

Multikriterielles Optimierungsverfahren zur Bewirtschaftungsplanung von Stauräumen

Produkt 3.2.1d

TP 3.2.1 – Wasserhaushalt im Einzugsgebiet von Talsperren

TP-Leiter: Dr. Franz Lennartz
Dr. Niels Schütze
Lehrstuhl für Hydrologie

Bearbeiter: Dipl. Hyd. Ruben Müller
Lehrstuhl für Hydrologie

Kontakt: Dipl. Hyd. Ruben Müller
Lehrstuhl für Hydrologie
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Technische Universität Dresden
Bergstraße 66
01069 Dresden
Tel.: 0351 / 46339578
Fax: 0351 / 46337162
E-Mail: ruben.mueller@tu-dresden.de

REGKLAM

Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	4
Abbildungen im Anhang	5
Tabellen	7
Tabellen im Anhang	8
Kurzfassung	9
1. Einleitung	10
2. Material und Methoden	12
2.1 DATENGRUNDLAGE	12
2.2 DAS TALSPERRENSYSTEM KLINGENBERG-LEHMÜHLE-RAUSCHENBACH	13
2.3 DAS MULTI-KRITERIELLE OPTIMIERUNGSFRAMEWORK	16
2.3.1 <i>Das Zeitreihenmodell (a)</i>	16
2.3.2 <i>Wasserhaushaltsmodell (b)</i>	16
2.3.3 <i>Monte-Carlo Rekombinationsmethodik (c)</i>	16
2.3.4 <i>Simulationsgestützte multi-kriterielle Optimierung (d)</i>	18
2.3.5 <i>Validierung (e)</i>	19
2.3.6 <i>Visualisierung durch Level-Diagramme (f)</i>	19
2.3.7 <i>Das Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS (g)</i>	20
2.3.8 <i>Initialisierung (h)</i>	21
3. Mathematische Beschreibung und Modellaufbau	22
3.1 ZIELFUNKTIONEN	22
3.1.1 <i>Formulierung der Zielfunktionen bei drei BSS</i>	22
3.1.2 <i>Szenario: Formulierung der Zielfunktionen bei vier BSS</i>	23
3.1.3 <i>Szenario: Formulierung der Zielfunktionen ohne Überleitung</i>	23
3.2 ENTSCHEIDUNGSVARIABLEN DER MULTI-KRITERIELLEN OPTIMIERUNG	24
3.2.1 <i>Entscheidungsvariablen bei drei BSS</i>	24
3.2.2 <i>Szenario: Entscheidungsvariablen bei vier BSS</i>	24
3.2.3 <i>Szenario: Entscheidungsvariablen bei einer MKO ohne Überleitung</i>	25
3.3 RANDBEDINGUNGEN	25
3.4 RULE-CURVE STACKING	25
3.5 AUFBAU DES TALSPERRENSYSTEMS IN OASIS	28
3.5.1 <i>Implementierte Regeln des Talsperrenbetriebs</i>	28
3.5.2 <i>Validierung des Modellaufbaus</i>	29
4. Ergebnisse	30
4.1 MONTE-CARLO REKOMBINATIONSMETHODIK	30
4.2 MKO FÜR REZENTE KLIMATISCHE VERHÄLTNISSE	32
4.2.1 <i>Normale Bewirtschaftung (hknn-sma Zeitreihe)</i>	32
4.2.2 <i>Normale Bewirtschaftung (Bemessungszeitreihe LTV)</i>	35
4.2.3 <i>Vier Bereitstellungsstufen unter hknn-sma Zeitreihe</i>	37
4.2.4 <i>Ohne Stützung des Betriebs durch die TS Rauschenbach (hknn-sma)</i>	39
4.2.5 <i>Erweiterter Hochwasserschutzraum unter hknn-sma Zeitreihe</i>	Fehler!
Textmarke nicht definiert.	
4.3 MKO FÜR WETTREG2010, ZEITSCHIBE 2021-2050	41
4.3.1 <i>Emissionsszenario A1B</i>	41
4.3.2 <i>Emissionsszenario A2</i>	43
4.3.3 <i>Emissionsszenario B1</i>	45

4.4	MKO FÜR WETTREG2010, ZEITSCHEIBE 2071-2100.....	48
4.4.1	<i>Emissionsszenario A1B</i>	48
4.4.2	<i>Emissionsszenario A2</i>	50
4.4.3	<i>Emissionsszenario B1</i>	52
4.5	ÜBERGREIFENDE VERGLEICHE	55
4.5.1	<i>Übersicht Zeitscheibe 2021-2050, WETTREG2010</i>	55
4.5.2	<i>Übersicht Zeitscheibe 2071-2100, WETTREG2010</i>	56
5.	Zusammenfassung	59
	Literatur.....	62
	Anhang	65
	ABSCHNITT 2.1	65
	ABSCHNITT 2.2	68
	ABSCHNITT 2.3	69
	<i>Zu 2.3.3</i>	69
	ABSCHNITT 4.1	70
	ABSCHNITT 4.2	72
	<i>Zu 4.2.3</i>	72
	<i>Zu 4.2.5</i>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	ABSCHNITT 4.3	73
	<i>Zu 4.3.1</i>	73
	<i>Zu 4.3.2</i>	73
	<i>Zu 4.3.3</i>	74
	ABSCHNITT 4.4	75
	<i>Zu 4.4.1</i>	75
	<i>Zu 4.4.2</i>	75
	<i>Zu 4.4.3</i>	75
	ABSCHNITT 4.5	76
	<i>Zu 4.5.1</i>	76
	<i>Zu 4.5.2</i>	77

Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Steuerung von Trinkwasserabgabe und Überleitung. Für die jeweilige Talsperre KL und LM ist <i>zbuf</i> die Staulamelle des Reserveraums, <i>zbeu</i> die Staulamelle der Bewirtschaftungszone.....	15
Abbildung 2: Schrittweises Ablaufschema des Multi-kriteriellen Optimierungsframeworks.	16
Abbildung 3: Vergleich der ECDF der ungekürzten Zeitreihe (11287 Defizitperioden) und der gekürzten Zeitreihe (Rezent 1921-2007).....	17
Abbildung 4: Rechenzeiten nach verwendeter Anzahl von Threads.....	19
Abbildung 5: Aufbau des Fließnetzes des Talsperrensystems KL-LM-RB im Talsperrerbewirtschaftungsmodell OASIS mit Angabe der implementierten Bewirtschaftungsregeln.	28
Abbildung 6: Schema der Kopplung des MKO Algorithmus MO-CMA-ES mit dem Talsperrerbewirtschaftungsmodell OASIS über ein PERL Skript.	26
Abbildung 7: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den beiden Clustern CI-1 (blau) und CI-2 (rot).	33
Abbildung 8: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	33
Abbildung 9: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen min(FF2) (links) und max(FF3) (rechts).....	34
Abbildung 10: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen	35
Abbildung 11: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	36
Abbildung 12: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen min(FF2) (links) und max(FF3) (rechts).	36
Abbildung 13: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit vier Bereitstellungsstufen	37
Abbildung 14: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	38
Abbildung 15: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung das Cluster CI-3.....	38
Abbildung 16: Level Diagramm der MKO für das Szenario ohne Überleitung von Brauchwasser aus der Talsperre Rauschenbach.	39
Abbildung 17: Staulamellen der Bereitstellungsstufen für die drei repräsentativen Lösungen CI-1 (links), CI-2 (Mitte) und CI-3 (rechts),.....	40
Abbildung 18: Staulamellen der Bereitstellungsstufen für die Lösungen max(FF1), links, und max(FF2), rechts.....	41
Abbildung 19: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen und einem Aufschlag der Hochwasserschutzräume um 1,5 hm ³	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 20: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 21: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts).....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 22: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, A1B.....	41
Abbildung 23: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	42

Abbildung 24: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts).....	43
Abbildung 25: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, A2.....	44
Abbildung 26: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	44
Abbildung 27: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für das Cluster CI-3....	45
Abbildung 28: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, B1.....	46
Abbildung 29: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	47
Abbildung 30: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, A1B.....	48
Abbildung 31: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	49
Abbildung 32: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3.	50
Abbildung 33: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, A2.....	50
Abbildung 34: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	51
Abbildung 35: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für das Cluster CI-3....	51
Abbildung 36: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, B1.....	52
Abbildung 37: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts).....	53
Abbildung 38: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts).....	54
Abbildung 39: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (rot), A2 (grün) und B1 (blau) unter Verwendung der 1-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2021-2050 (WETTREG2010).	55

Abbildungen im Anhang

Abbildung A 1: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios 1921-2007.....	65
Abbildung A 2: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A1B, 2021-2050.	65
Abbildung A 3: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A2, 2021-2050	66
Abbildung A 4: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios B1, 2021-2050.	66
Abbildung A 5: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A1B, 2071-2100.	67
Abbildung A 6: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A2, 2071-2100	67
Abbildung A 7: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios B1, 2071-2100.	67

Abbildung A 8: Vergleich der grundlegenden statistischen Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Autokorrelationskoeffizient auf monatlicher und jährlicher Zeitskala) zwischen der ungekürzten 10000 jährigen Zeitreihe (schwarz) und der auf 882 Jahre gekürzten Zeitreihe (rot) für die Szenarien basierend auf den Jahren 1921-2007.	69
Abbildung A 9: Streudiagramme zwischen den ermittelten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und den Zielfunktionswerten der Zielfunktionen FF1 bis FF3 in der MKO und in der Validierung..	70
Abbildung A 10: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen min(FF3) (links) und max(FF2) (rechts).	72
Abbildung A 11: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung max(P(BSS4)).	72
Abbildung A 12: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und min(FF3) (rechts).	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung A 13: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.	72
Abbildung A 14: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und min(FF3) (rechts).	73
Abbildung A 15: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.	73
Abbildung A 16: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max(FF1) (rechts).	73
Abbildung A 17: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.	74
Abbildung A 18: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max (FF1) (rechts).	74
Abbildung A 19: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung min(FF3).	74
Abbildung A 20: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max (FF1) (rechts).	75
Abbildung A 21: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung min(FF3).	75
Abbildung A 22: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2), die ebenso max(FF1) entspricht, (links) und min (FF3) (rechts).	75
Abbildung A 23: Staulamellen der repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).	76
Abbildung A 24: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der 1-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).	77
Abbildung A 25: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der 2-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).	77
Abbildung A 26: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der Inf-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).	78
Abbildung A 27: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der 1-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).	78

Abbildung A 28: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der 2-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau)..... 78

Abbildung A 29: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der Inf-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau)..... 79

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über die mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von WETTREG2010 (1961-1990) gegenübergestellt (MÜLLER et al. 2013b)..... 12

Tabelle 2: Übersicht über die Parameter der Steuerung der Trinkwasserbereitstellung 13

Tabelle 3: Reduzierte Abgaben von Brauchwasser für die Zeitscheibe 2071-2100. 14

Tabelle 4: Übersicht über die Parameter der Steuerung der Überleitung 14

Tabelle 5: Parameter und Ergebnisse zur Monte-Carlo Rekombination der 10000 jährigen Zeitreihen für die Zeitreihen unterschiedlicher Szenarien. CO₂ gibt die jeweiligen Emissionsszenarien an. 30

Tabelle 6: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben sind der Median des Bestimmtheitsmaßes R^2 , sowie der Median aus aller Offsets α und Steigungen β der linearen Regressionsmodelle zwischen der MKO und der Validierung. 31

Tabelle 7: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (1921-2007) für ausgewählte Lösungen. 32

Tabelle 8: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (Bemessungszeitreihe der LTV) für ausgewählte Lösungen..... 35

Tabelle 9: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (Bemessungszeitreihe der LTV) für ausgewählte Lösungen..... 37

Tabelle 10: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 und FF2 für das Szenario ohne Überleitung (1921-2007) für ausgewählte Lösungen. 40

Tabelle 11: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (1921-2007, erweiterter HQ-Schutzraum) für ausgewählte Lösungen. **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 12: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, A1B für ausgewählte Lösungen. 42

Tabelle 13: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, A2 für ausgewählte Lösungen. 45

Tabelle 14: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, B1 für ausgewählte Lösungen. 46

Tabelle 15: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, A1B für ausgewählte Lösungen. 49

Tabelle 16: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, A2 für ausgewählte Lösungen.52

Tabelle 17: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, B1 für ausgewählte Lösungen.53

Tabelle 18: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung aller Emissionsszenarien für die Zeitscheibe 2021-2050.56

Tabelle 19: Distanzen der repräsentativen Lösungen zum Utopia Punkt in unterschiedlichen p-Normen integrierten Vergleich. Zeitscheibe 2071-2100.56

Tabelle 20: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der 1-Norm.57

Tabelle 21: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der 2-Norm.57

Tabelle 22: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der Inf-Norm.58

Tabellen im Anhang

Tabelle A 1: Kenndaten der Talsperren Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach (nach WINKLER 2013)68

Tabelle A 2: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario (WETTREG2010, Zeitscheibe 2021-2050).70

Tabelle A 3: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario für rezente Rahmenbedingungen (1921-2007).71

Tabelle A 4: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario (WETTREG2010, Zeitscheibe 2071-2100).71

Tabelle A 5: Distanzen der repräsentativen Lösungen zum Utopia Punkt in unterschiedlichen p-Normen integrierten Vergleich. Zeitscheibe 2021-2050.76

Kurzfassung

Um die Robustheit eines Talsperrensystems gegenüber dem projizierten Klimawandel zu prüfen ist es notwendig zunächst eine, an diese Verhältnisse optimal angepasste, Talsperrenbewirtschaftung zu ermitteln. Diese garantiert die beste Performance des Talsperrensystems und vermeidet so eine Unterschätzung der Robustheit. Gleichzeitig stellt die ermittelte Talsperrenbewirtschaftung eine Adaptionstrategie ohne bauliche Veränderungen am Talsperrensystem dar. Multifunktions-talsperrensysteme besitzen oft mehrere konträre Nutzungen und Bewirtschaftungsziele. Eine mächtige Methodik zur Bestimmung der optimalen Talsperrenbewirtschaftung, sowie zur Ermittlung von optimalen Kompromisslösungen zwischen konträren Nutzungen und Bewirtschaftungszielen ist die simulationsbasierte multi-kriterielle Optimierung (MKO). In dieser Arbeit wird im Rahmend des REGKLAM Projekts ein innovatives generalisierbares simulationsbasiertes MKO Framework entwickelt, dass durch den Einsatz unterschiedlichster Techniken die Rechenzeit unter massiv verkürzen kann. Somit lassen sich Studien mit sehr hohen Zeitreihenlängen als Datengrundlage der MKO realisieren und gleichzeitig eine hohe Anzahl von Szenarienrechnungen realisieren. Dies führt zu einer robusten und effizienten MKO, insbesondere wenn Versorgungssicherheiten berücksichtigt werden müssen. Für ein Talsperrensystem im sächsischen Osterzgebirge wird die Robustheit anhand rezenter klimatischen Bedingungen und gegenüber dem projizierten Klimawandel (regionales Klimamodell WETTREG2010, Emissionsszenarien A1B, A2 und B1) analysiert und Adaptionstrategien auf Basis von Staulamellen vorgeschlagen. Hierbei wird auf fortgeschrittene Visualisierungs- und Entscheidungsfindungsmethodiken zurückgegriffen. Es zeigt sich, dass sich trotz einer Abnahme der Talsperrenzuflüsse in der Zeitscheibe 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1921-2007 um etwa 25 % weiterhin hohe Versorgungssicherheiten erreichen lassen. Es sind jedoch deutlich erhöhte mittlere monatliche Überleitungsmengen notwendig. Im Zeitraum 2071-2100 sinken in der letzten Zeitscheibe die Versorgungssicherheiten durch die Abnahme der Zuflüsse um ca. 50 % stark ab. Um akzeptable Werte für eine Indikatorvariable der Wasserqualität und die Versorgungssicherheit zu erreichen, müssen trotz einer reduzierten Abgaberrate sehr hohe mittlere monatliche Überleitungsmengen in Kauf genommen werden. Unter dem regionalen Klimamodell CLM ist hingegen durch gleichbleibende Zuflüsse keine Verminderung der generellen Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems zu erwarten.

1. Einleitung

Nach dem gegenwärtigen Stand führen der anthropogene Ausstoß von Treibhausgasen und die damit verbundene steigende Konzentration dieser Gase in der Atmosphäre zu weitläufigen Veränderungen des globalen Klimasystems. Dieser anthropogen bedingte Klimawandel könnte in Mittel- und Ostdeutschland zu einer ganzjährigen höheren mittleren Temperatur, zu trockeneren Sommern, feuchteren Wintern und einer höheren Strahlungsbilanz und potentiellen Evaporation führen (FRANKE et al. 2004, HEIDENREICH et al. 2011). Gravierende Auswirkungen auf die Natur und auf viele Bereiche des täglichen Lebens wären somit nicht auszuschließen.

Die BMBF Fördermaßnahme „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ unterstützt Regionen in Deutschland dabei, regionalspezifische Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln und umzusetzen. Das Tochterprojekt REGKLAM (Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden) versucht dabei, zusammen mit regionalen Akteuren aus den Bereichen Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft für die Region Dresden Risiken durch den Klimawandel zu erkennen und zu nutzen und zugleich zu mindern und vorzubeugen (REGKLAM 2013). Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht das Talsperrensystem der Talsperren Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach im sächsischen Osterzgebirge. Das Talsperrensystem wird auf vielfältige Arten genutzt. So werden unter anderem Brauchwasser zur Gewinnung von Trinkwasser für die Städte Dresden und Freital zu Verfügung gestellt. Weiterhin schützen die Talsperren Klingenberg und Lehmühle diese Städte vor Hochwasserereignissen durch das angestaute Fließgewässer Wilde Weißeritz. Das Talsperrensystem unterliegt der Bewirtschaftung durch die Sächsische Landestalsperrenverwaltung (LTV), die im Rahmen des REGKLAM Projektes als Praxispartner bei den Untersuchungen zur Seite steht.

Für den Wasserhaushalt in den Einzugsgebieten der Talsperren könnte der projizierte Klimawandel zu drastischen Abnahmen der Talsperrenzuflüsse führen (MÜLLER et al. 2013a). Dies würde negative Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit der Städte mit Trinkwasser bedeuten. Eine Zielsetzung dieser Arbeit ist es daher die Robustheit des Talsperrensystems gegen projizierte klimatische Veränderungen abzuschätzen. Dafür bedarf es optimal an die hydrologischen Rahmenbedingungen angepasste Bewirtschaftungsstrategien, die die bestmögliche Performance des Talsperrensystems garantieren. Diese Bewirtschaftungsstrategien bedeuten gleichzeitig wirksame Adaptionsstrategien für das Talsperrensystems gegen den Klimawandel und stellen das zweite Ziel dieser Arbeit dar.

Da das Talsperrensystem mehreren, teilweise konträren Nutzungen unterliegt bietet sich vor allem die simulationsbasierte multi-kriterielle Optimierung (MKO) als Methodik zum Erreichen der oben genannten Zielsetzungen an. Die MKO ist in der Lage zwischen mehreren formulierten und konträren Zielen innerhalb eines Optimierungslaufes einen (Pareto-optimalen) Satz bestmöglicher Kompromisslösungen zwischen den konträren Zielen zu finden. In der Literatur ist der Einsatz von vielfältigen MKO Verfahren zur Optimierung der Bewirtschaftung von unterschiedlichsten Talsperren und Talsperrensystemen weit verbreitet (REDDY & KUMAR 2006, 2007, 2008; CHANG & CHANG 2009; CHEN et al. 2007; KIM et al. 2008; DITTMANN et al. 2009; MALEKMOHAMMADI et al. 2011; CASTELLETTI et al. 2012). Einen Überblick zu Methodiken, die neben der MKO zur Optimierung von Talsperrenbewirtschaftungsstrategien zum Einsatz kommen, geben YEH (1985), LABADIE (2004) und RANI et al. (2010). Einen Überblick über, in der Literatur bekannte, Simulationsmodelle mit denen die Talsperrenbewirtschaftung für beliebige Talsperrensysteme simuliert werden kann, geben RANI et al. (2010).

Ein Anspruch von REGKLAM ist es, zusammen mit den Praxispartnern praxisnahe und praxisorientierte Ergebnisse zu erzielen. Die LTV verwendet zur Bewertung der Talsperrenbewirtschaftung stochastisch generierte monatliche Bemessungszeitreihen mit einer Länge von 10000 Jahren. Durch Simulationsmodelle und Speicherrechnungen kann mit diesen Bemessungszeitreihen der Talsperrenbetriebs über ein breites Spektrum von möglichen hydrologischen Zuständen eines bestimmten klimatischen Zustandes evaluiert werden. Die langjährigen Zeitreihen sind auch für fundierte und robuste Aussagen über die Versorgungssicherheiten notwendig. Um den Talsperrenbetrieb auch unter projizierten zukünftigen klimatischen Verhältnissen gleichermaßen evaluieren zu

können, ist es daher wünschenswert bei der MKO ebenso monatliche Zuflusszeitreihen von 10000 Jahren zugrunde zu legen.

Dies hat jedoch weitreichende Konsequenzen. Unter Verwendung eines gewöhnlichen MKO-Algorithmus, der mit einem Simulationsmodell gekoppelt wird, ergibt sich eine theoretische Rechenzeit (mit heutiger handelsüblicher Hardware) von etwa einem Jahr für einen einzelnen MKO-Lauf. Daher wird im Teilprojekt 3.2.1 des REGKLAM Projekts ein robustes und effizientes MKO Framework entwickelt, das die extreme Rechenzeit auf handelsüblicher Hardware maßgeblich verkürzt (in etwa 4 Tage) und sich an der vom Praxispartner angewandten Methodik orientiert. Hierbei bleibt durch die Generalisierbarkeit des Ansatzes auch eine Anwendbarkeit auf andere Talsperrensysteme bestehen. Dies wird dabei durch mehrere implementierte Methodiken erreicht.

Rechenzeit kann durch eine Parallelisierung der Simulationsmodellaufrufe (Abschnitt 2.3.4), sowie durch eine Monte-Carlo Rekombinationsmethodik (Abschnitt 2.3.3) zur Verkürzung der Zeitreihen ohne Informationsverlust hinsichtlich des hydrologischen Zuflussregimes eingespart werden. Weiterhin kann durch eine geeignete Formulierung des MKO-Problems Rechenzeit eingespart werden (Abschnitt 3.1.1). Durch die Einführung einer eindeutigen Beziehung zwischen Staulamellen kann eine robustere und effizientere Optimierungsleistung des MO-CMA-ES gewährleistet werden (Abschnitt 3.4). Auch die Wahl des Simulationsmodells hat einen großen Einfluss auf die Rechenzeit (Abschnitt 2.3.7). Im Vergleich zum frei verfügbaren generalisierten Talsperrenbewirtschaftungsmodell MODSIM (LABADIE 1995) ist das hier eingesetzte kostenpflichtige generalisierte Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS (HYDROLOGICS INC. 2009) um den Faktor 7 schneller. Schließlich kann eine Initialisierung der MKO mit geeigneten Startschätzungen Rechenzeit einsparen und für robustere Ergebnisse sorgen (Abschnitt 2.3.8).

Durch die massive Einsparung an Rechenzeit ist es somit möglich unter mehreren Szenarien multi-kriterielle Optimierungen als Grundlage für die Analyse der Robustheit des Talsperrensystems durchzuführen und Anpassungsstrategien zu ermitteln. Dies ist besonders bei Klimawandel-folgeanalysen wegen der hohen Bandbreite an zukünftig möglichen Entwicklungen wichtig. Da der Ergebnissatz einer MKO mehrere hunderte bis tausende Lösungen beinhalten kann, aus denen sich der Entscheidungsträger eine geeignete auswählen muss, kann diese Wahl sehr unübersichtlich und mühsam sein (BLASCO et al. 2008). Um den Entscheidungsprozess zu vereinfachen wird durch den Einsatz von Clusterungsverfahren die hohe Anzahl an Lösungen auf wenige repräsentative reduziert (Abschnitt 2.3.6). Hochdimensionalen Ergebnisdatensätze lassen sich durch den Einsatz geeigneter Visualisierungsverfahren verständlich darstellen (Abschnitt 2.3.6).

Der vorliegende Produktbericht ist wie folgt gegliedert: Im Abschnitt Methodik wird zunächst die Datengrundlage aus rezenten und projizierten Zuflüssen (Abschnitt 2.1) und das Talsperrensystem der Talsperren Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach beschrieben (Abschnitt 2.2). Nach der Einführung der Methodiken des multi-kriteriellen Optimierungsframeworks (Abschnitt 2.3) erfolgt die mathematische Formulierung des MKO-Problems für unterschiedliche Szenarien (Abschnitt 3). MKO Läufe werden zunächst für Szenarien unter rezenten klimatischen Bedingungen durchgeführt (Abschnitt 4.2). Die MKO als Grundlage zur Abschätzung der Robustheit des Talsperrensystems unter veränderten klimatischen Bedingungen, sowie die Auswahl geeigneter Adaptionstrategien erfolgt in den Abschnitten 4.3 und 4.4. Hierbei wird auf die projizierten Durchflüsse des regionalen Klimamodells WETTREG2010 unter den Emissionsszenarien A2, A1B und B1 zurückgegriffen. In Abschnitt 4.5 werden die Ergebnisse der MKO der einzelnen Zeitscheiben miteinander verglichen. Auf Rechnungen mit Grundlage des regionalen Klimamodells CLM wird verzichtet, da sich keine bedeutenden Abnahmen der Zuflüsse bis zum Jahr 2100 ergeben (MÜLLER et al. 2013b). Eine Überprüfung der Robustheit, sowie die Suche nach geeigneten Adaptionstrategien sind hier hinfällig, da die aktuellen Bewirtschaftungsstrategien auch weiterhin eine ausreichende Leistung des Talsperrensystems garantieren sollten.

2. Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

Die für die Szenarienrechnungen zugrundeliegenden, projizierten klimatischen Entwicklungen stützen sich auf die SRES Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 (IPCC 2000). Die Modellkette zur Simulation des lokalen Klimas startet mit dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM5-MPI und führt zu den regionalen Klimamodellen WETTREG2010 und CLM (HEIDENREICH et al. 2011). Für das regionale Klimamodell WETTREG2010 stehen zehn Realisierungen der möglichen klimatischen Entwicklungen bis zum Jahr 2100 zur Verfügung, für das regionale Klimamodell CLM sind dies jeweils zwei. Die meteorologischen Daten bilden die Antriebsdaten für das, im Produkt 3.2.1a des REGKLAM Teilmoduls 3.2.1, multi-kriteriell parametrisierte Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (SCHULLA 1997), welches die zugehörigen lokalen Talsperrenzuflüsse simuliert (MÜLLER et al. 2013a).

Nach Tabelle 1 ergeben sich unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 Abnahmen der lokalen Talsperrenzuflüsse um bis zu 25 % für die Zeitscheibe 2021-2050 und bis zu 50 % für die Zeitscheibe 2071-2100. Im Gegensatz dazu gibt es nach dem regionalen Klimamodell CLM keinen erkennbaren Abnahmen der Zuflüsse. (MÜLLER et al. 2013a). Der lokale Zufluss A entspricht dem Talsperrengesamtzufluss der Talsperre Lehmühle, der lokale Zufluss B dem Zwischengebietszufluss zwischen der Talsperre Lehmühle und Klingenberg. Die lokalen Zuflüsse C und D stehen für den Durchfluss am Pegel Rauschenbach 3 und dem Talsperrengesamtzufluss der Talsperre Rauschenbach (siehe Abbildung 6, Seite 28).

Die projizierten lokalen Talsperrenzuflüsse wurden dann mittels eines Zeitreihenmodells auf Basis eines hybriden künstlichen neuronalen Netzes auf 10000 Jahre multivariat stochastisch verlängert (MÜLLER et al. 2013b). Diese Daten bilden die Datengrundlage für die hier durchgeführten multi-kriteriellen Optimierungen der Talsperrenbewirtschaftung unter veränderten klimatischen Verhältnissen. Zur Übersicht sind Box Plots der synthetischen mittleren monatlichen Gesamtzuflüsse (Summe der lokalen Zuflüsse A und B) zu den Talsperren Klingenberg und Lehmühle im Anhang dargestellt (Abbildung A 1 bis Abbildung A 7)

Tabelle 1: Übersicht über die mittleren lokalen Zuflüsse unter dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 für die Zeitscheiben 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100. Weiterhin werden die mittleren beobachteten Zuflüsse im Zeitabschnitt 1921-2010 und in der Zeitscheibe 1961-1990 dem Reanalysezeitraum von WETTREG2010 (1961-1990) gegenübergestellt (MÜLLER et al. 2013b).

Zeitscheibe	Szenario	mittlerer lokaler Zufluss (m^3s^{-1})			
		A	B	C*	D
1921-2007	Beobachtet	1.14	0.31	0.6	0.14
1961-1990	Beobachtet	1.16	0.32	0.60	0.15
1961-1990	Reanalyse	1.03	0.34	0.54	0.15
1991-2020	A1B	1.03	0.34	0.54	0.15
	B1	1.05	0.34	0.55	0.15
	A2	1.03	0.33	0.54	0.15
2021-2050	A1B	0.8	0.26	0.45	0.13
	B1	0.97	0.31	0.52	0.14
	A2	0.86	0.27	0.47	0.13
2071-2100	A1B	0.53	0.18	0.36	0.11
	B1	0.54	0.17	0.36	0.1
	A2	0.54	0.17	0.36	0.1

* ohne Abgabe der Talsperre Flaje von $0.075 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

2.2 Das Talsperrensystem Klingenberg-Lehnmühle-Rauschenbach

Einführung

Das Talsperrensystem, bestehend aus den Talsperren Klingenberg (KL), Lehnmühle (LM) und Rauschenbach (RB) liegt südlich der Stadt Dresden im Osterzgebirge. Die Talsperren Lehnmühle und Klingenberg stauen das Fließgewässer der Wilden Weißeritz auf. Der aufgestaute Hauptzufluss der Talsperre Rauschenbach ist die Flöha. Das Talsperrensystem befriedigt unterschiedliche Talsperrennutzungen. Die beiden Hauptnutzungen sind die Bereitstellung von Brauchwasser zur Trinkwasserversorgung und der Hochwasserschutz. Das Brauchwasser wird von der Talsperre Klingenberg bereitgestellt und dient zur Versorgung der Städte Freital und Dresden, sowie umliegender Gebiete. Primäre Hochwasserschutzziele der Talsperren Klingenberg und Lehnmühle sind die Städte Dresden und Freital, sowie die unterstromig anliegenden Gemeinden. Die Talsperre Rauschenbach schützt den Erholungsort Neuhausen und die Stadt Olbernhau, sowie weitere Gemeinden (WINKLER 2013). Weitere Talsperrennutzungen mit geringerer Priorität sind die Energiegewinnung aus Wasserkraft, sowie der Tourismus (ohne direkte Nutzung der Talsperrenkörper). Tabelle A 1 gibt Auskunft über die wichtigsten Kenngrößen der Talsperren.

Tabelle 2: Übersicht über die Parameter der Steuerung der Trinkwasserbereitstellung

Bereitstellungsstufe	Abgaberate Q_{Del}^{BSS} (m^3s^{-1})	Geforderte Versorgungssicherheit R(BSS) (%)
BSS4*	1,20	50,0
BSS3	1,00	99,0
BSS2	0,925	99,5
BSS1	0,85	99,95

* zu Szenarien mit vier Bereitstellungsstufen eingeführt

Die Talsperre Rauschenbach stützt die Talsperren Lehnmühle und Klingenberg mit einer Überleitung von Brauchwasser von mit einer Streckenführung über die Revierwasserlaufanstalt, dem oberen Großhartmannsdorfer Teich, die Talsperre Lichtenberg zur Talsperre Klingenberg (WINKLER 2013). Die Stützung der Talsperren KL und LM wurde ab 2003 eingeführt, da nach dem Hochwasser 2002 die Hochwasserschutzräume der Talsperren massiv erhöht wurden (WINKLER 2013). Die Versorgung mit Brauchwasser zur Trinkwassergewinnung kann ohne die Überleitung nicht mehr mit der geforderten Versorgungssicherheit gewährleistet werden (siehe auch Abschnitt 4.2.4). Die Größe der Hochwasserschutzräume der Talsperren ist innerjährlich konstant (Tabelle A 1), da sich die Füllen der Hochwasser durch Schneeschmelzereignisse im Frühling und Extremniederschläge im Sommer die Waage halten.

Überblick Talsperrenbewirtschaftung

Zur Bewirtschaftung von Talsperren wird das Staubecken in mehrere Räume (Zonen) eingeteilt. Gebräuchlich ist eine Einteilung in

- Totraum: Dies ist der Bereich unterhalb des Grundablasses. Dieser Bereich kann nicht durch gezielten Einstau, oder Ablassen bewirtschaftet werden.
- Reserveraum: Dieser Raum wird zumeist aus Gründen der Wasserqualität ausgewiesen. In der Regel bleibt diese Zone eingestaut.
- Bewirtschaftungsraum: In dieser Zone geschieht der Regelbetrieb. Wasser wird aus dieser Zone abgelassen, wenn weniger zufließt als es die Deckung des Bedarfs erfordert, oder eingestaut wenn der Zufluss größer als der Bedarf ist.
- Gewöhnlicher Hochwasserschutzraum: Diese Zone wird, außer im Hochwasserfall, nicht eingestaut. Das Wasser, das im Hochwasserfall in der Zone eingestaut wird, sobald es die Situation zulässt, schnellstmöglich wieder abgelassen.

- Außergewöhnlicher Hochwasserschutzraum: Dies ist die Zone die vom Rückstau eingenommen wird, der sich aus dem Zufluss abzüglich aller Ausflüsse aus den Hochwasserentlastungsorganen ergibt.

Die Einteilung der Zonen im Staukörper erfolgt durch Staulamellen. Diese geben Stauinhalte in Volumen an, die benachbarte Zonen voneinander abgrenzen. Der aktuelle Stauinhalt einer Talsperre wird mit der Vorgabe durch die Staulamellen verglichen um zu entscheiden in welcher Zone sich der Einstau der Talsperre befindet. Für die jeweilige Talsperre KL und LM ist z^{buf} die Staulamelle (und somit maximale Größe) des Reserveraums und gleichzeitig der Beginn der Bewirtschaftungszone. z^{bew} ist die Staulamelle der Bewirtschaftungszone und gleichzeitig der Beginn des gewöhnlichen Hochwasserschutzraums.

Tabelle 3: Reduzierte Abgaben von Brauchwasser für die Zeitscheibe 2071-2100.

Bereitstellungsstufe	Abgaberate Q_{Del}^{BSS} (m^3s^{-1})	Geforderte Versorgungssicherheit R(BSS) (%)
BSS3	0,75	99,0
BSS2	0,675	99,5
BSS1	0,60	99,95

Der Bedarf an Brauchwasser zur Trinkwassergewinnung aus der Talsperre Klingenberg ist durch drei Stufen, den sogenannten Bereitstellungsstufen, BSS1 bis BSS3, geregelt. Jede Bereitstellungsstufe erfordert eine jeweils eigene Abgaberate Q_{del}^{BSS} mit einer zugehörigen geforderten (Mindest-) Versorgungssicherheit $R(BSS)$, siehe Tabelle 2. Durch die drastische projizierte Reduktion der Zuflüsse in der Zeitscheibe 2071-2100 unter WETTREG2010 (Tabelle 1) werden für alle Szenarien in dieser Zeitscheibe reduzierte Brauchwasserabgaben zur Trinkwassergewinnung von ca. 75 % angesetzt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 4: Übersicht über die Parameter der Steuerung der Überleitung

Überleitungsstufe	Überleitungsrate Q_{Div}^{BSS} (hm^3 Monat $^{-1}$)
DIV3	0,0
DIV2	0,4
DIV1	0,6

Die Bereitstellungsstufen sind nach Abbildung 1 durch die Einteilung der Bewirtschaftungsraums in drei Unterzonen definiert. Diese Zonen werden durch zwei Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ mit unterschiedlichen Einteilungen für jeden Monat unterteilt. Jedoch beziehen sich diese Staulamellen nicht auf den Bewirtschaftungsraum der Talsperre Klingenberg, sondern auf eine virtuelle Gesamtbewirtschaftungszone, die dem Gesamtvolumen S^{KL+LM} der Talsperren Klingenberg und Lehmühle folgt.

Die Überleitung von Wasser aus der Talsperre Rauschenbach erfolgt ebenso in drei Abstufungen, siehe Tabelle 4. Die Abstufungen geschehen in drei Zonen DIV1 bis DIV3. Diese Zonen werden, vergleichbar zu den Bereitstellungsstufen, durch zwei Staulamellen $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ mit monatlichen Werten unterteilt und beziehen sich nach Abbildung 1 wiederum auf den Gesamtvolumen S^{KL+LM} .

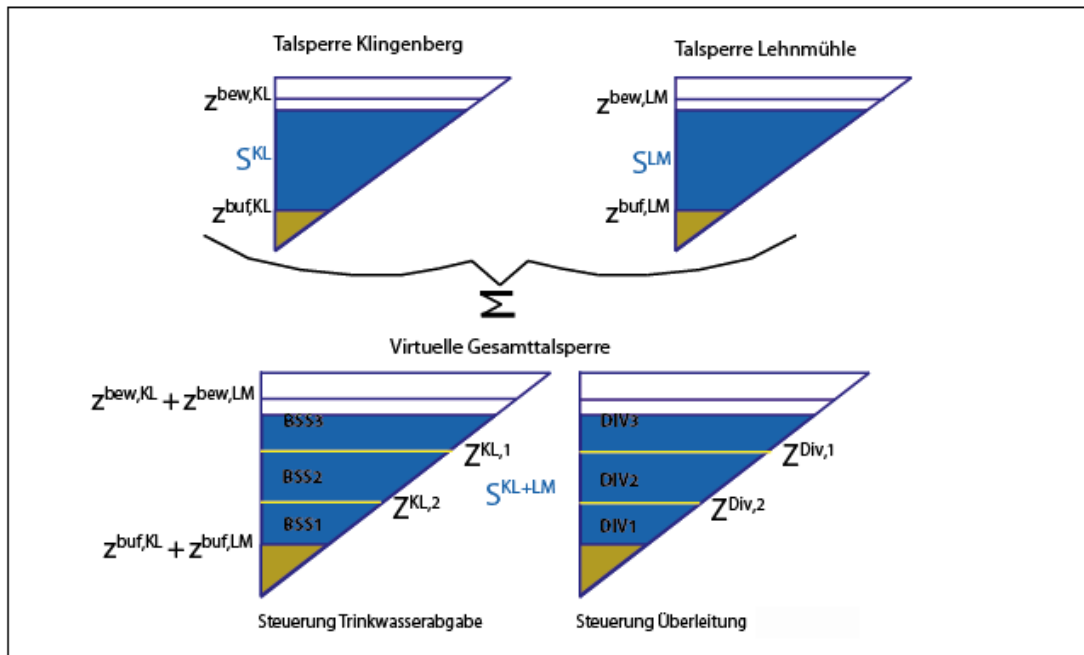


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Steuerung von Trinkwasserabgabe und Überleitung. Für die jeweilige Talsperre KL und LM ist z^{buf} die Staulamelle des Reserveraums, z^{bew} die Staulamelle der Bewirtschaftungszone.

2.3 Das Multi-kriterielle Optimierungsframework

Um den in der Einleitung genannten Herausforderungen zu begegnen wurde im Teilmodul 3.2.1 ein robustes und effizientes simulationsbasiertes multi-kriterielles Optimierungsframework (MKOF) entwickelt. Abbildung 2 zeigt das schrittweise Ablaufschema des MKOF. Demnach bietet das MKOF zwei Betriebsarten: (1) für Szenarienrechnungen die auf rezenten klimatischen Rahmenbedingungen basieren und Talsperrenzuflüsse als Datengrundlage existieren; (2) für Szenarien die auf projizierten klimatischen Rahmenbedingungen basieren und bei denen folglich Talsperrenzuflüsse zunächst über ein Wasserhaushaltsmodell simuliert werden müssen. Nachfolgend sollen die einzelnen Schritte innerhalb des MKOF näher beschrieben werden.

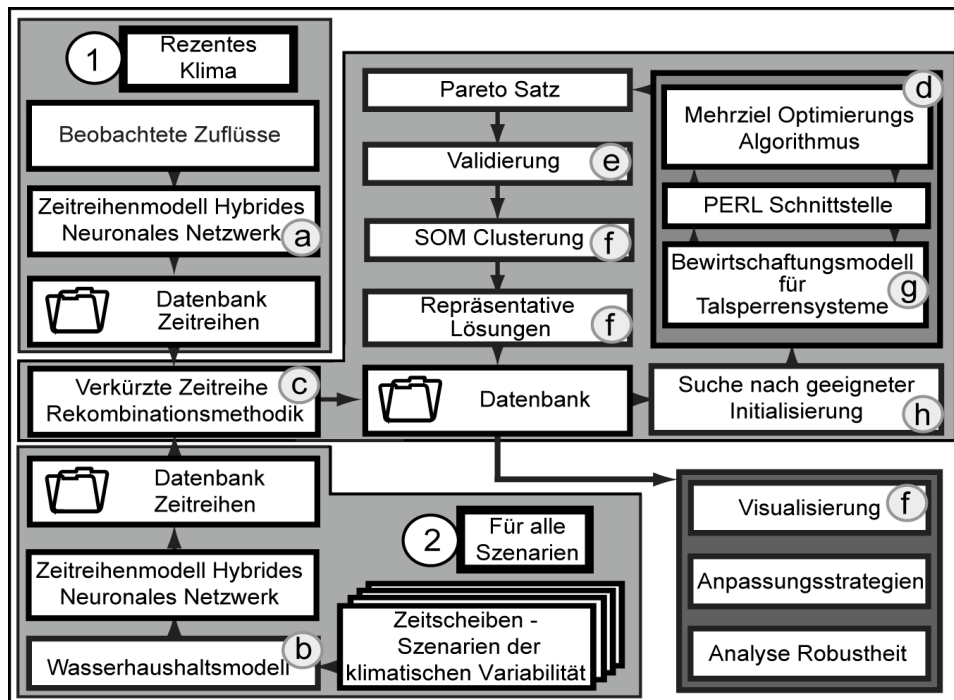


Abbildung 2: Schrittweises Ablaufschema des Multi-kriteriellen Optimierungsframeworks.

2.3.1 Das Zeitreihenmodell (a)

Das Zeitreihenmodell das die vorliegenden Zeitreihen multivariat synthetisch auf 10000 Jahre verlängert ist im REGKLAM Produktbericht 3.2.1b des Teilmoduls 3.2.1 (MÜLLER et al. 2013b) beschrieben. Das Modell basiert auf einem hybriden künstlichen neuronalen Netzwerk (ASHRAFZADEH & RIZI 2009) und wurde mit dem SMA-Filter (KOUTSOYIANNIS 2002) erweitert.

2.3.2 Wasserhaushaltsmodell (b)

Die Zuflüsse für das Talsperrensystem werden für projizierte klimatische Verhältnisse mit dem flächendifferenzierten und physikalisch basierten Wasserhausmodell WaSiM-ETH (SCHULLA 1997) simuliert. Für nähere Informationen wird auf den Produktbericht 3.2.1a des Teilmoduls 3.2.1 des REGKLAM Projektes (MÜLLER et al. 2013a) verwiesen.

2.3.3 Monte-Carlo Rekombinationsmethodik (c)

Die Monte-Carlo Rekombinationsmethodik funktioniert nach MÜLLER & SCHÜTZE (2013) wie folgt: Durch Einsatz des Folgescheitelalgorithmus (FSA; MANIAK 2005) wird zunächst eine langjährige (Master-) Zeitreihe in einzelne Defizit-Perioden, oder Trockenperioden gegen eine Abgabe c_{crit} unterteilt. Jede Defizit-Periode besitzt ein zugehöriges Defizit-Volumen das durch den FSA gegen einen Schwellenwert bestimmt wurde. Durch eine Normal-Quantil Transformation (KRZYSZTOFOWICZ 1997) wird die Verteilung der Defizit-Volumen in eine Normalverteilung transformiert. Mittels

der empirischen kumulativen Verteilungsfunktion (ECDF) der transformierten Defizit-Volumen und einer Anzahl von n_D zufälliger gleichverteilter Zufallszahlen werden Defizit-Volumen von der ECDF gesampelt. Anschließend wird die ECDF der gesampelten Defizit-Volumen gebildet (Abbildung 3 a) und der Pearson'sche Korrelationskoeffizient ρ zwischen beiden ECDFs oberhalb einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit von P_T berechnet. Ist ρ für die gesampelte ECDF ausreichend, wird der gesampelte Satz Defizit-Volumen übernommen, andernfalls werden erneut zufällige Defizit-Volumen gesampelt.

In den letzten Schritten des Verfahrens wird aus den gesampelten Defizit-Volumen mit ihren zugehörigen Defizit-Perioden eine gültige verkürzte Zeitreihe zusammengesetzt. Dabei werden beginnend mit der ersten Defizit-Periode jeweils neue Defizit-Perioden aus dem gesampelten Satz gesucht und angefügt. Die anzufügende Defizit-Periode muss dabei mit einem Monat beginnen, der auf den letzten Monat der verkürzten Zeitreihe folgt. Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis keine gültigen Zeitreihen mehr vorhanden sind. Im Folgenden wird dann die verkürzte Zeitreihe bis zum letzten Monat des Wasserhaushaltsjahres verlängert. Alle restlichen, noch nicht angefügten, Defizit-Perioden werden bis zum Anfang und Ende der jeweiligen Wasserhaushaltsjahre verlängert. Nach diesem Schritt können alle Defizit-Perioden nacheinander angefügt werden. In einem abschließenden Schritt kann geprüft werden, ob die relevanten Defizitperioden mit hohen Defizitvolumen in der gekürzten Zeitreihe, sowie die grundlegenden statistischen Parameter erhalten bleiben (beispielsweise Abbildung 3 (b) und Abbildung A 8).

Liegen mehrere Zeitreihen vor, die durch eine räumliche Korrelationsstruktur miteinander verknüpft sind, empfiehlt es sich eine Master-Zeitreihe zu generieren, die die wichtigsten Prozesse beschreibt. Die Rekombination wird dann anhand dieser Zeitreihe durchgeführt und auf alle Zeitreihen übertragen. Als Beispiel kann die Durchführung der Rekombination am Anwendungsbeispiel für das Talsperrensystem dienen.

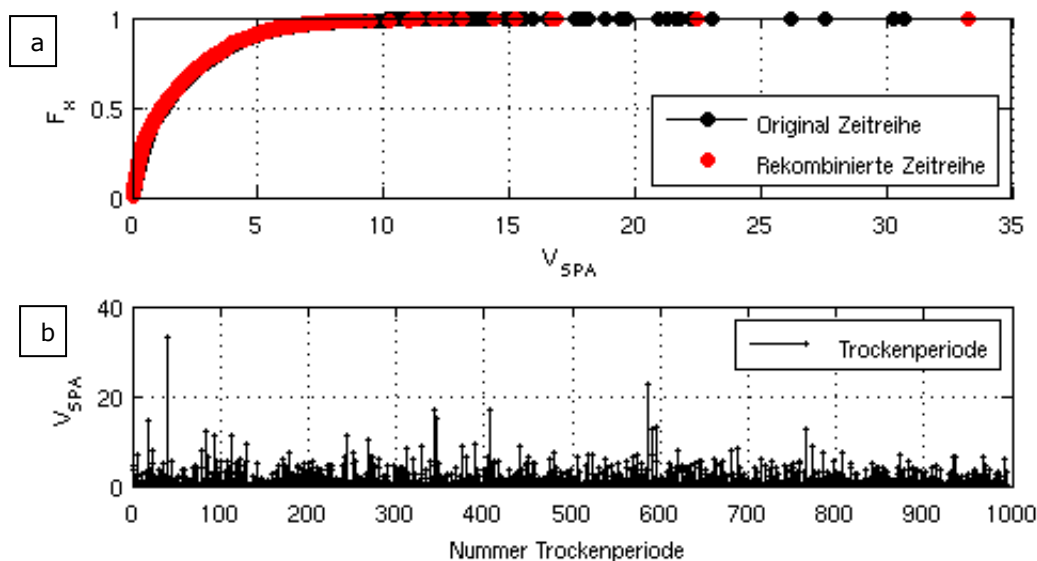


Abbildung 3: Vergleich der ECDF der ungekürzten Zeitreihe (11287 Defizitperioden) und der gekürzten Zeitreihe (Rezent 1921-2007) mit 800 gesampelten Defizitzeitreihen (a). Aus der Anordnung der gesampelten Defizitperioden wird dann die gekürzte Zeitreihe generiert. Panel (b) zeigt die mit dem FSA separierten Defizitperioden der gekürzten Zeitreihe.

Zur Beschreibung des hydrologischen Regimes im Talsperrensystem KL-LM-RB wird, wie auch schon im Produktbericht 3.2.1b, der Gesamttalsperrenzufluss zu den Talsperren KL und LM (Summe der lokalen Zuflüsse A und B) genutzt. Somit wird die Rekombinationsmethodik primär auf eine Kombination von zwei Zeitreihen bezogen (Master-Zeitreihe). Die Aufteilung der Zeitreihen in die

Defizitperioden, die zufällig gezogenen Defizitperioden, sowie die Anordnung der einzelnen gezogenen Trockenperioden zu der verkürzten Zeitreihe geschieht für die vier Zeitreihen der lokalen Zuflüsse dann analog.

Bei der Durchführung der Monte-Carlo Rekombinationsmethodik zur Verkürzung der Zuflusszeitreihen wird für alle Szenarien bis zum Jahr 2050 eine konstante Abgabe c_{crit} von $1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ angesetzt. Für die Szenarien der Zeitscheibe 2071-2100 ist c_{crit} auf $0,65 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ reduziert.

2.3.4 Simulationsgestützte multi-kriterielle Optimierung (d)

a) Multi-kriterielle Optimierung

In der mono-kriteriellen Optimierung wird ein Tupel $x = (x_{i=1}, \dots, x_{i=N}) \in \mathbb{R}^N, i = 1, \dots, N$ aus N Entscheidungsvariablen x_i durch den Einsatz eines Algorithmus iterativ gezielt verändert um eine einzelne Zielfunktion $f(x), f: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x)$ zu minimieren, $\min_{x \in \mathbb{R}^N} \{f(x)\}$. Die multi-kriterielle Optimierung (MKO) ist die Erweiterung der mono-kriteriellen Optimierung um $m = 1, \dots, M$ Zielfunktionen eines Zielfunktionsvektors $f(x) = (f_{m=1}(x), \dots, f_{m=M}(x))$ simultan zu minimieren (eine Minimierung der Zielfunktionen ist üblich, eine entsprechende Maximierung kann jedoch durch die Multiplikation der Zielfunktionswerte mit einem Faktor von -1 erreicht werden).

Der Einsatz der multi-kriteriellen Optimierung macht vor allem dann Sinn, wenn sich die Zielfunktionen zueinander konträr verhalten. Durch das Konzept der nicht-Dominanz können Lösungen im Optimierungsprozess hinsichtlich mehrerer Ziele verglichen und strikt partiell geordnet werden. Eine Lösung $x \in X$ dominiert demnach eine Lösung $\hat{x} \in X$ (formuliert als $x < \hat{x}$) wenn genau $\forall m \in \{1, \dots, M\} : f_m(x) \leq f_m(\hat{x})$ und $\exists m \in \{1, \dots, M\} : f_m(x) < f_m(\hat{x})$ gilt (IGEL et al. 2007). Als Ergebnis der MKO lässt sich ein Satz Lösungen, der sogenannte Pareto-Satz Θ , ermitteln, der die bestmöglichen Kompromisslösungen zwischen den konträren Zielen (den Zielfunktionen) im Sinne der Pareto-Optimalität enthält. Alle Lösungen des Pareto-Satzes sind nicht-dominiert, es gilt $\Theta = \{x \mid x \in X \wedge \nexists \hat{x} \in X : \hat{x} < x\}$. Demnach gelten für alle Lösungen des Pareto-Satzes, dass sich für das gestellte Optimierungsproblem keine weiteren Lösungen mehr finden lassen, bei denen alle Ziele verbessert werden können. Eine Verbesserung eines Ziels führt zu einer Verschlechterung eines anderen Ziels. Die Abbildung des Pareto-Satzes im Zielfunktionsbereich ist durch $\{f(x) \mid x \in X \wedge \nexists \hat{x} \in X : \hat{x} < x\} \subset \mathbb{R}^M$ gegeben und heißt Pareto-Front (IGEL et al. 2007).

Existieren für alle Entscheidungsvariablen Beschränkungen in der Form von oberen Randbedingungen x_i^u und unteren Randbedingungen x_i^l , ergibt sich für $f_1, \dots, f_M : X \mapsto \mathbb{R}$ der zulässige Parameter Raum als Teilmenge des gesamten Parameterraums, $X = [x_1^l, x_1^u] \times \dots \times [x_n^l, x_n^u] \subset \mathbb{R}^n$. Diese Art von Randbedingung wird als Box Constraint bezeichnet (IGEL et al. 2007). Um die Optimierung unter Box Constraints zu ermöglichen und effizient zu gestalten, existieren als Box Constraint Handler bezeichnete Methodiken, die in den Optimierungsalgorithmen implementiert werden können (IGEL et al. 2007, WOLDESENBET et al. 2009, COELLO COELLO 2010).

b) Generalisierter multi-kriterieller Optimierungsalgorithmus

Der verwendete multi-kriterielle Optimierungsalgorithmus entstammt der Klasse der evolutionären Strategien. Die Multi-Objective Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (MO-CMA-ES) wurden von IGEL et al. (2007) als multi-kriterielle Erweiterung des bekannten, mono-kriteriellen CMA-ES eingeführt. Eine Population der MO-CMA-ES besteht aus Individuen die auf elitären (1,1)-CMA-ES Suchstrategien basieren. Um den evolutionären Prozess zu imitieren werden diese durch nicht-dominierendes Sortieren (DEB et al. 2002) und einem Ranking durch das Hypervolumen Kriterium (ZITZLER & THIELE 1998) einer multi-kriteriellen Sortierung unterworfen, (IGEL et al. 2007).

Die MO-CMA-ES ist in der als open-source frei verfügbaren Bibliothek Shark verfügbar (IGEL et al. 2008). Die hier verwendete Version von Shark ist 2.3.4. Die in Shark implementierte Version des MO-CMA-ES wird für den Einsatz im Teilmodul 3.2.1 modifiziert. So ist die vorliegende Version in der Lage mittels openMP (OPENMP 2002) je nach Hardware bis zu 64 Simulationsläufe gleichzeitig zu starten. Auf handelsüblicher Hardware mit bis zu acht CPU-Kernen kann so die Rechenzeit einer multi-kriteriellen Optimierung um den Faktor 8 minimiert werden, siehe Abbildung 4.

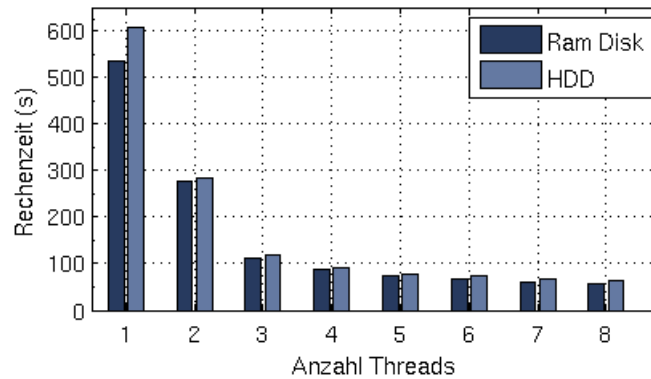


Abbildung 4: Rechenzeiten nach verwendeter Anzahl von Threads am Beispiel einer MKO über 10 Iterationen mit einer Populationsgröße von 24 für das Talsperrensystem KL-LM-RB über 86 Jahre (1921-2007). Angegeben ist der Median der Rechenzeit aus zehn MKO Läufen (CPU: AMD FX8150).

Die Handhabung des MO-CMA-ES wird durch den Einsatz einer Konfigurationsdatei erheblich erleichtert, da hier alle relevanten Einstellungen vornehmbar sind. Die Programmaufrufe des Simulationsmodells durch die MO-CMA-ES lassen sich anpassen. So kann eine Vielzahl von Schnittstellen und Simulationsmodellen verwendet werden. Eine hohe Generalisierbarkeit des MKO Programms ist hierdurch gewährleistet. Unter anderem wurde die hier erweiterte Version des MO-CMA-ES zur MKO des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH (SCHULLA 1997) genutzt (MÜLLER et al. 2013a).

c) Kopplung von MO-CMA-ES und OASIS

Bei der simulationsgestützten MKO wird der Zielfunktionsvektor mittels eines Simulationsmodells evaluiert. In diesem Fall ist das Simulationsmodell das Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS. Die Kommunikation zwischen dem MKO Optimierungsalgorithmus MO-CMA-ES und dem Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS geschieht über ein Skript in der Perl Programmiersprache (WALL et al. 2000). Die eigentliche MKO des Optimierungsproblems geschieht durch die MO-CMA-ES, dieser verändert iterativ die Entscheidungsvariablen und ruft dann das Perl Skript auf, siehe Abbildung 5. Dieses transformiert die Entscheidungsvariablen und schreibt diese in die entsprechenden Konfigurationsdateien von OASIS. Danach wird OASIS gestartet und simuliert die Talsperrenbewirtschaftung unter den gegebenen Staulamellen. Nach dem Beenden des Simulationslaufes berechnet das Perl Skript die einzelnen Zielfunktionswerte und übergibt diese dem MO-CMA-ES. Damit ist der Zielfunktionsvektor für einen Parametersatz evaluiert.

2.3.5 Validierung (e)

Um die korrekte Abbildung des hydrologischen Regimes unter der verkürzten Zeitreihe zu überprüfen erfolgt in dieser Phase eine Validierung der Pareto-optimalen Lösungen. Hierbei wird die Talsperrenbewirtschaftung unter Verwendung der Parametersätze der Pareto-Optimalen Lösungen mit OASIS anhand der nicht gekürzten 10000 jährigen Zeitreihen simuliert. Anhand der Simulationsergebnisse können dann die Zielfunktionen erneut berechnet und verglichen werden.

Um nicht alle Lösungen des Pareto-Satzes validieren zu müssen, erfolgt eine Auswahl an repräsentativen Lösungen. Hierbei wird die zum Pareto-Satz zugehörige Pareto-Front wie auch in Abschnitt 2.3.6 mittels selbstorganisierender Merkmalskarten (SOM, KOHONEN 2001) in ähnliche Bereiche geclustert und je Cluster jeweils eine repräsentative Lösung gewählt. In der Regel werden

maximal 360 repräsentative Lösungen validiert. Diese maximal 360 Lösungen werden dann in den endgültigen Lösungssatz übernommen. Ergibt sich bei der Validierung ein sehr guter linearer Zusammenhang zwischen den Zielfunktionswerten, könnte auch der komplette Pareto-Satz in den Satz der endgültigen Lösungen übernommen werden.

2.3.6 Visualisierung durch Level-Diagramme (f)

Die visuelle Darstellung von Datensätzen mit mehr als zwei Dimensionen ist nur mit Einschränkungen möglich und oft nicht leicht verständlich. Bei der MKO sind oftmals Pareto-Fronten mit mehr als zwei Dimensionen darzustellen. Da die Visualisierung der Pareto-Front eine Schlüsselrolle in der Vermittlung der Ergebnisse an den Entscheidungsträger darstellt (BLASCO et al. 2008), wurden verschiedenste Visualisierungsmethoden vorgestellt (LOTOV & MIETTINEN 2008, OBAYASHI & SASAKI 2003, PRYKE et al. 2007, TAN & FRASER 1998, ZIO & BAZZO 2011).

Für die Visualisierung der Ergebnisse des MKO Frameworks werden Level-Diagramme nach BLASCO et al. (2008) verwendet. Level Diagramme klassifizieren die Pareto-optimalen Lösungen nach ihrem Abstand, gegeben durch eine bestimmte Norm, zum Utopia-Punkt. Dieser Abstand kann dann genutzt werden, um Pareto-optimale Lösungen bei ihrer Darstellung auf mehreren Tafeln einer Abbildung bezüglich der Ordinate zu synchronisieren. Weiterhin können ebenso die zugehörigen Entscheidungsvariablen bezüglich dieses Abstands in ergänzenden Abbildungen wiedergegeben werden.

Um Level-Diagramme zu erstellen müssen zunächst alle Zielfunktionswerte des Zielfunktionsvektors $f(\mathbf{x}) = (f_{m=1}(\mathbf{x}), \dots, f_{m=M}(\mathbf{x}))$ mit $m = 1, \dots, M$ Zielfunktionen normiert werden. Der Vektor der normierten Zielfunktionen ist dann $\bar{f}(\mathbf{x}) = (\bar{f}_{m=1}(\mathbf{x}), \dots, \bar{f}_{m=M}(\mathbf{x}))$, $\bar{f}(\mathbf{x}) \in (0, \dots, 1)$. Die Normierung geschieht für jede Zielfunktion separat durch Gleichung (1)

$$\bar{f}_m(\mathbf{x}) = \frac{(f_m - \min(f_m))}{(\max(f_m) - \min(f_m))}, \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

Durch die Normierung erhält jede Zielfunktion die gleiche Wichtung bei der anschließenden Bestimmung der Distanz zum Utopia Punkt. Die Bestimmung der Distanz D zum Utopia Punkt $U = (\min(f_{m=1}), \dots, \min(f_{m=M}))$ erfolgt mittels einer p -Norm $D = \|\bar{f}(\mathbf{x})\|_p$. Die Distanz D kann dabei als „Kompromissbereitschaft“ einer Lösung betrachtet werden (BLASCO et al. 2008). Die 1-Norm, mit $p = 1$ auch Manhattan Distanz genannt, berücksichtigt demnach alle Zielfunktionen ebenbürtig. Die 2-Norm, mit $p = 2$, ist die Euklidische Distanz und gibt am besten die Form der Pareto-Front im gewohnten Euklidischen Raum wieder. Die Maximumsnorm (Inf-Norm), $p = \infty$, fokussiert den jeweils schlechtesten Zielfunktionswert einer Lösung (BLASCO et al. 2008).

ZIO & BAZZO (2011) nutzen einen subtraktiven Clusteringsalgorithmus um die Pareto-Front einer MKO in Cluster einzuteilen. Aus den ermittelten Clustern wird dann eine für die Cluster repräsentative Lösung ausgewählt. Somit lässt sich die oft sehr hohe Anzahl von Lösungen (hunderte bis tausende wenn mit Archiv gearbeitet wird) deutlich verringern ohne zu viele Informationen über die Ausdehnung und Form der Pareto-Front zu verlieren. Gleichzeitig ermöglicht eine vorausgewählte, geringe Anzahl an Lösungen einen deutlich effizienteren Entscheidungsprozess (ZIO & BAZZO 2011).

Abweichend von ZIO & BAZZO (2011) und an Anlehnung an OBAYASHI & SASAKI (2003) werden wiederum SOM verwendet. Weiterhin bezieht sich das Clustern nicht alleine auf die Pareto-Front, sondern auf einen gewichteten Mischdatensatz aus, jeweils normierten, Entscheidungsvariablen, der Pareto-Front, sowie der Distanz D . Die repräsentative Lösung eines jeden Clusters ist wahlweise: (1) die Lösung mit der geringsten Euklidischen Distanz der jeweiligen Lösung zu allen anderen Lösungen in einem Cluster in Bezug auf die Pareto-Front, (2) die Lösung mit der geringsten Distanz D innerhalb eines Clusters.

Zur besseren Visualisierung der einzelnen Cluster in einem Level-Diagramm wird eine Konkave Hülle um die Cluster gezeichnet. Zum ermitteln der konkaven Hülle wird der Alpha-Shape Algorithmus (EDELBRUNNER et al. 1983) verwendet.

Auf eine Darstellung der Entscheidungsvariablen in den Level-Diagrammen wird verzichtet. Stattdessen werden die Staulamellen der jeweiligen repräsentativen Lösungen gezeigt. In diesen Abbildungen wird weiterhin die farbige und transparente Hülle um die Spannweite der Monatswerte der Staulamellen in den jeweiligen Clustern dargestellt.

2.3.7 **Das Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS (g)**

Das von der Fima Hydrologics Inc. kommerziell vertriebene Flussgebietsmanagement- und Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS (HYDROLOGICS INC. 2009) wird zur Simulation des Talsperrenbetriebs auf monatlicher Schrittweite verwendet. Das Modell basiert auf einem gemischt-ganzzahligen linearen Programmierungs-Algorithmus (MILP). Das Gleichungssystem, welches das Talsperrensystem repräsentiert und zur Simulation des Talsperrenbetriebs für jeden Zeitschritt mittels des MILP gelöst wird, kann in OASIS über ein User Interface, oder durch die OASIS eigene Programmierungssprache OCL einfach aufgebaut werden. Durch den Einsatz von OCL ist das Modell sehr flexibel, so dass nahezu beliebig komplexe Talsperrensysteme mit OASIS aufgebaut und simuliert werden können. Durch die Verwendung des MILP kann im Allgemeinen von einer Optimierung des Talsperrenbetriebs für den kurzfristigen Bewirtschaftungszeitraum gesprochen werden. Auf dieser baut dann die Optimierung der mittel- und langfristigen Optimierung der Bewirtschaftung durch den MO-CMA-ES auf.

2.3.8 **Initialisierung (h)**

Durch zuvor bereits abgeschlossene MKO stehen oft vielfältige Lösungen zur Verfügung die als Initialisierung eines neuen MKO Laufes dienen können. Durch die Initialisierung des MO-CMA-ES mit zuvor erlangten Lösungen kann Rechenzeit eingespart werden. Der Algorithmus beginnt bereits aus einer relativ guten Startposition mit der Optimierung, was eine geringere Anzahl an Iterationen und eine schnellere Konvergenz bedeuten kann.

Zur Auswahl der Lösungen die als Initialisierung der ersten Individuen dienen, wird wiederum auf die Clusterung der Pareto-Front mit SOM zurückgegriffen. Generell werden hier zwei unterschiedliche Vorgehensweisen angewandt. (1) Es werden genau so viele Cluster gesucht, wie die Startpopulation Individuen aufweist. Für jedes Cluster kann dann die repräsentative Lösung ermittelt werden. Diese Vorgehensweise deckt sich mit der Bestimmung von Lösungen für die Validierung. (2) Es werden mit dem SOM vier bis zehn Cluster ermittelt. Die zu ermittelnden Lösungen werden zu gleicher Anzahl aus allen Clustern zufällig gezogen.

3. Mathematische Beschreibung und Modellaufbau

3.1 Zielfunktionen

Wie in 2.3.4 a) beschrieben, kann der Entscheidungsraum durch Randbedingungen beschnitten werden. Durch den Einsatz von Straffunktionen ist dies ebenso für den Zielfunktionsraum möglich. Der Zielfunktionsraum kann somit für die Optimierung eingegrenzt werden. Dies kann bei der MKO erhebliche Einsparungen bei der Rechenzeit bedeuten, da der Optimierungsalgorithmus die Pareto-Front nicht in Bereiche „ausweitet“ die für die Ergebnisse nicht von Belang sind.

3.1.1 Formulierung der Zielfunktionen bei drei BSS

Zielfunktion FF1: Zielfunktion FF1, Gleichung (2), maximiert die Versorgungssicherheit der Trinkwasserversorgung durch die Talsperre Klingenberg. Da, wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, insgesamt drei Bereitstellungsstufen mit jeweils eigenen Abgabern und geforderten Versorgungssicherheiten existieren, muss ein Ansatz gefunden werden der diese simultan berücksichtigt. Die einzelnen erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ werden daher durch die Hilfsfunktionen f_{F1} , f_{F2} und f_{F3} beschrieben, Gleichungen (3) bis (5). Die Hilfsfunktionen, zusammen mit der Straffunktion f_P , Gleichung (8), unterteilen den Zielfunktionsraum \mathbb{R}^M in einen gültigen Zielfunktionsraum $\mathbb{S}^M \subset \mathbb{R}^M$ und einen ungültigen Zielfunktionsraum. Die Unterteilung des Zielfunktionsraums erfolgt durch die Schwellenwerte der in der MKO geforderten, minimalen Versorgungssicherheiten λ_1 , λ_2 und λ_3 . Die Schwellenwerte müssen für die jeweilige MKO angepasst werden und sollten sich an der zu erwartenden Talsperrensystem-Performance hinsichtlich des aktuellen Szenarios orientieren.

$$\min(FF1) = \min(f_{F1} + f_{F2} + f_{F3} + f_P) \quad (2)$$

$$f_{F1} = \begin{cases} -1 \times \left(\frac{P(BSS1) - \lambda_1}{1 - \lambda_1} \right) & \text{wenn } P(BSS1) \geq \lambda_1 \\ 1 - \frac{P(BSS1)}{\lambda_1} & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{F2} = \begin{cases} -1 \times \left(\frac{P(BSS2) - \lambda_2}{1 - \lambda_2} \right) & \text{wenn } P(BSS2) \geq \lambda_2 \\ 1 - \frac{P(BSS2)}{\lambda_2} & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{F3} = \begin{cases} -1 \times \left(\frac{P(BSS3) - \lambda_3}{1 - \lambda_3} \right) & \text{wenn } P(BSS3) \geq \lambda_3 \\ 1 - \frac{P(BSS3)}{\lambda_3} & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (5)$$

Weiter sollte beachtet werden, dass die Schwellenwerte λ einen deutlichen Einfluss auf die Überführung der Variablen in den Zielfunktionsraum besitzen, da neben der Definition des gültigen Zielfunktionsraumes eine Gewichtung der einzelnen Versorgungssicherheiten durch die Normierung in den Hilfsfunktionen stattfindet.

Zielfunktion FF2: In einer Absprache mit dem Talsperrenbetreiber LTV wird die Zielfunktion FF2 definiert. FF2 maximiert die Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre Klingenberg im Monat April, $P(S^{KL} = V^{KL,bew})$. Eine volle Talsperre Klingenberg nach der Schneeschmelze ist Grundlage für eine, für gute Wasserqualität notwendige, Ausbildung des Hypolimnions. FF2, Gleichung (6), ist somit eine Indikator-Variable für die Wasserqualität.

$$\min(FF2) = \min(-1 \times [P(S^{KL} = V^{KL,bew}) + f_P]) \quad (6)$$

Hierbei ist S^{KL} das erreichte Stauvolumen in der Talsperre Klingenberg und $V^{KL,bew}$ das maximale Stauvolumen bei maximaler Stauhöhe innerhalb der Bewirtschaftungszone.

Zielfunktion FF3: Zielfunktion FF3, Gleichung (7), minimiert die Überleitungsmenge Q_t^{div} als mittlere monatliche Überleitungsmenge mit der die Talsperre Rauschenbach das Talsperrensystem Klingenberg-Lehnmühle stützt. Da übergeleitetes Wasser ab der Talsperre Lichtenberg mittels der Pumpstation Lichtenberg gepumpt werden muss, werden mit einer möglichst geringen Überleitungsmenge Kosten gespart.

$$\min(FF3) = \min\left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_t^{div} + f_P\right) \quad (7)$$

Strafffunktion f_P : Existiert mindestens eine erreichte Versorgungssicherheit $P(BSS)$ der drei Bereitstellungsstufen BSS die geringer ist als die in der MKO geforderten Schwellenwert-Sicherheiten λ , führt die Strafffunktion f_P zu einem Aufschlag von 1.000.000 auf alle erreichten Zielfunktionswerte (Gleichung (8)).

$$f_P = \begin{cases} 1E06 & \text{wenn } \exists(p_1 < \lambda_1 \wedge p_2 < \lambda_2 \wedge p_3 < \lambda_3) \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (8)$$

Ist dies der Fall kann die Lösung durch den Aufschlag der Strafffunktion nicht mehr dominierend sein, wenn andere Lösungen ohne Aufschlag durch die Strafffunktion existieren. Somit kann der gültige Zielfunktionsraum eingeschränkt werden. Lösungen mit zu geringen erreichten Versorgungssicherheiten werden so, wenn Lösungen mit gültigen erreichten Versorgungssicherheiten existieren, verworfen. Die Suche nach optimalen Lösungen kann somit auf einen, für den Entscheidungsträger, wichtigsten Bereich eingegrenzt werden. Dies ermöglicht eine kleinere Populationsgröße und somit eine verminderte Anzahl an Modellevaluationen. Dies spart Rechenzeit ein.

3.1.2 Szenario: Formulierung der Zielfunktionen bei vier BSS

Für die MKO unter rezenten klimatischen Randbedingungen wird als Sonderfall ein Szenario mit einer zusätzlichen Bereitstellungsstufe gerechnet. Die Abgaberate in der zusätzlichen Bereitstellungsstufe BSS4 beträgt für Q_{del}^{BSS4} $1,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Da diese nur in Sonderfällen abgegeben wird, soll die geforderte Versorgungssicherheit 50 % betragen. Die Formulierung der MKO ist der für die drei BSS äquivalent. Für die Zielfunktion FF1 und die Strafffunktion f_P ergeben sich jedoch folgende Unterschiede:

$$\min(FF1) = \min(f_{F1} + f_{F2} + f_{F3} + f_{F4} + f_P) \quad (9)$$

$$f_{F4} = \begin{cases} -1 \times \left(\frac{P(BSS4) - \lambda_4}{1 - \lambda_4}\right) & \text{wenn } P(BSS4) \geq \lambda_4 \\ 1 - \frac{P(BSS4)}{\lambda_4} & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_P = \begin{cases} 1E06 & \text{wenn } \exists(p_1 < \lambda_1 \wedge p_2 < \lambda_2 \wedge p_3 < \lambda_3 \wedge p_4 < \lambda_4) \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (11)$$

3.1.3 Szenario: Formulierung der Zielfunktionen ohne Überleitung

Für die Optimierung des Talsperrensystems ohne die Stützung des Betriebes der Talsperren Klingenberg und Lehnmühle mit der Talsperre Rauschenbach entfällt die Zielfunktion FF3. Die Zielfunktionen FF1 und FF2 (Gleichungen (2) und (6)) bleiben unverändert.

3.2 Entscheidungsvariablen der multi-kriteriellen Optimierung

In allen MKO sind $Z_i^{buf,KL}$, $Z_i^{bew,KL}$, $Z_i^{buf,LM}$, $Z_i^{bew,LM}$, q_{min}^* und q_{max}^* jeweils als obere und untere Randbedingungen vorgegeben.

3.2.1 Entscheidungsvariablen bei drei BSS

Nach Gleichung (12) setzen sich die Entscheidungsvariablen der MKO aus vier Staulamellen zusammen. Jede Staulamelle steuert den Talsperrenbetrieb durch monatlich konstante Angaben von Stauvolumen. Nach Abschnitt 2.2 wird mittels $Z_i^{KL,1}$ und $Z_i^{KL,2}$ die Abgabe von Trinkwasser aus der Talsperre Klingenberg gesteuert, mittels $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ die Überleitungsmengen aus der Talsperre Rauschenbach.

$$(Z_i^{KL,1}, Z^{KL,2}, Z^{Div,1}, Z^{Div,2})_{i=1, \dots, S} = \arg\{\min(FF1), \min(FF2), \min(FF3)\} \quad (12)$$

Die Optimierung der vier Staulamellen mündet in einer MKO mit 48 Entscheidungsvariablen. Die Entscheidungsvariablen unterstehen dabei den Randbedingungen der Gleichungen des Gleichungssatzes (13.1) bis (13.2). Die Durchflüsse Q_t^* im Modell sind durch Mindest- und Maximaldurchflussbedingungen, Gleichung (13.3), begrenzt. Für alle Gleichungen der Gleichungssätze (13.1), (14) und (15) gilt $i = 1, \dots, I$ und $t = 1, \dots, T$.

$$Z_i^{buf,KL} + Z_i^{buf,LM} \leq Z_i^{KL,2} \leq Z_i^{KL,1} \leq Z_i^{bew,KL} + Z_i^{bew,LM} \quad (13.1)$$

$$0 \leq Z_i^{div,1} \leq Z_i^{div,2} \leq Z_i^{bew,KL} + Z_i^{bew,LM} \quad (13.1)$$

$$q_{min}^* \leq Q_t^* \leq q_{max}^* \quad (13.1)$$

Zusätzlich gelten für die Abgaben von Trinkwasser und die Überleitung gelten die Randbedingungen nach den Gleichungen (14) und (15).

$$Q_t^{del} = \begin{cases} Q_{del}^{BSS3} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} \geq Z_i^{KL,1} \\ Q_{del}^{BSS2} & \text{wenn } Z_i^{KL,1} \geq S_t^{KL+LM} \geq Z_i^{KL,2} \\ Q_{del}^{BSS1} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < Z^{KL,2} \wedge Q_t^{in} - Q_t^{ab} + S_t^v \geq Q^{BSS1} \\ \max(Q_t^{in} - Q_t^{ab}, 0) & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < Z^{KL,2} \wedge Q_t^{in} - Q_t^{ab} + S_t^v < Q^{BSS1} \end{cases} \quad (14)$$

$$Q_t^{div} = \begin{cases} Q_{div}^{BSS3} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} \geq Z_i^{Div,1} \\ Q_{div}^{BSS2} & \text{wenn } Z_i^{Div,2} \geq S_t^{KL+LM} \geq Z_i^{Div,1} \\ Q_{div}^{BSS1} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < Z^{Div,2} \end{cases} \quad (15)$$

Hierbei ergeben sich Q_t^{div} , Q_t^{del} , S_t^{KL} , S_t^{LM} und Q_t^* nach Gleichung (17) aus dem Simulationslauf des Talsperrenbewirtschaftungsmodells OASIS,

$$(Q_t^{div}, Q_t^{del}, S_t^{KL}, S_t^{LM}, Q_t^*) = \text{OASIS}(Z_i^{KL,1}, Z_i^{KL,2}, Z_i^{Div,1}, Z_i^{Div,2}) \quad (16)$$

Und weiterhin ist, jeweils zum Zeitpunkt t , Q_t^{in} ist die Summe der Zuflüsse die zur Bedarfsdeckung genutzt werden kann, Q_t^{ab} die Summe aller Abgaben mit einer höheren Priorität als die Brauchwasserabgabe (z.B. ökologische Mindestdurchflüsse) und S_t^v das Speichervolumen das zur Bedarfsdeckung genutzt werden kann.

3.2.2 Szenario: Entscheidungsvariablen bei vier BSS

Nach Abschnitt 2.2 wird mittels $Z_i^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ auch in diesem Szenario weiterhin die Abgabe von Trinkwasser aus der Talsperre Klingenberg gesteuert. Die Staulamelle $Z_i^{KL,0}$ unterteilt den virtuellen Gesamtbewirtschaftungsraum S^{KL+LM} in eine weitere Zone BSS4 oberhalb der BSS3 und ist ebenfalls Gegenstand der Optimierung (Gleichung (17)). $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ geben weiterhin unverändert die Überleitungsmengen aus der Talsperre Rauschenbach vor.

$$(Z_i^{KL,0}, Z^{KL,1}, Z^{KL,2}, Z^{Div,1}, Z^{Div,2})_{i=1, \dots, S} = \arg\{\min(FF1), \min(FF2), \min(FF3)\} \quad (17)$$

Die Optimierung der fünf Staulamellen erhöht die Anzahl der Entscheidungsvariablen auf 60. Die Entscheidungsvariablen unterstehen dabei den Randbedingungen der Gleichungen des Gleichungssatzes (18.1) bis (18.1). Die Durchflüsse Q_t^* im Modell sind durch Mindest- und Maximaldurchfluss-

bedingungen, Gleichung (18.1), begrenzt. Für alle Gleichungen der Gleichungssätze (18.1), (19) und (20) gilt, dass $i = 1, \dots, I$ und $t = 1, \dots, T$.

$$z_i^{buf,KL} + z_i^{buf,LM} \leq z_i^{KL,2} \leq z_i^{KL,1} \leq z_i^{KL,0} \leq z_i^{bew,KL} + z_i^{bew,LM} \quad (18.1)$$

$$0 \leq z_i^{div,1} \leq z_i^{div,2} \leq z_i^{bew,KL} + z_i^{bew,LM} \quad (18.1)$$

$$q_{min}^* \leq Q_t^* \leq q_{max}^* \quad (18.1)$$

Zusätzlich gelten für die Abgaben von Trinkwasser und die Überleitung die Randbedingungen nach den Gleichungen (19) und (20).

$$Q_t^{del} = \begin{cases} Q_{del}^{BSS4} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} \geq z_i^{KL,0} \\ Q_{del}^{BSS3} & \text{wenn } z_i^{KL,0} \geq S_t^{KL+LM} \geq z_i^{KL,1} \\ Q_{del}^{BSS2} & \text{wenn } z_i^{KL,1} \geq S_t^{KL+LM} \geq z_i^{KL,2} \\ Q_{del}^{BSS1} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < z_i^{KL,2} \wedge Q_t^{in} - Q_t^{ab} + S_t^v \geq Q^{BSS1} \\ \max(Q_t^{in} - Q_t^{ab}, 0) & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < z_i^{KL,2}, \wedge Q_t^{in} - Q_t^{ab} + S_t^v < Q^{BSS1} \end{cases} \quad (19)$$

$$Q_t^{div} = \begin{cases} Q_{Div}^{BSS3} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} \geq z_i^{Div,1} \\ Q_{Div}^{BSS2} & \text{wenn } z_i^{Div,2} \geq S_t^{KL+LM} \geq z_i^{Div,1} \\ Q_{Div}^{BSS1} & \text{wenn } S_t^{KL+LM} < z_i^{Div,2} \end{cases} \quad (20)$$

Hierbei ergeben sich wiederum Q_t^{div} , Q_t^{del} , S_t^{KL} , S_t^{LM} und Q_t^* nach Gleichung (17) aus dem Simulationslauf des Talsperrenbewirtschaftungsmodells OASIS

$$(Q_t^{div}, Q_t^{del}, S_t^{KL}, S_t^{LM}, Q_t^*) = \text{OASIS}(z_i^{KL,0}, z_i^{KL,1}, z_i^{KL,2}, z_i^{Div,1}, z_i^{Div,2}) \quad (21)$$

3.2.3 Szenario: Entscheidungsvariablen bei einer MKO ohne Überleitung

Für die Szenariorechnungen ohne Überleitung von Brauchwasser aus der Talsperre Rauschenbach gelten weiterhin die Gleichungen (12), (13.1), (14) und (17) während Gleichung (15) ihre Gültigkeit verliert.

3.3 Randbedingungen

Alle weiteren Randbedingungen die die Verteilung des Wassers im Fließnetz und somit die Simulation der Talsperrenbewirtschaftung betreffen werden von OASIS beachtet. Dazu zählen unter anderem die Einhaltung von minimalen und maximalen Durchflüssen, minimaler und maximaler Stauvolumen, sowie die Einhaltung der Massenbilanz.

3.4 Rule-Curve Stacking

Die Randbedingungen, die die korrekte Ordnung der Staulamellen innerhalb S^{KL+LM} sicherstellen (Gleichungen (13.1) bzw. (18.1)), sind mit normalen Methoden nur schwer durch den Optimierungsalgorithmus zu „erlernen“. Eine Verletzung dieser Randbedingungen hat eine ungültige Lösung zur Folge. Die Lösung muss verworfen werden und steht für den „Lernprozess“ nicht weiter zur Verfügung. Mit einer geeigneten Kodierung der Entscheidungsvariablen im normierten Entscheidungsraum des Optimierungsalgorithmus kann die Verletzung dieser Randbedingungen gänzlich unterbunden werden. Hierzu soll das Verfahren des Rule-Curve Stacking eingeführt werden.

Nach Abbildung 5 operiert die MO-CMA-ES bezüglich der Entscheidungsvariablen in einem normierten Raum, $x_i \in [0, \dots, 1]$ mit $i = 1, \dots, N$. Anhand dieser Grundlage kann folgende Methodik abgeleitet werden, um einen Bezug zwischen den Entscheidungsvariablen herzustellen. Hierbei werden aus den Entscheidungsvariablen x_i nicht wie üblich über die Rücktransformation

$$Z_i = \frac{(x_i - z_i^{min})}{(z_i^{max} - z_i^{min})}, \quad i = 1, \dots, N \quad (22)$$

direkt die Staulamellen errechnet. Stattdessen wird x_i als ein Anteil angesehen, der den Anteil der Staulamelle Z_i an einem Stauraum beschreibt, in dem sich die Staulamelle befindet. z_i^{min} ist dabei die untere Randbedingung für die jeweilige Staulamelle und z_i^{max} ist die zugehörige obere Randbedingung.

Im Folgenden sei dies ohne Einschränkung der allgemeinen Anwendbarkeit für das Talsperrensystem KL-LM-RB für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen beschrieben. Es seien x_i mit $i = 1, \dots, 12$ die normierten Entscheidungsvariablen der monatlichen Werte der Staulamelle $Z_i^{KL,1}$ und x_i mit $i = 13, \dots, 24$ die normierten Entscheidungsvariablen der monatlichen Werte der Staulamelle $Z_i^{KL,2}$. Für die Überleitungsregeln gelte, dass $Z_i^{Div,1}$ durch x_i mit $i = 25, \dots, 36$ und $Z_i^{Div,2}$ durch x_i mit $i = 37, \dots, 48$ gegeben sei. Die Staulamellen $Z_i^{KL,1}$ und $Z_i^{KL,2}$ unterliegen der Randbedingung (13.1).

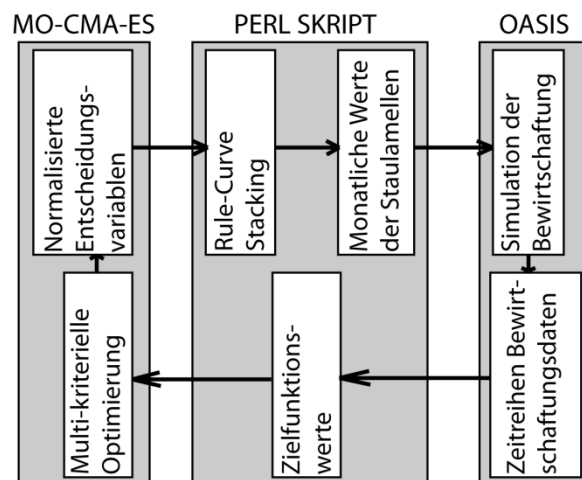


Abbildung 5: Schema der Kopplung des MKO Algorithmus MO-CMA-ES mit dem Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS über ein PERL Skript.

Zunächst wird $Z_i^{KL,1}$ über Gleichung (23)

$$Z_i^{KL,1} = x_i \times (z_i^{bew,KL} + z_i^{bew,LM} - z_i^{buf,KL} - z_i^{buf,LM}), \quad i = 1, \dots, 12 \quad (23)$$

bestimmt, dann kann $Z_i^{KL,2}$ durch Gleichung (24) als Anteil des Stauraumes berechnet werden, der durch $Z_i^{KL,1}$ gegeben ist

$$Z_{i-12}^{KL,2} = x_i \times Z_{i-12}^{KL,1}, \quad i = 13, \dots, 24 \quad (24)$$

Im letzten Schritt werden alle Staulamellen mit dem zuvor vorbehaltenen Reserveraum aufaddiert, $Z_i^{KL,1} = Z_i^{KL,1} + z_i^{buf,KL} + z_i^{buf,LM}$, $i = 1, \dots, 12$ und $Z_i^{KL,2} = Z_i^{KL,2} + z_i^{buf,KL} + z_i^{buf,LM}$, $i = 13, \dots, 24$. Analog hierzu werden $Z_i^{Div,1}$ und $Z_i^{Div,2}$ berechnet, die der Randbedingung (18.1) unterliegen. Es ist $Z_i^{Div,1}$ nach Gleichung (25)

$$Z_{i-24}^{Div,1} = x_i \times (z_{i-24}^{bew,KL} + z_{i-24}^{bew,LM}), \quad i = 25, \dots, 36 \quad (25)$$

und $Z_i^{Div,2}$ nach Gleichung (26)

$$Z_{i-36}^{Div,1} = x_i \times Z_{i-12}^{div,1}, \quad i = 37, \dots, 48 \quad (26)$$

Nicht geklärt ist in diesem Zusammenhang ob andere Optimierungsalgorithmen mit dieser Art der Kodierung der Entscheidungsvariablen ebenso erfolgreich sind wie die MO-CMA-ES. Bei zehn Testläufen des MO-CMA-ES mit Rule-Curve Stacking zeigten sich für die MO-CMA-ES jedoch im Schnitt

bessere Ergebnisse als mit dem gebräuchlichen Verfahren der direkten Rücktransformation (Gleichung (22)).

3.5 Aufbau des Talsperrensystems in OASIS

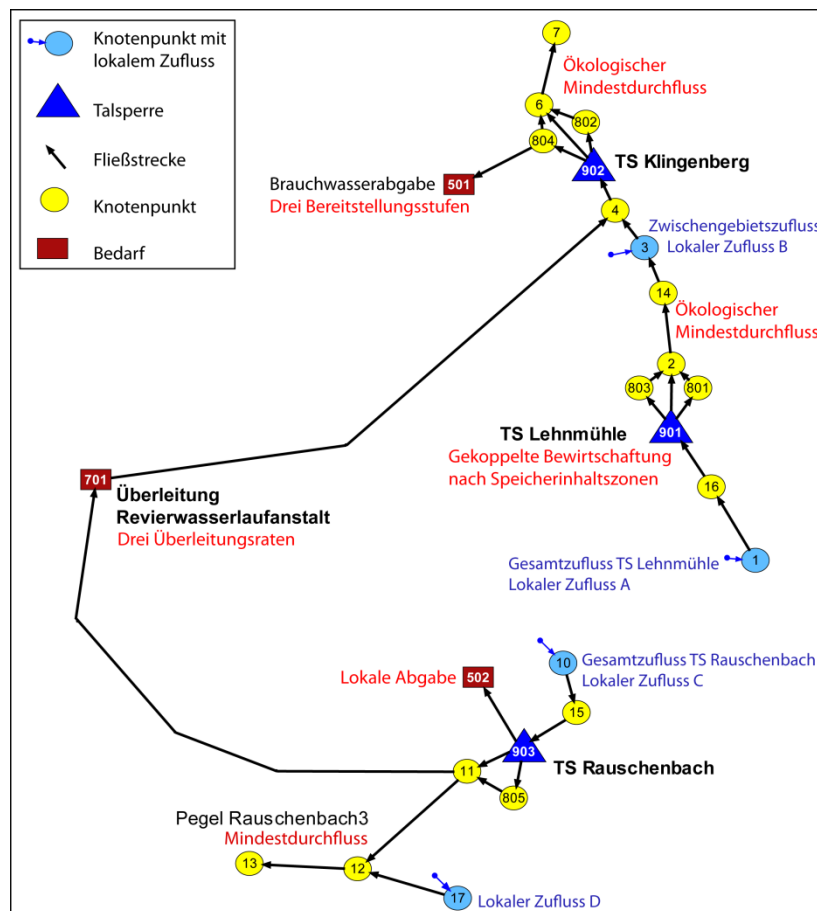


Abbildung 6: Aufbau des Fließnetzes des Talsperrensystems KL-LM-RB im Talsperrenbewirtschaftungsmodell OASIS mit Angabe der implementierten Bewirtschaftungsregeln.

3.5.1 Implementierte Regeln des Talsperrenbetriebs

Im Folgenden sollen Stichpunktartig die wichtigsten, bei der Simulation des Talsperrenbetriebs berücksichtigten Bewirtschaftungsregeln aufgezählt werden.

Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Fließnetzes des Talsperrensystems in OASIS und illustriert die Anwendung der Bewirtschaftungsregeln.

- Die ökologischen Mindestabgaben der Talsperren Klingenberg und Lehmühle, die Abgabe der Talsperre Rauschenbach über die Revierwasserlaufanstalt, sowie die Mindestwasserführung am Pegel Rauschenbach3 besitzen höhere Prioritäten als die Trinkwasserabgabe der Talsperre Klingenberg. Diese Anforderungen werden, wenn möglich, zuerst befriedigt.
- Die Verbundsteuerung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle geschieht durch ein eigenes Regelwerk. Diese Regeln werden in der Simulation des Talsperrenbetriebs mit OASIS strikt befolgt.
- Die maximalen Abgaben an den Unterstrom zum Hochwasserschutz werden wenn möglich eingehalten. Ebenso wird der Hochwasserschutzraum frei gehalten, und im Falle eines Einstaus schnellstmöglich wieder geleert. Die funktionale Beziehung zwischen Abgabe aus den Grundabläßen und den Hochwasserentlassungsanlagen sind ebenfalls implementiert. All Regeln dieses Punktes sind jedoch für die Simulation auf monatlicher Zeitskala nicht relevant. Das Modell kann den Talsperrenbetrieb im Bedarfsfall somit auch auf täglicher Zeitskala simulieren.

- Die Bereitstellung von Trinkwasser durch die Talsperre Klingenberg in den drei Bereitstellungsstufen ist implementiert. Die Abgabe erfolgt strikt nach den Bereitstellungsstufen.
- Die Stützung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle durch die Talsperre Rauschenbach durch die Überleitung „Revierwasserlaufanstalt“ ist implementiert. Diese operiert in drei Überleitungsstufen.

Um Ergebnisse möglichst nahe an den Simulationen der LTV zu garantieren, werden die zu optimierenden Bereitstellungsstufen und Überleitungsstufen (gegeben durch die Staulamellen) unter der Annahme der genauen Kenntnis der Zuflüsse für den aktuellen Monat optimiert. Dies bedeutet konkret, dass eine entsprechende Überleitungsmenge realisiert wird, wenn am Ende des aktuellen Zeitschrittes der Füllstand S^{KL+LM} in die entsprechende Überleitungszone fällt. Hieraus leitet sich der folgende in OASIS in OCL zusätzlich implementierte Simulationsalgorithmus ab:

Code 1: Zusätzliche in OCL implementierte Iterationsebene in OASIS

```
OASIS SOLVER: Zeitschritt t
    ITERATION: (Konvergenz:  $S^{KL+LM}(t+1)=f(Q^{div}(t))$ )
        OASIS SOLVER:  $Q^{div}(t)=f(S^{KL+LM}(t+1),I(t))$ ,  $Q^{del}(t)=f(S^{KL+LM}(t+1),I(t))$ 
    ENDE
ENDE
```

Hierbei ist $S^{KL+LM}(t+1)$ der virtuelle Gesamttalsperreninhalt am Ende eines Zeitschrittes t und $I(t)$ steht für alle weiteren relevanten Systemzustände (u.a. die aktuellen Zuflüsse $Q(t)$, die Talsperreninhalte $S(t)$ und $S^{KL+LM}(t)$ zum Beginn des Zeitschrittes) zum Zeitpunkt t .

3.5.2 Validierung des Modellaufbaus

Die Validierung des Modellaufbaus des Talsperrensystems KL-LM-RB in OASIS wird anhand der von der LTV aktuell angewandten Bewirtschaftungsregeln in Form der Staulamellen für die Bereitstellung von Trinkwasser als auch der Überleitung überprüft. Die Bewirtschaftungsregeln der LTV genügen den geforderten Versorgungssicherheiten. Diese Bewirtschaftungsregeln sollten also auch hier zu ähnlichen Ergebnissen führen. Eine Validierung anhand von beobachteten Talsperreninhalten und Abgaben ist nicht möglich, da sich die Bewirtschaftungsregeln in den letzten Jahren oft veränderten und somit keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung steht.

Als Datengrundlage dienen Zuflusszeitreihen die aus den, von der LTV genutzten 10.000 jährigen Gesamtzuflusszeitreihen des Talsperrensystems Klingenberg und Lehmühle, sowie der Talsperre Rauschenbach abgeleitet wurden. Der Zwischengebietszufluss zwischen den Talsperren Klingenberg und Lehmühle, als auch der Durchfluss am Pegel Rauschenbach3 mittels einer multiplen linearen Regression abgeleitet. Die ermittelten erreichten Versorgungssicherheiten sollten demnach den geforderten Versorgungssicherheiten (Tabelle 2) gleichen.

Die ermittelten Versorgungssicherheiten sind mit 98,6 % für die BSS3, 99,5 % für die BSS2 und 100 % für die BSS1 sehr nahe bei den geforderten Versorgungssicherheiten. Die hier ermittelte geringere Versorgungssicherheit für die BSS3 kann sich durch kleine Abweichungen in der Arbeitsweise des Modells, dem Aufbau des Modells, sowie durch mögliche Abweichungen in den Zeitreihen ergeben. Im Mittel werden dabei $0,078 \text{ hm}^3$ je Monat übergeleitet. Die Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre Klingenberg im April beläuft sich auf 77,7 %. Demnach kann eine praxisnahe Implementierung des Talsperrensystems KL-LM-RB in OASIS als erfolgreich angesehen werden.

4. Ergebnisse

4.1 Monte-Carlo Rekombinationsmethodik

Tabelle 5 gibt die zur Rekombination der Zeitreihen verwendeten Parameter an. Diese sind die Anzahl der zufällig gezogenen Trockenperioden n_D , als auch der untere Schwellenwert P_T . Weiterhin gezeigt werden die, gegenüber den geforderten Pearson'schen Korrelationskoeffizienten ρ_{gef} , erreichten Pearson'schen Korrelationskoeffizienten ρ_{rek} . Die verwendeten ρ_{gef} orientieren sich an empirischen Werten, die durch Versuche an den entsprechenden Zeitreihen ermittelt werden. P_T orientiert sich an der jeweiligen Form der ECDF.

Tabelle 5: Parameter und Ergebnisse zur Monte-Carlo Rekombination der 10000 jährigen Zeitreihen für die Zeitreihen unterschiedlicher Szenarien. CO₂ gibt die jeweiligen Emissionsszenarien an.

Szenario		neue Länge	P_T	ρ_{gef}	ρ_{rek}	n_D	
Datenbasis	Zeitraum	CO ₂	(Jahre)	(%)	(-)	(-)	
Beobachtet	1921-2007		882	0,4	99,5	99,51	800
LTV Zeitreihe			908	0,4	98,5	98,93	800
WETTREG2010	2021-2050	A1B	1148	0,6	99,0	99,39	250
	2021-2050	A2	933	0,8	99,25	97,5	300
	2021-2050	B1	548	0,9	92,5	93,53	400
	2071-2100	A1B	691	0,7	98,5	98,24	300
	2071-2100	A2	819	0,7	96,0	96,16	400
	2071-2100	B1	878	0,75	95,0	95,4	300

Die Anzahl der zufällig zu ziehenden Defizit-Perioden n_D richtet sich nach den Defizitperioden in den Zeitreihen. Diese muss ausreichend groß sein, um die ECDF angemessen wiedergeben zu können. Auf der anderen Seite ist die Wahl von n_D , in Verbindung mit der vorliegenden Verteilung der Trockenperioden, entscheidend für die Länge der resultierenden Zeitreihe, darf also auch nicht zu hoch angesetzt werden. Nach Tabelle 5 schwanken die verwendeten n_D zwischen 800 und 250. Die sich daraus ergebenden Zeitreihen besitzen eine Länge zwischen 548 und 1148 Jahren.

Die Vergleichbarkeit der durch die Monte-Carlo Rekombinationsmethodik erzeugten Zeitreihen mit den ursprünglichen Zeitreihen wird im MKOF durch den Validierungsschritt überprüft (Abschnitt 2.3.5). Mittels einer einfachen linearen Regression der Form $y = \alpha + \beta \times x$ wird der lineare Zusammenhang zwischen den Zielfunktionswerten der MKO (x) und der im Validierungsschritt erneut evaluierten Zielfunktionswerte (y) ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt Auskunft über die Güte des linearen Zusammenhangs zwischen MKO und Validierung.

Nach den Medianen der R^2 , angegeben in Tabelle 6, die sich aus allen Optimierungen ergeben, besteht ein sehr guter linearer Zusammenhang zwischen den Größen der MKO und der Validierung. Im Schnitt ist R^2 größer als 0,984. Im Anhang listen Tabelle A 2 bis Tabelle A 4 die einzelnen Ergebnisse auf. Demnach ergeben sich lediglich zufriedenstellende R^2 für P(BSS1) in den Optimierungen 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen, $R^2 = 0,486$ und bei WETTREG, B1, 2021-2050 mit $R^2 = 0,651$. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung A 9 Streudiagramme zwischen den Größen der MKO und der Validierung am Beispiel WETTREG2010, 2071-2100, B1, dargestellt.

Tabelle 6: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben sind der Median des Bestimmtheitsmaßes R^2 , sowie der Median aus aller Offsets α und Steigungen β der linearen Regressionsmodelle zwischen der MKO und der Validierung.

Größe	Median R^2	Median Offset α	Median Steigung β
P(BSS3)	0,990	4,425	0,963
P(BSS2)	0,984	5,844	0,946
P(BSS1)	0,991	23,369	0,767
P(BSS4)*	0,998	-0,716	1,020
FF1	0,988	-0,177	0,946
FF2	0,986	-4,158	1,060
FF3	0,998	0,001	0,947

* Kein Median (nur eine Beobachtung)

4.2 MKO für rezente klimatische Verhältnisse

4.2.1 Normale Bewirtschaftung (hknn-sma Zeitreihe)

Die MKO dieses Szenarios orientiert sich an der gegenwärtigen Talsperrenbewirtschaftung mit drei Bereitstellungsstufen und aktueller Größe der Bewirtschaftungszone. Als Datengrundlage dienen die im Teilprojekt 3.2.1 stochastisch erweiterten Zuflusszeitreihen mit dem hydrologischen Zuflussregime der Jahre 1921-2007. Die MKO beruht auf zwei einzelnen Optimierungsläufen. Im ersten Lauf sind $\lambda_3 = 0,6$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,98$. Aus dem Pareto-Satz des ersten MKO-Laufes werden dann Initialisierungen für den zweiten MKO-Lauf gezogen. Für den zweiten Lauf gilt $\lambda_3 = 0,9895$, $\lambda_2 = 0,9947$ und $\lambda_1 = 0,99945$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit insgesamt 915 Lösungen von denen 317 Lösungen durch die SOM Clusterung zur Validierung ausgewählt werden. Die in der Validierung erreichten Werte der Zielfunktionen und der Versorgungssicherheiten dienen dann als Grundlage für die Erstellung des Level Diagramms.

Tabelle 7: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (1921-2007) für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($\text{hm}^3 \text{Monat}^{-1}$)
CI-1	99,978	99,926	99,876	2,998	85,387	0,130
CI-2	99,971	99,900	99,732	2,996	82,809	0,085
min(FF3)	99,957	99,730	99,138	2,988	77,439	0,056
max(FF2)	99,995	99,893	99,710	2,996	91,352	0,280

Das Level Diagramm der MKO ist in Abbildung 7 dargestellt. Durch die Clusterung mit der SOM-Methodik ergeben sich zwei Cluster mit ihren repräsentativen Lösungen CI-1 (blau) und CI-2 (rot) deren Separation am deutlichsten an der FF3 ersichtlich ist. CI-1 beinhaltet vor allem Lösungen mit höheren mittleren monatlichen Überleitungsmengen, und somit hohen FF3 Werten. Die relativ hohen Überleitungsmengen ermöglichen hohe FF1 und FF2 Werte, also Lösungen mit hohen Versorgungssicherheiten P(BSS1), P(BSS2) und P(BSS3) und hohen Wahrscheinlichkeiten einer vollen Talsperre im April. Die Lösungen im Cluster CI-2 zeichnen sich demnach eher durch geringere Überleitungsmengen aus. Hieraus ergeben sich ebenso geringere erreichte Versorgungssicherheiten P(BSS) (und somit auch kleinere FF1) und geringere Wahrscheinlichkeiten einer gefüllten Talsperre Klingenberg im April.

Die Werte der P(BSS) sowie der Zielfunktionen der repräsentativen Lösungen sind in Tabelle 7 aufgelistet. Weiterhin sind die Werte der Lösungen mit der geringsten Überleitungsmenge min(FF3), sowie der maximalen Wahrscheinlichkeit einer gefüllten TS Klingenberg im April max(FF2) aufgelistet. Demnach gewährt die Lösung min(FF3) immer noch alle geforderten Versorgungssicherheiten bei einem FF2 Wert von 77,4 %. Für das Standard-Szenario unter rezenten klimatischen Bedingungen ist diese Lösung somit sehr attraktiv, und mit der aktuellen Bewirtschaftung des Talsperrensystems durch den Betreiber vergleichbar. Mit einer relativ hohen Überleitungsmenge von 0,28 hm^3 im Monat kann mit 91,3 % eine volle Talsperre Klingenberg im April garantiert werden.

Die Lösung CI-1 besitzt die niedrigste 1-Norm (Ordinatenwert im Level Diagramm) aller Lösungen im Pareto-Satz und ist daher die am besten ausgewogene Kompromisslösung zwischen allen Zielfunktionen. Bei einer moderaten mittleren monatlichen Überleitungsmenge werden Versorgungssicherheiten weit über den geforderten Mindestsicherheiten erreicht, dies bedeutet gleichzeitig das Maximum für FF1. Der FF2-Wert liegt dabei in etwa in der Mitte des von der Pareto-Front abgedeckten Bereichs bei 84,8 %. Eine etwas höhere 1-Norm besitzt CI-2, da diese etwas geringe FF1 und FF2 Werte zugunsten niedriger mittlerer monatlicher Überleitungsmengen (FF3) in Kauf nimmt.

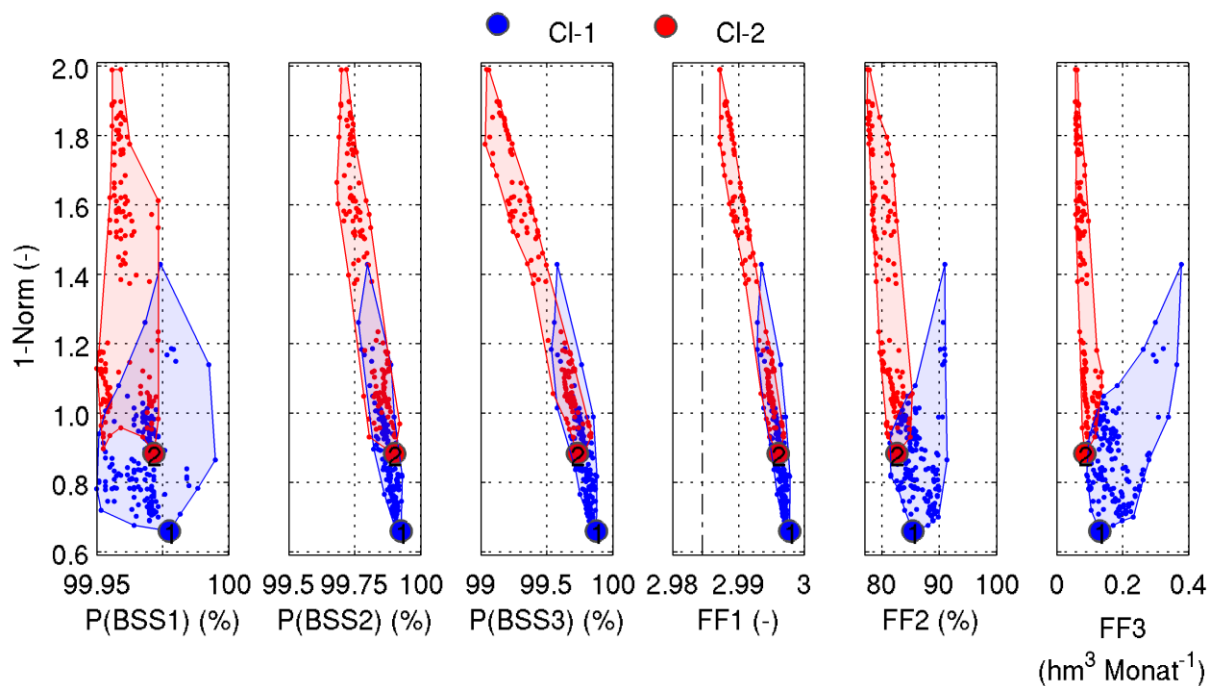


Abbildung 7: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den beiden Clustern CI-1 (blau) und CI-2 (rot).

Für alle aufgelisteten Lösungen sind die zugehörigen Staulamellen in Abbildung 8 und Abbildung 9 wiedergegeben. Alle Staulamellen zeigen, trotz des Verzichts einer Glättfunktion in der Optimierung der Staulamellen, einen akzeptabel glatten monatlichen Verlauf. Die Bereitstellungsstufe BSS2 erstreckt sich in allen Lösungen lediglich über einen sehr geringen Anteil des Stauraums, oder fehlt für manche Monate sogar ganz. Weiterhin ist die Zone DIV2 der Überleitung (mit 0,4 hm³ je Monat) in allen Lösungen im Dezember, sowie in den Monaten Juni und Juli sehr ausgeprägt. Bei Lösung max(FF3) wird schon bei geringen Fehlvolumina im Staukörper übergeleitet, und das dies dann sehr schnell mit der vollen Leistung von 0,6 hm³ je Monat (DIV3).

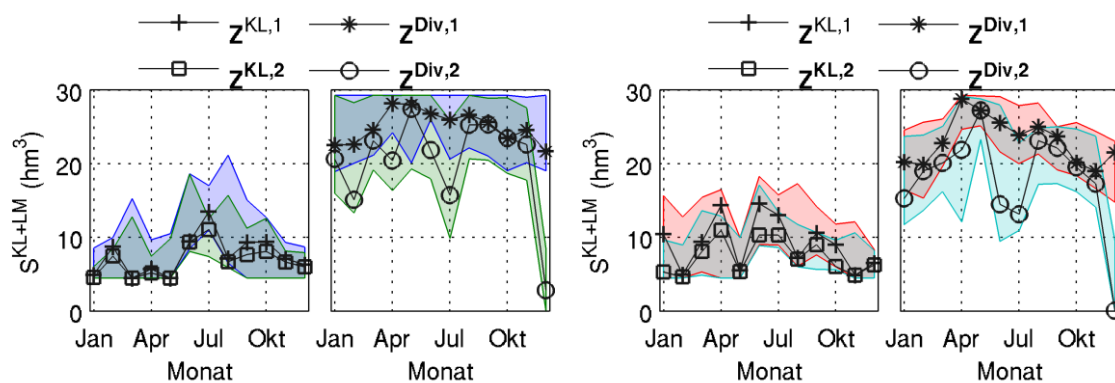


Abbildung 8: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Die Abgabe von Trinkwasser mit $1,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ wird in allen Lösungen trotz fallendem Talsperreninhalt $S^{\text{KL}+\text{LM}}$ sehr lange realisiert. Hier ist das Maximum der Staulamelle $Z^{\text{KL},1}$ bei etwas über 20 hm^3 . Alle Lösungen schlagen eine fast durchgehende maximale Abgabe im Monat Mai, nach dem Maximum des monatlichen Talsperrengesamtzuflusses (Abbildung A 8), vor. Die Abgabe wird in allen Lösungen in den Monaten Juni und Juli durch unterschiedlich ausgeprägte Zonen BSS2 und BSS1 frühzeitiger reduziert. Die Lösungen $\text{max}(\text{FF2})$ und $\text{min}(\text{FF3})$, die Ziele konträr zur Versorgungssicherheit favorisieren, zeigen dabei im Gegensatz zu den repräsentativen Lösungen eher durchgängig größere Zonen der Bereitstellungsstufen BSS2 und BSS1. Das Maximum der Staulamellen für die

Die farbigen Flächen in Abbildung 8 kennzeichnen die Spannweite aller ermittelten Staulamellen innerhalb der jeweiligen Cluster Cl-1 und Cl-2. Da die Flächen eine sehr geringe Spannweite besitzen, folgt, dass alle Lösungen innerhalb eines Clusters sehr ähnliche Werte für die jeweiligen Monate besitzen. Somit ist die generelle Variabilität an Staulamellen eher gering und wird von den repräsentativen Lösungen gut wiedergegeben.

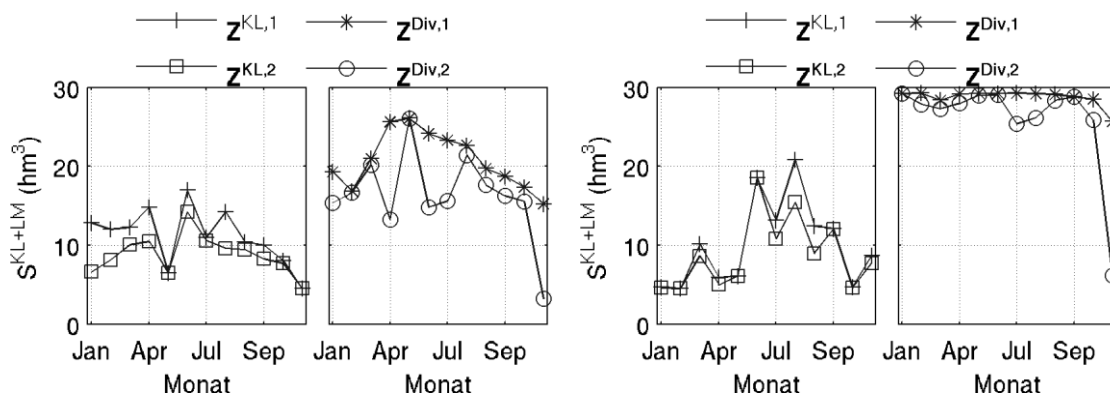


Abbildung 9: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen $\text{min}(\text{FF2})$ (links) und $\text{max}(\text{FF3})$ (rechts).

4.2.2 Normale Bewirtschaftung (Bemessungszeitreihe LTV)

Alle Individuen der Elternpopulation für diesen MKO-Lauf wurden mit den aktuell verwendeten Staulamellen des Talsperrenbetreibers initialisiert, die mit der Addition eines geringen Rauschen verfälscht wurden. Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,986$, $\lambda_2 = 0,9948$ und $\lambda_1 = 0,99945$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 1170 Lösungen von denen 337 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

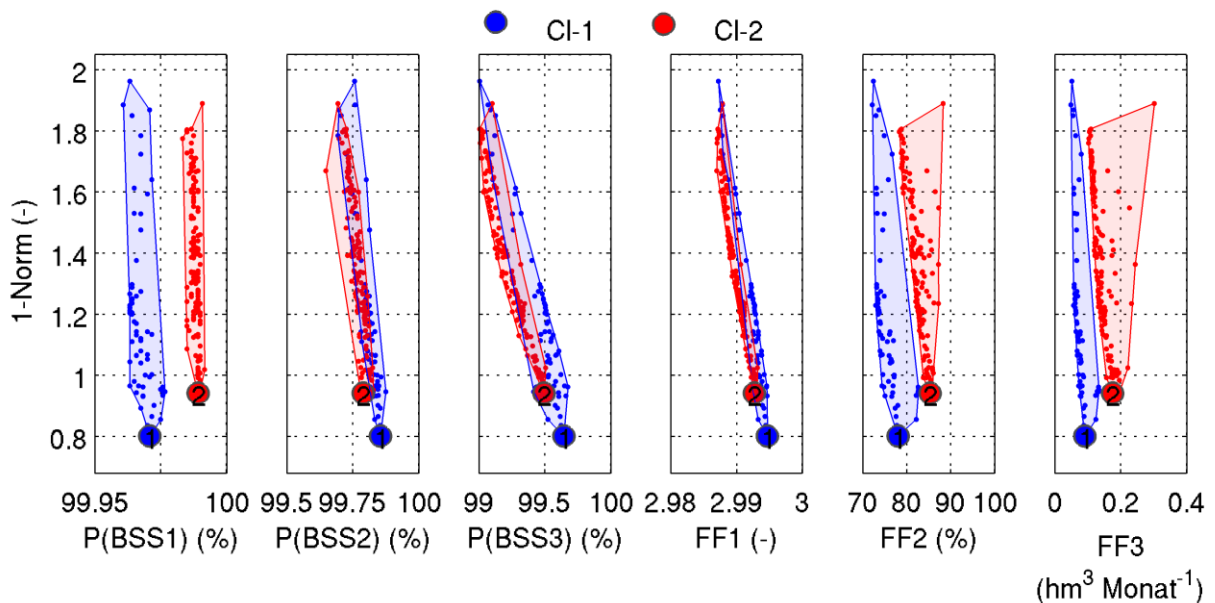


Abbildung 10: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschuttraums mit den beiden Clustern CI-1 (blau) und CI-2 (rot).

Das Level Diagramm der MKO in Abbildung 10 zeigt eine hohe Ähnlichkeit zum Level Diagramm, Abbildung 7, der MKO aus Abschnitt 4.2.1. Wiederum lässt sich die Pareto-Front in zwei Cluster CI-1 und CI-2 unterteilen. Wie auch schon in Abbildung 7 sind diese Cluster für die Zielfunktion FF3 und FF2 gut separiert. Ebenso zeigt sich eine deutliche Trennung der Cluster für die erreichte Versorgungssicherheit P(BSS1).

Tabelle 8: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (Bemessungszeitreihe der LTV) für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm³ Monat⁻¹)
CI-1	99,971	99,855	99,644	2,995	78,052	0,091
CI-2	99,989	99,789	99,493	2,993	85,315	0,175
max(FF2)	99,991	99,694	99,102	2,988	88,313	0,302
min(FF3)	99,961	99,759	99,070	2,988	72,203	0,049

Die repräsentative Lösung CI-1 hat auch in dieser MKO die geringste 1-Norm, liegt jedoch nun im Cluster mit den geringeren mittleren monatlichen Überleitungsmengen FF3. Durch den geringeren FF3 Wert, ergibt sich für CI-1 im Vergleich mit CI-2 eine deutlich geringe P(BSS1), jedoch höhere

Werte für P(BSS2) und P(BSS3) und daher insgesamt ein höherer Wert für FF1. Dies geht jedoch auf Kosten der Zielfunktion FF2, hier sinkt die Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre Klingenberg im Vergleich zu CI-2 von 85,3 % auf 78,0 %. Die Lösung min(FF3) kommt im Vergleich zu Abschnitt 4.2.1 mit einer deutlich geringeren Überleitungsmenge aus.

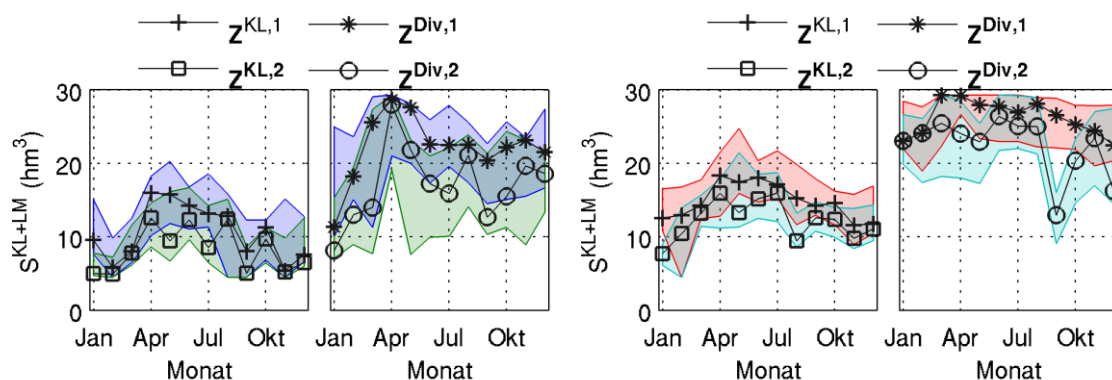


Abbildung 11: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Weiterhin zeigt der Vergleich der Staulamellen aus 4.2.1 gegenüber den Lösungen CI-1, CI-2, max(FF2) und min(FF3) deutliche Unterschiede (Abbildung 11 und Abbildung 12). So kann bei den Staulamellen Z^{KL,1} und Z^{KL,2} der Bereitstellungsstufen kein Minimum im Mai ausgemacht werden. Die sehr ausgeprägte Zone DIV2 im Dezember ist in keinen der Lösungen vorhanden. Das Maximum der Staulamellen für die Überleitung befindet sich weiterhin bei allen Lösungen in den Monaten April bis Mai. Eine Reduktion der Abgabe von 1,00 m³s⁻¹ auf 0,925 m³s⁻¹ und 0,85 m³s⁻¹ wird vor allem in den Monaten April bis Juli, durch eine kleinere Zone BSS3 und größere Zonen BSS2 und BSS1 unter den meisten Lösungen gefordert.

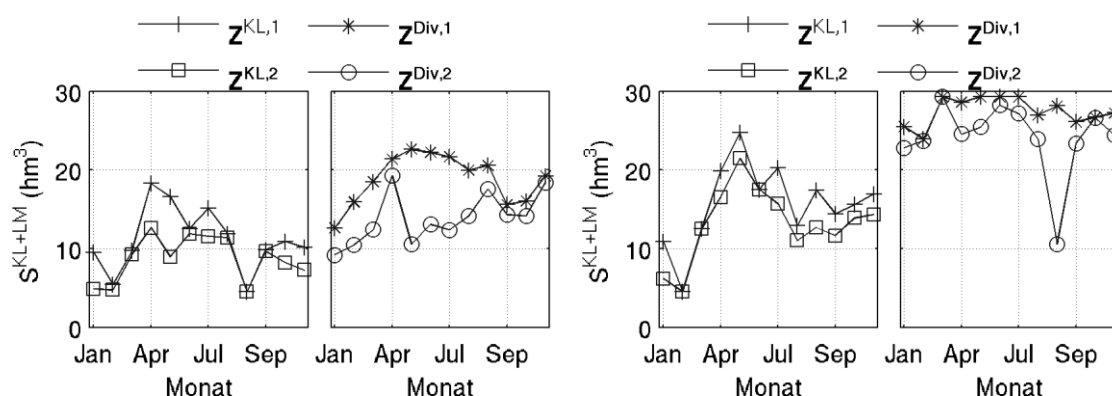


Abbildung 12: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen min(FF2) (links) und max(FF3) (rechts).

4.2.3 **Vier Bereitstellungsstufen unter hknn-sma Zeitreihe**

Alle Individuen der Elternpopulation für diesen MKO-Lauf wurden wiederum zum Start der MKO initialisiert. Die Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ wurden mit den aktuell verwendeten Werten der Staulamellen des Talsperrenbetreibers initialisiert, die mit einem geringen Rauschen verfälscht wurden. Die neu eingeführte Staulamelle $Z^{KL,0}$ wurde mit dem maximal möglichen Wert von 23,79 hm^3 initialisiert. Die Staulamellen zur Steuerung der Überleitung wurden mit den aktuellen Staulamellenwerten, plus eines Aufschlags von 3 hm^3 initialisiert.

Tabelle 9: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen (Bemessungszeitreihe der LTV) für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	P(BSS4) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($hm^3\text{ Monat}^{-1}$)
CI-3	99,962	99,897	99,731	37,317	2,996	85,970	0,153
CI-1	99,966	99,890	99,660	39,640	2,995	88,826	0,226
CI-2	99,966	99,878	99,649	37,609	2,995	86,891	0,173
max(P(BSS4))	99,952	99,890	99,687	41,614	2,995	80,773	0,113
max(FF2)	99,967	99,879	99,673	38,067	2,995	89,496	0,235
min(FF3)	99,956	99,807	99,695	33,433	2,995	81,865	0,094

Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,98$, $\lambda_2 = 0,994$ und $\lambda_1 = 0,9994$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 144048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 579 Lösungen von denen 315 Lösungen durch die SOM Clusterung zur Validierung ausgewählt werden.

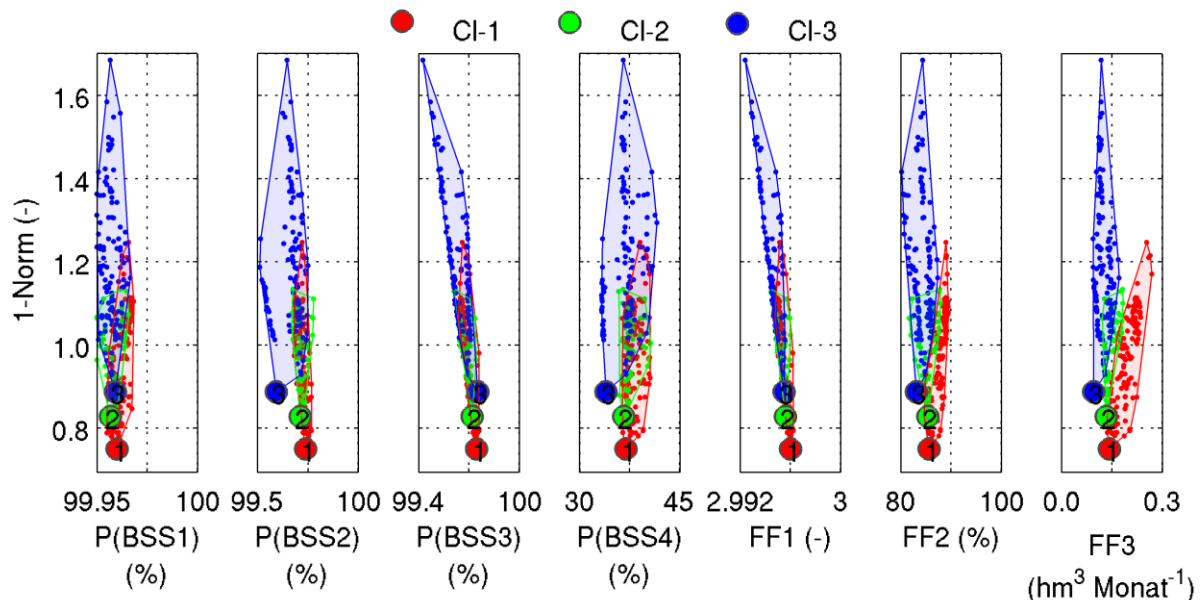


Abbildung 13: Level Diagramm für die MKO 1921-2007 mit vier Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschuttraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün) und CI-3 (blau).

Die Clusterung mittels der SOM-Methodik erzielt für die durchgeführte MKO drei Cluster. Wiederum können die Cluster als drei Abstufungen der mittleren monatlichen Überleitungsmengen (FF3)

angesehen werden. Durch die Hinzunahme der vierten Bereitstellungsstufe ergeben sich nach Abbildung 13 ausschließlich Lösungen mit deutlich höheren ermittelten Versorgungssicherheiten für die drei Standard-Bereitstellungsstufen BSS1 bis BSS3. So ist die minimale $P(BSS3)$ mit 99,4 % immer noch 0,4 % größer als die geforderte Versorgungssicherheit dieser Bereitstellungsstufe. Ebenso ist die minimale mittlere monatliche Überleitungsmenge (FF3) mit $0,094 \text{ hm}^3$ je Monat ($\min(FF3)$; Tabelle 9) gegenüber den $0,056 \text{ hm}^3$ je Monat in der MKO mit drei BSS fast doppelt so hoch - erzielt jedoch durchaus vergleichbare Werte wie Lösung CI-2 in der MKO mit drei BSS (Tabelle 7). Die maximale Versorgungssicherheit unter BSS4 liegt nach Lösung $\max(P(BSS4))$ bei einer durchschnittlichen Überleitungsmenge von $0,113 \text{ hm}^3$ je Monat und einem relativ geringen Wert von FF2 von 80,8 %. Die ausgewogenste Kompromisslösung ist nach Abbildung 13 die Lösung CI-1.

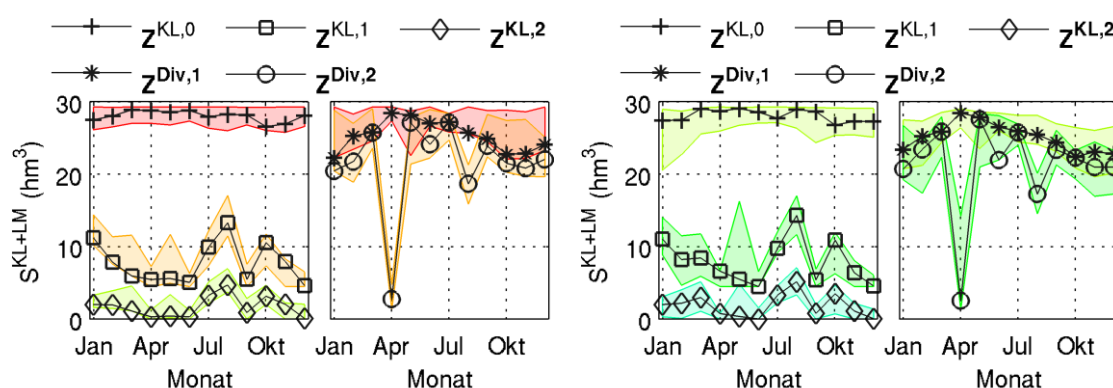


Abbildung 14: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Die Staulamellen der Cluster CI-1 und CI-2, unterscheiden sich nach Abbildung 14 nur geringfügig. Die deutlichsten Unterschiede zwischen den Staulamellen der Cluster sind bei den Staulamellen $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ feststellbar. Die geringe Überleitungsmenge der repräsentativen Lösung CI-2 wird vor allem durch einen größeren Bereich DIV2 im Juni und August realisiert. Im Vergleich hierzu zeigt die repräsentative Lösung CI-3 eine nochmals deutlich vergrößerte Zone DIV2 im August. Generell besitzen alle Lösungen eine extrem ausgeprägte Zone DIV2 im April, die sich fast über den gesamten möglichen kombinierten Stauinhalt der Bewirtschaftungszonen erstreckt.

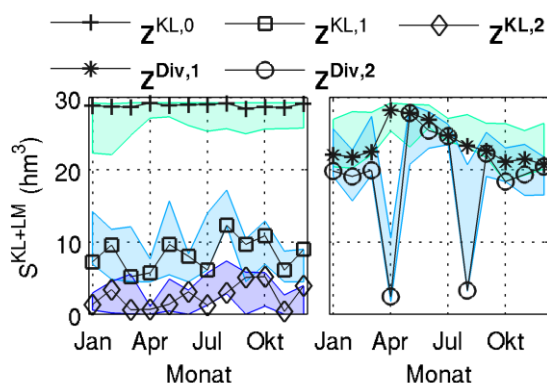


Abbildung 15: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung das Cluster CI-3. Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Dieses Merkmal, zusammen mit der minimalen Ausprägung der Zone DIV3, lässt sich als einen sehr frühzeitigen Start der Stützung der Talsperren KL und LM interpretieren, bei dem möglichst lange mit der resultierten Überleitungsmenge von $0,4 \text{ hm}^3$ je Monat gearbeitet wird. Sollten die Talsperren durch die Schneeschmelze im April nicht gefüllt sein, wird mit einer konservativen Überleitungsmenge gestützt, bevor dann im Mai sehr schnell mit der vollen Überleitungsmenge von $0,6 \text{ hm}^3$ je Monat gestützt wird. Die Staulamellen der Lösungen $\max(\text{FF2})$, $\min(\text{FF3})$ sind in Abbildung A 10 und $\max(\text{P}(\text{BSS4}))$ in Abbildung A 11 abgebildet.

4.2.4 Ohne Stützung des Betriebs durch die TS Rauschenbach (hknn-sma)

Alle Individuen der Elternpopulation für diesen MKO-Lauf wurden zufällig initialisiert. Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,6$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Wiederum werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Hieraus resultieren lediglich 80 Lösungen die den Pareto-Satz bilden. Alle Lösungen werden von zur Validierung ausgewählt.

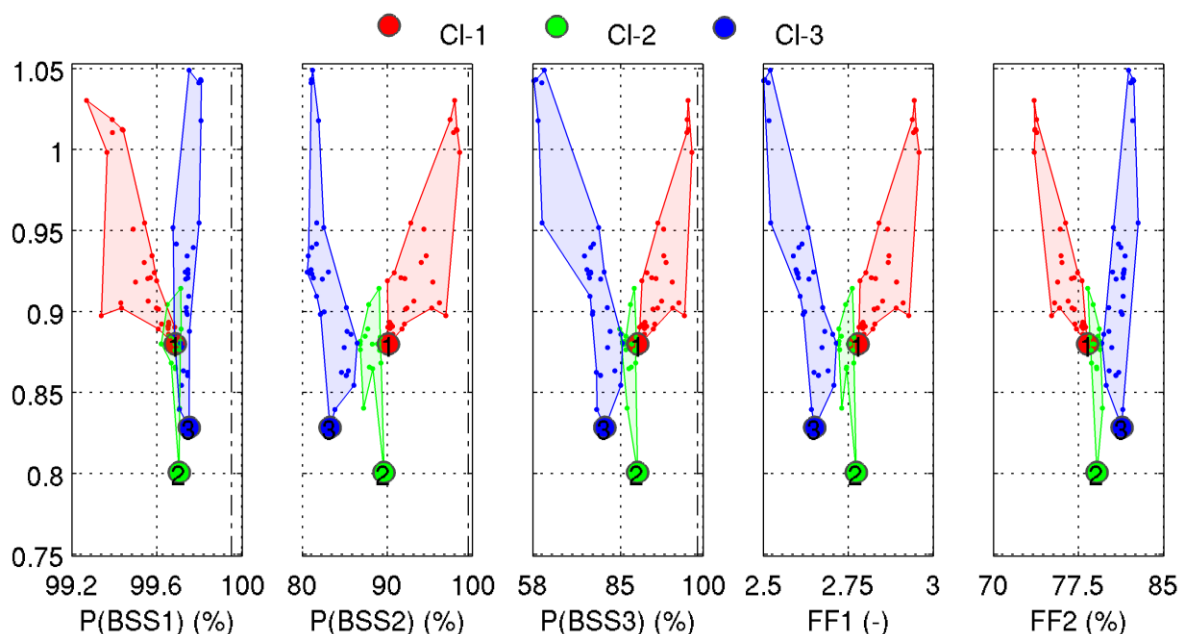


Abbildung 16: Level Diagramm der MKO für das Szenario ohne Überleitung von Brauchwasser aus der Talsperre Rauschenbach.

Ohne Stützung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle mit Wasser aus der Talsperre Rauschenbach verschärften sich die Trade-Offs zwischen den Zielfunktionen FF1 und FF2. Nach Abbildung 16 (Paneele 5 und 6) ist deutlich zu erkennen, dass das verfügbare Wasser entweder für eine hohe Wasserqualität gespeichert werden kann, oder eine hohe Versorgungssicherheit garantiert werden kann. Die Clusterung der Lösungen mündet in drei Cluster. Auch hier wird wiederum die konträre Natur der Zielfunktionen deutlich. Die Lösungen des Clusters CI-1 leisten nur geringe Versorgungssicherheiten bei hohen Wahrscheinlichkeiten einer gefüllten Talsperre Klingenberg im April. Dem entgegen bietet Cluster CI-3 relativ hohe Versorgungssicherheiten bei eher geringen Wahrscheinlichkeiten einer gefüllten Talsperre Klingenberg im April. Cluster CI-2 bietet einen ausgeglichenen Trade-off zwischen den Zielfunktionen.

Tabelle 10: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 und FF2 für das Szenario ohne Überleitung (1921-2007) für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)
CI-1	99,746	81,150	79,208	2,601	81,471
CI-2	99,391	97,373	97,138	2,939	73,823
CI-3	99,438	98,124	97,356	2,949	73,675
max(FF1)	99,366	98,503	97,995	2,959	73,615
max(FF2)	99,798	81,712	70,719	2,522	82,761

Generell kann festgestellt werden, dass ohne Unterstützung durch die Talsperre Rauschenbach das Bewirtschaftungsziel der hohen Versorgungssicherheit nicht erreicht werden kann, wie Lösung max(FF1) nach Tabelle 10 belegt.

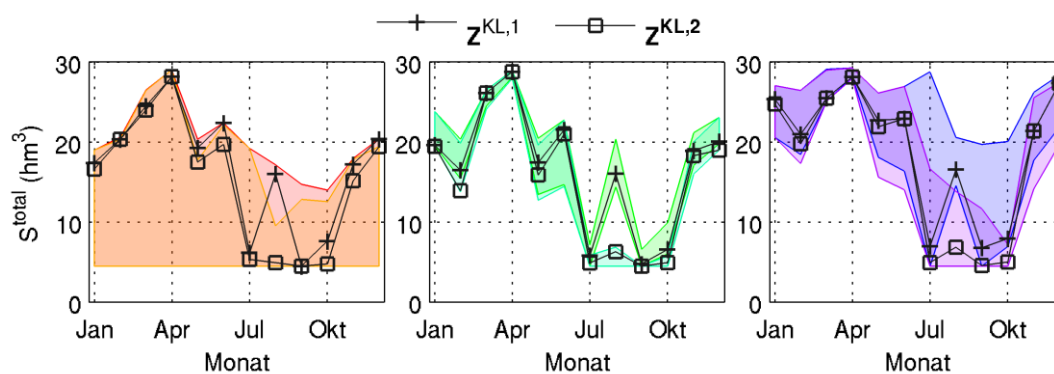


Abbildung 17: Staulamellen der Bereitstellungsstufen für die drei repräsentativen Lösungen CI-1 (links), CI-2 (Mitte) und CI-3 (rechts), sowie die Spannweiten der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen der jeweiligen Cluster als farbige Flächen.

Die optimierten Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ der Bereitstellungsstufen zeigen eine deutlich höhere Dynamik als in den Szenarien mit aktiver Überleitung (Abschnitte 4.2.1 bis 4.2.3). Eine Reduktion der Abgabe von Brauchwasser auf $0,85 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (BSS1) wird in allen drei repräsentativen Lösungen und für die Lösung max(FF2) in den Monaten Januar bis Juni und November bis Dezember bereits bei geringen Fehlbeträgen im Stauvolumen gefordert (Abbildung 17 und Abbildung 18). In den Sommer- und Herbstmonaten wird dann, mit Ausnahme des Monats August, möglichst lange eine Abgabe von $1,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ gewährt. Im August zeigt sich jeweils eine ausgeprägte BSS2 die in etwa 11 hm^3 umfasst. Die Staulamellen der Lösung max(FF1), also mit maximal erreichbarer Versorgungssicherheit, gleicht wiederum eher den Lösungen mit aktiver Überleitung von Brauchwasser aus der Talsperre Rauschenbach.

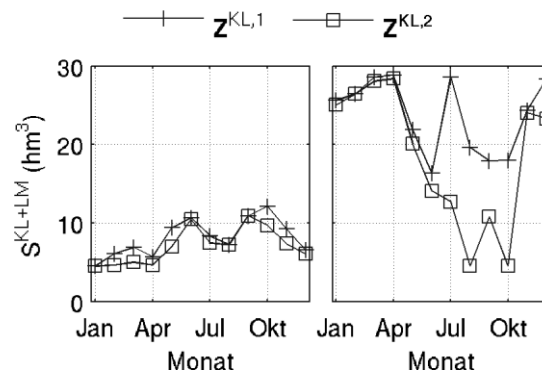


Abbildung 18: Staulamellen der Bereitstellungsstufen für die Lösungen $\max(\text{FF1})$, links, und $\max(\text{FF2})$, rechts.

4.3 MKO für WETTREG2010, Zeitscheibe 2021-2050

4.3.1 Emissionsszenario A1B

Zur Initialisierung der MKO dienen 48 ausgewählte Lösungen des Pareto-Satzes der MKO mit drei Bereitstellungsstufen und dem Regime von 1921-2007 (Abschnitt 4.2.1). Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 2673 Lösungen von denen 359 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

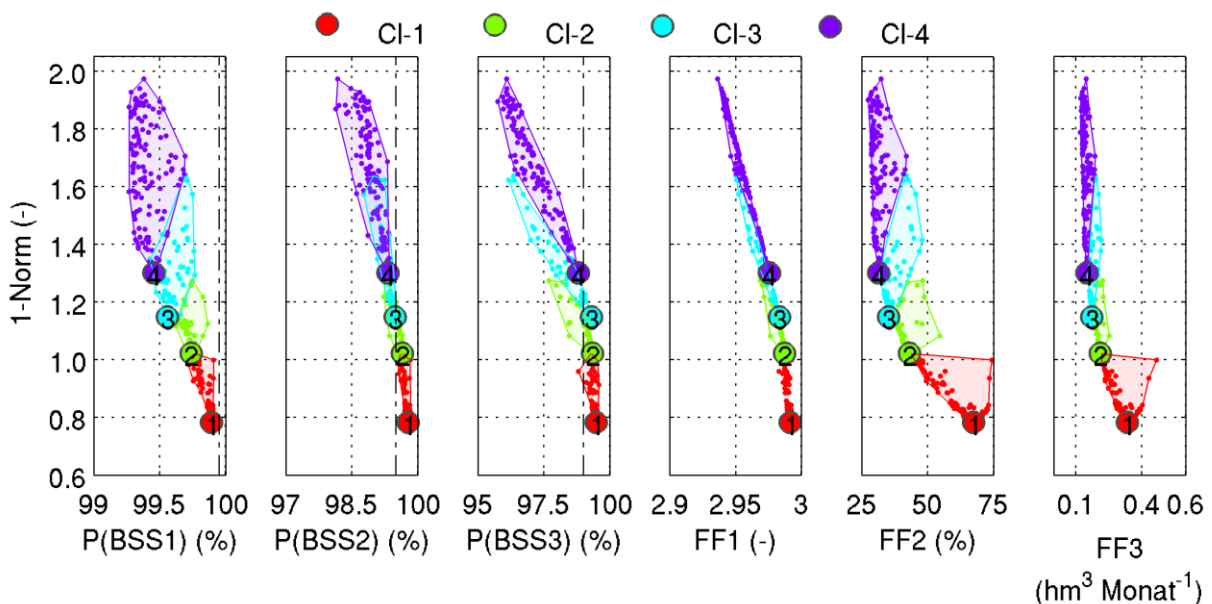


Abbildung 19: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, A1B, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün), CI-3 (hellblau) und CI-4 (lila).

Nach Abbildung 19 lassen sich in der Pareto-Front insgesamt vier Cluster unterscheiden. Die Cluster sind, mit Ausnahme im Raum der P(BSS2) jeweils mit nur sehr geringen Überschneidungen separierbar. Cluster CI-1, mit der repräsentativen Lösung CI-1, ist nach der 1-Norm die ausgeglichene Kompromisslösung mit den höchsten Überleitungsmengen (FF3), dem besten Wasserqualitätskriterium FF2, als auch der höchsten Versorgungssicherheiten. Von Cluster CI-2 bis CI-4 nehmen alle Zielfunktionswerte mit fallender Überleitungsmenge ab.

Für die projizierten Zuflüsse der Zeitscheibe unter dem Emissionsszenario A1B konnten keine Lösungen mit ausreichender Versorgungssicherheit für alle Bereitstellungsstufen durch die MKO generiert werden. Die Lösung max(FF1) mit maximalen Zielfunktionswert FF1 erreicht nach Tabelle 11 mit $P(BSS3) = 99,528\%$ und $P(BSS2) = 99,833\%$ ausreichende Versorgungssicherheiten für die Bereitstellungsstufen BSS2 und BSS3, erreicht jedoch mit $99,901\%$ nicht die geforderte Versorgungssicherheit der Bereitstellungsstufe BSS1. Durch die hohe Überleitungsmenge von $0,468 \text{ hm}^3$ je Monat ist max(FF1) gleichzeitig die Lösung mit dem höchsten Zielfunktionswert max(FF3) mit rund $74,4\%$.

Tabelle 11: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, A1B für ausgewählte Lösungen.

Lösung	$P(BSS1)$ (%)	$P(BSS2)$ (%)	$P(BSS3)$ (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($\text{hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$)
CI-1	99,892	99,783	99,482	2,992	67,391	0,335
CI-2	99,905	99,823	99,525	2,993	73,136	0,404
CI-3	99,893	99,794	99,445	2,991	67,966	0,342
CI-4	99,890	99,782	99,485	2,992	66,222	0,334
max(FF1)	99,909	99,833	99,528	2,993	74,375	0,468
max(FF2)						
min(FF3)	99,328	98,705	96,632	2,947	29,008	0,121
Balanced BSS	99,739	99,549	99,009	2,983	40,208	0,198
ABW	99,901	93,839	88,706	2,824	40,46	0,240

Die Lösung Balanced BSS erreicht knapp die geforderten Versorgungssicherheiten. Eine Simulation des Talsperrenbetriebs unter dem Szenario A1B, 2021-2050 mit nichtangepasster Talsperrenbewirtschaftung mündet in die Ergebnisse der Lösung ABW (Aktuelle Bewirtschaftungsweise). Alle Zielfunktionswerte und erreichte Versorgungssicherheiten dieser Lösungen, sowie der repräsentativen Lösungen sind ebenso in Tabelle 11 einzusehen.

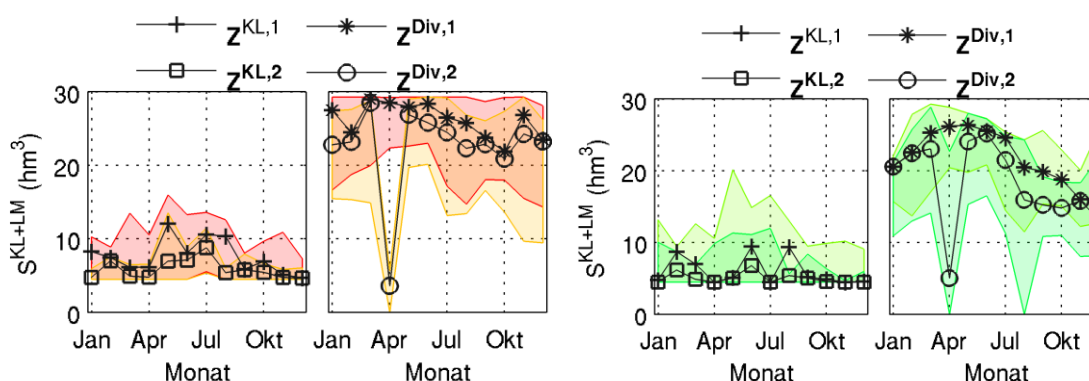


Abbildung 20: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Für das hydrologische Regime 2021-2050 unter A1B ergeben sich nach der MKO die Staulamellen der Abbildungen Abbildung 20 und Abbildung 21 für die repräsentativen Lösungen, als auch für die weiteren Lösungen in Abbildung A 13 und Abbildung A 14. Merkmale der Staulamellen, die mit den

Staulamellen für vier Bereitstellungsstufen vergleichbar sind, sind die sehr große Zone DIV2 im April, sowie das Maximum der Überleitung um den selben Monat, als auch das ansonsten sehr geringe Volumen der Zone DIV2. Im Vergleich mit den rezenten klimatischen Bedingungen zeigen sich sehr geringe Volumina der Stauvolumen BSS1 und BSS2. Die Talsperren werden bis zu sehr geringen Stauinhalten mit einer Abgabe von $1,00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ belastet.

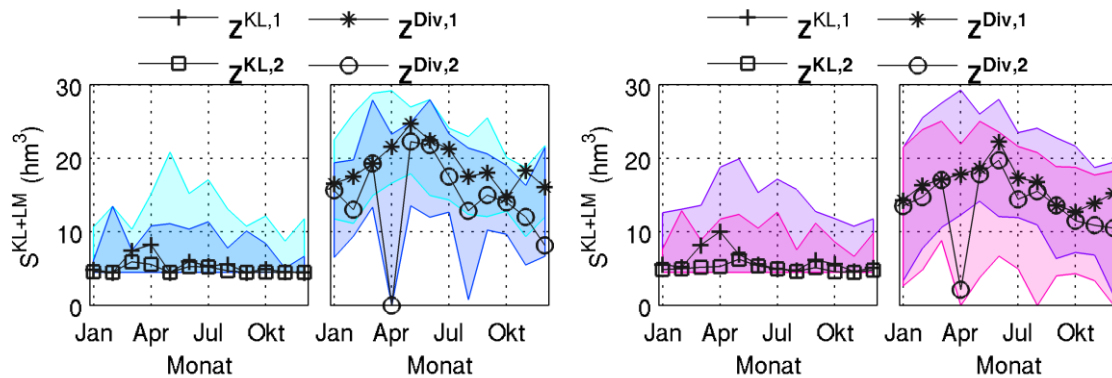


Abbildung 21: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

4.3.2 Emissionsszenario A2

Zur Initialisierung der MKO dienen 48 ausgewählte Lösungen des Pareto-Satzes der MKO mit drei Bereitstellungsstufen und dem Regime von 1921-2007 (Abschnitt 4.2.1). Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 3549 Lösungen von denen 360 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

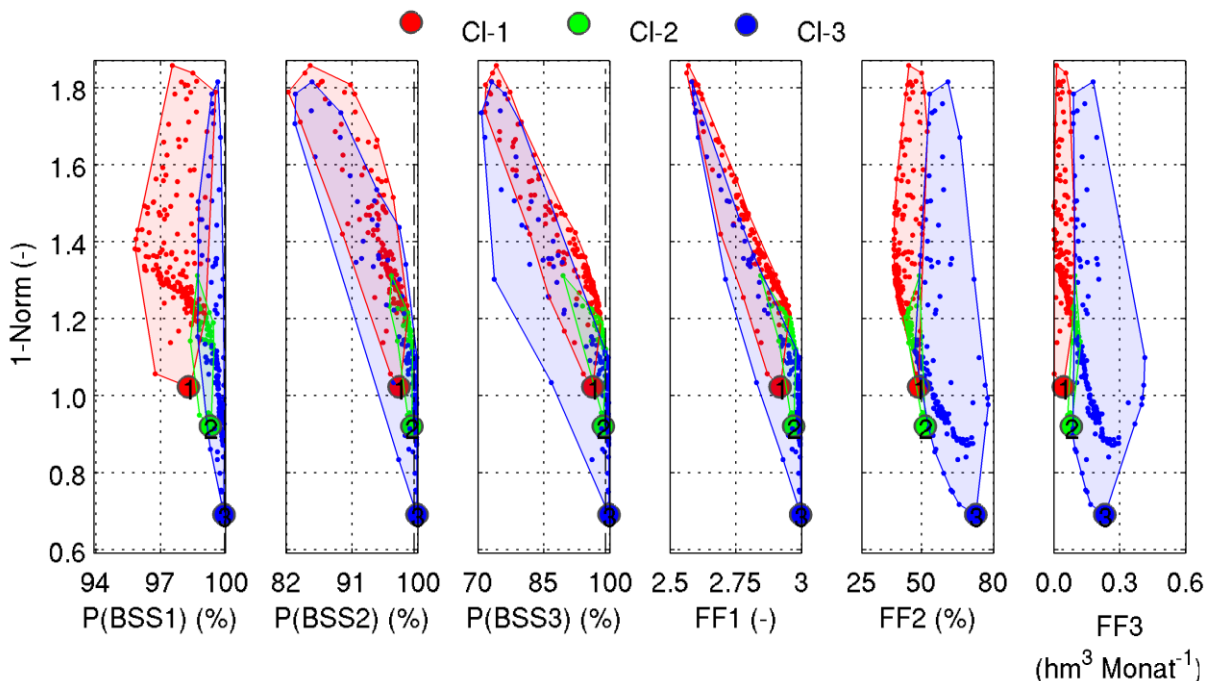


Abbildung 22: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, A2, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün), CI-3 (blau)

Die mittleren Zuflüsse zu den Talsperren innerhalb der Zeitscheibe 2021-2050 sind unter dem Emissionsszenario A2 etwas höher als unter dem Emissionsszenario A1B (Tabelle 1). Trotzdem existieren keine Lösungen die allen drei geforderten Versorgungssicherheiten der Bereitstellungsstufen genügen. So kann keine Lösung gefunden werden, die eine Versorgungssicherheit $P(BSS1)$ von mindestens als 99,95 % garantiert. Die maximale mittlere monatliche Überleitungsmenge ist mit $0,4 \text{ hm}^3$ je Monat etwas geringer als das Maximum unter dem Emissionsszenario A1B. Die Lösung mit der maximalen mittleren monatlichen Überleitungsmenge ist CI-3, die hierdurch die höchste Versorgungssicherheit unter dem Emissionsszenario A2 realisiert.

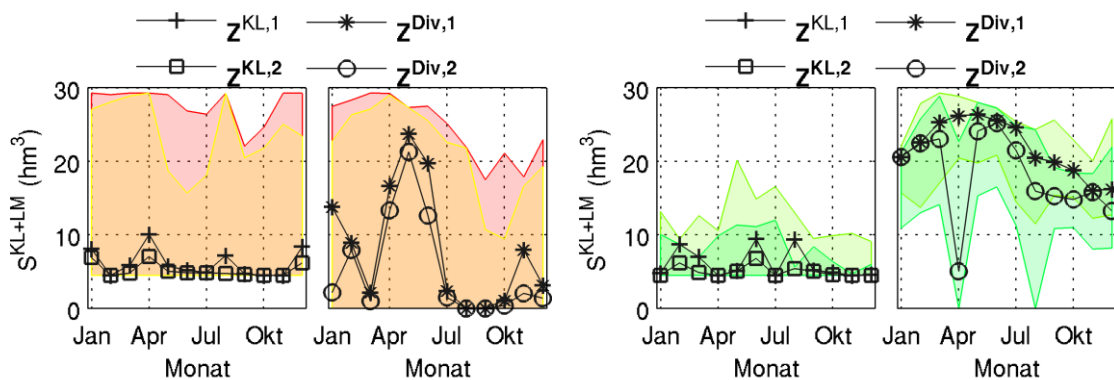


Abbildung 23: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Die breiten farbigen Flächen der Cluster CI-1 und CI-2, die die Spannweiten aller monatlichen Staulamellenwerte angeben (Abbildung 23 (links), Abbildung 24) deuten auf eine hohe Vielfalt, bzw. Variabilität der Staulamellen in den jeweiligen Clustern hin. Die Cluster sind somit primär durch den Zielfunktionsraum charakterisiert.

Wie auch schon unter dem Emissionsszenario A1B weisen die Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ der repräsentativen Lösungen CI-1, CI-2 und CI-3, sowie der Lösungen max(FF1) und Balanced BSS (Abbildung A 15 (rechts) und Abbildung A 16) eine sehr geringe innerjährliche Variabilität auf. Auf die Zonen BSS1 und BSS2 wird, bis auf sehr kurze Perioden komplett verzichtet. Wiederum wird die Steuerung des Systems primär über die Staulamellen der Überleitung $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ realisiert.

Nach den angegebenen Spannweiten in den Abbildungen existieren jedoch auch sehr abweichende Staulamellen-Typen im Pareto-Satz.

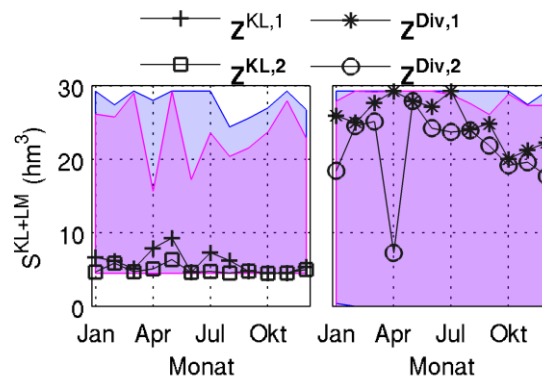


Abbildung 24: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für das Cluster CI-3. Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Tabelle 12: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(BSS1)$ bis $P(BSS3)$ und der Zielfunktionen $FF1$ bis $FF3$ für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, A2 für ausgewählte Lösungen.

Lösung	$P(BSS1)$ (%)	$P(BSS2)$ (%)	$P(BSS3)$ (%)	$FF1$ (-)	$FF2$ (%)	$FF3$ ($hm^3 \text{ Monat}^{-1}$)
CI-1	99,423	99,173	98,018	2,966	48,131	0,110
CI-2	99,868	99,833	99,683	2,994	65,993	0,241
CI-3	99,921	99,900	99,818	2,996	72,549	0,232
max($FF2$)	99,937	99,876	99,273	2,991	77,798	0,400
min($FF3$)	96,253	93,710	87,749	2,777	39,008	0,001
Balanced BSS	99,648	99,528	99,192	2,984	52,245	0,148
ABW	99,848	94,447	90,477	2,848	58,782	0,184

4.3.3 Emissionsszenario B1

Die Ergebnisse der MKO für das Emissionsszenario B1 beruhen auf zwei einzelnen MKO. Die Ergebnisse des ersten Laufs stellen die Initialisierungsgrundlage für den zweiten MKO-Lauf. Im ersten Lauf sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$ gesetzt. Dieser Lauf resultiert in 1158 Pareto-optimale Lösungen. Aus diesen wurden 48 Lösungen ausgewählt, die den geforderten Versorgungssicherheiten genügen, oder nur sehr gering unter den geforderten Werten liegen. Für den zweiten Lauf gilt $\lambda_3 = 0,99$, $\lambda_2 = 0,995$ und $\lambda_1 = 0,99947$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 779 Lösungen von denen 277 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden. Die in der Validierung erreichten Werte der Zielfunktionen und der erreichten Versorgungssicherheiten dienen als Grundlage für die Erstellung des Level Diagramms.

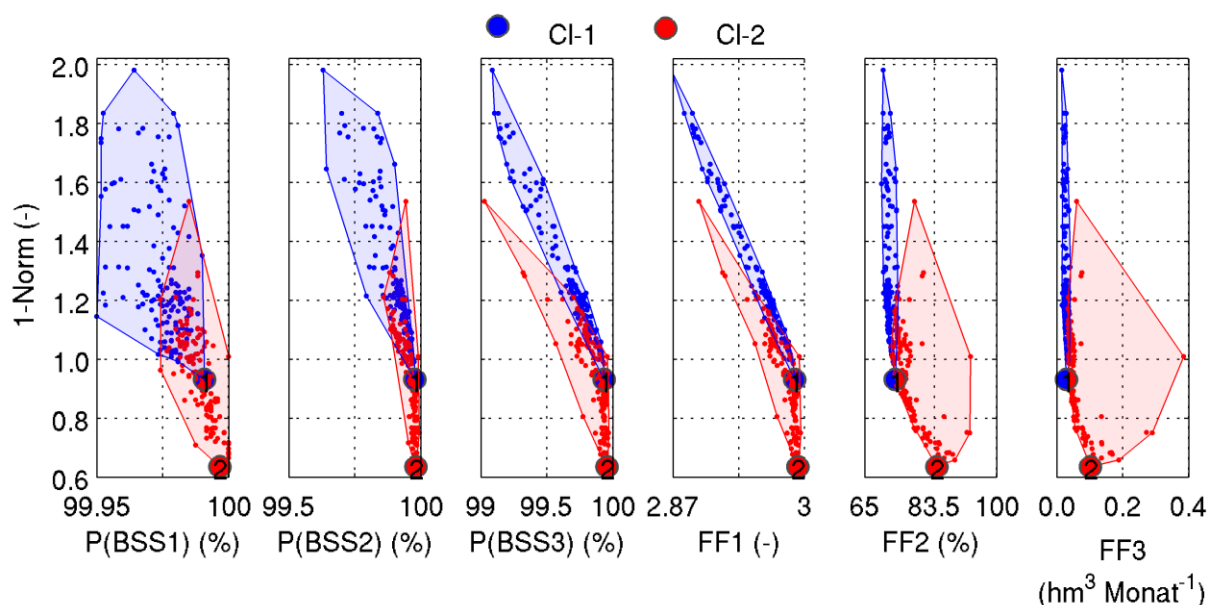


Abbildung 25: Level Diagramm für die MKO 2021-2050, B1, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den Clustern CI-1 (blau) und CI-2 (rot).

Das Level Diagramm der MKO für das Emissionsszenario B1 (Abbildung 25) in der Zeitscheibe 2021-2050 ist den Level Diagrammen des Zeitabschnitts 1921-2007 und der LTV Bemessungszeitreihe wiederum sehr ähnlich. Nach Tabelle 1 sind die Rückgänge der mittleren Talsperrenzuflüsse im Vergleich zum Zeitraum 1921-2007 auch nur sehr gering. Im Vergleich der beiden repräsentativen Lösungen CI-1 und CI-2 benötigt CI-2 eine geringere Stützung durch die Talsperre Rauschenbach und erreicht eine höhere Versorgungssicherheit bei geringerer Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre Klingenberg im April (siehe ebenso Tabelle 13).

Die Lösung mit der minimalen mittleren monatlichen Überleitungsmenge, FF3, $\min(\text{FF3})$, erfüllt unter B1 alle geforderten Versorgungssicherheiten und benötigt dabei eine Stützung von nur sehr geringen $0,015 \text{ hm}^3$ im Monat. Im Vergleich zur Lösung $\min(\text{FF3})$ unter dem Szenario 1921-2007, die $0,058 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$ überleitet, ist jedoch sowohl der Zielfunktionswert FF2 mit 69,9 % im Vergleich zu 77,43 %, als auch der Zielfunktionswert FF1, geringer. Die Simulation der Talsperrenbewirtschaftung mit den regulären Staulamellen des Talsperrenbetreibers führt zu den Werten der Lösung ABW, Tabelle 13. Wie auch in der Validierung, ergibt sich eine geringe Unterschätzung bezüglich P(BSS3), das wiederum auf die unterschiedlichen Modellansätze zurückgeführt werden kann. Die regulären Staulamellen behalten also auch unter dem Szenario B1 ihre Gültigkeit.

Tabelle 13: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2021-2050, B1 für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($\text{hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$)
CI-1	100,000	99,976	99,931	2,999	86,106	0,136
CI-2	99,997	99,982	99,956	2,999	84,140	0,102
max(FF1)	99,998	99,995	99,969	3,000	92,909	0,290
max(FF2)	100,000	99,991	99,958	2,999	93,114	0,385
min(FF3)	99,964	99,630	99,087	2,987	69,927	0,015
ABW	100,000	99,665	98,918	2,986	80,129	0,086

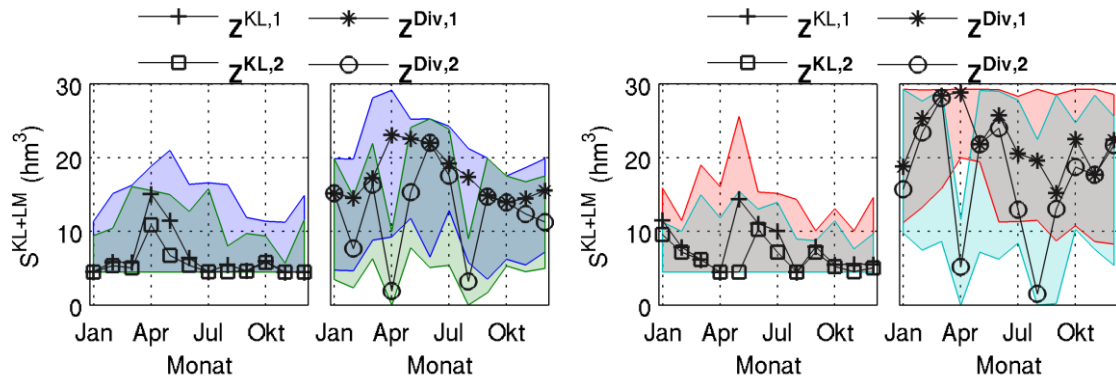


Abbildung 26: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Die ermittelten Staulamellen (Abbildung 26) zeigen Eigenschaften die ebenso unter den Szenarien 2021-2050 für A1B, A2 und 1921-2007 mit vier Bereitstellungsstufen beobachtet werden können. So nimmt die Zone DIV2 in den Monaten April und August einen Großteil des kombinierten Stauvolumens ein. Die Überleitung wird in den Monaten April oder Mai bei dem, auf die einzelnen Monate bezogenen, kleinsten Fehlvolumina in den Talsperren mit 0,4 hm^3 je Monat realisiert.

4.4 MKO für WETTREG2010, Zeitscheibe 2071-2100

4.4.1 Emissionsszenario A1B

Zur Initialisierung der MKO dienen 48 ausgewählte Lösungen des Pareto-Satzes der MKO mit drei Bereitstellungsstufen und dem Regime von 1921-2007 (Abschnitt 4.2.1). Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 2673 Lösungen von denen 359 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

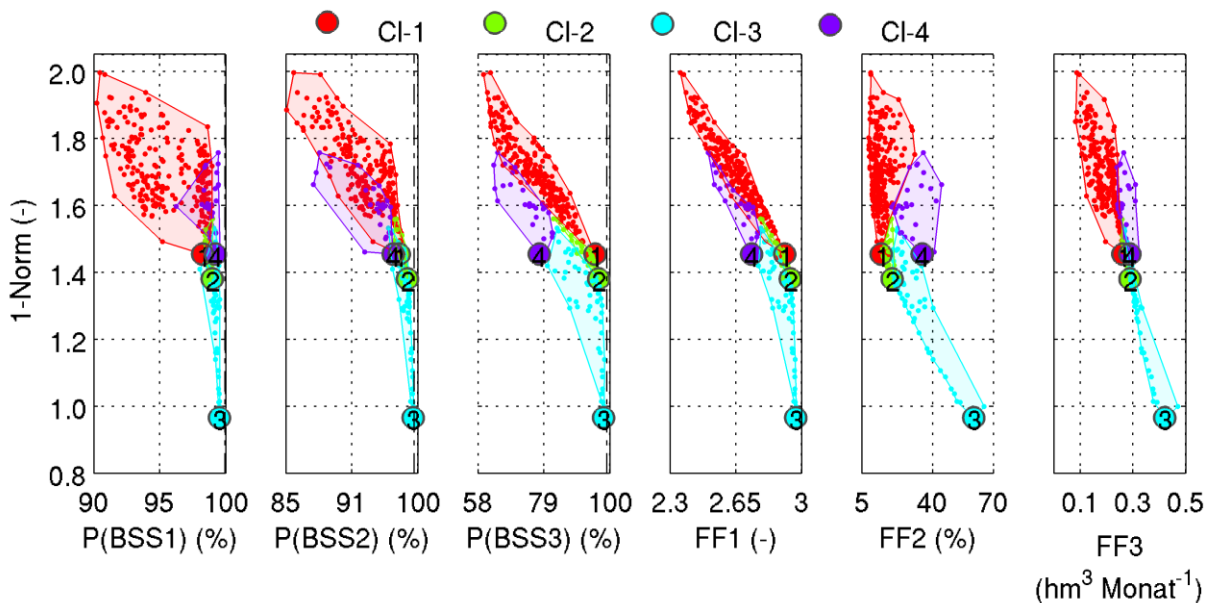


Abbildung 27: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, A1B, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschuttraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün), CI-3 (hellblau) und CI-4 (lila).

Die Lösungen lassen sich in vier unterschiedliche Cluster zusammenfassen. Nach Abbildung 27 stehen die Cluster CI-3 und CI-4 für Lösungen mit höheren FF2 Zielfunktionswerten, während die Cluster CI-1 und CI-2 Lösungen mit niedrigen FF2 Zielfunktionswerten zusammenfassen. Die repräsentative Lösung CI-1 ist die ausgeglichene Kompromisslösung, sehr gute FF1 und FF2 Werte werden gegen den schlechtesten, da höchsten FF3 Wert eingetauscht. Die repräsentative Lösung CI-4 mit mittleren FF3 Werten erreicht ebenso mittlere FF2 Werte, jedoch schlechtere FF1 Werte als die anderen repräsentativen Lösungen. Die repräsentativen Lösungen CI-1 und CI-2 stehen für niedrige FF2 Werte bei guten FF1 Werten und mittleren monatlichen Überleitungsmengen FF3.

Jedoch kann keine der Lösungen die geforderten Versorgungssicherheiten, trotz der bereits reduzierten Abgabemengen (Tabelle 3), decken. Nach Tabelle 14 sind für die Lösung max(FF1) maximale P(BSS1) von 99,54 % möglich. P(BSS2) liegt mit 99,44 % nur knapp unterhalb der geforderten Versorgungssicherheit für diese Bereitstellungsstufe und P(BSS1) wird mit 98,21 % etwas deutlicher unterschritten. FF2 nimmt hierbei einen Wert von 65,4 % an. Die dazu erforderlichen mittleren monatlichen Überleitungsmengen sind mit 0,47 hm³ je Monat allerdings bereits bedeutend. Mit 0,08 hm³ je Monat liegt die Lösung mit der geringsten Überleitungsmenge im Bereich der auch zuvor ermittelten Werte, jedoch erscheinen die damit zu erreichenden Versorgungssicherheiten und vor allen die zu erwartende Verschlechterung der Trinkwasserqualität durch die niedrige Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre im Monat April nicht tragbar. Die schlechten FF2 Werte sind wahrscheinlich auch Faktoren, die die Cluster bzw. die repräsentativen Lösungen

CI-1, CI-2 und CI-3 nicht tragbar machen. Es sei denn, dass FF3 Werte höher als, z.B. 0,3 hm³ je Monat nicht wirtschaftlich sein sollten.

Tabelle 14: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, A1B für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm ³ Monat ⁻¹)
CI-1	98,251	97,478	95,293	2,910	14,568	0,262
CI-2	98,975	98,591	96,469	2,940	19,988	0,289
CI-3	99,523	99,371	97,996	2,969	60,195	0,421
CI-4	99,216	96,645	77,530	2,734	34,756	0,288
max(FF1)	99,539	99,442	98,207	2,972	65,364	0,471
max(FF2)						
min(FF3)	91,218	87,755	63,375	2,423	10,816	0,083
ABW	99,771	88,949	79,758	2,685	24,474	0,311

Die zu den repräsentativen Lösungen zugehörigen Staulamellen, als auch die Spannweiten aller Lösungen in den Clustern, sind in Abbildung 28 und Abbildung 29 visualisiert. Die Staulamellen der Bewirtschaftungsstrategien nach den Lösungen max(FF1) und min(FF3) sind im Anhang in Abbildung A 19 ersichtlich. Das Cluster CI-1 besitzt eine hohe Variabilität an unterschiedlich verlaufenden Staulamellen und erstreckt sich dabei über einen großen Zielfunktionswertebereich FF1.

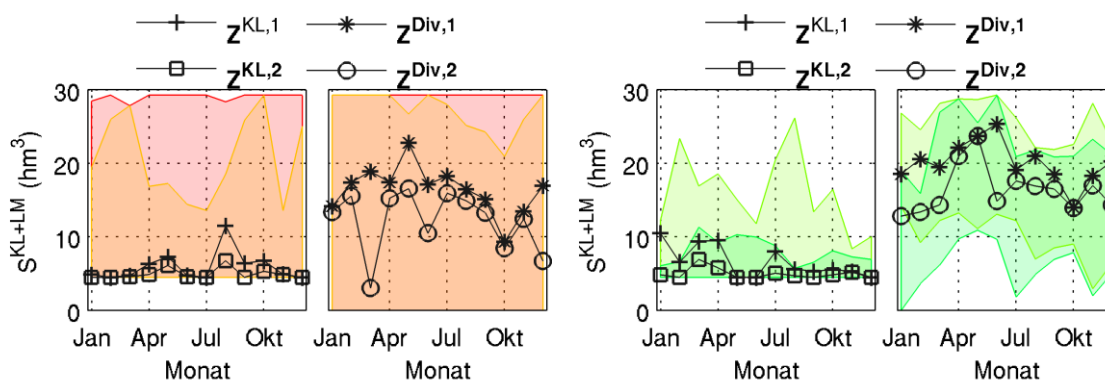


Abbildung 28: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

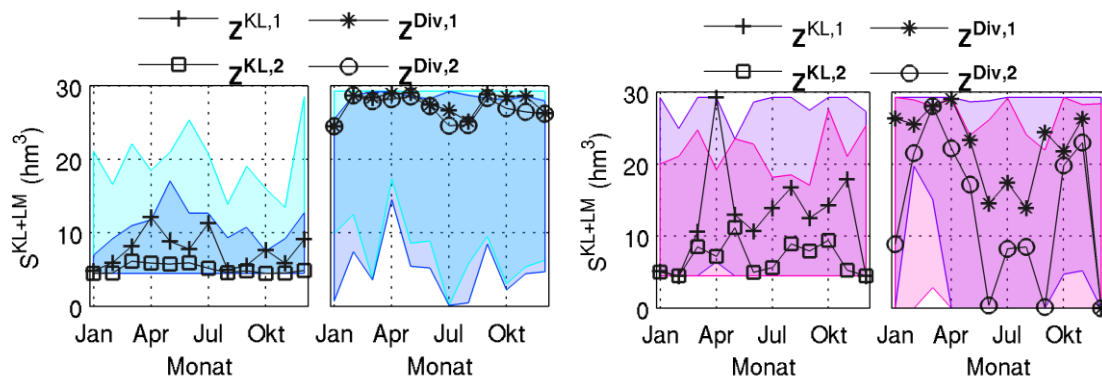


Abbildung 29: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

4.4.2 Emissionsszenario A2

Zur Initialisierung der MKO dienen 48 ausgewählte Lösungen des Pareto-Satzes der MKO mit drei Bereitstellungsstufen und dem Regime von 1921-2007 (Abschnitt 4.2.1). Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz 6187 mit Lösungen von denen 355 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

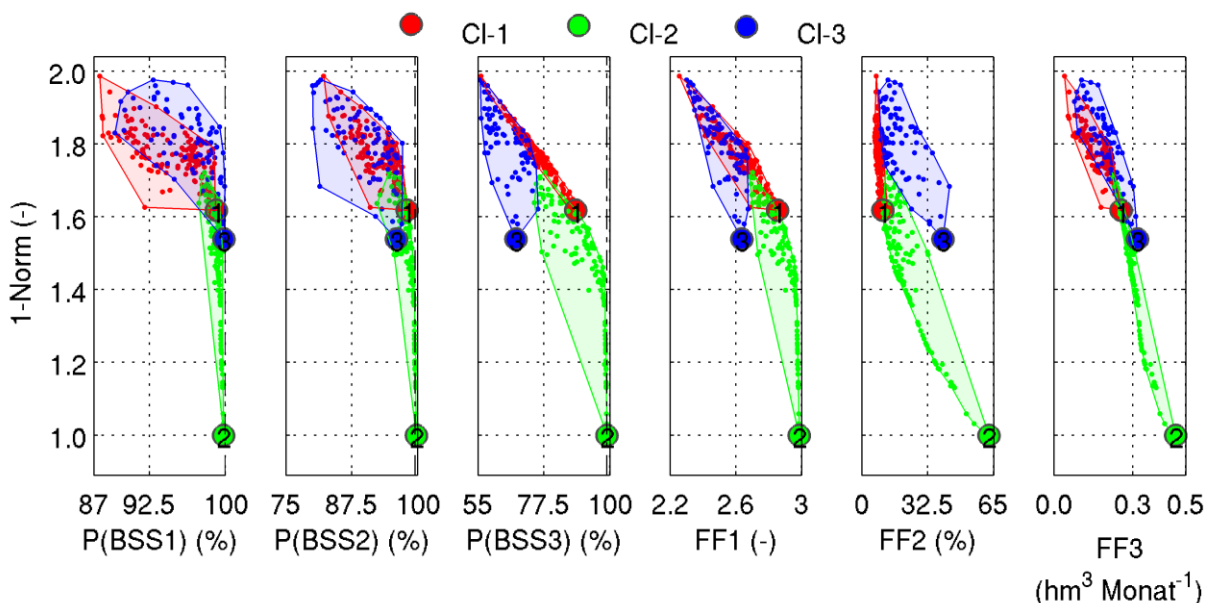


Abbildung 30: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, A2, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün) und CI-3 (blau).

Das Level Diagramm des Emissionsszenario A2 in der Zeitscheibe 2071-2100 zeigt eine hohe Ähnlichkeit mit dem Level Diagramm unter A1B bezüglich der Form der dargestellten Pareto-Front und deren Wertebereiche. Es werden allerdings nur drei Cluster gegeneinander abgegrenzt. Die ausgewogenste Kompromisslösung ist wiederum eine repräsentative Lösung, CI-2, mit den höchsten Zielfunktionswerten FF1 und FF2 (2,986 und 62,7 %), die durch die höchste Stützungsleistung der Talsperre Rauschenbach (FF3) von 0,462 hm³ Monat⁻¹ erkauft werden. Die repräsentativen

Lösungen CI-1 und CI-3 nutzen vergleichbare mittlere monatliche Überleitungsmengen von $0,255 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$, bzw. $0,317 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$, erzielen jedoch hierbei sehr unterschiedliche Zielfunktionswerte FF1 und FF2 (Tabelle 15) die deren konträrem Verhalten geschuldet sind.

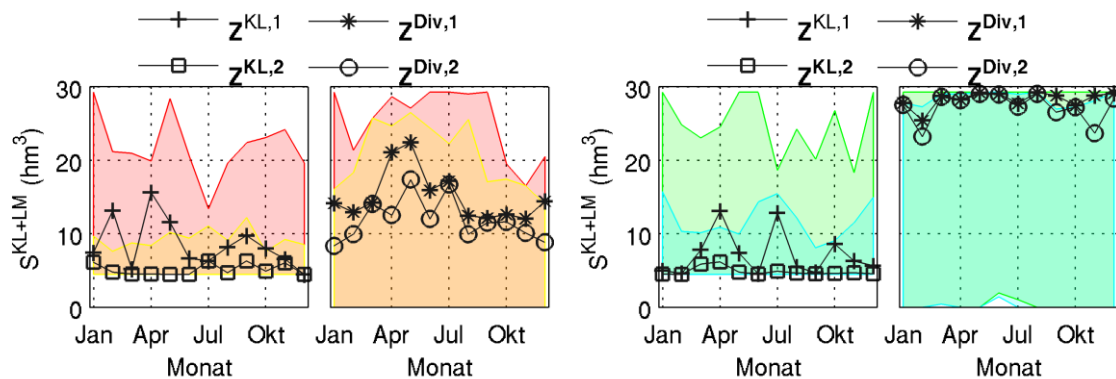


Abbildung 31: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

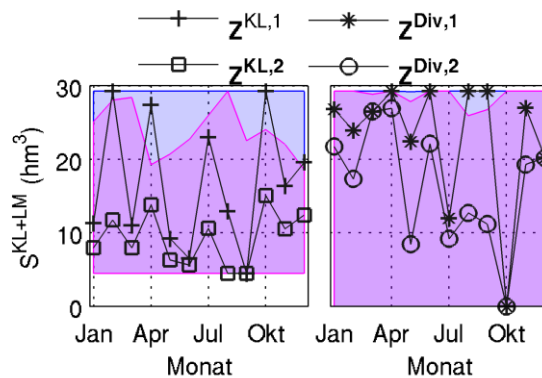


Abbildung 32: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für das Cluster CI-3. Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Während die Staulamellen der repräsentativen Lösungen CI-1 und CI-2 (Abbildung 31) sich mit den bisher ermittelten Staulamellen vergleichen lassen, zeigen die Staulamellen der repräsentativen Lösung CI-3 (Abbildung 32) einen sehr unruhigen Verlauf mit hohen monatlichen Fluktuationen. Dies beruht einerseits auf den ungewöhnlich großen Zonen BSS2 in den Monaten Februar, April, Juli und Oktober, andererseits auf dem sehr sprunghaften Verlauf der Staulamellen $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$. Dieser sprunghafte Verlauf könnte wiederum durch Aspekte der Wasserqualität nachteilig in der Bewirtschaftung der Talsperren sein. Schließlich ist in Abbildung A 20 die Bewirtschaftungsstrategie für die Lösung $\min(\text{FF3})$ abgebildet.

Tabelle 15: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, A2 für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm ³ Monat ⁻¹)
CI-1	99,081	97,984	88,337	2,854	10,408	0,255
CI-2	99,790	99,751	99,020	2,986	62,723	0,462
CI-3	99,824	95,951	67,888	2,637	40,022	0,317
min(FF3)	87,593	82,178	55,983	2,258	7,191	0,041
ABW	100,000	91,911	84,209	2,761	25,777	0,287

4.4.3 Emissionsszenario B1

Zur Initialisierung der MKO dienen 48 ausgewählte Lösungen des Pareto-Satzes der MKO mit drei Bereitstellungsstufen und dem Regime von 1921-2007 (Abschnitt 4.2.1). Die gewählten Schwellenwerte λ zur Begrenzung des Zielfunktionsraumes sind $\lambda_3 = 0,7$, $\lambda_2 = 0,8$ und $\lambda_1 = 0,9$. Die gewählte Populationszahl beträgt 96, wobei auf 48 Vorfahren insgesamt 48 Nachkommen kommen. Insgesamt werden 96048 Modellevaluationen durchgeführt. Die MKO resultiert in einem Pareto-Satz mit 4344 Lösungen von denen 358 Lösungen durch die SOM Clustering zur Validierung ausgewählt werden.

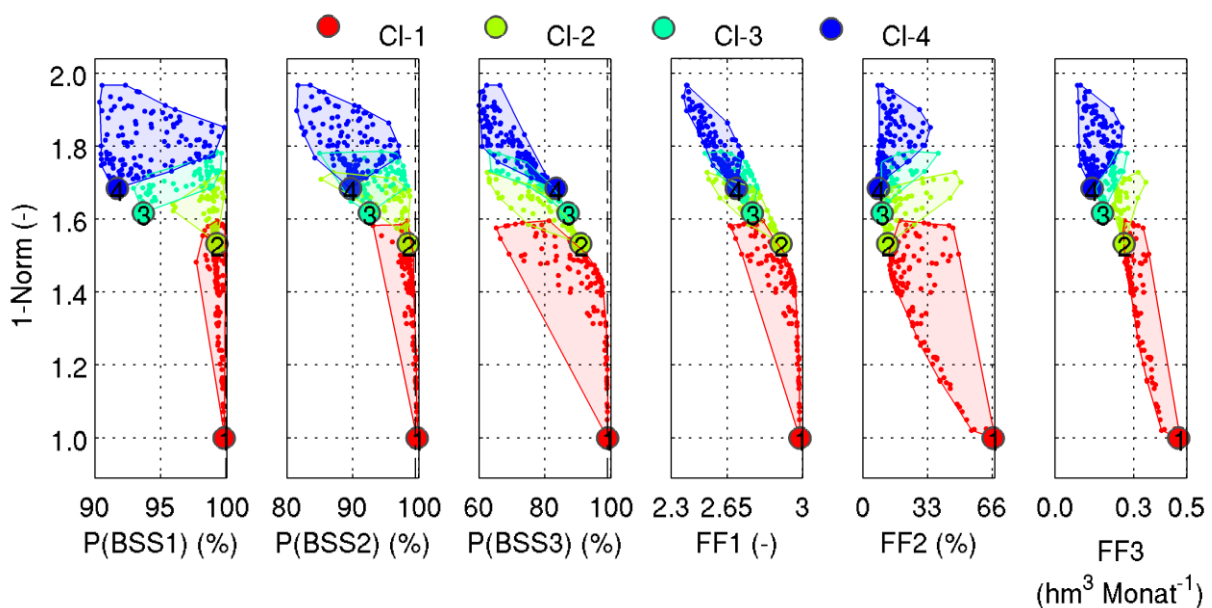


Abbildung 33: Level Diagramm für die MKO 2071-2100, B1, mit drei Bereitstellungsstufen und unveränderter Größe des Hochwasserschutzraums mit den Clustern CI-1 (rot), CI-2 (grün), CI-3 (hellblau) und CI-4 (blau).

Die vier Cluster des Level Diagramms in Abbildung 33 decken die Bandbreite des Zielfunktionswertebereichs FF3 ab. Die Lösung CI-1 vereint sowohl das Maximum in FF3 als auch in FF2 und einen sehr hohen Wert FF1. Auch für die repräsentativen Lösungen CI-1, CI-2 und CI-3 scheint in diesem Szenario die Gegensätzlichkeit der Zielfunktionen FF1 und FF2 sehr schwach ausgeprägt zu sein, denn für alle repräsentativen Lösungen gilt, dass mit abnehmender mittlerer monatlicher Überleitungsmenge FF3 sowohl FF2 und FF1 abnehmen. Dies kann ebenso aus Tabelle 16, die die Zielfunktionswerte und erreichten Versorgungssicherheiten auflistet, nachvollzogen werden.

Tabelle 16: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für das Szenario mit drei Bereitstellungsstufen, 2071-2100, B1 für ausgewählte Lösungen.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm ³ Monat ⁻¹)
CI-1	99,806	99,755	99,033	2,986	65,250	0,469
CI-2	99,248	98,342	90,423	2,880	12,196	0,261
CI-3	93,674	92,498	87,060	2,732	9,673	0,181
CI-4	91,705	89,652	83,418	2,648	7,806	0,141
max(FF2)	99,809	99,763	99,007	2,986	66,109	0,475
min(FF3)	90,563	81,689	66,429	2,387	7,649	0,086

Die mittleren monatlichen Überleitungsmengen FF3 schwanken zwischen 0,086 hm³ je Monat und 0,469 hm³ je Monat, während für FF2 Werte zwischen sehr geringen 7,6 % und 65,25 % erreicht werden.

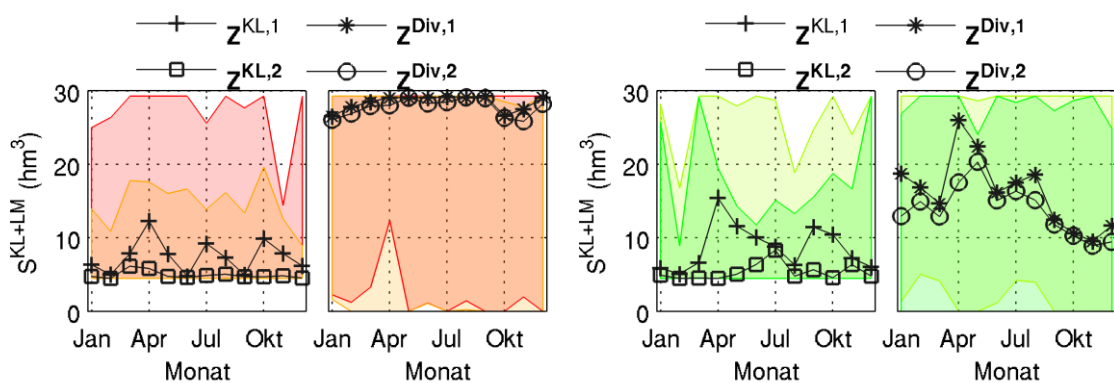


Abbildung 34: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-1 (links) und CI-2 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

Wie die hohe Spannweite der monatlichen Staulamellenwerte innerhalb der einzelnen Cluster andeuten, beherbergen die Cluster eine hohe Anzahl unterschiedlicher Staulamellenformen (Abbildung 34 und Abbildung 35). Während die Staulamellen der repräsentativen Lösungen CI-1 und CI-2, als auch der Lösung max(FF1) (Abbildung A 21, links) mit den Staulamellen bisheriger Lösungen vergleichbar sind, sind $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ der repräsentativen Lösungen CI-3 und CI-4, als auch der Lösung min(FF3) (Abbildung A 21, rechts) spezifisch für dieses Szenario. Eine Überleitung von Brauchwasser wird vor allem im Zeitraum Dezember bis Juni realisiert. Von Juli bis November werden die Talsperren KL und LM so gut wie leer gefahren, bevor die Stützung aktiviert wird.

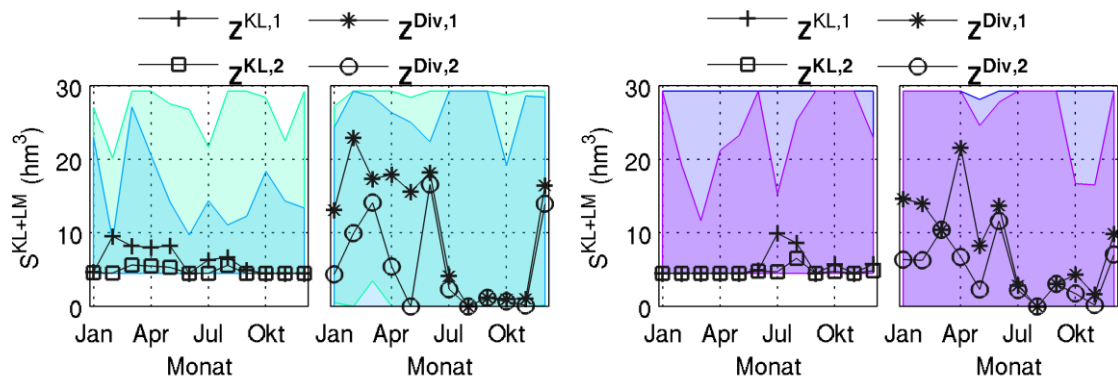


Abbildung 35: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für Cluster CI-3 (links) und CI-4 (rechts). Die farbigen Flächen geben 100% der Spannweite der monatlichen Werte der Staulamellen für alle Lösungen des jeweiligen Clusters an.

4.5 Übergreifende Vergleiche

In den folgenden zwei Abschnitten sollen die einzelnen Ergebnisse der MKOs zu den jeweiligen Emissionsszenarien einer Zeitscheibe miteinander verglichen werden. Hierzu werden wiederum Level Diagramme genutzt. Alle MKO werden hierzu als ein Datensatz einer MKO betrachtet, wobei die einzelnen MKO eines Emissionsszenarios jeweils als ein Cluster behandelt werden. Durch diese Vorgehensweise können alle Lösungen gegen einen gemeinsamen Utopia-Punkt mit Hilfe einer p-Norm miteinander verglichen werden.

4.5.1 Übersicht Zeitscheibe 2021-2050, WETTREG2010

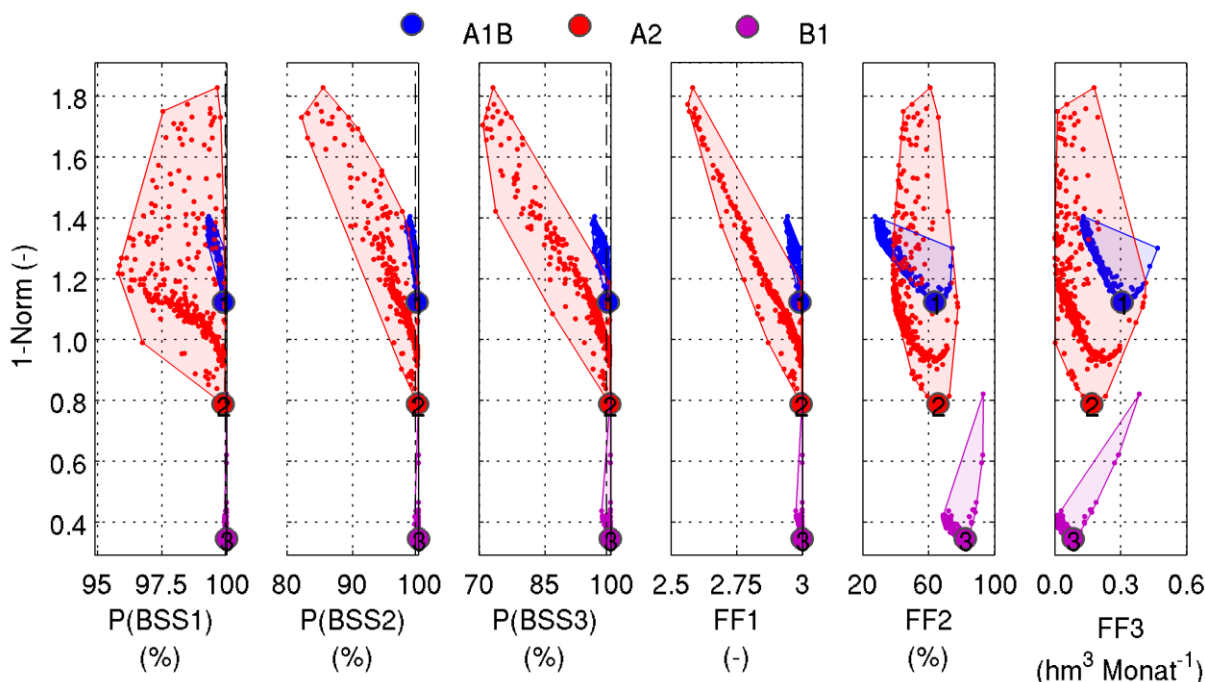


Abbildung 36: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (rot), A2 (grün) und B1 (blau) unter Verwendung der 1-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2021-2050 (WETTREG2010).

Für die Zeitscheibe 2021-2050 sind infolge der unterschiedlichen Entwicklungen des CO₂-Ausstoßes und der daran gekoppelten Klimaprojektionen auch große Unterschiede in der mengenmäßigen Entwicklung der Talsperrenzuflüsse vorhanden (siehe Tabelle 1). Dies wird auch durch das Level Diagramm für die Zeitscheibe 2021-2050 in Abbildung 36 ersichtlich, welches zur Visualisierung auf die 1-Norm zurückgreift. Das Cluster CI-3, das die MKO für das Emissionsszenario B1 repräsentiert besitzt die geringsten Distanzen zum Utopia-Punkt. Cluster CI-2 (A2) besitzt Lösungen mit deutlich besseren Distanzen als (A1B), aber auch Lösungen mit schlechteren Distanzen. Diese Lösungen besitzen deutlich geringere FF1 Funktionswerte. Unter der Verwendung anderer p-Normen wie der 2-Norm und der Inf-Norm behält CI-3 wie zu erwarten ebenso die geringsten Distanzen (Tabelle A 5).

Von den drei Emissionsszenarien sind sich A1B und A2 am ähnlichsten. Nach Tabelle 17 ergeben sich auch sehr ähnliche erreichte Versorgungssicherheiten, und somit auch sehr ähnlichen FF1 Funktionswerte für die repräsentativen Lösungen unter der 1-Norm. Die Funktionswerte FF2 liegen ebenso in einer ähnlichen Größenordnung. Hierfür ist für CI-1 jedoch fast die doppelte mittlere monatliche Überleitungsmenge von Nöten. Beide Lösungen CI-1 und CI-2 verfehlen die erforderliche Versorgungssicherheit der Bereitstellungsstufe eins, genügen jedoch allen anderen geforderten Versorgungssicherheiten. Im Vergleich der Lösungen mit der 2-Norm und der Inf-Norm ergeben sich nur geringe Unterschiede für die repräsentative Lösung CI-1. Unter der 2-Norm als auch unter der Inf-Norm werden repräsentative Lösungen mit geringeren FF3 Funktionswerten ermittelt. Der geringste FF3 Zielfunktionswert ergibt sich für die Inf-Norm.

Tabelle 17: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung aller Emissionsszenarien für die Zeitscheibe 2021-2050.

Lösung	P-Norm	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm ³ Monat ⁻¹)
CI-1 (A1B)	1	99,878	99,733	99,403	2,990	63,643	0,306
CI-1 (A1B)	Inf	99,815	99,693	98,816	2,983	56,686	0,265
CI-1 (A1B)	2	99,871	99,720	99,348	2,989	59,266	0,282
CI-2 (A2)	1, 2, Inf	99,859	99,811	99,743	2,994	65,667	0,168
CI-3 (B1)	1, 2, Inf	99,995	99,966	99,869	2,998	82,168	0,083

Der Vergleich der Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der 1-Norm zeigt nur in wenigen Punkten vergleichbare Merkmale. Diese betreffen vor allem die Lösungen CI-1 und CI-2, da das hydrologische Zuflussregime für CI-3 zu stark von den anderen unterscheidet. Nach Abbildung A 22 beginnt die Staulamelle $Z^{KL,1}$ der Lösungen CI-1 (blau) und CI-2 (rot) im Januar mit etwa 22,5 hm³ und fällt dann bis zum April auf die untere Randbedingung von 4,5 hm³ ab. Im April wird somit konstant über den gesamten Bereich S^{KL+LM} von 29,38 hm³ bis 4,5 hm³ eine Abgabe von 1,00 m³s⁻¹ realisiert. Von Mai bis Dezember unterscheiden sich die Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ der beiden Lösungen, reduzieren die Abgaben jedoch schon bei schwankend höheren Stauinhalten.

4.5.2 Übersicht Zeitscheibe 2071-2100, WETTREG2010

Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, sind die hydrologischen Rahmenbedingungen in den einzelnen Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 für die Jahre 2071-2100 sehr ähnlich. Demnach sollten sich auch die Lösungen der MKO unter den Emissionsszenarien dieser Zeitscheibe nicht zu sehr unterscheiden.

Tabelle 18: Distanzen der repräsentativen Lösungen zum Utopia Punkt in unterschiedlichen p-Normen integrierten Vergleich. Zeitscheibe 2071-2100.

Lösung	p-Norm		
	1	2	Inf
CI-1 (A1B)	0,421	0,378	0,557
CI-2 (A2)	0,462	0,3482	0,548
CL-3 (B1)	0,475	0,35	0,537

Ein Blick auf die Level Diagramme die alle MKO unter den Emissionsszenarien gegenüberstellen (Abbildung A 23, Abbildung A 24 und Abbildung A 25) zeigt deutlich, dass sich die konkaven Hüllen um die jeweiligen Cluster der Emissionsszenarien decken. Dies gilt sowohl für die Spannweiten der jeweiligen Zielfunktionswerte und erreichten Versorgungssicherheiten, als auch für die jeweiligen Distanzen unter den betrachteten p-Normen.

Die repräsentativen Lösungen, die sich je nach betrachteter p-Norm für ein Cluster unterscheiden, weisen für die Emissionsszenarien sehr ähnliche Werte auf (Tabelle 18). So unterscheiden sich Distanzen der repräsentativen Lösungen für die drei Cluster unter der 1-Norm bei einer Spannweite aller Distanzen von ca. 1,00 lediglich um ca. 0,05. Bei Nutzung der 2-Norm ist der Unterschied 0,03 bei einer Spannweite von ca. 0,7 – und bei Verwendung der Inf-Norm ist der Unterschied 0,02 bei einer Spannweite von 0,5. Je nach p-Norm weißt jeweils eine andere repräsentative Lösung die geringste Distanz auf. Somit lässt sich keine der Lösungen als eindeutig beste, oder ausgeglichene Kompromisslösung bestimmen.

Das Level Diagramm auf Basis der 1-Norm (Abbildung A 23) bewertet Lösungen mit steigenden mittleren monatlichen Überleitungsmengen (FF3) mit zunehmend besseren Distanzen. Somit weisen die zugehörigen repräsentativen Lösungen nach Tabelle 19 auch sehr hohe Zielfunktions-

werte FF3 zwischen $0,48 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$ und $0,42 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$ auf. Die Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre Klingenberg im April (FF2) liegt zwischen 60 % und 66 %. Die Versorgungssicherheiten werden von allen Lösungen für die Bereitstellungsstufen BSS3 erreicht. Die erreichte Versorgungssicherheit $P(\text{BSS1})$ ist bei allen Lösungen zu gering. Die Lösung mit der geringsten Distanz, CI-1, kann als einzige auch die Versorgungssicherheit der Bereitstellungsstufe BSS2 nicht erreichen, weist dafür jedoch die geringsten Bedarf an monatlicher Überleitungsmenge FF3 auf.

Tabelle 19: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(\text{BSS1})$ bis $P(\text{BSS3})$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der 1-Norm.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($\text{hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$)
CI-1 (A1B)	99,523	99,371	97,996	2,969	60,195	0,421
CI-2 (A2)	99,790	99,751	99,020	2,986	62,723	0,462
CI-3 (B1)	99,809	99,763	99,007	2,986	66,109	0,475

Wird die 2-Norm zur Berechnung des Level Diagramms verwendet, zeigt sich wiederum eine schnelle Abnahme der Distanzen mit zunehmenden FF3 Zielfunktionswerten bis in den Bereich von $0,34 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$ bis $0,38 \text{ hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$ (Abbildung A 24). Lösungen mit höheren FF3 Zielfunktionswerten weisen wiederum höhere Distanzen auf. Demnach werden unter der 2-Norm Lösungen mit monatlichen Überleitungsmengen präferiert. Dies bedeutet gleichzeitig geringere erreichte Versorgungssicherheiten und FF2 Zielfunktionswerte.

Tabelle 20: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten $P(\text{BSS1})$ bis $P(\text{BSS3})$ und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der 2-Norm.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 ($\text{hm}^3 \text{ Monat}^{-1}$)
CI-1 (A1B)	99,543	99,048	97,373	2,960	52,003	0,378
CI-2 (A2)	99,603	99,485	98,755	2,978	37,679	0,348
CI-3 (B1)	99,633	99,508	98,824	2,980	38,832	0,350

Nach BLASCO et al. (2008) sind die Abbildungen der Pareto-Fronten in Level Diagramme der Inf-Norm V-förmig, wenn sich zwei, oder mehrere Zielfunktionen konträr verhalten. Dieses Verhalten ist in Abbildung A 25 gut zu erkennen, auch wenn der Gesamtdatensatz im eigentlichen Sinne keine Pareto-Front ist. Die Abbildung der Pareto-Front für FF3 ist strikt V-förmig. Für FF1 und FF2 zeigen sich die typischen linear verlaufenden Ränder der Darstellung für die Bereiche mit Zielfunktionswerten kleiner als der jeweils zugehörigen repräsentativen Lösungen. Die repräsentativen Lösungen der Pareto-Sätze der MKO für die unterschiedlichen Emissionsszenarien besitzen im Vergleich zu den repräsentativen Lösungen der beiden anderen p-Normen die geringsten FF3 Zielfunktionswerte (Tabelle 21). Hierdurch ergeben sich ebenso die geringsten Zielfunktionswerte für FF2 und FF1. Alle diese Werte liegen in etwa im Mittelfeld der Spannweite der jeweiligen Zielfunktionswerte.

Tabelle 21: Werte der erreichten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und der Zielfunktionen FF1 bis FF3 für die repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung unter Berücksichtigung aller Emissionsszenarien in der Zeitscheibe 2071-2100 und der Inf-Norm.

Lösung	P(BSS1) (%)	P(BSS2) (%)	P(BSS3) (%)	FF1 (-)	FF2 (%)	FF3 (hm ³ Monat ⁻¹)
CI-1 (A1B)	99,436	94,761	66,064	2,603	34,471	0,283
CI-2 (A2)	99,728	95,254	66,813	2,618	33,575	0,279
CI-3 (B1)	99,793	92,721	67,073	2,596	34,053	0,274

Abschließend sollen die, zu den repräsentativen Lösungen zugehörigen, Staulamellen für eine p-Norm untereinander verglichen werden. Nach Abbildung A 26 ist offensichtlich, dass neben den Zielfunktionswerten auch die zugehörigen Staulamellen der repräsentativen Lösungen der 1-Norm untereinander eine gewisse Ähnlichkeit besitzen. Der innerjährliche Verlauf der Staulamellen $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ bedingt jeweils größere Zonen BSS1, BSS2 von März bis April, gefolgt von einer Periode mit erneut größeren Zonen BSS1 und BSS2 von Oktober bis Dezember. Die Staulamellen $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ unterteilen den Stauraum in eine ganzjährig sehr große Zone DIV1 und kleine Zonen DIV2 und DIV3, so dass das ganze Jahr hinweg ab geringen Fehlmengen mit 0,6 hm³ je Monat gestützt wird.

Unter der 2-Norm gleichen sich die Lösungen CI-2 (A2) und CI-3 (A1B) bezüglich dem Verlauf von $Z^{KL,1}$ und $Z^{KL,2}$ (Abbildung A 27). Die repräsentative Lösung CI-1 folgt dem Verlauf der anderen beiden Lösungen nur bedingt von Oktober bis Dezember. Eine gute Übereinstimmung im Verlauf der Staulamellen ist für $Z^{Div,1}$ und $Z^{Div,2}$ festzustellen.

Die Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der Inf-Norm (Abbildung A 28) besitzen einen sehr unruhigen innerjährlichen Verlauf. Ähnlichkeiten im Verlauf können für die Staulamellen $Z^{KL,1}$ in den Monaten August bis Dezember festgestellt werden. Die Überleitung wird bei allen Lösungen in den Monaten Mai und von September bis November erst bei sehr geringen Füllständen der beiden Talsperren KL und LM aktiviert.

Somit lassen sich unter jeder p-Norm ansatzweise ähnliche Bewirtschaftungsstrategien der jeweiligen repräsentativen Lösungen finden.

5. Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach im sächsischen Osterzgebirge wird in dieser Arbeit für projizierte Szenarien des Klimawandels und unter rezenten Bedingungen untersucht. Unter Beachtung mehrerer, teilweise konträrer Bewirtschaftungsziele und Talsperrennutzungen werden hierfür zunächst optimal angepasste Bewirtschaftungsstrategien durch eine multi-kriterielle simulationsbasierte Optimierung (MKO) ermittelt. Dieses Vorgehen ist notwendig um für die projizierten Szenarien die jeweils besten Bewirtschaftungsregeln zur Simulation der Talsperrenbewirtschaftung zu generieren. Nur dann kann die szenario-bezogene maximale Leistungsfähigkeit garantiert und somit belastbare Aussagen über die Robustheit des Talsperrensystems gemacht werden. Gleichzeitig stellen die mit der MKO ermittelten Bewirtschaftungsstrategien, basierend auf Stauraumaufteilungen durch Staulamellen, bestmögliche Adaptionstrategien gegen den Klimawandel dar.

Die Ziele werden in drei Zielfunktionen formuliert. Diese sind (1) FF1: die Maximierung der Versorgungssicherheit unter Berücksichtigung von drei Bereitstellungsstufen mit jeweils eigenen geforderten Versorgungssicherheiten und Abgaberaten, (2) FF3: die Stützung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle durch die Talsperre Rauschenbach soll als mittlere monatliche Überleitungsmenge so gering wie möglich und so groß wie nötig sein (3) FF2: als Indikator für die Wasserqualität soll die Wahrscheinlichkeit einer vollen Talsperre im April möglichst hoch sein.

In dieser Arbeit (Produkt 3.2.1d) hält sich die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems bestmöglich an das Vorgehen des Talsperrenbetreibers, die Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV), um so interpretierbare Ergebnisse zu ermöglichen. Die LTV verwendet langjährige (10000 Jahre) Bemessungszeitreihen auf monatlicher Basis um die erreichten Versorgungssicherheiten der Abgabe von Brauchwasser zur Trinkwassergenerierung durch die Simulation des Talsperrenbetriebs in drei Bereitstellungsstufen zu prüfen. Da dieses Vorgehen mit klassischen MKO Methodiken durch die hieraus resultierenden, erheblichen Rechenzeiten nicht möglich ist (Laufzeit einer MKO von ca. einem Jahr) wird in dieser Arbeit ein robustes und effizientes simulationsbasiertes MKO Framework entwickelt, dass durch den Einsatz unterschiedlichster Techniken die Rechenzeit erheblich verkürzt (Laufzeit einer MKO von ca. 4 Tage). Erst durch den Einsatz des entwickelten MKO Frameworks ist es machbar bestmögliche Adaptionstrategien auch für mehrere projizierte Klimawandelszenarien in einer angemessenen Zeit zu ermitteln. Durch den Einsatz von fortgeschrittenen Visualisierungs - und Entscheidungshilfemethodiken werden die Ergebnisse für den Entscheidungsträger auf wenige repräsentative Lösungen zusammengefasst und in einer leicht verständlichen Form präsentiert.

Bereits im Produkt 3.2.1a (MÜLLER et al. 2013a) konnten durch den Einsatz des, mittels MKO objektiv parametrisierten, Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH (SCHULLA 1997) Talsperrenzuflüsse für die projizierten Klimaszenarien (Emissionsszenarien A1B, A2 und B1, regionale Klimamodelle WETTREG2010 und CLM, globales Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM T63 Lauf 1) modelliert werden. Diese Talsperrenzuflüsse wurden dann im Produkt 3.2.1b (MÜLLER et al. 2013b) für die Zeitscheiben 1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 und 2071-2100 multivariat stochastisch verlängert. Hierbei zeigt sich für das regionale Klimamodell WETTREG2010 eine mittlere Abnahme der Talsperrenzuflüsse für die Zeitscheibe 2021-2050 von ca. 25 % und bis zum Jahr 2100 von ca. 50 %. Das regionale Klimamodell CLM weist im Vergleich hierzu für dieselben Emissionsszenarien keinerlei nennenswerte Abnahmen der Talsperrenzuflüsse auf. Da für die projizierten Zuflüsse unter CLM keine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Talsperren zu erwarten ist, werden hierfür keine MKO durchgeführt. Die bisher gültigen Bewirtschaftungsregeln sollten hier auch unter den projizierten klimatischen Entwicklungen ihre Gültigkeit behalten. Um der hohen Abnahme der Zuflüsse in der Zeitscheibe 2071-2100 unter WETTREG2010 zu entsprechen, werden die Abgaben des Talsperrensystems für alle Szenarien in dieser Zeitscheibe reduziert.

Für die Szenarienrechnungen unter rezenten klimatischen Bedingungen sind nur sehr geringe mittlere monatliche Überleitungsmengen aus der Talsperre Rauschenbach zur Unterstützung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle notwendig. Die Stützung durch die Beileitung ist jedoch notwendig, um die geforderten Versorgungssicherheiten gewährleisten zu können. Um die Generalisierbarkeit des Ansatzes zu demonstrieren, werden weitere Szenarien unter rezenten klimatischen Verhältnissen gerechnet um Bewirtschaftungsregeln zu ermitteln und die Kompromisse zwischen den Talsperrennutzungen und Bewirtschaftungszielen analysieren zu können. Die Szenarien umfassen die Einführung einer vierten Bereitstellungsstufe mit einer erhöhten Abgabeleistung.

Durch die Reduktion der Talsperrenzuflüsse in der Zeitscheibe 2021-2050 um etwa 25 % im Vergleich zum Zeitraum 1921-2007 gewinnt die Stützung der Talsperren Klingenberg und Lehmühle durch die Talsperre Rauschenbach an Bedeutung. Mit deutlich erhöhten mittleren monatlichen Überleitungsmengen lassen sich weiterhin hohe Versorgungssicherheiten hinsichtlich der Bereitstellungsstufen erreichen. Jedoch kann die geforderte Versorgungssicherheit der Bereitstellungsstufe mit der geringsten Überleitungsmenge (BSS1) in den Emissionsszenarien A1B und A2 nicht mehr voll befriedigt werden. Die Wahrscheinlichkeit einer gefüllten Talsperre Klingenberg im April, die als Indikator-Variable für Aspekte der Wasserqualität steht, schwankt je nach Überleitungsmenge zwischen 20 % und 80 %. Das Emissionsszenario B1 weist 2021-2050 nur minimale Rückgänge der Zuflüsse auf, so dass keinerlei Verschärfung der Versorgungssituation projiziert werden kann.

Trotz der reduzierten Abgabemengen an Brauchwasser zur Trinkwassergewinnung auf etwa 75 % der heutigen Raten sinken in der letzten Zeitscheibe die Versorgungssicherheiten stark ab. Um akzeptable Werte für den Indikator der Wasserqualität FF2 und die Versorgungssicherheit zu erreichen, müssen sehr hohe mittlere monatliche Überleitungsmengen in Kauf genommen werden. Vor allem in der Zeitscheibe 2071-2100 kann es zu Problemen mit der Wasserqualität kommen, da eine komplette Füllung der Talsperre Klingenberg im April je nach Lösung nur noch zwischen 7 % und 65 % realisiert werden kann.

Wie der Vergleich aller Lösungen der einzelnen MKO in den Zeitscheiben zeigt, sind sich diese in der letzten Zeitscheibe für alle Emissionsszenarien sehr ähnlich. Dies gilt sowohl für die Zielfunktionswerte, als auch für die Ausprägungen der zugehörigen Staulamellen. Werden unterschiedliche p-Normen als Grundlage für die Visualisierungs- und Entscheidungshilfemethodik auf Basis von Level Diagrammen verwendet, können unterschiedliche Typen von repräsentativen Lösungen gewonnen werden. Hierbei favorisiert die 1-Norm Lösungen mit sehr guten FF1 und FF3 Werten, die Inf-Norm resultiert in Lösungen mit sehr ausgewogenen Kompromissen zwischen allen Zielfunktionen und die 2-Norm resultiert in Lösungen mit FF3 Werten zwischen den anderen beiden Normen.

Wird der Stress auf das Talsperrensystem durch fallende Zuflüsse erhöht steigt die Variabilität der Staulamellen die durch die MKO ermittelt werden. Dies wird durch die steigende Bandbreite der monatlichen Staulamellenwerte (z.B. Abbildung 34) für die Cluster der jeweiligen Level Diagramme deutlich. Für die rezenten klimatischen Verhältnisse sind diese Bandbreiten für die einzelnen Clustern sehr gering. Mit den Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 nehmen diese Bandbreiten zu. Demnach erfordern extremere Bedingungen immer speziellere Lösungen um den Pareto-optimalen Zielfunktionsraum abdecken zu können (sprich: alle möglichen Kompromisse darzustellen).

Sind die projizierten Leistungsfähigkeiten der Talsperrennutzungen und Bewirtschaftungsziele selbst mit den optimalen, durch die MKO ermittelten, Anpassungsstrategien (adaptierten Bewirtschaftungsstrategien) nicht ausreichend, müssen weiter gehende Maßnahmen in Betracht gezogen werden. Nach WINKLER (2013) kann ein Ausbau der Verbundbewirtschaftung durch den Ausgleich von Kapazitäten zwischen weiteren Talsperren zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Talsperren beitragen. Hier können bestehende oder neue Talsperren in ein vergrößertes Talsperrensystem einbezogen werden. Weiterhin kann Wasser aus benachbarten Einzugsgebieten zur mengenwirtschaftlichen Stützung beigeleitet werden. Die Reduktion der Brauchwasserabgaben zur Trinkwassergewinnung muss gegebenenfalls durch andere Quellen kompensiert werden. So könnte, freie Kapazitäten vorausgesetzt, Trinkwasser aus Grundwasser gewonnen werden. Eine gesteigerte

Bereitstellung durch den Ausbau der Trinkwassergewinnung durch Uferfiltrat wäre ebenfalls denkbar.

Die in dieser Arbeit betrachteten Szenarien beruhen ausschließlich auf den Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 die mit dem regionalen Klimamodell WETTREG2010 modelliert wurden (Datengrundlage hierfür ist ECHAM5/MPI-OM T63 Lauf 1) und umfasst eine überschaubare Anzahl von ausgesuchten Szenarienrechnungen. Weitere mögliche Szenarien könnten höhere Abgabeanforderungen durch einen höheren kommunalen oder industriellen Wasserverbrauch oder zusätzlichen landwirtschaftlichen Bedarf durch Bewässerungsgaben berücksichtigen. Diese Szenarien wurden hier vernachlässigt, da das Talsperrensystem in der letzten Zeitscheibe auch ohne zusätzliche Abgabeanforderungen am Limit operiert.

In der Klimafolgenforschung ist weiterhin die Verwendung von Ensembles von globalen Klimamodellen und weiteren Emissionsszenarien geläufig. Da das in dieser Arbeit entwickelte simulationsbasierte multi-kriterielle Optimierungsframework durch seine Generalisierbarkeit auch für andere Talsperrensysteme eingesetzt werden kann, liefert es somit eine wichtige Grundlage um die Robustheit von anderen Talsperrensystemen unter der bestmöglichen Bewirtschaftung zu analysieren und Adaptionstrategien zu entwickeln. Vorteilhaft sind dabei die Effizienz (geringe Rechenzeiten und Ausnutzung der Möglichkeiten moderner Hardware), sowie die Robustheit (effektive Ausnutzung von großen Datengrundlagen in der Monte-Carlo Simulation) des Frameworks.

Literatur

- Ashrafzadeh, A. & Rizi, A. P. A Hybrid Neural Network Based Model for Synthetic Time Series Generation. Interational Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, 2009
- Blasco, X.; Herrero, J.; Sanchis, J. & Martínez, M.
A new graphical visualization of n-dimensional Pareto front for decision-making in multiobjective optimization Information Sciences, 2008, 178, 3908 – 3924
- Castelletti, A.; Pianosi, F.; Quach, X. & Soncini-Sessa, R.
Assessing water reservoirs management and development in Northern Vietnam Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16, 189-199
- Chang, L.-C. & Chang, F.-J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system Journal of Hydrology, 2009, 377, 12-20
- Chen, L.; Mcphee, J. & Yeh, W. W.
A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves Advances in Water Resources, 2007, 30, 1082-1093
- Coello Coello, C.
A. Constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms Proceedings of the 12th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation, ACM, 2010, 2603-2624
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S. & Meyarivan, T.
A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, 6, 182-197
- Dittmann, R.; Froehlich, F.; Pohl, R. & Ostrowski, M.
Optimum multi-objective reservoir operation with emphasis on flood control and ecology Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2009, 9, 1973-1980
- Edelsbrunner, H.; Kirkpatrick, D. G. & Seidel, R.
On the shape of a set of points in the plane IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4), 551-559
- Franke, J.; Goldberg, V.; Eichelmann, U.; Freydank, E. & Bernhofer, C.
Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. Climate Res. 27(2), 2004,145–150.
- Heidenreich, M.; Franke, J.; Goldberg, V.; Surke, M.; S. Hänsel, A. H.; Feske, N. & Foltyn, M., Bernhofer, C.; Matschullat, J. & Bobeth, A. (Eds.) Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden REGKLAM-Publikationsreihe, RHOMBOS-VERLAG, 2011
- Hydrologics Inc. (2009) User manual for OASIS with OCL, www.HydroLogics.net, 2009.
- Igel, C.; Hansen, N. & Roth, S. Covariance Matrix Adaptation for Multi-objective Optimization, Massachusetts Institute of Technology, Evolutionary Computation, 2007, 15(1), 1-28
- Igel, C.; Heidrich-Meisner, V. & Glasmachers, T.
Shark, Journal of Machine Learning Research, 2008, 9, 993-996
- IPCC
IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES): Chapter 4: An Overview of Scenarios, 2000
- Kim, T.; Heo, J.-H.; Bae, D.-H. & Kim, J.-H.
Single-reservoir operating rules for a year using multiobjective genetic algorithm Journal of Hydroinformatics, 2008, 10.1, 163-179

- Kohonen, T. Self-organizing maps Springer Verlag, 2001, 30
- Koutsyiannis, D. The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(4), 573-595
- Krzysztofowicz, R. Transformation and normalization of variates with specified distributions Journal of Hydrology, 1997, 197, 286 – 292
- Labadie, J. W. Optimal Operation of Multi-reservoir Systems: State-of-the-Art Review Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130, 93-111
- Labadie, J. W. MODSIM: River Basin Network Flow Model for Conjunctive Stream-Aquifer Management Program. User Manual and Documentation. Colorado State University, 1995
- Lotov, A. & Miettinen, K. ; Branke, J.; Deb, K.; Miettinen, K. & Slowinski, R. (Eds.) Visualizing the Pareto Frontier Multiobjective Optimization, Springer Berlin / Heidelberg, 2008, 5252, 213-243
- Malekmohammadi, B.; Zahraie, B. & Kerachian, R. Ranking solutions of multi-objective reservoir operation optimization models using multi-criteria decision analysis Expert Systems with Applications , 2011, 38, 7851 - 7863
- Maniak, U. Hydrologie und Wasserwirtschaft, Eine Einführung für Ingenieure Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005
- Müller, R.; Schütze, N. Improving the future performance and reliability multi-reservoir systems by multi-objective optimization, In: Proceedings of Symposium H09, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, 2013
- Müller, R.; Prange, N.; Lennartz, F.; Schütze, N. (2013a) REGKLAM Ergebnisbericht Produkt 3.2.1a, Wasserhaushalt für projizierte Klimaszenarien, 2013
- Müller, R.; N.; Lennartz, F.; Schütze, N. (2013b) REGKLAM Ergebnisbericht Produkt 3.2.1b, Stochastische Generierung von Zuflusszeitreihen, 2013
- Obayashi, S. & Sasaki, D. Visualization and data mining of Pareto solutions using self-organizing map Proceedings of the 2nd international conference on Evolutionary multi-criterion optimization, Springer-Verlag, 2003, 796-809
- OpenMP Architecture Review Board, "OpenMP Application Program Interface, Version 2.0", March 2002.
- Pryke, A.; Mostaghim, S. & Nazemi, A. Heatmap visualization of population based multi objective algorithms Proceedings of the 4th international conference on Evolutionary multi-criterion optimization, Springer-Verlag, 2007, 361-375
- Rani, D.; Moreira & Madalena, M. Simulation–Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation Water Resources Management, 2010, 24, 1107-1138
- Reddy, M. & Kumar, D. N. Optimal Reservoir Operation Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm Water Resources Management, 2006, 20, 861-878

- Reddy, M. J. & Kumar, D. N. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons, Ltd., 2007, 21, 2897-2909
- Reddy, M. & Kumar, D. N. Evolving strategies for crop planning and operation of irrigation reservoir system using multi-objective differential evolution *Irrigation Science*, Springer-Verlag, 2008, 26, 177-190
- REGKLAM HomePage: <http://www.regklam.de/home/>; Aufgerufen: Juni 2013
- Schulla, K. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Diss. ETH Nr.12018, Verlag Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1997.
- Tan, Y. S. & Fraser, N. M. The modified star graph and the petal diagram: two new visual aids for discrete alternative multicriteria decision making *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, Ltd., 1998, 7, 20-33
- Wall, L.; Christiansen, T. & Orwant, J. Programming Perl, 3rd Edition O'Reilly Media, 2000
- Winkler, U. Die Talsperrenbewirtschaftung im Spannungsfeld von Trockenperioden und Hochwasserereignissen, <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/1304.htm>, (Juni 2013)
- Woldesenbet, Y. G.; Yen, G. G. & Tessema, B. G. Constraint handling in multiobjective evolutionary optimization *Trans. Evol. Comp*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., The, 2009, 13, 514-525
- Yeh, W. W.-G. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review *Water Resources Research*, 1985, 21, 1797-1818
- Zitzler, E. & Thiele, L. Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms - A Comparative Case Study, Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN V), 1998, 292-301
- Zio, E. & Bazzo, R. A clustering procedure for reducing the number of representative solutions in the Pareto Front of multiobjective optimization problems *European Journal of Operational Research*, 2011, 210, 624 - 634

Anhang

Abschnitt 2.1

Zeitabschnitt 1921-2007

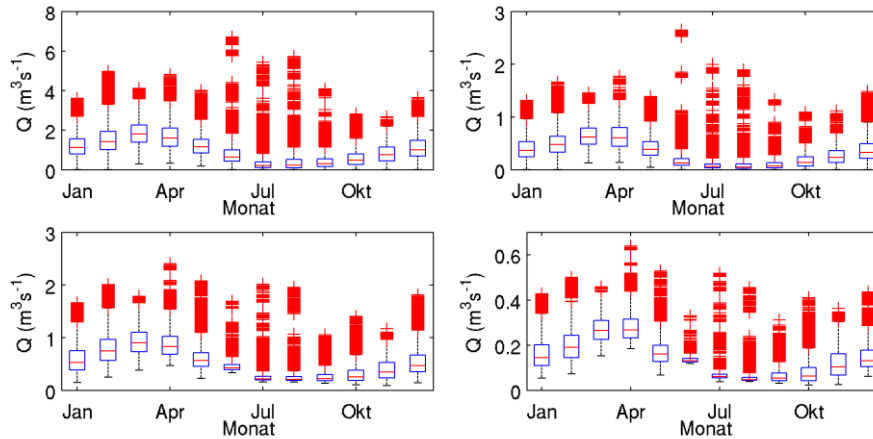


Abbildung A 1: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios 1921-2007. Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

Zeitscheibe 2021-2050, WETTREG2010

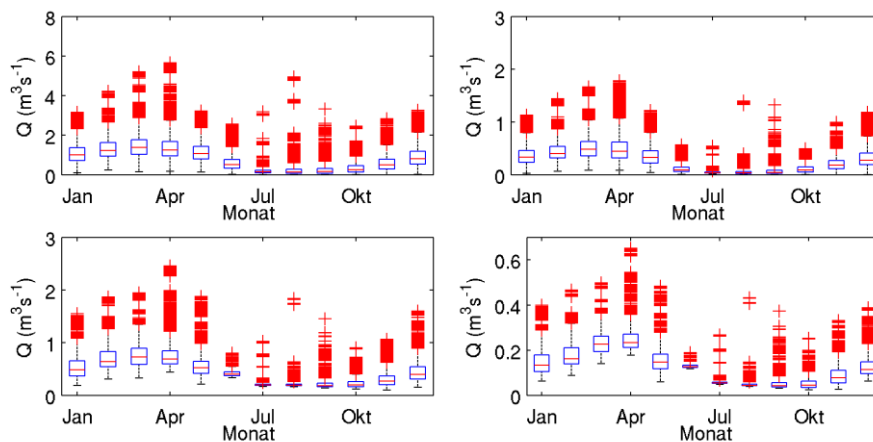


Abbildung A 2: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A1B, 2021-2050 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

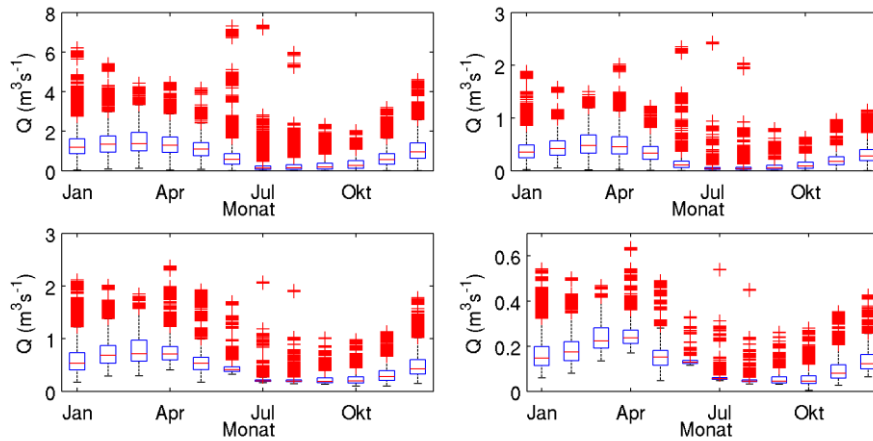


Abbildung A 3: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A2, 2021-2050 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

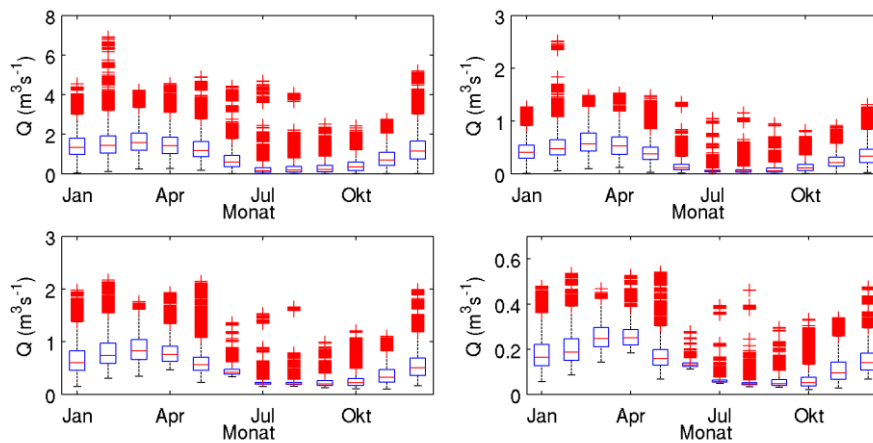


Abbildung A 4: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios B1, 2021-2050 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

Zeitscheibe 2071-2100, WETTREG2010

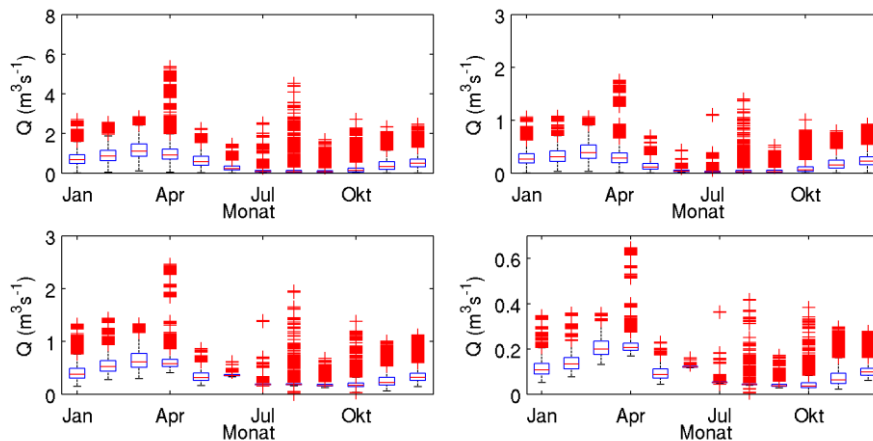


Abbildung A 5: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A1B, 2071-2100 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

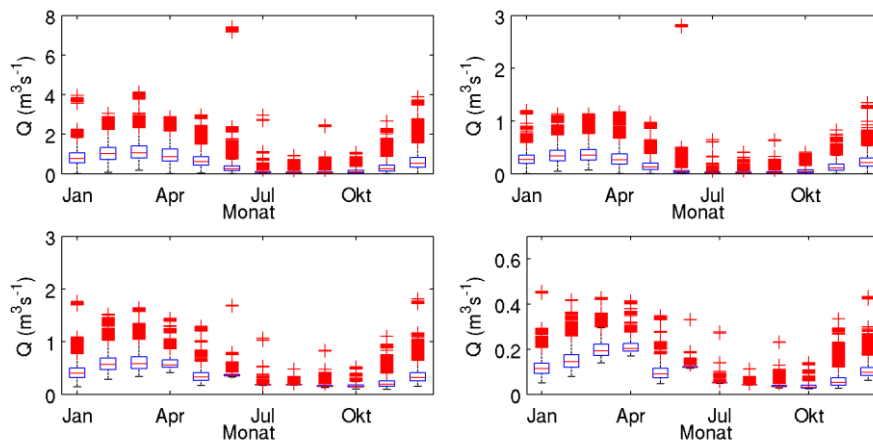


Abbildung A 6: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios A2, 2071-2100 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

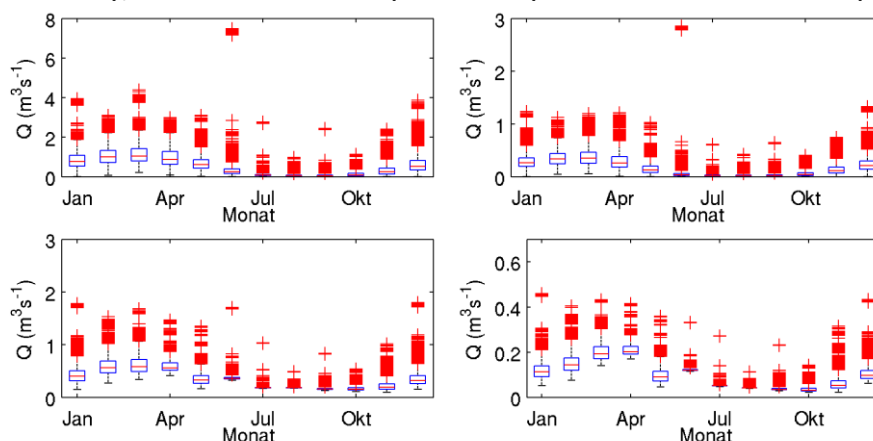


Abbildung A 7: Box Plots der mittlere monatlichen Zuflüsse für das hydrologische Regime des Szenarios B1, 2071-2100 (WETTREG2010). Abgebildet ist der lokale Zufluss A (oben links), der lokale Zufluss B (oben rechts), der lokale Zufluss C (unten links) und der lokale Zufluss D (unten rechts).

Abschnitt 2.2

Tabelle A 1: Kenndaten der Talsperren Klingenberg, Lehmühle und Rauschenbach (nach WINKLER 2013)

	TS Klingenberg	TS Lehmühle	TS Rauschenbach
Baujahr	1908-1914	1927-1931	1960-1968
Fließgewässer	Wilde Weißeritz		Flöha
<u>Stauraumaufteilung</u>			
Totraum (hm ³)	0,00	0,00	0,00
Reserveraum (hm ³)	2,00	2,50	2,30
Betriebsraum (hm ³)	12,37	12,42	8,90
Gew. HQ-Raum (hm ³)	2,00	7,00	4,00
Stauraum (hm ³)	16,38	21,92	15,20
<u>Ausbaugrade</u>			
Für Eigeneinzugsgebiet (%)	146 (ohne TS LM)	63	81 (ohne TS Flaje)
Für Gesamteinzugsgebiet (%)	35 (mit TS LM)	-	36 (mit TS Flaje)
Einzugsgebiete			
Eigeneinzugsgebiet (km ²)	29 (ohne TS LM)	60,4	26,9
Gesamteinzugsgebiet (km ²)	89,4 (mit TS LM)	-	70,5
<u>Zuflüsse</u>			
Eigeneinzugsgebiet (km ² a ⁻¹)	11,0	1,10	18,9
Gesamteinzugsgebiet (km ² a ⁻¹)	45,7	-	1,34

Abschnitt 2.3

Zu 2.3.3

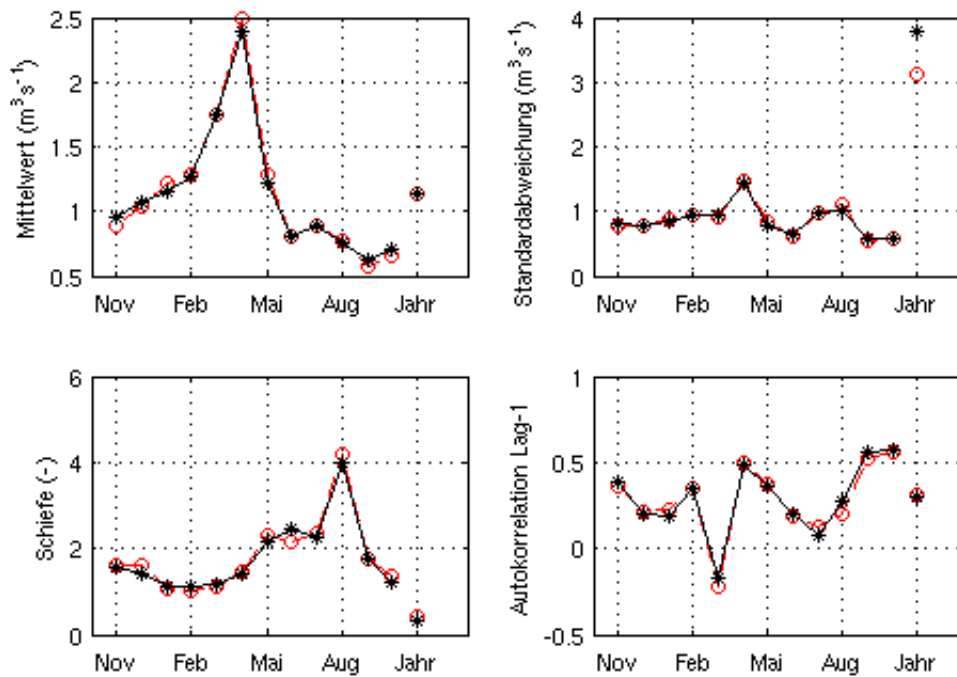


Abbildung A 8: Vergleich der grundlegenden statistischen Parameter (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Autokorrelationskoeffizient auf monatlicher und jährlicher Zeitskala) zwischen der ungekürzten 10000 jährigen Zeitreihe (schwarz) und der auf 882 Jahre gekürzten Zeitreihe (rot) für die Szenarien basierend auf den Jahren 1921-2007.

Abschnitt 4.1

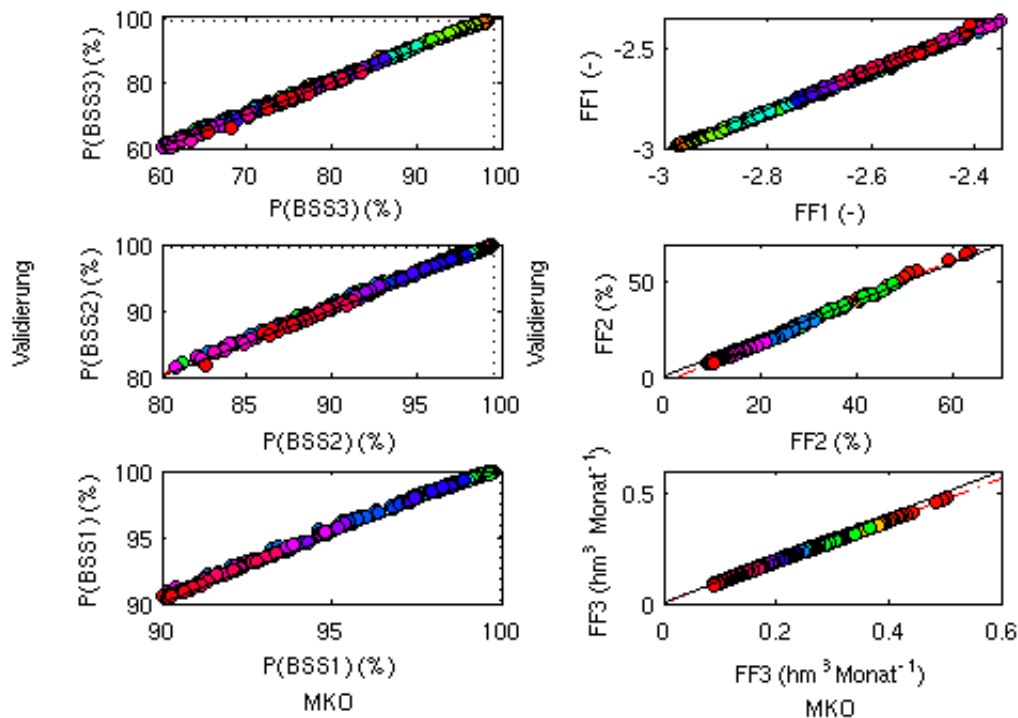


Abbildung A 9: Streudiagramme zwischen den ermittelten Versorgungssicherheiten P(BSS1) bis P(BSS3) und den Zielfunktionswerten der Zielfunktionen FF1 bis FF3 in der MKO und in der Validierung. Die schwarze Linie gibt die 1:1 Gerade wieder, die gestrichelte rote Linie das lineare Regressionsmodell (WETTREG2010, 2071-2100, B1).

Tabelle A 2: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario (WETTREG2010, Zeitscheibe 2021-2050).

Szenario	Größe	R^2	α	β	
A1B	2021-2050	BSS3	0,997	18,863	0,813
		BSS2	0,994	19,452	0,807
		BSS1	0,996	23,369	0,767
		FF1	0,998	-0,576	0,809
		FF2	0,999	-2,985	1,089
		FF3	1,000	-0,016	0,719
A2	2021-2050	BSS3	0,992	3,552	0,969
		BSS2	0,982	3,876	0,965
		BSS1	0,989	20,319	0,797
		FF1	0,988	-0,155	0,952
		FF2	0,957	-4,332	1,009
		FF3	0,993	0,000	0,872
B1	2021-2050	BSS3	0,978	0,042	1,000
		BSS2	0,922	18,273	0,817
		BSS1	0,651	43,393	0,566
		FF1	0,974	-0,194	0,935
		FF2	0,988	-7,409	1,067
		FF3	0,996	0,002	1,614

Tabelle A 3: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario für rezente Rahmenbedingungen (1921-2007).

Szenario	Größe	R^2	α	β
3 Bereitstellungsstufen	BSS1	0,969	24,703	0,753
	BSS2	0,888	36,859	0,631
	BSS3	0,486	40,198	0,598
	FF1	0,956	-0,831	0,723
	FF2	0,982	-7,002	1,061
	FF3	1,000	0,001	0,931
4 Bereitstellungsstufen	BSS1	0,994	4,425	0,963
	BSS2	0,984	5,844	0,946
	BSS3	0,991	53,743	0,463
	BSS4	0,998	-0,716	1,020
	FF1	0,986	-0,177	0,946
	FF2	0,991	6,303	0,936
	FF3	0,994	-0,007	0,961
Ohne Überleitung	BSS1	0,957	31,738	0,683
	BSS2	0,998	0,876	0,994
	BSS3	0,999	-0,273	1,006
	FF1	0,999	0,000	1,003
	FF2	0,982	-0,845	1,035
Erweiterer HQ-Schutzraum	BSS1	0,915	22,681	0,773
	BSS2	0,900	42,162	0,578
	BSS3	0,501	61,234	0,387
	FF1	0,940	-0,874	0,708
	FF2	0,974	-6,967	1,060
	FF3	1,000	0,001	0,933

Tabelle A 4: Mittlere Beziehungen zwischen den Größen der multi-kriteriellen Optimierung und der Validierung. Angegeben ist das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der Offsets α und die Steigung β eines linearen Regressionsmodells zwischen der MKO und der Validierung für das angegebene Szenario (WETTREG2010, Zeitscheibe 2071-2100).

Szenario	Größe	R^2	α	β	
A1B	2071-2100	BSS3	0,997	0,815	0,999
		BSS2	0,993	5,342	0,950
		BSS1	0,992	7,246	0,930
		FF1	0,995	-0,076	0,979
		FF2	0,991	-1,072	1,009
		FF3	0,998	0,005	1,171
A2	2071-2100	BSS3	0,990	-12,232	1,116
		BSS2	0,994	-20,257	1,205
		BSS1	0,999	-23,021	1,232
		FF1	0,992	0,466	1,156
		FF2	0,986	-4,158	0,918
		FF3	0,988	0,017	1,044
B1	2071-2100	BSS3	0,998	-0,944	1,019
		BSS2	0,997	0,450	1,002
		BSS1	0,998	1,765	0,986
		FF1	0,999	0,013	1,011
		FF2	0,997	-3,058	1,078
		FF3	0,999	0,006	0,926

Abschnitt 4.2

Zu 4.2.3

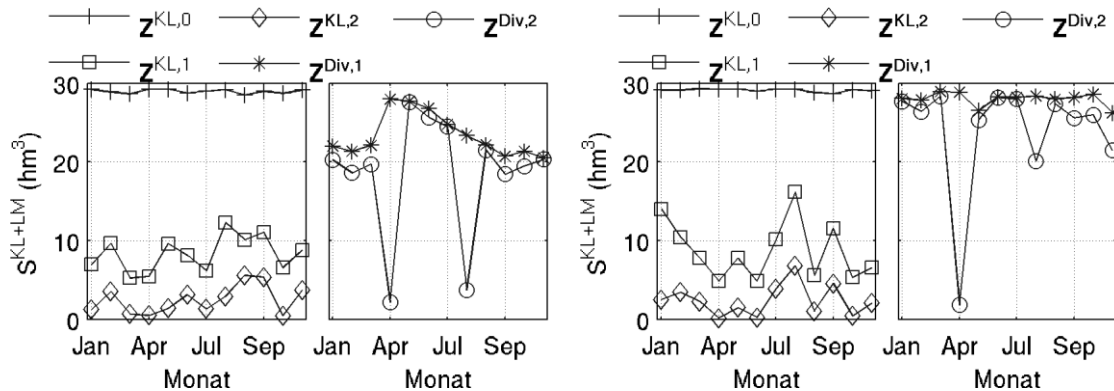


Abbildung A 10: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen $\min(FF3)$ (links) und $\max(FF2)$ (rechts).

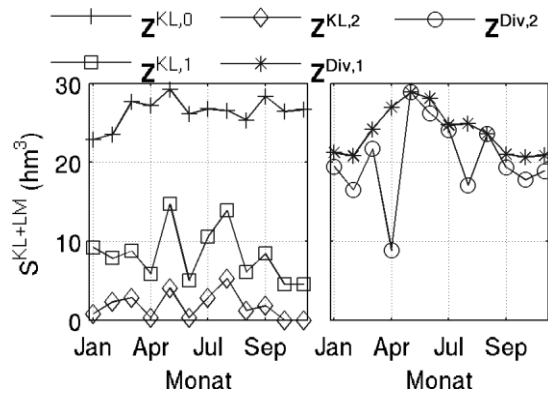


Abbildung A 11: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung $\max(P(BSS4))$.

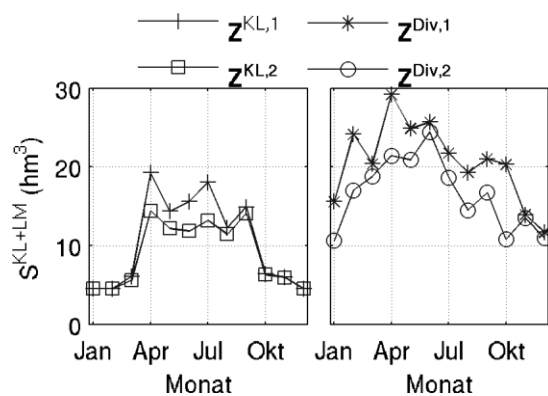


Abbildung A 12: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.

Abschnitt 4.3

Zu 4.3.1

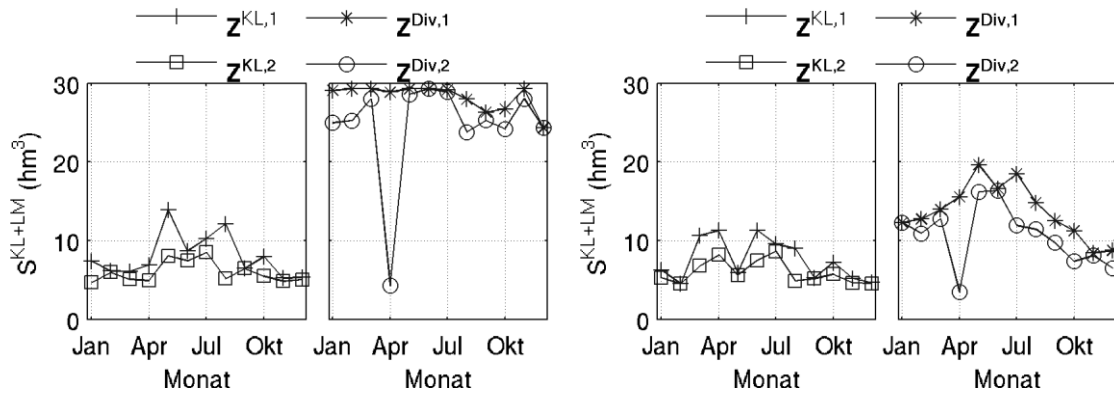


Abbildung A 13: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und min(FF3) (rechts).

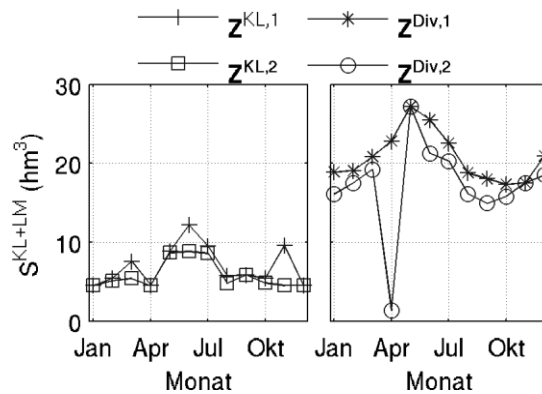


Abbildung A 14: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.

Zu 4.3.2

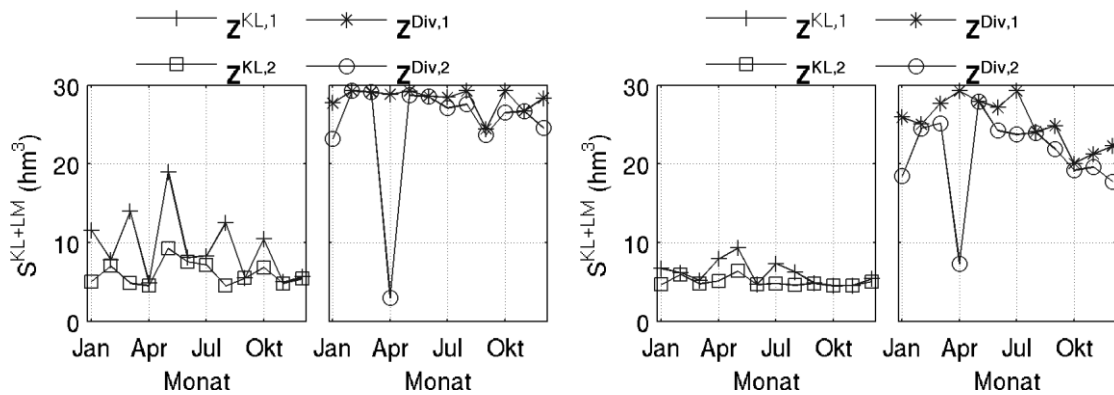


Abbildung A 15: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max(FF1) (rechts).

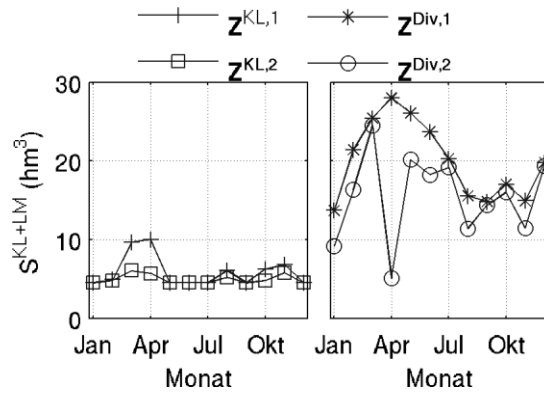


Abbildung A 16: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung Balanced BSS.

Zu 4.3.3

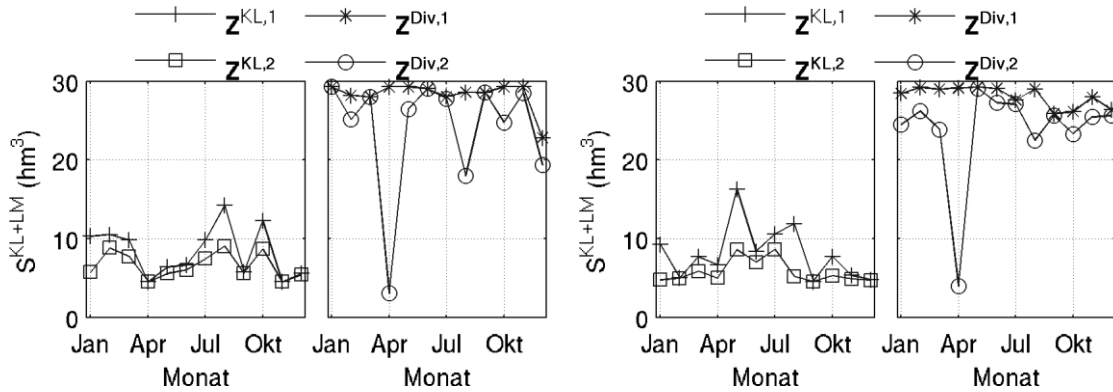


Abbildung A 17: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max(FF1) (rechts).

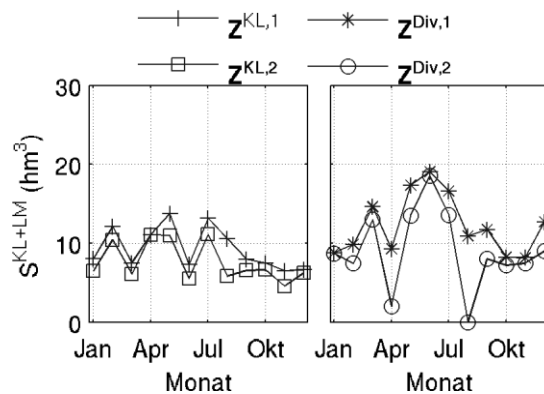


Abbildung A 18: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung min(FF3).

Abschnitt 4.4

Zu 4.4.1

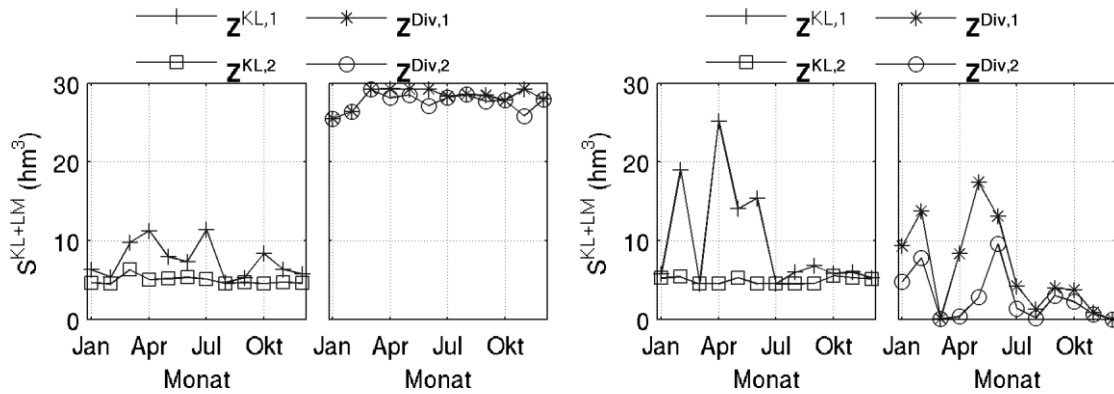


Abbildung A 19: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2) (links) und max(FF1) (rechts).

Zu 4.4.2

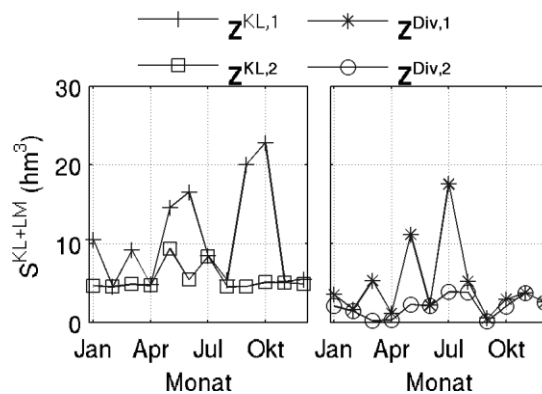


Abbildung A 20: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösung min(FF3).

Zu 4.4.3

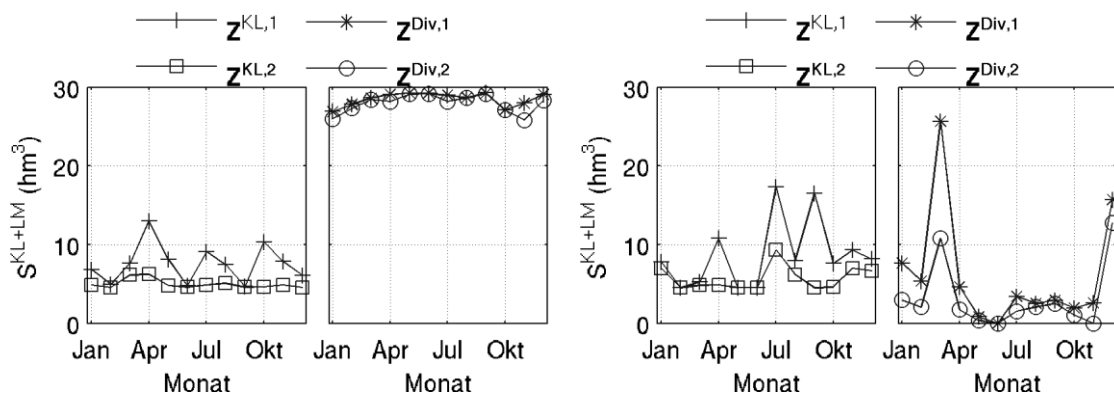


Abbildung A 21: Staulamellen der Brauchwasserabgabe und der Überleitung für die Lösungen max(FF2), die ebenso max(FF1) entspricht, (links) und min(FF3) (rechts).

Abschnitt 4.5

Zu 4.5.1

Tabelle A 5: Distanzen der repräsentativen Lösungen zum Utopia Punkt in unterschiedlichen p-Normen integrierten Vergleich. Zeitscheibe 2021-2050.

Lösung	p-Norm		
	1	2	Inf
Cl-1 (A1B)			0.568
Cl-1 (A1B)		0.792	
Cl-1 (A1B)	0.792		
Cl-2 (A2)	0.551	0.551	0.418
Cl-3 (B1)	0.243	0.243	0.177

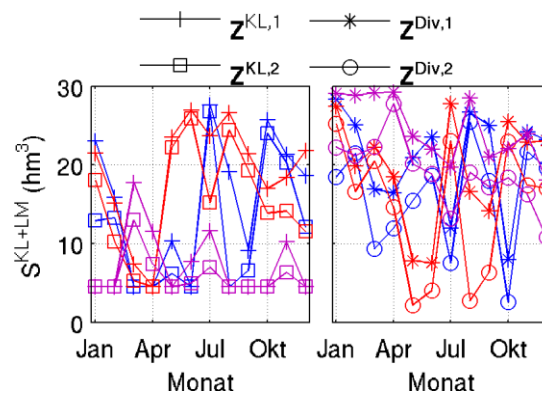


Abbildung A 22: Staulamellen der repräsentativen Lösungen der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).

Zu 4.5.2

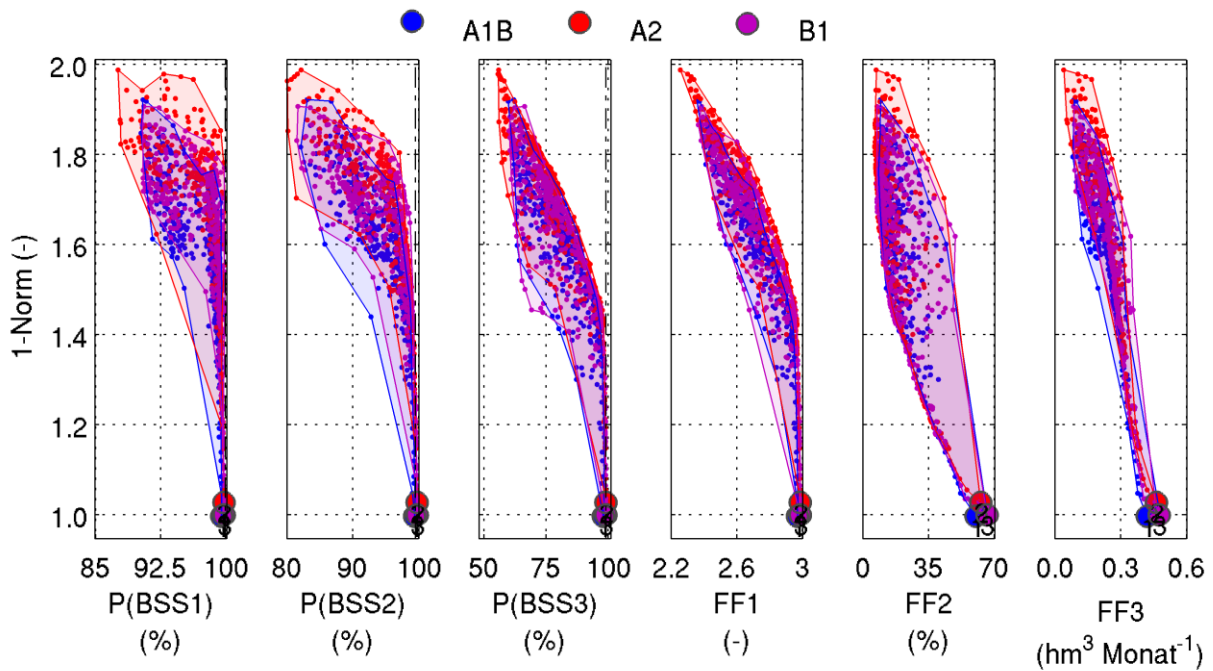


Abbildung A 23: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der 1-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).

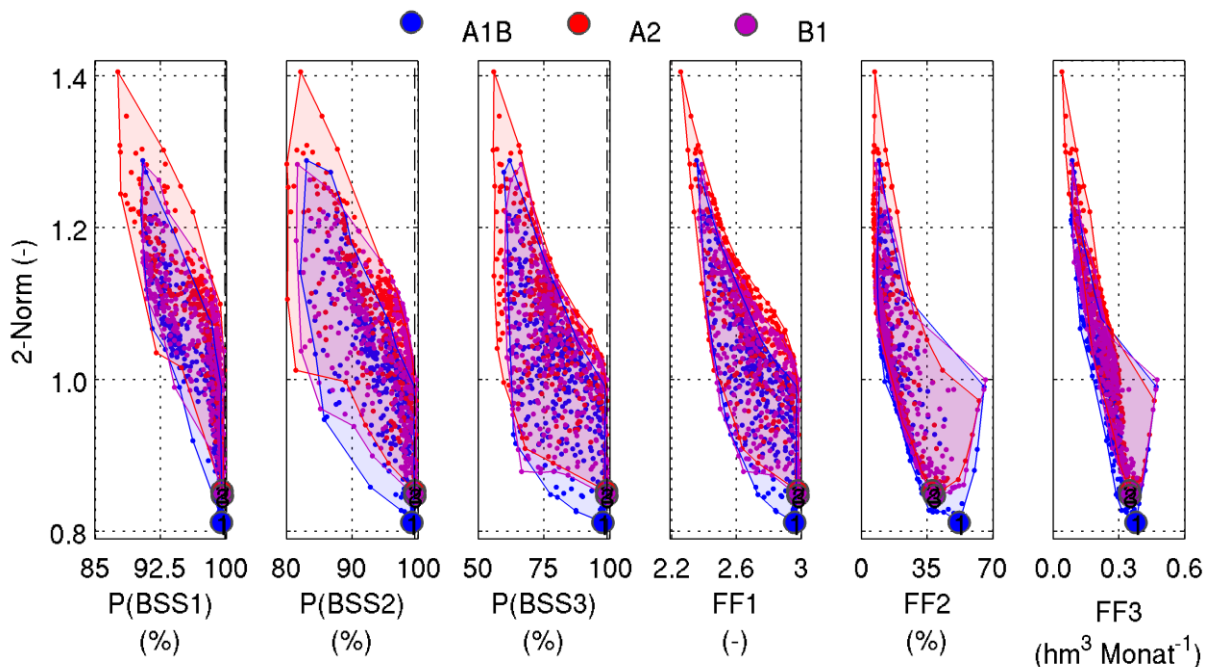


Abbildung A 24: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der 2-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).

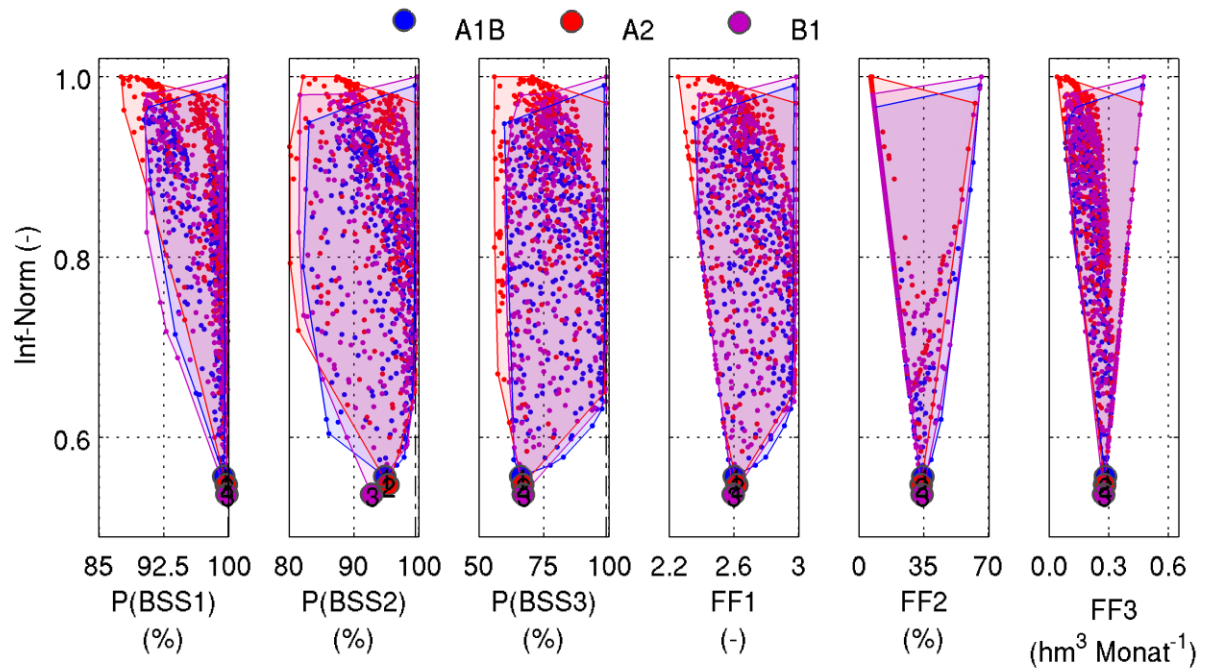


Abbildung A 25: Level Diagramm zur integrierten Betrachtung der Pareto-Sets der Emissionsszenarien A1B (blau), A2 (rot) und B1 (lila) unter Verwendung der Inf-Norm als Abstandsmaß zum Utopiapunkt für die Zeitscheibe 2071-2100 (WETTREG2010).

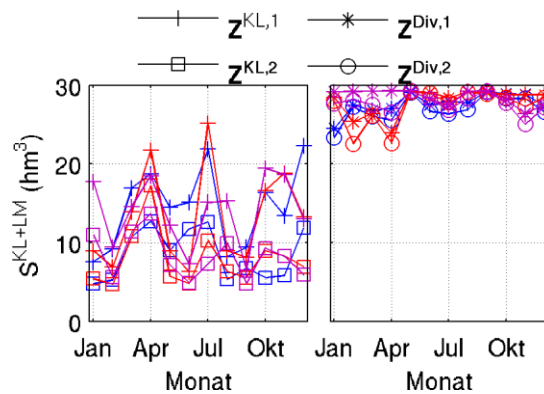


Abbildung A 26: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der 1-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).

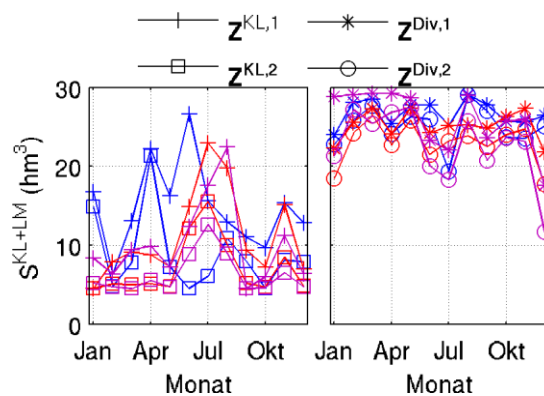


Abbildung A 27: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der 2-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).

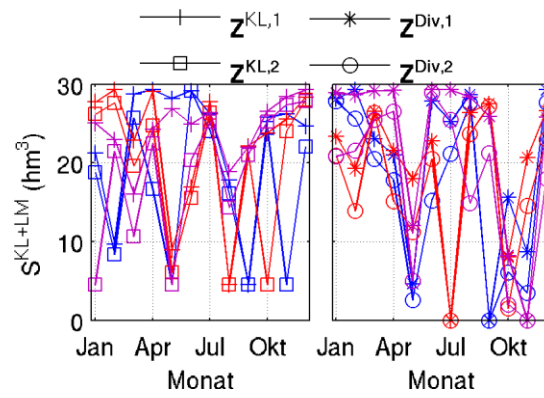


Abbildung A 28: Staulamellen der repräsentativen Lösungen unter der Inf-Norm in der integrierten Betrachtung der MKO unter den Emissionsszenarien B1 (lila), A2 (rot) und A1B (blau).