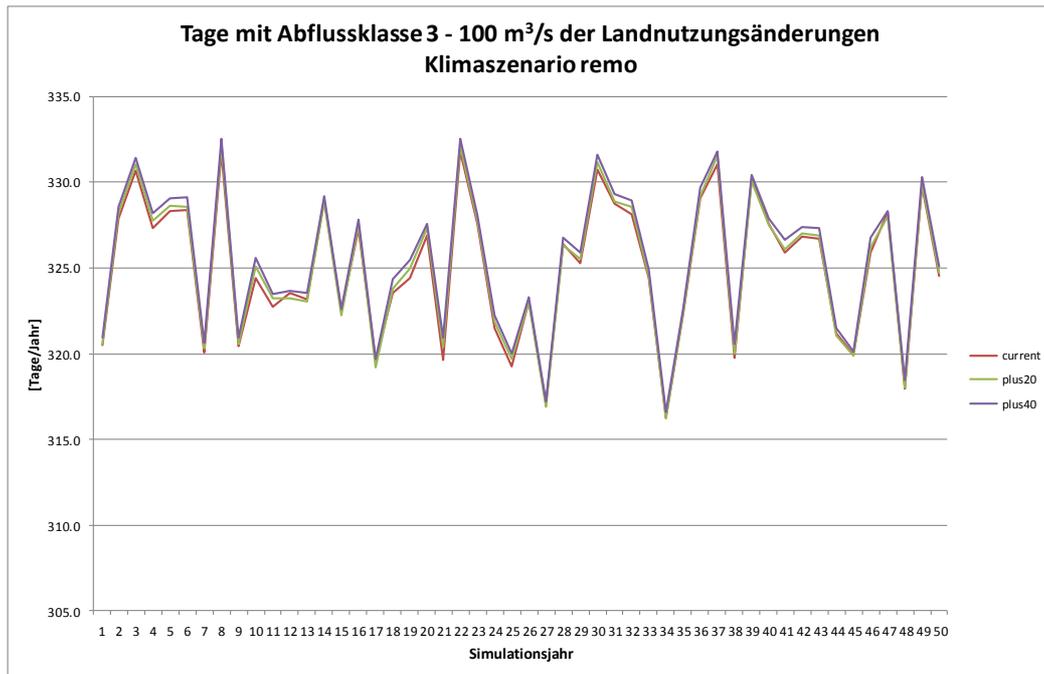
### 5.1. Auswirkungen der Landnutzungsszenarien auf den Abfluss

Die in Abschnitt 2.2 erläuterten Szenarien beinhalten die drei Landnutzungsszenarien *current*, *plus20* und *plus40*. Um deren Einfluss auf die hydrologischen Rahmenbedingungen im Untersuchungsgebiet zu untersuchen, wird der hydrologische Parameter *Abfluss* quantifiziert. Die folgenden Ausführungen fassen die dabei erarbeiteten Resultate zusammen.

In Abbildung 9 und Abbildung 10 werden die Anzahl Tage pro Jahr der Abflussklasse *nutzbar* (Tabelle 22) über den Simulationszeitraum von 2050-2100 verglichen. Unter Verwendung des Klimaszenarios *regcm3* zeigen die drei Landnutzungsszenarien einen Mittelwert zwischen 323.42 und 323.77 zur Stromproduktion nutzbaren Tagen pro Jahr. Entlang der 50 Simulationsdurchläufe schwankt dieser Wert mit einer Standardabweichung im Bereich von 3.50-3.58 Tagen. Bei Verwendung des Klimaszenarios *remo* kommt der Mittelwert in einem Bereich von 324.99-325.55 zu liegen und weist eine Standardabweichung von 4.09-4.15 Tagen auf. Die grafische Darstellung dieses Sachverhaltes verdeutlicht, dass die Resultate hauptsächlich durch die Wahl des zu verwendenden Klimaszenarios und der durch die Simulationsdurchläufe verursachte Streuung beeinflusst werden.



**Abbildung 9: Einfluss der Landnutzungsszenarien auf die nutzbare Abflussklasse 3-100m<sup>3</sup>/s unter dem Klimaszenario regcm3 ab 2050 (Simulationsjahr 1).**



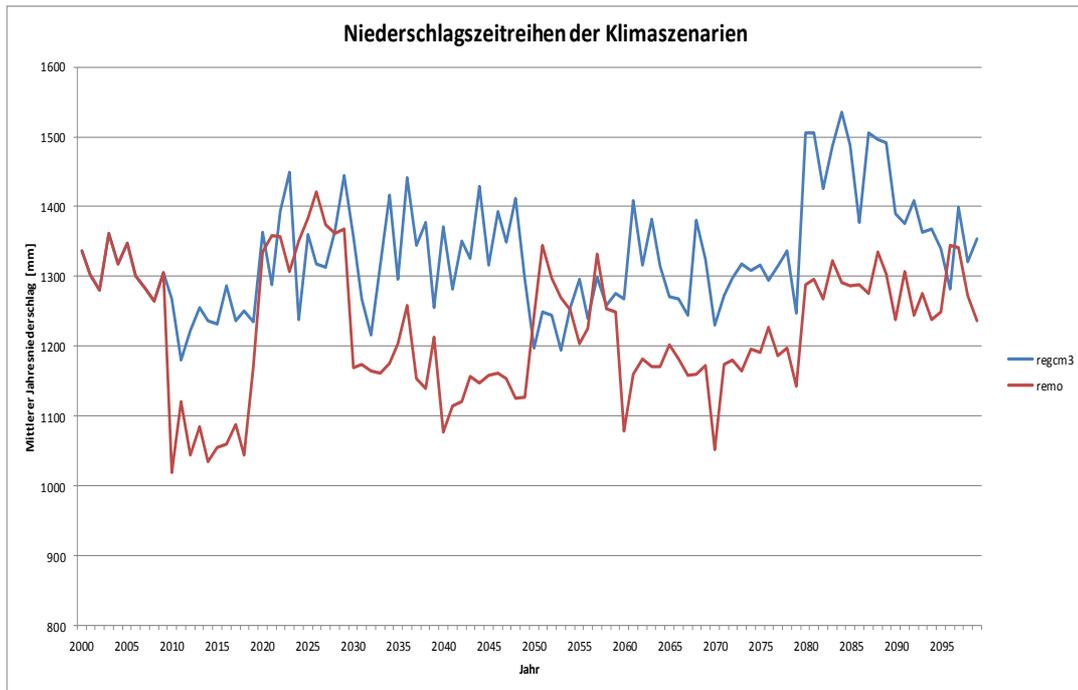
**Abbildung 10: Einfluss der Landnutzungsszenarien auf die nutzbare Abflussklasse 3-100m<sup>3</sup>/s unter dem Klimaszenario remo ab 2050 (Simulationsjahr 1).**

Aufgrund dieser Resultate wird zum jetzigen Zeitpunkt klar ersichtlich, dass die Landnutzungsänderung bei der Erstellung der *Bayes'schen Netzwerke* zur Quantifizierung der Ökosystemleistungen am Untersuchungsstandort keinen Einfluss hat.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Zunahme der Waldflächen der Landnutzungsänderung vor allem im Einzugsgebiet des Oberlaufes stattfindet und die Vermutung geäußert werden muss, dass sich allfällige Auswirkungen in diesem Bereich des Flusslaufes deutlicher manifestieren. Dies gilt es in künftigen Untersuchungen zu überprüfen.

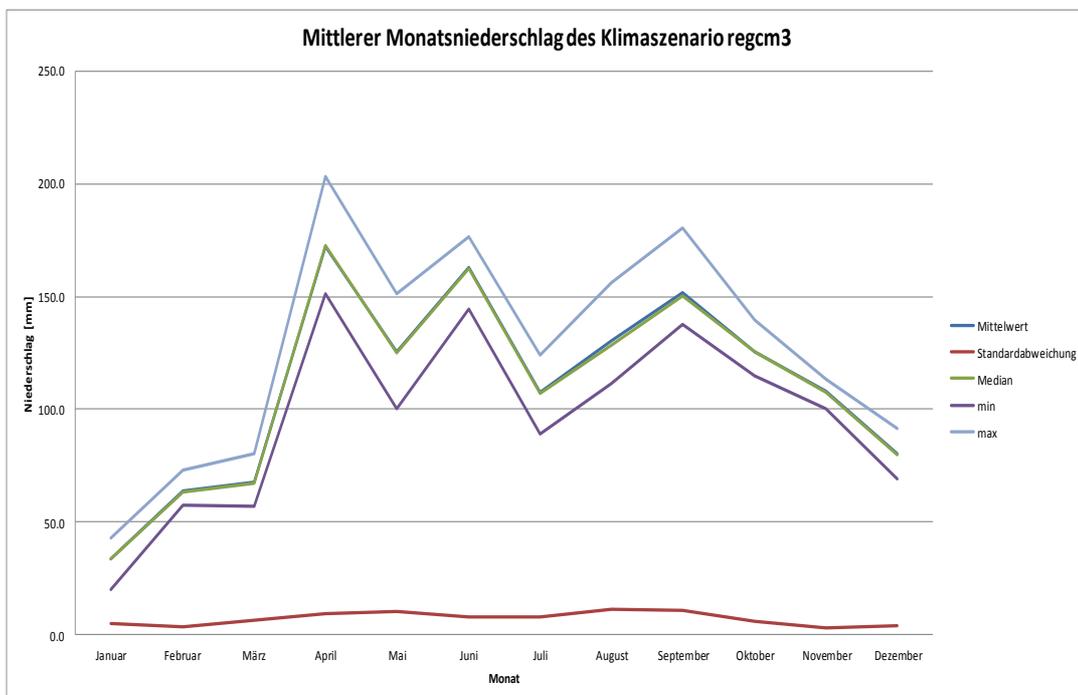
## 5.2. Auswirkung der Klimaszenarien auf den Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung über die gesamte Zeitreihe der Simulation (Abbildung 11) zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Jahresniederschlagsmengen für die beiden Klimaszenarien *regcm3* und *remo*. Es kann festgehalten werden, dass der Zeitraum 2000-2010, dessen Klimabedingungen bekannt sind, zur Evaluierung des Klimamodells genutzt wird (Vidale, Lüthi & Frei 2003). Mehrheitlich fallen die Niederschlagsmengen des Klimaszenarios *regcm3* im Vergleich zum Klimaszenario *remo* höher aus (2010-2018, 2030-2050, 2060-2095) mit einem Differenzbereich von 50-300mm Niederschlag. Zwischen diesen sich deutlich abgrenzenden Phasen finden sich Abschnitte mit sich deckenden mittleren Jahresniederschlägen.



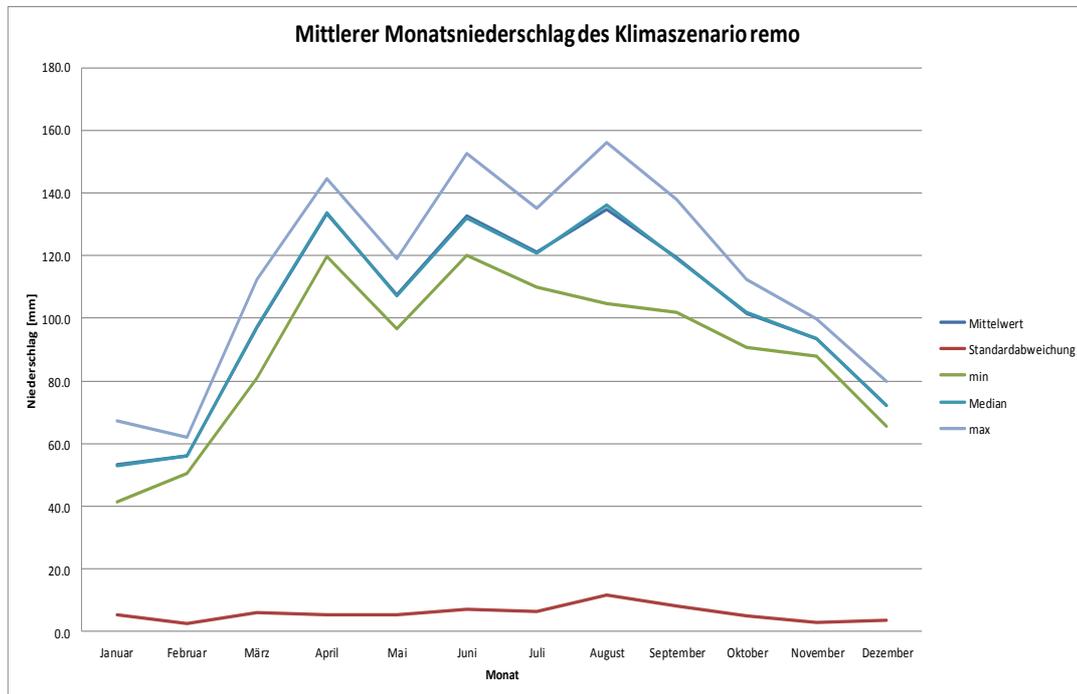
**Abbildung 11: Vergleich von Niederschlagszeitreihen der Klimaszenarien von 2000-2100.**

In Abbildung 12 des Klimaszenarios *regcm3* sind für die Monate April, Mai, August und September die grösste Streuung der Niederschlagswerte erkennbar. Auffallend ist, dass die Monate April und September gesehen zum Mittelwert grössere Sprünge Richtung Maximalwert zeigen, als dies im Monat Juni der Fall ist.



**Abbildung 12: Jahresverteilung des mittleren Monatsniederschlag des Klimaszenarios *regcm3* mit Simulationsbedingter Streuung.**

Die Visualisierung in Abbildung 13 der mittleren Monatsniederschläge des Klimaszenarios *remo* zeigt die grössten Streuungen der Niederschlagswerte im August. Der Juni hebt sich bloss bei den maximalen Werten ab.



**Abbildung 13: Jahresverteilung des mittleren Monatsniederschlags des Klimaszenarios *remo* mit Simulationsbedingter Streuung.**

In Abbildung 14 und Tabelle 9 finden sich direkte Gegenüberstellungen der mittleren Monatsniederschläge der verwendeten Klimaszenarien. Vergleicht man die Niederschlagsmengen und deren zeitliche Verteilung, gelangt man zu folgendem Schluss. Das Klimaszenario *regcm3* hat gegenüber dem Klimaszenario *remo* für die Monate Januar und März tiefere Niederschlagswerte, was sich aber im Verlauf des Frühlings ändert. So indiziert die Standardabweichung der Monate März, April, Juni und September markant höhere Niederschläge. Die mittleren Monatsniederschläge fallen für den angegebenen Zeitraum zwischen 14.6mm bis 19.4mm höher aus. Während der Monate Mai und Juni gehen die Niederschläge zurück, wobei im Juni die Niederschlagsmenge von *regcm3* unter die von *remo* sinkt. Ab September kann bis Dezember eine gleichmässig sinkende Niederschlagsmenge festgestellt werden. Übers ganze Jahr gemittelt hat das Klimaszenario *regcm3* einen mittleren Monatsniederschlag von 111mm, das Klimaszenario *remo* einen solchen von 102mm.

Vergleichend dazu weisen die mittleren Monatsniederschläge der Normperioden 1961-1990 und 1981-2010 deutlich niederschlagsärmere Monate auf (MeteoSchweiz 2014a, 2014b). Es hat im Frühjahr (März und April) und Spätsommer bis Anfang Winter

(September bis Dezember) weniger Niederschlag. Jedoch bleibt die Niederschlagsmenge den ganzen Sommer über auf einem ähnlich hohen Niveau.

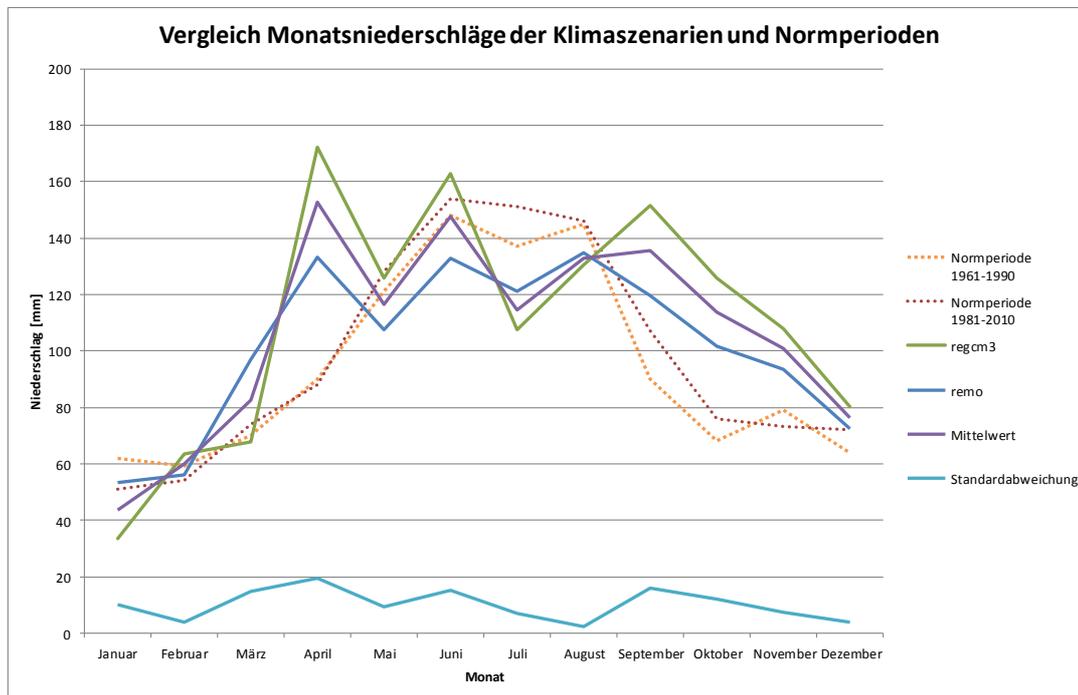


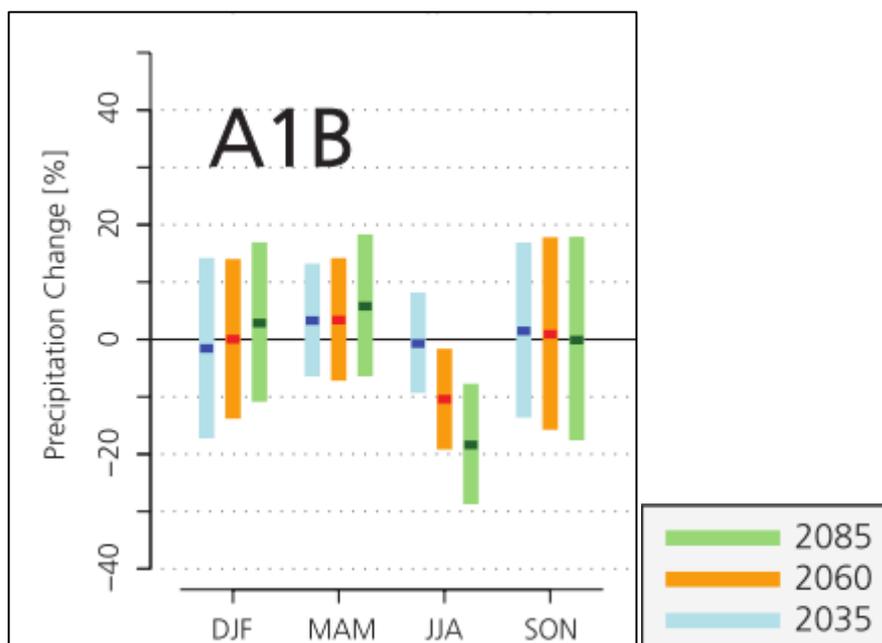
Abbildung 14: Vergleich der mittleren Monatsniederschläge aus den Simulationsdaten für die beiden Klimamodelle regcm3 und remo zu Normperioden (MeteoSchweiz, 2014a, 2014b).

Vergleich der mittleren Monatsniederschläge [mm]						
Monat	Normperiode		Klimaszenario			
	1961-1990	1981-2010	regcm3	remo	Mittelwert Klimaszenario	Standardabweichung
Januar	62	51	33	53	43.5	10.0
Februar	59	54	64	56	59.9	3.7
März	70	74	68	97	82.5	14.6
April	90	88	172	133	152.8	19.4
Mai	121	128	126	107	116.5	9.2
Juni	148	154	163	133	147.7	15.0
Juli	137	151	107	121	114.4	6.9
August	145	146	130	135	132.6	2.2
September	90	107	152	119	135.6	16.1
Oktober	68	76	126	102	113.7	12.0
November	79	73	108	93	100.7	7.3
Dezember	64	72	80	72	76.2	3.9
Mittelwert	94	98	111	102	106.3	10.0

Tabelle 9: Mittlere Monatsniederschläge der Klimaszenarien regcm3 und remo, Normperiode 1961-1990 und Normperiode 1981-2010 (MeteoSchweiz, 2014a, 2014b).

Die präsentierten Resultate zur jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung können durch weitere Quellen gestützt werden. Trotz stark sinkender Niederschlagsmenge der Sommermonate ab 2050 kann es zu einer Erhöhung der Niederschlagsmengen bei Extremereignissen kommen (CH2011 2011; Christensen & Christensen 2002; Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.) 2011).

Durch Verwendung von Klimamodellen können mittlerweile verlässliche Aussagen über die Grössenordnung und Richtung einer Entwicklung von Kerngrössen wie Gletscherbilanzen, Schneedecken und Temperaturen gemacht werden. Anders sieht es für die sehr kleinräumigen Parameter Niederschlag und Abfluss aus. Deren Modellierungen noch mit hohen Unsicherheiten behaftet sind (Beniston 2012; Gyalistras 2002; MeteoSchweiz 2013; Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.) 2011). Diese Aussage widerspiegelt sich auch in Abbildung 15, in welcher für den Prognosezeitraum bis 2050 keine bis nur geringfügige Veränderungen der Niederschlagsmengen auszumachen sind. Für die Winter- und Frühlingsmonate ist eine tendenzielle Niederschlagszunahme über den gesamten Prognosezeitraum ersichtlich. Die Herbstmonate kennzeichnen sich durch eine leichte Abnahme der Niederschlagsmengen, während der Sommermonate ist sogar eine deutliche Reduktion erkennbar.



**Abbildung 15: Vorhersage der Niederschlagsentwicklung in Prozent der vier Jahreszeiten (DJF: Dezember-Januar-Februar; MAM: März-April-Mai; JJA: Juni-Juli-August; SON: September-Oktober-November) mit den Zeiträume 2020-2049 (blau), 2045-2074 (orange) und 2070-2099 (grün) (Quelle: CH2011).**

Es kann mitgenommen werden, dass die im Verlauf der 21. Jahrhundert manifestierenden Veränderung der Niederschlagsregime zu einer Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen für Nordeuropa führt. Durch eine lineare Trendanalyse kann das für den Untersuchungsraum bestätigt werden. Die Gegenüberstellung der monatlichen Niederschlagsverteilungen der gesamten Simulationsdauer beider Klimaszenarien deckt sich in ihrer Entwicklungsrichtung mit den Resultaten von CH2011(2011). Interessant dabei sind die Resultate der Jahresverlaufsanalyse der 100-jährigen Prognose in kürzeren Zeitabschnitten zu betrachten. So wird bis ins Jahr 2050 eine geringe Veränderung proklamiert, während besonders gegen Ende des Jahrhunderts eine starke Niederschlagszunahme für die Winter- und Frühjahrsmonate und eine aussergewöhnlich stark ausgeprägte Abnahme der Sommerniederschlagsmengen vorausgesagt wird.

### 5.3. Vereinfachter Ansatz zur Hochwasserprognose

Die hier präsentierten Resultate basieren den Arbeitsschritten des Abschnitts 4.1. Zur Vermeidung von Wiederholungen erfolgen die Aufzählungen der mittleren Hochwasserabflüsse der Wiederkehrintervalle, wenn nicht anders beschrieben, in folgender Reihenfolge: 100 Jahre, 50 Jahre, 30 Jahre und 10 Jahre mit der jeweiligen Bezeichnung  $HQ_{100}$ ,  $HQ_{50}$ ,  $HQ_{30}$ , und  $HQ_{10}$ . Die entsprechende SI-Einheit von  $[m^3/s]$  wird nicht explizit angegeben.

#### 5.3.1. Quantil Methode

Anstelle einer sich erübrigenden Aufzählung der in den nachfolgend aufgezählten Tabellen enthaltenen Werte beschränken sich die Ausführungen aufs Erläutern der auffälligen Unterschiede und Strukturen. So hängt eine abnehmende Wiederkehrintervalldauer mit der erwarteten Abnahme der Hochwasserabflüsse zusammen. Bezugnehmend auf die Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12 wird der Einfluss der Landnutzungsänderung unter dem Klimaszenario *regcm3* beschrieben. Für alle Hochwasserabflüsse der Wiederkehrintervalle ist eine Erhöhung für die Landnutzungsszenarien *plus20* und *plus40* erkennbar. Wobei sie bei *plus20* leicht höher ausfällt. Die  $HQ_{100}$  Werte befinden sich im Bereich von 1016 bis 1094. Für  $HQ_{50}$  erstreckt sich der Wertebereich von 435 bis 480. Weiter erstreckt sich  $HQ_{30}$  von 334 bis 358,  $HQ_{10}$  schliesslich von 202 bis 231. Die bereits erwähnte Zunahme bei veränderter Landnutzung unterscheidet sich für *regcm3* nur geringfügig und entspricht bei  $HQ_{100}$  einer Zunahme von 8%, bei  $HQ_{50}$  einer Zunahme von 10%, bei  $HQ_{30}$  einer Zunahme von 7% und bei  $HQ_{10}$  einer Zunahme von 14%.

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (curr_regcm3)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	177	279	357	679
25% Quartil	192	314	406	926
Median	202	334	437	1004
<b>Mittelwert</b>	<b>203</b>	<b>334</b>	<b>435</b>	<b>1016</b>
Standardabweichung	17.2	28.0	37.1	130.1
75% Quartil	213	350	461	1103
max	231	397	510	1332

**Tabelle 10: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr\_regcm3.**

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (plus20_regcm3)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	182	270	349	687
25% Quartil	212	323	445	929
Median	225	354	480	1020
<b>Mittelwert</b>	<b>231</b>	<b>359</b>	<b>480</b>	<b>1094</b>
Standardabweichung	30.2	46.3	62.2	239.7
75% Quartil	247	394	522	1175
max	284	477	588	1498

**Tabelle 11: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus20\_regcm3.**

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (plus40_regcm3)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	182	269	348	687
25% Quartil	212	323	445	928
Median	225	354	480	1020
<b>Mittelwert</b>	<b>232</b>	<b>359</b>	<b>480</b>	<b>1094</b>
Standardabweichung	30.1	46.4	62.1	239.8
75% Quartil	247	394	522	1176
max	283	476	587	1498

**Tabelle 12: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus40\_regcm3.**

In den folgenden Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 wird die resultierende Veränderung der Hochwasserabflüsse bei Verwendung des Klimaszenarios *remo* ersichtlich. Die  $HQ_{100}$  Werte liegen im Bereich von 729 bis 1094.45.  $HQ_{50}$  deckt einen Wertebereich von 311.28 bis 480 ab. Erstreckt sich  $HQ_{30}$  von 245.33 bis 358.64, reicht es bei  $HQ_{10}$  noch für Werte von 155.83 bis 231.47. Die relative Hochwasserabflusszunahme vom Landnutzungsszenario *curr* zum Landnutzungsszenario *plus20* entspricht für  $HQ_{100}$  einem Wert von +50%, für  $HQ_{50}$  einem Wert von +54%, für  $HQ_{30}$  einem Wert von +46%

und für  $HQ_{10}$  einem Wert von +49%. Beim Vergleich der Veränderung des Landnutzungsszenarios *curr* zum Landnutzungsszenario *plus40* entspricht die relative Zunahme von  $HQ_{100}$  einem Wert von +11%, für  $HQ_{50}$  einem Wert von +7%, für  $HQ_{30}$  einem Wert von +1% und für  $HQ_{10}$  einem Wert von +5%.

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (curr_remo)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	136	200	265	590
25% Quartil	151	233	299	663
Median	156	246	310	726
<b>Mittelwert</b>	<b>156</b>	<b>245</b>	<b>311</b>	<b>729</b>
Standardabweichung	13.3	18.4	22.0	95.1
75% Quartil	162	259	325	774
max	179	284	358	914

**Tabelle 13: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr\_remo.**

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (plus20_remo)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	129	185	266	544
25% Quartil	150	228	309	690
Median	163	248	324	764
<b>Mittelwert</b>	<b>231</b>	<b>359</b>	<b>480</b>	<b>1094</b>
Standardabweichung	30.2	46.3	62.2	239.7
75% Quartil	178	264	349	935
max	202	305	406	1165

**Tabelle 14: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus20\_remo.**

Hochwasserabflüsse Quantil Methode (plus40_remo)[m3/s]				
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
min	130	186	265	545
25% Quartil	151	228	309	691
Median	163	248	324	764
<b>Mittelwert</b>	<b>164</b>	<b>247</b>	<b>333</b>	<b>811</b>
Standardabweichung	18.8	29.2	35.7	152.8
75% Quartil	178	263	349	936
max	202	306	394	1165

**Tabelle 15: Hochwasserabflüsse mit Quantil Methode für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios plus40\_remo.**

Durch Vergleichen der Mittelwerte der Hochwasserabflüsse aller Szenarien kann zusammenfassend Folgendes festgehalten werden. Beide zur Simulation benutzen Klimaszenarien führen unabhängig vom Wiederkehrintervall bei Verwendung der Landnutzungsszenarien *plus20* und *plus40* zur Erhöhung der Hochwasserabflüsse. Die relative Zunahme der Hochwasserabflüsse des Klimamodells *regcm3* beider Landnutzungsszenarien tritt aber in einem engen Rahmen auf und entspricht abhängig vom Wiederkehrintervall der Bandbreite von 7-14%. Vergleichend dazu fällt die Bandbreite 46-54% relativer Zunahme für das Klimamodell *remo* bei Landnutzungsszenario *plus 20* deutlich höher aus, um sich dann im Landnutzungsszenario *plus40* mit relativer Zunahme der Werte von 1-10% auf einem tieferen Niveau einzupendeln. Abschliessend bleibt festzuhalten, dass das Szenario *plus40\_remo* unerwartet tiefe Hochwasserabflüsse enthält.

### 5.3.2. Johnson Verteilung

Zu der in Abschnitt 4.3. beschriebenen Implementierung der Johnson Verteilung zur Berechnung von Hochwasserabflüssen mit definierten Wiederkehrintervallen werden in Tabelle 16 und Tabelle 17 Resultate präsentiert.

Simulation	Hochwasserabfluss(curr_regcm3)[m3/s]			
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
1	1079	1511	1689	1901
5	1046	1597	1903	2377
10	939	1493	1794	2244
15	994	1487	1748	2140
20	1338	2008	2309	2693
25	799	1285	1577	2055
30	928	1239	1386	1591
35	1026	1401	1583	1840
40	1105	1775	2179	2841
45	830	1040	1135	1264
50	908	1507	1886	2528
Mittelwerte	999	1486	1744	2134
Standard-abweichung	135.6	237.4	304.4	431.8

**Tabelle 16: Hochwasserabflüsse nach Johnson Verteilung für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr\_regcm3.**

Simulation	Hochwasserabfluss(curr_remo)[m3/s]			
	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
1	638	850	943	1061
5	859	1443	1803	2400
10	786	1072	1175	1287
15	655	808	857	908
20	749	1320	1678	2283
25	666	861	935	1021
30	654	910	1042	1237
35	755	1429	1897	2745
40	748	1044	1193	1408
45	625	891	1031	1243
50	781	1170	1378	1691
Mittelwerte	720	1072	1267	1571
Standard-abweichung	69.2	216.0	337.8	571.1

**Tabelle 17: Hochwasserabflüsse nach Johnson Verteilung für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall des Szenarios curr\_remo.**

Durch den explorativen Ansatz bei Verwendung der *Johnson Verteilung* wurde diese Methode nur auf die beiden Klimaszenarien *regcm3* und *remo* und dem Landnutzungsszenario *curr* angewandt. Beim Vergleich der erhaltenen Mittelwerte für die Hochwasserabflüsse fällt besonders auf, dass auch mit dieser Methode die Werte für das Klimamodell *regcm3* höher ausfallen. Zudem sind die Hochwasserabflusswerte um den Faktor 1.5 bis 2 höher als die von Eppler (2014) und dem Bundesamt für Umwelt (2013) präsentierten zu erwartenden Hochwasserabflussmengen.

### 5.3.3. Vergleich mit Referenzwerten

Die präsentierten Resultate sind in sich stimmig, müssen aber in der Diskussion in Relation zu den Resultaten von Eppler (2014) und den Hochwasserwahrscheinlichkeitstabellen des Bundesamtes für Umwelt gebracht werden.

Die in Tabelle 18 enthaltenen Werte werden mittels der *Methode der Jahresmaximalreihen* (AMF) für den Standort Reussbühl bei Littau berechnet. Die Arbeit von Eppler (2014) beruft sich dabei auf eine Kurvenverteilungsanpassung nach GEV (Generalised Extrem Value Distribution) bei einer zehnjährigen Zeitreihe (2000-2010), während das Bundesamt für Umwelt (2013) sich an die Log-Pearson-III-Verteilung bei einer 76-jährigen Zeitreihe hält.

Hochwasserabflussmenge mit Verteilungsanpassungen					
Methode	Fitting	HQ10	HQ30	HQ50	HQ100
AMF	GEV	464			752
AMF	Log-Pearson-III	485	590	639	706

**Tabelle 18: Hochwasserabflussmengen für 10, 30, 50, 100 Jahre Wiederkehrintervall berechnet mit AMF Methode mit GEV Kurvenanpassung (Eppler 2014) und AMF Methode mit Log-Pearson-III (Bundesamt für Umwelt BAFU 2013).**

#### 5.3.4. Diskussion zur Verwendung vereinfachter Prognoseansätzen

Bei der Aufarbeitung des Einflusses der Klimaszenarien auf den Niederschlag im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (Abschnitt 5.2) konnte gezeigt werden, dass es im Laufe des 21. Jahrhundert im Untersuchungsgebiet zu einer leichten Zunahme der jährlichen Niederschlagsmengen kommt und sich deren zeitliche Verteilung teilweise von den Normperioden 1961-1990 und 1981-2010 unterscheiden.

Vergleicht man die Resultate der Hochwasserberechnung dieser Arbeit mit den in Tabelle 18 zusammengetragenen Werten, kommt man zu folgendem Schluss: Der Ansatz nach Johnson kann als nicht verwertbar eingeordnet werden. Für die *HQ100* Berechnung kommt es zu einer Überschätzung der Resultate von 300% für das Klimaszenario *regcm3* und 200% für das Klimaszenario *remo*. Diese Überschätzung muss als klar unrealistisch angesehen werden. So wird durch diese Arbeit ausdrücklich von einer Verwendung des *R Package SuppDists* zur Extremwertanalyse abgeraten. Etwas anders sieht es für die *Quantil Methode* aus. Interessanterweise werden die Resultate für *HQ10*, *HQ30* und *HQ50* je nach Klima- und Landnutzungsszenario um 125-300% unterschätzt. Jedoch scheint die Methode für den Wert von *HQ100* eine einfache Abschätzung mit der *Quantil Methode* zuzulassen. Unter dem Klimaszenario *regcm3* zeigen die Werte eine leichte Überschätzung von 35-45%. Teilweise kann diese Überschätzung mit der im Laufe des 21. Jahrhunderts prognostizierten Intensivierung der Starkniederschlagsereignisse erklärt werden. Die Quantität dieser Überschätzung ist bis heute jedoch nicht eruiert. Anders sieht es für die Resultate des Klimaszenarios *remo* aus. Hier ist ein Streubereich von -3 bis 45% erkennbar, welcher nicht mit den erwarteten Werten übereinstimmt. Es kann nur vermutet werden, dass sich die *Quantil Methode* ausschliesslich unter Verwendung des Klimaszenarios *regcm3* eignet, um eine Abschätzung über den Wert von *HQ100* zu machen.

Kurz vor Fertigstellung der vorliegenden Arbeit konnte durch Einblick in die Arbeit von Eppler (2014) festgestellt werden, dass das dieser Arbeit zugrunde liegende *TOPKAPI* Modell dazu führt, dass es bei der Abschätzung von Hochwasserabflüssen zu

Überschätzungen kommt. Gemäss Eppler (2014) kann dieser Effekt durch entsprechende Anpassungen behoben werden.

Diese Simulationen noch einmal durchlaufen zu lassen, würde den Umfang dieser Masterarbeit sprengen. Für eine künftige Durchführung einer ähnlichen Arbeit wird folgendes Vorgehen empfohlen. Es ist ratsam, in einem ersten Schritt die Hochwasserabflusswerte nach einer Methode nach DVWK(1999) zu berechnen. Auf dieser Resultatbasis ist es möglich, die Abschätzung durch andere Methoden aussagekräftiger durchzuführen.

### 5.4. Hydrologische Ökosystemleistung Wasserkraft

#### 5.4.1. Bayes'sche Netzwerkstruktur

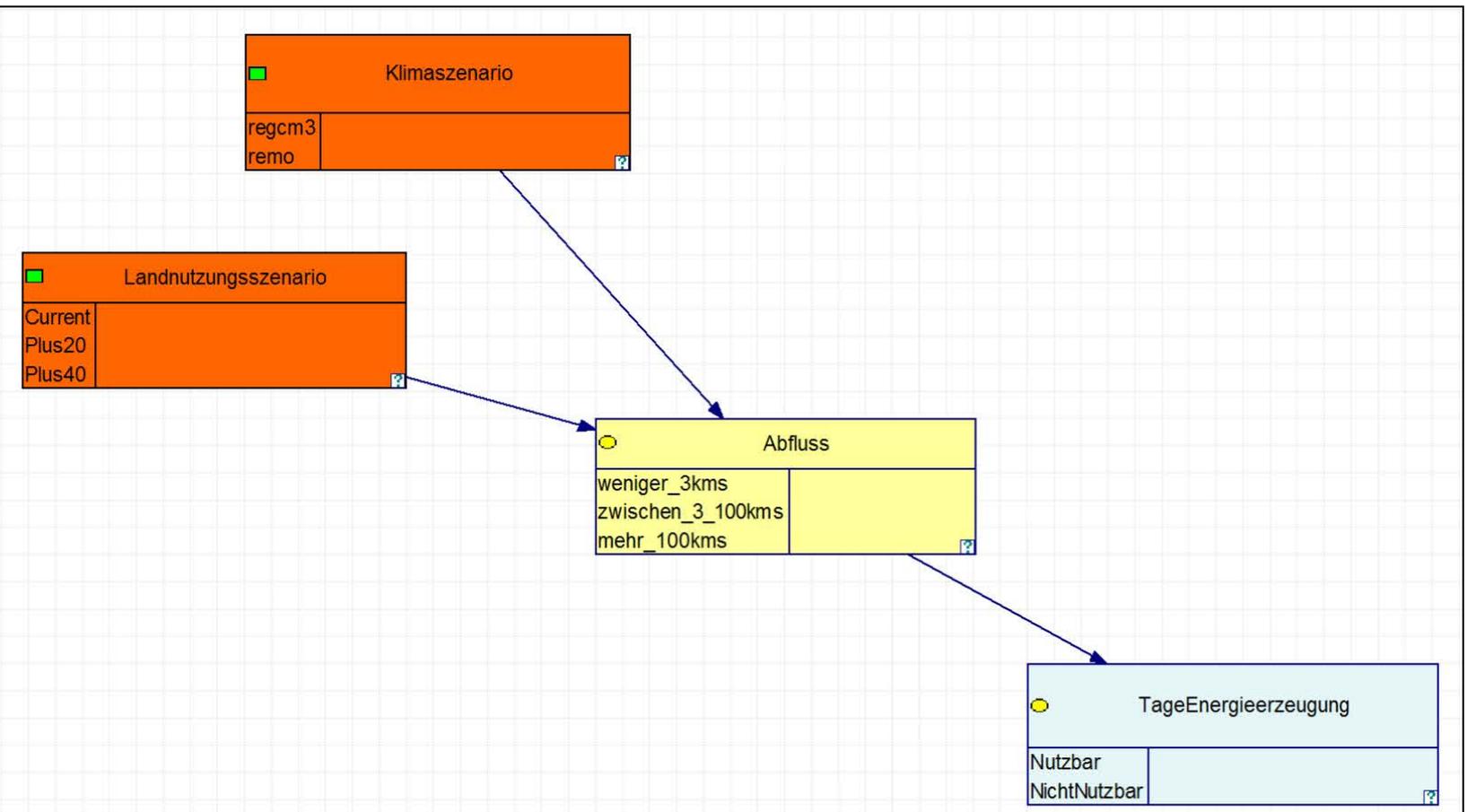


Abbildung 16: Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft mit allen beteiligten Nodes.

Beschreibung der in Abbildung 16 enthaltenen *Nodes* des *Bayes'schen Netzwerk Wasserkraft*:

*Klimaszenario (Desicion Node)*: Umfasst die beiden verwendeten Klimamodelle *regcm3* und *remo* der Simulation.

*Landnutzungsszenario (Desicion Node)*: Umfasst die verwendeten Landnutzungsszenarien *current*, *plus20* und *plus40*.

*Abfluss [m<sup>3</sup>/s](Chance-Node)*: die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abflussklassen wird durch die a-priori Wahrscheinlichkeiten des *Klimaszenarios* und *Landnutzungsszenarios* bestimmt.

*Tage Energieerzeugung[Tage] (Chance-Node)*: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Nutzbarkeitsklassen hängt von den a-priori Wahrscheinlichkeiten von *Abfluss* ab.

#### 5.4.2. Kategorisierung des Abflusses

Basierend auf den in Tabelle 22 enthaltenen Kategorisierungsklassen können für die sechs zu untersuchenden Szenarien Teilresultate in Tabelle 19 und Tabelle 20 gezeigt werden.

Szenario	Simulationsdauer [Jahre]	Mittelwert [Tage]	Abflussklassen [Tage/Jahr]		
			< 3	3-100	> 100
			zu wenig	nutzbar	zu viel
curr_regcm3	100		36.66	323.12	5.46
curr_remo	100		33.88	328.31	3.05
curr_regcm3	50		42.69	323.67	6.18
curr_remo	50		44.06	324.99	3.50
plus20_regcm3	50		42.91	323.42	6.21
plus20_remo	50		43.87	325.15	3.52
plus40_regcm3	50		42.54	323.77	6.23
plus40_remo	50		43.46	325.55	3.53

**Tabelle 19: Mittelwerte der Abflussklassierung aller Szenarien über ein Jahr.**

Die gemittelten Verteilungen der Abflussklassen eines Jahres können der Tabelle 19 entnommen werden. Die Verteilung der Klassenhäufigkeiten ist in Tagen angegeben. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass bei Aufsummierung der einzelnen Klassen eines Szenarios der Wert von 365 Tagen eines Jahres überschritten wird. Diese Anomalie hängt mit der Datenaggregation und der Bildung von Klassen zusammen. Da die Niederschlagsereignisse der 50 Simulationen durchläufe sich in ihrer zeitlichen Verteilung und Intensität unterscheiden, wird zur Erhaltung der Simulationsvariabilität bereits auf Stufe der Simulationen mit der Erfassung der Klassenverteilung begonnen. Die darauffolgende

Berechnung der Klassenmittelwerte führt dazu, dass die Anzahl Tage nicht mehr mit der Realität übereinstimmt. Leider lässt sich dieser negative Effekt nicht durch eine Anpassung in der Datenaufbereitung beheben. Interessanterweise führt dies bei den 100-jährigen Simulationen nur zu einer Zunahme von 0.24 Tagen, während das Jahr der 50-jährigen Simulationen um 7.54 Tage gestreckt wird.

Vergleicht man die Abflussklassen-Mittelwerte der Abflussklasse *zu klein* mit der heutigen Landnutzung, fällt die markante Abnahme von Tagen der 100-jährigen Szenarien auf. Vergleicht man nun alle Szenarien, die von 2050 bis 2100 simuliert wurden, wird ersichtlich, dass es innerhalb der Klassen nur kleine Differenzen gibt. Dies legt die Vermutung nahe, dass ein zu Beginn der Simulation (2000-2050) laufender Prozess sich in den Resultaten der Klasse *zu klein* bemerkbar macht.

Nach einer Normalisierung der Werte in Tabelle 19 wird für die weiteren Ausführungen auf Tabelle 20 Bezug genommen. Es werden ausschliesslich die 50-jährigen Simulationen näher besprochen, da diese denselben 50-jährigen Simulationszeitraum aufweisen. So kann zwischen 86.81% und 87.34% der Zeit des Jahres der Abfluss des Flusses als für die Wasserkraftanlagen *nutzbar* eingestuft werden. Wobei anzumerken ist, dass durch die begrenzende Anlagendimensionierung nur bis zu  $16\text{m}^3/\text{s}$  dieses Abflusses auch tatsächlich genutzt werden können.

Szenario	Simulationsdauer [Jahre]	Mittelwert [Tage]	Abflussklassen [Normalisiert Tag/Jahr]		
			< 3	3-100	> 100
			zu wenig	nutzbar	zu viel
curr_regcm3	100		0.10037	0.88468	0.01495
curr_remo	100		0.09276	0.89890	0.00834
curr_regcm3	50		0.11460	0.86881	0.01659
curr_remo	50		0.11826	0.87235	0.00939
plus20_regcm3	50		0.11519	0.86814	0.01667
plus20_remo	50		0.11775	0.87280	0.00945
plus40_regcm3	50		0.11419	0.86909	0.01672
plus40_remo	50		0.11666	0.87387	0.00948

**Tabelle 20: Standardisierte Mittelwerte der Abflussklassen aller Szenarien.**

Lenkt man das Augenmerk auf die nicht nutzbaren Klassen, so herrschen zwischen 11.42% und 11.83% des Jahres Wasserstände, die keine Nutzung mehr zulassen und gerade mal zwischen 0.94% und 0.17% des Jahres kommen die Anlagen an die Verarbeitungskapazitätsgrenzen. Der Vergleich der sechs Szenarien bringt zu Tage, dass die drei Landnutzungsszenarien *current*, *plus20* und *plus40* keinen massgeblichen Einfluss auf die Auftretenshäufigkeit der einzelnen Abflussklassen hat. Die Klimaszenarien *regcm3* und *remo* widerspiegeln ihre Grundcharakteristiken dadurch,

dass die *remo* geprägten Szenarien (1) in den Klassen *zu wenig* und *nutzbar* leicht höhere Mittelwerte haben (2), aber in der Klasse *zu viel* tiefere Mittelwerte aufweisen als *regcm3* und (3) dennoch höher ausfallen als für *curr*. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die aufgezeigte Spannweite der Werte für die Implementierung der Daten ins *Bayes'sche Netzwerk Wasserkraft* zu gering ausfällt, als dass die Szenarienwahl einen Einfluss auf die Monetarisierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* hätte.

#### 5.4.3. Vom Niederschlag zur Stromproduktion

Gemäss der Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz werden im Flusslauf der Kleinen Emme vier Laufkraftwerke - Wohlhusen, Ettisbühl, Thorenberg und Emmenwald - betrieben. Bei jeder der vier Wasserkraftanlagen handelt es sich um ein Laufkraftwerk (Bundesamt für Energie BFE 2013). Während Wohlhusen und Ettisbühl direkt am Fluss stationiert sind, werden Thorenberg und Emmenwald durch mit Einlaufschützen versehene Kanäle mit Wasser versorgt.

Die Daten der Tabelle 21 und Informationen der Kraftwerkbetreiber werden zur Erstellung der Abflussklasseneinteilung (siehe Abschnitt 4.1.) verwendet.

Kraftwerk	Wohlhusen	Ettisbühl	Thorenberg	Emmenweid
Kraftwerktyp	Laufkraftwerk	Laufkraftwerk	Laufkraftwerk	Laufkraftwerk
Verarbeitungskapazität [m <sup>3</sup> /s]				
minmal		2	2.5	
maximal	4	16	6.5	12
Notabschaltung Anlage [m <sup>3</sup> /s]		> 100		
Stromtarife [CHF/m <sup>3</sup> /s]		0.003	0.0057	

**Tabelle 21: Wasserkraftanlagen an der Kleinen Emme (mündliche Information von M. Scherrer (Wasserkraftwerk Ettisbühl), 21.11.2013; H.U. Ledermann (Wasserkraftwerk Thorenberg), 22.11.2013; Bundesamt für Energie BFE (2013)).**

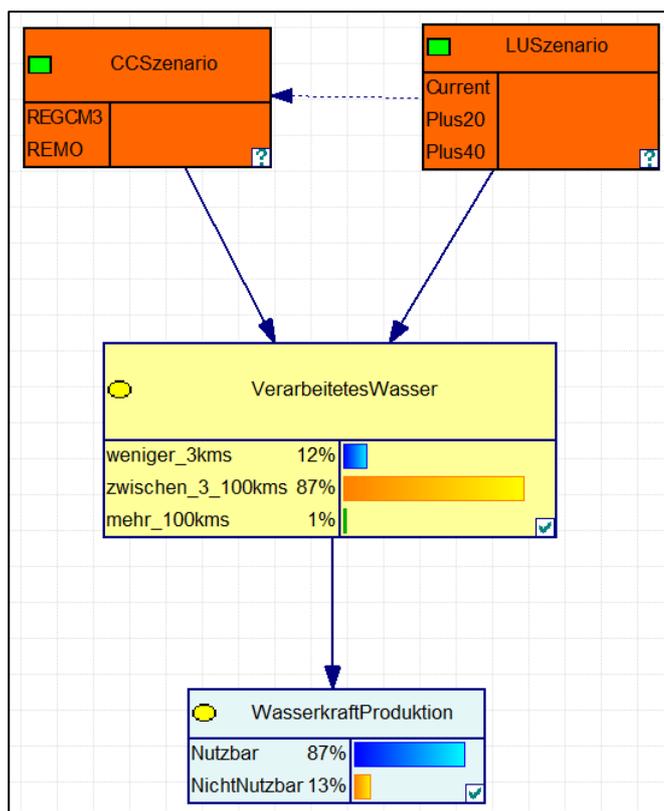
Durch Kontaktaufnahme mit den Kraftwerkbetreibern konnten für einen Teil der Anlagen noch zusätzliche Informationen zu den bereits in der Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz (Bundesamt für Energie BFE 2013) aufgeführten eingeholt werden. So ergänzt Herr M. Scherrer (Ettisbühl) am 21.11.2013, dass der Wirkungsgrad der Anlage durch Veränderung des Anstellwinkels der Turbinenschaufeln über den ganzen Bereich der Verarbeitungskapazität optimiert wird. Erst ab einem Abfluss von über 100 m<sup>3</sup>/s muss auf Grund drastisch zunehmender Schwemmholzmengen eine Notabschaltung der Anlage vorgenommen werden. Ähnliches berichtet H.U. Ledermann (Thorenberg) am 22.11.2013. So kann bei Hochwasserereignissen die Wassermenge durch Zulaufschütze am Kanaleingang kontrolliert werden.

Zusammenfassend zeigt die Tabelle 22, dass Abflussmengen kleiner als 2 Kubikmeter pro Sekunde und über 100 Kubikmeter pro Sekunde als *nicht nutzbar* einzustufen sind. Einzig die Abflussmenge im Bereich von 3-100 Kubikmeter pro Sekunde kann zur Energieerzeugung durch Wasserkraftanlagen genutzt werden. Die Stromtarife der Tabelle 21 der beiden Kraftwerke Ettisbühl und Thorenberg werden zur Monetarisierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* verwendet.

Abflussmenge [m3/s]	< 3	3-100	>100
Abflussklasse	nicht nutzbar	nutzbar	nicht nutzbar

**Tabelle 22: Bildung Abflussklassen aus Abflussmenge.**

Die normalisierten Mittelwerte der Abflussklassenverteilung werden im *Bayes'schen Netzwerk Wasserkraft* zur Definition der *CPT* verwendet. Die in Abschnitt 5.4.2 aufgestellte Vermutung der sich zu wenig differenzierenden Szenarien-Ausprägung wird auch im dazugehörigen *Bayes'schen Netzwerk* gestützt.



**Abbildung 17: Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft mit Resultat unter Berücksichtigung aller Szenarien.**

So liefert das in Abbildung 17 abgebildete *Bayes'sche Netzwerk Wasserkraft* für den Knoten *AbflussTurbine* das Resultat, dass durchschnittlich während 87% der Tage eines Jahres Strom erzeugt werden kann. In keinem der simulierten Szenarien wird dieser Wert

verändert. Durch Kombination der Nutzbarkeit mit den eingeführten Stromtarifen lässt sich die jährliche *Ökosystemleistung Wasserkraft* monetarisieren.

Durchfluss [m3/s]	Durchfluss [m3/Tag]	Tage nutzbar	Preis [CHF/m3/s]	Ertrag [CHF/Jahr]
16	1382400	324	0.00435	1'948'355
3	259200	324	0.00435	365'316

**Tabelle 23: Monetarisierung der Ökosystemleistung Wasserkraft durch Bayes'sches Netzwerk Wasserkraft.**

Unter Verwendung eines für die beiden Wasserkraftanlagen Ettisbühl und Thorenberg gemittelten Strompreises wird der jährliche Ertrag der *Ökosystemleistung Wasserkraft* berechnet. So wird in Tabelle 23 die Bandbreite der zu erwartenden variablen Durchflussmengen der nutzbaren Klasse berücksichtigt. Die hydrologische *Ökosystemleistung Wasserkraft* kann mit dem jährlichen Ertrag der Kraftwerksbetreiber gleichgesetzt werden und liegt im Bereich von 365'316 CHF und 1'948'355 CHF.

#### 5.4.4. Diskussion der Resultate in einem weiteren Kontext

Betrachtet man die in diesem Abschnitt erarbeiteten Resultate zur Abflussänderung im Kontext der durch Klimawandel und Landnutzungsänderungen hervorgerufenen Niederschlagsverteilungen (siehe Abschnitt 5.1 und 5.2), kann Nachfolgendes beobachtet werden.

Die von Beniston (2012) aufgestellte Vermutung, dass es durch abnehmende Verteilung der Vegetationsdecke zu einer Erhöhung des mittleren Jahresabflusses und beschleunigten Abflüssen während heftiger Regenfällen kommt, muss basierend auf den vorliegenden Resultaten kritisch hinterfragt werden. So können aus den Resultaten der Klassenverteilung der mittleren Jahresabflüsse (Tabelle 20) nur sehr kleine Veränderungen von weniger als 1% für Szenarien mit identischem Klimaszenario und unterschiedlichen Landnutzungsänderungen erkannt werden. Zudem lässt sich die Zunahme von Waldfläche nicht mit einem klaren Entwicklungstrend der Klassenverteilung in Verbindung setzen.

Ausgehend von der auf mittleren Jahresabflüssen basierenden Quantifizierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* kommt man zum Schluss, dass sich die Wahl des zu verwendenden Klimaszenarios in den Abflussklassenverteilungen, wenn auch in sehr geringem Ausmass, widerspiegelt und sie in ihrer Logik mit den präsentierten Klimawandprognosen stimmig ist. Bei Verwendung der drei Landnutzungsszenarien ist es nicht möglich, eindeutige Aussagen bezüglich Grösse des Einflusses oder dessen Richtung der Entwicklung zu machen. Die mittels des *Bayes'schen Netzwerks Wasserkraft*

durchgeführte Quantifizierung der Abflussmengen zeigt Differenzen in der Ausprägung der Szenarien. Trotzdem fallen sie bei der Monetarisierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* zu wenig ins Gewicht, als dass die Szenarien eine Veränderung der monetären Wertigkeit verursachen würden.

Die künftige Stromgewinnung mittels Laufkraftwerken an der Kleinen Emme wird von den (1) ausgeglicheneren Abflussregime mit höheren Abflussmengen im Winter und (2) der Zunahme des Jahresabflusses in der Nordschweiz leicht profitieren. Zudem werden die Kraftwerke durch das höhere Fassungsvermögen ihre Stromproduktion steigern können (Gaudard et al. 2013; Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.) 2011).

### 5.5. Hydrologische Ökosystemleistung Trinkwasser

#### 5.5.1. Bayes'sche Netzwerkstruktur

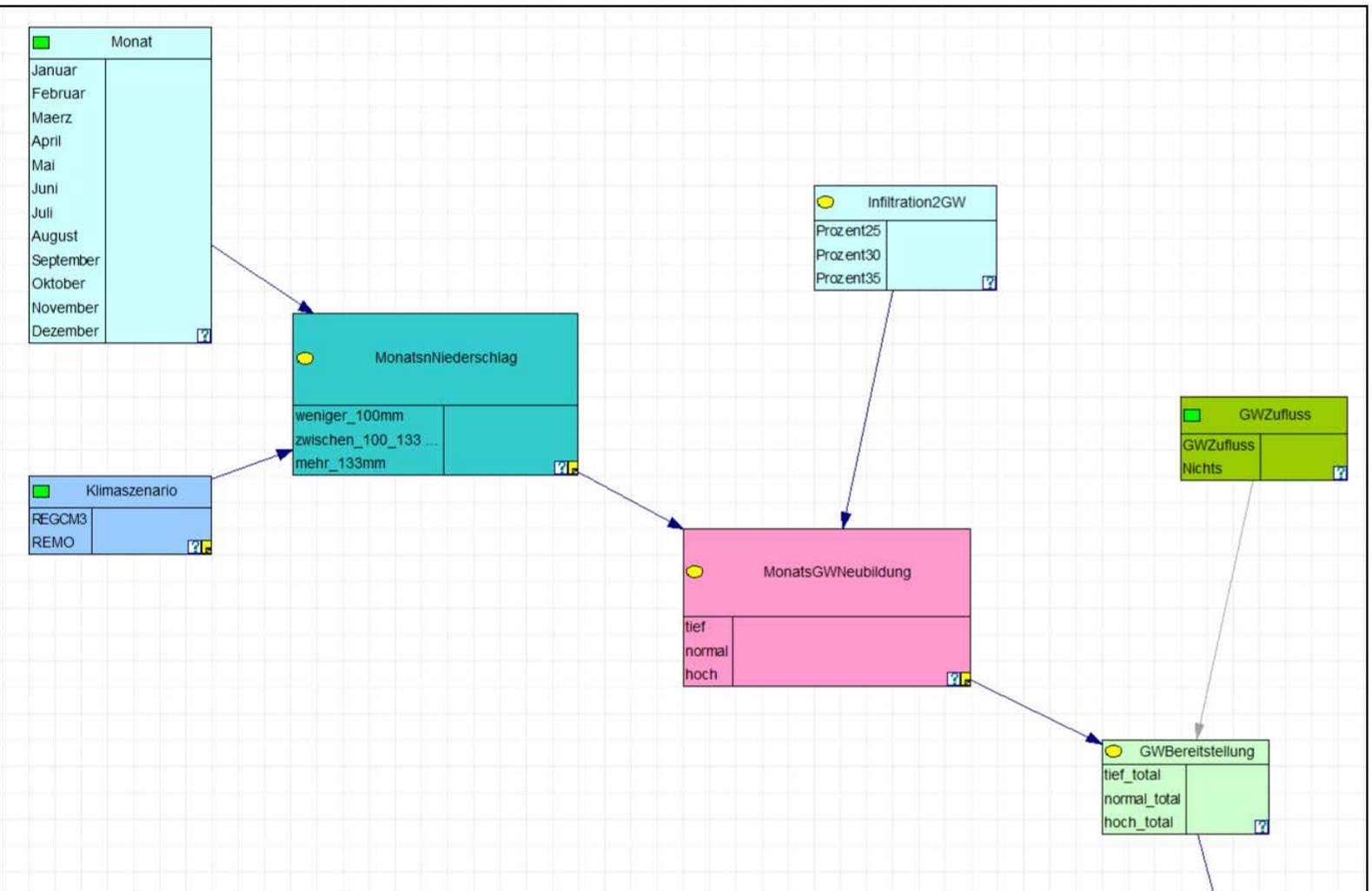


Abbildung 18: Bayes'sches Netzwerk der Bereitstellungside der Grundwasserbilanzierung.

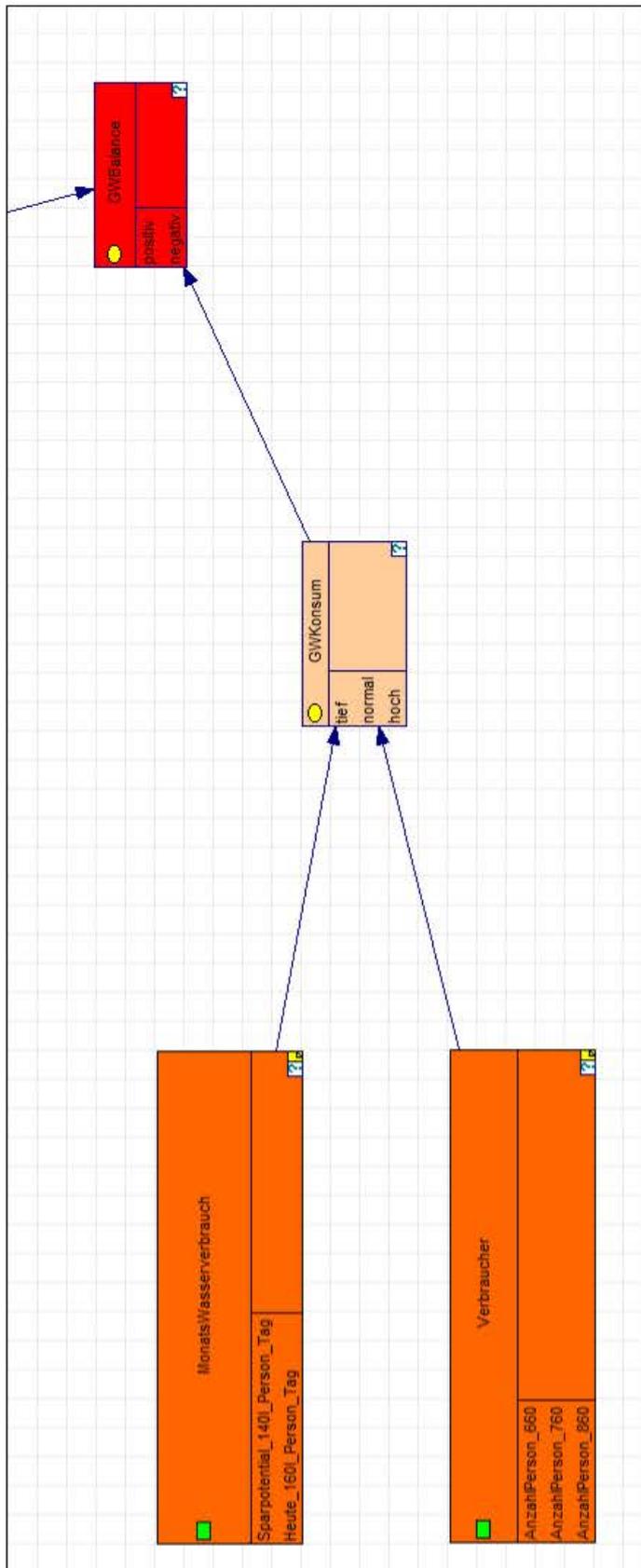


Abbildung 19: Bayes'sches Netzwerk der Verbraucherseite der Grundwasserbilanzierung mit Grundwasserbilanzierung.

Im folgenden Abschnitt werde die in Abbildung 18 und Abbildung 19 enthaltenen *Nodes* des *Bayes'schen Netzwerk Trinkwasser* beschrieben:

*Monat* (Decision Node): Auswahl des zu untersuchenden Monats oder Jahresmittel.

*Klimaszenario* (Decision Node): Entscheidung über das zur Simulationsberechnung verwendete Klimaszenario.

*Monatsniederschlag* (Chance Node) [mm/Monat]: Widerspiegelt in seinen drei Zuständen (1) deutlich weniger als Jahresmittelwert, (2) um den Jahresmittelwert und (3) deutlich mehr als der Jahresmittelwert die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Kombinationsmöglichkeiten seiner Parent Nodes *Monat* und *Klimaszenario*.

*Infiltratio2GW* (Chance Node)[%]: Beinhaltet die Wahrscheinlichkeiten für die erwarteten Infiltrationsraten.

*MonatsGWNeubildung* (Chance Node) [l/Monat]: Entspricht mit seinen drei Zuständen einer (1) tieferen, (2) normalen und (3) höheren monatlichen Grundwasserneubildung durch Niederschlag.

*GWZufluss* (Decision Node) [l/Monat]: Mit der Entscheidung über den Grundwasserfluss wird berücksichtigt, dass sich bei Veränderung der klimatischen Rahmenbedingungen auch der Grundwasserzufluss stromaufwärts leicht anpasst. Wird so umgesetzt, dass nur ein Zustand zur Implementierung gewählt wird.

*GWbereitstellung* (Chance Node)[l/Monat]: Beinhaltet die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Kombinationsmöglichkeiten seiner Parent Nodes *MonatsGWNeubildung* und *GWZufluss* und beschreibt die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für (1) eine tiefere, (2) normale und (3) höhere Grundwasserbereitstellung.

Zur quantitativen Bestimmung des am Untersuchungsort als Trinkwasser konsumierten Grundwassers werden der zu erwartende Wasserverbrauch und die potentielle Anzahl Verbraucher zum Grundwasserkonsum vereint. Folgende Auflistung beschreibt die zur Implementierung der Wirkungsgefüge des *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasser* benötigten Nodes.

*Wasserverbrauch* (Decision Node) [l/Person/Tag]: Entscheidung über den zu erwartenden Wasserverbrauch. Dabei kann zwischen einem dem heutigen Verbrauch oder einem reduzierten Verbrauch entschieden werden.

*Verbraucher* (Decision Node) [Personen]: Entscheidung über die Anzahl zu versorgender Personen durch die am Untersuchungsstandort bereitgestellte Trinkwassermenge. Es besteht die Möglichkeit zwischen drei Szenarien zu wählen.

*GWKonsum* (Chance Node) [l/Person/Tag]: Entspricht den Wahrscheinlichkeitsverteilungen aller Kombinationsmöglichkeiten der Parent Nodes *Wasserverbrauch* und *Verbraucher*. Es werden drei Konsumszenarien erfasst: (1) tiefer als normal, (2) normal und (3) höher als normal.

Im Node *GWBalance* werden die beiden Netzwerkzweige von Bereitstellung und Verbrauch vereint.

*GWBalance*(Chance Node) [%]: Die repräsentierten Zustände geben mit ihren Wahrscheinlichkeiten Auskunft über das Verhältnis ihrer Parent Nodes *GWBereitstellung* und *GWKonsum*. Dieser Node beendet schliesslich das *Bayes'sche Netzwerk Trinkwasser*.

### 5.5.1. Vom Niederschlag zum Trinkwasser

Vorweg muss darauf hingewiesen werden, dass entgegen dem in den Methoden erläuterten Ansatz zur Bestimmung der Grundwasserneubildung aus (1) Niederschlag und (2) Grundwasserbeeinflussung durch anliegendes Gewässer nur ersterer explizit umgesetzt werden kann. Aufgrund der langen Berechnungszeiten mussten die Simulationsstandorte bereits in einem frühen Stadium der Arbeit definiert werden. Durch die geschickte Platzierung dieser Simulationspunkte im Flussnetz erhofft man sich, später alle notwendigen Daten ableiten zu können. Mit Ernüchterung muss bei der Umsetzung der in Abschnitt 4.2 eingeführten *DARCY-Methode* festgestellt werden, dass es zur quantitativen Bestimmung des Einflusses der Kleinen Emme auf das Grundwasser zwingend notwendig ist, Simulationspunkte ausserhalb des Flussnetzes zu setzen. Nur so kann die Schwankung des Grundwasserpegels registriert und zur Erfassung der zeitlich variablen Interaktion des Grundwassers und anliegendem Fließgewässer genutzt werden. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Arbeit ist ausschliesslich die Untersuchung des Einflusses des zeitlich und klimabedingt variierenden Niederschlags auf die Grundwasserneubildung möglich.

Durch die Analyse der vorausgehenden Resultate zu Auswirkung der Klimaszenarien auf die Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet und Überprüfung des *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasser* bezüglich Zusammenhang der Niederschlagsmenge und resultierender Grundwasserbilanz wird die Grundwasserbilanzierung in drei Gruppen unterteilt. Basierend darauf erfolgt die Grundwasserbilanzierung der Monate mit (1) höheren, (2) normalen und (3) tieferen mittleren Monatsniederschlägen.

*Grundwasserbilanzierung bei hohen Monatsniederschlägen*

Die Monate April, Juni, August und September weisen für das Klimaszenario *regcm3* und *remo* mittlere Monatsniederschläge von 130-172mm und 119-133mm auf. Folglich liegen sie deutlich über dem Jahresmittelwert von 111mm und 102mm.

Grundwasserbilanzierung bei hohen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
April	x		x		x			64	36
		x	x		x			60	40
	x			x	x			88	12
		x		x	x			86	14
	x		x			x		56	44
		x	x			x		53	47
	x			x		x		84	16
		x		x		x		81	19
	x		x				x	19	81
		x	x				x	17	83
x			x			x	27	73	
	x		x			x	25	75	

**Tabelle 24: Grundwasserbilanzierung des Monats April bei hohen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei hohen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Juni	x		x		x			64	36
		x	x		x			60	40
	x			x	x			88	12
		x		x	x			86	14
	x		x			x		56	44
		x	x			x		53	47
	x			x		x		84	16
		x		x		x		81	19
	x		x				x	19	81
		x	x				x	17	83
x			x			x	27	73	
	x		x			x	25	75	

**Tabelle 25: Grundwasserbilanzierung des Monats Juni bei hohen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei hohen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
August	x		x		x			59	41
		x	x		x			61	39
	x			x	x			85	15
		x		x	x			86	14
	x		x			x		52	48
		x	x			x		53	47
	x			x		x		80	20
		x		x		x		81	19
	x		x				x	17	83
		x	x				x	17	83
x			x			x	25	75	
	x		x			x	26	74	

**Tabelle 26: Grundwasserbilanzierung des Monats August bei hohen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei hohen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
September	x		x		x			64	36
		x	x		x			57	43
	x			x	x			88	12
		x		x	x			83	17
	x		x			x		56	44
		x	x			x		50	50
	x			x	x			84	16
		x		x	x			78	22
	x		x				x	19	81
		x	x				x	16	84
x			x			x	27	73	
	x		x			x	24	76	

**Tabelle 27: Grundwasserbilanzierung des Monats September bei hohen Niederschlägen.**

Die Resultate der Tabelle 24 bis Tabelle 27 machen deutlich, dass eine Verbraucherzunahme trotz hoher Niederschlagsmengen dieser Monate zu erheblich negativer Grundwasserbilanzierung führt. Auch unter Ausschöpfung des Sparpotentials beim Monatswasserverbrauch reduziert sich die Wahrscheinlichkeit einer negativen Bilanzierung bloss um 2%. Ausgehend von der heutigen Anzahl Verbraucher und dem Szenario einer Abnahme der Verbraucher wird beim Wasserverbrauchsszenario von heute eine ausgeglichene und bis zu 64% positive Bilanz erreicht. Durch Verminderung des Wasserverbrauchs wird die Wahrscheinlichkeit einer positiven Bilanzierung auf 78-88% gesteigert. Über alle Szenarien hinweg weist das Klimaszenario *regcm3* gegenüber *remo* eine Tendenz zu einer positiveren Grundwasserbilanz auf.

*Grundwasserbilanzierung bei mittleren Monatsniederschlägen*

Die mittleren Monatsniederschläge der Monate Mai, Juli und Oktober liegen für die Klimaszenarien *regcm3* und *remo* im Bereich von 107-126mm und 102-121mm. Dies entspricht dem Bereich des mittleren Jahresniederschlags.

Grundwasserbilanzierung bei mittleren Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Mai	x		x		x			58	42
		x	x		x			56	44
	x			x	x			84	16
		x		x	x			82	18
	x		x			x		51	49
		x	x			x		49	51
	x			x	x			79	21
		x		x	x			77	23
	x		x				x	16	84
		x	x				x	16	84
x			x			x	24	76	
	x		x			x	22	78	

**Tabelle 28: Grundwasserbilanzierung des Monats Mai bei mittleren Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei mittleren Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Juli	x		x		x			55	45
		x	x		x			57	43
	x			x	x			81	19
		x		x	x			83	17
	x		x			x		48	52
		x	x			x		50	50
	x			x		x		76	24
		x		x		x		78	22
	x		x				x	15	85
		x	x				x	16	84
x			x			x	22	78	
	x		x			x	23	77	

**Tabelle 29: Grundwasserbilanzierung des Monats Juli bei mittleren Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei mittleren Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Oktober	x		x		x			58	42
		x	x		x			53	47
	x			x	x			83	17
		x		x	x			80	20
	x		x			x		50	50
		x	x			x		48	52
	x			x		x		78	22
		x		x		x		75	25
	x		x				x	16	84
		x	x				x	14	86
x			x			x	24	76	
	x		x			x	21	79	

**Tabelle 30: Grundwasserbilanzierung des Monats Oktober bei mittleren Niederschlägen.**

Aus den in Tabelle 28 bis Tabelle 30 enthaltenen Resultaten wird ersichtlich, dass die Szenarien mit einer Verbraucherzunahme in allen Fällen zu einer deutlich negativen Grundwasserbilanz von 84-86% bei heutigem Wasserverbrauch und 76-79% bei Ausnutzung des Sparpotentials führen. Bei bleibender Anzahl Verbraucher ist die Grundwasserbilanz beim heutigem Wasserverbrauch in etwa ausgeglichen, in Abhängigkeit des verwendeten Klimaszenarios kommt es zu leichten Verschiebungen. Nach wie vor wird durch einen reduzierten Wasserverbrauch eine positive Bilanzierung von 75-79% erreicht. Die Abnahme der Verbraucheranzahl resultiert in einer über alle Szenarien hinweg wirkende positive Bilanzierung von 53-58% bei heutigem Wasserverbrauch und 80-83% bei verringertem Wasserverbrauch.

*Grundwasserbilanzierung bei tieferen Monatsniederschlägen*

Während der Monate Januar, Februar, März, November und Dezember liegen die mittleren Monatsniederschläge für die Klimaszenarien *regcm3* und *remo* im Bereich von 33-108mm und 53-97mm. Diese Bereiche liegen deutlich unter dem mittleren Jahresniederschlag der Simulationen.

Grundwasserbilanzierung bei tiefen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Januar	x		x		x			48	52
		x	x		x			48	52
	x			x	x			75	25
		x		x	x			75	25
	x		x			x		40	60
		x	x			x		40	60
	x			x		x		70	30
		x		x		x		70	30
	x		x				x	12	88
		x	x				x	12	88

**Tabelle 31: Grundwasserbilanzierung des Monats Januar bei tiefen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei tiefen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Februar	x		x		x			48	52
		x	x		x			48	52
	x			x	x			75	25
		x		x	x			75	25
	x		x			x		40	60
		x	x			x		40	60
	x			x		x		70	30
		x		x		x		70	30
	x		x				x	12	88
		x	x				x	12	88

**Tabelle 32: Grundwasserbilanzierung des Monats Februar bei tiefen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei tiefen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
März	x		x		x			48	52
		x	x		x			51	49
	x			x	x			75	25
		x		x	x			77	23
	x		x			x		40	60
		x	x			x		43	57
	x			x		x		70	30
		x		x		x		73	27
	x		x				x	12	88
		x	x				x	13	87

**Tabelle 33: Grundwasserbilanzierung des Monats März bei tiefen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei tiefen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
November	x		x		x			57	43
		x	x		x			48	52
	x			x	x			82	18
		x		x	x			75	25
	x		x			x		49	51
		x	x			x		40	60
	x			x		x		78	22
		x		x		x		70	30
	x		x				x	16	84
		x	x				x	12	88
x			x			x	23	77	
	x		x			x	18	82	

**Tabelle 34: Grundwasserbilanzierung des Monats November bei tiefen Niederschlägen.**

Grundwasserbilanzierung bei tiefen Niederschlägen									
Monat	Klima-szenario		Monats-Wasserverbrauch		Verbraucher			GWBalance [%]	
	regcm3	remo	Heute (160)	Sparpotential (140)	660	760	860	positiv	negativ
Dezember	x		x		x			48	52
		x	x		x			48	52
	x			x	x			75	25
		x		x	x			75	25
	x		x			x		40	60
		x	x			x		40	60
	x			x		x		70	30
		x		x		x		70	30
	x		x				x	12	88
		x	x				x	12	88
x			x			x	18	82	
	x		x			x	18	82	

**Tabelle 35: Grundwasserbilanzierung des Monats Dezember bei tiefen Niederschlägen.**

Die verminderten Niederschlagsmengen widerspiegeln sich deutlich in der Grundwasserbilanzierung aller Szenarien. So wird fast ausschliesslich noch bei der heutigen oder einer verminderten Anzahl Verbraucher und einem reduzierten Wasserverbrauch eine positive Grundwasserbilanzierung erlangt. Diese kommt in einem Wahrscheinlichkeitsbereich von 70-82% zu liegen. Zudem kommt es bei einer reduzierten Verbraucheranzahl mit heutigem Wasserverbrauch teilweise noch zu einer positiven Bilanzierung, wobei diese Schwankungen mit dem jeweiligen untersuchten Monat zusammenhängen. Die stark negativ bilanzierten Szenarien einer zunehmenden Verbraucheranzahl erreichen Werte von 77-88% negativer Bilanzierung. Für die gemässigten negativen Bilanzierungen liegt der Bereich zwischen 52 und 60%.

### Grundwasserbilanzierung aus Pumpversuch

Aus dem Schlussbericht „Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme“ wird dem untersuchten Flussabschnitt VI folgende Grundwasserbilanz zugewiesen (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990). Gemäss Tabelle 36 und Tabelle 37 kommt es unter Berücksichtigung aller beteiligten Komponenten zu einem Grundwasserverlust von 28470m<sup>3</sup>/Monat. Lässt man die anthropogene Grundwasserentnahme weg, fällt die Bilanzierung positiv aus: 24090 m<sup>3</sup>/Monat. Würde diese Grundwassermenge monatlich abgeführt, wäre eine ausgeglichene Grundwasserbilanz für den untersuchten Standort gewährleistet.

Grundwasserneubildung [m <sup>3</sup> /Monat]	
Niederschlag	32850
Seitenhänge	8760
Seitenbach	35040
Infiltration Kleine Emme	21900
Gesamtgrundwasserneubildung	98550

**Tabelle 36: Grundwasserneubildung gemäss Schlussbericht "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme" (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990).**

Grundwasserverlust [m <sup>3</sup> /Monat]	
Exfiltration Kleine Emme	74460
Entnahme	52560
Gesamtgrundwasserverlust	127020

**Tabelle 37: Grundwasserverlust gemäss Schlussbericht "Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme"(Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990).**

#### 5.5.2. Monetarisierung

Basierend auf der bereits in Abschnitt 2.4. eingeführten Markpreis-Monetarisierungsmethode wird im folgenden Abschnitt eine explizite Monetarisierung für den Untersuchungsstandort des *Bayes'schen Netzwerks Trinkwasser* durchgeführt. Wobei aufgrund der vereinfachten Implementierung nur der Teil der Grundwasserneubildung aus Infiltration von Niederschlag für die Szenarien berücksichtigt wurde. Die Trinkwasserpreise bewegen sich im Bereich von 1.55-1.85 CHF/m<sup>3</sup> (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012b; Energie Wasser Luzern EWL 2013; Freiburghaus 2012; Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW 2012).

GWNeubildung Szenario	Monat	Niederschlag [mm/Monat]	Grundwasserneubildung [m <sup>3</sup> /Monat]	min Ertrag [CHF]	max Ertrag [CHF]
maximal	April	172	50671	78'540	93'742
ausgeglichen	Juli	121	35647	55'252	65'946
minimal	Januar	33	9722	15'069	17'985

**Tabelle 38: Monetarisierung der maximalen, ausgeglichenen und minimalen Grundwasserneubildungsmenge aller Szenarien.**

Ausgehend davon, dass die gesamte Grundwasserneubildungsmenge der Szenarien aus Tabelle 38 durch den Wasserversorger verwertet wird, kann ein monetärer Wertbereich von (1) 78'500-93'700 CHF für das maximale Szenario, (2) 55'200-66'600 CHF für das ausgeglichene Szenario und (3) 15'000-18'000 CHF für das minimale Szenario erwartet werden. Zum Vergleich kann aus den Werten von 1981-1990 der Tabelle 36 für die Grundwasserneubildung aus Niederschlag ein monetärer Wertebereich von 50'900-60'800 CHF berechnet werden.

### 5.5.3. Diskussion der Resultate in einem weiteren Kontext

Unter Verwendung des in Abschnitt 5.2 aneigneten Wissens zu den Auswirkungen der Klimaszenarien auf die prognostizierten Niederschlagsmengen und deren zeitlicher Verteilung konnte eine passende Niederschlagsklassierung durchgeführt werden (Abschnitt 4.2). So zeigen die resultierenden monatlichen Grundwasserbilanzierungen einen klaren Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und positiver beziehungsweise negativer Grundwasserbilanzierung. Ausgehend von der in Abschnitt 2.4 und Abschnitt 4.2 weitergehend erläuterten Strukturen kann für jeden Monat aus (1) Klimaszenario, (2) Monatswasserverbrauch und (3) Anzahl Verbraucher gewählt werden, auf welchen Grundannahmen die Bilanzierung stattfinden soll. So entstehen für jeden Monat acht Kombinationsmöglichkeiten. Da für keinen Monat bei der Voraussetzung des Verbraucherszenarios 860 eine positive Bilanzierung erzielt werden konnte, wird dieses Szenario bei den folgenden Erläuterungen nicht berücksichtigt. Es kennzeichnen sich die Monate hoher Monatsniederschlägen mit durchwegs positiven und einer ausgeglichenen Bilanzierung. Monate mittlerer Monatsniederschläge haben höchstens eine negative Bilanzierung, während es für die Monate geringer Niederschläge deren drei bis vier sind.

Die durchschnittliche monatliche Grundwasserneubildung über Infiltration bei einem monatlichen Niederschlag von 107mm kann für den Zeitraum 1981-1990 mit 32850m<sup>3</sup>/Monat beziffert werden (Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis 1990). Vergleichend dazu wird aus den Szenarien der Monat Juli gewählt, weil dieser (1) einen

mittleren Monatsniederschlag nahe den Jahresmittelwerten beider Klimaszenarien hat und (2) eine ausgeglichene Grundwasserbilanzierung aufweist. Abhängig vom jeweiligen Klimaszenario mit mittleren Monatsniederschlägen von 107mm und 121mm findet eine Grundwasserneubildung von 31520-35650m<sup>3</sup>/Monat statt. Obwohl diese Werte in einem ähnlichen Bereich liegen, darf daraus kein voreiliger Schluss auf die quantitative Veränderung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* gezogen werden. Es stehen sich zwar auf mittleren Monatsniederschlägen basierende Grundwasserneubildungswerte gegenüber, diese unterscheiden sich aber um den Faktor 10 im Beobachtungszeitraum, was wiederum zu unterschiedlichen Unsicherheiten der Daten führt. Zur Quantifizierung der Veränderung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* ist der prognostizierte Niederschlag der entscheidende Parameter. Wie in Abschnitt 5.2 erörtert, wird für den Zeitraum 2000-2100 von einer (1) Zunahme der Jahresniederschlagsmenge, (2) leichten und mittleren Niederschlagszunahme der Winter- und Frühlingsmonate begleitet von Starkregenereignissen, (3) ausgeprägten Reduktion der Sommerniederschläge begleitet von häufiger auftretenden Trockenperioden und (4) einer leichten Abnahme der Herbstniederschläge ausgegangen. Bei ganzjähriger Beurteilung der Entwicklung der Grundwasserverfügbarkeit stehen die Chancen gut, dass die Grundwasserpegelsenkung aufgrund sommerlicher, langer Trockenperioden durch den Mehrniederschlag bei gleichzeitiger Grundwasserbildung der Wintermonate kompensiert wird (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2008; Ernst Basler + Parner AG 2007).

Es kann festgehalten werden, dass sich das *Bayes'sche Netzwerk Grundwasser* zur Quantifizierung des Einflusses der Klimaszenarien auf die *Ökosystemleistung Trinkwasser* eignet. Die monatlichen Grundwasserbilanzierungen stehen im Einklang zu den klimatischen Bedingungen des Simulationszeitraums.

Die bewusst gewählte, vereinfachte Implementierung wirkt sich in folgenden Bereichen der Resultate aus. (1) Die nicht vorhandenen Simulationsdaten zur Grundwasserpegelhöhe am Untersuchungsstandort verunmöglichen den Einbezug der grundwasserbeeinflussenden Interaktion zwischen Grundwasser und anliegendem Fließgewässer. Zur Quantifizierung dieser Beziehung wären für beide Komponenten entsprechende Simulationsdaten notwendig. (2) Zunehmende Niederschläge sind mit einer Zunahme des Grundwasserzuflusses gekoppelt. (3) Insbesondere die Variabilität der Grundwasserinfiltration von Niederschlag über die Bodenmatrix ist in Anbetracht der prognostizierten Veränderung der Sommermonate mit verringerter Niederschlagshäufigkeit und stattfindender Intensivierung nur teilweise erfassbar. (4) Der Grundwasserzufluss aus anliegenden Hängen und Seitenbächen ist nicht umgesetzt.

Die durch einfache Abbildung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* berechnete monetäre Wertigkeit (siehe Tabelle 38) muss relativiert werden. Durch Vergleich der Grundwasserneubildungsmengen der Tabelle 36 und Tabelle 38 kann davon ausgegangen werden, dass sich durch Einbezug aller beteiligten Prozesse der Grundwasserneubildung deren Quantität um den Faktor drei erhöht. Das bedeutet, dass unter künftigen Klimabedingungen der *Ökosystemleistung Trinkwasser* ein monatlicher Monetärer Wert von 45'000-54'000 CHF beim minimalen Szenario, 165'000-198'000 CHF beim ausgeglichenen Szenario und 235'000-282'000 CHF beim maximalen Szenario zugewiesen werden kann.

Mit der klimabedingten Auswirkung auf die Jahresniederschlagsverteilung wird sich auch die monatliche Grundwasserverfügbarkeit verändern (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012a). Gemäss Schürch (2010) herrscht heute im Einzugsgebiet der Kleinen Emme ein pluvial-nivale-préalpines Grundwasserregime. Der maximale Grundwasserstand wird durch Überlagerung der Schneeschmelze und überlagernden Frühlingsniederschlägen für den Monat März oder April erwartet. Der minimale Grundwasserstand tritt im Winter ein. Es ist nicht geklärt, inwiefern sich die in Abschnitt 5.2 erläuterten Veränderungen der Niederschlagsregime auf das Grundwasserregime auswirken. Es ist fraglich, ob die vermutete Zunahme von Grundwasserneubildung im Frühling den Mangel im Juli zu kompensieren vermag. Der bisherige minimale Grundwasserstand im Winter wird durch höhere Herbstniederschläge vermutlich gehoben. Trotz eintretender Veränderung ist eine Regimeveränderung eher unwahrscheinlich (Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.) 2011).

Aus Sicht der Wasserversorger erscheint eine neue Problematik. Bis anhin konnte in Jahren mit unterdurchschnittlich viel Niederschlag die reduzierte Quantität des Quellwassers zur Wasserversorgung durch höhere Bezüge aus Grundwasser kompensiert werden (Freiburghaus 2012). Ob und in welchem Umfang dies bei Eintritt der prognostizierten Trockenperioden im Sommer noch möglich ist, ist nicht geklärt. Gerade in dicht besiedelten Gebieten mit geringerer Grundwasserneubildungsrate besteht die Gefahr, durch Übernutzung der Grundwasserressource deren Qualität langfristig negativ zu beeinflussen (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2003; Eawag (Hrsg.) 2000). Die Herkunft des von den Wasserversorgern bereitgestellten Trinkwassers unterscheidet sich massgeblich in seinen Kosten. Sie belaufen sich für Gewinnung und Aufbereitung von Quellwasser auf 0.30 CHF/m<sup>3</sup>, bei Grund- und Seewasser belaufen sich die entsprechenden Kosten auf 0.60 CHF/m<sup>3</sup> (Kappeler 2010). Bei Gegenüberstellung der

Entwicklung der Kostenentwicklung stellt sich heraus, dass es selbst nach Teuerungsbereinigung für den Zeitraum 1980-2010 zu einer Kostenzunahme von 43% kam, der Wasserpreis im selben Zeitraum aber nur um 32% anstieg (Freiburghaus 2012). Trotz grösserer Aufwände für die Wassergewinnung- und -aufbereitung weisen grosse Wasserversorger gegenüber kleineren Wasserversorgern tiefere Grundgebühren und Mengenbeiträge für die Konsumenten auf (Kappeler 2010). Aus ökonomischer Sicht wird es für kleinere Wasserversorger (Privatpersonen und Gemeinden) künftig lukrativer sein, sich zusammenzuschliessen. Dies, da der hohe Fixkostenanteil der Wasserversorgung im Zusammenhang mit nicht dem Konsumrückgang angepassten Preiserhöhungen dazu führt, dass kleine Wasserversorger es verhältnismässig schwieriger haben, ihre Infrastrukturkosten zu finanzieren (Bundesamt für Gesundheit BAG & Bundesamt für Umwelt BAFU 2013; Freiburghaus 2012; Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW 2012). Durch die steigenden Infrastrukturkosten, Veränderung der Wasserherkunft und zu erwartenden Versorgungsengpässen während der prognostizierten Trockenperioden im Sommer wird der Wasserpreis im 21. Jahrhundert steigen. Dies wiederum wird auch auf *Ökosystemleistung Trinkwasser* Einfluss haben. Das Ausmass der Preiserhöhung ist aufgrund der komplexen Rahmenbedingungen in der Schweiz noch nicht quantifizierbar. Einen tiefergehenden Ausblick auf die Szenarien einer nachhaltigen Wasserwirtschaft gewährt die Arbeit von Lienert, Monstadt & Truffer. (2006).

## 5.6. Beurteilung zur Implementierung Bayes'scher Netzwerke

Zur Quantifizierung der *Ökosystemleistungen Trinkwasser und Wasserkraft* wurden gemäss den in Abschnitt 2.4 ausgeführten Eigenschaften der Ökosystemleistungen geeignete *Bayes'sche Netzwerke* erstellt, deren Verwendung im kommenden Abschnitt erläutert und beurteilt werden.

Die massgebenden Einflussfaktoren bei der Quantifizierung der *Ökosystemleistungen Trinkwasser* sind auf der Bereitstellungsseite die Wahl des zu verwendeten *Klimaszenario* und *Monat*, auf der Nachfrageseite die Wahl des *MonatsWasserverbrauch* und die Anzahl *Verbraucher*. Diese *Nodes* sind mit kontinuierlichen Daten der hydrologischen Simulation und standortspezifischen Kennzahlen versehen. Diese Daten müssen zur Sicherstellung der weiteren Verwendbarkeit in *States* (Kategorien) umgewandelt werden (Korb & Nicholson 2004). Die Definition der States erfolgt durch das vorhandene Expertenwissen über die Prozesszusammenhänge und kann der Zielsetzung entsprechend angepasst werden. Bei Wegfall des Expertenwissens kann auf Algorithmen zur automatischen Kategorisierung zurückgegriffen werden. Die Zuordnung einer passenden Anzahl und

eines passenden Levels der *States* für alle *Nodes* stellt eine Herausforderung dar (Stewart-Koster et al. 2010). Die Berechnung der *CPT* dieser *Nodes* erfolgt durch Kombination des Expertenwissens und den vorhandenen Simulationsdaten sowie standortspezifischen Kennzahlen. Da Ziel dieser Arbeit nicht die Quantifizierung der hydrologischen Simulationsunsicherheiten ist, werden diese Daten als exakt angenommen. Es kommt zu keiner Implementierung, welche die Simulationsunsicherheiten besonders berücksichtigt. So kommen die *Nodes MonatsNiederschlag* und *GWKonsum* ohne Beeinflussung durch den Grad persönlicher Überzeugung aus und werden ausschliesslich durch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der *States* aller Kombinationsmöglichkeiten gekennzeichnet. Der darauffolgende *Node MonatsGWNeubildung* besteht nun aus den drei *States*, die einer heutigen, tieferen und höheren monatlichen Grundwasserneubildung entsprechen. Zur Erstellung der *CTP* wird Expertenwissen angewandt, was gewährleistet, dass die logischen Prozesszusammenhänge erhalten bleiben. Es zeigt sich bereits bei dieser relativ einfachen Umsetzung, dass es eine Herausforderung ist, dieser Anforderung gerecht zu werden. Da dieses Vorgehen durch Verwendung von Expertenwissen und externem Wissen über das untersuchte Phänomen eine maximale Effizienz aufweist wird es häufig angewandt (Perreault, Bernier, Bobée & Parent 2000). Zur Erweiterung des Netzwerkes wird auf der Bereitstellungsseite noch der Grundwasserzufluss durch den *Node GWZUfluss* eingeführt und führt durch Verbindung mit der monatlichen Grundwasserneubildung (*MonatsGWNeubildung*) zur gesamthaften Grundwasserbereitstellung (*GWBereitstellung*). Durch das Expertenwissen wird erreicht, dass die *CPT* dafür sorgt, dass (1) eine höhere Wahrscheinlichkeit der monatlichen Grundwasserneubildung *States* auch zu einer höheren Wahrscheinlichkeit der entsprechenden *States* der gesamthaften Bereitstellung führen, beziehungsweise sich eine Reduktion der Wahrscheinlichkeit eines *States* sich entgegengesetzt auswirkt und (2) dass Expertenwissen über den positiven Zusammenhang von monatlicher Grundwasserneubildung und Grundwasserzufluss zu einer einfachen Rückkoppelung führt. Bei der Grundwasserbilanzierung zeigt sich der persönliche Grad der Überzeugung in der *CPT* dadurch, dass eine ausgeglichene Grundwasserbilanzierung nur bei gleichwertigen *States* der Bereitstellungs- und Konsumseite möglich ist.

Treibende Kraft bei der simplen Quantifizierung der *Ökosystemleistung Wasserkraft* sind die *Nodes Klimaszenario* und *Landnutzungsszenario*. Die kontinuierlichen Daten müssen zur Verwendbarkeit im *Child Node Abfluss* entsprechend des Expertenwissens der Kraftwerksbetreiber kategorisiert werden. Die *CPT* enthält die Wahrscheinlichkeitsverteilungen sämtlicher Szenarien-Kombinationen. Die *States* des

*Nodes Abfluss* werden für den *Node TageEnergieerzeugung* neu aggregiert und ermöglichen die Unterteilung in Nutzbar und nicht Nutzbar.

Durch Verwendung *Bayes'scher Netzwerke* erzeugte Resultate können aus verschiedenen Gründen mit Unsicherheiten behaftet sein (Grêt-Regamey, Brunner, Altwegg & Bebi 2013). Untersucht man die beiden vorliegenden Netzwerke auf Unsicherheiten, wird ersichtlich, dass (1) Datenunsicherheiten basierend auf den hydrologischen Simulationen bewusst zur Komplexitätsreduktion weggelassen wurden und (2) dass Unsicherheiten bei den *Nodes Infiltration2GW, MonatsGWNeubildung, GWZufluss, GWBereistellung* und *GWKonsum* zu erwarten sind. Diese *Nodes* haben gemeinsam, dass ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungen der *CPT* aufgrund fehlender Daten durch Expertenwissen erstellt werden müssen. Das vergleichsweise Ausprobieren anderer Ansätze hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Wie bereits mehrfach in der Literatur (Molina, Pulido-Velázquez, García-Aróstegui & Pulido-Velázquez 2013; Min 2005; Zobrist & Reichert 2006; Grêt-Regamey, Brunner, Altwegg & Bebi 2013) erwähnt, kann basierend auf den vorliegenden Resultaten bestätigt werden, dass sich die *Bayes'sche Statistik* und *Netzwerke* als nützliches Werkzeug zur Quantifizierung spezifischer Prozesszusammenhängen anbietet. Trotz Unsicherheiten in der Datengrundlage können durch den interaktiven Charakter des Bayes'schen Netzwerkansatzes Fragestellungen beantwortet werden. Zudem erlaubt die Flexibilität des *Bayes'schen Netzwerkes* die Untersuchung des Einflusses der zeitlichen Variabilität auf Ökosystemleistungen.

Die monetäre Quantifizierung nach der Marktpreismethode ermöglicht es, den *Ökosystemleistungen Trinkwasser* und *Wasserkraft* eine Wertigkeit zuzuweisen. Die verwendeten Preisszenarien basieren auf heutigen Marktpreisen, über deren künftige Entwicklung nur spekuliert werden kann. In dieser Arbeit wurde die Monetarisierung der Ökosystemleistung bewusst vom *Bayes'schen Netzwerk* losgelöst. Sie liesse sich für künftige Forschungsarbeiten sicherlich auch ins Netzwerk direkt einbetten und erlaubte somit auch, Beziehungen zwischen der Quantität der Ökosystemleistung und deren Monetarisierung herzustellen.

## 6. Verbesserungsansätze und weitere Forschungsfragen

### *Mehrstufige Erfassung der Jahres- und Monatsvariabilität*

Wie in dieser Arbeit bereits mehrfach erwähnt und auch in der Fachwelt festgehalten, streuen die beobachteten Temperaturen, Niederschlags- und Abflussmengen eines Untersuchungsraumes von Jahr zu Jahr stark. Durch Untersuchung saisonaler Unterschiede und der Variabilität innerhalb der Jahre ist es möglich, Entwicklungstendenzen besser herauszuarbeiten. Dem Umstand, dass die Veränderung der Klimasimulationen während der Langzeitsimulation von 2000-2100 nicht linear verläuft muss Rechnung getragen werden. Um die saisonalen Entwicklungen besser beurteilen zu können, wird empfohlen, die Langzeitsimulationsreihen in kürzere Untersuchungszeiträume aufzuteilen. Diese Verkürzung muss unter Einbezug von Expertenwissen geschehen; nur so kann gewährleistet werden, dass möglichst wenige Informationen verloren gehen. Dieses Vorgehen wurde bereits in der Arbeit von CH2011(2011) zu den Schweizerischen Klimaszenarien erfolgreich durchgeführt.

### *Ausbleibende Abflussänderung bei Landnutzungsänderungen*

An dieser Stelle werden gleich zwei Punkte für künftige Verbesserungen aufgegriffen.

(1) Für weitere Forschungen in diesem Bereich gilt es herauszufinden, wie gross der räumliche Wirkungsbereich einer Änderung der Rahmenbedingungen ist. So werden in dieser Arbeit die Landnutzungsänderungen hauptsächlich im Einzugsgebiet des Oberlaufs vermutet. Es stellt sich die Frage, wie sich die Distanz zwischen dem Standort mit verändertem Zustand und dem Simulationsstandort des beobachteten Parameters auf dessen Veränderungsstärke auswirkt? Um dies für einen Untersuchungsraum schlüssig beurteilen zu können, wird eine aufwändige Versuchsreihe notwendig.

(2) Kontinuierliche empirische Daten müssen zur Verwendung in einem *Bayes'schen Netzwerk* kategorisiert werden. Gerade für den Fall, bei dem dies durch Expertenwissen geschieht, stellt sich die Frage über die Einflussstärke dieser Aggregation. Es muss eine Balance zwischen genügender Vereinfachung und Reduktion des Informationsgehalts gefunden werden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Kategorisierung der Abflussmengen erfolgte durch Expertenwissen über die Verarbeitungskapazitäten der Kraftwerke. Für künftige Forschungen wird empfohlen, dabei auch die Dichteverteilung der Abflusswerte zu berücksichtigen. Durch Einführung zusätzlich notwendiger Kategorien kann eine besser ausgewogene Kategorisierung erreicht werden, welche wiederum den Informationsgehalt erhöht.

Es ist ungewiss inwiefern diese Verbesserungsansätze die Resultate der Quantifizierung, Erstellung und Darstellung der hydrologischen Ökosystemleistungen verändern. Der folgende Abschnitt nimmt Stellung zu der, den Simulationsdaten zugrundeliegenden, Modellierungsmethode.

### *Datenvalidität der hydrologischen Simulation*

Die hydrologischen Simulationsdaten dieser Arbeit basieren auf dem hydrologischen Modell *TOPKAPI*. Eine Weiterverwendung dieses Modelles in Forschungsarbeiten mit einer ähnlichen Ausgangslage und Fragestellung, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorhanden sind, muss kritisch hinterfragt werden.

Aus angeregten Diskussionen mit Andrea Ryffel über die Eignung von *TOPKAPI* für diese Arbeit können folgende Fakten zusammengetragen werden: (1) Um im global gesehenen kleinen Einzugsgebiet der Kleinen Emme hydrologische Prozesse durch dieses Modelle zu simulieren, wird die räumliche Auslösung von 100m als zu gering angesehen. Die sehr kleinräumig wirkenden Zunahme von Waldflächen der Landnutzungsänderung fällt dabei wahrscheinlich zu wenig ins Gewicht als, dass dies relevante Auswirkungen auf die Simulationsdaten hat. (2) Obgleich schon es sich um sehr komplexes Modell handelt, werden Bodeneigenschaften und deren Einfluss auf Abfluss und Grundwasserbildung zu wenig stark berücksichtigt. Dazu gilt es zu erwähnen, dass ein grundsätzlicher Mangel an Bodendaten und entsprechendem Prozessverständnis herrscht. Gemäss der von Progea (2014) aufgeführten Liste der Einsatzgebiete geht eine gute Eignung des Modells vor allem in grossen semi-ariden Einzugsgebieten hervor.

Für eine Weiterführung der in dieser Arbeit aufgegriffenen Forschungsfragen, wäre es ratsam eine passendere Modellierungsmethode zu verwenden. Als eine solche kann das hydrologische Niederschlags-Abfluss Modell PREVAH (Precipitation Runoff Evapotranspiration Hydrotope Model) eingestuft werden. So eignet es sich für kleinräumige alpine Einzugsgebiete, verspricht eine relativ einfache Anwendung und kann mit höheren räumlichen Auflösungen verwendet werde (Viviroli, Zappa, Gurtz & Weingartner 2009).

### *Grundwassermodellierung mit Rückkoppelungen*

Bei bisherigen Grundwassermodellierungen werden alle Komponenten dazu benutzt, quantitative Aussagen und Prognosen über ein Gebiet zu ermöglichen. Es ist wünschenswert, wenn künftige Untersuchungen den *Bayes'schen* Ansatz dazu aufgreifen, um damit Rückkoppelungen besser zu berücksichtigen. So kann zum Beispiel versucht werden, den Zusammenhang von Bodenfeuchtigkeit, Temperatur, Niederschlag und

Grundwasserneubildung in *Bayes'schen* Netzwerken zu erfassen. Dies erlaubt eine bessere Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Trinkwasser. Eine andere mögliche Erweiterung beinhaltet den Einfluss der Temperatur auf die Qualitätsentwicklung des Grundwassers.

### *Komplexere Strukturen, CPT und Expertenwissen*

*Bayes'sche Netzwerke* können bei entsprechend vorhandenem Expertenwissen auch ohne dazugehöriges empirisches Wissen in ihrem Wirkungsgefüge erweitert werden. Die damit einhergehende Komplexitätszunahme wird zusätzlich durch die fehlende Möglichkeit zu direkten Rückkoppelungen erhöht, da diese indirekt modelliert werden müssen. All dies macht die Festlegung der CPTs schwieriger. Es ist Kuhnert, Martin & Griffiths (2010), die mit ihren differenzierteren Empfehlungen zur Verwendung von Expertenwissen Möglichkeiten aufzeigen, um damit einhergehendes Potential besser auszunutzen. Masegosa & Moral (2013) beschreiten einen verhoffnungsvollen Weg mit ihrem interaktiven Ansatz zum Lernen von *Bayes'schen Netzwerken* durch eine aktive Teilnahme der Experten. Es gilt abzuklären, in wie fern sich ein solcher Ansatz zur Quantifizierung von Ökosystemleistungen durch *Bayes'sche Netzwerk* umsetzen lässt. Künftig ist es wünschenswert, dass sich vermehrt Schnittstellen zwischen den Naturwissenschaften und Informatikbereichen finden. Wäre es doch einen Versuch wert den Bayes'schen Ansatz durch beim Datamining und Strukturellen Netzwerklernen angewandte Techniken zu optimieren.

## 7. Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei vereinfachte Ansätze zur Bestimmung von Hochwasserabflüssen auf ihre Umsetzbarkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Daten einer 100 jährigen hydrologischen Simulationsreihe auf den Einfluss der Klimaszenarien hin mit dem Ansatz der *Johnson Verteilung* untersucht. Dabei ergibt sich für das Hochwasserereignis mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren eine Überschätzung der Hochwasserabflussmenge von 200-300% zu den heutigen erwarteten Werten. Infolgedessen wird diese Methode als nicht anwendbar erachtet. Bei der Überprüfung der Anwendbarkeit der *Quantil Methode* flossen sowohl die beiden Klimaszenarien als auch die prognostizierten Landnutzungsänderungen einer 50 jährigen Simulationsreihe in die Untersuchung mit ein. Dies erlaubt, auf den Einfluss der Landnutzungsänderungen zu schliessen. Aus dieser Vorgehensweise hervorgehend lässt sich eruieren, dass es bei 10, 30 und 50 jährigen Wiederkehrintervallen, unabhängig der Kombination der Szenarien, zu Unterschätzungen von 125-300% der Werte kommt. Was die 100 jährigen Wiederkehrintervalle angeht, konnte einzig bei Verwendung des Klimaszenario *regcm3* ein als akzeptabel einzustufendes Resultat mit einer Überschätzung von 35-45% erreicht werden. Weist doch die Annäherung beim Klimaszenario *remo* eine Streuung von -3-45% zum heutigen Wert auf. Es muss festgestellt werden, dass es für eine differenziertere Beurteilung beider Ansätze notwendig wird, die vollendeten Analysemethoden noch gemäss den in DVWK (1999) eingeführten statistischen Analysen zu Hochwasserabflüssen aufzuarbeiten und diese Werte als Referenzwerte zu verwenden. Es kann kein abschliessendes Urteil darüber gefällt werden, ob es durch genügend lange Zeitreihen sich erübrigt Verteilungsanpassungen zu machen.

Weiter wurde mit dieser Arbeit die Erfassung und Quantifizierung des Einflusses der Klimaszenarien und Landnutzungsszenarien auf die *Ökosystemleistungen Wasserkraft und Trinkwasser* angestrebt. Dazu werden in einer initialen Phase die Auswirkungen der Szenarien auf den Parameter Abfluss und Niederschlag untersucht. Es kann bestätigt werden, dass sich die Klimawandel bedingten Entwicklungsrichtungen der verwendeten Modellierung mit den in der Literatur breitabgestützten Trends decken. Zur realen Nachbildung der Ökosystemleistungen in Bayes'schen Netzwerken mussten die Wirkungsgefüge erst durch Literaturstudium und Expertenwissen erkannt und simplifiziert werden. Es gelang, die Prozesszusammenhänge der *Ökosystemleistung Wasserkraft* mit Hilfe von vier *Nodes* zu repräsentieren, während deren 11 zur angemessenen Darstellung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* notwendig sind. Zur

Quantifizierbarkeit dieser Netzwerke konnten durch Expertenwissen gestützte Niederschlags- und Abflussdatenaufbereitungen aller Szenarien gezeigt werden, dass die Erzeugung einer verwertbaren empirischen Datengrundlagen möglich ist. Die unvermeidbare Kategorisierung der Daten führt zu einer Daten- und Informationsaggregation. Infolgedessen muss dieser Schritt mit äusserster Vorsicht erfolgen. Bei fehlender empirischer Datengrundlage muss zur Bestimmung der *CPT* auf entsprechende Literatur und Expertenwissen zurückgegriffen werden, mit der Einschränkung, dass dies einen gewissen Grad an Prozessverständnis voraussetzt. Durch sorgfältige strukturelle Erfassung und Darstellung der Ökosystemleistungen kann das Grundgerüst für die Quantifizierung entwickelt werden.

Bei der abschliessenden Quantifizierung kann für die *Ökosystemleistung Wasserkraft* festgehalten werden, dass während 87% des Jahres eine Stromproduktion möglich ist und dieser Wert über alle Szenarien hinweg nur eine Streuung von weniger als 1% aufweist. Unter heutigen Marktpreisbedingungen entspricht dies einer jährlichen monetären Ökosystemleistung von 365'000-1'949'000 CHF pro Jahr.

Auf Basis des zur Quantifizierung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* erstellten *Bayes'schen Netzwerks* konnte der Kausalzusammenhang zwischen der monatlichen Niederschlagsmenge und der Grundwasserbilanzierung bestätigt werden. Schliesslich attestieren die den Grundwasserbilanzierungen anhaftenden Wahrscheinlichkeitsangaben, dass sich die Klimaszenarien in der Quantifizierung bemerkbar machen. Wenngleich doch mahndend darauf hingewiesen wird, dass dies schlussendlich nicht der entscheidende Aspekt hinsichtlich der Bilanzierungsrichtung ist. Gerade die Monate mit mittleren und tiefen Niederschlagsmengen zeigen eine stärkere Beeinflussung der Grundwasserbilanzierung durch die Wahl des täglichen Wasserbrauchs und der Anzahl Verbraucher. Bei der abschliessenden Monetarisierung der *Ökosystemleistung Trinkwasser* kann bei minimaler Grundwasserneubildung eine monatliche Wertigkeit von 45'000-54'000 CHF beim minimalen Szenario, 165'000-198'000 CHF beim ausgeglichenen Szenario und 235'000-282'000 CHF beim maximalen Szenario bestimmt werden.

Es kristallisiert sich heraus, dass es bei Verwendung *Bayes'scher Netzwerke* durchaus vorkommen kann, dass auf Expertenwissen basierende *Nodes* gegenüber jenen mit Grundlagen in der Empirie grösseren Einfluss auf das Endresultat haben. Überdies führt ein höherer Detaillierungsgrad bei Erfassung der Kausalketten durch die steigende Anzahl *Nodes* zu einem komplexeren *Bayes'schen Netzwerk*.

Ungeachtet der noch weiterer Forschung bedürftigen Punkte (1) Datenvalidität der Simulation, (2) Datenaggregation durch Kategorisierung und (3) mehrstufige zeitliche Analyse wird die in dieser Arbeit angewandte Arbeitsmethode als geeignet beurteilt. Durch quantitative Analysen der Simulationsdaten aus der hydrologischen Modellierung konnten die Funktionen und die Leistungen der untersuchten *Ökosysteme Wasserkraft und Trinkwasser* quantifiziert werden. *Bayes'sche Netzwerke* ermöglichen, die Strukturen des Ökosystems so umzusetzen, dass dessen Leistungen erfasst und dargestellt werden können. Durch gleichzeitige Anwendung *Bayes'scher Netzwerke* und Einsatz der Marktpreismethode können den *Ökosystemleistungen Wasserkraft und Trinkwasser* monetäre Wertebereiche zugeschrieben werden.

## Schlusswort und Dank

Diese Arbeit ist in der Abschlussphase meines Masterstudiums in Geografie an der Universität Zürich entstanden. Während dieser Zeit wurde ich von vielen Personen unterstützt und nun möchte ich mich bei ihnen bedanken.

Für die angeregten Diskussionen, die vielen fachlichen Inputs und die ständige Erreichbarkeit möchte ich mich bei meiner Betreuerin Andrea Ryffel bedanken.

Ebenfalls danke ich Prof. Dr. Jan Seibert für die Betreuung der Arbeit und die hilfreichen Diskussionen.

Maarten Van Strien bin ich äusserst dankbar, mich bei der Umsetzung der R-Skripte durch hilfreiche Inputs weitergebracht zu haben.

Es waren die Simulationsdaten von Christoforos Pappas, denen ich einen erheblichen Teil der Datengrundlage zu verdanken habe.

Meiner Familie danke ich für die Unterstützung und Motivation während des ganzen Studiums.

Annette Giger bin ich überaus dankbar für die konstruktive Kritik und die einzigartige Unterstützung während der nicht immer einfachen Zeit.

Fürs Korrekturlesen und die stilistischen Verbesserungsvorschläge danke ich herzlichst Max Giger, Mélanie Giger und Franziska Engeli.

Katja Barrueto, Roger Gygli, Gian Kälin, Martin Lips, Chris Moser, Hans-Ueli Scheidegger, Philip Schneider, Robert Spörri, Marc Stüssi und Daniel Tschudi danke ich für die guten Stunden zwischen der Masterarbeit, sei es beim Klettern, beim Skitouren oder einfach bei einem guten Glas Wein.

## Literaturverzeichnis

- Allen, M., Stott, P., Mitchell, J., Schnur, R., et al., 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, 407(6804), Pp. 617–20.
- Arbeitsgemeinschaft R. Mengis + H.G. Lorenz AG, Luzern, Hydrotest AG, Emmenbrücke, Büro für Hydrogeologie AG, Weggis., 1990. *Grundwasserforschung im Tal der Kleinen Emme: Schlussbericht der Untersuchungsperiode 1981-1990*, Luzern.
- Bayes, T., 1763. Essay Towards Solving A Problem In The Doctrine Of Chances. *The Philosophical Transactions*, (53), Pp. 377–418.
- Beniston, M., 2012. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 412-413, Pp. 291–296.
- Berger, J., 1985. *Statistical decision theory and Bayesian analysis* 2nd ed., New York: Springer Verlag.
- Binggeli, V., 1974. Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere im Gebiet der Langete: Über Wasserhaushalt und Flusserosion sowie Schutz und Entwicklung der Gewässer im Rahmen des Kulturlandschaftswandels. *Beiträge zur Geologie der Schweizerischen Hydrologie*, (22), P. 163.
- Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T. & Schär, C., 2011. *Klimaszenarien für Klimaimpaktstudien in der Schweiz*, Zürich.
- Brauman, K. a., Daily, G.C., Duarte, T.K. & Mooney, H. a., 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), Pp. 67–98.
- Brown, G.O., 2002. Henry Darcy and the making of a law. *Water Resources Research*, 38(7), Pp. 11-1-11-12.
- Bundesamt für Energie BFE, 2013. *Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz*, Bern.
- Bundesamt für Gesundheit BAG & Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013. *Umsetzung des Protokolls Wasser und Gesundheit in der Schweiz*, Bern.

- Bundesamt für Statistik BFS, 2013. *Urban Audit: Schweizerische Daten*, Neuchâtel. Verfügbar unter: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/international/03/04/03/01.html> [Zugriff am 18. April 2014].
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013. *Hochwasserwahrscheinlichkeiten (Jahreshochwasser) - DB-Nr. 944 Kleine Emme - Littau, Reussbühl*, Verfügbar unter: [http://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq\\_statistics/2425hq.pdf](http://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/hq_statistics/2425hq.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2012a. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). *Umwelt-Wissen*, 1217, P. 76.
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2003. *Grundwasser*, Bern. Verfügbar unter: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00377/index.html?lang=de> [Zugriff am 18. April 2014].
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2012b. Grundwasser: Fragen und Antworten. Verfügbar unter: [http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07514/?lang=de#sprungmarke0\\_21](http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07514/?lang=de#sprungmarke0_21) [Zugriff am 18. April 2014].
- Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2008. Management des Grundwassers in der Schweiz. *Umwelt-Wissen*, (6), P. 42.
- Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., et al., 2005. Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*, 25(14), Pp. 1855–1880.
- CH2011, 2011. *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*, Zürich: C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC.
- Chee, Y.E., 2004. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services. *Biological Conservation*, 120(4), Pp. 549–565.
- Christensen, J.H. & Christensen, O.B., 2002. Severe summer time flooding in Europe. *Nature*, 421(February), Pp. 2002–2003.
- Cox, R.T., 1946. Probability, Frequency and Reasonable Expectation. *American Journal of Physics*, 14(1), P. 14.

- Daily, G.C. et al., 2009. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), Pp. 21–28.
- Daily, G.C., 1997. Introduction: What are ecosystem services. In *Natures services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington: Island Press, , P. 10.
- Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Paris.
- Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R. & Pielke, R., 2009. Climate prediction: a limit to adaptation. In *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance*. Cambridge: Cambridge University Press, , Pp. 64–78.
- Dirnböck, T., Dullinger, S. & Grabherr, G., 2003. A regional impact assessment of climate and land-use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, 30(3), Pp. 401–417.
- DVWK, 1999. *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau)*, Bonn: Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser.
- Eawag (Hrsg.), 2000. Grundwasserforschung für die Praxis. *EAWAG news*, 49d(September), P. 36.
- Energie Wasser Luzern EWL, 2013. *Luzerner Wasser trinken*, Luzern. Verfügbar unter: [http://www.ewl-luzern.ch/upload/docs/pdf/V32012PBLuzerner\\_Wasser\\_trinken.pdf](http://www.ewl-luzern.ch/upload/docs/pdf/V32012PBLuzerner_Wasser_trinken.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].
- Engeland, K. & Gottschalk, L., 2002. Bayesian estimation of parameters in a regional hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(5), Pp. 883–898.
- Eppler, J.M., 2014. A Comparison of Flood Estimation Methods. A Case Study for the Kleine Emme Basin in Switzerland. , P. 153.
- Ernst Basler + Parner AG, 2007. *Wasserwirtschaft Schweiz 2025*, Zollikon. Verfügbar unter: [http://www.wasserwirtschaft.ch/images/content/3%20Themen/3.1%20Wasserwirtschaft/Thesen\\_zur\\_Wasserwirtschaft\\_Schweiz\\_2007.pdf](http://www.wasserwirtschaft.ch/images/content/3%20Themen/3.1%20Wasserwirtschaft/Thesen_zur_Wasserwirtschaft_Schweiz_2007.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].
- Fetter, C.W., 2001. *Applied hydrogeology* 4th. ed., Upper Saddle River: Prentice Hall.

- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. & Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), Pp. 1547–1578.
- Freiburghaus, M., 2012. Statistische Übersicht über die Wasserversorgung in der Schweiz 2010. *Aqua & Gas*, 3(54), Pp. 54–59.
- Gadow, K. v., 1984. Die Erfassung von Durchmesserverteilungen in gleichaltrigen Kieferbeständen. In *Forstwirtschaftliches Centralblatt*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, , Pp. 360–374.
- Gaudard, L. et al., 2013. Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *The Science of the Total Environment*.
- Gaume, E. et al., 2010. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), Pp. 101–117.
- Grêt-Regamey, A., Brunner, S.H., Altwegg, J. & Bebi, P., 2013. Facing uncertainty in ecosystem services-based resource management. *Journal of environmental management*, 127 Suppl, Pp. S145–54.
- Grêt-Regamey, A. & Kytzia, S., 2007. Integrating the valuation of ecosystem services into the Input–Output economics of an Alpine region. *Ecological Economics*, 63(4), Pp. 786–798.
- Grêt-Regamey, A. & Straub, D., 2006. Spatially explicit avalanche risk assessment linking Bayesian networks to a GIS. *Natural Hazards And Earth System Science*, (6), Pp. 911–926.
- Groot, R.S. de, Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., et al., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7(3), Pp. 260–272.
- Grunewald, K. & Bastian, O., 2013. *Ökosystemdienstleistungen*, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- Gyalistras, D., 2002. *An uncertainty analysis of monthly temperature and precipitation scenarios for Switzerland*, Bern.
- Hahn, G.J. & Shapiro, S.S., 1967. *Statistical models in engineering XVIII.*, New York: Wiley.

- Haines-Young, R. & Potschin, M., 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In *Ecosystem Ecology: a new synthesis*. Cambridge: in press, , P. 31.
- Hawkins, E. & Sutton, R., 2009. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), Pp. 1095–1107.
- Heal, G.M., 2000. *Nature and the Marketplace: Capturing the Value of Ecosystem Services*, Washington: Island Press.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge UK and New York USA: Cambridge University Press.
- Jacob, D., 2001. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77(1-4), Pp. 61–73.
- Jacob, D. & Podzun, R., 1997. Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63(1-2), Pp. 119–129.
- Jin, X., Xu, C.-Y., Zhang, Q. & Singh, V.P., 2010. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 383(3-4), Pp. 147–155.
- Johnson, N., 1949. Systems of frequency curves generated by methods of translation. *Biometrika*, 36, Pp. 149–176.
- Jones, C., Cox, P. & Huntingford, C., 2003. Uncertainty in climate-carbon-cycle projections associated with the sensitivity of soil respiration to temperature. *Tellus B*, 55(2), Pp. 642–648.
- Kanton Luzern & Kanton Aargau, 2013. *Regendaten für die Siedlungswasserwirtschaft-Jahresbericht 2012.*, Luzern und Aarau. Verfügbar unter: <http://www.umwelt-luzern.ch/Jahrbuch/Daten/Texte/JahresberichtN.PDF> [Zugriff am 18. April 2014].
- Kappeler, J., 2010. Benchmarking für Wasserversorgungen. *Gas Wasser Abwasser*, Pp. 1–10.
- Kavetski, D., Franks, S. & Kuczera, G., 2003. Confronting input uncertainty in environmental modelling. *Water Science and Application*, 6, Pp. 49–68.

- Kavetski, D., Kuczera, G. & Franks, S.W., 2006. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resources Research*, 42(3), P. n/a–n/a.
- Kjaerulff, U.B. & Madsen, A.L., 2013. *Bayesian networks and influence diagrams: a guide to construction and analysis* 2nd ed., New York: Springer.
- Korb, K. & Nicholson, A., 2004. *Bayesian artificial intelligence* 2nd ed., Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.
- Kosoy, N., Martinez-Tuna, M., Muradian, R. & Martinez-Alier, J., 2007. Payments for environmental services in watersheds: Insights from a comparative study of three cases in Central America. *Ecological Economics*, 61(2-3), Pp. 446–455.
- Kuhnert, P.M., Martin, T.G. & Griffiths, S.P., 2010. A guide to eliciting and using expert knowledge in Bayesian ecological models. *Ecology letters*, 13(7), Pp. 900–14.
- Kuikka, S. et al., 1999. Modeling environmentally driven uncertainties in Baltic cod ( *Gadus morhua* ) management by Bayesian influence diagrams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(4), Pp. 629–641.
- Landuyt, D. et al., 2013. A review of Bayesian belief networks in ecosystem service modelling. *Environmental Modelling & Software*, 46, Pp. 1–11.
- Lienert, J., Monstadt, J. & Truffer, B., 2006. Future Scenarios for a Sustainable Water Sector: A Case Study from Switzerland. *Environmental Science & Technology*, 40(2), Pp. 436–442.
- Maltby, E., 2009. *Functional assessment of wetlands: Towards evaluation of ecosystem services*, Cambridge: Woodhead CRC.
- Masegosa, A.R. & Moral, S., 2013. An interactive approach for Bayesian network learning using domain/expert knowledge. *International Journal of Approximate Reasoning*, 54(8), Pp. 1168–1181.
- McCann, R., Marcot, B. & Ellis, R., 2006. Bayesian belief networks: applications in ecology and natural resource management. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(12), Pp. 3053–3062.
- MeteoSchweiz, 2014a. *Klimanormwerte Luzern Normperiode 1961-1990*, Zürich. Verfügbar unter: [http://www.meteoschweiz.admin.ch/files/kd/climsheet/de/LUZ\\_norm6190.pdf](http://www.meteoschweiz.admin.ch/files/kd/climsheet/de/LUZ_norm6190.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].

- MeteoSchweiz, 2014b. *Klimanormwerte Luzern Normperiode 1981-2010*, Zürich. Verfügbar unter: [http://www.meteoschweiz.admin.ch/files/kd/climsheet/de/LUZ\\_norm8110.pdf](http://www.meteoschweiz.admin.ch/files/kd/climsheet/de/LUZ_norm8110.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].
- MeteoSchweiz, 2013. Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht. *Fachbericht MeteoSchweiz*, (243), P. 36.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and human well-being: health synthesis*, Washington: Island Press.
- Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, K. a & Delworth, T.L., 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415(6871), Pp. 514–7.
- Min, S.-K., Hense, A., Paeth, H. & Kwon, W.-T., 2004. A Bayesian decision method for climate change signal analysis. *Meteorologische Zeitschrift*, 13(5), Pp. 421–436.
- Min, S.-K., 2005. Regional-scale climate change detection using a Bayesian decision method. *Geophysical Research Letters*, 32(3), P. L03706.
- Molina, J.-L., Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J.L. & Pulido-Velázquez, M., 2013. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 479, Pp. 113–129.
- Nash, D. et al., 2013. Using a conceptual Bayesian network to investigate environmental management of vegetable production in the Lake Taihu region of China. *Environmental Modelling & Software*, 46, Pp. 170–181.
- Pal, J.S. et al., 2007. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), Pp. 1395–1409.
- Palmer, T.N., 2000. Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. *Reports on Progress in Physics*, 63(2), Pp. 71–116.
- Palmer, T.N. et al., 2005. Representing Model Uncertainty in Weather and Climate Prediction. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), Pp. 163–193.
- Papadakis, E.N. & Tsionas, E.G., 2012. Bayesian analysis of extreme value regression. *Applied Economics Letters*, 19(17), Pp. 1707–1710.

- Pearl, J., 1988. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*, San Mateo, California: Kaufmann.
- Perreault, L., Bernier, J., Bobée, B. & Parent, E., 2000. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 1. The normal model revisited. *Journal of Hydrology*, 235(3-4), Pp. 221–241.
- Progea, 2014. Progea Slr. Verfügbar unter: <http://www.progea.net> [Zugriff am 18. April 2014].
- Reis, D.S. & Stedinger, J.R., 2005. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology*, 313(1-2), Pp. 97–116.
- Rogelj, J., Meinshausen, M. & Knutti, R., 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2(4), Pp. 248–253.
- Scanlon, B., Healy, R. & Cook, P., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(2), Pp. 347–347.
- Schamm, T., 2014. Modellbasierter Ansatz zur probabilistischen Interpretation von Fahrsituationen. , P. 193. Verfügbar unter: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000038054> [Accessed April 1, 2014].
- Scherrer, S.C., 2004. Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. *Geophysical Research Letters*, 31(13), P. L13215.
- Schürch, M., 2010. Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz. *Gas Wasser Abwasser*, 11, Pp. 955–965.
- Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie SGHL und Hydrologische Kommission CHy (Hrsg.), 2011. *Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht.*, Bern: SGHL und CHy. Verfügbar unter: [http://www.slf.ch/fe/gebirghydrologie/index\\_DE/wildbaeche/projekte/hydropower/downloads/CC\\_Wasserkraft\\_Synthesebericht\\_D\\_2011.pdf](http://www.slf.ch/fe/gebirghydrologie/index_DE/wildbaeche/projekte/hydropower/downloads/CC_Wasserkraft_Synthesebericht_D_2011.pdf) [Zugriff am 18. April 2014].
- Schweizerischer Nationalfonds SNF, 2014. Nationales Forschungsprogramm NFP 61: Nachhaltige Wassernutzung. Verfügbar unter: <http://www.nfp61.ch> [Zugriff am 18. April 2014].
- Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, 2012. Der Trinkwasserkonsum sinkt stetig. Verfügbar unter:

[http://www.trinkwasser.ch/dt/frameset.htm?html/wasserversorgung/wvs\\_wasserabgabe\\_03.htm~mainFrame](http://www.trinkwasser.ch/dt/frameset.htm?html/wasserversorgung/wvs_wasserabgabe_03.htm~mainFrame) [Zugriff am 18. April 2014].

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW & Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft BUWAL, 2001. *Wasserverbrauch im Haushalt Studie des SVGW in Zusammenarbeit mit dem BUWAL*, Verfügbar unter: <http://www.trinkwasser.ch/dt/html/download/pdf/twi5.pdf> [Zugriff am 18. April 2014].

Simonato, J.-G., 2011. The Performance of Johnson Distributions for Computing Value at Risk and Expected Shortfall. *The Journal of Derivatives*, 19(1), Pp. 7–24.

Smith, B., Prentice, I.C. & Sykes, M.T., 2008. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology and Biogeography*, 10(6), Pp. 621–637.

Sophocleous, M.A., 1991. Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects. *Journal of Hydrology*, 124(3–4), Pp. 229–241.

Spreafico, M. & Viviroli, D., 2013. Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz - Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, (40), P. 108.

Stadelmann, P. & Lovas, R., 2000. Flussgebietsplanung für einen voralpinen Fluss in der Schweiz. Kleine Emme im Kanton Luzern. *Gas Wasser Abwasser*, 11(1453), P. 24.

Stakhiv, E. & Stewart, B., 2010. Needs for Climate Information in Support of Decision-Making in the Water Sector. *Procedia Environmental Sciences*, 1, Pp. 102–119.

Staub, C., Ott, W. et al., 2011. Indikatoren für Ökosystemleistungen: Systematik, Methodik und Umsetzungsempfehlungen für eine wohlfahrtsbezogene Umweltberichterstattung. *Umwelt-Wissen*, (1102), P. 106.

Stewart-Koster, B. et al., 2010. The use of Bayesian networks to guide investments in flow and catchment restoration for impaired river ecosystems. *Freshwater Biology*, 55(1), Pp. 243–260.

Strahler, A. & Strahler, A., 2002. *Physische Geographie 2.*, überar. F. Ahnert, ed., Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

- TEEB, 2010. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. P. Kumar, ed., London and Washington: Earthscan.
- TEEB, 2009. TEEB Climate Issues Update. September.
- Tomassini, L., Reichert, P., Knutti, R., Stocker, T.F., et al., 2007. Robust Bayesian Uncertainty Analysis of Climate System Properties Using Markov Chain Monte Carlo Methods. *Journal of Climate*, 20(7), Pp. 1239–1254.
- Umwelt und Energie UWE, 2014. Gewässer. Verfügbar unter: <http://www.umwelt-luzern.ch/index/themen/gewaesser.htm> [Zugriff am 18. April 2014].
- Vidale, P., Lüthi, D. & Frei, C., 2003. Predictability and uncertainty in a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 108(D18).
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. & Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), Pp. 1209–1222.
- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., et al., 2009. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), Pp. 191–207.
- Weingartner, R. & Pearson, C., 2001. A Comparison of the Hydrology of the Swiss Alps and the Southern Alps of New Zealand. *Mountain Research and Development*, 21(4), Pp. 370–381.
- Weinzettel, P. & Usunoff, E., 2002. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. In *Groundwater and Human Development*. London: Taylor & Francis, , Pp. 731–738.
- Wheeler, B., 2009. *Package "SuppDists,"* Verfügbar unter: <http://cran.uvigo.es/web/packages/SuppDists/SuppDists.pdf> [Accessed March 26, 2014].
- Zhang, Q., Liu, C., Xu, C., Xu, Y., et al., 2006. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), Pp. 255–265.
- Zobrist, J. & Reichert, P., 2006. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), Pp. 207–223.

## Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Zürich, April 2014

Bruno Adank