

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

**Energie- und Wasserspeicher Harz -
Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen
zur Energiespeicherung, zum Hochwasserschutz
und zur Ressourcensicherung (EWAZ)**

Abschlussbericht

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Hrsg.)

Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Hrsg.)

Band 77



Cuvillier Verlag Göttingen

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN)

Band 77

Das EFZN ist ein gemeinsames
wissenschaftliches Zentrum der
Universitäten:



Energie- und Wasserspeicher Harz - Kopplung nachhaltiger Systemdienst- leistungen zur Energiespeicherung, zum Hochwasserschutz und zur Ressourcen- sicherung (EWAZ)

Abschlussbericht

Laufzeit des Verbundprojektes

01.07.2019 bis zum 30.09.2022

Antragsnummern:

ZW6 – 85037489

ZW6 – 85036282

ZW6 – 85036390

Fördernde Stelle:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Förderlinie Innovationsverbünde, Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft gefördert.



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2023

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2023

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Dieses Dokument unterliegt der Lizenz Open Access CC BY 4.0

ISBN 978-3-7369-7875-1

eISBN 978-3-7369-6875-2

Projektleitung und Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Technische Universität Clausthal,
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE)

Dr.-Ing. Jens zum Hingst

Technische Universität Clausthal
Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC)

Teilprojektleitung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Technische Universität Clausthal,
Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE)

Bezeichnung Teilvorhaben: EWAZ – Planung, Bau und Betrieb untertägiger Energiespeicher

Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Technische Universität Braunschweig
Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz (HYWAG)

Bezeichnung Teilvorhaben: EWAZ – Klimaszenarien und integrierte Systemmodellierung

Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Hochschule Braunschweig/
Wolfenbüttel, Standort Suderburg
Institut für nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum

Bezeichnung Teilvorhaben: EWAZ – Oberirdische Speicher, Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung

Bearbeiter und Autoren:

Technische Universität Clausthal

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme)

Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld (Institut für Bergbau)

Prof. Dr. Roland Menges (Institut für Wirtschaftswissenschaft)

Felix Eckenfels, M. Sc. (Institut für Wirtschaftswissenschaft)

Dr.-Ing. Jens zum Hingst (CUTEC Forschungszentrum)

Sandra Nowosad, M. Sc. (Institut für Bergbau)

Yener Sisik, M. Eng. (CUTEC Forschungszentrum)

Karlo Tkalcec, M. Sc. (CUTEC Forschungszentrum)

Technische Universität Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Günter Meon

Dipl.-Hydr. Tim Müller

Patrick Nistahl, M. Sc.

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Standort Suderburg

Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher

Jan Sünemann, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XVIII
Einleitung	1
1 Klimaszenarien (AP 1)	6
1.1 Inhalte des Arbeitspaketes	6
1.2 Einführung und Vorgehen	7
1.3 Historische Beobachtungen	8
1.4 Verwendete Klimarealisierungen	9
2 Integrierte Modellierung des Gesamtsystems (AP2)	12
2.1 Inhalte des Arbeitspaketes	12
2.2 Gesamtkonzept der Modellierung und Bewertung	12
2.3 Hydrologische Langzeitsimulationen mit PANTA RHEI	13
2.4 Modellierung vernetzter Speichersystem mit Gecko/IGOmod	15
2.5 Wasserwirtschaftliche Bewertungsindikatoren	16
2.6 Kalibrierung und Validierung mit historischen Beobachtungen und heutiger Infrastruktur	18
2.7 Modellierung von Planungsvarianten für (klimatische) Historie und Zukunft ...	21
2.7.1 Übersicht über modellierten Varianten	21
2.7.2 Modellierung des Pumpspeichers Huneberg mit Verbindung zur Okertalsperre	22
2.7.3 Modellierung der Varianten zur Nutzung von Wasser im Innerstetal	32
2.7.4 Modellierung des PS Stöberhai mit Verbindung zur Odertalsperre	38
2.7.5 Modellierung von Varianten zur Wassernutzung im Siebental	42
2.7.6 Modellierung der erhöhten Granetalsperre	46
2.8 Zusammenfassung und Fazit	49
3 Bauliche Planungsvarianten und Betriebsstrategien (AP 3)	51
3.1 Inhalte des Arbeitspaketes	51
3.2 Stand der Technik zum Thema Talsperren	54

3.2.1	Talsperren	54
3.2.2	Aufbau	55
3.2.3	Bemessung von Talsperren.....	56
3.2.4	Aufgaben	58
3.3	Vorhandene Anlagen und aktuelle Situation.....	60
3.3.1	Granetalsperre	62
3.3.2	Okertalsperre.....	63
3.3.3	Innerstetalsperre	63
3.3.4	Odertalsperre	64
3.3.5	Sösetalsperre	65
3.4	Auswahl der Projektstandorte.....	65
3.5	Standortanalyse mit ArcGIS	67
3.6	Entwicklung der Dammbauwerke	68
3.7	Ermittlung der Stauraumaufteilung	69
3.8	Ermittlung der Hochwasserentlastung	70
3.9	Entwicklungen der Speicherbauwerke unter Tage	71
4	Bauliche Maßnahmen (AP 3).....	78
4.1	Inhalte des Arbeitspaketes	78
4.2	Okertalsperre - Huneberg	78
4.2.1	Datenbasis	79
4.2.2	Topografisches Profil.....	80
4.2.3	Speicherkapazität.....	81
4.2.4	Bauliche Anpassungen.....	82
4.2.5	Nutzung des Speicherraumes	85
4.3	Wassernutzung im Innerstetal	86
4.3.1	Datenbasis	88
4.3.2	Topologisches Profil.....	88
4.3.3	Speicherkapazität.....	91
4.3.4	Bauliche Anpassungen.....	94
4.3.5	Nutzung des Speicherraums	97
4.3.6	Nicht weiter betrachtete Varianten	97

4.4	Odertalsperre - Stöberhai	98
4.4.1	Datenbasis	98
4.4.2	Topografisches Profil	99
4.4.3	Speicherkapazität	100
4.4.4	Bauliche Anpassungen	101
4.4.5	Nutzung des Speicherraums	104
4.4.6	Nicht weiter betrachtete Varianten	104
4.5	Wassernutzung im Siebertal	105
4.5.1	Datenbasis	105
4.5.2	Topografisches Profil	107
4.5.3	Speicherkapazität	108
4.5.4	Bauliche Maßnahmen	110
4.5.5	Nutzung des Speicherraums	112
4.5.6	Nicht weiter betrachtete Varianten	113
4.6	Erhöhung der Granetalsperre	114
4.6.1	Datenbasis	114
4.6.2	Topografisches Profil	115
4.6.3	Speicherkapazität	115
4.6.4	Bauliche Anpassungen	115
4.6.5	Nutzung des Speicherraums	116
4.7	Hochwasserschutz für Goslar	117
4.7.1	Datenbasis	117
4.7.2	Variante 6.1: Aufweitung des Oker-Grane-Stollens	118
4.7.3	Variante 6.2: Hochwasserrückhaltebecken	119
4.8	Überleitungssystem	121
4.9	Einordnung	126
5	Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe (AP 4)	128
5.1	Inhalte des Arbeitspaketes	128
5.2	Ergebnisse	128
5.2.1	Schadensschwerpunkte beim Juli-Hochwasser 2017	129
5.2.2	Referenzstrecken für den Hochwasserschutz	129

5.2.3	Auswertung von Niedrigwasserphasen aus der Vergangenheit	131
5.2.4	Bedarfsgerechte Mindestwasserabgaben	132
6	Trinkwasserversorgung (AP 5)	134
6.1	Inhalte des Arbeitspaketes	134
6.2	Ergebnisse.....	134
6.2.1	Limnologie.....	134
6.2.2	Trinkwassertalsperren	137
6.3	Pumpspeicherung an Talsperren.....	139
6.3.1	Bauliche Anforderungen an Pumpspeicherbecken.....	139
6.3.2	Konfliktpotential Pumpspeicherung und Trinkwassergewinnung.....	140
6.4	Trinkwasserbedarfsentwicklung.....	141
6.4.1	Trinkwasserversorgung durch die Harzwasserwerke	141
6.4.2	Bedarfsentwicklung	142
6.5	Lösungsansätze für die synergetische Nutzung von Pumpspeicherung und Trinkwassergewinnung.....	144
7	Energiesystem (AP 6).....	146
7.1	Inhalte des Arbeitspaketes	146
7.2	Betrieb und Auslegung des Energiespeichers	146
7.2.1	Energetisches Potential der Standorte	147
7.2.2	Auswahl der Maschineneinheiten.....	150
7.2.3	Betrieb von vorhandenen Pumpspeicherkraftwerken	154
7.2.4	Fazit	160
7.3	Energiemarkt und Betriebsführung	161
7.3.1	Day-Ahead Strommarktanalyse für ein Pumpspeicherkraftwerk	161
7.3.2	Regelleistungsmarktanalyse für ein Pumpspeicherkraftwerk	165
7.3.3	Fazit	167
7.4	Netzanbindung	168
7.4.1	Netzanbindung der Standorte.....	169
7.4.2	Mögliche Anschlussvarianten von Standorten und deren Vergleich	173
7.4.3	Die Diskussion von Anschlussvarianten mit den Netzbetreibern	177

7.4.4	Die Zusammenfassung der Rahmenbedingungen eines Netzanschlusses und Netzzugangs	178
7.4.5	Fazit	178
7.4.6	Kosten	180
8	Sozio- und regionalökonomische Bewertung (AP 7)	182
8.1	Inhalte des Arbeitspaketes	182
8.1.1	Die Bewertungs- und Entscheidungsorientierung des Projektes	182
8.1.2	Der Analytische-Hierarchie-Prozess: Methodisches Vorgehen	184
8.1.3	Projektstandorte und Alternativenbeschreibung	187
8.1.4	Bestimmung, Hierarchisierung und Gewichtung des Zielsystems	198
8.1.5	Bewertung der Alternativen	201
8.1.6	Integration von Zielgewichten und Alternativenbewertungen	201
8.2	Ergebnisse	202
8.2.1	Sensitivitätsanalyse	206
8.2.2	Alternative Szenarien	207
8.2.3	Fazit	208
9	Literaturverzeichnis	209
10	Anhang	217
10.1	A1 – Maßnahmensteckbriefe der Standorte	218
10.2	A2 – Entscheidersteckbriefe zu Kapitel 8	269
10.3	A3 – Fotodokumentation der Standorte	289

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtkonzept.....	3
Abbildung 2: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (NLWKN 2021, nach Klimanavigator 2017).....	7
Abbildung 3: Niederschlagsstationen (links) und Pegelstandorte (rechts) im Westharz (Lange und Eggelsmann 2011).....	8
Abbildung 4: Niederschlagsstationen in Niedersachsen (NLWKN 2021/1)	9
Abbildung 5: Prozentuale Abweichung des Niederschlags der Klimarealisation MPI-Racmo r1 von interpolierten Beobachtungen für das Untersuchungsgebiet im Referenzzeitraum 1971-2000	11
Abbildung 6: Konzept der wasserwirtschaftlichen Systemmodellierung und Bewertung (AP 2) unter Nutzung von regionalen Klimasimulationen (AP 1).....	13
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Abflussbildung, -konzentration und des Wellenablaufs im hydrologischen Modell PANTA RHEI	14
Abbildung 8: Das hydrologische Untersuchungsgebiet mit einem Gesamteinzugsgebiet von ca. 6000 km ² , 2560 Teileinzugsgebieten und 21 Schnittstellen zwischen hydrologischem Modell und Speicherbetriebsmodell	15
Abbildung 9: Beispiel von drei verbundenen Speichern mit Fließschema (links) und modularer Implementierung in der Modellsoftware (rechts).....	16
Abbildung 10: Methodik der Ermittlung von wasserwirtschaftlichen Bewertungskenngrößen aus Zeitreihen (Loucks und van Beek 2017).....	17
Abbildung 11: Vergleich von simuliertem und beobachtetem Abfluss an den Pegeln Altenau (Zuflusspegel Okertalsperre, links) und Schladen (ca. 25 km unterstrom an der Oker, rechts).....	19
Abbildung 12: Vergleich des simulierten und beobachteten jährlichen Zuflussvolumens der Okertalsperre.....	20
Abbildung 13: Vergleich von simuliertem jährlichen Zuflussvolumen zur Innerstetalsperre und Beobachtungen der Harzwasserwerke aus der Wasserbilanz an der Talsperre (links) sowie Ergebnisse am Pegel Heinde an der Innerste ($A_{EO} = 897$ km ²).....	20
Abbildung 14: Standorte der modellierten Planungsvarianten	22
Abbildung 15: Schema der Implementierung des Hunebergs im Modell IGOMod	23

Abbildung 16: Obere und mittlere Oker mit Teileinzugsgebieten und seitlichen Zuflüssen bis Pegel Schladen als unmittelbares Einflussgebiet des untersuchten Pumpspeichers Huneberg.....	24
Abbildung 17: Simulierte Abflussganglinie an Pegeln Okertal und Schladen für den konstruktiven Status Quo (SQ) und die Variante Huneberg, simuliert nach damals gültigem Lamellenplan I sowie dem neuen Betriebsplan (Lamellenplan II)	25
Abbildung 18: Anzahl von Ereignissen (links) sowie Volumen pro Ereignis (rechts) über 12 m ³ /s am Pegel Okertal über das gesamte Klimaensemble (2041-2070) im Status Quo sowie nach Implementierung der Variante Huneberg. In jedem Boxerplot ist der Median, die zwei Quartile und die Extremwerte aus den Simulationen dargestellt.	26
Abbildung 19: Simulationsergebnisse am Pegel Okertal für die Klimarealisation ECE Racmo r1. Die grüne horizontale Linie entspricht dem (fiktiv) vorgegebenen Zielabfluss. Links Ergebnisse für 2041-2070, rechts Vergrößerung des Überschreitungsereignis 2061.	27
Abbildung 20: Beispielhafte Ganglinie für den Pegel Okertal und Klimarealisation ECE Racmo r12	29
Abbildung 21: Detailansicht des Niedrigwasserereignisses aus Abbildung 18 und Markierung des Defizitvolumens zur ökologischen Mindestwasserabgabe	30
Abbildung 22: Defizitvolumen zur ökologischen Mindestwasserabgabe am Pegel Okertal für einzelne Klimarealisierungen (links) und in Summe (rechts). Ergebnisse in Rot sind ohne Huneberg, Ergebnisse in Blau mit Huneberg.	30
Abbildung 23: Ausschnitt aus einer Simulation der Realisation MPI-WETTReg-2013 zur beispielhaften Wirkung des Hunebergs auf den Stauinhalt an der Granetalsperre bei Trockenphasen.....	31
Abbildung 24: Stark vereinfachtes Fließschema der geplanten Varianten (grün) im Gebiet von Innerste und Oker mit Kennzeichnung der beeinflussten Pegeln und Größe der Einzugsgebiete. Die Überleitung von Innerste zur Grane wird nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre deaktiviert.	33
Abbildung 25: Im Modell verwendeter Betriebsplan der oberen Innerstetalsperre.....	34
Abbildung 26: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGOmod im Innerstetal.....	34
Abbildung 27: Veränderung der Gesamtabgabe über 30 Jahre über die HWE der Innerstetalsperre ohne konstruktive Anpassung (links) und nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre (rechts). Jeder Punkt steht für eine Klimarealisation. Die dunkelgraue Linie stellt den Mittelwert über alle Realisationen dar. Referenzperiode ohne bauliche Anpassung und mit aktuellem Betriebsplan simuliert.	35

Abbildung 28: Veränderung der Abgabe über die HWE der Innerstetalsperre mit Implementierung des PS Hohestein für die Zukunftsperiode (links) und nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre sowie des PS Hohesteins (rechts)	36
Abbildung 29: Stark vereinfachtes Fließschema der untersuchten Varianten im Südharz (grün) mit relevanten Pegeln unterhalb	38
Abbildung 30: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGOmod im Odertal	39
Abbildung 31: Aktuell gültiger Betriebsplan der Odertalsperre	40
Abbildung 32: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGOmod im Siebertal	43
Abbildung 33: Lamellenplan der modellierten Siebertalsperre	43
Abbildung 34: Modellimplementierung der Variante Graneerhöhung im Modell IGOmod. Das Fließschema entspricht dem des bestehenden Nordharzverbundsystems, lediglich der Speicher und die Überleitungs- und Abgaberegeln der Granetalsperre wurden angepasst.	47
Abbildung 35: Im Modell implementierter Lamellenplan zur Erhöhung der Granetalsperre	47
Abbildung 36: Ein nachhaltiger Ansatz – Die acht Arbeitsphasen des EWAZ-Projektes	51
Abbildung 37: Altbergbau und Tagesöffnungen im Bereich der Maßnahme 1: Okertalsperre - Huneberg (basierend auf LBEG, NIBIS und Ließmann)	53
Abbildung 38: Stauraumaufteilung von Talsperren (DIN 19700-11 2004)	57
Abbildung 39: Übersichtskarte Westharz/Projektgebiet (Lange und Eggelsmann 2011). Rot gestrichelt: Abschlagwassereinzugsgebiete	61
Abbildung 40: Prinzip der Stauraumaufteilung am Beispiel der Odertalsperre	69
Abbildung 41: Mögliche Anordnung von Hangentlastungen an Staudämmen (Strobl und Zunic 2006)	71
Abbildung 42: Schematische Darstellung der Örterbau-Abbaumethode, schräg, im Bergbau (Atlas Copco Rock Drills AB 2007)	75
Abbildung 43: Vereinfachtes Flussdiagramm für die Planung von unterirdischen Streckenauffahrungen und Hohlräumen (nach Düsterloh 2020)	76
Abbildung 44: Standort 1 mit gefülltem Huneberg und Abtrennung des Kalbetals	79
Abbildung 45: Geländeschnitt Standort 1	80

Abbildung 46: Speicherinhaltslinie Huneberg	81
Abbildung 47: Speicherinhaltslinie Kalbetal	82
Abbildung 48: Überblick über die Maßnahme 1 und die geplanten unterirdischen Bauwerke.....	84
Abbildung 49: Systemskizze Standort 1	85
Abbildung 50: Untere Innerstetalsperre mit PSW-Oberbecken Hohestein	86
Abbildung 51: Obere Innerstetalsperre	87
Abbildung 52: Oberbecken Hohestein	87
Abbildung 53: Lokalisierung PSW-Oberbecken auf dem Höhenzug Hohestein (Donner 2018)	88
Abbildung 54: Höhenprofil im Bereich der unteren Innerstetalsperre	89
Abbildung 55: Höhenprofil Obere Innerstetalsperre.....	90
Abbildung 56: Höhenprofil im Bereich der unteren Innerstetalsperre im Zusammenhang mit einem unterirdischen Speicherraum	91
Abbildung 57: Speicherinhaltslinien von ol37 und ol47 im Vergleich.....	92
Abbildung 58: Speicherinhaltslinie Oberbecken Hohestein	92
Abbildung 59: Profil und Südostansicht des entworfenen Speicherraums, unter Tage .	93
Abbildung 60: Speicherinhaltslinie Oberbecken Hohestein, unter Tage	93
Abbildung 61: Überblick über die Maßnahme 2 und die geplanten unterirdischen Bauwerke.....	96
Abbildung 62: Systemskizze Standort 2	97
Abbildung 63: Odertalsperre mit Oberbecken Stöberhai	98
Abbildung 64: Topografische Profil Odertalsperre - Stöberhai.....	99
Abbildung 65: Speicherinhaltslinie Stöberhai.....	100
Abbildung 66: Speicherinhaltslinie Herzbek.....	100
Abbildung 67: Überblick über die Maßnahme 3 und die geplanten unterirdischen Bauwerke.....	103
Abbildung 68: Systemskizze Standort 3	104
Abbildung 69: Siebertalsperre mit PSW-Oberbecken Knollenspeicher	105
Abbildung 70: Höhenprofil entlang des Siebertals	107
Abbildung 71: Höhenprofil PSW Siebertal	108

Abbildung 72: Speicherinhaltslinie Siebertalsperre (S47)	109
Abbildung 73: Speicherinhaltslinie Knollenspeicher	109
Abbildung 74: Überblick über die Maßnahme 4 und die geplanten unterirdischen Bauwerke	111
Abbildung 75: Systemskizze Standort 4.....	112
Abbildung 76: Speicherinhaltslinie der Varianten für eine Siebertalsperre	113
Abbildung 77: Stauraum der Granetalsperre bei einer Erhöhung um 15 m	114
Abbildung 78: Speicherinhaltslinie Standort 5.....	115
Abbildung 79: Luftseitige Dammschüttung (nach Harzwasserwerke GmbH 1982).....	116
Abbildung 80: Systemskizze Standort 5.....	117
Abbildung 81: Aufweitung OGS (Schettler 2021).....	118
Abbildung 82: Längsschnitt Erweiterung OGS (Schettler 2021)	119
Abbildung 83: Hochwasserrückhaltebecken im Gosetal	120
Abbildung 84: Speicherinhaltsganglinie Standort 6.....	120
Abbildung 85: Hochwasserrückhaltebecken Niederpöbel (LTV Sachsen 2020), Ausschnitt aus einer Animation der Funktion dieses Beckens.....	121
Abbildung 86: Überleitungsvarianten	122
Abbildung 87: Wasserverteilung ausgehend von der Odertalsperre	125
Abbildung 88: Wasserverteilung ausgehend von der Siebertalsperre	125
Abbildung 89: Wasserverteilung ausgehend von der oberen Innerstetalsperre	126
Abbildung 90: Hochwasserschutzmaßnahme Bleicherstraße.....	130
Abbildung 91: Hochwasserschutzmauer in der Ortslage Schladen	130
Abbildung 92: Ideal geschichteter See (Echterhoff und Meißner 2015).....	135
Abbildung 93: Zirkulations- und Stagnationsphasen (Maniak 2016).....	136
Abbildung 94: Wasserentnahme aus geschichteter Talsperre (Kennedy und Walker 1991).....	138
Abbildung 95: Bautechnischer Aufbau eines PSW (Giesecke et al. 2009)	140
Abbildung 96: Bevölkerungsentwicklung (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz 2022).....	143

Abbildung 97: Entnahmen für die öffentliche Wasserversorgung aus Grund- (links) und Oberflächenwasser (rechts) (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz 2022).....	144
Abbildung 98: Karte und Geoprofil des PSW Okertal (Vgl. Ostfalia AP 5).....	147
Abbildung 99: Karte und Geoprofil des PSW Odertalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5).....	148
Abbildung 100: Karte und Geoprofil des PSW Innerstetalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5).....	148
Abbildung 101: Karte und Geoprofil des PSW Siebertalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5)	149
Abbildung 102: Skizze des PSW Okertal.....	150
Abbildung 103: Verhältnis zwischen Wasserhöhe und gefüllter Wasserkapazität der PSW Okertal-Becken im Turbinenbetrieb (Datenquelle: Speicherinhaltslinien aus Ostfalia)	152
Abbildung 104: Beispiel für ein Prinzipschaltbild mit zwei drehzahlgeregelten Maschinensätzen (2 x 90 MW) (nach VDE Kassel 2006)	154
Abbildung 105: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Goldisthal, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	156
Abbildung 106: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Goldisthal, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	156
Abbildung 107: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Markersbach, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	158
Abbildung 108: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Markersbach, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	158
Abbildung 109: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Waldeck II, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	159
Abbildung 110: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Waldeck II, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	160
Abbildung 111: Stündliche Mindestpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an Werktagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	162
Abbildung 112: Stündliche Mindestpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an arbeitsfreien Tagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	163
Abbildung 113: Stündliche Höchstpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an Werktagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur).....	164
Abbildung 114: Stündliche Höchstpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an arbeitsfreien Tagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	165

Abbildung 115: Ein Beispieltag für die Preise im Regelarbeitsmarkt (Datenquelle: Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung).....	167
Abbildung 116: Übersichtskarte – Netzinfrastruktur rund um die Standorte (eigene Darstellung nach 50Hertz Transmission GmbH et al. und Harz Energie Netz GmbH 2017).....	169
Abbildung 117: HS-Netz der Harz Energie Netz GmbH und mögliche 110-kV-Anbindungen des PSW Okertals (Harz Energie Netz GmbH 2017).....	171
Abbildung 118: Einer der 110-kV-Masten der Harzring-Freileitung (Bialek 2019).....	173
Abbildung 119: Skizze einer möglichen Route zum USW Lamspringe.....	174
Abbildung 120: Skizze einer alternativen Route zum USW Schwanebeck.....	175
Abbildung 121: Skizze einer möglichen Route zum USW Hardeggen.....	175
Abbildung 122: Skizze einer alternativen Route zum USW Wolframshausen.....	176
Abbildung 123: Vereinfachte Trasse zum USW Lamspringe.....	180
Abbildung 124: Vereinfachte Trasse zum USW Hardeggen.....	181
Abbildung 125: EWAZ-Zielsystem.....	198
Abbildung 126: Likert-Skala zur Bestimmung der Zielgewichte.....	199
Abbildung 127: Bestimmung der Zielgewichte (vereinfachtes Beispiel mit drei Zieldimensionen).....	200
Abbildung 128: Bestimmung der Zielbeiträge innerhalb der Dimension „Hochwasserschutz“ (vereinfachtes Beispiel mit drei Alternativen).....	201
Abbildung 129: Ablauf der Beiratssitzung zur Datenerhebung am 31.08.2022.....	203
Abbildung 130: Überblick über das Ergebnis der Auswertung.....	203
Abbildung 131: Zielgewichte im Überblick.....	204
Abbildung 132: Performancebewertungen in den Zieldimensionen (1 pu \triangleq 100 %)...	205
Abbildung 133: Teilnutzenwerte in den Zieldimensionen (1 pu \triangleq 100 %).....	206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über verwendete Klimarealisierungen.....	10
Tabelle 2: Beispielhafte Bewertungskenngrößen für die vier Zielgrößen im Projekt EWAZ	18
Tabelle 3: Vergleich der Dauer und des Volumens der Abgabe über die Hochwasserentlastungsanlage der Okertalsperre	28
Tabelle 4: Vergleich von Überschreitungsdauer bzw. -volumen mit und ohne die Variante Huneberg für die Historie und Zukunft am Pegel Okertal für den Zielabfluss 11 m ³ /s	28
Tabelle 5: Vergleich von Überschreitungsdauer bzw. -volumen mit und ohne die Variante Huneberg für die Historie und Zukunft am Pegel Schladen für den Zielabfluss 63 m ³ /s.....	28
Tabelle 6: Einfluss des PS Hunebergs auf das 1 %-Perzentil des Stauinhalts der Granetalsperre bei Trinkwasserentnahme von 47,3 Mio. m ³ /a	31
Tabelle 7: Energiewirtschaftliche Kenngrößen des PS Huneberg aus wasserwirtschaftlicher Simulation.....	32
Tabelle 8: Veränderung der Überschreitung der HW-Schwelle am Pegel Bredelem zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal.....	36
Tabelle 9: Veränderung der Überschreitung der HW-Schwelle am Pegel Heinde zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal.....	36
Tabelle 10: Veränderung der Überschreitung der NW-Schwelle am Pegel Heinde zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal.....	37
Tabelle 11: Überleitungsmengen aus dem Innerste-Einzugsgebiet zur Granetalsperre	37
Tabelle 12: Kennwerte zur Energiespeicherung am PS Hohestein aus wasserwirtschaftlichen Simulationen	38
Tabelle 13: Auswirkungen der Variante TW-Nutzung Odertalsperre und PS Stöberhai auf den Hochwasserschutz im Oder-Einzugsgebiet	41
Tabelle 14: Einfluss der Varianten im Odertal auf die Niedrigwasserkenngrößen an der Odertalsperre.....	41

Tabelle 15: Kenngrößen zur Energiespeicherung im Stöberhai aus der wasserwirtschaftlichen Simulation	42
Tabelle 16: Einfluss der Variante Wassernutzung im Siebertal auf den HW-Schutz am Pegel Hattorf und Lindau (Oder).....	44
Tabelle 17: Einfluss der Variante Wassernutzung im Siebertal auf den NW-Schutz am Pegel Hattorf und Lindau (Oder).....	45
Tabelle 18: Kenngrößen zur Energiespeicherung im Knollenspeicher aus der wasserwirtschaftlichen Simulation	46
Tabelle 19: Kenngrößen zur Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf den Hochwasserschutz im nördlichen Harzvorland	48
Tabelle 20: Kenngrößen zur Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf den Niedrigwasserschutz im nördlichen Harzvorland	49
Tabelle 21: Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf die Trinkwassergewinnung	49
Tabelle 22: Technische Daten der Okertalsperre (nach Eggelsmann 2016).....	63
Tabelle 23: Berechnung der Hochwasserentlastungen	70
Tabelle 24: Kurzer Überblick über die wichtigsten PSWuT-Projekte der letzten 20 Jahre (Nowosad und Langefeld 2021, Aktualisierung 2022)	73
Tabelle 25: Zusammenfassung der Ergebnisse der im Rahmen des EWAZ-Projektes durchgeführten Quecksilberdruckporosimetrie-Tests	74
Tabelle 26: Unterirdische Infrastruktur pro Möglichkeitsmaßnahme	77
Tabelle 27: Maße der unterirdischen Infrastruktur	83
Tabelle 28: Maße der unterirdischen Infrastruktur	95
Tabelle 29: Maße der unterirdischen Infrastruktur	102
Tabelle 30: Maße der unterirdischen Infrastruktur	110
Tabelle 31: Einzelüberleitungen.....	124
Tabelle 32: Ermittlung vom Bedarf der NW-Aufhöhung an der Innerste für das Jahr 2018.....	132
Tabelle 33: Ermittlung vom Bedarf der NW-Aufhöhung an der Sieber für das Jahr 2018	132
Tabelle 34: Mindestwasserabgaben für Standort 2 und Standort 4	133
Tabelle 35: Trinkwasserabsatz der Harzwasserwerke.....	141

Tabelle 36: Die Höhenstufen des PSW Okertal (Datenquelle: Speicherinhaltslinien aus Ostfalia)	151
Tabelle 37: Messdaten aus Hune und Kalbe (Datenquelle: Harzwasserwerke)	151
Tabelle 38: Abmessungen des Kavernenhauses	153
Tabelle 39: Abmessungen der Trafokaverne	153
Tabelle 40: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Goldisthal (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	155
Tabelle 41: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Markersbach (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	157
Tabelle 42: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Waldeck II (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	159
Tabelle 43: Ein Beispieltag für die Preise von Regelleistungsmarkt (Datenquelle: Bundesnetzagentur)	167
Tabelle 44: Kostenabschätzung für den Anschluss der Standorte Okertal und Innerstetal an das USW Lamspringe (50Hertz Transmission GmbH et al.)	181
Tabelle 45: Kostenabschätzung für den Anschluss der Standorte Siebertal und Odertal an das USW Hardeggen (50Hertz Transmission GmbH et al.)	181
Tabelle 46: Profil Alternative 1 (Okertalsperre)	189
Tabelle 47: Profil Alternative 2 (Innerstetalsperre)	191
Tabelle 48: Profil Alternative 3 (Odertalsperre)	193
Tabelle 49: Profil Alternative 4 (Siebertalsperre)	195
Tabelle 50: Profil Alternative 5 (Granetalsperre)	197
Tabelle 51: Obere Innerstetalsperre und Granetalsperre	207
Tabelle 52: Neues Ranking, bei Änderung der kritischen Performancebewertung	207
Tabelle 53: Neues Ranking, Szenario 1 bei Änderung des Gewichtes „elektrischer Speicher“	208
Tabelle 54: Neues Ranking, Szenario 2 bei Änderung des Gewichtes „Kosten“	208

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Engl. Alternative Current)
aFRR	Sekundärregelleistung (Engl. automatic Frequency Restoration Reserves)
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
AHP-OS	Analytischer Hierarchieprozess-Online System
AP	Arbeitspaket
ArcGIS	Oberbegriff für Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI Inc.
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BBPIG	Bundesbedarfsplangesetz
BHQ	Bemessungshochwasserabfluss
BR	Betriebsraum
CR	Konsistenzratio (Engl. Consistency Ratio)
DC	Gleichstrom (Engl. Direct Current)
DGM	Digitales Geländemodell
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EnLAG	Energieleitungsausbaugesetz
ESW	Energiespeicherwasser
ETRS	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem
EURO-CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment for Europe
EWAZ	Energie- und Wasserspeicher Harz
FCR	Primärregelleistung (Engl. Frequency Containment Reserve)
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb der VDE
FTU	In der Wasseraufbereitung verwendete Einheit für Trübung (Engl. Formazine Turbidity Unit)
GCS	Geographisches Koordinatensystem (Engl. Geographic Coordinate System)

Gecko	GeodataCore Softwareplattform
HGÜ	Hochspannungsgleichstromübertragung
HQ	Hochwasserabfluss
HT	Herzberger Teich
HW	Hochwasser
HWE	Hochwasserentlastungsanlage
HWR	Hochwasserraum
IGOmod	Innerste-Grane-Oker-Modell
KGE	Kling-Gupta Effizienz
KliBiW	Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland, Forschungsprojekt des NLWKN
KraftNAV	Kraftwerks-Netzanschlussverordnung
KW	Kraftwerk
LTV	Landestalsperrenverwaltung
MADM	(Engl. Multi Attributive Decision Making)
Maptek Vulcan	Bergbauplanungssoftware der Firma Maptek Pty Ltd.
mFRR	Minutenreserveleistung (Engl. manual Frequency Restoration Reserves)
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss
MODM	(Engl. Multi Objective Decision Making)
MQ	Mittlerer Abfluss
NEG	Negativ
NIBIS	Niedersächsisches Bodeninformationssystem
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz
NN7Q	Der niedrigste über 7 Tage gemittelte Abfluss in einer Zeitreihe
NSE	Nash-Sutcliffe Effizienz
NW	Niedrigwasser

OB	Oberbecken
OB-ü	Oberbecken über Tage
OGS	Oker-Grane-Stollen
OW	Oberwasser
PANTA RHEI	Hydrologisches Modell für Wasserhaushalt, entwickelt von TU Braunschweig
PBIAS	Prozentuale Abweichung (Engl. Percent Bias)
PCC	Verknüpfungspunkt (Engl. Point of Common Coupling)
POS	Positiv
PS	Pumpspeicher
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PSWuT	Pumpspeicherkraftwerk unter Tage
pu	Per Unit
PW	Pumpwasser
RCP	Representative Concentration Pathways
ReKliEs-DE	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
RR	Reserveraum
RW	Rohwasser
SQ	Status Quo
TW	Trinkwasser
ü. NHN	über Normalhöhennull
UB	Unterbecken
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
USW	Umspannwerk
UTM	Universal Transverse Mercator
UW	Unterwasser

Einleitung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck; Dr.-Ing. Jens zum Hingst; TU Clausthal

Das Projekt „Energie- und Wasserspeicher Harz“ wurde innerhalb der Richtlinie Innovation durch Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Bereich Innovationsverbünde mit dem Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft im Zeitraum Juli 2019 bis Juni 2022 durch EFRE-Fördermittel gefördert. Hintergrund des Projektes waren neben den Änderungen im elektrischen Energiesystem mit einer vermehrten Umstellung auf erneuerbare Energien die Auswirkungen des Klimawandels im Harz, wie sie in den Jahren 2017 und 2018 aufgetreten sind. Erst traf die Region ein 1000-jährliches Hochwasser. Kurz darauf folgte eine langanhaltende Dürreperiode mit Rekordminuswerten beim Niederschlag.

Mit steigendem Anteil fluktuierender, regenerativer Einspeisungen in das Stromnetz leisten Energiespeicher mit ihrem Ausgleich von Energiebereitstellung und -nutzung substantielle Beiträge für ein funktionsfähiges Energiesystem (Beck 2016). Insbesondere zum Ausgleich der Residuallast kommt diesen Technologien eine tragende Rolle bei der Netzstabilisierung zu. Speicherkapazitäten in Norddeutschland sind insbesondere in Kombination mit der Windenergie, die ebenfalls zu großen Teilen in Norddeutschland in die Netze einspeist, von Bedeutung, um Leitungskapazitäten besser auszunutzen und (elektrische) Systemdienstleistungen wie beispielsweise Momentanreserve vor Ort bereitzustellen. Großtechnische Pumpspeicherkraftwerke stellen darüber hinaus eine technologisch ausgereifte Lösung für die Erbringung derartiger stabilisierender Systemdienstleistungen dar; neue Potentiale erscheinen jedoch v. a. aufgrund der erheblichen Eingriffe in die Natur und den damit verbundenen Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung, aber auch aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht realisierbar.

Es zeigte sich, dass die langfristige Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen (unter den gegebenen Rahmenbedingungen) bei einer alleinigen Vermarktung in einem energy only-Markt nicht gegeben ist. Gleichwohl bietet die Technologie prinzipiell das Potential, zusätzliche Deckungsbeiträge auch in anderen Bereichen (z. B. Erbringung von Systemdienstleistungen) zu generieren und einen zusätzlichen volkswirtschaftlichen Nutzen (z. B. Integration in den Hochwasserschutz) zu stiften.

Vor diesem Hintergrund erfolgte im Projekt EWAZ eine innovative Kopplung und systemische Betrachtung energie- und wasserwirtschaftlicher Aspekte. Da der Harz hydrologisch als großes Wasserüberschussgebiet zu betrachten ist und Klimawandelprojektionen zukünftig eine Erhöhung des dortigen mittleren jährlichen Wasserdargebot erwarten lassen, erscheint ein solcher integrativer Ansatz für zwingend geboten.

Die niedersächsische Wasserwirtschaftsverwaltung rechnet damit, dass Starkregenereignisse und Überschwemmungen zukünftig häufiger und intensiver auftreten werden. Derzeit wird die Einführung eines Klimabeiwertes von 15 % diskutiert, der als Sicherheitszuschlag bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen landesweit zu berücksichtigen ist (NLWKN 2017). Das jüngste Hochwasser vom Juli 2017 unterstreicht die aktuelle Brisanz dieser Diskussion. In einigen Gewässern des nördlichen Harzrandes wurden Abflussscheitelwerte registriert, die statistisch einem 1000-jährlichen Hochwasser entsprechen. An einigen Pegeln des nördlichen Harzvorlandes wurden Höchstwasserstände gemessen, die z. T. erheblich über die bislang bekannten Höchstmarken hinausgingen. Im Rahmen der Klimawandelanpassungsstrategie des Landes Niedersachsen sind für die Region westlicher Harz und das dazugehörige Harzvorland sowie für (infrastrukturell) verbundene Regionen geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln, damit die Bürger und infrastrukturellen Einrichtungen auch zukünftig bestmöglich vor Hochwasser geschützt werden.

Unter diesen Voraussetzungen war die Aufgabenstellung dieses interdisziplinären Vorhabens, mit der systemischen Kopplung der Energie- und Wasserwirtschaft eine wissenschaftliche fundierte Konzeption für einen „Energie- und Wasserspeicher Harz“ zu entwickeln, der die zukünftigen überregionalen Anforderungen in den Zieldimensionen Energieerzeugung und -speicherung, Hochwasserschutz, Trinkwassergewinnung sowie der Niedrigwasserabgabe erfüllt.

Im Fokus war das System Energie- und Wasserspeicher Harz mit den gekoppelten Systemdienstleistungen

- Nachhaltige Stabilisierung des Energiesystems (Energieerzeugung und -speicherung),
- Hochwasserschutz,
- Niedrigwasserabgabe sowie
- Trinkwassergewinnung.

Alle vier Teilsysteme sind gekoppelt und beeinflussen sich dadurch gegenseitig (siehe Abbildung 1). Die individuellen Beiträge der einzelnen Aufgaben zum übergeordneten Ziel einer integrativen und nachhaltigen Systemdienstleistung für Niedersachsen mit volkswirtschaftlichem Mehrwert mussten zunächst erfasst und quantifiziert werden.

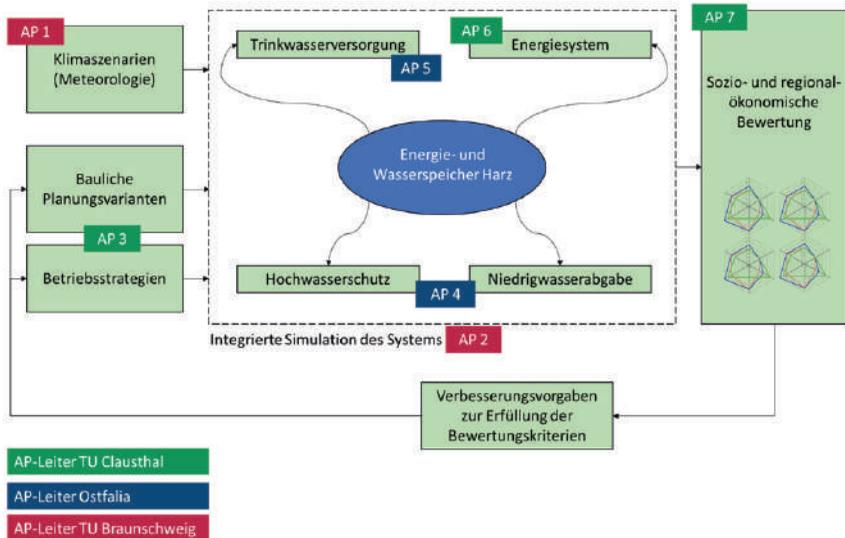


Abbildung 1: Gesamtkonzept

Um den zu erwartenden Nutzen dieser Dienstleistungen zu quantifizieren, wurden Planungsvarianten für ein zukünftiges Wasserspeicher- und Bewirtschaftungssystem definiert. Planungsvarianten wurden definiert als Neubau von Stauanlagen, Erweiterung vorhandener Stauanlagen, Nutzung offener Tagebauten sowie Nutzung untertage Bauwerke bzw. Neuauffahrungen. Mittels mathematischer Modellrechnungen des Gesamtsystems über lange Zeitperioden wurden die Wirkungen der Varianten gegenüber dem heutigen Zustand anhand von Bewertungskriterien quantifiziert.

Zur sozio- und regionalökonomischen Bewertung wurde das definierte System mit unterschiedlichen Betriebsstrategien mathematisch modelliert und simuliert. Die dafür erforderlichen Bewertungskriterien wurden erstmals für ein derartig gekoppeltes System entwickelt und exemplarisch angewendet.

Auf Basis der Ergebnisse wurden Verbesserungsoptionen zur Erfüllung der Bewertungskriterien durch angepasste Betriebsstrategien und - wenn nötig - auch durch Änderungen der Planungsvarianten entwickelt. Diese Iterationsschleife wurden jeweils unter den gegebenen Randbedingungen aus den meteorologischen Klimaszenarien durchlaufen.

Die Arbeit ist in einzelne Arbeitspakete (AP) gegliedert. Die einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden kurz aufgelistet:

Arbeitspaket 1 Klimaszenarien (Meteorologie)

Arbeitspaket 2 Integrierte Modellierung und Optimierung des Systems

Arbeitspaket 3	Bauliche Planungsvarianten und Betriebsstrategien
Arbeitspaket 4	Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe
Arbeitspaket 5	Trinkwasserversorgung
Arbeitspaket 6	Energiesystem
Arbeitspaket 7	Sozio- und regionalökonomische Bewertung

Die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeitspakete sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Durchgeführt wurde das Projekt in Zusammenarbeit der TU Clausthal mit der TU Braunschweig und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften mit den folgenden Einrichtungen:

- TU Clausthal:
 - o Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE), Prof. Beck
 - o Institut für Wirtschaftswissenschaft (IfW), Prof. Menges
 - o Institut für Bergbau (IBB), Prof. Langefeld
 - o Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC), Dr. zum Hingst
- TU Braunschweig:
 - o Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) mit der Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Prof. Meon
- Ostfalia:
 - o Fakultät für Bau-Wasser-Boden, Prof. Röttcher

Die Forschung wurden dabei von den Kooperationspartnern Harz Energie GmbH & Co. KG und Harzwasserwerke GmbH begleitend unterstützt.

Nach der Einarbeitung in das Projekt erfolgte neben den arbeitspaketspezifischen Arbeiten insbesondere die im Verbund gemeinsam durchgeführte Identifikation repräsentativer Standorte im Harz, die einen Möglichkeitsraum für die Analysen des Projektes zulassen. Dabei stand der Systemgedanke im Zusammenwirken verschiedener Standorte/Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen als Schwerpunkt des Projektes im Vordergrund. Ziel ist dabei die Entwicklung einer auf andere Standorte übertragbaren Methodik. Bei der Auswahl der Standorte des definierten Möglichkeitsraumes stand neben der Verfügbarkeit von Daten aus vorangegangenen Betrachtungen und der bestehenden Infrastruktur das Bündelungsgebot im Vordergrund. Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt üblicherweise bei der Errichtung von Trassen zur Energieübertragung (z. B. Südlink). Daher wurden insbesondere Standorte ausgewählt, an denen bereits eine entsprechende (wasserwirtschaftliche) Infrastruktur vorhanden ist. Ziel war somit eine Minimierung der Umweltbelastungen. Im Rahmen dieser Systemstudie wurde dazu ein

technisch möglicher Betrachtungsraum (Möglichkeitsraum) ausgewählt. Dabei sind auch Standorte enthalten, die in der Öffentlichkeit teilweise kritisch gesehen werden. Der Sensitivität dieser Thematik ist sich das Projektteam durchaus bewusst. Für die Auswahl eines Möglichkeitsraums zur Entwicklung einer auf andere Standorte übertragbaren Methodik vor dem Hintergrund des systemischen Zusammenwirkens der einzelnen Maßnahmen wurden hier aber bewusst keine Denkverbote auferlegt.

Einen Meilenstein im Gesamtprojekt stellte die Identifikation potentiell geeigneter Standorte als Möglichkeitsraum für eine spätere Realisierung der Maßnahmen dar. Diese Zwischenergebnisse wurden im März 2021 zusammengefasst und kommuniziert. Am 09.03.2022 wurde ein Workshop mit der Leitung des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) in Goslar durchgeführt. Seitens des MWK nahm Staatssekretärin Dr. Sabine Johannsen in Vertretung für Herrn Minister Thümler teil. Im Workshop erfolgte eine Vorstellung und Diskussion des Gesamtsystems sowie bisheriger Ergebnisse unter Berücksichtigung von Einzelmaßnahmen und Überleitungssystemen. Weiterhin wurde das Simulationssystem und Simulationsergebnisse sowie die Bewertungsfunktion vorgestellt.

Zur Einbindung von zivilgesellschaftlichen Akteuren wurde ein Praxisbeirat während der gesamten Projektlaufzeit eingebunden. Im Folgenden sind die Treffen des Projektteams zu gemeinsamen Workshops mit dem Praxisbeirat aufgeführt, die auch einer kontinuierlichen Ergebnisprüfung gedient haben. Im Beirat waren die folgenden Organisationen und Mitglieder eingeladen, die entweder persönlich oder durch von ihnen bestimmte Vertreter an den Sitzungen teilgenommen haben:

- Harzwasserwerke GmbH
- Harz Energie GmbH & Co. KG
- Oberbürgermeister(in) der Stadt Goslar
- Bürgermeister der Gemeinde Schladen-Werla
- Landrat des Landkreises Goslar
- Stiftung Bergwerk Rammelsberg, Altstadt von Goslar und Oberharzer Wasserwirtschaft
- Energie Ressourcen Agentur Goslar e.V.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)

1 Klimaszenarien (AP 1)

Patrick Nistahl, M. Sc., Dipl.-Hydr. Tim Müller, Prof. Dr.-Ing. Günter Meon, TU Braunschweig

1.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Im Sommer 2017 waren der Harz und das Harzvorland bis nach Hannover und Braunschweig einer verheerenden Hochwasserkatastrophe ausgesetzt. Goslar und weite Teile der Region Hildesheim standen unter Wasser. Im Folgejahr 2018 litten die gleiche Region und ganz Mitteleuropa vom Frühling bis zum Spätherbst unter extremer Hitze und Dürre. Auch in 2019 und – etwas abgeminderter in 2020 – gab es monatelang im Norden und Osten Deutschlands kaum Niederschlag, die Trinkwassertalsperren im Harz leerten sich bedenklich.

Die Häufung solcher meteorologisch-hydrologischer Extreme, die in relativ kurzen zeitlichen Abständen zu Engpässen in der Wasserversorgung, aber auch zu Hochwasserkatastrophen führten und denen Teile Deutschlands vor allem im Sommer ausgesetzt waren, ist auffällig. Die Klimaprognosen deuten auf eine Zunahme solcher extremen Situationen des Wasserdargebots in Flussgebieten hin (NLWKN 2021/1). Auch die Harzwasserwerke GmbH, die sechs große Talsperren im westlichen Harz betreibt, befürchtet auf mittlere bis längere Sicht und ohne Ausbau des heutigen Versorgungssystems eine klimabedingte Verknappung des Wasserdargebots bei gleichzeitig steigendem Bedarf in der Nutzerregion bis zur norddeutschen Küste. Zugleich fordert die laufende Energiewende in Niedersachsen eine signifikante Zunahme von Möglichkeiten zur Energiespeicherung.

Vor diesem Hintergrund lag das Ziel des Projektes EWAZ in der Erarbeitung von wasserwirtschaftlichen und energietechnischen Maßnahmen zur Klimawandelanpassung im westlichen Harz. Mithilfe einer angepassten und erweiterten wasserbaulichen Infrastruktur (Speichersysteme) sollten die drei wasserwirtschaftlichen Systemdienstleistungen Trinkwasserversorgung, Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung unter dem erwarteten Klimawandeleinfluss optimiert werden. Als vierte Dienstleistung wurde die Energiespeicherung mittels ober- und untertägiger Pumpspeicher betrachtet.

Die Ziele des Teilprojektes der TU Braunschweig innerhalb des Gesamtverbundes waren die Themen Klimaszenarien (AP 1) und die integrierte numerische Modellierung des Wasserhaushalts und der baulichen Anlagen im Untersuchungsgebiet (AP 2). Des Weiteren gehörte zu den Arbeitszielen die weitere Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten der Ostfalia Hochschule „Oberirdische Speicher, Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung“ und der TU Clausthal mit der Energiesystembetrachtung (AP 6), bergbaulichen Fragestellungen (AP 3) und der sozio- bzw. regionalökonomischen Bewertung (AP 7).

Im Rahmen des Arbeitspaketes Klimaszenarien (AP 1) wurden meteorologische Zeitreihen aufbereitet, als räumliche Datenfelder aus der Vergangenheit und Zukunft analysiert und für die integrierte Modellierung des Gesamtsystems in AP 2 zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden wird zunächst die hydrologisch-meteorologische Datengrundlage beschrieben und die Methodik der hydrologischen Wirkmodellierung erläutert, mit der die natürlichen Zuflüsse zu den Speicheranlagen mit erwarteter Klimaänderung ermittelt wurden.

1.2 Einführung und Vorgehen

Die im Rahmen von EWAZ untersuchten Standortvarianten und Sub-Varianten sollten auch auf ihren Beitrag zur Klimawandelanpassung untersucht werden. Eine gängige Methodik, um zu untersuchen, wie sich der Klimawandel auf die Abflüsse in Oberflächengewässern auswirkt, ist die hydrologische Modellierung von Klimafolgen (Hakala et al. 2019).

Hierbei verwendet ein hydrologisches Modell (siehe auch Kapitel 2.3) Klimaprojektionen als Eingangsdaten. Klimaprojektionen sind Simulationen des Klimas über Zeiträume von mehr als 100 Jahren, welche unter angenommenen Vorgaben u. a. zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentration („Szenarien“) durchgeführt werden. Globale Klimamodelle rechnen das gesamte Weltklima inklusive Rückkopplung durch bspw. die Meere in einer groben horizontalen Auflösung von ca. 100 km. Um hieraus Aussagen auch auf regionaler Ebene ableiten zu können, werden feiner aufgelöste Klimamodelle (ca. 12 km) für begrenzte Gebiete wie z. B. Zentraleuropa simuliert, welche ihre Randbedingungen aus verschiedenen globalen Klimamodellen erhalten (Abbildung 2).

Details zur Auswahl und Vorverarbeitung der verwendeten Klimarealisierungen sind in Kapitel 1.4 beschrieben.

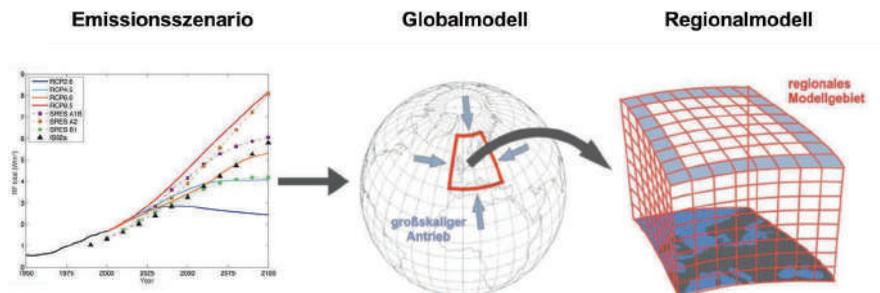


Abbildung 2: Modellkette der regionalen Klimamodellierung (NLWKN 2021, nach Klimanavigator 2017)

1.3 Historische Beobachtungen

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurde zunächst die hydrologische und meteorologische Datenbank an der TU Braunschweig mithilfe von zahlreichen zur Verfügung gestellten Beobachtungsdaten der Harzwasserwerke GmbH für den westlichen Harz und des NLWKN für das gesamte Aller-Leine-Oker Einzugsgebiet erweitert.

Für die Talsperreinzugsgebiete im westlichen Harz standen insgesamt 70 Niederschlagsstationen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur Verfügung (Abbildung 3):

- 37 Regensammler (Totalisatoren, Monatssummen)
- 11 Regenmesser (Tageswerte)
- 22 Niederschlagschreiber (15-Minuten-Werte)

Hinzu kamen diverse Niederschlagsstationen des NLWKN für die Einzugsgebiete unterhalb der Talsperren (Abbildung 4) sowie ein im Rahmen des Projektes KLiBiW erstellter Rasterdatensatz aus meteorologischen Beobachtungen mit Auflösung von 1 km (NLWKN 2021/1).

Zur Kalibrierung und Validierung standen zudem zahlreiche Abflussdaten aus Harz (Abbildung 4) und Harzvorland sowie die Talsperrendatenbanken mit umfänglichen Wasserbilanzen, Entnahme- sowie Abgaberegeln zur Verfügung.

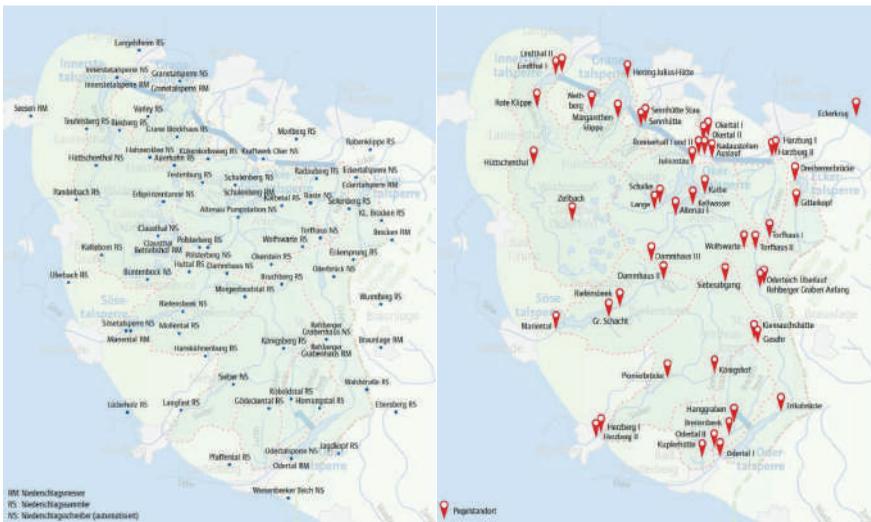


Abbildung 3: Niederschlagsstationen (links) und Pegelstandorte (rechts) im Westharz (Lange und Eggelsmann 2011)

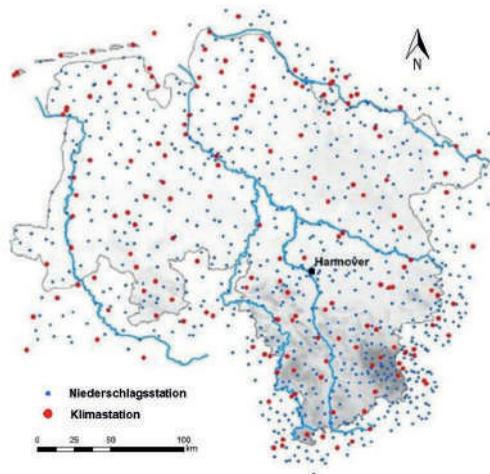


Abbildung 4: Niederschlagsstationen in Niedersachsen (NLWKN 2021/1)

Die deutliche Verfeinerung des existierenden Messnetzes für Niederschlag und Abfluss im Harz sowie die Bilanzen an den sechs großen Talsperren der Harzwasserwerke konnten in das Gesamtsystem integriert werden und bildeten die Basis für a) die Bewertung der Klimaszenarien und b) die Kalibrierung und Validierung des Modellsystems (siehe auch Kapitel 2.6).

1.4 Verwendete Klimarealisierungen

Die Auswahl der zu verwendenden Klimarealisierungen (Kombinationen aus Emissionsszenario, Globalmodell und Regionalmodell) fand in Abstimmung mit der niedersächsischen Klimafolgenforschung des Projektes KliBiW (NLWKN und TU Braunschweig) statt. Wie auch in KliBiW wurde in EWAZ das sogenannte Kernensemble für Deutschland auf Basis des RCP8.5-Szenarios verwendet, welches vom Bund-Länder Fachgespräch empfohlen wurde. Die aus den Projekten EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment, Jacob et al. 2017) sowie ReKliEs-DE (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Hübener et al. 2017) vorliegenden Realisationen wurden hier in einem ersten Schritt auf Basis der Abbildung des vergangenen Klimas validiert und einzelne Realisationen aus dem Ensemble entfernt (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2020). Anschließend wurden mithilfe eines Algorithmus jene Realisationen ausgewählt, welche eine möglichst große Bandbreite der wichtigsten klimatischen Variablen aufweisen (Dalelani et al. 2018). Abschließend wurde das Ensemble mithilfe von Beobachtungsrastern Bias-adjustiert und auf eine Auflösung von 5 km runterskaliert (Brienen et al. 2020).

Neben den sechs Realisationen dieses Kernensembles wurden vom NLWKN zwei ergänzende Projektionen mit der gleichen Auflösung zur Verfügung gestellt, welche im Gegensatz zum Kernensemble (dynamisches Downscaling), auf dem statistischen Regionalmodell WETTReg 2013 basieren (NLWKN 2021/1). Eine Übersicht über die verwendeten Klimarealisierungen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Für weitere Informationen zu den repräsentativen Emissionspfaden, den verwendeten Modellkombinationen und den ersten Aufbereitungsschritten sei auch auf die Schlussberichte von KliBiW 6 sowie ReKliEs-DE verwiesen.

Tabelle 1: Übersicht über verwendete Klimarealisierungen

Globales Klimamodell / Erdsystemmodell (ESM)	Regionales Klimamodell	Zeitliche und räumliche Auflösung	Art des Downscaling
EC-Earth (r1)	RACMO	5 km, 1 Tag	Dynamisch
EC-Earth (r12)	RACMO		Dynamisch
HadGEM2-ES	WETTREG2013		Statistisch
HadGEM2-ES	WRF361H		Dynamisch
MIROC5	CCLM		Dynamisch
MPI-ESM-LR	CCLM		Dynamisch
MPI-ESM-LR	WETTREG2013		Statistisch
MPI-ESM-LR	WRF361H		Dynamisch

Als Referenzzeitscheibe wurde analog zum Projekt KliBiW 1971-2000 gewählt. Da sehr große wasserwirtschaftliche Maßnahmen, wie sie in EWAZ untersucht wurden, in der Regel eine lange Vorplanungs- und Genehmigungszeit benötigen, erschien die in KliBiW verwendete Zeitscheibe für die nahe Zukunft 2021-2050 als nicht angebracht. Zugleich sollten die Varianten jedoch auch nicht erst auf ihren Einfluss auf den Wasserhaushalt in der üblichen Zeitscheibe der fernen Zukunft (2071-2100) überprüft werden. Als geeignete Zukunftszeitscheibe für die Analyse des Einflusses der Planungsvarianten auf den potentiellen Wasserhaushalt der Zukunft wurde daher die Zeitscheibe 2041-2070 identifiziert.

Die Unsicherheit, die der Modellkette der hydrologischen Modellierung von Klimafolgen zugrunde liegt, ist bei der Betrachtung von sehr kleinen Flusseinzugsgebiete erhöht, da sich zufällige Fehler der Klimamodelle (sog. „Klimarauschen“) bei Betrachtung von sehr wenigen Rasterzellen nicht gegenseitig ausgleichen (Taylor et al. 2012).

Auch aus diesem Grund wurde eine weitere Validierung der Klimarealisierungen für die Referenzperiode unter Nutzung der meteorologischen Beobachtungen durchgeführt (Beispiel in Abbildung 5). Eine Auswertung der Niederschlagshöhen hat ergeben, dass vor

allein die beiden Realisationen MPI-ESM WettReg2013 („MPI W13“) und HadGem WRF316H für die Referenzperiode eine vergleichsweise geringe Abweichung der Niederschlagssumme aufweisen. Zudem wurde die Niederschlagssumme von MPI W13 leicht unterschätzt und von HadGem WRF316H leicht überschätzt. Ursprünglich wurde daher geplant, sämtliche Planungsvarianten zunächst mit diesen beiden Realisationen als Eingangsdatenreihe zu simulieren und für ausgewählte Varianten dann eine Sensitivitätsanalyse mit den weiteren sechs Realisationen durchzuführen. Im Laufe des Projektes wurde jedoch von diesem Ansatz abgesehen und stattdessen sämtliche acht Klimarealisationen für alle Planungsvarianten simuliert, um die gesamte Bandbreite des Ensembles auch für die kleinen Talsperreneinzugsgebiete darstellen zu können. Die Validierung der acht Klimarealisationen in der Referenzperiode zeigte für den Niederschlag insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse, sodass von einer erneuten Bias-Korrektur abgesehen wurde. Insgesamt wurde festgestellt, dass die Klimarealisationen mit statistischem Downscaling sowohl in der Referenzperiode als auch für die Zukunft für das Untersuchungsgebiet niedrigere Niederschlagshöhen aufweisen als die Klimarealisationen mit dynamischem Downscaling. Dies stimmt mit den Ergebnissen für andere Gebiete überein (Hübener et al. 2017).

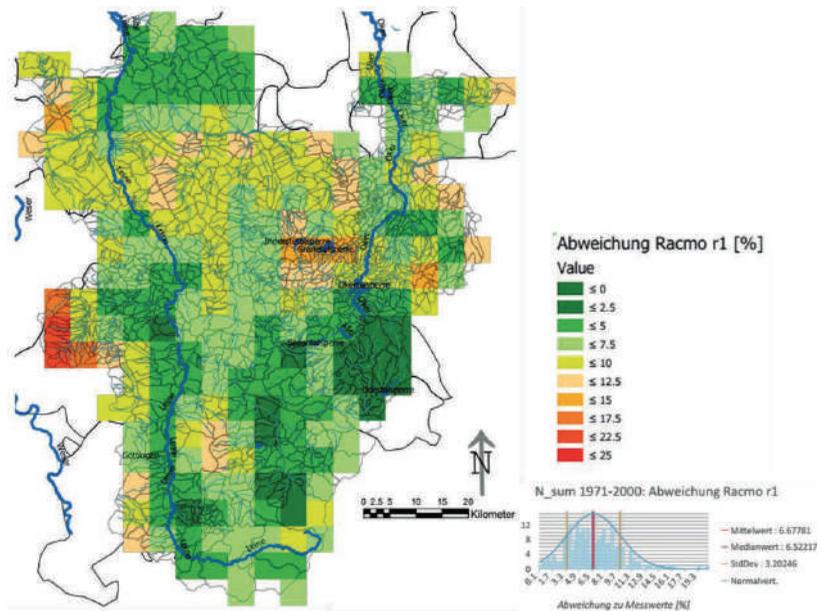


Abbildung 5: Prozentuale Abweichung des Niederschlags der Klimarealisation MPI-Racmo r1 von interpolierten Beobachtungen für das Untersuchungsgebiet im Referenzzeitraum 1971-2000

2 Integrierte Modellierung des Gesamtsystems (AP2)

Patrick Nistahl, M. Sc., Dipl.-Hydr. Tim Müller, Prof. Dr.-Ing. Günter Meon, TU Braunschweig

2.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Im AP 2 wurde ein räumlich hochaufgelöstes hydrologisches Modell für den Wasserhaushalt (PANTA RHEI) mit einem Modell für den Betrieb von Einzelspeichern oder Speicherverbundsystemen im westlichen Harz kombiniert (IGOmod). Beide Modelle sind so gekoppelt, dass PANTA RHEI die natürlichen Zuflüsse in die Speicher liefert. Mit IGOmod wird der Wassermengenbetrieb von einzelnen Speichern und von vernetzten Speichern einschließlich ihrer Überleitungen simuliert. Daraus werden die Speicherabgaben berechnet, von PANTA RHEI nach unterstrom übernommen und mit simulierten Zuflüssen aus den Zwischeneinzugsgebieten überlagert (Abbildung 6).

Hierzu werden in den Kapiteln 2.2 bis 2.5 die Methodik der integrierten Systemmodellierung und die einzelnen Modell- und Bewertungskomponenten näher erläutert. Nach der Kalibrierung und Validierung der Modelle (Kapitel 2.6) werden in Kapitel 2.7 die Modellierung und die Simulationsergebnisse der untersuchten Planungsvarianten vorgestellt. In Kapitel 2.8 erfolgt schließlich eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und ein Ausblick.

2.2 Gesamtkonzept der Modellierung und Bewertung

Für EWAZ wurde entsprechend Abbildung 8 ein räumlich hochaufgelöstes hydrologisches Modell für den Wasserhaushalt mit einem Modell für den Betrieb von Einzelspeichern oder Speicherverbundsystemen im westlichen Harz kombiniert. Für die hydrologische Modellierung wurde die Planungsversion der institutseigenen hydrologischen Software PANTA RHEI (siehe Kapitel 2.3) verwendet. Das Speicherbetriebsmodell IGOmod basiert auf der Software Gecko, mit der beliebige Verbundsysteme und Betriebsregeln für Mehrzweckspeicher modelliert werden können (siehe Kapitel 2.4). Beide Modelle sind so gekoppelt, dass PANTA RHEI die natürlichen Zuflüsse in die Speicher liefert. Mit IGOmod wird der Wassermengenbetrieb von einzelnen Speichern und von vernetzten Speichern einschließlich ihrer Überleitungen simuliert. Daraus werden die Speicherabgaben berechnet, von PANTA RHEI nach unterstrom übernommen und mit simulierten Zuflüssen aus den Zwischeneinzugsgebieten überlagert (siehe Abbildung 6).

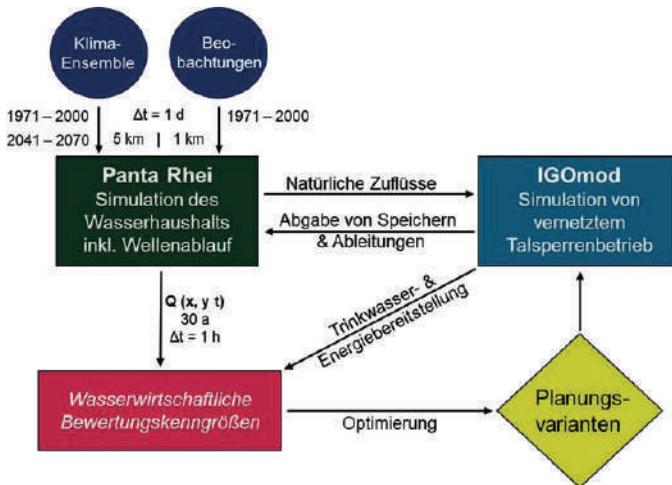


Abbildung 6: Konzept der wasserwirtschaftlichen Systemmodellierung und Bewertung (AP 2) unter Nutzung von regionalen Klimasimulationen (AP 1)

In dem integrierten hydrologisch-speicherbetrieblichen Systemmodell werden die Informationen aller Teilprojekte in Planungsvarianten zusammengeführt. Nach Implementierung der im Projektkonsortium erarbeiteten konstruktiven und operationellen Details wird die integrierte Simulation von Wasserhaushalt und Speicherbetrieb durchgeführt und mit dem aktuellen Systemzustand verglichen. Für jede Projektvariante lassen sich Kenngrößen der Wirksamkeit, wie zum Beispiel die Zuverlässigkeit der Bedarfsdeckung von Trinkwasser im Zeitraum 2041–2070 in Konkurrenz zur Niedrigwasseraufhöhung und zur Schutzwirkung der Sperren gegen Hochwasser im Harzvorland ableiten. So können insbesondere die Veränderungen und Wechselwirkungen der genannten vier Systemdienstleistungen unter Klimawandeleinfluss quantifiziert und iterativ optimiert werden. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ergab sich dabei vor allem aus der gemeinsamen Planung und iterativen Überarbeitung von neuen Speicheranlagen, welche dann von der TU Braunschweig modelliert werden.

2.3 Hydrologische Langzeitsimulationen mit PANTA RHEI

Das hydrologische Modellsystem PANTA RHEI wird seit 2005 in Zusammenarbeit zwischen dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz (HYWAG) und dem Institut für Wassermanagement GmbH (IfW) entwickelt (LWI-HYWAG und IfW 2012). PANTA RHEI findet u. a. Anwendung in der operationellen Hochwasservorhersage (Meon et al. 2015), Studien zu den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen (NLWKN 2021/1 und Wörner

et al. 2019), zu Hochwasserschutzplanungen und zur Gewässergüte (Lorenz et al. 2017) auf nationaler und internationaler Ebene. Es handelt sich um ein deterministisches, semi-distributives Modell, bei dem das Gesamteinzugsgebiet in hochaufgelöste Teilflächen unterteilt wird, welche basierend auf Landnutzung, Bodeneigenschaften und Topographie wiederum in Hydrotope als kleinste hydrologische Berechnungseinheiten unterteilt werden (Förster et al. 2014). Für jedes Teileinzugsgebiet werden die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration sowie des Wellenablaufs nach zuvor ausgewählten Prozeduren und unter Berücksichtigung der internen Hydrotop-Verteilungen simuliert (Abbildung 7). Je nach Anwendungsfall kann die zeitliche Diskretisierung frei gewählt werden und liegt in den meisten Fällen zwischen 15 Minuten (Bemessungssimulationen für Hochwasserschutzplanungen) und einer Stunde (langjährige Wasserhaushaltssimulationen).

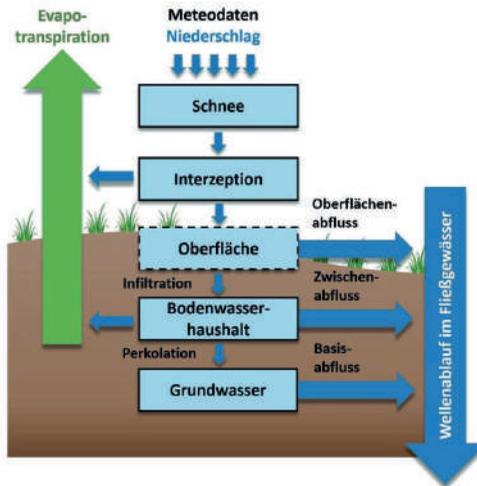


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Abflussbildung, -konzentration und des Wellenablaufs im hydrologischen Modell PANTA RHEI

Im Projekt EWAZ werden neben der Hochwasserschutzwirkung der zu untersuchenden Varianten auch die Zielgrößen Trinkwasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung und Energiespeicherung betrachtet. Der Fokus der hydrologischen Modellierung mit PANTA RHEI liegt demnach zum einen in einer guten Nachbildung der langjährigen Talsperrenzuflüsse und zum anderen im Routing der von IGOmod berechneten Speicherabgaben in Überlagerung mit den Abflüssen der unterstrom gelegenen Teileinzugsgebiete.

Hierfür wurden bestehende Modellversionen des oberen Oker- und Leine-Einzugsgebiets mithilfe von neuen Daten zu Topographie (DGM1) und Landnutzung (ATKIS) überarbeitet, vor allem im westlichen Harz deutlich verfeinert sowie 21 Schnittstellen zum Austausch mit IGOmod implementiert (siehe Abbildung 8).

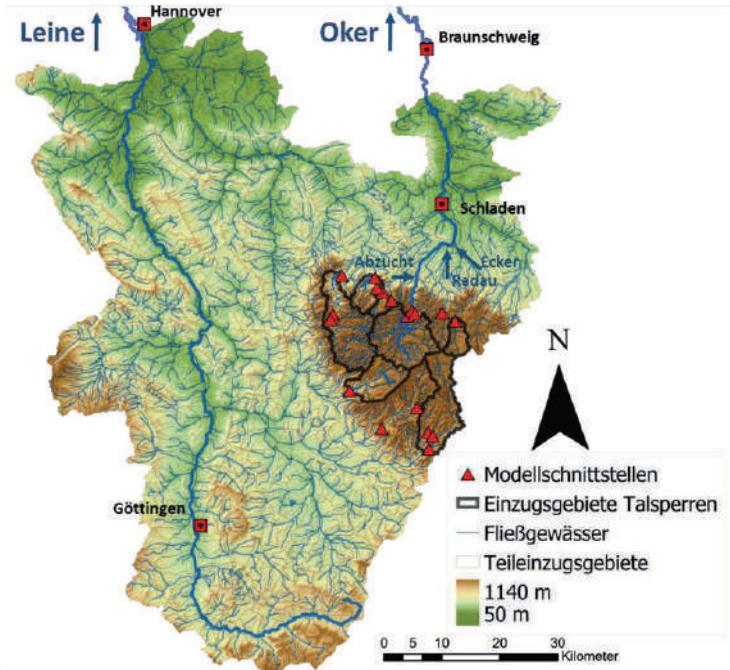


Abbildung 8: Das hydrologische Untersuchungsgebiet mit einem Gesamteinzugsgebiet von ca. 6000 km², 2560 Teileinzugsgebieten und 21 Schnittstellen zwischen hydrologischem Modell und Speicherbetriebsmodell

2.4 Modellierung vernetzter Speichersystem mit Gecko/IGOmod

Die Simulation des Betriebs der bestehenden Talsperren im Westharz und der untersuchten Varianten erfolgte mit Hilfe des Speicherverbundmodells IGOmod (Innerste-Grane-Oker-Modell). Das Modellsystem ist Bestandteil der Softwareplattform Gecko (Geodata-Core) des Ingenieurbüros IWUD GmbH aus Hörter. Gecko bietet neben der Modellierung von Einzel- und Verbundspeichern auch zahlreiche weitere Funktionalitäten, zum Beispiel Interfaces zwischen hydrologischen und hydrodynamischen Modellen. Eine Vorversion von IGOmod wurde schon 2015 im Zuge des Neubewilligungsverfahrens der Harzwasserwerke GmbH für das Nordharzverbundsystem in Kooperation mit der Technischen Universität Braunschweig entwickelt (Meon et al. 2016). Das Speicherverbundsystem ist aufgrund der Charakteristika von Speicheranlagen modular ausgelegt. Die Elemente einer Talsperre können durch definierte Schnittstellen miteinander verknüpft und in ein Gesamtsystem gebracht werden. Konstruktive Erweiterungen wie angepasste Bauwerke oder neue Speicheranlagen sowie operationelle Anpassungen nach neuen Betriebsplänen lassen sich effektiv in bestehende Modellanwendungen integrieren.

Innerhalb des Modellsystems können wasserstandsabhängige Überleitungen zwischen zwei Speichern simuliert und Priorisierungen von konkurrierenden Überleitungen berücksichtigt werden. Dies trifft auf das Nordharzverbundsystem zu, bei dem z. B. die Graneltsperre durch zwei Überleitungen aus der Innerste- und Okertalsperre zusätzlich gefüllt wird.

Die Wiedergabe der komplexen, interdependenten Betriebsregeln erfolgt über einen sogenannten Regelinterpretier. Dieser ermöglicht neben der Verwendung von Lamellenplänen für die Steuerung der Abgabe auch die Festlegung von Steuermechanismen im Falle von Niedrig- oder Hochwassersituationen.

In Abbildung 9 ist exemplarisch die Implementierung von drei verbundenen Speichern veranschaulicht. Der linke Teil zeigt das Fließschema einer untersuchten Variante, welche dann in die Modellsoftware IGOmod implementiert wurde (rechts). Die interdependente Steuerung der verschiedenen per Überleitungen miteinander verknüpften Speicher wird auf der rechten Abbildung durch die roten Linien repräsentiert. Anhand von mehreren Iterationsrechnungen wird die Verteilung der Wassermengen auf Basis aller Regeln und Vorgaben im Modellsystem ermittelt. Da die Überleitungen gegenseitigen Einfluss aufeinander haben und gegebenenfalls Neuberechnungen einzelner Speicher verursachen können, muss innerhalb des Modells eine Priorisierung der Überleitungen vorgegeben werden. Dies wird dann durch den sogenannten Controller gesteuert.

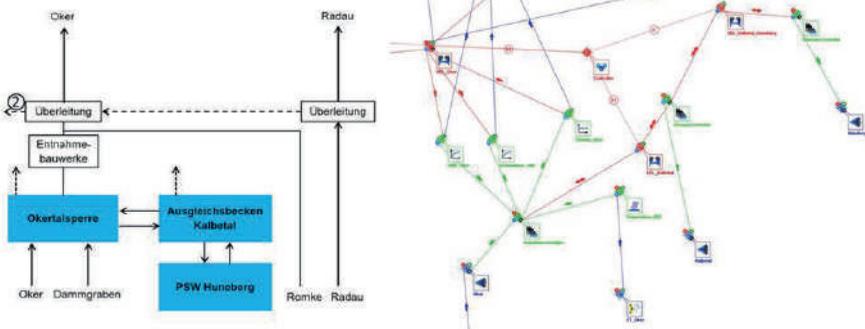


Abbildung 9: Beispiel von drei verbundenen Speichern mit Fließschema (links) und modularer Implementierung in der Modellsoftware (rechts)

2.5 Wasserwirtschaftliche Bewertungsindikatoren

Für jede konstruktive Planungsvariante ergeben sich unterschiedliche operationelle Betriebsweisen und Speicherraumteilungen. Jede Kombination wird mithilfe der zuvor beschriebenen kombinierten Modellierung aus natürlichem Wasserhaushalt und Speicherbetrieb simuliert, sodass langjährige Abflussganglinien für beliebige Standorte im

Untersuchungsgebiet und für jeden meteorologischen Treiber (Beobachtungen und Klimaensemble) resultieren. Um diese Ergebnisse einer Bewertung und Optimierung zugänglich zu machen, werden die Zeitreihen zu wasserwirtschaftlichen Bewertungskenngrößen für alle vier Zielgrößen zusammengefasst. Hierbei wird u. a. auf das Verfahren nach Hashimoto et al. (1982) zurückgegriffen, welches die Vulnerabilität, Resilienz und Reliabilität als wasserwirtschaftliche Systembewertungskenngrößen definiert.

Die Reliabilität α beschreibt die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit, dass sich ein System während eines definierten Zeitraumes in einem zufriedenstellenden Zustand befindet. Zufriedenstellende und nicht zufriedenstellende Systemzustände werden durch einen zuvor festgelegten Schwellwert getrennt und die Häufigkeit der Überschreitung bzw. Unterschreitung aufsummiert (Abbildung 10). Für die Zielgröße Trinkwasser kann beispielsweise die Versorgungssicherheit definiert werden als Häufigkeit der Erfüllung der zuvor vorgegebenen Trinkwasserabgabe. Im Bereich des Hochwasserschutzes wird in der Regel das Risiko zur Bewertung herangezogen, welches als eins minus die Reliabilität beschrieben werden kann ($R = 1 - \alpha$). Zudem werden zur besseren Anschaulichkeit sowie Abgrenzung zur Resilienz hydrologisch unabhängige Ereignisse oberhalb des Schwellwertes aufsummiert.

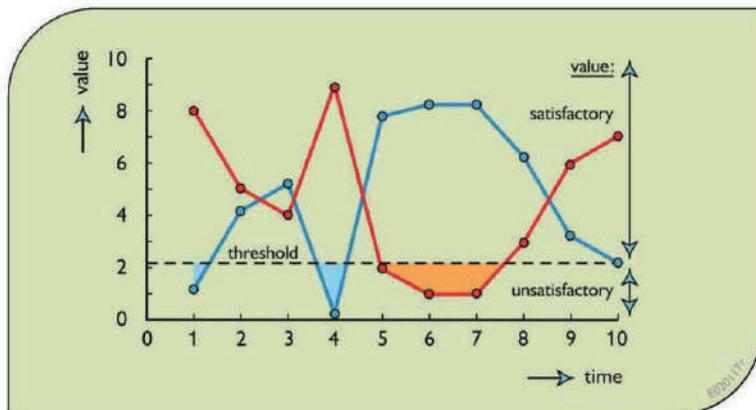


Abbildung 10: Methodik der Ermittlung von wasserwirtschaftlichen Bewertungskenngrößen aus Zeitreihen (Loucks und van Beek 2017)

Um nicht nur die Häufigkeit, sondern auch das Ausmaß solcher Über- bzw. Unterschreitungsereignisse in die Bewertung einzubeziehen, werden auch die Resilienz und die Vulnerabilität in die Bewertung einbezogen. Die Resilienz ist dabei definiert als Wahrscheinlichkeit, dass nach einer Schwellwertüberschreitung wieder ein zufriedenstellender Systemzustand folgt. Im Hochwasserkontext wird hierbei die durchschnittliche Dauer einer Schwellwertüberschreitung betrachtet und als Hochwasserdauer bezeichnet.

Die Vulnerabilität stellt den Schweregrads des Ereignisses dar – im Rahmen der Zielgröße Hochwasserschutz beispielsweise der durchschnittliche Abstand eines Hochwasserscheitels vom definierten Schwellwert.

In Tabelle 2 sind beispielhafte Bewertungskenngrößen für die vier betrachteten Zielgrößen mit Zuordnung zu den oben genannten Kategorien im Rahmen von EWAZ angegeben.

Als Schwellwerte für die Zielgröße Hochwasserschutz wurde in EWAZ in der Regel das HQ₂₀ der Referenzperiode für Pegel in den Wirkgebieten gewählt. Hierbei wurden ein Pegel in unmittelbarer Nähe der Anlagen und ein Pegel mit deutlich größerem Einzugsgebiet gewählt. Analog wurde für diese Pegel eine Niedrigwasserschwelle definiert, die auf dem NN7Q der Referenzperiode basiert.

Tabelle 2: Beispielhafte Bewertungskenngrößen für die vier Zielgrößen im Projekt EWAZ

	Hochwasserschutz	Trinkwasser	Niedrigwasseraufhöhung	Energiespeicherung
Reliabilität	Ereignisse über definierter HW-Schwelle	Ereignisse an denen TW-Abgabe nicht bereitgestellt wird	Ereignisse unter Niedrigwasserschwelle	Ereignisse an denen Leistungsbedarf nicht bereitgestellt wird
Resilienz	Dauer eines HW-Ereignisses	Dauer eines Ausfall-Events	Dauer einer Unterschreitung (Durchschnitt)	Dauer eines Ausfall-Events (Durchschnitt)
Vulnerabilität	Max. Abstand zur HW-Schwelle	Max. Abstand zur gewünschten Abgabe pro Ausfall-Event	Max. Abstand zur Schwelle pro Unterschreitung	Max. Abstand zur gewünschten Leistungsabgabe

2.6 Kalibrierung und Validierung mit historischen Beobachtungen und heutiger Infrastruktur

Vor Implementierung von Varianten erfolgte die Kalibrierung und Validierung der Modelle für den Zeitraum 1971-2000 mit Nutzung der umfangreichen Abflussmessungen des NLWKN und der Harzwasserwerke unter Verwendung von gerasterten meteorologischen Beobachtungen mit räumlicher Auflösung von einem Kilometer und zeitlicher Auflösung von einem Tag. Eine Verwendung von meteorologischen Eingangsdaten mit feinerer zeitlicher Auflösung ist zwar modelltechnisch möglich und wäre im oberen, schnell reagierenden Einzugsgebiet ggf. sinnvoll, wurde jedoch aufgrund der angestrebten Konsistenz mit der Verwendung der lediglich auf Tageswertbasis verfügbaren Klimasimulationsergebnisse in der laufenden Projektphase nicht umgesetzt.

Bei der Kalibrierung des integrierten Modellsystems für den langfristigen Wasserhaushalt und den Betrieb der Stauseen lag der Schwerpunkt auf den Zuflussvolumen zu den Stauseen, dem saisonalen Wasserhaushalt und der Hoch-/Niedrigwasserstatistik. Exemplarisch ist in Abbildung 11 (links) die Kalibrierung des Pegels Altenau dargestellt, der den Zufluss zur Okertalsperre aufzeichnet. Da er mit 31 km² lediglich etwa 37 % des Einzugsgebietes der Talsperre abdeckt, wurde zusätzlich das simulierte jährliche Zuflussvolumen zur Okertalsperre mit Bilanzrechnungen der Harzwasserwerke GmbH (Lange und Egelsmann 2011) verglichen und in Abbildung 12 dargestellt.

Die Simulationsergebnisse zeigen im Oberharz eine hohe Modellgüte sowohl in der Nachbildung des zeitlichen Verlaufs am Pegel Altenau (KGE 0,8) als auch in der Abflussfülle an der Okertalsperre (PBIAS -2 %). Einzelne extreme Abflussscheitel wurden erwartungsgemäß am Pegel Altenau ($A_{E0} = 31 \text{ km}^2$) aufgrund der beschriebenen Limitierung der zeitlichen Auflösungen der Beobachtungsdaten und der resultierenden Unterschätzung der Niederschlagsintensität nicht erreicht. Der Einfluss dieser Scheitel ist aufgrund der Retentionswirkung der Talsperren für die Bewertung des Hochwasserschutzes im unteren Einzugsgebiet jedoch vernachlässigbar. Gleichzeitig wurden kleine Abflüsse zwischen 50 und 150 l/s in der Simulation am Pegel Altenau überschätzt, da Teile des mikroskaligen Grabensystems (Oberharzer Wasserregal) nicht im Modell implementiert sind.

Bei den Kalibrierungsergebnissen am Pegel Schladen (Abbildung 11, rechts), ca. 25 km unterstrom der Sperre gelegen, sind bereits die Simulationsergebnisse des Speicherbetriebs (IGMod, Kapitel 2.4) integriert, da die Oker in Schladen u. a. maßgeblich durch die Abgabe der Okertalsperre sowie seitliche Zuflüsse der Radau (Teilableitung in den Radaustollen), der Ecker (beeinflusst durch die Eckertalsperre) sowie die Abzucht (Teilableitungen in den Oker-Grane-Stollen) geprägt ist. Auch hier zeigt sich trotz des komplexen hydrologischen und anthropogen beeinflussten Abflussregimes eine insgesamt hohe Abbildungsgüte, die durch eine Kling-Gupta Effizienz (KGE) von 0,89 bestätigt wird.

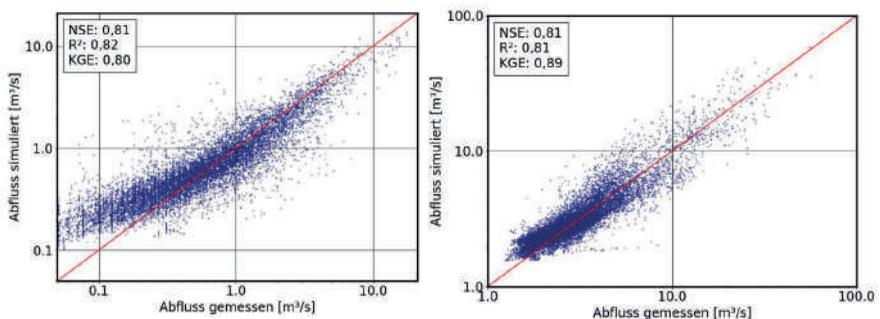


Abbildung 11: Vergleich von simuliertem und beobachtetem Abfluss an den Pegeln Altenau (Zuflusspegel Okertalsperre, links) und Schladen (ca. 25 km unterstrom an der Oker, rechts)

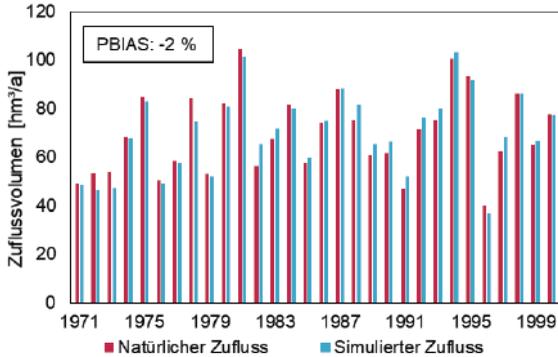


Abbildung 12: Vergleich des simulierten und beobachteten jährlichen Zuflussvolumens der Okertalsperre

Exemplarische Kalibrierungsergebnisse für das Einzugsgebiet der Innerste sind in Abbildung 13 dargestellt. Auch hier zeigt sich eine hohe Anpassungsgüte der Simulation sowohl beim natürlichen jährlichen Zufluss zur Talsperre (links) als auch bei der zeitlich hochaufgelösten Simulation bis zum Pegel Heinde an der Innerste ($A_{EO} = 897 \text{ km}^2$, rechts).

Sämtliche Zuflusspegel an den untersuchten Stauanlagen und Variantenstandorten sowie die Pegel in den Wirkgebieten zeigten für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum eine hohe Anpassungsgüte mit einer Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE) von mindestens 0,7.

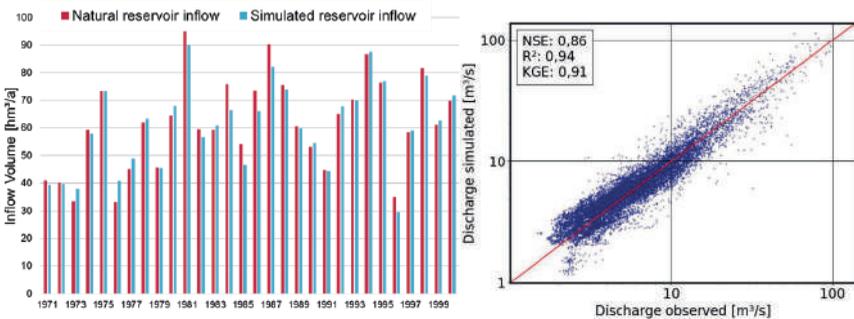


Abbildung 13: Vergleich von simuliertem jährlichen Zuflussvolumen zur Innerstetalsperre und Beobachtungen der Harzwasserwerke aus der Wasserbilanz an der Talsperre (links) sowie Ergebnisse am Pegel Heinde an der Innerste ($A_{EO} = 897 \text{ km}^2$)

2.7 Modellierung von Planungsvarianten für (klimatische) Historie und Zukunft

2.7.1 Übersicht über modellierten Varianten

Im Rahmen des Gesamtprojektes wurden fünf konstruktive und betriebliche wasser- und energiewirtschaftliche Varianten (Neubauten, Erweiterungen, Überleitungen) mit zahlreichen Untervarianten auf mögliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Region in Bezug auf die vier zuvor beschriebenen Zielgrößen analysiert (siehe auch Kapitel 3).

Die zu betrachtenden Varianten sollen positive Auswirkungen auf mehrere der vier zum Teil konkurrierenden Zielgrößen bieten und sind damit i. d. R. auch von Nutzungskonflikten betroffen. Potentielle Konflikte wurden bereits in einer ersten Speicherraumplanung abgewogen. Diese geht in die anfänglichen Simulationen ein. In einem iterativen Prozess werden dann konstruktive Varianten und Betriebspläne mittels der Simulationsergebnisse modifiziert und nach Zielvorgaben iterativ überarbeitet. Die initiale Erarbeitung der wasserbaulichen Varianten erfolgte maßgeblich durch die Hochschule Ostfalia in Zusammenarbeit mit den Harzwasserwerken, teilweise unter Rückgriff auf historische Planungsunterlagen.

Die im Projektkonsortium identifizierten und von der TU Braunschweig modellierten Standorte sind in Abbildung 14 eingetragen.

Nachfolgend sind für jede Projektvariante in einzelnen Abschnitten die Implementierung im Speichermodell sowie Simulationsergebnisse für die vier Zielgrößen unter historischen und erwarteten zukünftigen klimatischen Verhältnissen dargestellt.

Die dargestellten Simulationsergebnisse des kombinierten Modellsystems stellen i. d. R. Mittelwerte über das beschriebene Klimaensemble dar. Pro Standort werden dabei die Ergebnisse einer Vorzugsvariante dargestellt. Weitere untersuchte Sub-Varianten werden in Kapitel 3 beschrieben.

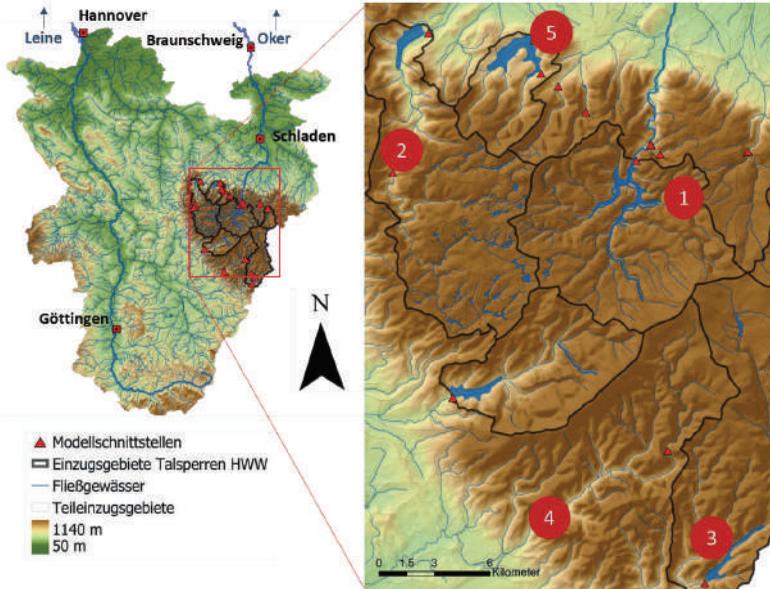


Abbildung 14: Standorte der modellierten Planungsvarianten

- Variante 1** Pumpspeicher Huneberg mit Verbindung zur Okertalsperre
- Variante 2** Errichtung einer oberen Innerstetalsperre und Verbindung mit der Granetalsperre im Freispiegelgefälle sowie Pumpspeicher Hohestein
- Variante 3** Kombination aus Pumpspeicher Stöberhai an Odertalsperre und TW-Gewinnung an der Odertalsperre
- Variante 4** Wassernutzung im Siebertal und Pumpspeicher Knollen
Erhöhung der Granetalsperre und damit Vergrößerung des Stauvolumens für TW-Nutzung, HW-Schutz, NW-Aufhöhung und Energieerzeugung
- Variante 5**

2.7.2 Modellierung des Pumpspeichers Huneberg mit Verbindung zur Okertalsperre

Die Variante 1 stellt die Nachnutzung des Diabas-Steinbruchs Huneberg als Oberbecken eines Pumpspeicherkraftwerks an der Okertalsperre dar (siehe Abbildung 15). Dieses Becken soll neben der Energiespeicherung auch dem Hochwasserschutz, der Unterstützung der Trinkwasserversorgung an der Granetalsperre sowie der Einhaltung der ökologischen Mindestwasserabgabe an der Okertalsperre dienen. Der Steinbruch, der sich ca.

3 km östlich der Talsperre befindet, besäße einen Stauraum von etwa 16 hm^3 bei einer Wasserspiegellagendifferenz zur Okertalsperre bei Vollstau von etwa 195 m.

2.7.2.1 Implementierung im Modell

Im Rahmen der Implementierung im Modell des bestehenden Nordharzverbundsystems wird der Speicher Huneberg mit einer Hochwasserschutzlamelle von 2 hm^3 zur Unterstützung des Hochwasserschutzes an der Okertalsperre sowie einer Speicherabgrenzung und -erweiterung der Okertalsperre im Kalbetal mittels Vorsperre um weitere 2 hm^3 simuliert (siehe Kapitel 3). Bei Erreichen eines kritischen Füllstandes der Okertalsperre, wird der Pendelbetrieb eingestellt und der HW-Schutzraum des Kalbetals und des Hunebergs gefüllt. Nach dem HW-Ereignis wird das Wasser entsprechend über die Turbinen wieder abgelassen.

Unterhalb des Hochwasserrückhalterumes sind weitere 2 hm^3 als Energielamelle für die Nutzung des Pumpspeichers vorgesehen. Der Pendelbetrieb des Pumpspeichers wird unter Berücksichtigung einer Bedarfsganglinie der TU Clausthal (Kapitel 7) simuliert.

Unterhalb dieser Energielamelle befinden sich weitere 12 hm^3 Speicherraum, die nur bei extremer Trockenheit an der Okertalsperre genutzt werden. Kommt es während der Simulation zur Unterschreitung eines kritischen Wasserstandes, wird auch hier der Pendelbetrieb eingestellt und die Okertalsperre aufgefüllt, sodass sie ihre UW-Abgaben sowie ggf. Überleitungen zur Granetalsperre aufrechterhalten kann.

Der Betriebsplan der Okertalsperre inkl. Überleitungsplan zur Granetalsperre basiert auf dem aktuell gültigen Betriebsplan nach Bewilligung in 2017 und wurde zunächst nicht angepasst. Für die Trinkwasserentnahme aus der Granetalsperre wurden unterschiedliche Gesamtentnahmemengen mit konstanter Entnahme berücksichtigt.

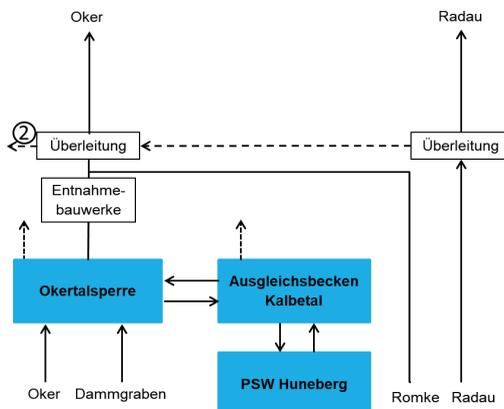


Abbildung 15: Schema der Implementierung des Hunebergs im Modell IGOMod

2.7.2.2 Simulationsergebnisse

Nachfolgend sind die nach Zielgröße getrennten Simulationsergebnisse der Variante Huneberg unter Nutzung der vorgestellten Modellkombinationen beschrieben.

Hochwasserschutz

Trotz ihres verhältnismäßig kleinen Einzugsgebiets ($A_{EO} = 85 \text{ km}^2$) hat die Okertalsperre aufgrund des hohen Jahresniederschlages im Westtharz einen signifikanten Einfluss auf das Abflussregime der mittleren und unteren Oker. Die Sperre kann somit einen Beitrag zum Hochwasserschutz der stromabwärts gelegenen Ortschaften bis nach Braunschweig ausüben (NLWKN 2021/2).

Der Einfluss der Variante Huneberg auf den Hochwasserschutz der Okertalsperre wurde u. a. an den Pegeln Okertal ($A_{EO} = 94 \text{ km}^2$), ca. 3 km unterhalb der Talsperre und Schladen ($A_{EO} = 363 \text{ km}^2$, siehe Abbildung 16), ca. 20 km unterhalb der Talsperre, untersucht.

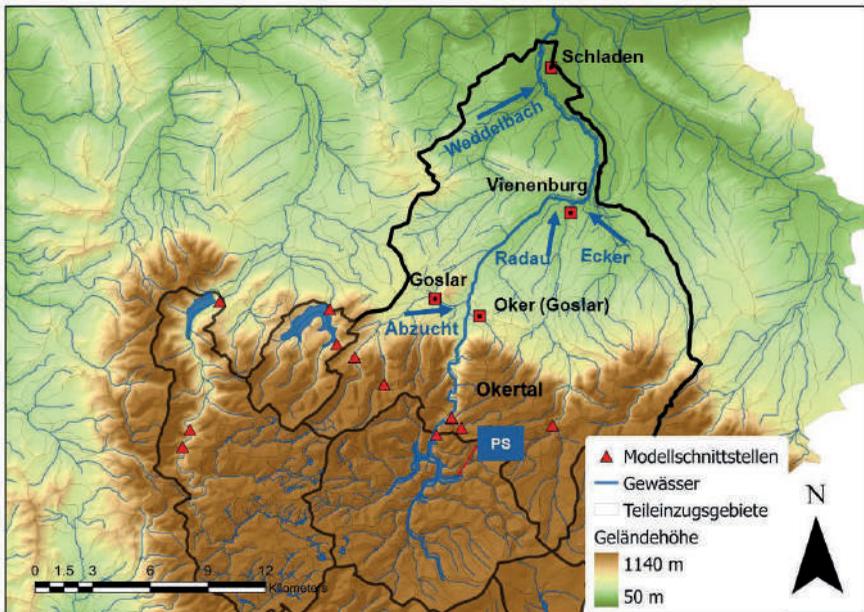


Abbildung 16: Obere und mittlere Oker mit Teileinzugsgebieten und seitlichen Zuflüssen bis Pegel Schladen als unmittelbares Einflussgebiet des untersuchten Pumpspeichers Huneberg

Ein großes Hochwasser im meteorologischen Referenzzeitraum 1971-2000 des EWAZ-Projektes mit erheblichen Schäden im Okereinzugsgebiet bis Braunschweig ereignete sich im April 1994 mit einer Kombination aus Schneeschmelze und Regen. Es hatte einen Abflussscheitel in Schladen von knapp über $80 \text{ m}^3/\text{s}$ und war damit ähnlich hoch wie das

Extremereignis 2017 (ca. $90 \text{ m}^3/\text{s}$). Im Gegensatz zum Ereignis im Juli 2017 wies die Okertalsperre im April 1994 bereits zu Beginn des Ereignisses einen hohen Füllstand auf. Die Retentionswirkung im Speicher war reduziert und es flossen große Abflussmengen über die Hochwasserentlastung ab.

Zur ersten Bewertung der Planungsvariante Huneberg wurde der meteorologische Referenzzustand sowohl im konstruktiven Status Quo (SQ) des Nordharzverbundsystems unter damals gültigen Betriebsplänen (Lamellenplan I) als auch nach Implementierung der Variante simuliert. Anschließend wurde der Huneberg erneut unter Verwendung eines angepassten Betriebsplans der Talsperre nach heute aktuellem Regelwerk (Lamellenplan II) simuliert. In Abbildung 17 ist das 1994er-Ereignis als Ausschnitt aus den 30-jährigen Langzeitsimulationen an den Pegeln Okertal sowie Schladen dargestellt.

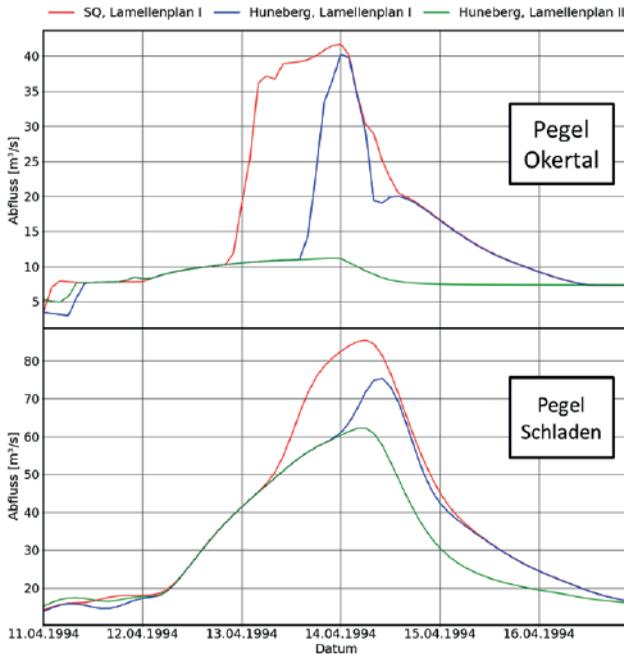


Abbildung 17: Simulierte Abflussganglinie an Pegeln Okertal und Schladen für den konstruktiven Status Quo (SQ) und die Variante Huneberg, simuliert nach damals gültigem Lamellenplan I sowie dem neuen Betriebsplan (Lamellenplan II)

Der zusätzliche Hochwasserrückhalteraum von 4 hm^3 am Huneberg bzw. Kalbetal führt bereits zu einer deutlichen Abminderung des Wellenvolumens. Aus der Kombination der Variante Huneberg mit den heute gültigen Betriebsplänen an der Okertalsperre konnte die Hochwasserwelle ohne Abgabe über die Hochwasserentlastung stark abgemindert

werden. Der Wellenscheitel wurde in Schladen um ca. $20 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert. Dieser angepasste Betriebsplan beinhaltet neben überarbeiteten Abgabe- und Überleitungsregeln auch einen erweiterten Hochwasserrückhalteraum im Sommerhalbjahr an der Okertalsperre. Die Variante Huneberg könnte somit bei einem ähnlichen meteorologischen Ereignis mit Starkregenzentrum im Harz in der Zukunft in Kombination mit den angepassten Betriebsplänen der Okertalsperre einen wertvollen Beitrag zum Hochwasserschutz der Unterlieger liefern.

Neben der Wirkung der Varianten unter Verwendung von meteorologischen Beobachtungen wurde auch die mögliche Wirkung auf den erwarteten Wasserhaushalt der Zukunft (2041-2070) unter Nutzung des beschriebenen Klimaensembles als meteorologische Input-Zeitreihe simuliert und nach definierten Kenngrößen bewertet.

In Abbildung 18 sind Simulationsergebnisse für das gesamte Klimaensemble (8 Realisationen à 30 Jahre) jeweils für den baulichen Status Quo und inklusive der Variante Huneberg für den Pegel Okertal unterhalb der Talsperre dargestellt. Sämtliche Ergebnisse basieren auf dem aktuellen Betriebsplan des Nordharzverbundsystems und einem Zielabfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ als Schwellwert. Als Kenngröße der Reliabilität wurde die Häufigkeit von unabhängigen Überschreitungseignissen für jede Realisation des Klimaensembles zwischen 2041 und 2070 ausgezählt (links). Die Unterstützung der Okertalsperre durch die Variante Huneberg führte in der aktuellen Modellimplementierung zu einer Reduktion von insgesamt 27 auf 14 Überschreitungseignisse in der Summe über das gesamte Ensemble und kann damit im Durchschnitt etwa jedes zweite Ereignis komplett zurückhalten.

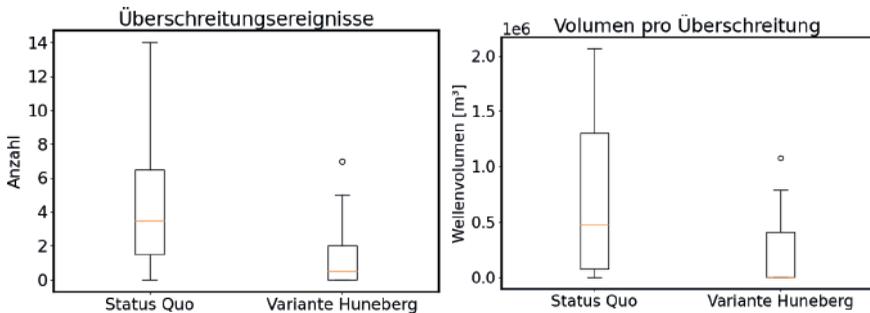


Abbildung 18: Anzahl von Ereignissen (links) sowie Volumen pro Ereignis (rechts) über $12 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Okertal über das gesamte Klimaensemble (2041-2070) im Status Quo sowie nach Implementierung der Variante Huneberg. In jedem Boxerplot ist der Median, die zwei Quartile und die Extremwerte aus den Simulationen dargestellt.

Betrachtet man zusätzlich das durchschnittliche Volumen der verbleibenden Ereignisse (rechts), so reduziert es sich im Maximum von etwa 2 hm^3 für die „nasseste“ Klimarealisation ECE-Racmo-r1 auf etwa $1,1 \text{ hm}^3$.

Die gesamte Ganglinie 2041-2070 dieser extremsten Klimarealisation ist in Abbildung 19 dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Großteil der Extremereignisse, welche aus einer Abgabe über die Hochwasserentlastung der Okertalsperre resultieren, mithilfe des Hunebergs nahezu vollständig zurückgehalten wird (links). Lediglich das größte Ereignis im Januar 2061 wird durch die Variante nur im Volumen leicht verringert, da der Hochwasserrückhalteraum des Hunebergs bereits durch ein kleineres, vorangegangenes Ereignis gefüllt wurde. Hier könnte in der Realität eine Zuflussvorhersage eine Vorentlastung auslösen und damit auch dieses Extremereignis weiter reduzieren. Im Rahmen einer möglichen Folgeuntersuchung zur Variante sollte auch geprüft werden, inwiefern ein angepasster Betrieb und eine modifizierte Speicherräumteilung die Wirkung des Hochwasserschutzes verbessern kann, ohne die weiteren drei Systemdienstleistungen signifikant zu verschlechtern.

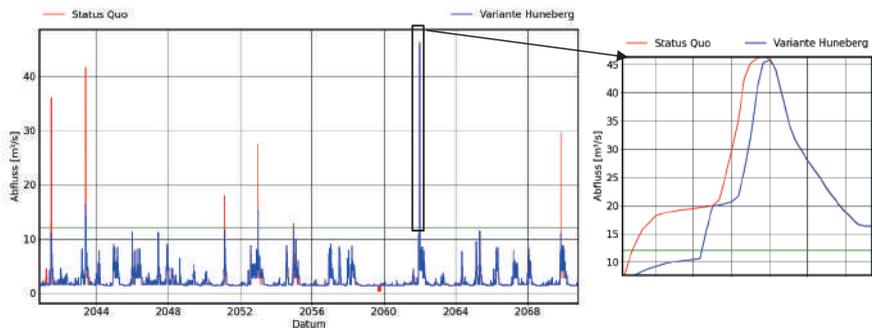


Abbildung 19: Simulationsergebnisse am Pegel Okertal für die Klimarealisation ECE Racmo r1. Die grüne horizontale Linie entspricht dem (fiktiv) vorgegebenen Zielabfluss. Links Ergebnisse für 2041-2070, rechts Vergrößerung des Überschreitungereignis 2061.

Vergleicht man über den gesamten Simulationszeitraum aller Realisationen die Inanspruchnahme der Hochwasserentlastungsanlage der Okertalsperre in Vergangenheit und Zukunft, wird deutlich, dass die Nutzung in der Zukunft deutlich häufiger notwendig wurde und auch das über die HWE abgegebene Volumen deutlich zunahm (Tabelle 3, Spalte „Ohne Huneberg“). Nach Implementierung der Variante Huneberg konnte dieser Effekt mehr als nur ausgeglichen werden. So wurden hierdurch in der Referenzperiode sämtliche Abgaben über die HWE zurückgehalten und in der Zukunftsperiode um mehr als 80 % in Dauer und Volumen reduziert (Spalte „Mit Huneberg“).

Tabelle 3: Vergleich der Dauer und des Volumens der Abgabe über die Hochwasserentlastungsanlage der Okertalsperre

Anspruchnahme Hochwasserentlastung Okertalsp.	Ohne Huneberg	Mit Huneberg
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	23.75	0
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	48.75	8.87
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-82%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.55	0
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	1.34	0.16
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-88%	

Betrachtet man, wie sich dies unterstrom auf die Pegel Okertal und Schladen (siehe Abbildung 16) auswirkt, so erkennt man einen deutlichen Effekt auf Hochwasserdauer und Volumen, der durch die wachsende Größe des nicht beeinflussbaren Zwischeneinzugsgebiets abnimmt (Tabelle 4 und Tabelle 5). Am Pegel Schladen ($A_{EO} = 363 \text{ km}^2$) kann noch immer eine deutliche Reduktion des durchschnittlichen Hochwasservolumens um 24 % beobachtet werden (Tabelle 5).

Insgesamt zeigt sich, dass ein zusätzlicher Speicher einen signifikanten Beitrag zur Unterstützung des Hochwasserschutzes der Okertalsperre liefern kann.

Tabelle 4: Vergleich von Überschreitungsdauer bzw. -volumen mit und ohne die Variante Huneberg für die Historie und Zukunft am Pegel Okertal für den Zielabfluss 11 m³/s

Überschreitung HW-Schwelle Okertal ¹	Ohne Huneberg	Mit Huneberg
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	166	109
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	264	103
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-61%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	3.0	1.5
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	5.3	1.6
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-71%	

Tabelle 5: Vergleich von Überschreitungsdauer bzw. -volumen mit und ohne die Variante Huneberg für die Historie und Zukunft am Pegel Schladen für den Zielabfluss 63 m³/s

Überschreitung HW-Schwelle Schladen ²	Ohne Huneberg	Mit Huneberg
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	6.9	1.4
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	39.0	35.3
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-10%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.19	0.03
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	2.55	1.94
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	-24%	

Niedrigwasseraufföhung

Neben der Hochwasserschutzlamelle ist in der im Projekt geplanten Speicherräumteilung des Hunebergs ein großer Reserveraum von etwa 12 Mio. m³ zur Auffüllung der Okertalsperre in extremen Trockenperioden vorgesehen. Die Okertalsperre selbst dient u. a. der Niedrigwasseraufföhung der Oker. So werden auch in Trockenzeit bei sehr

niedrigen Zuflüssen zur Talsperre mindestens $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ an den Unterlauf der Oker abgegeben, um die Fließgewässerökologie zu schützen und ggf. Unterliegern Kühlwasserentnahmen bzw. Einleitungen zu ermöglichen. Im Falle von extremen Trockenperioden kann es aufgrund von sehr niedrigen Füllständen an der Okertalsperre dazu kommen, dass diese Mindestwasserabgabe nicht mehr eingehalten werden kann. In solchen Situationen ist im Modell eine Auffüllung der Okertalsperre durch den Reserveraum des Huneberg vorgesehen.

Beispielhaft ist ein solches Trockenereignis in der Ganglinie des Pegels Okertal für die Realisation ECE Racmo r12 (2041-2070) zu erkennen (Abbildung 20).

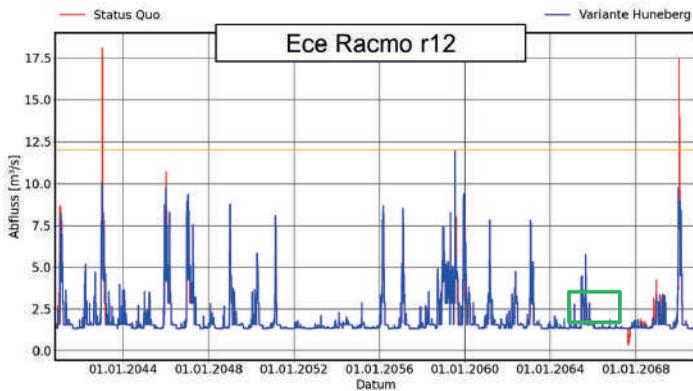


Abbildung 20: Beispielhafte Ganglinie für den Pegel Okertal und Klimarealisation ECE Racmo r12

Neben der wirksamen Reduktion von Hochwasserereignissen ist im Jahr 2067 ohne Variante Huneberg eine Unterschreitung der ökologischen Mindestwasserabgabe der Okertalsperre zu erkennen (grüner Kasten). Abbildung 21 stellt eine Detailansicht dieses Ereignisses mit Markierung des sogenannten Defizitvolumens unterhalb der Niedrigwasserschwelle von $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ dar. Bei Simulation mit Planungsvariante Huneberg (blau) wird diese Unterschreitung vermieden.

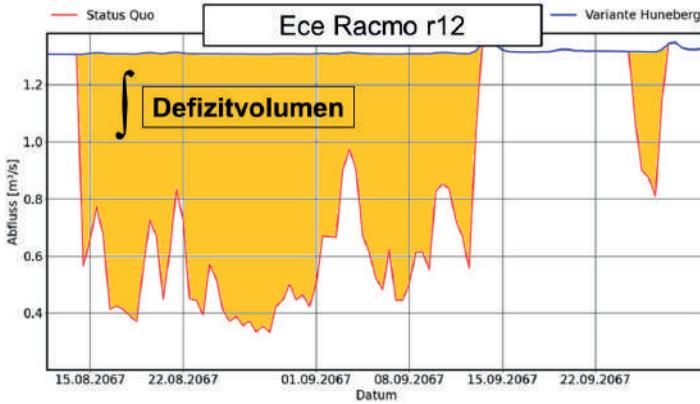


Abbildung 21: Detailansicht des Niedrigwasserereignisses aus Abbildung 18 und Markierung des Defizitvolumens zur ökologischen Mindestwasserabgabe

Die Summe der Defizitvolumina wurde für jede Klimarealisation mit und ohne Huneberg ausgewertet (Abbildung 22). Bei insgesamt 5 von 8 Klimarealisationen kommt es zu Unterschreitungereignissen, die bei 4 von 5 Realisationen durch den Huneberg vollständig vermieden werden können. Bei der besonders trockenen Realisation *HadGem-WETT-Reg 2013* kann das Defizitvolumen um ca. 80 % reduziert werden.

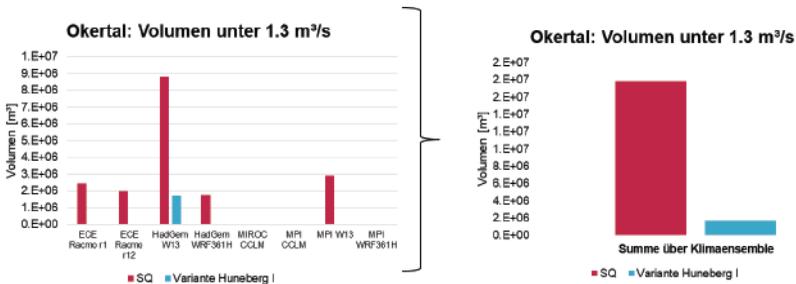


Abbildung 22: Defizitvolumen zur ökologischen Mindestwasserabgabe am Pegel Okertal für einzelne Klimarealisationen (links) und in Summe (rechts). Ergebnisse in Rot sind ohne Huneberg, Ergebnisse in Blau mit Huneberg.

Trinkwasserversorgung

Die Variante Huneberg beinhaltet keine eigene Trinkwasseraufbereitung. Im aktuellen Nordharzverbundsystem wird von der Okertalsperre Wasser nach festgelegtem Überleitungsplan in Abhängigkeit der jeweiligen Stauinhalte zur Granetalsperre übergeleitet. Aus der Granetalsperre werden im Modell 47,3 Mio. m³/a Rohwasser zur Trinkwasseraufbereitung entnommen. Die Versorgungssicherheit der Granetalsperre kann durch die

Aufhöhung der Okertalsperre durch den PS Huneberg erhöht werden. Die beispielhafte Wirkung des PS Huneberg auf ein Trockenereignis innerhalb einer Langzeitsimulation ist in Abbildung 23 dargestellt. Durch eine erhöhte Überleitungsmenge von Oker- zur Granetalperre kann ein Abfall auf lediglich 7,5 Mio. m³ Stauinhalt vermieden werden.

Diese Wirkung wird über alle Klimarealisierungen z. B. am 1 %-Perzentil der Granetalperre deutlich. Diese ist in Tabelle 6 als Median über alle Realisationen mit und ohne die Variante Huneberg dargestellt. Das 1 %-Perzentil wird bei Trinkwasserentnahme von 47,3 Mio. m³/a um ca. 5 % angehoben.

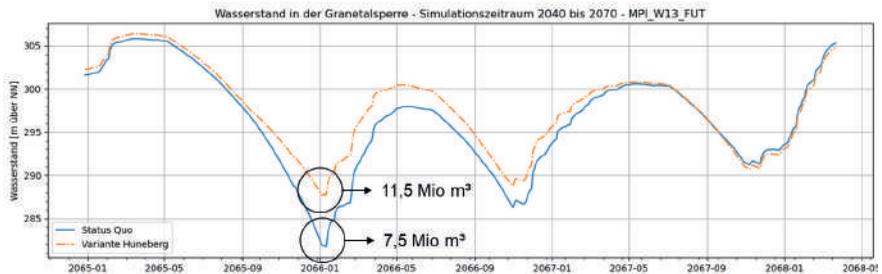


Abbildung 23: Ausschnitt aus einer Simulation der Realisation MPI-WETTReg-2013 zur beispielhaften Wirkung des Hunebergs auf den Stauinhalt an der Granetalperre bei Trockenphasen

Tabelle 6: Einfluss des PS Hunebergs auf das 1 %-Perzentil des Stauinhalts der Granetalperre bei Trinkwasserentnahme von 47,3 Mio. m³/a

	Ohne Huneberg	Mit Huneberg
- Historie 1971-2000: 1 %- Perzentil Grane [Mio. m ³]	14.7	15.95
- Zukunft 2041-2070: 1 %- Perzentil Grane [Mio. m ³]	11.76	12.4
Veränderung durch Huneberg (2041-2070)	5%	

Energiespeicherung

Außerhalb von hydrologischen Extremereignissen wird das PS Huneberg im Modell im Regelbetrieb nach Bedarfsganglinie der TU Clausthal betrieben. Für Details zum energiewirtschaftlichen System ist auf das Kapitel 7 verwiesen.

Als direktes Ergebnis der wasserwirtschaftlichen Simulation sind in Tabelle 7 die durchschnittliche Fallhöhe, die erzeugte elektrische Energie sowie der Zeitraum des Turbinenbetriebs im Verhältnis zur gesamten Simulationsdauer dargestellt. Sämtliche Ergebnisse wurden als Median über alle Klimarealisierungen berechnet.

Die elektrische Leistung wurde mit einem Wirkungsgrad von 0,9 und einer Verlusthöhe von 5 % abgeschätzt (nach Maniak 2016):

$$P_{Turbine} = Q \cdot (h - h_V) \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{Turbine}$$

mit:

$P_{Turbine}$ = elektrische Leistung der Turbine in kW

Q = Durchfluss in m³/s

h = Fallhöhe in m

h_V = 0,05 · h = Verlusthöhe in m

ρ = Dichte von Wasser in g/cm³

g = Erdbeschleunigung in m/s²

$\eta_{Turbine}$ = 0,9 = Wirkungsgrad der Turbine in pu

Tabelle 7: Energiewirtschaftliche Kenngrößen des PS Huneberg aus wasserwirtschaftlicher Simulation

	Ohne Huneberg	Mit Huneberg
Energieerzeugung Huneberg		
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	177.0
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	176.8
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	277
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	244
- Historie 1971-2000: Anzahl der Stunden, des PS-Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	50175 von 54775
- Zukunft 2041-2070: Anzahl der Stunden, des PS-Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	44385.6 von 54771

2.7.3 Modellierung der Varianten zur Nutzung von Wasser im Innerstetal

Unter der zweiten untersuchten Variante sind eine obere Innerstetalsperre und ein Pumpspeicher am Hohestein mit Verbindung zur Innerstetalsperre zusammengefasst (siehe stark vereinfachtes Fließschema in Abbildung 24). Für weitere Details zu der baulichen Varianten sei auf Kapitel 3 verwiesen.

Nachfolgend sind die Implementierung der Variante im Modell sowie die Simulationsergebnisse mit Bezug auf die vier Zielgrößen dargestellt.

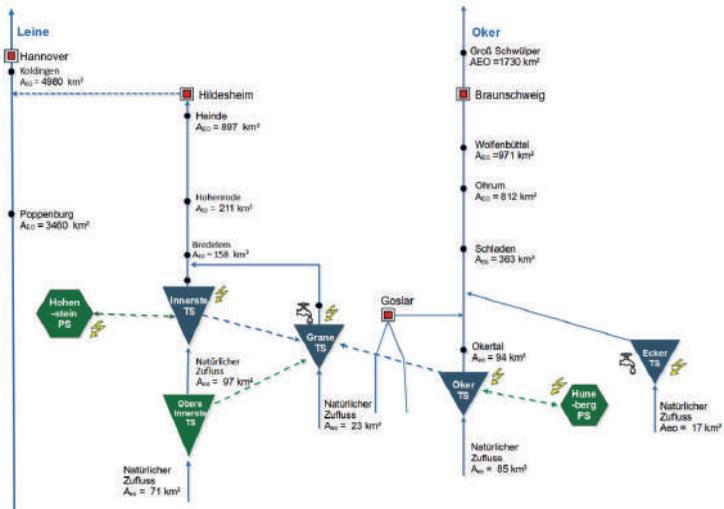


Abbildung 24: Stark vereinfachtes Fließschema der geplanten Varianten (grün) im Gebiet von Innerste und Oker mit Kennzeichnung der beeinflussten Pegeln und Größe der Einzugsgebiete. Die Überleitung von Innerste zur Grane nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre wird deaktiviert.

2.7.3.1 Implementierung im Modell

Die obere Innerstetalsperre wurde im Modell an der Stelle des heutigen Pegels Hütt-schenthal mit einem natürlichen Einzugsgebiet von 71 km^2 implementiert. Sie besitzt im Modell einen Gesamtstauraum von $13,9 \text{ hm}^3$ mit $2,1 \text{ hm}^3$ Hochwasserrückhalteraum, $8,2 \text{ hm}^3$ Betriebsraum und $3,6 \text{ hm}^3$ Reserveraum. Es wurde eine Überleitung zur Grane-talsperre im natürlichen Gefälle zur Granetalsperre berücksichtigt. Der hinterlegte Lamellenplan ist in Abbildung 25 dargestellt. Die bestehende Überleitung der Innerstetalsperre wurde deaktiviert.

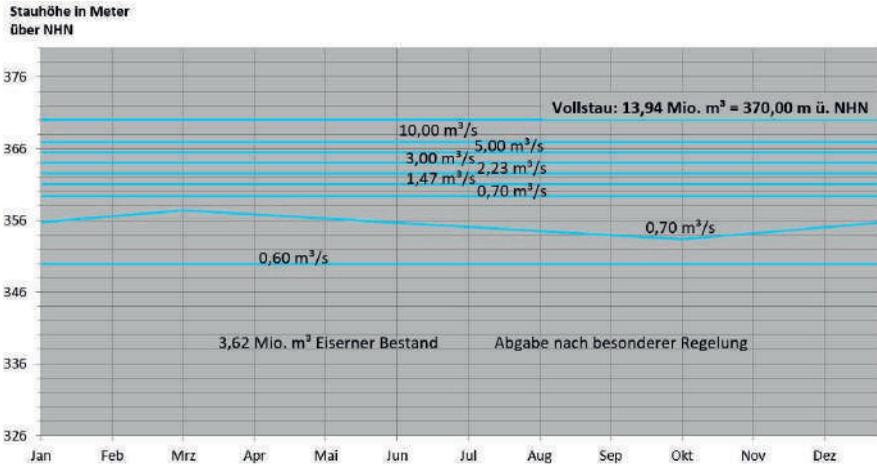


Abbildung 25: Im Modell verwendeter Betriebsplan der oberen Innerstetalsperre

Zusätzlich wurde ein Pumpspeicher Hohestein mit Verbindung zur Innerstetalsperre mit 2,4 hm³ Stauraum, einer Fallhöhe von ca. 280 m und einem Sonderbetrieb bei hydrologischen Extremereignissen analog zum Huneberg berücksichtigt. Das im Modell hinterlegt Fließschema ist in Abbildung 26 dargestellt.

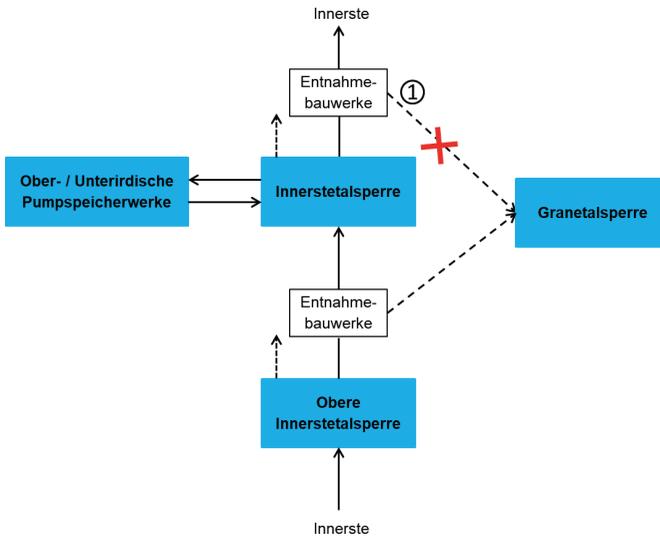


Abbildung 26: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGOMod im Innerste

2.7.3.2 Simulationsergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Simulationsergebnisse beziehen sich, wenn nicht anderweitig beschrieben, auf die Kombination aus oberer Innerstetalsperre und Pumpspeicher Hohestein.

Hochwasserschutz

Die Innerste-Talsperre bietet einen sehr wichtigen Hochwasserschutz für die flussabwärts gelegenen Städte und Siedlungen (NLWKN 2021/2). Im Rahmen von EWAZ wurde untersucht, inwiefern die Varianten im Innerstetal dieses Hochwasserschutzpotential für die Unterlieger auch vor dem Hintergrund zunehmender Extremereignisse erhöhen kann. Eine der hierfür gewählten Bewertungskriterien ist das Gesamtvolumen, welches über die Hochwasserentlastungsanlage (HWE) abgegeben wird, wenn der Hochwasserrückhalteraum der Innerstetalsperre vollständig gefüllt ist.

Hierfür wurde unter Nutzung der 8 Klimarealisationen die Veränderung der Gesamtabgabe über die HWE zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) ohne bauliche Veränderung bestimmt (Abbildung 27, links). 3 von 8 Klimarealisationen zeigen eine deutliche Zunahme der Abgabe über HWE an. Der Mittelwert über alle Realisationen liegt bei einer Zunahme von 75 %. Nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre (ohne PS Hohestein) nimmt die Gesamtabgabe über HWE in allen Klimarealisationen im Mittel um 90 % ab (Abbildung 27, rechts). Die obere Innerstetalsperre bietet also einen zusätzlichen Hochwasserschutz, der deutlich über den Ausgleich der Klimaeränderung zur Zeitscheibe 2041-2070 hinausgeht.

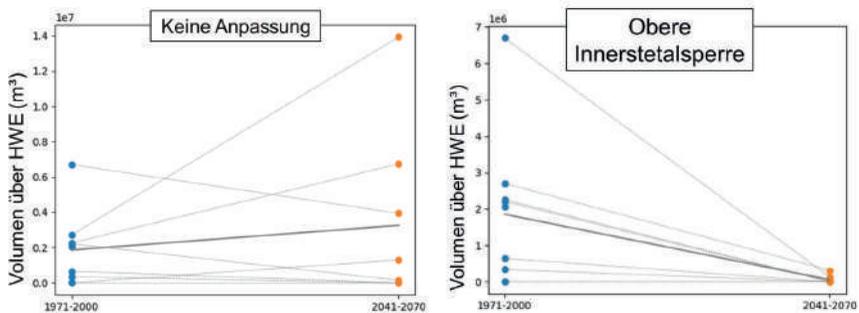


Abbildung 27: Veränderung der Gesamtabgabe über 30 Jahre über die HWE der Innerstetalsperre ohne konstruktive Anpassung (links) und nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre (rechts). Jeder Punkt steht für eine Klimarealisation. Die dunkelgraue Linie stellt den Mittelwert über alle Realisationen dar. Referenzperiode ohne bauliche Anpassung und mit aktuellem Betriebsplan simuliert.

Bei Implementierung des PS Hohestein ohne obere Innerstetalsperre (Abbildung 28, links) kommt es im Mittel zu einer Zunahme von etwa 2 %. Die Kombination aus PS

Hohestein und oberer Innerstetalsperre führt zu einer fast vollständigen Vermeidung der Nutzung der HWE der Innerstetalsperre und damit zu einem signifikanten zusätzlichen Hochwasserschutz (Abbildung 28, rechts).

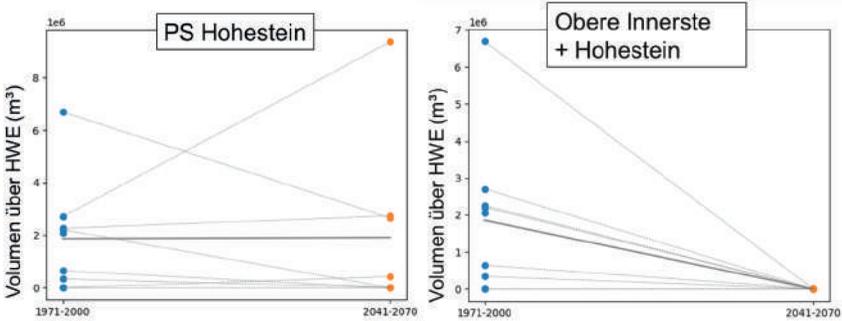


Abbildung 28: Veränderung der Abgabe über die HWE der Innerstetalsperre mit Implementierung des PS Hohestein für die Zukunftsperiode (links) und nach Implementierung der oberen Innerstetalsperre sowie des PS Hohesteins (rechts)

In Tabelle 8 und Tabelle 9 ist dargestellt, inwiefern sich dieser zusätzliche Hochwasserschutz weiter unterstrom an den Pegeln Bredelem ($A_{EO} = 158 \text{ km}^2$) und Heinde ($A_{EO} = 897 \text{ km}^2$) auswirkt. Auch hier ist ohne Implementierung der Varianten eine deutliche Zunahme von Hochwasserdauer und -volumen oberhalb der Schwelle des HQ_{20} zu erkennen. Durch Implementierung der Varianten kommt es zu einer deutlichen Reduktion dieser Werte. Diese Ergebnisse weisen insgesamt auf ein hohes Potential der untersuchten Varianten hin, ein potentiell steigendes Hochwasserrisiko an der Innerste zu mindern.

Tabelle 8: Veränderung der Überschreitung der HW-Schwelle am Pegel Bredelem zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal

	Ohne Obere Innerste & Hohestein	Mit Obere Innerste & Hohestein
Überschreitung HW-Schwelle Bredelem¹		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	15.4	1.3
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	40.4	1.4
Veränderung durch Variante (2041-2070)		-97%
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.4	0.04
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	1.39	0
Veränderung durch Variante (2041-2070)		-100%

Tabelle 9: Veränderung der Überschreitung der HW-Schwelle am Pegel Heinde zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal

	Ohne Obere Innerste & Hohestein	Mit Obere Innerste & Hohestein
Überschreitung HW-Schwelle Heinde²		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	11.6	4.3
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	76.9	59.5
Veränderung durch Variante (2041-2070)		-23%
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.2	0.03
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	12.2	10.0
Veränderung durch Variante (2041-2070)		-17%

Niedrigwasseraufhöhung

Betrachtet man die Zielgröße Niedrigwasseraufhöhung der Innerstetalsperre, so kommt es klimabedingt zu einer deutlichen Zunahme von Niedrigwasserwasserdauer und Defizitvolumen am Pegel Heinde zwischen Referenzzeitscheibe und Zukunft, die durch Implementierung der Varianten leicht zunimmt (Tabelle 10). Diese Zunahme kommt durch eine erhöhte Überleitungsmenge zur Granetalsperre zustande. Die Abgabe der oberen Innerstetalsperre ist im Modell unabhängig vom Füllstand der Innerstetalsperre. In weiteren Untersuchungen sollte diese Abhängigkeit überprüft werden.

Tabelle 10: Veränderung der Überschreitung der NW-Schwelle am Pegel Heinde zwischen Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2041-2070) mit und ohne Varianten im Innerstetal

Unterschreitung NW-Schwelle Heinde ²	Ohne Obere Innerste & Hohestein	Mit Obere Innerste & Hohestein
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [d] = sumD	19.4	20.8
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [d] = sumD	70.6	72.4
Veränderung durch Variante (2041-2070)	2%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm³]	0.26	0.35
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm³]	1.2	1.6
Veränderung durch Variante (2041-2070)	32%	

Trinkwasserversorgung

In Tabelle 11 sind die Überleitungsmengen für Referenzzeitscheibe und Zukunft aus dem Innerstegebiet zur Granetalsperre dargestellt. Eine deutliche Zunahme des Überleitungsvolumens zur Granetalsperre um ca. 2 hm³ führt zu einer Erhöhung der 1 %-Perzentils an der Granetalsperre und damit zu einer erhöhten Trinkwasserversorgungssicherheit.

Tabelle 11: Überleitungsmengen aus dem Innerste-Einzugsgebiet zur Granetalsperre

Überleitungsmengen	Ohne Obere Innerste & Hohestein	Mit Obere Innerste & Hohestein
- Historie 1971-2000: Überleitungsvolumen Innerste-Grane [Mio. m³ / Jahr]	7.13	9.4
- Zukunft 2041-2070: Überleitungsvolumen Innerste-Grane [Mio. m³ / Jahr]	7.38	9.43
Veränderung durch Obere Innerste & Hohestein (2041-2070)	28%	
- Historie 1971-2000: 1 % - Perzentil Grane [Mio. m³]	14.7	16.86
- Zukunft 2041-2070: 1 % - Perzentil Grane [Mio. m³]	11.76	15.37
Veränderung durch Obere Innerste & Hohestein (2041-2070)	31%	

Energiespeicherung

Analog zu den Auswertungen zum PS Huneberg, wurde auch für das PS Hohestein die durchschnittliche Fallhöhe, überschlägige Energieerzeugung und Betriebsstunden

außerhalb von hydrologischen Extremereignisse direkt aus den wasserwirtschaftlichen Simulationen berechnet. Für weitere Details ist auf das Kapitel 7 verwiesen.

Tabelle 12: Kennwerte zur Energiespeicherung am PS Hohestein aus wasserwirtschaftlichen Simulationen

Simulationsergebnisse - Energiespeicherung		
Energieerzeugung Obere Innerste & Hohestein	Ohne Obere Innerste & Hohestein	Mit Obere Innerste & Hohestein
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	285.79
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	285.86
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	266.41
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	234.71
- Historie 1971-2000: Anzahl der Stunden, des PS - Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	30462 von 54775
- Zukunft 2041-2070: Anzahl der Stunden, des PS - Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	26771 von 54771

2.7.4 Modellierung des PS Stöberhai mit Verbindung zur Odertalsperre

Bei der dritten Variante wurde ein Pumpspeicher mit Oberbecken am Stöberhai und Verbindung zur Odertalsperre untersucht. Analog zur Variante am Huneberg, wurde an der Odertalsperre eine Vorsperre Herzbek geplant. Ein stark vereinfachtes Fließschema der Varianten im Südharz (3 und 4) ist in Abbildung 29 dargestellt (ohne Überleitungsvarianten). Für weitere Details zu der baulichen Planung und zum Energiesystem wird auf Kapitel 3 und Kapitel 7 verwiesen.

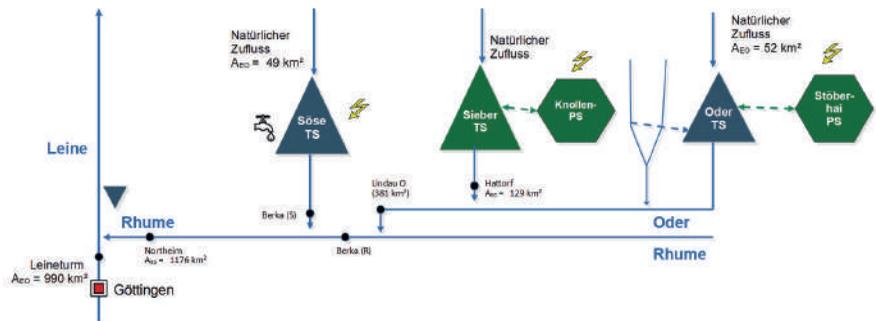


Abbildung 29: Stark vereinfachtes Fließschema der untersuchen Varianten im Südharz (grün) mit relevanten Pegeln unterhalb

2.7.4.1 Implementierung im Modell

Das Speicherbecken Stöberhai wurde im Modell nach dem in Abbildung 30 dargestellten Fließschema, einem Gesamtsperrraum von 2,3 hm³ und einer PSW-Lamelle von 2 hm³ implementiert. Im Gegensatz zur Variante Huneberg besitzt weder der PS Stöberhai noch das Ausgleichsbecken Herzbek eine eigene Hochwasserschutzlamelle. Im Hochwasserfall wird der Pendelbetrieb eingestellt und die PSW-Lamelle im Oberbecken und Ausgleichsbecken gefüllt. Darüber hinaus wurde eine Trinkwasserentnahme aus der Odertalsperre von insgesamt 9 hm³/a untersucht, die konstant entnommen wird. Die Odertalsperre wird im Modell weiterhin nach aktuell gültigem Lamellenplan betrieben (Abbildung 31). Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass die angegebenen Speichervolumina in dieser Variante nicht mehr gültig sind, da das Ausgleichsbecken Herzbek ein Talar der Odertalsperre ist. Innerhalb des Modells wurde deshalb mit einer angepassten Speicherinhaltslinie für die Odertalsperre simuliert. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Hochwasserrückhalteraum innerhalb des Modells etwas geringer ausfällt.

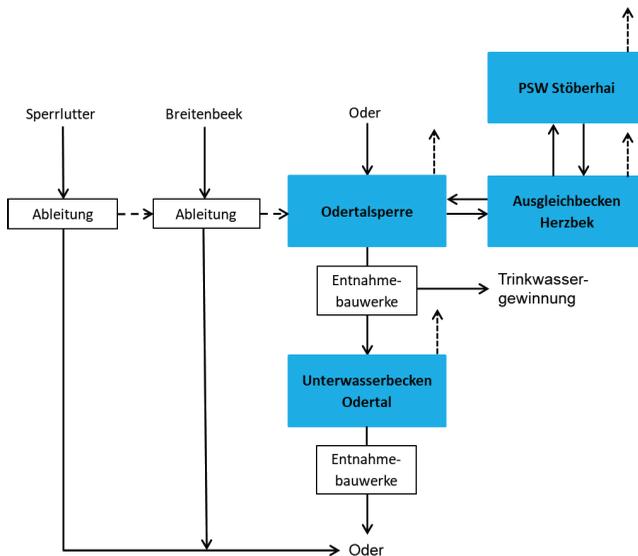


Abbildung 30: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGoMod im Odertal

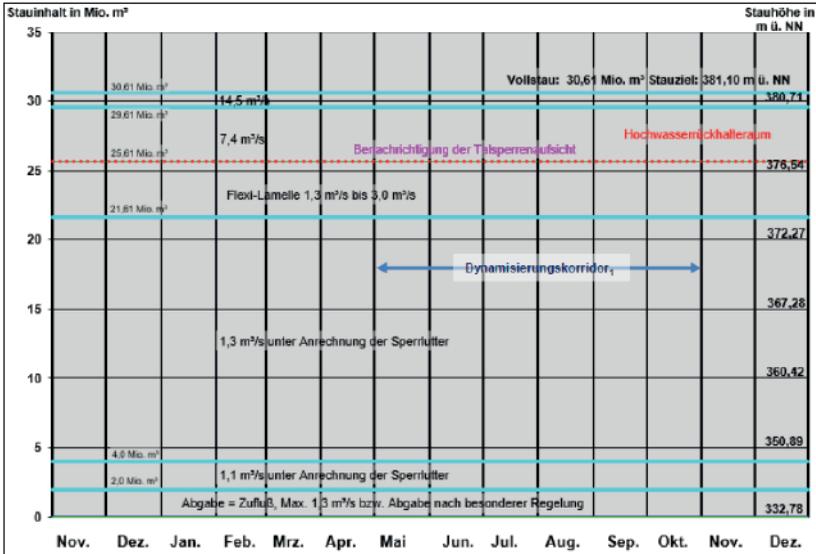


Abbildung 31: Aktuell gültiger Betriebsplan der Odertalsperre

2.7.4.2 Simulationsergebnisse

Nachfolgend dargestellt sind die Ergebnisse inkl. einer Trinkwasserentnahme aus der Odertalsperre. Weitere untersuchte Subvarianten werden in Kapitel 3 beschrieben.

Hochwasserschutz

In Tabelle 13 sind die Auswirkungen der Varianten im Odertal auf die Zielgröße Hochwasserschutz dargestellt. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Varianten, nimmt die Abgabe über die HWE der Odertalsperre im Vergleich zwischen Referenzzeitscheibe und Zukunft für die 8 Klimarealisierungen nicht zu, sondern leicht ab.

Obwohl die Variante keinen zusätzlichen Hochwasserrückhalteraum vorsieht, ergibt sich vor allem durch den durchschnittlich geringeren Stauinhalt durch die Trinkwasserentnahme eine vollständige Reduktion der Abgabe über die HWE und ein positiver Effekt auf den HW-Schutz bis zum Pegel Lindau (Oder). Sowohl in der Referenzperiode als auch für die Zeitscheibe 2041-2070 ist der Hochwasserschutz unter Nutzung der 8 Klimarealisierungen bereits ohne neue Variante als gut zu bewerten mit lediglich geringem Hochwasservolumen über der HQ₂₀-Schwelle.

Tabelle 13: Auswirkungen der Variante TW-Nutzung Odertalsperre und PS Stöberhai auf den Hochwasserschutz im Oder-Einzugsgebiet

Anspruchnahme Hochwasserentlastung Odertalsp.	Ohne Variante	Mit Variante
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	14.37	0
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	14.37	0
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-100%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.259	0
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	0.101	0
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-100%	
Überschreitung HW-Schwelle Scharzfeld¹	Ohne Variante	Mit Variante
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	9.25	7.25
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	4.75	4.375
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-8%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.1	0.2
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	0.2	0.2
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-2%	
Überschreitung HW-Schwelle Lindau²	Ohne Variante	Mit Variante
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	6.0	5.8
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	4.5	4.1
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-8%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.20	0.17
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	0.37	0.36
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-0.4%	

Niedrigwasseraufhöhung

Die Varianten im Odertal nach aktueller Implementierung zeigen signifikant negative Auswirkungen auf die Zielgröße Niedrigwasser durch die Trinkwasserentnahme von fast 9 hm³/a. Für eine solche TW-Entnahme müssten daher Überleitungsvarianten betrachtet oder der aktuelle Betriebsplan der Odertalsperre auf die TW-Entnahme angepasst werden, um die Niedrigwasseraufhöhung der Odertalsperre nicht zu verschlechtern.

Tabelle 14: Einfluss der Varianten im Odertal auf die Niedrigwasserkenngrößen an der Odertalsperre

Unterschreitung Ökologische Mindestabgabe	Ohne Variante	Mit Variante
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [h]	50.75	1803.25
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [h]	343	2901
Veränderung durch Variante (2041-2070)	746%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm ³]	0.146	5.19
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm ³]	0.987	8.35
Veränderung durch Variante (2041-2070)	746%	

Trinkwasserversorgung

Die zusätzliche Trinkwasserentnahme von ca. 9 hm³/a würde eine deutliche Zunahme der Rohwasserentnahme aus dem Westharz darstellen und sich entsprechend positiv auf die lieferbare Trinkwassermenge auswirken. Bisher wird keine Trinkwasserentnahme aus der Odertalsperre vorgenommen.

Energiespeicherung

Analog zu den vorherigen Varianten ist in Tabelle 15 die durchschnittliche Fallhöhe, überschlägig bestimmte elektrische Energieerzeugung durch die Turbine und mögliche Betriebsstunden außerhalb von hydrologischen Extremereignissen dargestellt. Für weitere Details zum Energiesystem wird auf das Kapitel 7 verwiesen.

Tabelle 15: Kenngrößen zur Energiespeicherung im Stöberhai aus der wasserwirtschaftlichen Simulation

	Ohne Variante	Mit Variante
Energieerzeugung Stöberhai		
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	339.7
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	339.7
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	576.1
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	576
- Historie 1971-2000: Anzahl der Stunden, des PS - Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	54235.38 von 54775
- Zukunft 2041-2070: Anzahl der Stunden, des PS - Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	54240.12 von 54771

2.7.5 Modellierung von Varianten zur Wassernutzung im Siebertal

Unter Variante 4 sind unterschiedliche Wassernutzungen im Siebertal zusammengefasst. Neben einer potentiellen Siebertalsperre wurden auch ein Pumpspeicher Knollen mit Verbindung zur Talsperre und unterschiedliche Überleitungsvarianten betrachtet. Im Folgenden sind die Modellimplementierung und die Simulationsergebnisse für die Kombination aus Siebertalsperre und Knollenspeicher dargestellt. Für weitere Details zu den einzelnen Alternativen wird auf das Kapitel 3 verwiesen.

2.7.5.1 Implementierung im Modell

Die folgenden Simulationsergebnisse beziehen sich auf die Implementierung der Siebertalsperre zwischen Sieber und Herzberg mit einem Gesamtstauraum von 16 hm³, einem

Hochwasserrückhalteraum von 2,4 hm³, einer PSW-Lamelle von 1,3 hm³, einem Betriebsraum von 9,9 hm³ und einer Reserveraum von 2,4 hm³. Die Abgabe der Siebertalsperre an das Unterwasser wurden nach dem Lamellenplan in Abbildung 33 gesteuert.

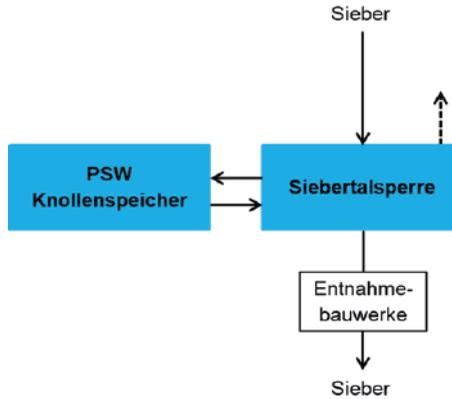


Abbildung 32: Fließschema der Implementierung der Varianten im Modell IGOmod im Siebertal

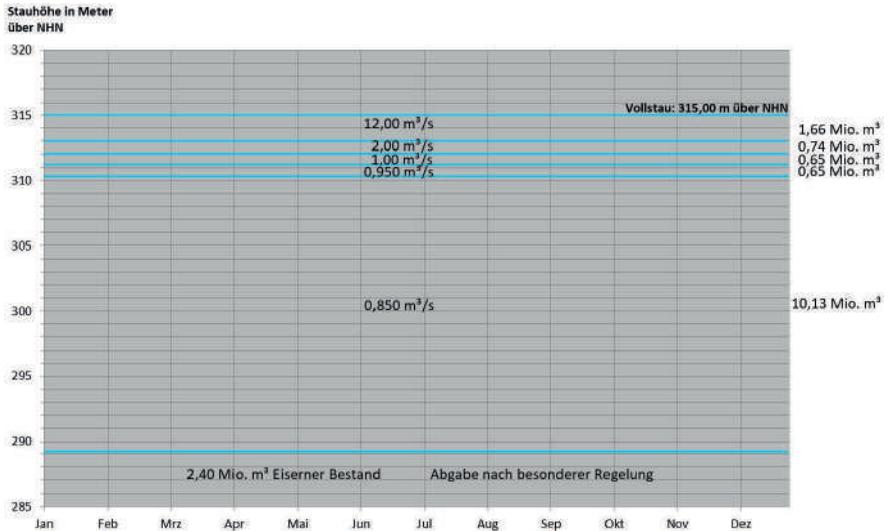


Abbildung 33: Lamellenplan der modellierten Siebertalsperre

2.7.5.2 Simulationsergebnisse

Hochwasserschutz

Analog zu den Auswertungen der vorherigen Varianten ist in Tabelle 16 die Wirkung der Siebertalsperre mit kombiniertem PS Knollen auf die Dauer und das Volumen oberhalb der Hochwasserschwelle (HQ₂₀) an den Pegeln Hattorf (129 km²) und Lindau (Oder, 381 km²) dargestellt.

Die Siebertalsperre stellt die einzige Variante mit einem Talsperren-Neubau in einem bisher nicht eingestauten Flusstal dar und zeigt entsprechend einen deutlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt mit positivem Effekt auf den Hochwasserschutz. Ähnlich wie Variante 3 im Odertal zeigen sich bei Nutzung der 8 Klimarealisierungen bereits ohne Variante nur geringe Werte für Hochwasserdauer und -volumen über 30 Jahre in den acht Klimarealisierungen.

Tabelle 16: Einfluss der Variante Wassernutzung im Siebertal auf den HW-Schutz am Pegel Hattorf und Lindau (Oder)

	Ohne Variante	Mit Variante
Überschreitung HW-Schwelle Hattorf¹		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	0	0
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	3.5	1.875
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-46%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0	0
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	0.3	0.1
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-73%	
Überschreitung HW-Schwelle Lindau Oder²	Ohne Variante	Mit Variante
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	6	4
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	4.5	2.4
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-47%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.2	0.17
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	0.37	0.17
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-55%	

Niedrigwasseraufhöhung

Eine große Wirkung besitzt die modellierte Siebertalsperre auf die Niedrigwasseraufhöhung unterstrom (Tabelle 17). Im Karstgebiet am Pegel Hattorf liegt das simulierte NN7Q der Referenzperiode als verwendete Niedrigwasserschwelle bereits bei lediglich 0,1 m³/s. Die Unterschreitung dieser Schwelle nimmt bei Betrachtung der 8 Klimarealisierungen zukünftig im Mittel deutlich zu. Die Siebertalsperre könnte die Dauer der Unterschreitung und das Defizitvolumen deutlich reduzieren mit erkennbarem Einfluss bis zum Pegel Lindau (Oder).

Tabelle 17: Einfluss der Variante Wassernutzung im Siebertal auf den NW-Schutz am Pegel Hattorf und Lindau (Oder)

Simulationsergebnisse - Niedrigwasser		
	Ohne Variante	Mit Variante
Unterschreitung NW-Schwelle Hattorf¹		
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [d] = sumD	106	2
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [d] = sumD	237	8
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-97%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm ³]	0.25	0.01
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm ³]	0.61	0.02
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-97%	
Unterschreitung NW-Schwelle Lindau²		
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [d] = sumD	8.5	0.125
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [d] = sumD	22.5	17.8
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-21%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm ³]	0.2	0.00
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm ³]	0.50	0.46
Veränderung durch Variante (2041-2070)	-7%	

Trinkwasserversorgung

Im Rahmen der Planungsvariante *Wassernutzung im Siebertal* wurde keine direkte Trinkwassernutzung untersucht. In separaten Überleitungsvarianten wurde eine Überleitung von Wasser aus den Einzugsgebieten von Sieber- bzw. Oder zur Söse- bzw. Granetal Sperre für eine dortige Aufbereitung untersucht. Weitere Details zu den Überleitungsvarianten sind in Kapitel 3 zu finden.

Energiespeicherung

In Tabelle 18 sind die energiewirtschaftlichen Kenngrößen zum Knollenspeicher aus der wasserwirtschaftlichen Simulation dargestellt. Besonders auffällig ist die verhältnismäßig geringere Betriebszeit aufgrund zu geringer Stauinhalte. Sollte eine Kombination aus Siebertalsperre und Pumpspeicher zukünftig näher betrachtet werden, ist ggf. ein Ausgleichsbecken analog zu den Varianten 1 und 3 und ein angepasster Betriebsplan zu untersuchen. Für weitere Details zum Energiesystem ist auf das Kapitel 7 verwiesen.

Tabelle 18: Kenngrößen zur Energiespeicherung im Knollenspeicher aus der wasserwirtschaftlichen Simulation

	Ohne Variante	Mit Variante
Energieerzeugung Knollenspeicher		
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	254.17
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Fallhöhe bei Pumpbetrieb [m]	0	254.32
- Historie 1971-2000: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	32.58
- Zukunft 2041-2070: durchschnittliche Energieerzeugung [GWh /Jahr]	0	28.08
- Historie 1971-2000: Anzahl der Stunden, des PS -Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	6810.88 von 54775
- Zukunft 2041-2070: Anzahl der Stunden, des PS -Betriebes zur Energieerzeugung [h]	0	5957.12 von 54771

2.7.6 Modellierung der erhöhten Granetalsperre

Planungsvariante 5 beschäftigt sich mit der Erhöhung der Granetalsperre. Nachfolgend sind die Simulationsergebnisse und die Modellimplementierung der „*Maximalvariante*“ mit Erhöhung um 15 m bei 40 Mio. m³ zusätzlichem Stauraum dargestellt. Für weitere Details zur baulichen Planung und Subvarianten sei auf das Kapitel 3 verwiesen.

2.7.6.1 Implementierung im Modell

Die implementierte Speichererweiterung geht weiterhin von einem Reserveraum von 2,5 hm³, einer Vergrößerung des Hochwasserrückhalteraaumes von 2 hm³ auf 3 hm³ und einer Vergrößerung des Betriebsraumes auf 80,5 hm³ aus.

Modelltechnisch wird davon ausgegangen, dass die Überleitung von Oker- und Innerstetalsperre bis zur neuen Grenze des Hochwasserrückhalteraaumes hydraulisch möglich ist. Die Unterwasserabgaben der Granetalsperre werden nach Betriebsplan aus Abbildung 35 berechnet. Es wurden unterschiedliche Rohwasserentnahmen berücksichtigt. Nachfolgend sind die Ergebnisse für eine konstante RW-Entnahme von 55 hm³/a dargestellt.

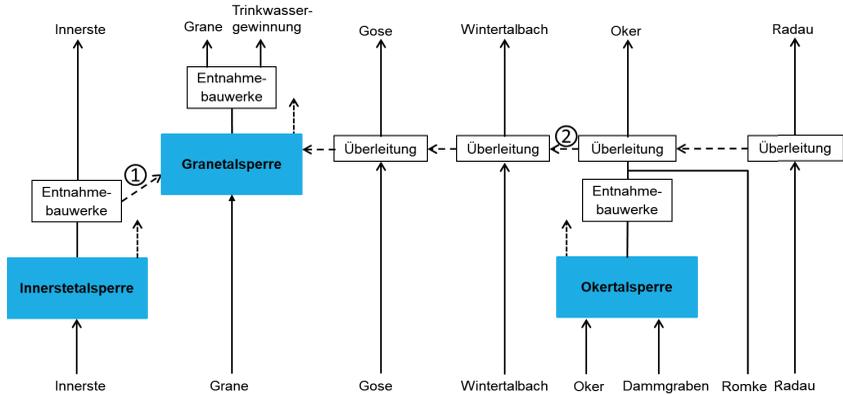


Abbildung 34: Modellimplementierung der Variante Graneerhöhung im Modell IGOmod. Das Fließschema entspricht dem des bestehenden Nordharzverbundsystems, lediglich der Speicher und die Überleitungs- und Abgaberegeln der Granetalsperre wurden angepasst.

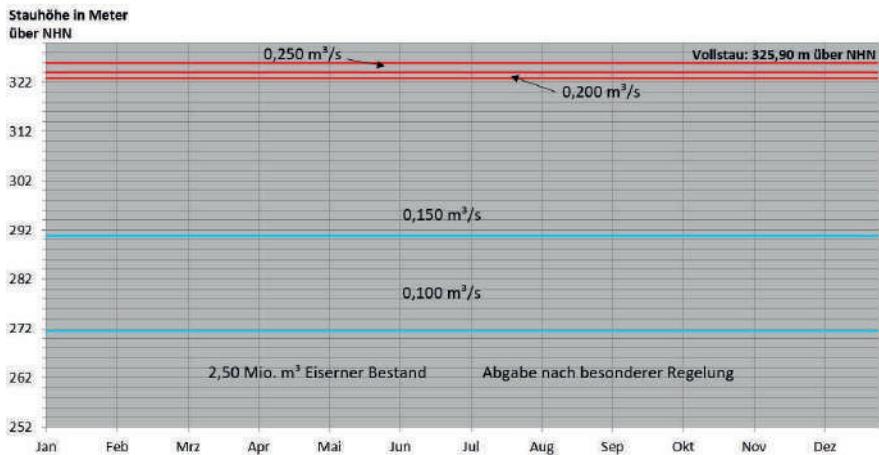


Abbildung 35: Im Modell implementierter Lamellenplan zur Erhöhung der Granetalsperre

2.7.6.2 Simulationsergebnisse

Hochwasserschutz

Neben der Vergrößerung des HW-Rückhaltereaumes an der Granetalsperre besitzt die Speichererweiterung direkten Einfluss auf die Überleitungsmengen von Innerste- und Okertalsperre.

Wie in Tabelle 19 dargestellt, führt eine erhöhte Überleitung entsprechend zu einer leichten Verringerung der Abgabe über die HWE der Okertalsperre. Durch eine Anpassung des Betriebsplans zur Überleitung könnte diese Wirkung ggf. verstärkt werden.

Direkt unterhalb der Granetalsperre führt v. a. der zusätzliche HW-Rückhalteraum von 1 hm³ und die erhöhte Rohwasserentnahme zu einer moderaten Verringerung der Hochwasserdauer und des Hochwasservolumens (> HQ₂₀). Je nach Größe der Speichererweiterung und hydraulischen Möglichkeiten kann hier ggf. eine weitere Vergrößerung des HW-Rückhalteraaumes der weiteren Verbesserung des Hochwasserschutzes dienen.

Tabelle 19: Kenngrößen zur Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf den Hochwasserschutz im nördlichen Harzvorland

	Ohne Erhöhung	Mit Erhöhung
Anspruchnahme Hochwasserentlastung Okertalsperre		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	23.75	17.87
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	48.75	48.43
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-1%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.56	0.42
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	1.34	1.17
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-13%	
Überschreitung HW-Schwelle Bredelem¹		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	15.375	13.5
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	40.375	35.25
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-13%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.4	0.33
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	1.4	1.0
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-29%	
Überschreitung HW-Schwelle Heinde²		
- Historie 1971-2000: Hochwasser-Dauer [h]	11.6	10.4
- Zukunft 2041-2070: Hochwasser-Dauer [h]	76.9	74.9
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-3%	
- Historie 1971-2000: HW-Volumen [hm ³]	0.22	0.16
- Zukunft 2041-2070: HW-Volumen [hm ³]	12.17	11.59
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	-5%	

Niedrigwasseraufhöhung

Durch die erhöhte Trinkwasserentnahme wird die Niedrigwassersituation an den Unterläufen verschlechtert. So wird häufiger die ökologische Mindestwasserabgabe nicht eingehalten und auch die Niedrigwasserindizes an Pegeln unterstrom (Bredelem, Heinde) verschlechtern sich durch die erhöhte Entnahme (Tabelle 20).

Bei Realisation dieser Variante mit deutlicher Erhöhung der Trinkwasseraufbereitung sollten ggf. zusätzliche Überleitungen aus den angrenzenden Einzugsgebieten realisiert werden. Zusätzlich sollten die Betriebspläne weiter an die neue Speichergröße und Entnahmemenge angepasst werden.

Tabelle 20: Kenngrößen zur Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf den Niedrigwasserschutz im nördlichen Harzvorland

	Ohne Erhöhung	Mit Erhöhung
Unterschreitung NW-Schwelle Bredelem¹		
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [h]	21	36
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [h]	107	148
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	39%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm ³]	0.2	0.35
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm ³]	0.8	1.3
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	63%	
Unterschreitung NW-Schwelle Heinde²	Ohne Erhöhung	Mit Erhöhung
- Historie 1971-2000: NW-Dauer [d] = sumD	19.4	24.6
- Zukunft 2041-2070: NW-Dauer [d] = sumD	70.6	79.4
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	12%	
- Historie 1971-2000: NW-Defizit [hm ³]	0.26	0.38
- Zukunft 2041-2070: NW-Defizit [hm ³]	1.20	1.43
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	19%	

Trinkwasserversorgung

Die Erhöhung der Speichergröße wurde im Modell zusammen mit einer erhöhten Rohwasserentnahmerate simuliert. Insgesamt konnten hierdurch als Mittelwert über alle Klimarealisationen ca. 7,7 hm³/a zusätzliches Rohwasser in der Referenzperiode und 6,5 hm³/a in der Zukunftsperiode zur Verfügung gestellt werden (Tabelle 21).

Diese zusätzliche Rohwassermenge konnte größtenteils durch eine deutliche erhöhte Überleitungsmenge aus der Innerstetalsperre sichergestellt werden.

Tabelle 21: Wirkung der modellierten Variante der Graneerhöhung auf die Trinkwassergewinnung

	Ohne Erhöhung	Mit Erhöhung und erhöhter Entnahme
Trinkwasserverfügbarkeit		
- Historie 1971-2000: Rohwasser [Mio. m ³ /Jahr]	47.32	55.01
- Zukunft 2041-2070: Rohwasser [Mio. m ³ /Jahr]	47.10	53.67
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	14%	
- Historie 1971-2000: 1% - Perzentil Grane [Mio. m ³]	14.7	20.63
- Zukunft 2041-2070: 1% - Perzentil Grane [Mio. m ³]	11.76	18.12
Veränderung durch Erhöhung (2041-2070)	54%	

2.8 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojektes EWAZ wurden Erweiterungen des existierenden Speicherverbundsystems mithilfe einer kombinierten Modellierung aus Klimamodellen, Wasserhaushalt und Speicherbetrieb untersucht. Hierdurch sollten Varianten auf ihre Eignung geprüft werden, um einen positiven und nachhaltigen Einfluss auf die vier Systemdienstleistungen Hochwasserschutz, Trinkwasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung und Energiespeicherung auch unter Klimaänderung zu bieten. Die angewandte Methodik geht über eine klassische Bemessung eines Speichers hinaus. Durch die

modelltechnische Nachbildung vernetzter und multifunktionaler Speicher, eingebettet in eine solide hydrologische Modellierung des dazugehörigen Einzugsgebietes bis in die Wirkungszonen der Zielgrößen, konnten nachhaltige Lösungsvarianten nach baulichen und operationellen Kriterien unter dem Einfluss der Klimaänderung entwickelt werden.

Die simulationsgestützten quantifizierten Leistungskenngrößen lassen hierbei ein großes Potential erkennen, den regionalen Hochwasser- und Dürreschutz deutlich zu erhöhen und die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf den regionalen Wasserhaushalt zu verringern. Besonders die Varianten Pumpspeicher Huneberg und die obere Innerstalsperre in Verbindung mit einem Pumpspeicher Hohestein können neben ihrer deutlich positiven Wirkung bei hydrologischen Extremen an Oker und Innerste gleichzeitig als überregional relevanter Energiespeicher dienen und zugleich die Trinkwasserversorgung unterstützen. Auch eine Erhöhung der Granetalsperre deutet ein großes Potential an, durch eine signifikante Vergrößerung des wasserwirtschaftlichen Speichers zusätzliche Versorgungssicherheit und auch zusätzlichen Hochwasserschutz in den überleitenden Gebieten sicherzustellen.

Die detaillierten Simulationsergebnisse aus EWAZ können als Grundlage in weiteren Schritten zur Umsetzung der Varianten wie technischen Machbarkeitsstudien genutzt werden. Unklar blieb, wie einzelne technisch sehr wirksame und auf wissenschaftlicher Basis ermittelte Projektvarianten wegen bestehender oder sich noch verstärkenden Zielkonflikte baulich realisiert werden können. So gibt es oftmals unter Betroffenen von solchen Infrastrukturmaßnahmen zwar ein Bekenntnis zur Klimaänderung und den damit verbundenen Extremsituationen des Wasserhaushaltes, aber zugleich eine Ablehnung neuer Stauanlagen (Talsperren) zur Erhöhung des Wasserdargebots für die Trinkwasserversorgung und für einen verbesserten Hochwasserschutz nach Unterstrom. Bislang fehlt auch in Ergänzung zu den oben genannten Dienstleistungen eine gründliche ökologische Bewertung der Maßnahmen. Eine Auflösung von Zielkonflikten sollte im Zentrum von zukünftigen Untersuchungen stehen, wodurch zum einen ein großer Schritt in Richtung der technischen Umsetzung gemacht werden könnte und zum anderen Methoden zur Beschleunigung von anderen gesellschaftlich relevanten Genehmigungsverfahren untersucht werden können.

3 Bauliche Planungsvarianten und Betriebsstrategien (AP 3)

3.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Untersuchung von Möglichkeiten für zusätzlichen Speicherraum. Dies beinhaltet zum einen die optimierte Nutzung von vorhandenem Speicher, wie auch die Untersuchung der Möglichkeiten von neuen ober- und unterirdischen Speicherräumen. Hierfür wurden zum einen frühere Planungen und Ideen zu Talsperren gesichtet und hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit geprüft. Zum anderen wurde auch geprüft, inwieweit in den jeweiligen Untersuchungsräumen neuer Speicher geschaffen werden kann. Diese Betrachtung schloss auch Oberbecken für die Pumpspeicherung mit ein.



Abbildung 36: Ein nachhaltiger Ansatz – Die acht Arbeitsphasen des EWAZ-Projektes

Die Projektpartner begannen mit der Definition eines regionalen Untersuchungsgebiets, um diese Arbeit zu entwickeln. Dann wurde die Oberflächenwasserbilanz in Betracht gezogen und die Oberflächenwasserparameter in Verbindung mit extremen Wettersituationen wurden definiert. Dies ermöglichte es den Projektpartnern, das Untersuchungsgebiet auf einen lokalen Teil zu reduzieren. Dieses Arbeitspaket befasste sich daher, wie in Abbildung 36 dargestellt, mit der Phase 6, der Entwicklung von Konzepten für den Bau und den Betrieb von ober- und unterirdischen Speicherräumen.

Für die ausgewählten Standorte wurden Speicherinhaltslinien auf Basis des digitalen Geländemodells (DGM 1) ermittelt. Bauliche Varianten wurden hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit geprüft. Raumwiderstände wie Natur- oder Denkmalschutz wurden berücksichtigt, führten aber nicht zum direkten Ausschluss eines Standortes. Eine Verknüpfung der Standorte mit unterirdischen Speichern wurde geprüft, ebenso wurden Betriebsstrategien entwickelt.

Als erste Maßnahme wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets die Kompatibilität untertägiger und oberflächlicher Anlagen an den identifizierten potentiellen Standorten aus bergbaulicher Sicht bewertet. Bei der Bewertung wurden folgende Faktoren berücksichtigt: Stand der untertägig vorhandenen Bergbauinfrastruktur, Entfernung zu bestehenden Talsperren, Entfernung zu Hochrisikogebieten (Überschwemmungsgebieten), regionale Geologie und Gesteinsfestigkeit für Neuanlagen, Kompatibilität für die Systemintegration, verfügbares Speichervolumen sowie der Speichervolumenbedarf für konkurrenzfähige Infrastruktur.

Hierfür wurde ein Werkzeugkasten zur Beurteilung der Kompatibilität untertägiger und oberflächlicher Anlagen entwickelt. Dieser Werkzeugkasten besteht aus der Zusammenstellung von Daten aus dem Staatsarchiv, privaten Archiven und wissenschaftlichen Publikationen und umfasste unter anderem alte Grubenrisse und Karten in und rund um West- und Südharz (Lautenthal, Clausthal-Zellerfeld, Wildemann und Büchenberg).

Die auf dieser Grundlage basierende Bewertung führte zu dem Ergebnis, dass die Wiederverwendung der alten Bergbauinfrastruktur im Nordharz planungs- und kostenintensiver ist als ein vollständiger Neubau der untertägigen Infrastruktur. Bei einer Wiederverwendung fallen zusätzliche Kosten für die Sanierungsarbeiten am Schacht, die Vergrößerung des Schachtdurchmessers, den Bau von zwei Speicherräumen (Ober- und Unterbecken) und ein unterirdisches Maschinenhaus an. Darüber hinaus steht die vorhandene Infrastruktur in Verbindung mit den großen Erzgewinnungsgebieten der ehemaligen Gruben, was eine Herausforderung für die Wasserspeicherung darstellt, da eine Auskleidung erforderlich ist, um eine optimale Wasserqualität zu gewährleisten. Insbesondere die ehemaligen Bergbauzentren wie Bad Grund oder Clausthal-Zellerfeld befinden sich, wie in Abbildung 37 dargestellt, in einer Entfernung von 10 bzw. 15 km zu den derzeit verfügbaren Talsperren, was den Investitionsbedarf erhöht und ihre Nutzung zur

es sich bei den oberirdischen (über Tage) Bauwerken um Speicherbecken an der Oberfläche und bei den unterirdischen (unter Tage) Bauwerken um alle Bauwerke, die unterhalb der Erdoberfläche in einem Mindestabstand von 20 Metern zum Deckgebirge errichtet werden wie Druckstollen, Kraftwerke und Speicherräume unter Tage.

3.2 Stand der Technik zum Thema Talsperren

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Das folgende Unterkapitel beschreibt in knapper Form den Stand der Technik zum Thema Talsperren. Da EWAZ ein stark interdisziplinäres Projekt ist, wird hier zu einigen Themen ein gemeinsames Grundverständnis dargelegt.

3.2.1 Talsperren

Talsperren werden nach den Grundlagen der DIN 19700-10 (2004) Gemeinsame Festlegungen, DIN 19700-11 (2004) Talsperren und DIN 4048-1 (1987) Wasserbau; Begriffe; Stauanlagen errichtet.

Talsperren sind nach DIN 19700-11 (2004) „Stauanlagen, die über den Querschnitt des gestauten Wasserlaufes hinaus den Talquerschnitt abriegeln. Sie bestehen in der Regel aus einem Absperrbauwerk, Betriebseinrichtungen und Speicherbecken (Hauptsperrern) sowie gegebenenfalls zusätzlichen Vorsperren. [...] Talsperren bewirken durch Speicherung des zufließenden Wassers einen Ausgleich des natürlichen Wasserdargebotes in den gestauten Fließgewässern.“

Talsperren werden nach DIN 19700-11 (2004) in zwei Größenklassen eingeteilt, welche auf physikalischen Größen basieren. Dabei reicht die Erfüllung eines Kriteriums, damit eine Talsperre in die Talsperrenklasse 1 eingeordnet wird. In Einzelfällen sind Abweichungen möglich.

Talsperrenklasse 1 (große Talsperren):

- Absperrbauwerk von min. 15 m Höhe (Gründungssohle bis Krone)
- Speicherraum von min. 1 Mio. m³

Talsperrenklasse 2 (mittlere und kleine Talsperren):

- Voraussetzungen von Talsperrenklasse 1 werden nicht erfüllt

3.2.2 Aufbau

Folgend werden alle Elemente bzw. ihre wichtigsten Eigenschaften kurz zusammengefasst dargestellt. Für eine detailliertere Betrachtung wird auf die erwähnte Literatur verwiesen.

Absperrbauwerk

Das Absperrbauwerk kann als Staumauer oder Staudamm errichtet werden. Staudämme werden als Erd- oder Steinschüttdämme errichtet. Staumauern werden als Gewicht-, Pfeiler, Bogen- oder Gewölbereihenmauern ausgeführt. Ein Staudamm hat einige Vorteile gegenüber der Staumauer, die von Strobl und Zunic (2006) wie folgt beschrieben werden:

- Errichtung in nahezu jeder Talform und unter jeglichen geologischen Bedingungen möglich
- Verwendung natürlicher Baustoffe (geringer Einsatz von Fremdstoffen)
- Anpassung des Entwurfs an örtliche Bedingungen (hoher Optimierungsgrad)
- hoher Mechanisierungsgrad beim Bau
- geringerer Preisanstieg der Einheitspreise bei Erd- und Schüttdämmen

Weiterhin werden Absperrbauwerke von Staudämmen im DWA-M 512 (DWA 2012) nach ihren Dichtungselementen wie Asphalt- oder Betonoberflächenabdichtungen unterschieden.

Speicherbecken

Das Speicherbecken oder der Stauraum stellt das Hauptelement einer Talsperre, den Wasserkörper, dar. Dieser kann in verschiedene Lamellen aufgeteilt werden. Die Aufteilung ist in Abbildung 38 dargestellt, je nach Nutzung kann der Betriebsraum noch weiter unterteilt werden. Die Größe der Lamellen kann statisch, variabel über das Jahr oder flexibel z. B. in Abhängigkeit vom Füllgrad gestaltet werden.

Entlastungsanlagen

Eine Entlastungsanlage dient der Ableitung des nicht speicherbaren Teils eines Hochwassers. Die Bemessung erfolgt auf Basis von Bemessungshochwassern. Es gibt verschiedene Arten der Ausführung wie z. B. Überfälle (mit oder ohne Verschluss), Zwischenauslässe unterhalb des Stauziels oder überströmbare Dammbereiche (Strobl und Zunic 2006).

Entnahmeanlagen

Entnahmeanlagen dienen der Bewirtschaftung, der Entleerung oder auch der Entlastung von Talsperren. Sie bestehen aus einem Einlaufbauwerk (Trompete, Entnahmeturm),

einem Transportbauwerk (Rohrleitung) und einem Auslaufbauwerk (Strobl und Zunic 2006).

Energieumwandlungsanlagen

Energieumwandlungsanlagen dienen dazu, den meist schließenden, Abflusses unterhalb einer Entlastungsanlage wieder in einen strömenden Abfluss zurückzuführen. Sie können z. B. als Tosbecken oder -kammern, Kaskaden oder Kolkseen ausgebildet werden (DIN 19700-11 2004).

3.2.3 Bemessung von Talsperren

Talsperren werden hinsichtlich verschiedener Kriterien bemessen: zum einen nach den Sicherheitsanforderungen an die Anlage selbst, nach ihrer Hochwasserschutzfunktion, sowie nach ihren betrieblichen Funktionen. Folgend werden die einzelnen Bemessungskriterien kurz erläutert.

Hochwassersicherheit

Nach DIN 19700-11 (2004) sind für Talsperren die Hochwasserbemessungsfälle 1 und 2 betrachten.

Hochwasserbemessungsfall 1 (BHQ 1) wird für die Bemessung der Hochwasserentlastungsanlage verwendet.

- Bei Talsperrenklasse 1 gilt: Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-3} (1.000 Jahre)
- Bei Talsperrenklasse 2 gilt: Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2×10^{-3} (500 Jahre)

Hochwasserbemessungsfall 2 (BHQ 2) stellt den Nachweis für die Anlagensicherheit bei extremen Hochwasserereignissen dar.

- Bei Talsperrenklasse 1 gilt: Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} (10.000 Jahre)
- Bei Talsperrenklasse 2 gilt: Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2×10^{-4} (5.000 Jahre)

Zusätzlich sind bei beiden Hochwasserbemessungsfällen weitere Randbedingungen, wie bewegliche Verschlüsse, weitere Anlagen am Gewässer und Füllung des Hochwasserrückhalteraaumes zu beachten.

Hochwasserschutz

Nach DIN 19700-11 (2004) dient der Hochwasserbemessungsfall 3 (BHQ 3) dem Schutz der Unterlieger durch einen Rückhalt im gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum, wobei

die Bemessungshochwasserwelle abhängig vom angestrebten Schutzgrad ist. Der Schutzgrad wiederum hängt im Wesentlichen von der Nutzung der zu schützenden Flächen ab, so wird für geschlossen bebaute Bereiche ein Schutz vor einem hundertjährlichen Hochwasser (HQ_{100}) angestrebt.

Stauräume und Stauziele

Der Stauraum von Talsperren wird, wie in Abbildung 38 (DIN 19700-11 2004) aufgezeigt, in verschiedene Lamellen aufgeteilt.

Der Reserveraum (I_R) wird auf Basis wasserwirtschaftlicher und ökologischer Bedingungen bemessen, wobei insbesondere wassergütwirtschaftliche Ansprüche im Stauraum die Größe beeinflussen.

Die Größe des Betriebsraumes (I_{BR}) ist abhängig von den unterschiedlichen Nutzungen (Trinkwasserbereitstellung, Niedrigwasseraufhöhung usw.) und wird auf Basis von Speichersimulationen ermittelt.

Der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum (I_{GHR}) wird auf Basis des BHQ 3 bemessen.

Der außergewöhnliche Hochwasserrückhalteraum (I_{AHR}) basiert auf BHQ 1 und BHQ 2 und liegt über dem Vollstau.

Der Freibord (f) beschreibt die Differenz zwischen Bauwerkskrone und dem Hochwasserstauziel 1 (Z_{H1}) im BHQ 1. Im BHQ 2 beschreibt es den Abstand von Bauwerkskrone zu Hochwasserstauziel 2 (Z_{H2}).

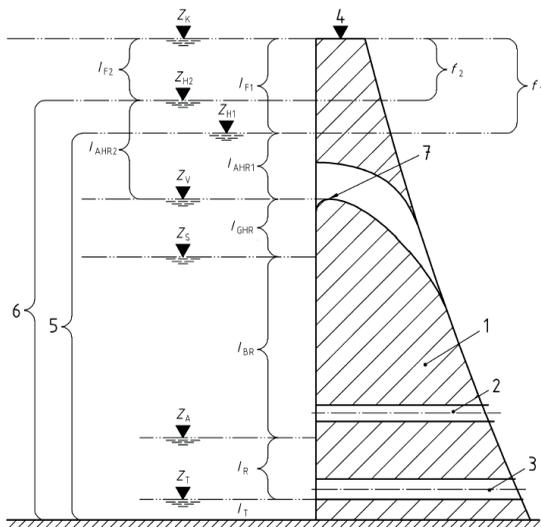


Abbildung 38: Stauraumaufteilung von Talsperren (DIN 19700-11 2004)

Weiterhin zeigt Abbildung 38 das Absperrbauwerk selbst (1), den Betriebsauslass (2), den Grundablass (3), die Krone (4), den Stauraum im BHQ 1 (5), den Stauraum im BHQ 2 (6) und die Krone der Hochwasserentlastung (7).

3.2.4 Aufgaben

Talsperren sind in der Regel Mehrzweckanlagen und können verschiedenen Nutzungen oder Systemdienstleistungen dienen (Strobl und Zunic 2006). Talsperren werden seit Ende des 19. Jahrhunderts, dem großen Zeitalter des Talsperrenbaus in Deutschland, unter anderem für den Hochwasserschutz, die Trinkwassergewinnung, die Wasserkraft oder die Niedrigwasseraufhöhung erbaut. Zumeist haben sie, trotz der Nutzung als Mehrzweckspeicher, eine primäre Dienstleistung zu erbringen. So werden 46,6 % der großen Anlagen primär für den Hochwasserschutz genutzt, 21,3 % für die Trinkwassergewinnung, 17,6 % für die Wasserkraft und 4,6 % zur Niedrigwasseraufhöhung. Der Rest sind weitere Nutzungen (Königeter et al. 2004).

Nachfolgend werden diese Systemdienstleistungen, die für das Projekt relevant sind, kurz auf Basis des Internet-Artikels „Aufgaben staatlicher Wasserspeicher“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2022) erläutert.

Hochwasserschutz

Wie bereits erläutert, dient der Hochwasserrückhalteraum zur Speicherung von bestimmten Hochwasserereignissen bzw. zur Abminderung der Spitzenabflüsse und somit zum Schutz der Unterlieger. Prinzipiell wird der Hochwasserstand im Unterlauf minimiert und somit auch das Schadenspotential. Die hochwasserreduzierende Wirkung eines solchen Speichers nimmt mit der Entfernung zu der zu schützenden Ortslage deutlich ab, da über das Zwischeneinzugsgebiet nicht reduzierte Hochwasserabflüsse hinzukommen. Relevant für die erzielte Hochwasserreduzierung ist die Art der Steuerung und an welcher Stelle der entsprechende Steuerpegel sitzt.

Trinkwasserversorgung

Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung wird in abflussstarken Phasen in der Talsperre gespeichert, um es über das Jahr zur Verfügung stellen zu können. Bei der Trinkwasserversorgung spielen neben quantitativen, auch qualitativen Aspekten eine wichtige Rolle. Die Wasserentnahme aus einer Talsperre ermöglicht auch die gewisse Steuerung verschiedener Parameter wie Temperatur oder Trübung des Rohwassers, was bei direkter Entnahme aus einem Fließgewässer oder einer sehr kleinen Stauanlage so nicht möglich ist.

Wasserkraft und Energiespeicherung

Weiterhin können Talsperren zur Energiegewinnung und -speicherung genutzt werden. Die Energiegewinnung erfolgt z. B. an einem Fluss über ein Laufwasserkraftwerk, in dem die Fallhöhe von Wasser- zur Luftseite ausgenutzt wird. Wird der Zulauf zu einer Talsperre direkt wieder abgegeben entspricht auch dies einem Laufwasserkraftwerk. In einer größeren Talsperre wird mit dem Wasser auch Energie gespeichert, wird Energie benötigt, wird die entsprechende Wassermenge abgegeben. Soll bereits erzeugte Energie gespeichert werden, wird ein Pumpspeicherkraftwerk benötigt. Diese Energiespeicherung erfordert größere Speichervolumen und größere Fallhöhen, sodass zusätzlich zur eigentlichen Talsperre ein weiteres Speicherbecken vorhanden sein muss, welches auf einem nahegelegenen Höhenzug platziert wird. Das Thema Pumpspeicherung an Talsperren wird später detaillierter betrachtet.

Niedrigwasseraufhöhung

Die Überbrückung von Niedrigwasserphasen, also Phasen mit einem Wasserstand deutlich unter dem langjährigen Mittel, ist ebenfalls eine der Aufgaben von Talsperren. Für die Niedrigwasseraufhöhung wird Wasser in abflussstärkeren Phasen, z. B. im Winter gespeichert, um bei einer Unterschreitung eines bestimmten Abflusses innerhalb einer Trockenphase das Wasser dem Unterlauf wieder zur Verfügung zu stellen. Das Ziel ist hier häufig der Erhalt oder Schutz von wasserabhängigen Landökosystemen im Unterlauf. Auch der Erhalt der Möglichkeit der Brauch- bzw. Kühlwasserentnahme und die Vergleichsmäßigung der Wasserkrafterzeugung bei Anlagen am Gewässer unterhalb der Talsperre spielen hier eine Rolle.

Freizeit und Erholung

Mit den Talsperren hat sich auch eine breite touristische Nutzung auf der Talsperre selbst und in ihrem Umfeld entwickelt. Dazu gehören Schwimmen und alle Arten von Wassersport, Camping, Wandern, Radfahren usw. Die mit diesen Aktivitäten verbundenen Dienstleistungen stellen heute in den entsprechenden Regionen oft einen wichtigen Wirtschaftsfaktor dar. Allerdings sind an Trinkwassertalsperren die meisten Aktivitäten auf und im Wasser nicht erlaubt, und in den Schutzzonen um die Talsperre bestehen entsprechende Einschränkungen.

Synergien und Konkurrenz

Die dargestellten unterschiedlichen Nutzungen bzw. Systemdienstleistungen haben teilweise konkurrierende, aber auch synergetische Anforderungen an einen Wasserspeicher. Trinkwassergewinnung, Niedrigwasseraufhöhung und Wasserkraft profitieren von einem möglichst vollen Speicher bzw. einer hohen Auslastung des Speichers. Der Hochwasserschutz hingegen benötigt eine möglichst geringe Auslastung des Speichers, also einen möglichst leeren Speicher. Ein Speicher, der als Pumpspeicher eingesetzt wird,

hält im Idealfall zwei teilgefüllte Speicherbecken vor, um jederzeit Strom speichern als auch erzeugen zu können.

Ein Ziel von EWAZ ist es, Betriebsstrategien zu entwickeln, die zu möglichst großen Synergien bei den jeweils relevanten Systemdienstleistungen führen. Außerdem wird aufgezeigt, wie eine Erweiterung der technischen Anlagen zur Verstärkung der verschiedenen Systemdienstleistungen beitragen kann.

3.3 Vorhandene Anlagen und aktuelle Situation

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Das Projektgebiet umfasste den westlichen Teil beziehungsweise niedersächsischen Teil des Harzes. Der Harz ist ein deutsches Mittelgebirge und gleichzeitig das höchste Gebirge Norddeutschlands. In den vergangenen Jahrhunderten prägte der Bergbau und die damit verbundene Wasserwirtschaft die Region. Die Wasserbewirtschaftung im Oberharz Wasserregal ist seit 2010 UNESCO Weltkulturerbe. Mit dem Niedergang des Bergbaus steht seit Beginn des 20. Jahrhunderts die Speicherwirtschaft im Fokus (Eggelsmann 2016). Im Projektgebiet liegen sechs große Talsperren, wovon alle durch die Harzwasserwerke als Multifunktionsspeicher betrieben werden (siehe Abbildung 39). Fünf dieser Speicher wurden im Rahmen des Projektes näher betrachtet, nicht in die Betrachtung einbezogen war die Eckertalsperre.



Abbildung 39: Übersichtskarte Westharz/Projektgebiet (Lange und Eggelsmann 2011).
Rot gestrichelt: Abschlaggerneinzugsgebiete

Die Granetalsperre, die Okerstalsperre und die Innerstetalsperre bilden das Nordharzverbundsystem, welches eine zentrale Rolle bei der Trinkwasserbereitstellung durch die Harzwasserwerke einnimmt. Die Trinkwasseraufbereitung erfolgt zentral an der Granetalsperre, Oker- und Innerstetalsperre fungieren als Beileitungstalsperren, aus denen Wasser über Rohrleitungsstollen zur Granetalsperre geleitet wird, da das Einzugsgebiet der Grane zu klein ist, um die benötigten Rohwassermengen bereitzustellen. Zusätzlich werden über den Oker-Grane-Stollen auch erhöhte Abflüsse aus dem Einzugsgebiet der Gose der Granetalsperre zugeleitet. Die Fassung und Ableitung des Wassers aus dem Einzugsgebiet der Radau dient dem Hochwasserschutz vor Ort und der Bereitstellung von Rohwasser für die Trinkwassergewinnung an der Granetalsperre. Weiterhin bestehen im südlichen Teil des Westharzes die Oderstalsperre und die Sösetalsperre, wobei

die Sösetalsperre ebenfalls zur Trinkwasserbereitstellung beiträgt. Ebenfalls Teil der Harzwasserwerke, jedoch nicht Bestandteil des Projektes, ist die Eckertalsperre. Sie dient ebenfalls der Trinkwasserbereitstellung, sowie dem Hochwasserschutz und der Energieerzeugung.

Im Ostteil des Harzes, in Sachsen-Anhalt, existiert ebenfalls ein Verbundsystem, wobei sich mit der Rappbodetalsperre mit 109 Mio. m³ ein weiterer bedeutender Wasserspeicher befindet. Verschiedene Ideen, das Westharzsystem auch mit der Rappbodetalsperre zu verbinden, wurden im Rahmen des Projektes nicht weiter untersucht.

Folgend werden alle im Projektgebiet befindlichen Talsperren in ihrer Funktion und mit ihren Besonderheiten kurz dargestellt. Die Daten für die einzelnen Talsperren wurden den Erläuterungsberichten „Antrag der Harzwasserwerke GmbH auf Neufassung der wasserrechtlichen Bewilligung für das Nordharzverbundsystem“ (Eggelsmann 2016) und „Antrag der Harzwasserwerke GmbH auf Neufassung der wasserrechtlichen Bewilligung für die Odertalsperre“ (Eggelsmann 2019) entnommen.

3.3.1 Granetalsperre

Die Granetalsperre, die 1969 in Betrieb genommen wurde, nimmt eine zentrale Rolle im Talsperrenverbundsystem im Westharz ein. Sie erfüllt mit dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung, der Energieerzeugung und vor allem mit der Trinkwassergewinnung verschiedene wasserwirtschaftliche Aufgaben.

Das Absperrbauwerk ist ein 600 m langer Erdschüttdamm mit einer geknickten Achse und mit einer Asphaltbeton-Außendichtung auf der Wasserseite. Die Höhe des Dammes liegt bei circa 67 m Meter über der Gründungssole, die Kronenhöhe liegt hierbei auf 313 m ü. NHN. Insgesamt verfügt die Granetalsperre über ein Stauvolumen von 46,39 Mio. m³. Das Stauziel liegt auf 311 m ü. NHN.

Das System Granetalsperre besteht aus der Talsperre selbst, einem Ausgleichsbecken für die Wasserabgabe an die Grane und einem Tagesspeicher für die Trinkwassergewinnung mit einem Volumen von 60.000 m³. Die Entnahme aus der Granetalsperre erfolgt über den Grundablass und eine sich daran anschließende Betriebswasserleitung, bestehend aus zwei Leitungen mit einem Durchmesser von je 1,20 m. Hierdurch wird ein maximaler Abfluss von insgesamt 24 m³/s ermöglicht. Entnommenes Wasser wird über den Hauptstollen in Richtung der Pumpstation, die gleichzeitig als Krafthaus dient, auf der Luftseite geleitet. Von dort aus gelangt das Rohwasser über eine Druckleitung in den Tagesspeicher. Das Wasser, welches der Mindestwasserführung der Grane dient, fließt durch die Turbine ins Unterwasserbecken. Die Hochwasserentlastung ist als 12 Meter breiter Überfall mit einer Überlaufklappe und anschließender Schussrinne ins Unterbecken ausgebaut. Es können bis zu 70 m³/s Wasser abgeführt werden.

3.3.2 Okertalsperre

Die Okertalsperre nimmt als Teil des Nordharzverbundsystems ebenfalls eine wichtige Stellung ein, wobei sie Aufgaben des Hochwasserschutzes, der Niedrigwassererhöhung, der Trinkwassergewinnung, der Energiegewinnung und der Freizeitnutzung wahrnimmt.

Die Okertalsperre besteht aus der Hauptsperre, einer Vorsperre und einem Unterwasserbecken. Sie wurde 1956 in Betrieb genommen. Das Hauptstaubauwerk ist eine Bogen-Gewichtsstaumauer, das Staubauwerk der Vorsperre eine Gewichtsmauer, ebenso wie beim Unterwasserbecken. Die technischen Daten finden sich in Tabelle 22.

Tabelle 22: Technische Daten der Okertalsperre (nach Eggelsmann 2016)

Bezeichnung	Stauvolumen Mio. m ³	Staufläche km ²	Höhe m	Kronenhöhe m ü. NHN	Vollstau m ü. NHN
Vorsperre	0,52	0,12	24	420,35	415,00
Hauptsperre	46,85	2,25	75	418,20	416,60
UW-Becken	0,20	0,03	21	313,73	313,00

Die Wasserentnahme der Hauptsperre erfolgt über den Grundablass. Der maximale Durchfluss beträgt hier 16 m³/s. Der Ablass besteht aus einem Stahlrohr DN 1200, einer Drosselklappe (in der Mauer), einem Ringkolbenventil am Auslauf und einer Schütztafel (Revisionsverschluss) auf der Wasserseite.

Das Betriebswasser für das Kraftwerk Romkerhall wird unabhängig davon entnommen. Diese Entnahme erfolgt über einen 1,1 km langen Druckstollen (2 m Durchmesser) durch den Ahrendsberg. Der Einlauf verfügt über ein Gleitschütz und einen Rechen. Das zugehörige Wasserschloss befindet sich auf 66 m Höhe auf dem Stollen, es ist als Schachtwasserschloss (3,50 m Durchmesser) ausgebildet.

Die Hochwasserentlastung erfolgt über acht Heber, aufgeteilt in zwei Gruppen. Jeder Heber hat einen Querschnitt von 1,50 m², wobei der Auslaufquerschnitt auf 0,85 m² verengt ist. Die maximale Leistung der Anlage beträgt 120 m³/s. Die Energieumwandlung erfolgt über zwei Sprungschancen, eine pro Hebergruppe, und zur Umleitung ins rechtsgelegene Tosbecken sind Zahnschwellen auf der Schanze angeordnet.

3.3.3 Innerstetalsperre

Die Innerstetalsperre wurde 1966 in Betrieb genommen, sie ist ebenfalls Teil des Nordharzverbundsystems. Sie erfüllt die wasserwirtschaftlichen Aufgaben Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Trinkwassergewinnung und Energieerzeugung. Außerdem dient sie der Freizeitnutzung.

Die Innerstetalsperre besitzt einen 750 m langen Erdschüttdamm mit Asphaltbeton-Außendichtung. Die Höhe des Absperrbauwerks beträgt 40 m (über Gründungssohle) wobei die Krone auf 264 m ü. NHN liegt. Das Vollstauniveau liegt bei 260,95 m ü. NHN. Hierbei wird eine Fläche von 1,39 km² überstaut und ein Volumen von 19,26 Mio. m³ erreicht.

Die Wasserentnahme erfolgt über den Grundablass. Dieser ist wasserseitig am Einlauffurm der Hochwasserentlastung angeordnet. Der maximale Durchfluss des Grundablasses beträgt 13 m³/s. Ein Ringkolbenventil und eine Schwergewichtsklappe dienen als Abschlussorgan. Für den Verschluss ist wasserseitig ein Rollschütz installiert. Das Betriebswasser gelangt über eine Wasserleitung zur Pumpstation (Überleitung zur Granetalsperre) sowie zum Kraftwerk Gethke.

Die Hochwasserentlastung besteht aus einem Einlauffurm mit 90°-Krümmer, einem Entlastungsstollen und einem Tosbecken. Der Durchmesser des Turms an der Überlaufkrone beträgt 20,20 m. Die maximale Leistung ist 125 m³/s und entspricht dem BHQ 1. Weiterhin existiert eine zusätzliche Entlastung über einen Nebendamm (nördlich des Hautdammes). Hierdurch wird ein 150 m langer und 5 m tiefer Sattel abgeriegelt.

Für die Überleitung von Innerstetalsperre zur Granetalsperre muss das Wasser über eine Druckrohrleitung gepumpt werden, da die Innerstetalsperre ein niedrigeres Niveau hat als die Granetalsperre. Der Einlauf an der Innerstetalsperre befindet sich auf 233,50 m ü. NHN und der Auslauf an der Granetalsperre auf 312,72 m ü. NHN.

3.3.4 Odertalsperre

Die Odertalsperre wurde 1934 in Betrieb genommen und dient dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung, Energieerzeugung und der Freizeitnutzung.

Die Odertalsperre besteht aus der Hauptsperre, sowie einer Nachsperre. Das Absperrbauwerk der Hauptsperre ist ein 62 m hoher Erddamm mit Betonkern (mit Lehmvorlage). Die Höhe der Krone liegt bei 383, 21 m ü. NHN. Der Vollstau wird bei einer Höhe von 377,05 m ü. NHN (Winter) und bei 378,71 m ü. NHN (Sommer) erreicht. Der Stauraum beträgt bei Vollstau 30,61 Mio. m³ und erstreckt sich über eine Fläche von 1,36 km².

Das Stauziel des Unterbeckens, welches durch einen Erdschüttdamm aufgestaut wird, liegt bei 325,51 m ü. NHN. Die Krone hat eine Höhe von 329 m ü. NHN, wobei die Höhe des Dammes 12 m beträgt. Der Stauraum beträgt 0,57 Mio. m³ und weist eine Fläche von 0,12 km² auf.

Die Entnahme von Wasser aus der Hauptsperre erfolgt über zwei Grundablässe mit einem maximalen Durchfluss von 21 m³/s bzw. 16 m³/s. Die Entnahmeleitungen DN 2500

sind jeweils mit einer Fallgewichtsklappe, je einem Ringkolbenventil am Auslauf und einer Schütztaste als Revisionsverschluss ausgestattet.

Die Hochwasserentlastung der Hauptsperre hat eine Kapazität von 140 m³/s und ist als 62 m langes Überlaufbauwerk mit dahinterliegendem Sammelkanal ausgebaut. Hinter dem Kanal ist eine Schusssrinne angelegt, die das Wasser ins Unterbecken abführt.

Die Wasserentnahme aus dem Unterbecken erfolgt auf zwei Wegen: einmal über den Grundablass und zum anderen über den Betriebsauslass auf der linken Seite (von Wasserkraftanlage). Die Hochwasserentlastung erfolgt über eine 11,82 m breite Wehrschwelle.

Zwischen den Jahren 2011 und 2015 wurde die Odertalsperre umfangreich saniert. Unter anderem erfolgten Arbeiten am Wasserkraftwerk (Einbau effektiverer Turbinen), eine Sanierung der Dammdichtung des Unterwasserbeckens sowie eine Sanierung der Dichtung des Dammes der Hauptsperre und ein Neubau der Hochwasserentlastung.

3.3.5 Sösetalsperre

Die Sösetalsperre wurde 1931 in Betrieb genommen. Sie dient dem Hochwasserschutz, der Trinkwassergewinnung, Niedrigwasseraufhöhung und Energieerzeugung, wie im Erläuterungsbericht „Generalüberholung der Sösetalsperre und Instandsetzung der B 489 Planfeststellungsverfahren“ (Ramboll GmbH und Harzwasserwerke GmbH 2018) beschrieben wird. Hieraus entstammen ebenfalls alle weiteren Angaben zur Sösetalsperre.

Das System besteht aus einem Vorsperrenbecken, einem Hauptsperrenbecken, einem Wasserkraftwerk und einem Unter- bzw. Ausgleichsbecken.

Das Absperrbauwerk der Hauptsperre ist 56 m hoch, wobei die Bauwerkskrone auf 328,60 m ü. NHN liegt. Das Absperrbauwerk der Vorsperre ist 18 m hoch. Hier liegt die Krone auf 336,10 m ü. NHN. Die Wasserstände liegen bei Vollstau bei 332,90 m ü. NHN (Vorsperre) und 326,80 m ü. NHN (Hauptsperre).

3.4 Auswahl der Projektstandorte

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Für eine allgemeine Standortanalyse im Westtharz wäre es erforderlich gewesen, diesen topografisch zu analysieren, um geeignete Speicherstandorte ab einem Volumen größer 500.000 m³ zu lokalisieren. Im Weiteren wäre dann die Frage gewesen, wie weit als untertägige Unterbecken nutzbare bergmännische Anlagen in der Nähe erreichbar sind.

Diese Überlegung wurde aus drei wesentlichen Gründen ausgeschlossen: die erheblichen Entfernungen zu den für einen Anschluss zur Verfügung stehenden Talsperren, das geringere Speicherangebot in m³, das die aktuell zugängliche unterirdische Infrastruktur bieten kann (unter 200.000 m³), und vor allem, weil die Abbaugelände nicht direkt in die Einzugsgebiete des nach Goslar fließenden Oberflächenwassers und des Nordvorlandes fallen.

Es hat sich schnell gezeigt, dass bestehende untertägige Anlagen wegen Sicherheitsbedenken nicht genutzt werden sollten. Neben den Standorten für zusätzlichen Speicher in Talsperren sollten daher auch Standorte für potentielle Oberbecken von Pumpspeicherkraftwerken in der Nähe vorhandenen Talsperren gesucht werden.

Auf Grund dieser Faktoren fand eine pragmatische Auswahl von Projektstandorten im Februar 2020 statt, die sich zunächst an früheren Ideen und Planungen orientierten. Dabei stand der Systemgedanke im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Standorte/Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen im Vordergrund.

Bei der Auswahl der Standorte stand neben der Verfügbarkeit von Daten aus vorangegangenen Betrachtungen und der bestehenden Infrastruktur das Bündelungsgebot im Vordergrund. Daher wurden insbesondere Standorte ausgewählt, an denen bereits eine entsprechende wasserwirtschaftliche Infrastruktur vorhanden ist. Ziel ist somit eine Minimierung der entstehenden Umweltbelastungen. Dabei sind auch Standorte enthalten, die in der Vergangenheit in der Öffentlichkeit teilweise kritisch gesehen wurden. Bei der Auswahl ging es insbesondere darum, die verschiedenen Möglichkeiten und die damit verbundenen Chancen und Risiken aufzuzeigen und mit anderen Optionen zu vergleichen. Dies ist in der Vergangenheit nicht in diesem Maße erfolgt, es wurden immer einzelne Maßnahmen betrachtet, ohne konkrete Alternativen zur Zielerreichung zu benennen. Zusätzlich zu den Speicherstandorten wurde die Betrachtung der Verbesserung des Hochwasserschutzes für Goslar einbezogen. Am Ende des Prozesses wurden folgende Bereiche für eine weitere Untersuchung ausgewählt:

- Okertalsperre - Huneberg
- Wassernutzung im Innerstetal
- Odertalsperre - Stöberhai
- Wassernutzung im Siebertal
- Erweiterung der Granetalsperre
- Hochwasserschutz für Goslar

3.5 Standortanalyse mit ArcGIS

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Nach der Festlegung der Standorte erfolgte jeweils eine genauere Betrachtung der ausgewählten Bereiche. Hierbei wurde auf Basis der Datenlage geprüft, wo ein Speicher am Standort platziert werden kann, um mit einem möglichst geringen Dammvolumen ein großes Speichervolumen zu erreichen.

In einem ersten Schritt wurden die sechs Projektstandorte besichtigt. Es wurde eine Fotodokumentation dieser Begehungen angefertigt (siehe Anhang). Hierbei wurde insbesondere geprüft, inwieweit sich vor Ort weitere Raumwiderstände oder Besonderheiten ergeben, die auf Karten so nicht erkennbar sind.

Die eigentliche Analyse der Standorte erfolgte dann mit ArcGIS. Hierzu wurde ein DGM 1 von Niedersachsen zur Verfügung gestellt, das vom NLWKN verwendet wird. Das DGM ist das projizierte ETRS_1989_UTM_Zone_32N in einer transversalen Mercator Projektion auf Basis des geographischen Koordinatensystems GCS_ETRS_1989.

Bei dieser Analyse war keine grundsätzliche Vereinheitlichung des Vorgehens möglich, da die Standorte im Hinblick auf vorhandene Infrastruktur, Topographie sowie vorhandene und potentielle Nutzungen individuell zu betrachten waren. Grundlegend kann zwischen zwei Typen von potentiellen Speichern unterschieden werden: zum einem dem Neubau oder der Erweiterung einer Talsperre bzw. eines Hochwasserrückhaltebeckens und dem Bau eines zu einer Talsperre dazugehörigen PSW-Oberbeckens.

Einige allgemeine Kriterien für die Lokalisierung der Speicherstandorte wurden jedoch festgelegt. Die zentrale Rolle hierbei spielt das im Projektantrag festgelegte Mindestvolumen von 500.000 m³. Außerdem wurden für die möglichen PSW-Mindestanforderungen festgelegt. Die Kriterien hierfür basieren auf dem Endbericht „Analyse der Pumpspeicherpotentiale in Bayern“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2014) und stellen sich wie folgt dar:

- Fallhöhe von ≥ 200 m
- Entfernung zwischen den Becken ≤ 5 km
- Installierbare Leistung ≥ 100 MW

Bei einem potentiellen Talsperrenstandort wurden ein oder mehrere Sperrstandorte gesetzt. An diesen Standorten wurde das Einstauvolumen bei verschiedenen Wasserständen ermittelt und so eine Speicherinhaltslinie erstellt. Zur Eingrenzung wurde das Kriterium festgelegt, dass die maximale Stauhöhe maximal 2 m unterhalb der Höhe der ersten Hausreihe einer Ortslage auf der Wasserseite liegen darf, um möglichen relevanten Grundwassererhöhungen vorzubeugen. Dies wird an den relevanten Standorten im Kapitel 7 im Höhenprofil dargestellt. Ansonsten wurde teilweise auch geprüft, welche Stauvo-

lumen sich aus der Topografie heraus maximal realisieren lassen. Erst in den späteren Betrachtungen und hydrologischen Simulationen hat sich dann jeweils gezeigt, wieviel dieses möglichen Volumens tatsächlich sinnvoll genutzt werden kann.

Bei den PSW-Vorhaben wurden anhand der Kriterien und der Datenlage Standorte lokalisiert. Anschließend wurden an diesen Standorten Ringbecken im Massenausgleich geplant. Das heißt, dass der Berg auf eine bestimmte Höhenlinie abgetragen wurde und dieses Abtragsvolumen für den Ringdamm genutzt werden kann. Für diese Ringbecken wurden ebenfalls Speicherinhaltslinien erstellt. Ebenfalls wurde eine Vordimensionierung vorgenommen. Diese wird in Kapitel 6.5 erläutert.

An zwei Standorten (Okertalsperre und Odertalsperre) war die bauliche Trennung von der Hauptsperre bzw. die Abtrennung eines separaten Unterbeckens für den PSW-Betrieb notwendig, um die angesprochenen Konflikte zwischen Pumpspeicherbetrieb und Trinkwassergewinnung zu vermeiden. Diese Becken wurden auf Basis von Bathymetrie-Karten der Harzwasserwerke GmbH modelliert, die die Topografie des Geländes unterhalb des Wasserspiegels darstellen. Dies war notwendig, da das DGM 1 die Topografie des Stauraums nur bis zu einem bestimmten Wasserstand abgedeckt hat, aber nicht bis zum Grund. Auch hier wurden Speicherinhaltslinien erstellt und Dammvolumen ermittelt.

3.6 Entwicklung der Dammbauwerke

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Dammbauwerke in EWAZ wurden vereinfacht mit einheitlichen Randbedingungen und Böschungsneigungen usw. für die verschiedenen Standorte angesetzt. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen für die meisten Standorte keine Untersuchungen zur Tragfähigkeit des Untergrundes vor, ebenso war offen, welches Dammbaumaterial zum Einsatz kommt. Ein Damm für eine Talsperre oder für die Abtrennung innerhalb einer Talsperre wurde als Schüttdamm mit Außendichtung angesetzt. Die Böschungsneigung betrug 1:1,6. Die Hochwasserentlastung wurde als fester Überlauf mit anschließender Schussrinne angenommen. Bei den PSW-Oberbecken war das Vorgehen ähnlich. Die Becken wurden, ausgenommen im Fall des Standortes 1, immer als Ringbecken mit einer Asphaltbetonaußendichtung angenommen. Auch hier betrug die Böschungsneigung immer 1:1,6.

Im Zuge einer Umsetzung der Maßnahmen wären geotechnische und bautechnische Untersuchungen durchzuführen, um eine standortspezifische Lösung zu entwickeln.

3.7 Ermittlung der Stauraumaufteilung

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Als Basis für die Betriebsstrategie der Talsperren wurden die Gesamtvolumina der einzelnen Standorte entsprechend der Systemdienstleistungen in einzelne Lamellen aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgte auf Basis der Angaben aus Kapitel 3.2 (Stand der Technik) sowie der Lamellen der bestehenden Harztalsperren. Das Prinzip wird in Abbildung 40 dargestellt.

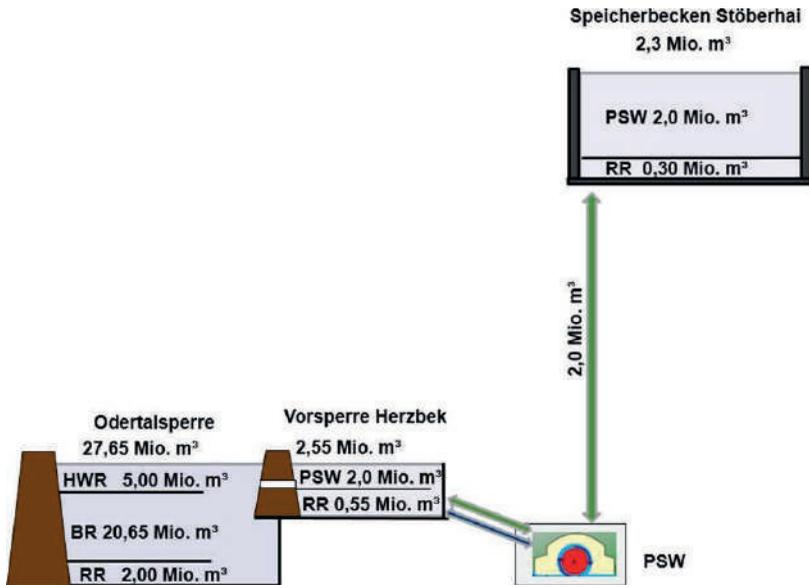


Abbildung 40: Prinzip der Stauraumaufteilung am Beispiel der Odertalsperre

Die Einteilung, sowie sie in Abbildung 40 dargestellt wird, gilt prinzipiell für alle bearbeiteten Speicher. Die PSW-Oberbecken an den Standorten 2, 3 und 4 beinhalten ausschließlich Speicher für den PSW-Betrieb. Nur am Standort 1 kann aufgrund der dortigen Besonderheit zusätzlich Speicherraum auch für andere Zwecke bereitgestellt werden. Der Hochwasserrückhalteraum und eine Reserve wurden zur Vereinfachung in Anlehnung an die Verhältnisse der bestehenden Talsperren der Harzwasserwerke GmbH ermittelt. Hierfür wurden jeweils Mittel gebildet, welche aufgezeigt haben, dass die Lamellen jeweils 5 % des Gesamtstauraums ausmachen. Dieses Prinzip wurde auf die Standorte 2 und 4, welche einen neuen Talsperre vorsehen, übertragen. Die einzelnen Stauraumaufteilungen finden sich in den Maßnahmensteckbriefen im Anhang. Die Ermittlung zur Größe der PSW-Lamelle wird in Kapitel 6.5 erläutert.

3.8 Ermittlung der Hochwasserentlastung

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Für die Standorte 2 (Wassernutzung im Innerstetal) und 4 (Wassernutzung im Siebortal), an denen potentiell eine neue Talsperre errichtet werden könnte, wurden auch die Hochwasserentlastungsanlagen vormessen. Die Vormessung ist auf Basis des HQ_{1.000} erfolgt. Es wurden Überfallhöhe, Wehrbreite und Freibord über folgende Formel ermittelt (Schneider und Albert 2014):

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot b \sqrt{2g} \cdot h_E^{3/2}$$

mit:

- Q = Abfluss in m³/s
- μ = Überfallbeiwert in pu
- b = Wehrbreite in m
- g = Erdbeschleunigung in m/s²
- h_E = Überfallhöhe über der Wehrkrone in m

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der Berechnung.

Tabelle 23: Berechnung der Hochwasserentlastungen

Standort	Lastfälle			Wehrbreite m	Überfallhöhe m	Freibord
	HQ ₁₀₀	HQ _{1.000}	HQ _{10.000}			
2	58,30	98,70	142,10	45	0,99	1,73
4	91,80	142,14	204,96	71	0,93	1,5

In Abbildung 41 werden die drei bautechnischen Möglichkeiten einer Hochwasserentlastungsanlage an Dammbauwerken dargestellt. Möglichkeit A zeigt eine frontal angeströmte Überlaufschwelle mit anschließender Schussrinne, welche in einem Tosbecken endet. Möglichkeit B ist ein im Stauraum installierter Überlauftrichter mit einem Vertikalschacht. Hierbei wird das Wasser über einen Stollen in die Energieumwandlung in Form eines Tosbeckens geleitet. Möglichkeit C wäre der seitlich angeströmte Hangkanal mit anschließendem Schrägschacht bis zum Tosbecken.

Alle drei Optionen sind potentielle Möglichkeiten für die neuen Speicherstandorte. Innerhalb des Projektes wurden jedoch nur vereinfacht die Überfallhöhe und die Wehrbreite berechnet, die zunächst unabhängig von der Anordnung der Hangentlastung ist. Eine endgültige Auswahl kann erst in den folgenden Planungsphasen erfolgen.

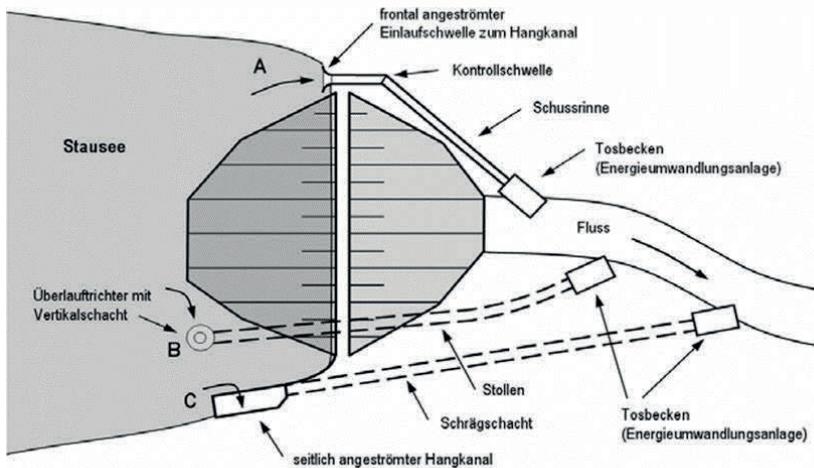


Abbildung 41: Mögliche Anordnung von Hangentlastungen an Staudämmen (Strobl und Zunic 2006)

3.9 Entwicklungen der Speicherbauwerke unter Tage

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Das Konzept, ein stillgelegtes Bergwerk als unteres Wasserreservoir zu nutzen, wurde erstmals 1960 in den USA vorgestellt und hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Das Funktionsprinzip eines Pumpspeicherkraftwerks (PSW) beruht auf der Nutzung der überschüssigen elektrischen Energie aus Wind- und Solaranlagen, um Wasser von einem tiefer gelegenen in ein höher gelegenes Reservoir zu pumpen und so Strom in potentielle Energie umzuwandeln. Das in dem höher gelegenen Reservoir gespeicherte Wasser kann bei Bedarf in das untere Reservoir geleitet werden, wo es eine Turbine antreibt, die einen Generator zur Stromerzeugung aktiviert. Der Begriff PSWuT bezieht sich auf ein Pumpspeicherkraftwerk, bei dem sich mindestens eines des Wasserreservoirs unterirdisch (unter Tage) befindet. Bislang wurden zwei Anordnungen untersucht: unterirdisch-unterirdisch und oberirdisch-unterirdisch. Die Kapazität der Anlage ist proportional zur Masse und zum Volumen des gepumpten Wassers sowie zum Höhenunterschied zwischen den beiden Reservoiren.

Seit 2007 beschäftigt sich eine Forschergruppe unter Beteiligung des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen und der TU Clausthal mit diesem Thema, wobei der Schwerpunkt auf Nachbergbaugebieten im Oberharz und seinen stillgelegten Erzgruben sowie im Erzgebirge im Osten Deutschlands liegt (Beck und Schmidt 2011, Kellner 2012

und Langefeld 2018). Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Installation von Speicherräumen und Pumpspeicherkraftwerken unter Tage (PSWuT) in Kohlebergwerken, z. B. auf der Zeche Prosper-Haniel in Bottrop (Niemann et al. 2018) und im zentralen asturischen Kohlebecken in Nordspanien (Menendez et al. 2017). Andere Studien haben sich auf die Bewertung der Nutzung bestehender Oberflächengewässer und den Bau unterirdischer Anlagen konzentriert, wie eine Studie, die die Eignung der verschiedenen italienischen Regionen im Jahr 2016 klassifizierte (Alterach et al. 2016). Von den verschiedenen Initiativen ist derzeit nur eine in Betrieb, bei der es sich um eine vollständige untertägige Zwischenspeicherung (System von Parallelstollen) in Österreich handelt (Tabelle 24).

Der Bau neuer Infrastrukturen als unterirdische Speicherräume bietet für dieses Projekt mehrere Vorteile, wie die Reduzierung der Kosten, da hauptsächlich Kosten für den Bau von nur eines unterirdischen Speichers und eines Krafthauses anfallen, die Auswahl einer geologisch geeigneten und geomechanisch stabilen Gesteinsformation, die die Anforderungen an die Auskleidung reduziert oder vermeidet, die Standortwahl in der Nähe von Talsperren in der Region, die aber gleichzeitig im Einflussbereich von Risikogebieten liegen, sowie die Vermeidung von Verdunstung aufgrund von steigenden Temperaturen. Darüber hinaus hat die Betrachtung der Geologie der untersuchten Standorte gezeigt, dass vielfältige Möglichkeiten zur Errichtung unterirdischer Wasserspeicher in der Region bestehen. Diese Betrachtung der Standorte, zusammen mit der finalen Festlegung des Untersuchungsgebietes (West- und Südharz) auf die fünf projektrelevanten Gebiete führte zu einer umfassenden Analyse zu jedem identifizierten Standort. Diese Analyse hat zur genauen Definition der geologischen und geomechanischen Charakteristika jedes Standortes geführt, wodurch zwei geeignete Auffahrungsmethoden für den Bau untertägiger Speicher in der Region zur Auswertung ausgewählt wurden. Darüber hinaus gibt Tabelle 24 einen Überblick über die PSWuT in Europa in den letzten 20 Jahren. Dabei handelt es sich um vier Projekte zur Nachnutzung vorhandener Infrastrukturen, in Belgien und Deutschland, sowie um vier weitere Projekte zum Bau unterirdischer Hohlräume für den Einsatz als Wasserspeicherraum, in Italien, Österreich und die Niederländer. Von diesen Projekten ist eines in Österreich bereits in Betrieb und das Zweite in Pfaffenboden in Molln befindet sich derzeit im Bau.

Tabelle 24: Kurzer Überblick über die wichtigsten PSWUt-Projekte der letzten 20 Jahre (Nowosad und Langefeld 2021, Aktualisierung 2022)

Projekt	Land	Stand	Speicherkapazität m ³	Höhe m	Gesamtlänge m	Typ	Aufführungsmethode	Jahr	Bemerkungen
Nabfeld	Österreich	In Betrieb	160 000	317	2 000	Neubau	Parallele Stollen	2006	Nachhaltiger Ansatz. Das abgebaute Gestein wurde wiederverwendet, z. B. Staudamms.
Schieferbergwerk Martelange	Belgien	Forschung	550 000	500	-	Nachnutzung	Parallele Speicherräume	2016	Technische Machbarkeit nachgewiesen.
Nachnutzung stillgelegter Steinkohlebergwerke - Prosper Hamel	Deutschland	Forschung	575 000	530	26 700	Nachnutzung	Ringspeicher	2012	Technische Machbarkeit nachgewiesen. Hohe Investitionskosten für die Wiederverwendung der vorhandenen Infrastruktur.
Nachnutzung der Grube Grund	Deutschland	Forschung	320 000	700	11 210	Nachnutzung	Parallele Stollen	2011	Technische Machbarkeit nachgewiesen. Hohe Investitionskosten für die Wiederverwendung der vorhandenen Infrastruktur.
Eisenerzbergwerk (TUC + Barbara Erzbergbau GmbH)	Deutschland	Forschung	1 000 000	200 - 300	-	Nachnutzung	Örterbau	2011	Technische Machbarkeit nachgewiesen. In Kombination mit einem Bergwerk in Betrieb.
O-PAC	Niederlande	Forschung	ca. 192 000	1400	12 000	Neubau	Parallele Stollen	1980 & 2020	Technische Machbarkeit nachgewiesen. Hohe Investitionskosten.
Pflaffenboden in Molln	Österreich	Genehmigt	1 240 000	630	6 000	Neubau	Parallele Stollen	2011 & 2021	Das Projekt wurde gegen wirtschaftlicher Machbarkeit in einer ersten Phase bis 2019 pausiert. Seit 2021 befindet sich das Projekt im Bau.
Ritten	Italien	Abgelehnt	600 000	900	-	Neubau	Parallele Stollen	2009	Das Projekt hat die Machbarkeitskriterien aufgrund von Unstimmigkeiten mit der Gemeinde nicht erfüllt.

In Abhängigkeit der jeweiligen Geologie können die untertägigen Speichervolumina entweder im Örterbau oder als ein System von parallel aufgefahrebenen Stollen erstellt werden. Beide Methoden entsprechen dem aktuellen Stand der Technik beim Bau großer unterirdischer Speicherkavernen für Pumpspeicherkraftwerke unter Tage (PSWuT), wie in Tabelle 25 dargestellt. Der Hauptunterschied besteht darin, dass ein System paralleler Stollen weniger Volumen pro Fläche (m^2) speichert als die Örterbau-Methode (siehe Abbildung 42) die die TU Clausthal 2011 als Pionier in einem kleinen Projekt in Zusammenarbeit mit der Eisenerzgrube Barbara (Langefeld 2018) eingeführt hat. Damit die Örterbau-Methode jedoch eine höhere Rate des pro Fläche verfügbaren Volumens bieten kann, ist eine geeignete stabile Felsformation erforderlich. Günstigerweise sind die Innerstetalsperre und die geplante Siebertalsperre von Grauwacke umgeben, einem typischen Sandstein aus dem Harz. Daher wurde das Projekt fortgesetzt, um dieses Gestein genauer zu untersuchen und die technische Machbarkeit des Baus von großvolumigen unterirdischen Kavernen in Grauwacke zu prüfen, um verschiedene Szenarien für mögliche PSWuT zu erstellen. Um die Qualität dieses Gesteins zu bewerten, wurde eine Quecksilberdruckporosimetrie an drei Proben durchgeführt, die zu dem Ergebnis führte, dass es sich im Falle der Grauwacke um sehr dichtes Gestein mit sehr geringer Porosität handelt. Weiterhin wurden auch einaxiale und triaxiale Druckversuche durchgeführt, um die Festigkeit des Gesteins zu bestätigen, wobei Werte zwischen 180 und 220 MPa ermittelt wurden. Die Eignung für den Bau von Wasserspeichern unter Tage wurde hiermit bestätigt. Die Eignung für den Bau von unterirdischen Wasserspeichern wurde damit ebenso bestätigt wie die geringere Notwendigkeit der Verzug in diesem speziellen Fall. Ein Verzug sollte in jedem Fall in Bruch-, Kluft und Risszonen, sofern vorhanden, in Betracht gezogen werden.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Ergebnisse der im Rahmen des EWAZ-Projektes durchgeführten Quecksilberdruckporosimetrie-Tests

Probe	EWA-2	EWA-5	EWA-7
Porenvolumen %	1,82	4,25	4,94

Um die Planungsvarianten und Betriebsstrategien für eine PSWuT im Rahmen dieses Projektes bereitstellen zu können, wurde ein georeferenziertes 3D-Modell unter Verwendung der Bergbauplanungssoftware Maptex Vulcan entwickelt, das zur Durchführung möglicher Betriebssimulationen benötigt wurde. Das 3D-Modell enthält daher die relevanten Informationen (alte Schächte und Stollen), die sich direkt im Untersuchungsgebiet der fünf Maßnahmen befinden.

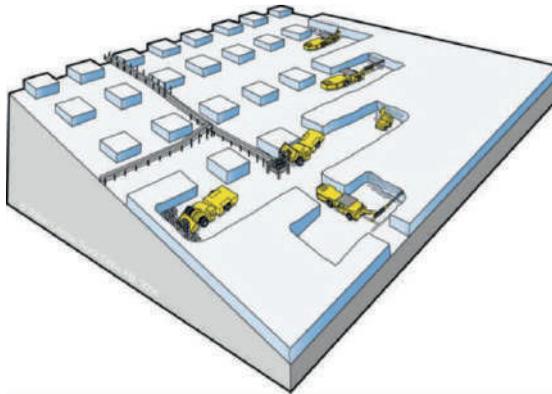


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Örterbau-Abbaumethode, schräg, im Bergbau (Atlas Copco Rock Drills AB 2007)

Die Auswertung ergab, dass unter den betrachteten geologischen Bedingungen, unter denen die unterirdischen Wasserspeicherräume geplant wurden, dass Örterbauverfahren eine wettbewerbsfähige Speicherkapazität bietet, die jeweils ein Volumen von ca. 1,8 Mio. m³ für die untertägigen Speicherräume in Verbindung mit der Innerstetalsperre und Siebertalsperre erreicht hat. Um die bautechnische Sicherheit für die Dimensionierung zu gewährleisten, wurden die zum Kammerbauverfahren gehörenden Pfeilergrößen unter Bewertung des Tragverhaltens der Pfeiler auf der Basis empirischer Methoden nach dem Stand der Technik ausgelegt. Darüber hinaus wurden auch weitere Faktoren wie die Standfestigkeit der Firste, Abbruchsrisikos zur Oberfläche, und die Bodenabsenkung iterativ berechnet, bis die minimale Nebenflächen und Pfeilergröße für die maximale Abbaurrate definiert war, wie im Flussdiagramm in Abbildung 43 dargestellt.

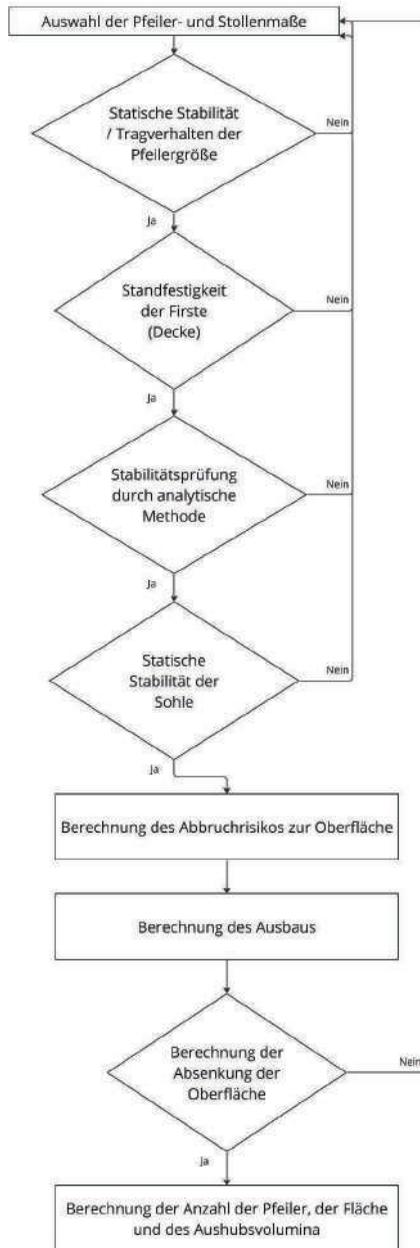


Abbildung 43: Vereinfachtes Flussdiagramm für die Planung von unterirdischen Streckenauffahrungen und Hohlräumen (nach Dusterloh 2020)

Für die Detailplanung für den Aufbau größerer unterirdischer Auffahrungen und damit verbundener Grubenräume fand im Mai 2022 eine Fortbildungsrunde durch Maptek Vulcan statt. Dies ermöglichte die Integration und den digitalen Aufbau der gesamten zusätzlichen Infrastruktur, die für den Betrieb eines unterirdischen Pumpspeicherkraftwerks mit einem unterirdischen Speicher erforderlich ist. Für jede Maßnahme wurde die Planung der in Tabelle 26 unterirdischen Infrastruktur durchgeführt. Die erforderliche unterirdische Infrastruktur kann in eine zum unterirdischen Pumpspeicherkraftwerk und eine zum unterirdischen Speicherbecken gehörende Infrastruktur unterteilt werden.

Tabelle 26: Unterirdische Infrastruktur pro Möglichkeitsmaßnahme

Möglichkeitsmaßnahme	PSW-Infrastruktur	zzt. Unterirdische Speicher
Okertalsperre - Huneberg	<ul style="list-style-type: none"> • Triebwasserstollen (Ober- und Unterwasser) • Zufahrtstollen zur PSW • Bewetterungsschacht • Kraftwerk 	
Obere Innerstetalsperre - Hohenstein	<ul style="list-style-type: none"> • Triebwasserstollen (Ober- und Unterwasser) • Zufahrtstollen zur PSW • Bewetterungsschacht • Kraftwerk 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaverne (Speicher) • Zufahrtstollen zur Kaverne • Bewetterungsbohrloch
Siebertal	<ul style="list-style-type: none"> • Triebwasserstollen (Ober- und Unterwasser) • Zufahrtstollen zur PSW • Bewetterungsschacht • Kraftwerk 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaverne (Speicher) • Zufahrtstollen zur Kaverne • Bewetterungsbohrloch
Odertalsperre - Stöberhai	<ul style="list-style-type: none"> • Triebwasserstollen (Ober- und Unterwasser) • Zufahrtstollen zur PSW • Bewetterungsschacht • Kraftwerk 	

4 Bauliche Maßnahmen (AP 3)

4.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Im folgenden Abschnitt werden die Maßnahmen an den Projektstandorten dargestellt. Die Maßnahme wird hierfür kurz skizziert, und das Speicherpotential am Standort wird in Form von Speicherinhaltslinien dargestellt. Weiterhin werden Dammvolumina sowie Empfehlungen für die bauliche Umsetzung beschrieben. Für jede Maßnahme wird eine Stauraumaufteilung dargestellt, welche die Basis für die spätere Betriebsstrategie liefert. Die Stauraumaufteilung wurde in enger Abstimmung mit den hydrologischen Betrachtungen der TU Braunschweig festgelegt. Auch verworfene Varianten sowie der Grund für das Verwerfen werden hier aufgeführt.

4.2 Okertalsperre - Huneberg

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Im Bereich der Okertalsperre besteht eine besondere Situation, da mit dem Steinbruch am Huneberg bereits ein potentielles Oberbecken besteht, das über ein sehr großes Volumen verfügen würde. Dieses hier wahrscheinlich realisierbare Volumen geht weit über den Bedarf eines Oberbeckens für den Pumpspeicherbetrieb hinaus. Der Standort an der Okertalsperre soll daher zum Teil um das Volumen des Hunebergs erweitert werden, um so in Zukunft mehr Speicherkapazität für die bestehenden Systemdienstleistungen am Standort bereitstellen zu können. Ziel ist die Schaffung einer zusätzlichen Reserve für Trockenperioden, sowie die Bereitstellung von zusätzlichem Rückhalteraum für starke Hochwasserereignisse und somit zur Entlastung der Okertalsperre. Weiterhin soll der Huneberg in Kombination mit der Okertalsperre als Pumpspeicherkraftwerk genutzt werden. Da die Okertalsperre ein Zwischenspeicher für die Rohwasser der Trinkwassergewinnung darstellt, wird, wie in Kapitel 6.3.2 und 6.5 erläutert, eine bauliche Trennung innerhalb der Okertalsperre angestrebt, um den Hauptstaukörper vor den direkten Auswirkungen der Pumpspeichersequenzen zu schützen. Abbildung 44 zeigt die in ArcGIS modellierte Version des Standortes mit dem Huneberg als zusätzlichem Speicher und einer räumlichen Trennung innerhalb der Okertalsperre.

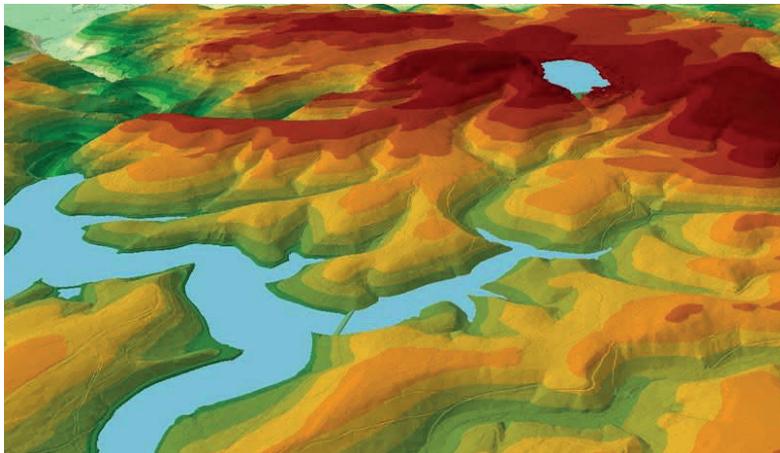


Abbildung 44: Standort 1 mit gefülltem Huneberg und Abtrennung des Kalbetals

Für die räumliche Trennung bzw. das Unterbecken des PSW wird ein östlich liegender Arm der Okertalsperre vorgesehen, das Kalbetal. Dieses eignet sich auf Grund der Anforderungen an ein PSW, insbesondere auf Grund der geringen horizontalen Entfernung zwischen den Becken.

4.2.1 Datenbasis

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Zum Standort Okertalsperre - Huneberg liegt eine Masterthesis zum Thema „Planung und Dimensionierung eines PSW zwischen einem Steinbruch und einer Talsperre mit besonderer Herausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten bei kritischen Randbedingungen“ vor, die von Dipl.-Ing. Ralf Herrmann im Jahr 2011 an der TU Clausthal und der Hochschule Bremen verfasst wurde. In die Bearbeitung waren die Harzwasserwerke involviert. Herrmann beschäftigte sich dort mit einer Eignungsprüfung des Standortes zum PSW. Er betrachtete in erster Linie bergmännische Belange, ging aber auch auf einige wasserwirtschaftlich relevante Punkte ein. Diese werden folgend kurz aufgeführt.

Nach Herrmann (2011) liegt das potentielle Speichervolumen des Hunebergs bei circa 16 Mio. m³ bei einer Überlaufhöhe von 576 m ü. NHN. Es wird dabei von einem Abbauende im Jahr 2011 ausgegangen. Bei einem planmäßigem Abbauende im Jahr 2032 wären es bereits 25 Mio. m³.

Es wurde das Setzen eines Satteldammes empfohlen, um das Volumen entweder um 5 Mio. m³ (2011) oder 6,5 Mio. m³ (2032) zu erhöhen.

Hermann führte ebenfalls bereits aus, dass starke Hochwasser an den Huneberg abgegeben werden sollen, um diese zu speichern und als Reserve für Trockenperioden vorzuhalten.

Ebenfalls untersuchte er drei Möglichkeiten der Verbindungen von Huneberg und Okertalsperre. Die von ihm aufgeführte Variante C weist dabei die meisten Vorteile auf, unter anderem auf Grund der geringsten Länge von circa 2,85 km.

Weiterhin wurden verschiedene maximale elektrische Leistungen ermittelt. Für das Abbauende 2011 wurde unterschieden zwischen einer Umsetzung ohne Satteldamm mit 488 MW und einer Umsetzung mit Satteldamm mit 528 MW. Für das Abbauende 2032 liegt die Leistung bei 462 MW ohne Satteldamm und bei 502 MW mit Satteldamm.

Die gesamte Thesen wurde als Ausgangsbasis für die Untersuchungen im EWAZ-Projekt betrachtet.

4.2.2 Topografisches Profil

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Topografisch wurde am Standort 1 nur der Huneberg, das Kalbetal sowie das Gelände zwischen den beiden Punkten betrachtet. Abbildung 45 zeigt einen Schnitt von der Okertalsperre bis zum Huneberg.

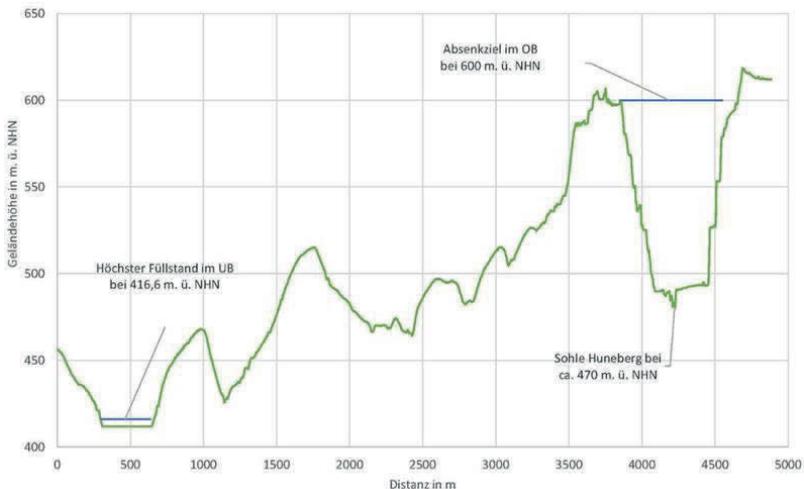


Abbildung 45: Geländeschnitt Standort 1

Die Entfernung von Huneberg zur Okertalsperre beträgt circa 4000 m und liegt somit innerhalb der in Kapitel 5.2 beschriebenen 5 km Entfernung. Die Höhendifferenz vom Huneberg bis zum aktuellen Stauziel der Okertalsperre von 416,6 m ü. NHN liegt zwischen 53,4 m und 183,4 m. Die Anforderungen an ein PSW würden hiermit nicht erfüllt werden. Der Standort wird aber auf Grund des potentiell großen Stauvolumens trotzdem betrachtet

4.2.3 Speicherkapazität

Jan Sünnemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Der potentielle Speicherinhalt am Huneberg wird in Abbildung 46 in Form der Speicherinhaltslinie dargestellt.

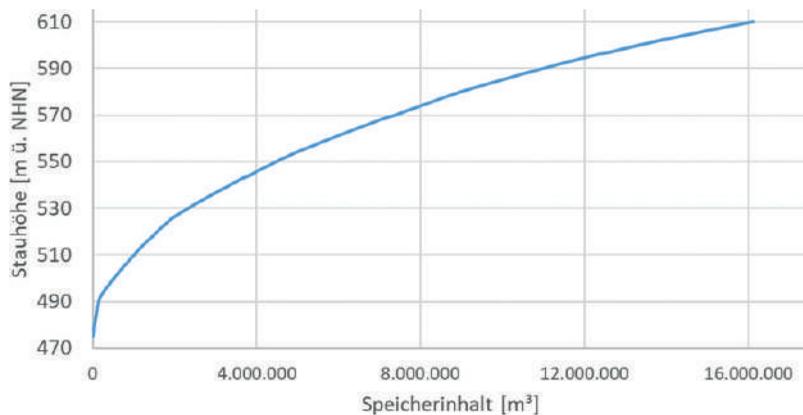


Abbildung 46: Speicherinhaltslinie Huneberg

Der Huneberg bietet somit ein Volumen von maximal 16 Mio. m³ bei einer maximalen Stauhöhe von 610 m ü. NHN. Diese Stauhöhe kann nur erreicht werden, wenn die aktuelle Zufahrt zum Huneberg mit einem entsprechenden Damm verschlossen wird.

Die Speicherkapazität des Kalbetals wird in Abbildung 47 dargestellt.

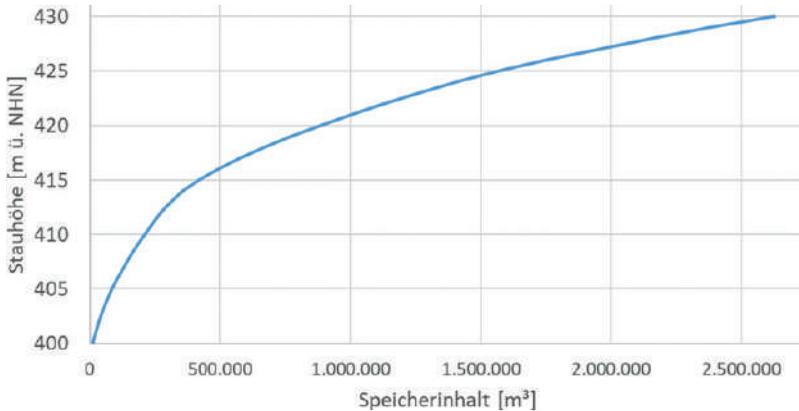


Abbildung 47: Speichereinhaltslinie Kalbetal

Das Kalbetal hat ein maximales Speichervolumen von 2,63 Mio. m³ bei einer Stauhöhe von 430 m ü. NHN. Die Stauhöhe ist höher als die der Okertalsperre und wird durch den für die Abtrennung benötigten Damm erreicht.

Durch die Erweiterung kann das Volumen des gesamten Standortes von 46,85 Mio. m³ auf 64,77 Mio. m³ gesteigert werden.

4.2.4 Bauliche Anpassungen

4.2.4.1 Bauwerke über Tage

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Für die Maßnahmen am Standort 1 werden zwei neue Dammbauwerke benötigt: ein Damm zum Verschluss des Hunebergs und ein Damm zur Abtrennung des Kalbetals von der Okertalsperre. Grundlegend unabhängig vom Volumen des Dammes ist zu erwähnen, dass die Dämme als Schüttdämme mit Betonaußendichtung angelegt werden, da diese Bauart beständig gegen die starken Wasserstands-schwankungen ist. Weiterhin werden sie nach den entsprechenden DIN-Normen ausgelegt. Vertiefende Planungen sind in weiteren Arbeitsschritten durchzuführen.

Für den Damm, der das Kalbetal von der Okertalsperre abtrennt, wurde ein Dammvolumen von circa 532.629 m³ ermittelt, bei einer Höhe von circa 31 m. Die Dammkrone befindet sich bei 432 m ü. NHN, das Freibord wird mit 2 m angesetzt. Die Böschungsneigung beträgt auf beiden Seiten 1:1,6 m.

Das Volumen des Dammes, der den Huneberg abschließt, beträgt circa 69.657 m³ bei einer Höhe von circa 12 m. Die Dammkrone befindet sich auf 613 m ü. NHN, das Freibord wird mit 2 m angesetzt. Die Böschungsneigung beträgt beidseitig 1:1,16 m.

4.2.4.2 Bauwerke unter Tage

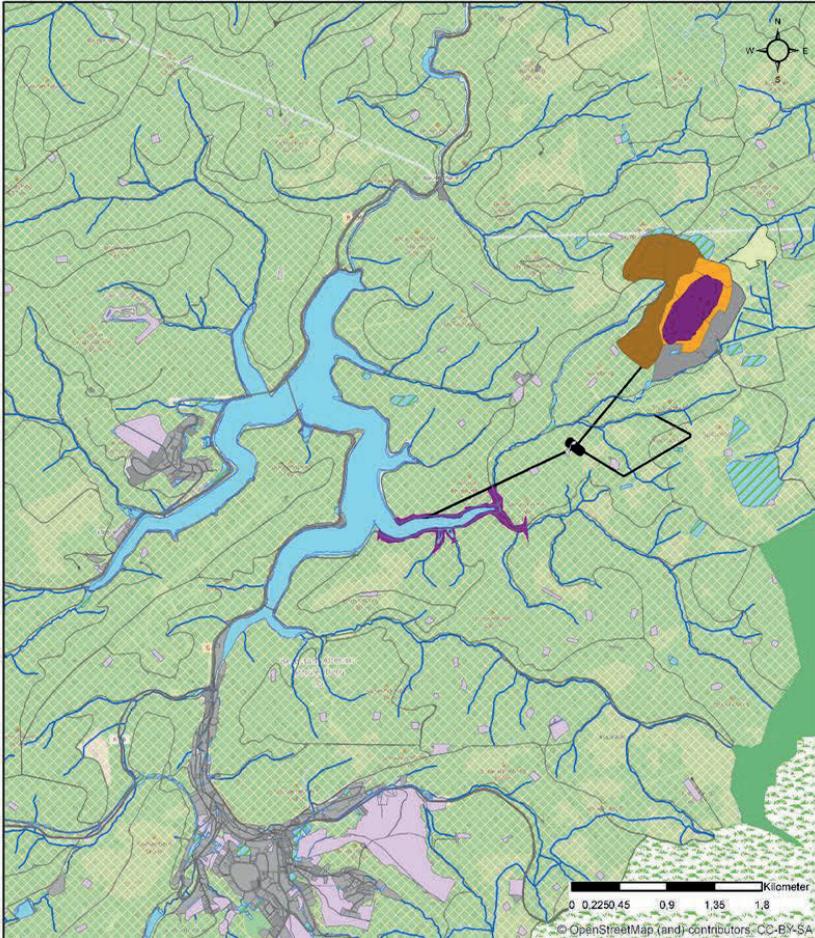
Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Für die Maßnahmen am Standort 1 wurden zwei Triebwasserstollen geplant, Ober- und Unterwasser, sowie ein Kraftwerk und die dazu gehörige Zufahrtstollen und ein Bewetterungsbohrloch. In Anbetracht der bekannten geologischen und geotechnischen Merkmale des Standorts kann vorgeschlagen werden, die Hohlräume nach der konventionellen Abbaumethode (Bohren und Sprengen) zu errichten. Die geologischen und geotechnischen Merkmale müssen jedoch für diesen spezifischen Standort für einen zukünftigen Bau in Form einer geologischen Erkundung für Stollen und Kavernen bestätigt werden.

Die spezifischen Maße der unterirdischen Bauwerke sind in Tabelle 27 zusammengefasst, während die Abbildung 48 einen Überblick über den empfohlenen Standort für ein PSW und die zugehörigen Bauwerke gibt.

Tabelle 27: Maße der unterirdischen Infrastruktur

Triebwasserstollen – Länge m	Kavernen-Krafthaus – Maße [H x B x L] m	Zufahrtswege – Länge m
3.454,1	51 x 20 x 60	1.602,4
Schieber-Kavernen m ³	Trafo-Kaverne m ³	Bewetterungsbohrloch – Länge m
18.000	7.395	155,5



Legende

 AX_Gebaeude	 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25
 AX_Gehoelz	 Nationalparke_DTK25
 AX_Halde	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 PSW_Huneberg
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 AX_TagebauGrubeSteinbruch	 Talsperren

Abbildung 48: Überblick über die Maßnahme 1 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

4.2.5 Nutzung des Speicherraumes

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Das Volumen des Hunebergs beträgt insgesamt 16 Mio. m³. Hiervon sollen zukünftig 2 Mio. m³ für den Pumpspeicherbetrieb in Verbindung mit dem Kalbe- Unterbecken genutzt werden. 12 Mio. m³ sollen als Reserveraum in Trockenperioden für die Trinkwassergewinnung und Niedrigwasseraufhöhung zurückgehalten werden. Durch diesen dauerhaft gefüllten Reserveraum wird die Fallhöhe für den Pumpspeicherbetrieb im Normalfall erhöht. Dieser Reserveraum sollte daher erst genutzt werden, wenn entsprechende Tiefstände in der Okertalsperre erreicht werden, der Reserveraum dort könnte evtl. zu Gunsten des Betriebsraumes verringert werden. Die Wirkung der Hochwasserschutzlamelle im Oberbecken ist in weiteren Untersuchungen noch detailliert zu prüfen. Durch diese Lamelle geht im Oberbecken dauerhaft Fallhöhe im Pumpspeicherbetrieb verloren, und diese Lamelle müsste bei einer entsprechenden Vorwarnung zur Entlastung aus der Okertalsperre gefüllt werden, um diese zu entlasten. Hier kann es andere Betriebsstrategien geben, die die gleichen Ziele erreichen, aber keine Hochwasserlamelle im Oberbecken benötigen und damit keinen Verlust an Fallhöhe verursachen.

Weiterhin stehen 2 Mio. m³ als zusätzlicher Rückhalteraum für Hochwasserereignisse zur Verfügung. Die Systemskizze in Abbildung 49 zeigt die verschiedenen Elemente am Standort Okertalsperre in einem möglichen zukünftigen Zustand.

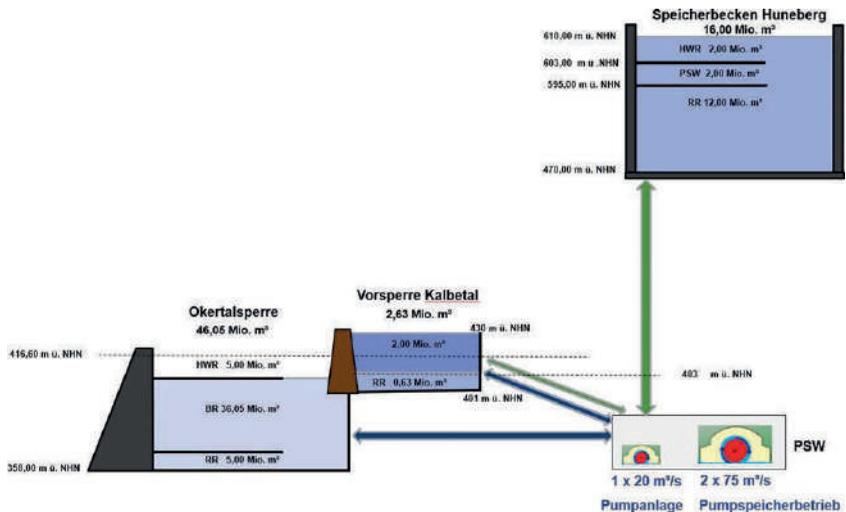


Abbildung 49: Systemskizze Standort 1

4.3 Wassernutzung im Innerstetal

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Das Innerstetal bietet verschiedene Möglichkeiten der Erweiterung der Speicherkapazität bzw. unterschiedliche Standorte für neue Speicheroptionen. Der Standort soll um die Systemdienstleistung Energiespeicherung erweitert werden, zugleich soll weiterer Speicherraum für die bestehenden Nutzungen in Form von Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung und Rohwasserspeicherung für die Trinkwassergewinnung geschaffen werden. Da aktuell an der bestehenden Innerstetalsperre Rohwasser für die Trinkwassergewinnung zwischengespeichert wird und sich dieser Standort topografisch zusammen mit dem Höhenzug Hohestein als PSW eignet, soll die Trinkwassergewinnung an der Innerste weiter in den Oberlauf verlagert werden. Zwischen den Ortslagen Wildemann und Lautenthal ist hierfür die Errichtung einer „oberen Innerstetalsperre“ vorgesehen. Diese neue Speicheroption bietet ebenfalls den Vorteil, Wasser im Freigefälle zur Granetalsperre überzuleiten, anstatt wie bisher an der bestehenden Innerstetalsperre über eine Pumpstation. Abbildung 50 zeigt die bestehende (untere) Innerstetalsperre mit dem oberirdischen PSW-Oberbecken auf dem Höhenzug Hohestein. Eine Alternative bietet ein unterirdisches Oberbecken am selben Standort (siehe Abbildung 52).

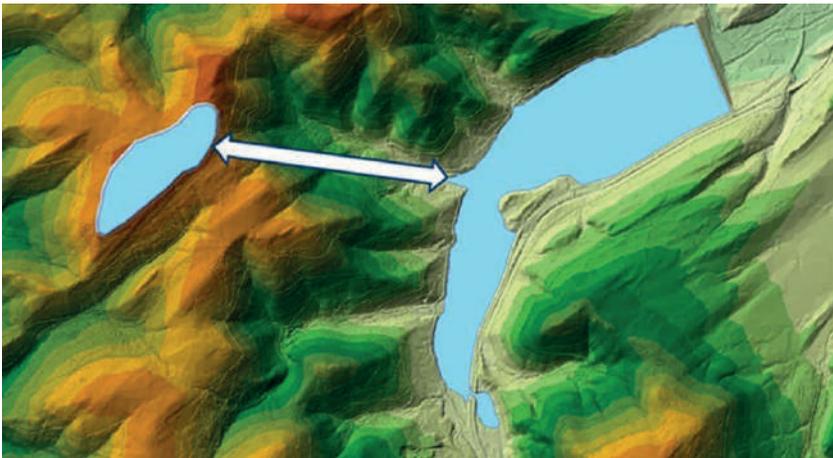


Abbildung 50: Untere Innerstetalsperre mit PSW-Oberbecken Hohestein

Abbildung 51 zeigt die neue obere Innerstetalsperre mit einem Gesamtvolumen von 14 Mio. m³.

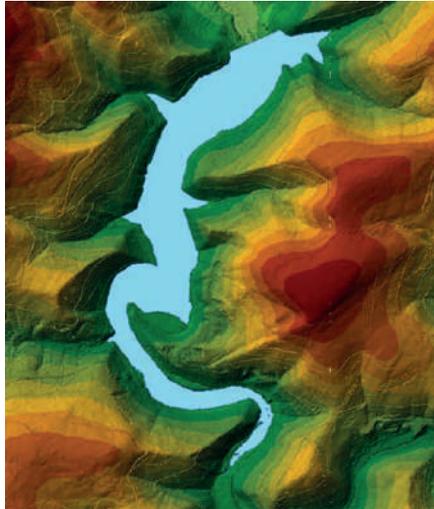


Abbildung 51: Obere Innerstetalsperre

Die neue obere Innerstetalsperre dient neben der Rohwasserspeicherung ebenso dem Hochwasserschutz und der Niedrigwasseraufhöhung. Eine Energiegewinnung als Laufwasserkraftwerk, wie sie an einigen Harztalsperren, erfolgt, wird im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht. Diese ist aber auch hier grundsätzlich zu empfehlen, auch wenn der Betrieb nach wasserwirtschaftlichen anstelle von energetischen Gesichtspunkten erfolgen sollte.

Als Alternative wurde für den Standort Hohestein ein unterirdischer, bergmännisch abzubauen Speicherraum konzipiert. Der Speicherraum wird eine geringe Neigung von 0,25 % in südöstlicher Richtung aufweisen, um ein freies Gefälle innerhalb des Speicherraums zu gewährleisten, wobei eine Gesamtspeicherkapazität von 1,7 Mio. m³ und ein Bruchvolumen von 2,1 Mio. m³ vorgesehen ist.

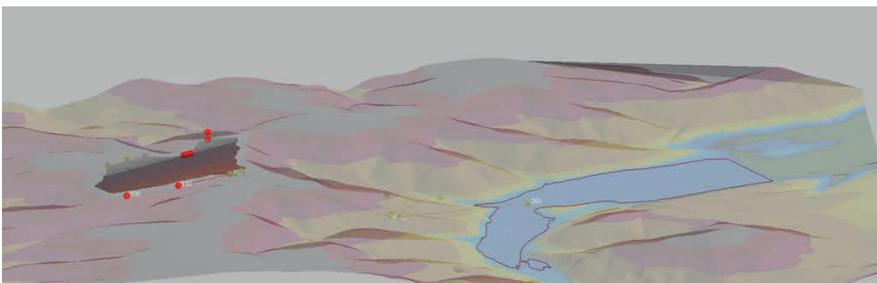


Abbildung 52: Oberbecken Hohestein

mann und Lautenthal, da hier laut der Harzwasserwerke bereits in der Vergangenheit ein potentieller Sperrstandort angedacht wurde. Abbildung 54 zeigt das Höhenprofil von Hohenstein und der unteren Innerstetalsperre. Zwischen der Stauhöhe der Talsperre bei 260,95 m ü. NHN und dem aus ArcGIS ermittelten unteren Niveaus des PSW-Oberbeckens bei circa 540 m ü. NHN liegen circa 281 m potentielle Fallhöhe. Die Standorte liegen circa 2 km auseinander. Somit erfüllen sie topografisch die Kriterien für die Errichtung eines PSW.

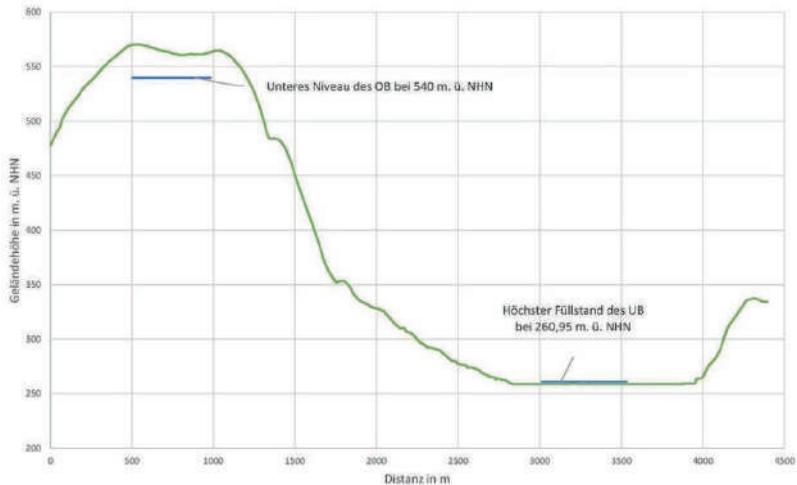


Abbildung 54: Höhenprofil im Bereich der unteren Innerstetalsperre

Abbildung 55 zeigt das Höhenprofil entlang des Tals im Bereich der Oberen Innerstetalsperre. Es wurden zwei Varianten betrachtet: die Variante o137 (Zahl steht für Dammhöhe) und die Variante o147.

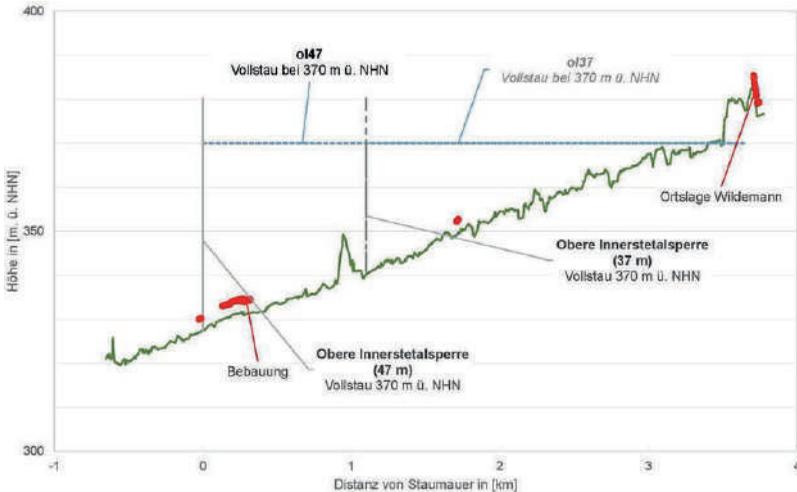


Abbildung 55: Höhenprofil Obere Innerstetalsperre

Variante o137 wurde trotz des potentiell geringeren Stauvolumens untersucht, da sich die Sperrstelle topografisch ebenfalls für die Errichtung eines Dammes als günstig erweist. Bei beiden Varianten wird die Ortslage Wildemann nicht eingestaut, der Höhenunterschied bei maximalen Wasserständen in der Talstperre (HQ_{1.000}) beträgt mindestens die angestrebten 2 m zur Ortslage. Die Variante o147 wird gegenüber der Variante o137 vorgezogen, da mehr Volumen aufgestaut werden kann.

4.3.2.2 Bauwerke unter Tage

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Der geplante unterirdische Speicherraum hat seine Sohle auf 497m ü. NHN und die Oberkante bei 502 m ü. NHN im Eingangsbereich im Südosten und aufgrund der berücksichtigten Neigung von 0,25 % in nordwestlicher Richtung eine Höhe von 498,6 m ü. NHN im unteren und 503,6 m ü. NHN im oberen Bereich des nordwestlichen Randes.

Das Höhenprofil des Hohesteiens und der unteren Innerstetalsperre ist in Abbildung 56 dargestellt. Zwischen der Talstperre auf ca. 261 m ü. NHN und der Unterkante des PSW-Oberbeckens auf 497 m ü. NHN besteht eine potentielle Fallhöhe von ca. 236 m, die aus ArcGIS ermittelt wurde. Der Abstand zwischen den Standorten beträgt etwa 1,5 km. Insofern erfüllen sie ebenso topographisch die Kriterien für den Bau eines PSW.

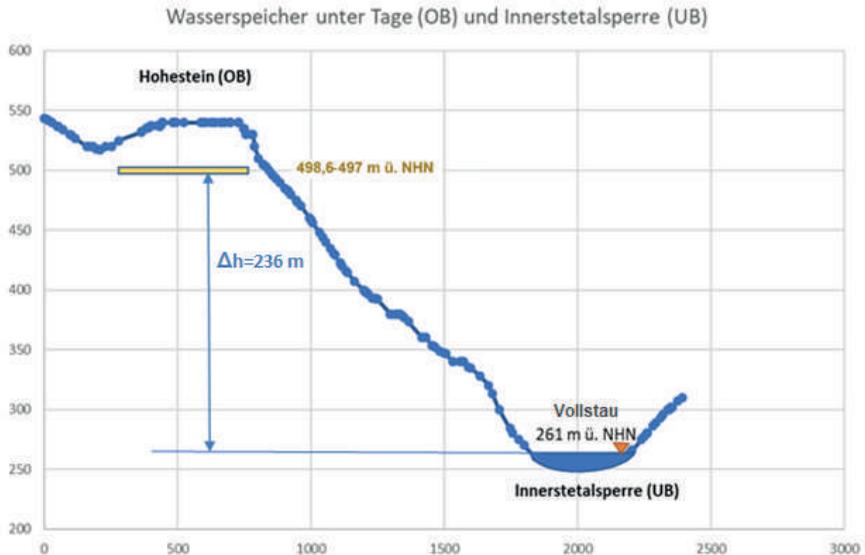


Abbildung 56: Höhenprofil im Bereich der unteren Innerstetalsperre im Zusammenhang mit einem unterirdischen Speicherraum

4.3.3 Speicherkapazität

4.3.3.1 Bauwerke über Tage

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Der Speicherinhalt der zwei Varianten für die Obere Innerstetalsperre wird in Abbildung 57 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Variante ol47 volumentechnisch mit 14 Mio. m³ ein deutlich größeres Potential bietet als Variante ol37 mit 5,7 Mio. m³ bei der gleichen Stauhöhe von 370 m ü. NNH.

In Abbildung 58 wird die Speicherinhaltslinie des PSW Hohestein dargestellt. Abbildung 58 zeigt auf, dass das Oberbecken für das PSW an der Innerstetalsperre circa 2,4 Mio. m³ Stauvolumen aufweisen kann. Die maximale Stauhöhe hierbei beträgt 550 m ü. NNH.

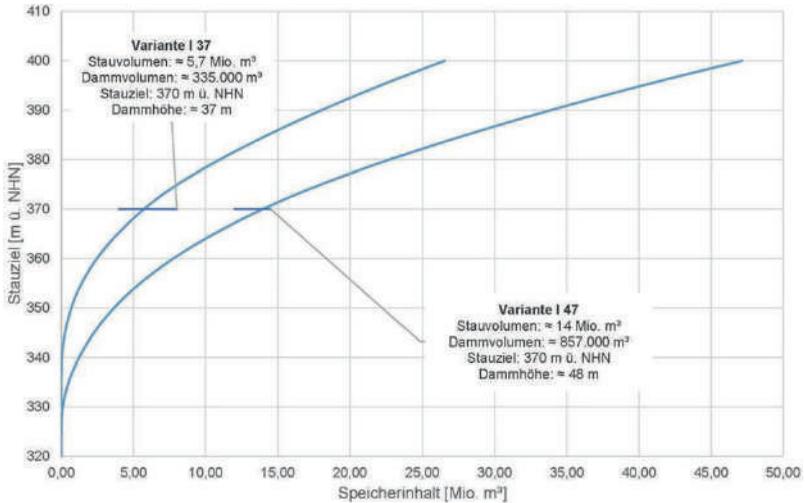


Abbildung 57: Speicherinhaltslinien von o137 und o147 im Vergleich

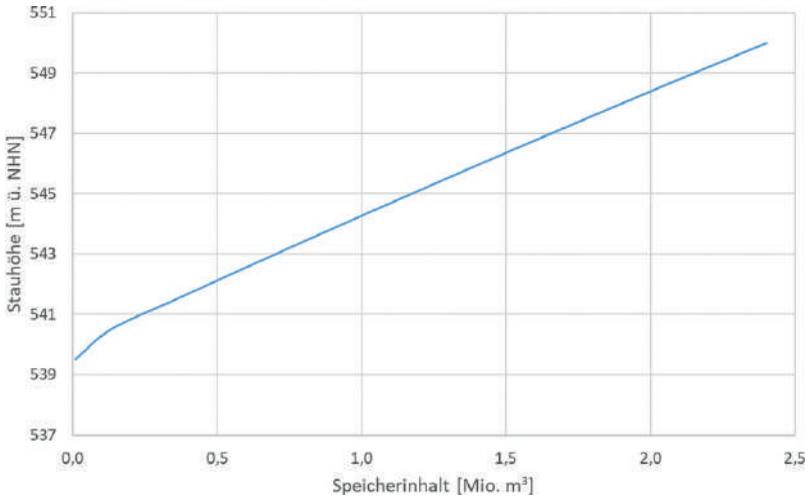


Abbildung 58: Speicherinhaltslinie Oberbecken Hohestein

4.3.3.2 Bauwerke unter Tage

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Der Bau des unterirdischen Speicherraums könnte eine Fläche von 564 600 m² umfassen und ein Nutzvolumen von insgesamt 1,7 Mio. m³ bieten. Unter Berücksichtigung der Tragfähigkeit der Grauwacke wurde ein System von Kammern und Pfeilern mit Nebenflächen

von 10 x 10 m mit Stützpfйлern von 5 x 5 m und einer gemeinsamen Höhe von 5 m mit einem Gefälle von 0,25 % entworfen, wie in Abbildung 59 zu sehen ist. Das Deckgebirge liegt in diesem Bereich zwischen 30 und 70 m. Alle Messungen werden in Metern angegeben.

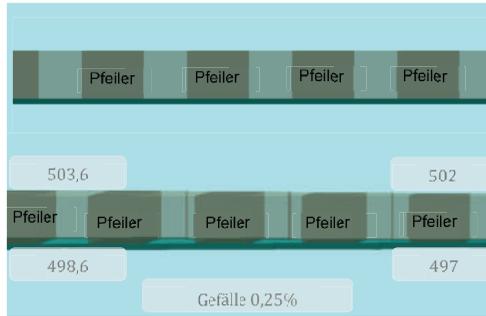


Abbildung 59: Profil und Südostansicht des entworfenen Speicherraums, unter Tage

Weiterhin stellt die Abbildung 60 die Inhaltsspeicherlinie im Bereich zwischen den Höhen 497 und 503,6 m ü. NHN dar. Der Speicherraum erreicht sein Gesamtvolumen bei 503,6 m ü. NHN und ein produktives Nutzvolumen von 1,7 Mio. m³ bei 502 m ü. NHN. Der leere Raum zwischen 502 m ü. NHN. und 503,6 m ü. NHN wurde aus Gründen der Wetterführung und des Druckausgleichs in der Planung berücksichtigt. Auf der oberen Speicher-ebene entlang der Nordwestseite werden zwei Bohrungen mit Anschluss an die Oberfläche angeordnet, um den Druck im Inneren des Speichers während der Füll- und Entleerungszyklen zu regulieren.

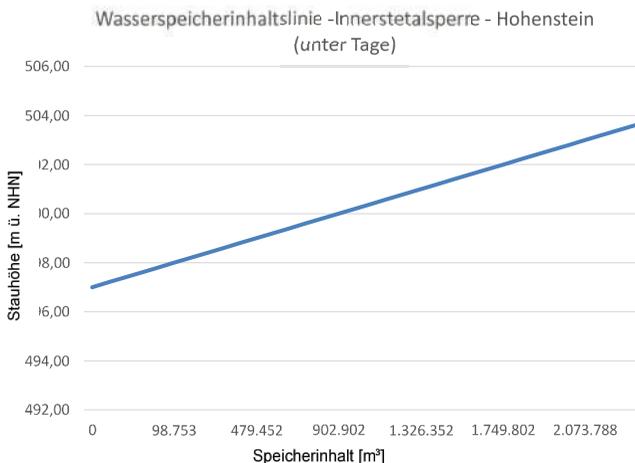


Abbildung 60: Speichereinhaltslinie Oberbecken Hohestein, unter Tage

4.3.4 Bauliche Anpassungen

4.3.4.1 Bauwerke über Tage

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Maßnahme im Innerstetal erfordert die Errichtung zweier neuer Bauwerke: zum einen die eines Absperrbauwerks im Bereich der oberen Innerste und zum anderen die eines Ringdammes für das Oberbecken Hohestein am Standort obere Innerste. Das Absperrbauwerk der oberen Innerstetalsperre wird an das der bestehenden Innerstetalsperre angelehnt. Es wird also ein Erdschüttdamm mit Außendichtung empfohlen, wobei keine finale Einschätzung hierzu erfolgen kann. Die detaillierte Betrachtung hierzu muss in weiteren Planungsschritten erfolgen.

Für die Errichtung des Dammes der oberen Innerstetalsperre wird ein Dammvolumen von circa 857.000 m³ ermittelt. Dabei hat der Damm eine Höhe von 47 m. Die Dammkrone befindet sich bei circa 372 m ü. NHN, wobei das Freibord 1,73 m beträgt. Die Böschungsneigung wird beidseitig mit 1:1,6 angesetzt.

Das Ringbecken Hohestein hat ein Dammvolumen von rund 1,6 Mio. m³, wobei die Dammhöhe 12 m beträgt. Es wird nach Kapitel 6.3.1 ein Ringdamm mit Asphaltbetonaußendichtung empfohlen. Die Böschungsneigung wurde mit 1:1,6 angesetzt. Die Krone befindet sich auf 550 m ü. NHN.

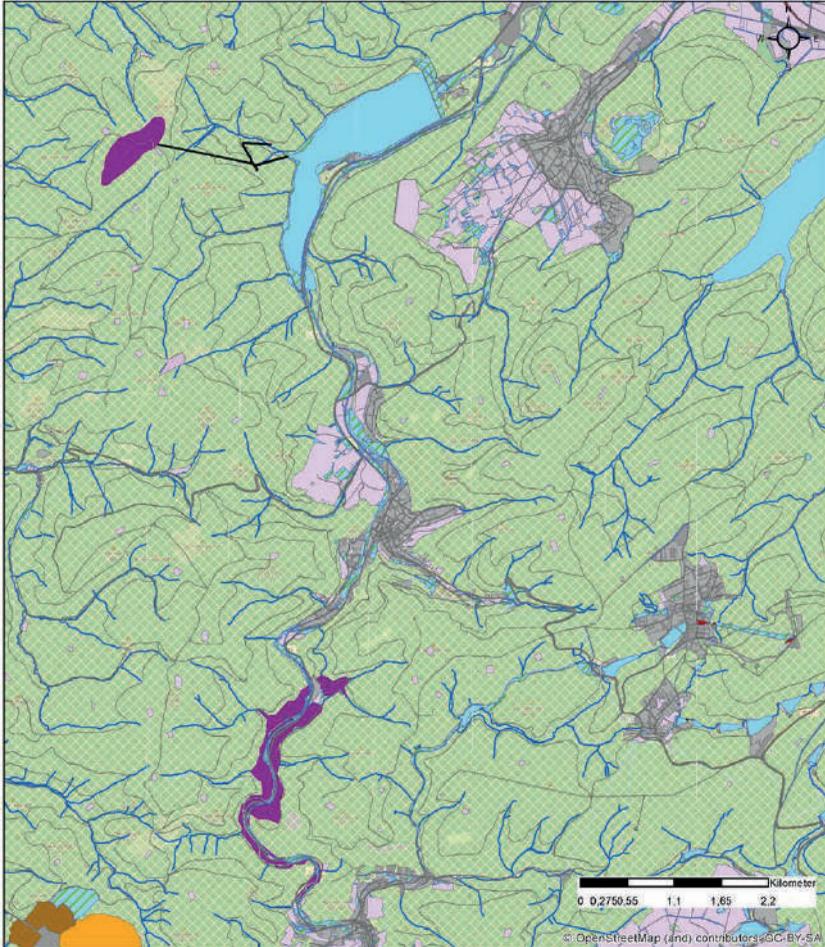
4.3.4.2 Bauwerke unter Tage

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Für die Maßnahmen am Standort 2 wurden zwei Triebwasserstollen geplant, Ober- und Unterwasser, sowie ein Kraftwerk und die dazu gehörige Zufahrtstollen und ein Bewetterungsbohrloch. In Anbetracht der bekannten geologischen und geotechnischen Merkmale des Standorts kann vorgeschlagen werden, die Hohlräume nach der konventionellen Abbaumethode (Bohren und Sprengen) zu errichten. Die spezifischen Maße der unterirdischen Bauwerke sind in Tabelle 28 zusammengefasst, während die Abbildung 61 einen Überblick über den empfohlenen Standort für ein PSW und die zugehörigen Bauwerke gibt.

Tabelle 28: Maße der unterirdischen Infrastruktur

Triebwasserstollen – Länge m	Kavernen-Krafthaus – Maße [H x B x L] m	Zufahrtswege – Länge m
1.675	51 x 20 x 75	557
Schieber-Kavernen m ³	Trafo-Kaverne m ³	Bewetterungsbohrloch – Länge m
18.000	10.710	114
Speicher Abbruchvolumina Mio. m ³	Speicher Bewetterungsbohrloch – Länge m	Speicher-Zufahrtswege – Länge m
410	75	440



Legende

- | | |
|---|--|
|  AX_Gebäude |  Naturschutzgebiete_DTK25 |
|  AX_Landwirtschaft |  PSW_Innerste |
|  AX_Strassenverkehr |  Speicherbecken_EWAZ |
|  Landschaftsschutzgeb_FL_DTK25 |  Talsperren |
|  Nationalparke_DTK25 | |

Abbildung 61: Überblick über die Maßnahme 2 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

4.3.5 Nutzung des Speicherraums

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Systemdienstleistungen im Innerstetal sollen in Zukunft insbesondere aus Gründen der Wasserqualität im Falle einer Umsetzung eines PSW auf die beiden Talsperrenstandorte aufgeteilt werden. Das Prinzip dieser Maßnahme wird Abbildung 62 dargestellt.

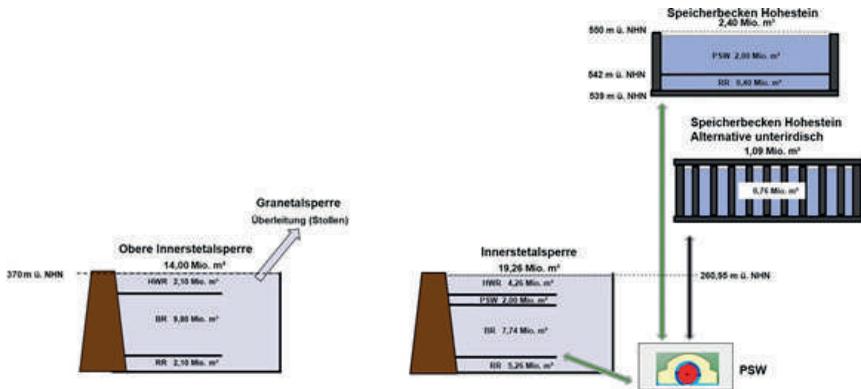


Abbildung 62: Systemskizze Standort 2

Durch die Errichtung einer oberen Innerstetalsperre kann in Zukunft mehr Volumen für alle Systemdienstleistungen zur Verfügung gestellt werden. Das Standortvolumen kann von 19,26 Mio. m³ auf 35,66 Mio. m³ erhöht werden. Eine detaillierte tabellarische Aufteilung findet sich im Anhang.

4.3.6 Nicht weiter betrachtete Varianten

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Am Standort 2 wurden mehrere Varianten der Oberen Innerstetalsperre untersucht: die Varianten o137 und o147. Die Variante o137 wurde auf Basis der Begehung und der topografischen Analyse als Alternative angesehen. Die Variante wurde auf Grund des geringeren Volumens verworfen. Sie könnte später aber relevant werden, sollten sich Schwierigkeiten beim Grunderwerb, insbesondere im Bereich der vorhandenen Bebauung, ergeben.

4.4 Odertalsperre - Stöberhai

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Am Standort Odertalsperre ist eine Erweiterung der Nutzungen Trinkwassergewinnung und Energiespeicherung vorgesehen. Hierzu muss der Standort um ein Oberbecken erweitert werden. Weiterhin wird zum Schutz des Hauptstaukörpers eine bauliche Abtrennung eines Bereiches innerhalb der Talsperre vorgeschlagen. Abbildung 63 zeigt eine Skizze der Maßnahme im digitalen Geländemodell.

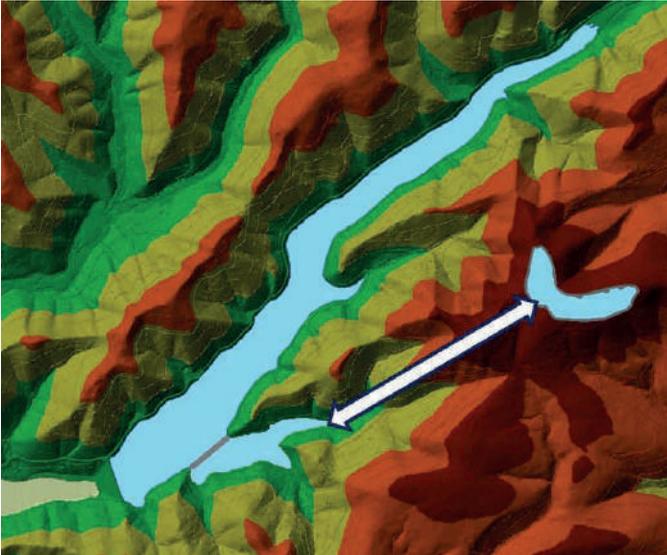


Abbildung 63: Odertalsperre mit Oberbecken Stöberhai

Der in Abbildung 63 dargestellte Oberbeckenstandort liegt auf dem Höhenzug Stöberhai und erfüllt optimal die Kriterien aus Kapitel 5.2 für ein PSW.

4.4.1 Datenbasis

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Für die Odertalsperre existieren ebenfalls Entwürfe zu einer Nutzungsanpassung. Einen konkreten Vorschlag liefert hier der Erläuterungsbericht „Nutzung der Odertalsperre als Trinkwasserreservoir“ aus dem Jahr 2019. Die abschließende Bewertung ergab, dass im Best-Case 14,5 Mio. m³ pro Jahr gewonnen werden können, und im Worst-Case sind es 3,5 Mio. m³ pro Jahr. Die 14,5 Mio. m³ können nur unter der Bedingung gewonnen werden, wenn Wasser aus der Sieber- zur Okertalsperre übergeleitet wird, was innerhalb des

EWAZ-Projektes nicht weiter untersucht wird, da das Siebertal als eigenständiger Standort betrachtet wird. Weiterhin gilt, dass die Odertalsperre baulich angepasst werden müsste, da das Hypolimnion (Tiefenwasser) zu klein für eine Unterwasserabgabe und Trinkwasserabgabe ist (Eggelsmann 2019).

Der Standort Odertalsperre - Stöberhai wurde in einer Masterarbeit (Sünnemann 2022), die im Rahmen des EWAZ-Projektes durchgeführt wurde, im Hinblick auf eine Nutzung als Multifunktionsspeicher untersucht. Hier wurden die Untersuchungen zur Nutzung der Odertalsperre als Trinkwasserreservoir sowie die Ideen zur Nutzung als Pumpspeicherkraftwerk mit einem Oberbecken auf einem der Höhenzüge Stöberhai oder Jagdkopf als Basis verwendet.

4.4.2 Topografisches Profil

Jan Sünnemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

An der Odertalsperre wurden zwei Standorte untersucht, die sich potentiell als Oberbeckenstandort eignen würden, und zwar der Höhenzug Stöberhai und der Höhenzug Jagdkopf. Hierbei wurde der Standort Stöberhai auf Grund seiner größeren Fallhöhe ausgewählt.

Der Standort Stöberhai ermöglicht eine Fallhöhe von 317 m (siehe Abbildung 64), was gleichzeitig die größte Fallhöhe bei einer oberirdischen Variante im EWAZ-Projekt darstellt.

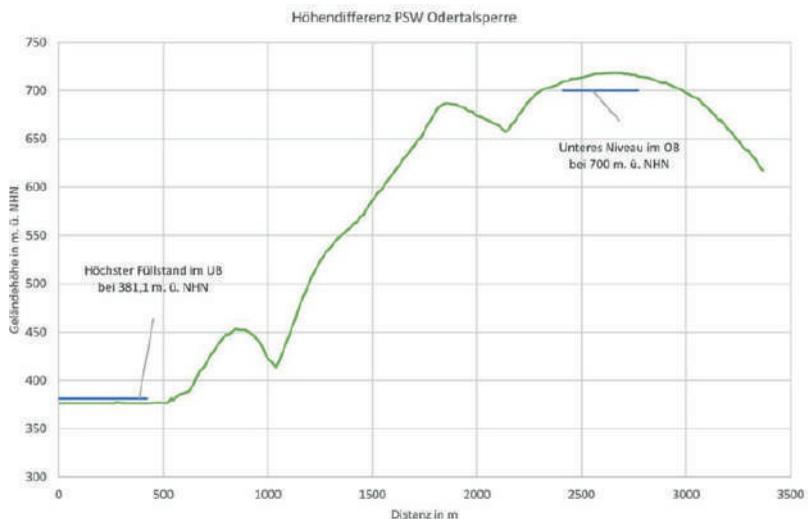


Abbildung 64: Topografische Profil Odertalsperre - Stöberhai

4.4.3 Speicherkapazität

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

In Abbildung 65 wird die Speicherinhaltslinie des Oberbeckens Stöberhai dargestellt. Das Becken hat in Volumen von 2,3 Mio. m³.

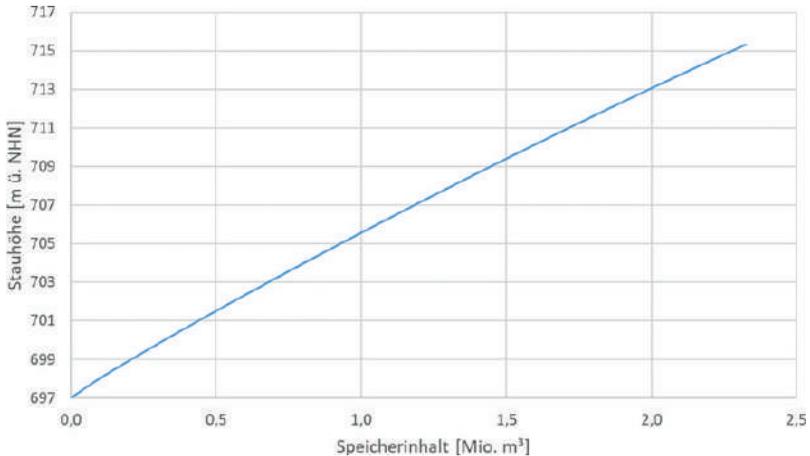


Abbildung 65: Speicherinhaltslinie Stöberhai

Abbildung 66 zeigt die Speicherinhaltslinie des Unterbeckens Herzbek, also des abgetrennten Bereiches innerhalb der Okertalsperre. Das maximale Volumen beträgt hier 2,55 Mio. m³ bei einem Vollstau von 381,10 m ü. NHN.

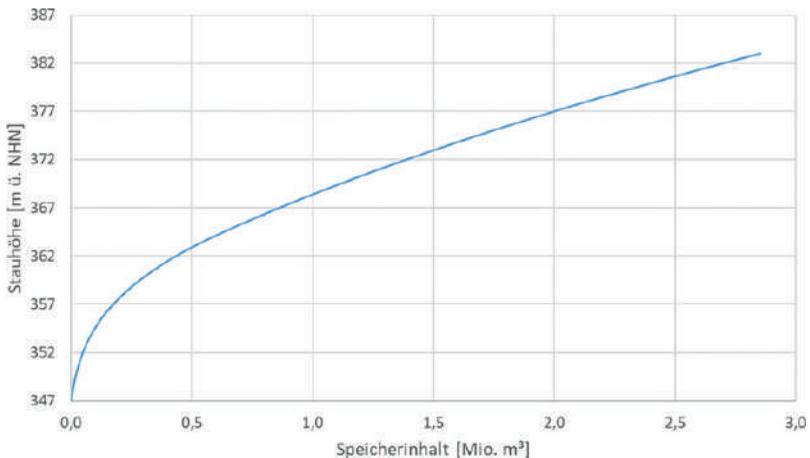


Abbildung 66: Speicherinhaltslinie Herzbek

Insgesamt wird das Standort-Volumen von 30,61 Mio. m³ auf 32,45 Mio. m³ gesteigert, wobei das Volumen des Hauptstauraumes von 30,61 Mio. m³ auf 27,65 Mio. m³ abfällt.

4.4.4 Bauliche Anpassungen

4.4.4.1 Bauwerke über Tage

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Maßnahme am Standort Odertalsperre - Stöberhai erfordert aus wasserbaulicher Sicht die Errichtung von zwei Dammbauwerken: einen Ringdamm auf dem Höhenzug Stöberhai und einen weiteren Damm zur Abtrennung von Odertalsperre und Herzbek.

Für den Ringdamm auf Stöberhai wurde ein benötigtes Dammvolumen von 411.508 m³ ermittelt. Der Damm hat eine Höhe 17 m, die Böschungsneigung liegt beseitig bei 1:1,6. Für die Umsetzung eines solches Bauwerks müsste der Höhenzug Stöberhai bis auf die Höhenlinie auf 700 m ü. NHN abgetragen werden. Das dabei abgetragene Material kann dann als Schüttmaterial für den Damm verwendet werden. Die detaillierte bauliche Gestaltung ist in kommenden Planungsphasen festzustellen.

Der Damm zur Abtrennung hat ein Volumen von 819.186 m³ bei einer Höhe von circa 36 m und einer Böschungsneigung von 1:1,6. Die detaillierte bauliche Gestaltung ist ebenfalls in weiteren Planungen detaillierter zu untersuchen.

4.4.4.2 Bauwerke unter Tage

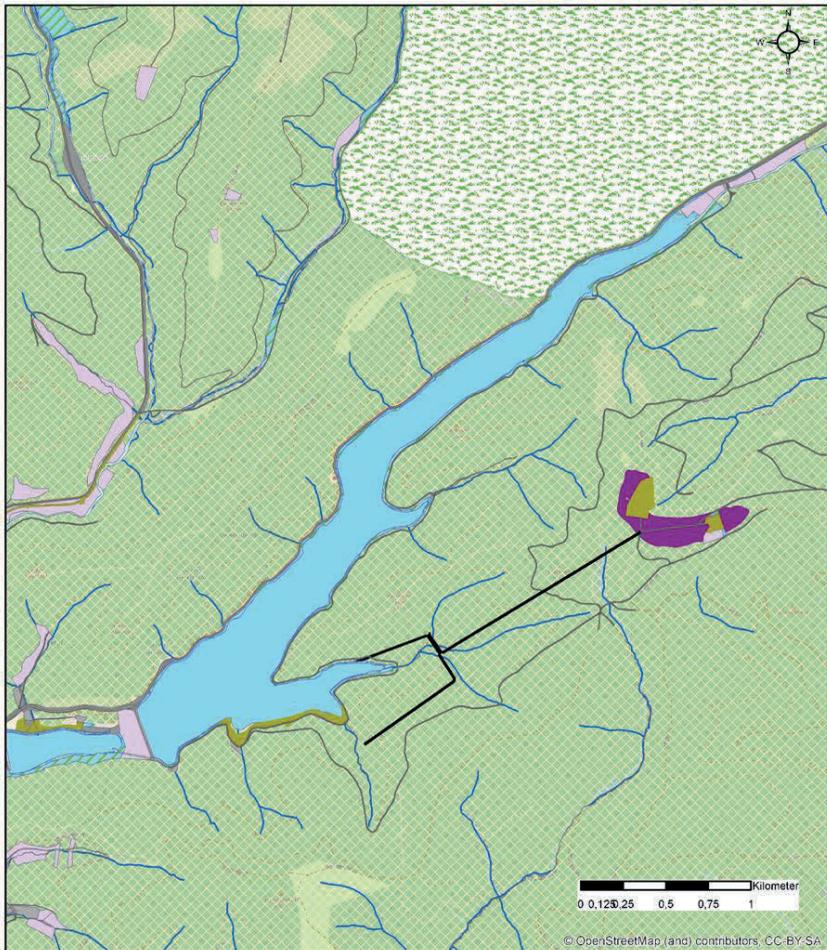
Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Für die Maßnahmen am Standort 3 wurden auch zwei Triebwasserstollen geplant, Ober- und Unterwasser, sowie ein Kraftwerk und die dazu gehörige Zufahrtstollen und ein Bewetterungsbohrloch. In Anbetracht der bekannten geologischen und geotechnischen Merkmale des Standorts kann vorgeschlagen werden, die Hohlräume nach der konventionellen Abbaumethode (Bohren und Sprengen) zu errichten. Angesichts der reduzierten Abstände zwischen den Speicherräumen und der Nähe zur Oberfläche im Vergleich zu den Maßnahmen 1, 2 und 4 bietet die Maßnahme 3 eine starke Alternative zum Bau eines PSW. Die geologischen und geotechnischen Merkmale müssen jedoch für diesen spezifischen Standort für einen zukünftigen Bau in Form einer Bohrkernentnahmekampagne bestätigt werden.

Die spezifischen Maße der unterirdischen Bauwerke sind in Tabelle 29 zusammengefasst, während die Abbildung 67 einen Überblick über den empfohlenen Standort für ein PSW und die zugehörigen Bauwerke gibt.

Tabelle 29: Maße der unterirdischen Infrastruktur

Triebwasserstollen – Länge m	Kavernen-Krafthaus – Maße [H x B x L] m	Zufahrtswege – Länge m
2.274	51 x 20 x 80	822
Schieber-Kavernen m ³	Trafo-Kaverne m ³	Bewetterungsbohrloch – Länge m
18.000	10.710	85



Legende

 AX_Gebaeude	 Nationalparke_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_SportFreizeitUndErholungsflaeche	 PSW_Oder
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25	 Talsperren

Abbildung 67: Überblick über die Maßnahme 3 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

4.4.5 Nutzung des Speicherraums

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Der Hauptstauraum der Odertalsperre soll in Zukunft, neben dem Hochwasserschutz und der Niedrigwasseraufhöhung, für die Trinkwasserspeicherung genutzt werden. Hierfür werden insgesamt 27,65 Mio. m³ zur Verfügung stehen. Für den PSW-Betrieb stehen insgesamt 4,85 Mio. m³ Stauraum zur Verfügung, aufgeteilt auf das Unterbecken Herzbeek und das Oberbecken Stöberhai. Abbildung 68 zeigt eine Skizze des Systems.

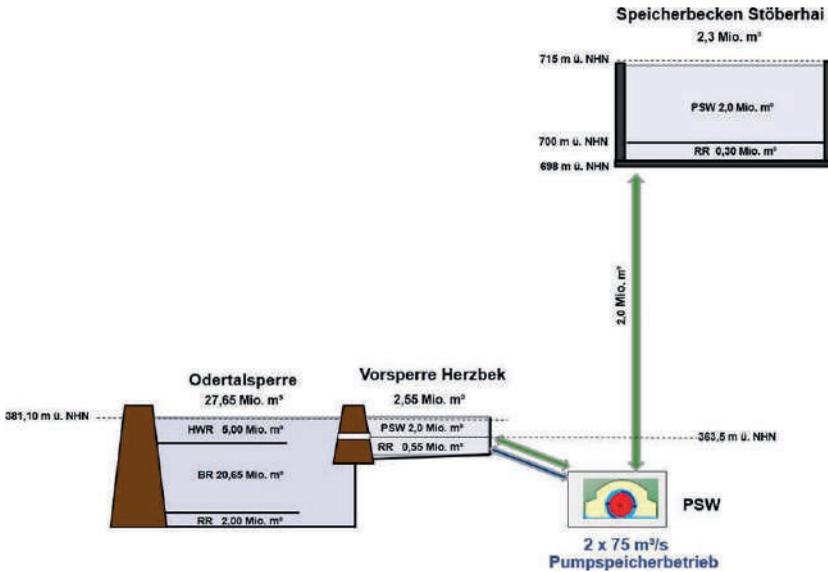


Abbildung 68: Systemskizze Standort 3

Insgesamt steigt das Standortvolumen von 30,61 Mio. m³ auf 32,45 Mio. m³ an. Die detaillierte Stauraumaufteilung findet sich im Anhang.

4.4.6 Nicht weiter betrachtete Varianten

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Am Standort 3 wurden im Hinblick auf die Errichtung eines PSW-Oberbeckens die Standorte Jagdkopf und Stöberhai in einer Vorauswahl miteinander verglichen. Der Standort Jagdkopf wurde auf Grund der niedrigeren Fallhöhe von nur 265 m (Stöberhai: 317 m) und der daraus resultierenden geringeren Leistung verworfen. Dieser Standort könnte relevant werden, wenn der Standort Stöberhai nicht realisiert werden kann.

4.5 Wassernutzung im Siebertal

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Maßnahme am Standort 4 Wassernutzung im Siebertal sieht vor, das letzte große ungenutzte Tal im Westharz ebenfalls wasserwirtschaftlich zu nutzen. Alle Systemdienstleistungen sollen am Standort etabliert werden. Hierzu ist geplant, eine Talsperre zwischen den Ortslagen Sieber und Herzberg zu errichten (siehe Abbildung 69).

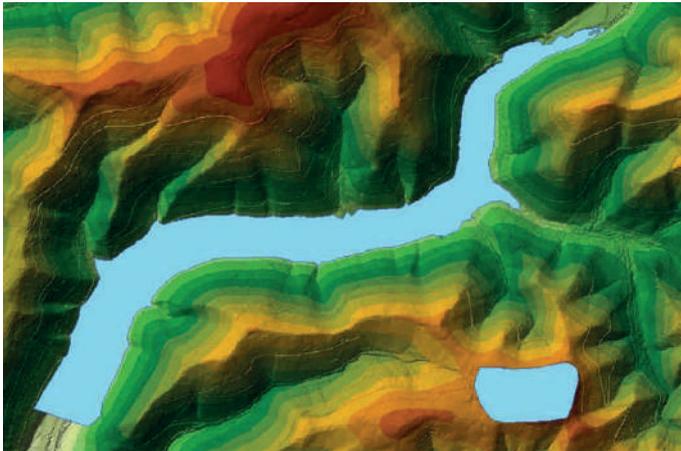


Abbildung 69: Siebertalsperre mit PSW-Oberbecken Knollenspeicher

Weiterhin könnte ein PSW entstehen, wobei die oberirdische Option für das Oberbecken auf dem Knollen liegt (Abbildung 69). Das Wasser für die Trinkwassergewinnung soll oberhalb der Ortschaft Sieber beim Zusammenfluss von Lonau und Sieber mittels eines Ableitungswehrs abgezogen werden und optional auf die Aufbereitungsstandorte Grane- oder Sösetalsperre verteilt werden. Diese Maßnahme kann aber auch unabhängig vom Bau einer Talsperre umgesetzt werden.

4.5.1 Datenbasis

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Der Grund, weshalb das Siebertal bislang nicht wasserwirtschaftlich genutzt wurde, liegt in den vielen Raumwiderständen (Naturschutzgebiete, Nationalpark, Anwohner). Die Idee einer wasserwirtschaftlichen Nutzung existiert bereits seit 1930er Jahren in verschiedenen Ansätzen, zusammenfassend werden sie von Martin Schmidt in „Das Sieberwasser-Problem – Notwendigkeit und Möglichkeiten seiner Lösung“ (Schmidt 1979) dargestellt. Die Notwendigkeit für eine Speicherung von Wasser im Siebertal beschreibt

Schmidt wie folgt: „Das Siebertal ist ein sehr niederschlagsreiches Tal mit einer hohen Hochwasserdichte und zugleich in Trockenzeiten mit besonders niedrigen Abflüssen.“ Die von ihm aufgezeigten Lösungsmöglichkeiten, die für den Hochwasserschutz und die Niedrigwasseraufhöhung als notwendig angesehen werden, sind nachfolgend dargestellt.

Schmidt beschreibt drei Lösungsalternativen, wovon zwei Alternativen den gesamten Speicherraum direkt im Siebertal vorsehen. Die dritte Alternative sieht vor, Wasser in andere Einzugsgebiete überzuleiten und die dort vorhandenen Speicher zu nutzen. In diesem Fall würde nur ein kleiner Speicherraum in Siebertal notwendig werden. Alle Maßnahmen hätten gemeinsam, dass die Trinkwasseraufbereitung nicht am Standort „Siebertal“, sondern entweder an der Sösetalsperre oder der Granetalsperre stattfinden würden, wo bereits zum damaligen Zeitpunkt Trinkwasseraufbereitungsanlagen vorhanden waren.

Die erste Lösung stellt die sogenannte „kleine“ oder auch „Zwei-Schritt-Lösung“ dar. Diese sieht einen Bau von zwei Talsperren, eine oberhalb und eine unterhalb der Ortschaft Sieber, vor. Die obere Siebertalsperre würde mit einem 90 m hohen Damm errichtet werden. Hierbei würde je ein Stollen zur Oker- und zur Sösetalsperre zur Trinkwasserüberleitung errichtet werden. Weiterhin würde die untere Siebertalsperre oberhalb Herzbergs mit einem 47 m hohen Damm errichtet werden.

Die große Lösung sieht einen 97 m hohen Staudamm am Standort der unteren Siebertalsperre vor. Es könnten 93 Mio. m³ Stauraum zur Verfügung gestellt werden. Eine Umsiedlung der Ortslage Sieber würde nötig werden, was zu hohen Wiederständen führen würde. Eine Überleitung von Trinkwasser würde hierbei über einen 22 km langen Stollen in die Söse- bzw. Okertalsperre realisiert werden.

Die letzte Lösung wird als „Mehrschritt-Lösung“ bezeichnet. Hierbei soll ein Großteil des Stauraumes nicht im Siebertal, sondern im Nordharz durch eine Erhöhung der Granetalsperre geschaffen werden. Schritt 1 wäre der Bau von zwei Stollen (Königsberg- und Ackerstollen; 1 km und 7 km) sowie kleine Ableitungssperren im Sieber- und Kulmketal. Die Stollen sollen auf Abflüsse von 30 m³/s ausgelegt sein und das Wasser der Sieber zur Sösetalsperre leiten. Der nächste Arbeitsschritt wäre der Bau eines Nordstollens von der Söse- zur Granetalsperre. In diesem Arbeitsschritt ist ebenfalls die Erhöhung der Granetalsperre um 15 m bzw. die Erweiterung um 40 Mio. m³ vorgesehen. Der letzte Arbeitsschritt wäre der Bau der unteren Siebertalsperre, wie in Lösungsvariante 1.

Es werden also drei verschiedene Herangehensweisen an die wasserwirtschaftliche Nutzung vorgeschlagen. Die Mehrschritt-Lösung wird innerhalb des EWAZ-Projektes als Basis für weitere Untersuchungen verwendet. Sie eignet sich auf Grund der Trennung von Trinkwassergewinnung und dem restlichen Betrieb im Rahmen des Konflikts von Pumpspeicherung und Trinkwassergewinnung als Lösungsansatz

4.5.2 Topografisches Profil

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Das Siebertal wurde topografisch zunächst im Hinblick auf die Errichtung der Talsperre untersucht. Hierbei wurde der Standort der ursprünglich geplanten unteren Siebertal-sperre zwischen den Ortslagen Herzberg und Sieber im digitalen Geländemodell auf die Tauglichkeit geprüft (siehe Abbildung 70).

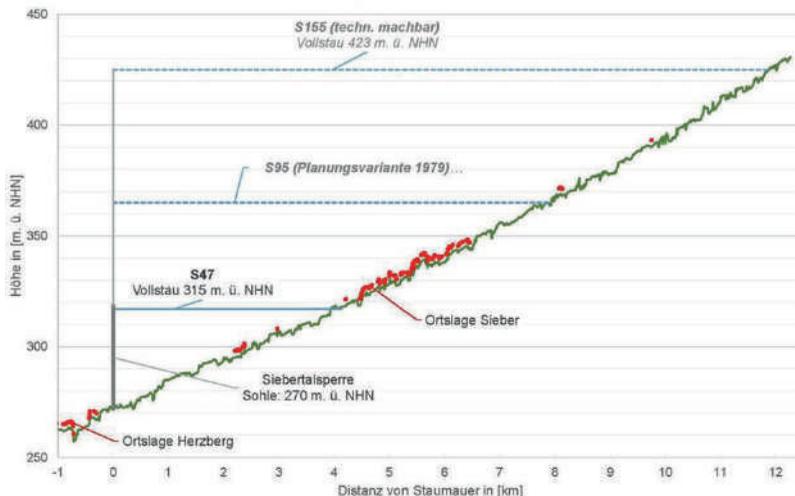


Abbildung 70: Höhenprofil entlang des Siebertals

Abbildung 70 zeigt neben der Variante S47 ebenfalls zwei weitere Varianten, welche auf Grund des Überstaus der Ortslage Sieber verworfen wurden. Die Variante S47 erfüllt das Kriterium, dass der Vollstau 2 m unterhalb der Ortslage Sieber liegen muss. Bei der Variante S155 würde die höchste deutsche Talsperre entstehen. Die im Ostharz gelegene Rappbodetal-sperre ist mit 106 m die bisher höchste deutsche Talsperre, dicht gefolgt von Leibis-Lichte mit 102,5 m in Thüringen. Beide Talsperren verfügen als Absperrbauwerk über eine Gewichtsstaumauer aus Beton.

Weiterhin wurde das Siebertal im Hinblick auf die Eignung als PSW-Standort betrachtet. Der Standort Knollen bietet hierbei die beste Option zur Errichtung eines oberirdischen Oberbeckens (siehe Abbildung 71).

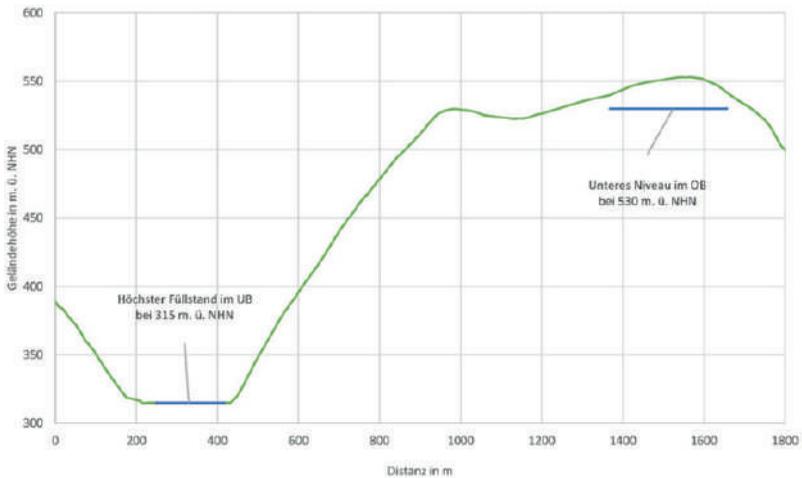


Abbildung 71: Höhenprofil PSW Siebertal

Die potentielle Fallhöhe am Standort 4 für ein oberirisches PSW beträgt 215 m. Das untere Niveau des Oberbeckens würde hierbei auf der 530 m ü. NHN Höhenlinie liegen. Die Entfernung der Becken liegt im Minimum bei circa 1 km. Der Standort eignet sich somit als PSW.

4.5.3 Speicherkapazität

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Speicherkapazität der Variante S47 wird in Abbildung 72 in Form der Speicherinhaltslinie dargestellt.

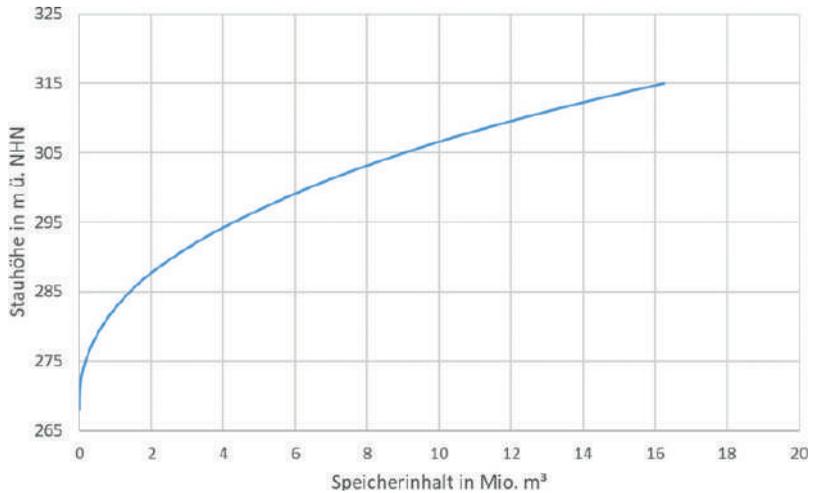


Abbildung 72: Speicherinhaltslinie Siebertalsperre (S47)

Die Siebertalsperre hat ein maximales Speichervolumen von circa 16 Mio. m³, wobei der Vollstau auf 315 m ü. NHN liegt.

Neben der Siebertalsperre wurde ebenfalls die Speicherkapazität des PSW-Oberbeckens auf dem Knollen ermittelt (siehe Abbildung 73).

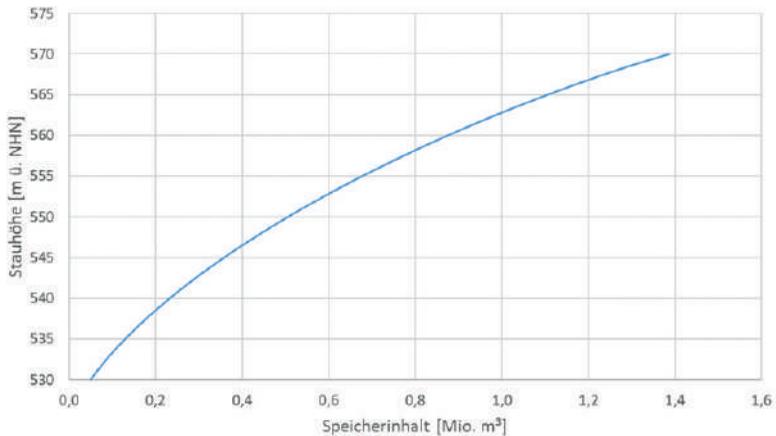


Abbildung 73: Speicherinhaltslinie Knollenspeicher

Das Oberbecken erreicht ein maximales Stauvolumen von 1,38 Mio. m³ bei einer maximalen Stauhöhe auf 569 m ü. NHN.

4.5.4 Bauliche Maßnahmen

4.5.4.1 Bauwerke über Tage

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Im ersten Schritt steht die Errichtung der Siebertalsperre. Um 16 Mio. m³ Stauraum zur Verfügung stellen zu können, muss ein Damm mit einer Höhe von 47 m errichtet werden. Dieser Damm hat ein Volumen von 942.000 m³, wobei die Krone auf 317 m ü. NHN liegt. Die Böschung wurde beidseitig mit 1:1,6 angesetzt.

Der Damm für das PSW-Oberbecken auf dem Knollen hat eine Höhe von circa 40 m und ebenfalls Böschungsneigungen von 1:1,6. Die Krone liegt auf 570 m ü. NHN. Das Dammvolumen beträgt hier 928.616 m³. Der Berg würde hier bis auf eine Höhe von 530 m ü. NHN abgetragen werden, wobei der Abtrag als Schüttmaterial für den Damm verwendet werden kann. Zusätzlich muss ein Wehr zur Ableitung für die Trinkwassergewinnung oberhalb der Ortschaft Sieber beim Zusammenfluss von Sieber und Lonau errichtet werden. Es wird empfohlen, dieses ähnlich dem Wehr der Gose-Ableitung zu gestalten.

4.5.4.2 Bauwerke unter Tage

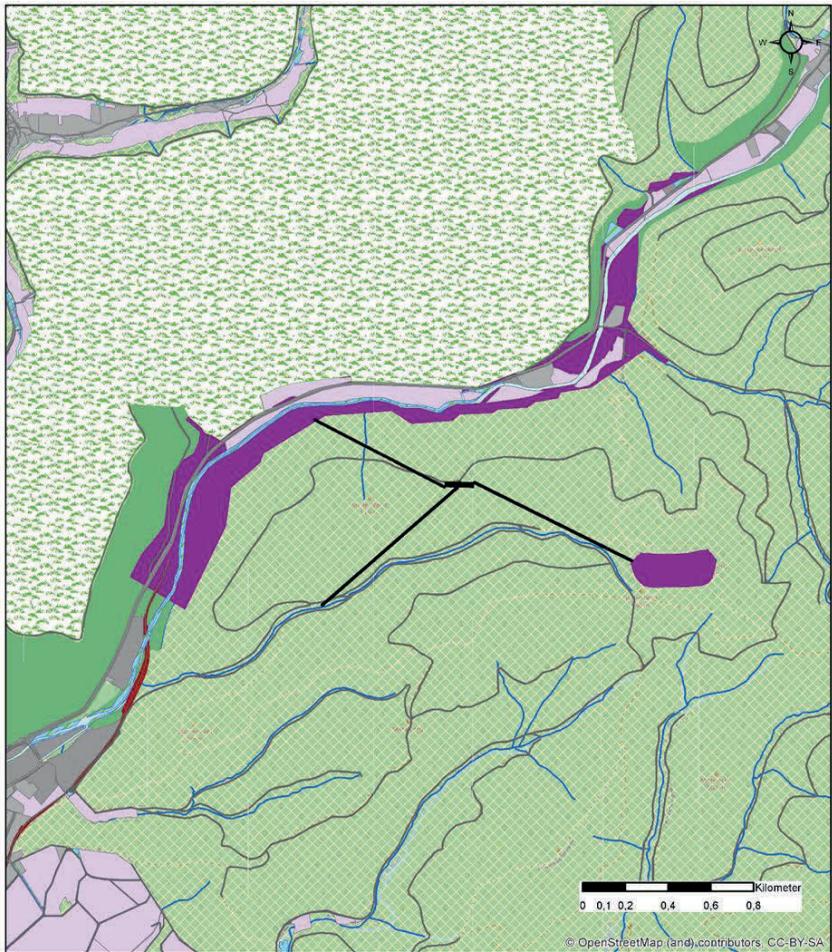
Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Für die Maßnahme 4 wurde der Bau eines PSW zwischen der neu zu errichtenden Siebertalsperre und dem Oberbecken Knollen berücksichtigt. Hierzu wurden auch zwei Triebwasserstollen geplant, Ober- und Unterwasser, sowie ein Kraftwerk und die dazu gehörige Zufahrtstollen und ein Bewetterungsbohrloch. In Anbetracht der bekannten geologischen und geotechnischen Merkmale des Standorts kann hier ebenso vorgeschlagen werden, die Hohlräume nach der konventionellen Abbaumethode (Bohren und Sprengen) zu errichten. Die geologischen und geotechnischen Merkmale müssen jedoch für diesen spezifischen Standort für einen zukünftigen Bau in Form einer Bohrkernentnahmekampagne bestätigt werden.

Die spezifischen Maße der unterirdischen Bauwerke sind in Tabelle 30 zusammengefasst, während die Abbildung 74 einen Überblick über den empfohlenen Standort für ein PSW und die zugehörigen Bauwerke gibt.

Tabelle 30: Maße der unterirdischen Infrastruktur

Triebwasserstollen – Länge m	Kavernen-Krafthaus – Maße [H x B x L] m	Zufahrtswege – Länge m
1.542	51 x 20 x 55	845
Schieber-Kavernen m ³	Trafo-Kaverne m ³	Bewetterungsbohrloch – Länge m
18.000	7.395	175



Legende

- | | |
|---|--|
|  AX_Gebaeude |  Naturschutzgebiete_DTK25 |
|  AX_Landwirtschaft |  PSW_Sieber |
|  AX_Strassenverkehr |  Speicherbecken_EWAZ |
|  Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25 |  Talsperren |
|  Nationalparke_DTK25 | |

Abbildung 74: Überblick über die Maßnahme 4 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

4.5.5 Nutzung des Speicherraums

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Siebertalsperre soll für Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung und Energiespeicherung genutzt werden. Für diese Nutzungen steht ein Stauvolumen von rund 16 Mio. m³ zur Verfügung. 9,9 Mio. m³ sind als Betriebsraum angedacht. Für den Hochwasserrückhalteraum werden 15 %, also 2,4 Mio. m³, des Gesamtstauraums veranschlagt. Der

Reserveraum wird ebenfalls mit 2,4 Mio. m³ angesetzt. Die Trinkwassergewinnung erfolgt, wie bereits erwähnt, über ein Ableitungswehr, hierbei wird eine Menge x über einem noch zu bestimmenden Mindestabfluss abgezogen. Für die Energiespeicherung sind sowohl im Knollenspeicher als auch in der Siebertalsperre 1,3 Mio. m³ angesetzt. Abbildung 75 zeigt die Systemskizze des Standorts 4.

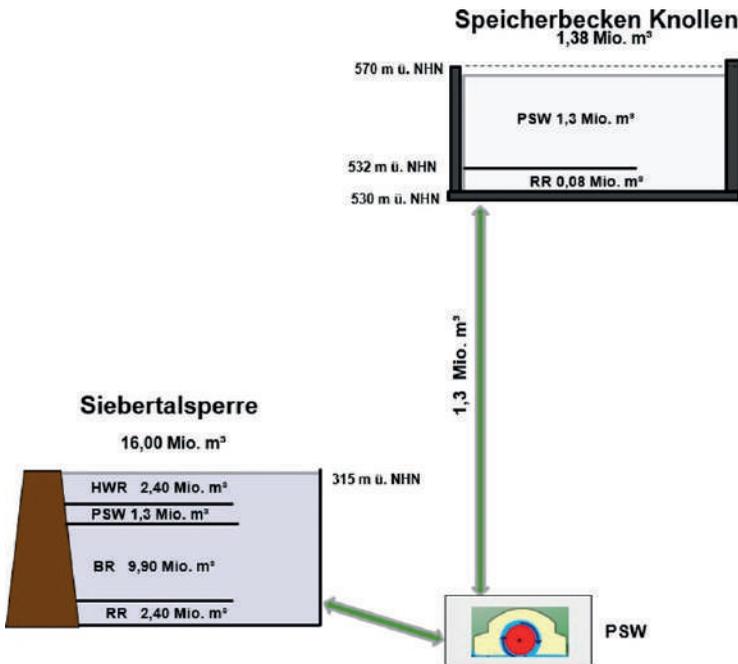


Abbildung 75: Systemskizze Standort 4

Eine tabellarische Darstellung der Stauraumaufteilung findet sich im Anhang.

4.5.6 Nicht weiter betrachtete Varianten

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Sandra Nowosad, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld; TU Clausthal

Am Standort 4 wurden mehrere Möglichkeiten, eine Talsperre zu errichten, untersucht. Die Varianten unterscheiden sich insbesondere in der Höhe des Staubauwerks. In Abbildung 76 werden die Varianten S95 und S155 neben der ausgewählten Variante S47 dargestellt.

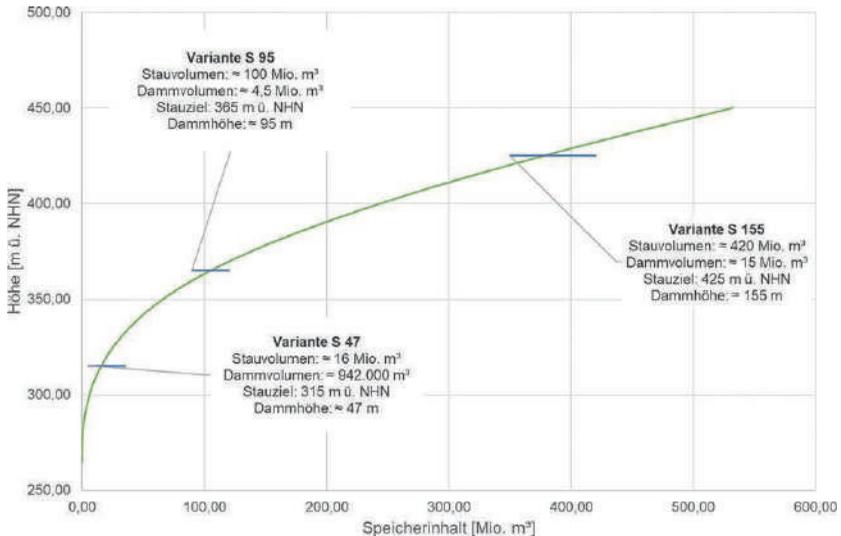


Abbildung 76: Speicherinhaltslinie der Varianten für eine Siebertalsperre

Die Variante S95 ergab sich aus alten Planungsansätzen zur Siebertalsperre, die Variante S155 ist ein technisches Maximum bei einer Ausnutzung des gesamten Tals. Beide Varianten wurden verworfen, da die Ortschaft Sieber überstaut werden würde. Auf Grund der großen Höhen der Bauwerke sind auch größere bodenmechanische Probleme zu erwarten.

Auch die Option eines Anschlusses des neu zu errichtenden Staudamms an ein unterirdisches Reservoir im Bergzug Langsfast wurde aus wirtschaftlichen Gründen nicht verfolgt. Die Maßnahme erfordert bereits durch den Bau des Staudamms einen hohen Investitionsumfang, der durch ein eigenes unterirdisches Reservoir noch gesteigert würde.

4.6 Erhöhung der Granetalsperre

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Die Erhöhung der Granetalsperre um bis zu 15 m dient in erster Linie der Sicherstellung der Trinkwassergewinnung in der Zukunft. Das Volumen des Standortes kann durch eine solche Erhöhung des Staudammes fast verdoppelt werden. Somit stehen bis zu 41 Mio. m³ mehr an Speicherraum zur Verfügung. Abbildung 77 zeigt die angepasste Stauffläche bei einer Erhöhung um die maximale Höhe von 15 m. Durch die steilen Hanglagen vergrößert sich die überstaute Fläche nicht proportional zum Stauvolumen, sondern bleibt moderat.

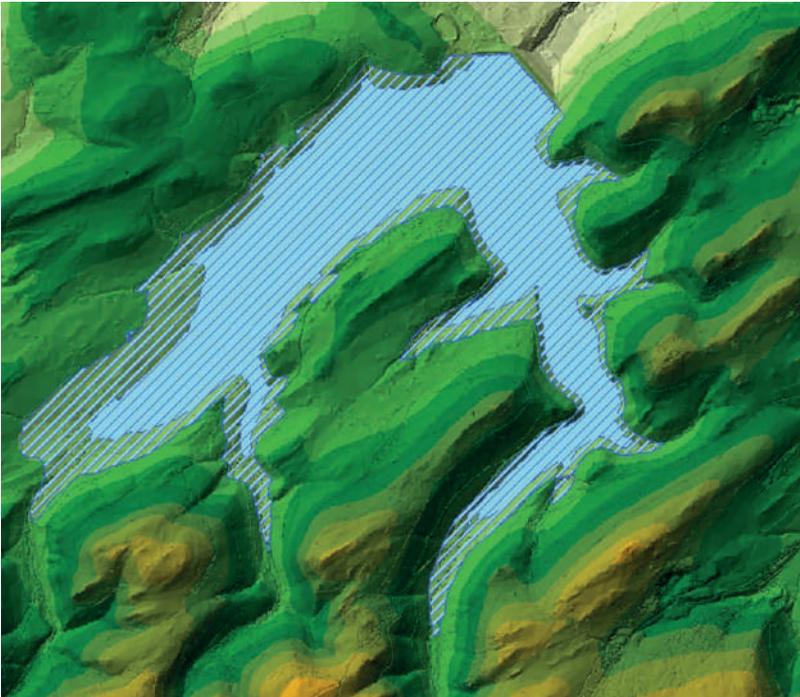


Abbildung 77: Stauraum der Granetalsperre bei einer Erhöhung um 15 m

4.6.1 Datenbasis

Die Unterlagen zu den Planungen im Siebertal enthalten, wie oben erwähnt, den Aspekt der Erhöhung der Granetalsperre im Rahmen der Verbindung von Nord- und Südharz. Die Erhöhung um 15 m wird hierbei insbesondere geprüft.

4.6.2 Topografisches Profil

Eine topografische Analyse wurde nur hinsichtlich der Vergrößerung des Stauraumes vorgenommen. Der Standort bietet die topografischen Möglichkeiten zur Vergrößerung des Stauraumes bei einer Erhöhung von bis zu 15 m.

4.6.3 Speicherkapazität

Die Speicherkapazität wird in Form der Speicherinhaltslinie in Abbildung 78 dargestellt.

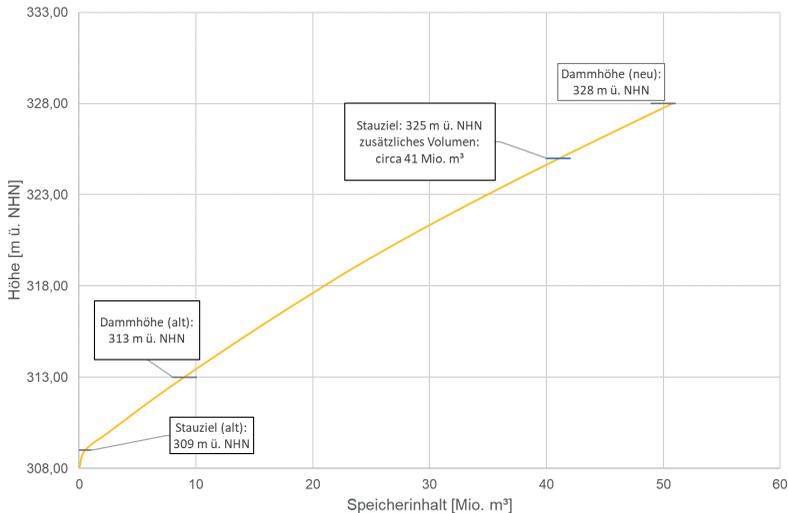


Abbildung 78: Speicherinhaltslinie Standort 5

Es wird nur das hinzugewinnbare Volumen bei einer Erhöhung der Granetalsperre dargestellt. Weiterhin zeigt die Speicherinhaltslinie auf, dass das Speichervolumen einem linearen Trend folgt. Beispielsweise könnte, bei einer Nicht-Auslastung der vollen Erhöhung oder Widerständen aus räumlichen Gründen, ebenso eine Erhöhung in kleinerem Umfang stattfinden. Bei einer Erhöhung um die Hälfte des Maximums, also einer Erhöhung von circa 7,5 m, könnten immer noch zusätzliche 20 Mio. m³ an zusätzlichem Stauraum zur Verfügung gestellt werden.

4.6.4 Bauliche Anpassungen

Die Erhöhung der Granetalsperre wird mit einer landseitigen Aufschüttung des Dammbauwerks durchgeführt. Das Dammvolumen der Granetalsperre wird durch die Erhöhung

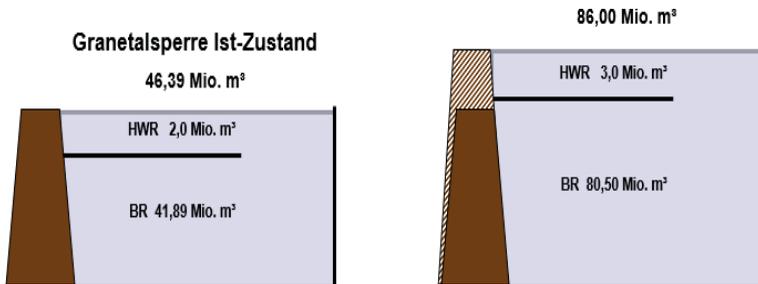


Abbildung 80: Systemskizze Standort 5

Die Größe des Betriebsraumes wird von 41,89 Mio. m³ auf 80,5 Mio. m³ erhöht. Der Hochwasserrückhalteraum wird von 2 Mio. m³ auf 3 Mio. m³ vergrößert. Die detaillierte Aufteilung findet sich im Anhang.

4.7 Hochwasserschutz für Goslar

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Der Standort 6 ist gesondert zu betrachten, da hier weder Energie- noch Wasserspeicher bereitgestellt werden. An diesem Standort geht es nur um die Systemdienstleistung Hochwasserschutz. Angesichts des Hochwassers 2017 und der damit verbundenen starken Auswirkungen auf die Stadt Goslar, wurden zwei Lösungsvarianten erarbeitet. Variante 6.1 stellt hierbei die Ertüchtigung des Oker-Grane-Stollens (OGS) dar. In dieser Variante werden die Gose-Einleitung und der Oker-Grane-Stollen soweit ertüchtigt, dass sie ein HQ₁₀₀ in Richtung Granetalsperre abführen können. Variante 6.2 ist ein Hochwasserrückhaltebecken im Bereich der Gose-Einleitung, mit dem die Hochwasserwelle soweit reduziert wird, dass eine Ableitung über Gose und Oker-Grane-Stollen ohne Aufweitung möglich wäre.

4.7.1 Datenbasis

Insbesondere seit dem Hochwasserereignis im Jahr 2017 gibt es Überlegungen, wie die Stadt Goslar bzw. das Harzvorland vor Hochwasserereignissen geschützt werden können. In einem Vortrag von Dr. Christoph Donner der Harzwasserwerke GmbH aus dem Jahr (Donner 2018) werden die Anpassung des Oker-Grane-Stollens im Bereich der Gose- und Abzucht-Einleitung sowie eine Aufweitung des Stollens unter anderem als Lösung genannt. Auch ein Hochwasserrückhaltebecken und eine Nutzung des Herzberger Teiches als solches wurden in Erwägung gezogen. Die Nutzung des Herzberger Teiches als Hochwasserrückhaltebecken wurde separat durch die Stadt Goslar geprüft, aus

diesem Grund ist keine weitere Betrachtung der Abzucht und des Herzberger Teiches innerhalb dieses Projektes erfolgt.

4.7.2 Variante 6.1: Aufweitung des Oker-Grane-Stollens

Variante 6.1 ist, wie beschrieben, die Stollenaufweitung des Oker-Grane-Stollens (siehe Abbildung 81). Hierbei wird das Stück ab der Gose-Einleitung so ertüchtigt, dass $32 \text{ m}^3/\text{s}$ anstatt den bisher möglichen $16 \text{ m}^3/\text{s}$ abgeleitet werden können. Somit wird es ermöglicht, HQ₁₀₀-Abflussspitzen von der Gose in Richtung der Granetalsperre abzuleiten. Diese Variante wurde innerhalb des EWAZ-Projektes diskutiert und durch die Mitteldeutsche MONTAN GmbH, in einer Mini-Studie separat durch die Harzwasserwerke beauftragt, weitergehend untersucht.

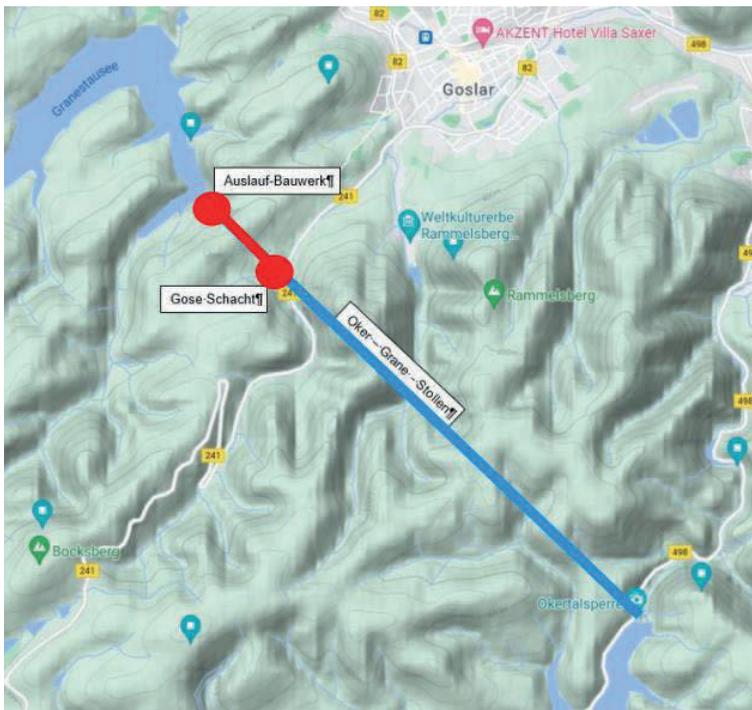


Abbildung 81: Aufweitung OGS (Schettler 2021)

Der OGS würde in dieser Variante auf einer Länge von ca. 1700 m ab dem Gose-Schacht von 3,15 m im Durchmesser auf 3,75 m erweitert werden (siehe Abbildung 82) (Schettler 2021). Dies entspricht einer Querschnittsvergrößerung von rund 40 %.

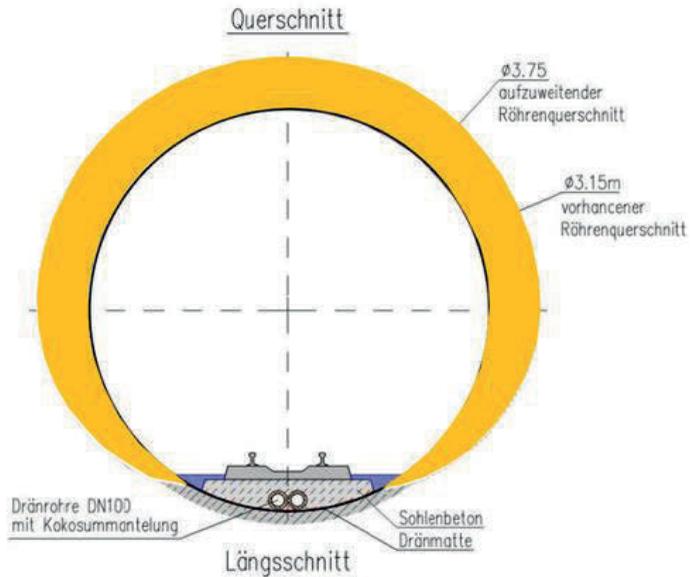


Abbildung 82: Längsschnitt Erweiterung OGS (Schettler 2021)

Weiterhin würde der Gose-Schacht auf eine Tiefe von rund 30 m erweitert werden, wobei der Durchlass von 1,50 m auf 2,90 vergrößert werden würde (Schettler 2021).

Weitere Details sind der „Machbarkeitsstudie und Technologiekonzept Erweiterung des Oker-Grane-Stollens und Goseschachtes“ (Schettler 2021) zu entnehmen.

4.7.3 Variante 6.2: Hochwasserrückhaltebecken

Variante 6.2 sieht ein Hochwasserrückhaltebecken im Bereich des Goseschachtes vor (siehe Abbildung 83). Das Becken hat ein Volumen von rund 118.000 m³, welches es ermöglicht, ein HQ₁₀₀ zurückzuhalten. Der Damm hat eine Höhe von 15 m und ein Volumen von 24.052 m³.

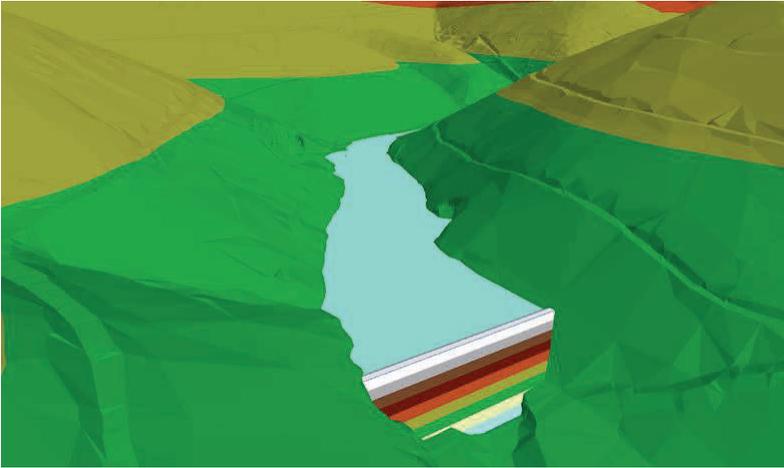


Abbildung 83: Hochwasserrückhaltebecken im Gosetal

Abbildung 84 zeigt den Speicherverlauf eines typischen HQ_{100} -Ereignisses am Standort 6 in Form einer Speicherinhaltsganglinie auf.

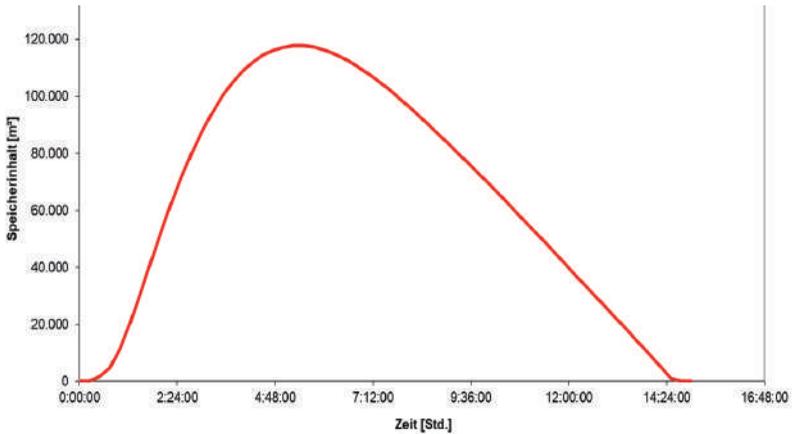


Abbildung 84: Speicherinhaltsganglinie Standort 6

Bei Anlage eines solchen Dammbauwerkes würde die Verbindungsstraße zwischen Goslar und Clausthal-Zellerfeld unterbrochen werden. Die Verlegung der Straße um das Bauwerk herum wäre wiederum durch die steilen Hänge aufwändig und teuer. Da Clausthal-Zellerfeld aber auch auf mehreren anderen Straßen erreichbar bleibt, wurde eine kurzzeitige Unterbrechung der Verbindung als weniger problematisch angesehen. So ist die Idee eines durchfahrbaren Dammbauwerkes entstanden, bei dem der Straßendurchlass

im Einstaufall mit entsprechend druckwasserdichten Toren verschlossen werden kann. Ein solches Bauwerk wurde am Standort Niederpöbel in Sachsen unter Leitung der dortigen Landestalsperrenverwaltung errichtet (siehe Abbildung 85).

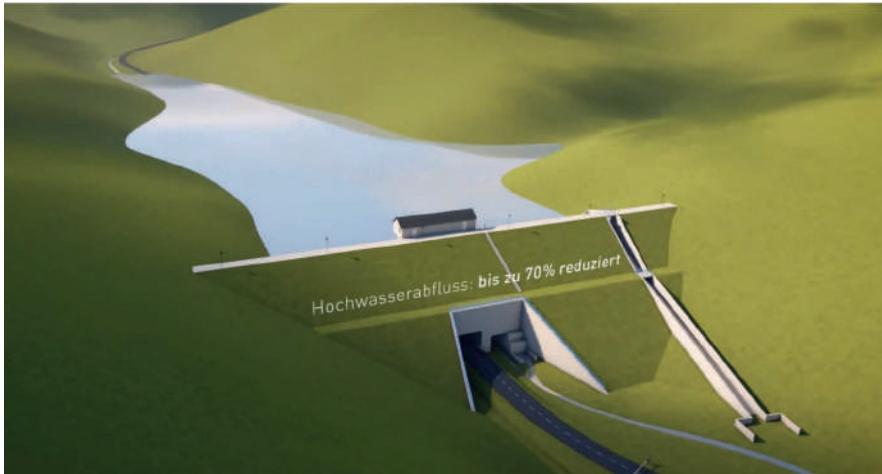


Abbildung 85: Hochwasserrückhaltebecken Niederpöbel (LTV Sachsen 2020), Ausschnitt aus einer Animation der Funktion dieses Beckens

Im weiteren Vorgehen müsste anhand von geo- und bautechnischen Untersuchungen geprüft werden, ob sich der Standort im Gosetal für ein solches Bauwerk eignet.

Beide Varianten ermöglichen einen Schutz vor einem HQ₁₀₀-Ereignis. Eine Entscheidung obliegt der Stadt Goslar und kann erst im Rahmen von weiteren Folgeuntersuchungen und einer detaillierten Machbarkeitsprüfung erfolgen.

4.8 Überleitungssystem

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Neben der Betrachtung der Einzelstandorte wurde der Westharz als System betrachtet. Bei dieser Betrachtung spielt insbesondere die Überleitung von Rohwasser für die Trinkwassergewinnung eine zentrale Rolle. Diese Überleitung findet bereits ausgehend von Innerste- und Okertalsperre hin zur Granetalsperre statt. Im Rahmen des Projektes wurden die einzelnen Standorte im Hinblick auf mögliche weitere Überleitungen von Rohwasser geprüft. Dies erfolgt insbesondere vor dem Hintergrund, die Trinkwasseraufbereitung auf wenige Standorten zu konzentrieren. Alternativ kann in zukünftigen Planungsschritten auch eine stärker dezentral arbeitende Trinkwasseraufbereitung geprüft werden. Der Vorteil der Überleitungen liegt darin, dass der Stauraum an der Granetalsperre

vergleichsweise einfach vergrößert werden kann. Dieser vergrößerte Stauraum könnte jedoch durch die natürlichen Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Grane nicht sinnvoll ausgenutzt werden. Mit der zentralen Trinkwasseraufbereitung an der Granetalsperre können Synergien genutzt und auf verschiedene Situationen im Einzugsgebiet flexibel reagiert werden, bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit.

Die Überleitung bzw. Umleitung von Hochwasser an einen anderen Standort wurde aus Kosten-Nutzen-Gründen ausgeschlossen. In einem solchen Fall müssten die Stollen sehr große Abmessungen haben, würden aber nur wenige Tage im Jahr und auch dann nur zu einem geringen Anteil ausgenutzt werden. Ein kleinerer Stollen, der nur für häufige Hochwasser ausgelegt ist, würde keinen wesentlichen Beitrag zur Entlastung bringen.

Abbildung 86 zeigt die verschiedenen Überleitungsvarianten mit ihren Einzelüberleitungen.

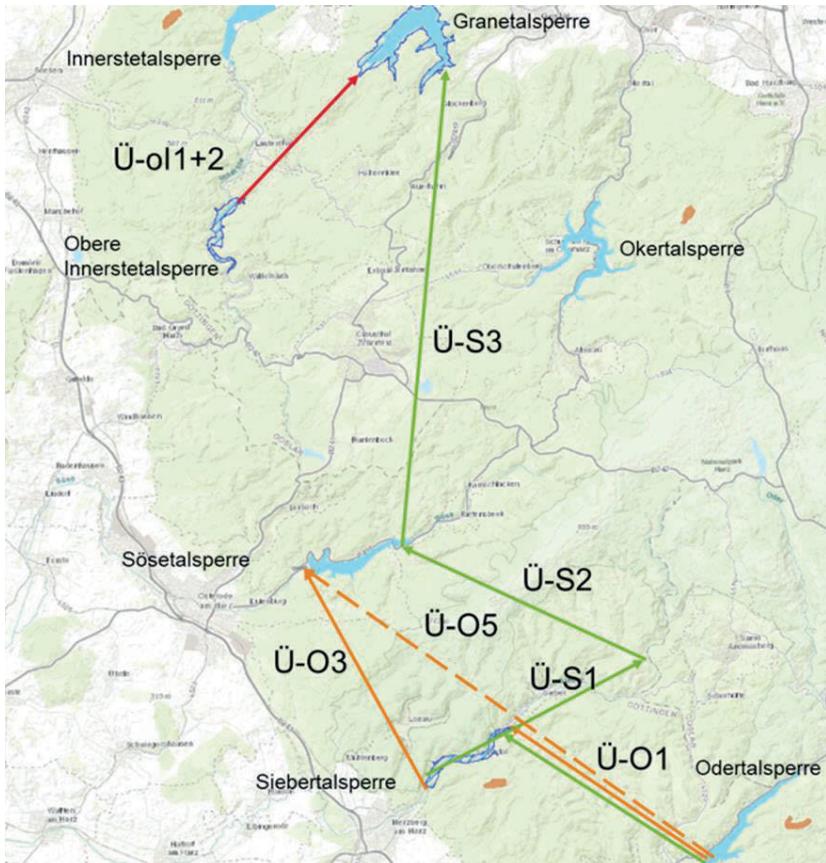


Abbildung 86: Überleitungsvarianten

Zusammenfassend lassen sich drei übergeordnete Überleitungsvarianten darstellen. Sofern nicht angegeben wird, dass die Abflüsse gepumpt werden müssen, kann die Ableitung über die Schwerkraft in der Regel im Freispiegelgefälle erfolgen.

Variante 1-1 stellt die Überleitung von der Odertalsperre zur Siebertalsperre (Ü-O1) sowie die Überleitung von der Siebertalsperre zur Sösetalsperre (Ü-O3) dar. In diesem Szenario gibt es keine Verbindung von Nord- und Südharz. Die Trinkwasseraufbereitung erfolgt dann an der Sösetalsperre.

Variante 1-2 stellt die Überleitung von Odertalsperre direkt zur Sösetalsperre dar. In diesem Szenario gibt es keine Siebertalsperre und keine Nord-Süd-Verbindung. Auch hier erfolgt die Trinkwasseraufbereitung an der Sösetalsperre.

Variante 2 umfasst ebenfalls die Überleitung von Oder- zur Siebertalsperre. Von dort aus wird das Wasser flussaufwärts zu einem Ableitungswehr gepumpt (Ü-S1). Vom Ableitungswehr wird das Wasser zur Sösetalsperre übergeleitet (Ü-S2). Dieses Szenario beinhaltet eine Nord-Süd-Verbindung von der Sösetalsperre zur Granetalsperre (Ü-S3). Die Trinkwasseraufbereitung kann an Söse und Granetalsperre erfolgen.

Variante 3 beinhaltet die Überleitung von oberer Innerstetalsperre zur Granetalsperre als Ersatz zur bestehenden Überleitung. Die bestehende Überleitung, bei der das Wasser zur Granetalsperre gepumpt werden muss, kann für besondere Situationen erhalten werden.

Die Einzelüberleitungsoptionen werden in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Einzelüberleitungen

Maßnahme	Von	Nach	Länge km	Gefälle ‰
Ü-O1	Odertalsperre Grundablass	Siebertalsperre Stauwurzel	7,5 km	1,9
Ü-O2	Odertalsperre Grundablass	Siebertalsperre Grundablass	11 km	4,9
Ü-O3	Siebertalsperre Grundablass	Sösetalsperre Unterstaubecken	8,5 km	0,35
Ü-O4	Siebertalsperre Grundablass	Sösetalsperre (Level-Vollstau)	8 km	-6,1
Ü-O5	Odertalsperre	Sösetalsperre (Unterbecken)	19,5 km	2,9
Ü-S1	Siebertalsperre Grundablass	Ableitungssperre Sieber	9 km	-15
Ü-S2	Ableitungssperre Sieber	Sösetalsperre Vorstaubecken	9 km	8,8
Ü-S3	Sösetalsperre Vorstaubecken	Granetalsperre (Oker-Grane-Stollen)	16 km	1,4 (0,5 m nach Erhöhung)
Ü-o11	Obere Innerstetalsperre Grundablass	Granetalsperre Vollstau (Stauziel nach Erhöhung)	7 km	2,2 (0,8 m nach Erhöhung)

Die Abbildungen 87 bis 89 zeigen die Ermittlung der Längen zwischen den Standorten, die dazugehörigen Gefälle sowie die jeweilige Überdeckung.

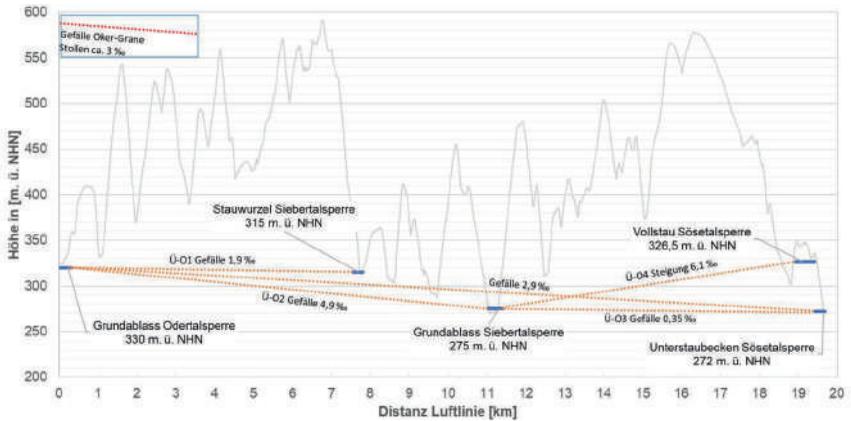


Abbildung 87: Wasserverteilung ausgehend von der Odertalsperre

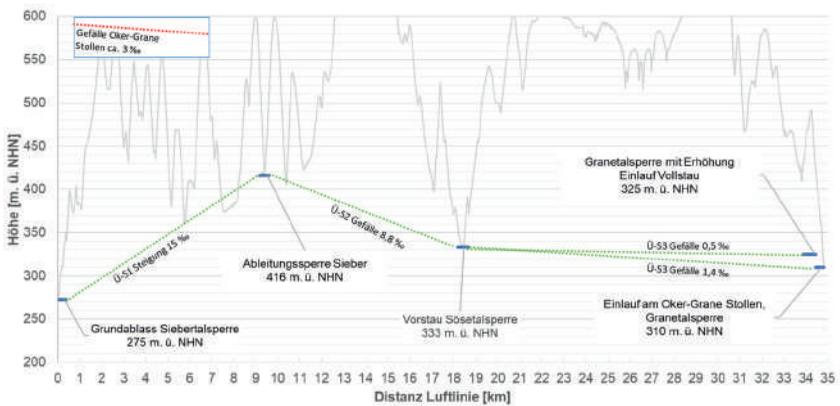


Abbildung 88: Wasserverteilung ausgehend von der Siebertalsperre

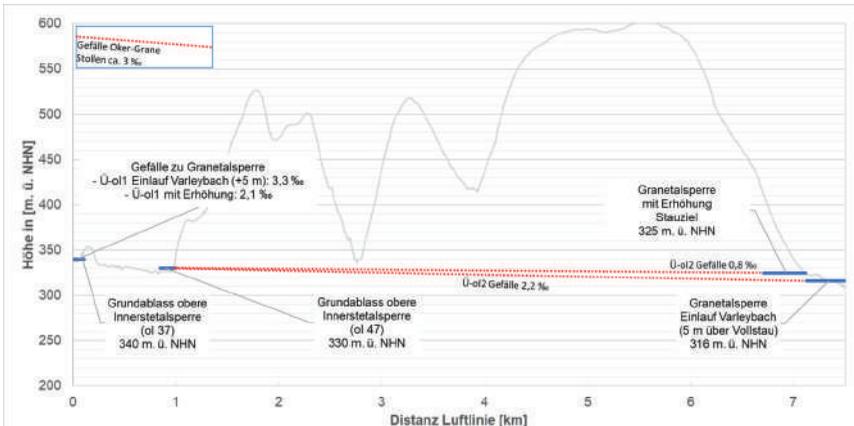


Abbildung 89: Wasserverteilung ausgehend von der oberen Innerstetalsperre

Die hier dargestellten Varianten wurden an die Projektpartner TU Braunschweig und TU Clausthal weitergegeben. Die TU Braunschweig hat dann entsprechende Durchflüsse für die einzelnen Varianten simuliert. Die Durchflüsse und Gefälle der einzelnen Varianten bildeten die Basis der Querschnittsermittlung der Stollen durch die TU Clausthal, dort wurde zudem die Herstellbarkeit der Verbindungen überprüft.

4.9 Einordnung

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

Bei Umsetzung aller baulichen Maßnahmen im EWAZ-Projekt könnten insgesamt rund 90 Mio. m³ an zusätzlichem Speicherraum zur Verfügung gestellt werden. Dazu könnten Talsperren und PSW-Oberbecken errichtet werden. Dies wäre aus wasserwirtschaftlicher Sicht, insbesondere im Hinblick auf die angesprochenen Extremwetterereignisse in Folge des Klimawandels, eine deutliche Optimierung. Die Bereitstellung von zusätzlichem Speicherraum für Wasser zur Trinkwassergewinnung, die Niedrigwasseraufhöhung sowie als Rückhalteraum für Hochwasser würde hierdurch gewährleistet werden können. Das Potential für die Errichtung neuer Speicher ist aus topografischer Sicht gegeben. Jedoch besteht auch die Möglichkeit, dass auf Grund von Raumwiderständen oder Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit nicht alle Speicher realisiert werden können. In diesem Fall bieten sich auch Teillösungen an den Standorten an. Als Beispiel ist das Siebertal zu nennen, wo auf Grund der verschiedenen Schutzbedürfnisse (Naturschutz, Nationalparke) durchaus solche Teilumsetzungen als realistischer anzusehen sind. Beispielsweise würde sich anbieten, nur eine Errichtung eines Ableitungswehres umzusetzen, um das Siebertal für

die Trinkwassergewinnung wasserwirtschaftlich nutzen zu können, dabei aber den Eingriff in die Natur möglichst gering zu halten. Hierzu müssen in weiterführenden Untersuchungen die Interessen verschiedener Sektoren gegeneinander abgewogen werden.

5 Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe (AP 4)

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

5.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Der Kern dieses Arbeitspaketes war, die Auswirkungen von wasserreichen oder trockenen Phasen auf bestimmte Gewässerabschnitte unterhalb der Stauanlagen zu ermitteln. Es wurden Schadensschwerpunkte vergangener Hochwasserereignisse ermittelt. Außerdem erfolgte eine Betrachtung der Wirkung der im Arbeitspaket „Bauliche Planungsvarianten und Betriebs-strategien“ festgelegten Standorte in Bezug auf den Hochwasserschutz. Weiterhin wurde betrachtet, inwiefern Hochwasser gespeichert, ab- und umgeleitet werden können.

Niedrigwasserphasen haben sowohl Einwirkungen auf die Gewässerökologie als auch auf Nutzungen wie Stromproduktion am Gewässer und Brauchwasserentnahmen. Niedrigwasserperioden aus der Vergangenheit wurden exemplarisch ausgewertet. Es erfolgte eine beispielhafte Ermittlung von ökologisch und ökonomisch begründeten Mindestwasserabgaben.

5.2 Ergebnisse

Die Hochwässer in den Jahren 2013 und 2017 haben gezeigt, dass Defizite im Hochwasserschutz in einigen Bereich des Harzes vorliegen. Allerdings zeigen Berichte des NLWKN und der Harzwasserwerke auf, dass Defizite nicht unbedingt durch die Erweiterung des Talsperrensystems Westharz gelöst werden können.

Die Talsperren an Oker, Oder, Innerste und Grane speicherten vergangene Hochwässer (Betrachtungszeitraum von 1958 bis 2014) zu 89 bis 100 %, wobei die Abschlussspitzen an allen genannten Talsperren deutlich gekappt wurden. Im Erläuterungsbericht zur Neubewilligung des Nordharzverbundsystem aus dem Jahr 2016 wird beschrieben, dass die Harztalsperren ihre Funktion voll erfüllen und die verbleibenden Hochwasserspitzen erst unterhalb der Talsperren im Harzvorland entstehen.

Im Bericht „Mai-Hochwasser 2013“ (NLWKN 2013) wird ebenfalls bestätigt, dass die Hochwasserwellen am Ende des Monats Mai durch die Talsperren im Westharz zurückgehalten werden konnten. Weiterhin wird auch hier darauf hingewiesen, dass der Einfluss der Talsperren bei einer flächenhaften Dauerregenlage im Harzvorland nur sehr gering sei.

Das Juli-Hochwasser 2017 hat ebenfalls gezeigt, dass die Westharz-Talsperren einen großen Anteil der Hochwasserwelle aus dem Harz zurückhalten konnten, wodurch eine deutliche Entlastung der Unterläufe erreicht werden konnte. Die extremen

Hochwasserereignisse im Harzvorland sind das Resultat von starken Niederschlägen ober- und unterhalb der Talsperren.

5.2.1 Schadensschwerpunkte beim Juli-Hochwasser 2017

Folgend werden beispielhaft einige Hot-Spots des Hochwassers 2017 auf Basis des Berichts „Das Juli-Hochwasser 2017 im südlichen Niedersachsen“ (NLWKN 2021) aufgeführt. Besonders die Landkreise Goslar (Gose, Abzucht, Innerste), Hildesheim (Innerste), und Wolfenbüttel (Oker) sind stark betroffen gewesen.

In Goslar wurde am 26.07.2017 der komplette historische Marktplatz überflutet, nachdem die Abzucht dort über die Ufer getreten war. Diverse Erdgeschosse haben gravierende Schäden durch die massiven Überflutungen genommen.

Die Ortslage Lautenthal (Innerste) wurde ebenfalls stark durch das Hochwasser getroffen, welches diverse Schäden angerichtet hatte.

Innerhalb der Ortslage Schladen im Landkreis Wolfenbüttel kam es zu neuen Rekordwasserständen, obwohl die Okertalsperre konstant geringe Unterwasserabgaben aufweisen konnte. Die Zuströme, welche die hohen Abflüsse zur Folge hatten, kamen unterhalb der Talsperre hinzu.

Im Landkreis Hildesheim wurde nach Übertreten der Innerste u. a. der Kulturcampus der Universität Hildesheim überflutet. Es kam hier zu Rekordpegelständen und zu mehreren Damnbrüchen am Gewässer.

5.2.2 Referenzstrecken für den Hochwasserschutz

Für den Hochwasserschutz wurden innerhalb des Projektes zwei Referenzstrecken definiert. Eine Referenzstrecke bildete ein Teil der Innerste und befand sich im Bereich des Pegels Heinde, bis zum Ende der Ortslage Hildesheim. Die zweite Referenzstrecke lag an der Oker im Bereich des Pegel Schladen und umfasste die Oker innerhalb der Ortslage Schladen. Die komplette Fotodokumentation hierzu findet sich im Anhang.

Bei der Begehung der Referenzstrecke bei Hildesheim wurde festgestellt, dass innerhalb der Ortslage bereits Maßnahmen zum Hochwasserschutz durchgeführt werden. Wie Abbildung 90 zeigt, wurde ein Linienbauwerk zum Hochwasserschutz von Überflutungsflächen, die besonders im Jahr 2017 betroffen waren, im Bereich der Bleicherstraße in Hildesheim errichtet.



Abbildung 90: Hochwasserschutzmaßnahme Bleicherstraße

In Schladen wurde bereits auf der einen Uferseite eine Hochwasserschutzmauer erreicht (siehe Abbildung 91).



Abbildung 91: Hochwasserschutzmauer in der Ortslage Schladen

Die durch das Land Niedersachsen geförderte Maßnahme in Form einer Hochwasserschutzmauer bietet Schutz vor einem HQ₁₀₀-Ereignis. Weiterhin wird derzeit eine weitere Hochwasserschutzmaßnahme in Form eines Schutzwalles umgesetzt, der die östliche Ortslage von Schladen schützen soll. Im Bereich der Hermann-Müller-Straße wird hierfür der 390 m lange und 1,70 m hohe Damm entstehen (Wolfenbüttler Schaufenster 2019)

Eine weitere, detaillierte Betrachtung der Referenzstrecken im Hinblick auf dezentrale Maßnahmen zum Hochwasserschutz war innerhalb des Projektes nicht mehr möglich, da die maßgebenden Abflüsse erst zum Ende des Projektes feststanden.

5.2.3 Auswertung von Niedrigwasserphasen aus der Vergangenheit

Ein Bestandteil des Projektes stellte die Auswertung vergangener Niedrigwasserperioden dar. Diese Auswertung erfolgte für die Standorte Innerstetal (Pegel Hüttschenthal) und Siebertal (Pegel Herzberg).

Das (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2020) definiert den Niedrigwasserabfluss wie folgt: Niedrigwasser herrscht vor, wenn ein bestimmtes Mittel unterschritten wird. Dieses Mittel stellt den mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ dar, also den Mittelwert des jeweils kleinsten Abflusses in einem Monat über ein hydrologisches Jahr (1. November bis 31. Oktober). Im Fall eines 30-jährigen Betrachtungszeitraumes werden die Jahresminimumwerte betrachtet. Alle Jahresminimumwerte werden gemittelt und das Mittel bildet den Grenzwert für Niedrigwasser. Alle Jahre mit einem Jahresmittel, welches kleiner als dieses 30-jährige Mittels ist, sind als trockene Jahre einzustufen.

Am Betrachtungsstandort Innerste (Pegel Hüttschenthal) liegt das 30-jährige Mittel bei 1,36 m³/s. In insgesamt 19 Jahren wurde dieser Wert unterschritten, dies entspricht circa 63 % aller hier betrachteten Jahre. Exemplarisch wird hier das Jahr 2018 betrachtet, welches mit einem Mittel der täglichen Minimumwerte von 1,05 m³/s als besonders trocken einzustufen ist. Für das Jahr 2018 wurden die Volumina ermittelt, die benötigt werden würden, um einen bestimmten Abfluss in der Innerste zu gewährleisten. Diese Volumina basieren auf dem Differenzwert zwischen tatsächlichem und definiertem Abfluss im Gewässer. Über die Anzahl der Unterschreitungstage der definierten Abflüsse kann dann das Gesamtvolumen in Mio. m³ ermittelt werden (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Ermittlung vom Bedarf der NW-Aufhöhung an der Innerste für das Jahr 2018

Abfluss m ³ /s	Benötigtes Volumen Mio. m ³	Unterschreitungstage des Abflusses d
0,5	4,87	198
1	13,53	235
1,5	22,56	272
2	33,85	283
2,5	46,96	303
1,36	22,77	264

Der gleiche Prozess ist für den Standort Sieber erfolgt. Das 30-jährige Mittel liegt hier bei 1,33 m³/s, der Wert von 2018 liegt bei 1,16 m³/s. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 33.

Tabelle 33: Ermittlung vom Bedarf der NW-Aufhöhung an der Sieber für das Jahr 2018

Abfluss m ³ /s	Benötigtes Volumen Mio. m ³	Unterschreitungstage des Abflusses d
0,5	3,08	168
1	10,03	219
1,5	18,91	249
2	29,53	278
2,5	43,18	298
1,33	19,15	239

5.2.4 Bedarfsgerechte Mindestwasserabgaben

Innerhalb des Projektkonsortiums wurde festgelegt, bestehende Mindestwasserabgaberegulungen an den Standorten, an denen bereits Talsperren vorhanden sind, beizubehalten anstatt neue Werte zu ermitteln, da hier in der Regel neben ökologischen Aspekten auch wirtschaftliche Aspekte, wie Brauchwasserentnahmen und Wasserkraftnutzung, eine Rolle spielen, die in ihrer zukünftigen Entwicklung nicht im Projekt erfasst werden konnten. Ziel des Projektes war es daher, die heutigen Mindestwasserabgaben auch in Zukunft an möglichst das ganze Jahr über sicherstellen zu können.

An den Standorten 2 („Wassernutzung im Innerstetal“) und Standort 4 („Wassernutzung im Siebertal“) wurden Pegelraten eines 30-jährigen Zeitraumes (1988-2018) an den Pegeln Hüttschenthal (Standort 2) und Herzberg (Standort 4) im Hinblick auf bedarfsgerechte Mindestwasserabgaben ausgewertet.

Die Mindestwasserabgaben wurden nach (Maniak 2016) ermittelt. Dieser beschreibt, dass die minimale Regelabgabe bei $0,1-0,7 \times MQ$ liegen sollte. Tabelle 34 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung.

Tabelle 34: Mindestwasserabgaben für Standort 2 und Standort 4

x	Mindestwasserabgabe m ³ /s	
	Sieber	Innerste
0,1	0,20	0,15
0,2	0,40	0,30
0,3	0,61	0,44
0,4	0,81	0,59
0,5	1,01	0,74
0,6	1,21	0,89
0,7	1,41	1,04
Mittelwert	0,81	0,59

Für den Standort 2 wird eine Mindestwasserabgabe von circa $0,59 \text{ m}^3/\text{s}$ empfohlen und für den Standort 4 eine Mindestwasserabgabe von $0,81 \text{ m}^3/\text{s}$.

6 Trinkwasserversorgung (AP 5)

Jan Sünemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

6.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Innerhalb des Arbeitspaketes ging es um die Sicherung der Trinkwasserversorgung in der Zukunft bei einem insgesamt wachsenden Bedarf, wobei sowohl der quantitative als auch der qualitative Aspekt betrachtet wurde. Es galt einerseits darum zu prüfen, wieviel Stauraum in Zukunft für Trinkwasser zusätzlich bereitgestellt werden kann, beispielsweise durch geänderte Betriebsweisen oder die Erweiterung des bestehenden Speicherraumes. Andererseits wurde untersucht, inwieweit die Energiespeicherung in Form der Pumpspeicherung und die Trinkwasserversorgung synergetisch an einer Talsperre eingesetzt werden können, ohne dass eine Minderung der Qualität des vorgehaltenen Rohwassers für die Trinkwassergewinnung auftritt. Dabei ging es sowohl um die Veränderung der Nachfrage im Versorgungsgebiet durch Veränderungen bei der Bevölkerung und den Wasserbedarf, wie auch um die Möglichkeit der Ausweitung der Versorgung, da aus verschiedenen Gründen in Zukunft eine verstärkte Nachfrage erwartet wird.

6.2 Ergebnisse

Die unterschiedlichen Nutzungen bzw. Systemdienstleistungen haben teilweise konkurrierende, aber auch synergetische Anforderungen an einen Wasserspeicher. Trinkwassergewinnung, Niedrigwasseraufhöhung und Wasserkraft profitieren von einem möglichst vollen Speicher bzw. einer hohen Auslastung des Speichers. Der Hochwasserschutz hingegen benötigt eine möglichst geringe Auslastung des Speichers, also einen möglichst leeren Speicher. Ein Speicher, der als Pumpspeicher eingesetzt wird, hält im Idealfall zwei teilgefüllte Speicherbecken vor, um jederzeit Strom speichern als auch erzeugen zu können.

Ein Ziel von EWAZ ist es, Betriebsstrategien zu entwickeln, die zu guten Synergien bei allen jeweils relevanten Systemdienstleistungen führen.

6.2.1 Limnologie

Im folgenden Abschnitt wird auf die Limnologie, also die Ökologie, von Talsperren bzw. Binnengewässern eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf Schichtungs- und Zirkulationsphasen als Basis für die Thematik Pumpspeicherung an Trinkwassertalsperren. Die Schichtung und das Verhalten von Durchmischung oder auch Zirkulation innerhalb einer Talsperre wird durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt. Dies sind (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 1990):

- Beckenform und -tiefe
- Hauptwindrichtung
- Windhäufigkeit und -stärke
- Sonnenscheindauer

Dies sind Einflussfaktoren, die auf das Wasser innerhalb der Sperre einwirken. Der entscheidende Faktor ist jedoch die Temperatur des Wassers selbst, denn Wasser hat seine größte Dichte bei 3,98 Grad Celsius. Ist die Temperatur des Wassers höher oder niedriger, nimmt die Dichte ab.

Die Dichteanomalie des Wassers führt zu einem Dichtegradienten aufgrund der verschiedenen Temperaturen bspw. innerhalb eines Sees. Die Schichtung des Wassers verstärkt sich. Ein ideal geschichteter See (Abbildung 92) tritt somit im Sommer auf, wenn die auf den See einwirkenden Temperatur stark von den 3,98 Grad Celsius abweichen.

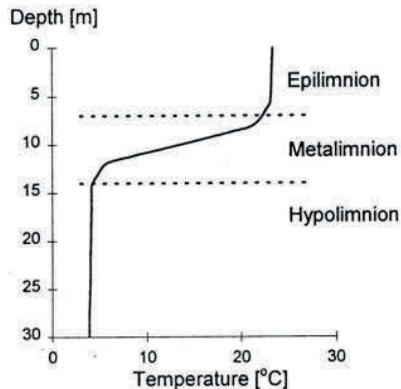


Abbildung 92: Ideal geschichteter See (Echterhoff und Meißner 2015)

Abbildung 92 zeigt ebenfalls, dass ein See bzw. ein tiefer Talsperrenkörper sich in folgende drei unterschiedliche Schichtungen einteilen lässt:

- Epilimnion
- Metalimnion (Sprungschicht)
- Hypolimnion (Tiefenwasser)

Die obere Schicht, also das Epilimnion, weist eine windinduzierte Homogenisierung auf. Diese Schicht unterliegt einer dauerhaften Vermischung, was in einem konstanten Temperaturverlauf in Abbildung 92 dargestellt ist. Ebenso bleiben Stoffkonzentrationen, in Folge dieser Homogenisierung, mit steigender Tiefe konstant. Die Temperatur dieser Schicht ist dabei ähnlich der Umgebungstemperatur. Durch den direkten Kontakt zur

Atmosphäre dient das Epilimnion ebenfalls dem Eintrag von Sauerstoff und dem Abbau von Nährstoffen innerhalb des Wasserkörpers.

Die darunterliegende Schicht ist das Metalimnion, auch als Sprungschicht bezeichnet. Es besteht ein maximaler Temperatur- und somit ebenfalls ein maximaler Dichtegradient. Die Sprungschicht zeichnet sich dadurch aus, dass die Temperaturdifferenz bei mindestens einem Grad Celsius pro Meter Tiefe liegt. Das Metalimnion weist insgesamt eine ungefähre Tiefe von zwei bis sechs Metern auf und bildet eine Art Barriere zwischen Epilimnion und Hypolimnion, wodurch ein Stoffaustausch zwischen diesen verhindert wird. Ebenfalls sind keine Sauerstoffaustauschprozesse möglich. Kommt es zu Temperaturdifferenzen über fünf Grad Celsius, werden ebenfalls die Diffusionsvorgänge eingestellt.

Das Tiefenwasser wird als Hypolimnion bezeichnet. Auf Grund fehlender Lichtverfügbarkeit findet keine Photosynthese statt. Die Schicht unterliegt meist einer Sauerstoffarmut (niedrige Temperaturen und hoher Druck sind ansonsten guten Bedingungen für einen hohen Sauerstoffgehalt), resultierend aus sauerstoffzehrenden Mineralisationsprozessen von absinkender Biomasse aus der Sprungschicht. In dieser Schicht liegt der maximale Dichtegradient von Wasser vor, es herrschen grundsätzlich um die vier Grad Celsius, wobei sich die Temperatur über den Jahresverlauf in einem Bereich von vier bis acht Grad Celsius bewegen kann (Echterhoff und Meißner 2015).

Die in Abbildung 92 dargestellte und darauffolgend erläuterte Schichtung ist ein Idealzustand, der während des Sommers erreicht wird. Insgesamt wechseln innerhalb eines Jahres jedoch Stagnations- und Zirkulationsphasen wie Abbildung 93 zeigt.

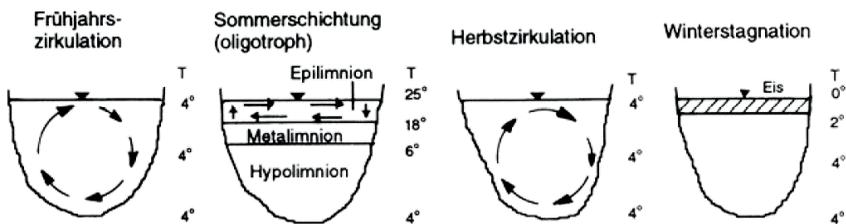


Abbildung 93: Zirkulations- und Stagnationsphasen (Maniak 2016)

Die Sommerschichtung resultiert aus der erhöhten Sonneneinstrahlung, wodurch sich das Epilimnion erwärmt. Die Strahlungsstärke nimmt jedoch mit steigender Tiefe immer weiter ab, wodurch auch die Temperatur mit der Tiefe sinkt. Es bildet sich eine Stagnation aus. Im Herbst nehmen Sonneneinstrahlung und Außentemperatur ab, der Wasserkörper hat eine konstante Temperatur von circa vier Grad Celsius. Dies führt zur

Vergleichmäßigung des Dichtegradients und somit zum Lösen der Schichtung. Das Wasser kann zirkulieren, womit Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt ebenfalls gleichmäßig werden. Mit Einsetzen des Winters fällt die Außentemperatur weiter ab, wodurch die obere Wassertemperatur unter vier Grad Celsius sinkt. Es bildet sich eine inverse Schichtung aus, da das vier Grad Celsius kalte Wasser weiterhin die höchste Dichte aufweist. Im Frühling bestehen dem Herbst ähnliche Zirkulationsverhältnisse, da die Außentemperatur wieder steigt (Echterhoff und Meißner 2015).

6.2.2 Trinkwassertalsperren

Der dynamisierte Talsperrenbetrieb beschreibt einen mengenmäßig zeitlich variablen Entnahmevergange von Rohwasser aus der Talsperre, wobei Entnahmegütes beinflusst werden können (Echterhoff und Meißner 2015). Im ENERWA-Bericht zur Thematik „Die gewässerchemischen und chemisch-physikalischen Auswirkungen einer Trinkwassertalsperre unter Berücksichtigung eines dynamisierten Talsperrenbetriebs“ unterscheiden Echterhoff und Meißner (2015) zwischen der Entnahme aus einem geschichteten Wasserkörper und der aus einem ungeschichteten Wasserkörper. Die Entnahme aus dem ungeschichteten Wasserkörper kann dabei aus zwei Schichten erfolgen, dem Epilimnion und dem Hypolimnion. Folgend werden alle drei Prozesse und ihre Wirkungen nach diesem Bericht erläutert.

Entnahme aus dem ungeschichteten Wasserkörper

Während der Zirkulationsphasen im Frühling und im Herbst bestehen kein Dichtegradient und somit keine Stratifikation im Talsperrenkörper, das heißt, es wirkt keine Kraft gegen den Mischungsprozess. Erfolgt eine Entnahme, fließt das Wasser radial aus allen Tiefen zur Entnahmeverrichtung. Die Temperatur und die Inhaltsstoffe sind während dieser Zirkulationsphasen im Wasserkörper gleichmäßig, was zur Folge hat, dass die Entnahme aus verschiedenen Höhen keine Auswirkungen auf die Qualität des Rohwassers hat.

Entnahme aus dem geschichteten Wasserkörper

Bei der Entnahme aus einem geschichteten Wasserkörper besteht ein gravierender Qualitätsgradient über die drei Schichtungen. Abbildung 94 zeigt die Entnahme aus einem solchen Wasserkörper, wobei sich ein parabelförmiges Geschwindigkeitsprofil ausbildet.

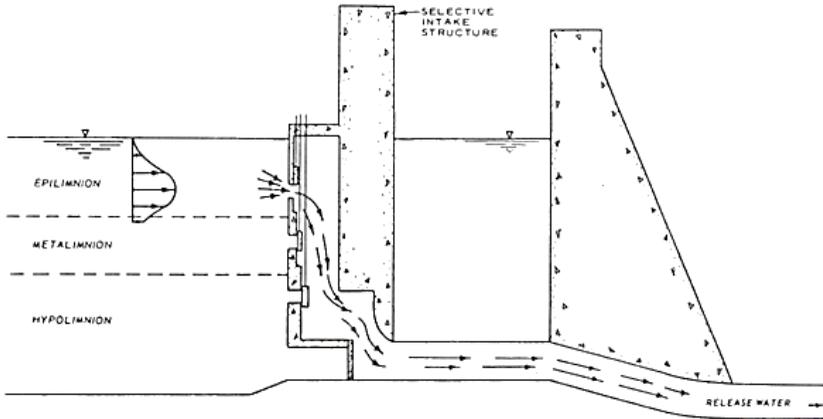


Abbildung 94: Wasserentnahme aus geschichteter Talsperre (Kennedy und Walker 1991)

Die Entnahme erfolgt also ausschließlich aus der Schicht, in der sich die Entnahmevorrichtung befindet, was daraus resultiert, dass die Dichtegradienten ober- oder unterhalb des Entnahmehorizontes für eine Begrenzung der vertikalen Ausbreitung sorgen. Resultierend hieraus ist abzuleiten, dass die Wasserentnahme aus einer horizontalen Schicht erfolgt, eine vertikale Durchmischung erfolgt nicht. Wasserschichten außerhalb des Entnahmehorizontes tragen nicht zur Wasserentnahme bei (Echterhoff und Meißner 2015).

Nach Schneider und Albert (2014) beeinflusst zudem die Stärke des Abflusses die vertikale Ausdehnung einer Entnahmeschicht nur marginal, was sich aus folgender Formel ableiten lässt:

$$H_E = \sqrt[3]{Q}$$

mit:

H_E = Höhe der Entnahmezone in m

Q = Entnahmemenge in m³

Hier entspricht die vertikale Ausdehnung der Entnahmezone H_E der Kubikwurzel der Entnahmemenge Q , wonach selbst bei einer Steigerung der Entnahmemenge um das Achtfache die vertikale Ausdehnung sich nur verdoppelt. Dies bedeutet theoretisch, dass eine gleichzeitige Entnahme aus verschiedenen Schichten zu unterschiedlichen Nutzungen durchaus im Bereich des Möglichen liegt. Weiterhin gilt, dass sich Zuflüsse entsprechend ihrer Dichte in eine vorhandene Schichtung einordnen, womit starkbelastete Zuflüsse

abgeführt werden können, wenn eine Entnahmemöglichkeit in dieser Schichthöhe besteht (Echterhoff und Meißner 2015).

In Bezug auf die Trinkwasserentnahme während der Sommerstagnation ist zu festzuhalten, dass die Talsperre im Frühjahr sowie kurz vor Ende der Zirkulationsphase möglichst vollgefüllt sein sollte, damit sich ein großes Hypolimnion ausbilden kann. Anzumerken ist, dass bei einem zu kleinen Hypolimnion die Gefahr von einem Sauerstoffdefizit zum Ende des Sommers besteht (ATT 2009). Außerdem sollte dieses Hypolimnion geschont werden, das heißt, es sollte möglichst nur die Entnahme des Rohwasser für Trinkwasser aus dieser Schicht erfolgen. Die Abgabe in den Unterlauf kann oder sollte bevorzugt aus der epilimnischen Schicht erfolgen, da diese ein ähnliches Temperaturregime wie das des Flusses aufweist. Im Optimalfall wird die Zuflusstemperatur ermittelt, und es wird Wasser an den Unterlauf weitergegeben, welches eine ähnliche Temperatur aufweist.

6.3 Pumpspeicherung an Talsperren

Die Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerkes an einer bestehenden Talsperre ist bei günstigen topographischen Bedingungen im Vergleich zu einem kompletten Neubau sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch als günstig einzustufen. Es fallen geringere Baukosten sowie eine niedrigere Flächeninanspruchnahme an. Weiterhin wird bereits existierender multifunktionaler Speicher im Sinne der Bündelung um eine weitere Nutzung ergänzt. Bisher wurden aber solche Projekte, insbesondere an Trinkwassertalsperren, nicht umgesetzt bzw. nicht in Erwägung gezogen, wie die „Potentialstudie Pumpspeicherkraftwerke Nordrhein-Westfalen“ (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2016) und der „Analyse der Pumpspeicherpotentiale in Bayern Endbericht“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2014) aufgezeigt haben. Die vorliegende Ausarbeitung erläutert in Kapitel 6.3.2 die Gründe für die bisherige Sichtweise. In Kapitel 6.5 werden Lösungsansätze zur synergetischen Nutzung aufgezeigt. Zunächst wird der bautechnische Aufbau von PSW generell bzw. von Pumpspeicherbecken erläutert.

6.3.1 Bauliche Anforderungen an Pumpspeicherbecken

Pumpspeicherbecken sind nach den Vorgaben von DIN 19700-14 zu errichten. Die Gestaltung des Absperrbauwerks richtet sich nach Gesichtspunkten der Topographie, der Geotechnik, der Wasserwirtschaft und der Bautechnik (DIN 19700-14 2004). Die Becken können in Form von Talsperren (Unterbecken), Staustufen (Unterbecken) oder Ringbecken (Ober- oder Unterbecken) umgesetzt werden. Hierbei ist es wichtig, dass die Absperrbauwerke für schnell und häufig schwankende Wasserstände geeignet sind (DIN 19700-14 2004).

Abbildung 95 zeigt den bautechnischen Aufbau eines typischen Pumpspeicherkraftwerkes mit Ober- und Unterbecken, Druckstollen, Krafthaus, Einlauf- und Auslaufbauabauwerk.

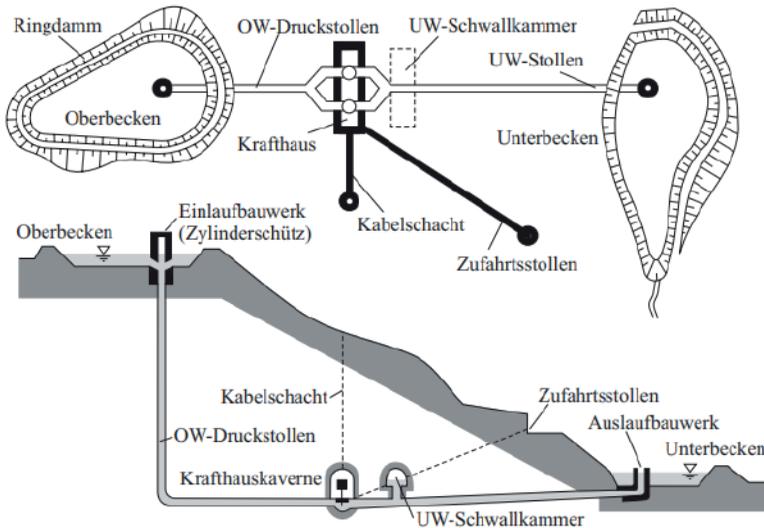


Abbildung 95: Bautechnischer Aufbau eines PSW (Giesecke et al. 2009)

Für die Errichtung von Pumpspeicherbecken, insbesondere den Oberbecken, hat sich Asphaltbeton als Dichtung zum Stand der Technik entwickelt, da die Dichtungen auch bei den Anforderungen an ein solches Becken über Jahrzehnte beständig sind (Strobl und Zunic 2006). Ökologische Anforderungen an eine naturnahe Böschungsgestaltung treten dabei in den Hintergrund, da die extremen Wasserspiegelschwankungen innerhalb kurzer Zeit eine Besiedelung durch Pflanzen und Tiere praktisch unmöglich machen.

Die im Rahmen des EWAZ-Projektes angesprochenen und angedachten unterirdischen, bergmännisch angelegten, Ober- bzw. Unterbecken sind ausführlich in Kapitel der TU Clausthal dargestellt.

6.3.2 Konfliktpotential Pumpspeicherung und Trinkwassergewinnung

Vereinfacht ist festzustellen, dass das Konfliktpotential zwischen Trinkwassergewinnung und Pumpspeicherung daraus resultiert, dass die Anforderungen an das Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung gütetechnisch in Deutschland sehr hoch sind. Auf der anderen Seite wirkt sich der Pumpspeicherbetrieb mit hohen Durchflüssen bei den Pumpspeichersequenzen auf den Wasserkörper der Talsperre aus, die in der Regel das Unterbecken bildet. Während eines solchen Vorgangs werden große Pendelwassermengen

zwischen Ober- und Unterbecken hin und her bewegt. Die Resultate können eine Homogenisierung der Wasserkörper oder auch Erosionen in Uferbereichen sein, welche den Schwebstoff-Anteil im Wasserkörper erhöhen können und somit die Qualität des Rohwassers beeinträchtigen würden. Dies ist der Grund dafür, wie oben beschrieben, Trinkwassertalsperren bisher für eine Kombination mit Pumpspeicherbetrieb ausgeschlossen wurden.

Die Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT e.V.) hat im Jahr 2013 ein Positionspapier zum Thema „Zielkonflikte bei gleichzeitiger Nutzung von Trinkwassertalsperren als Pumpspeicherbecken“ (ATT 2013) veröffentlicht, welches als Basis für die zukünftige synergetische Nutzung gesehen werden kann. Dort wurden zum einen die Zielkonflikte abermals verdeutlicht, jedoch könne eine solche Maßnahme im Einzelfall unter strikten Bedingungen umgesetzt werden. Es wird verdeutlicht, dass der Trinkwasserbetrieb an einer bestehenden Trinkwassertalsperre die oberste Priorität haben muss und, dass der Pumpspeicherbetrieb keine negativen Auswirkungen zur Folge haben darf.

6.4 Trinkwasserbedarfsentwicklung

Im Fokus der Untersuchungen des Projektes EWAZ stand neben der Frage der Energiespeicherung die Sicherung der Trinkwasserversorgung des Harzes sowie des gesamten Versorgungsgebietes der Harzwasserwerke für die Zukunft. Nachfolgend wird kurz die aktuelle Situation der Wasserversorgung durch die Harzwasserwerke sowie die Bedarfsentwicklung innerhalb Niedersachsens dargestellt.

6.4.1 Trinkwasserversorgung durch die Harzwasserwerke

Die Harzwasserwerke sind einer der größten Wasserversorger innerhalb Deutschlands. Das Unternehmen wurde im Jahr 1928 gegründet und bewirtschaftet aktuell 6 Talsperren, 3 Talsperrenwasserwerke sowie 4 Grundwasserwerke. Durch die Harzwasserwerke werden ca. 70 Wasserversorger und Industrieunternehmen über ein Leitungsnetz von rund 520 km versorgt. Der Trinkwasserabsatz insgesamt wird in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Trinkwasserabsatz der Harzwasserwerke

Jahr	Trinkwasser in Mio. m ³
2018	100,7
2019	98,7
2020	98,9
2021	94,8

Ein Großteil dieser Trinkwasserabsatzmengen wird in den Talsperren innerhalb des Projektgebietes gewonnen.

6.4.2 Bedarfsentwicklung

Für das Land Niedersachsen wurde das „Niedersächsischen Wasserversorgungskonzept“ durch das Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz erstellt und im Mai 2022 veröffentlicht. Die Harzwasserwerke waren bei der Konzepterstellung beteiligt, die konkreten Zahlen für Niedersachsen, insbesondere zu den Prognosen, standen den Projektbeteiligten jedoch erst zum Ende der Bearbeitungszeit zur Verfügung. In der Projektbearbeitung war jedoch von Anfang an absehbar, dass die Nachfrage nach Wasser von den Harzwasserwerken im Versorgungsgebiet in der Zukunft steigen wird. Dabei ist insbesondere von Bedeutung, dass kommunale Wasserversorger mit Blick auf die Quantität und Qualität der eigenen Quellen mehr Wasser von den Harzwasserwerken beziehen möchten. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist in dieser Hinsicht die zukünftige Bevölkerungsentwicklung.

Die Betrachtung erfolgte auf Basis der Gegenwart, bezogen auf das Jahr 2015 und den Betrachtungszeitpunkten 2030 und 2050. In Bezug auf die Bevölkerung innerhalb Niedersachsens ist festzuhalten, dass diese insgesamt bis zum Jahr 2050 zurückgehen wird, wobei der Rückgang auf die Entwicklungen im ländlichen Raum zurückzuführen ist. Die Ballungsräume wie Hannover, Braunschweig oder Oldenburg verzeichnen Zunahmen, wie Abbildung 96 zeigt.

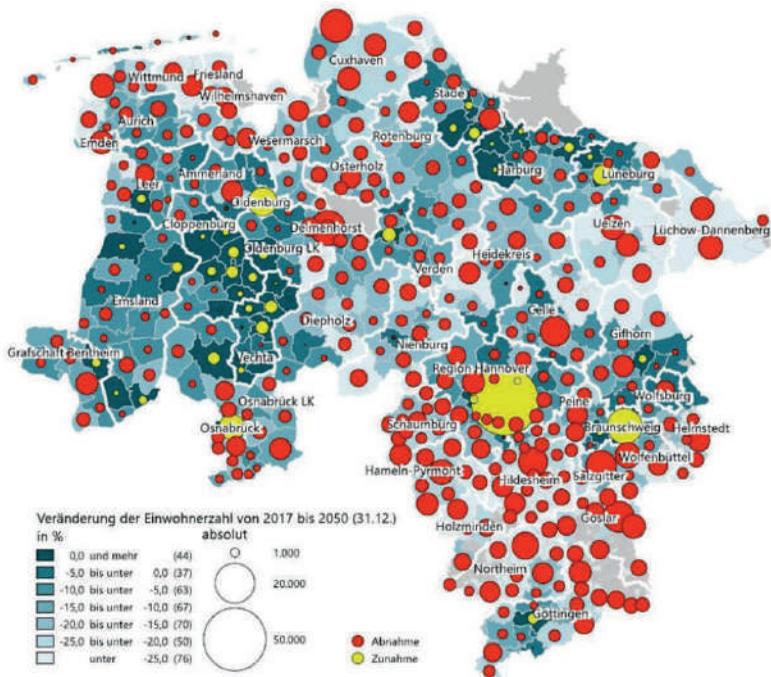


Abbildung 96: Bevölkerungsentwicklung (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz 2022)

Der Pro-Kopf-Verbrauch hingegen wird in allen Regionen Niedersachsens ansteigen. Bis zum Jahr 2030 wird ein Anstieg um 10 % und bis zum Jahr 2050 um 15 %, im Vergleich zur Gegenwart, erwartet. Der Grund hierfür liegt in den immer öfter auftretenden Trockenphasen wie z. B. im Jahr 2018.

Dies zeigt sich auch in der Entwicklung der Entnahme für die öffentliche Wasserversorgung aus Grund- und Oberflächenwasser, wie Abbildung 97 zeigt.

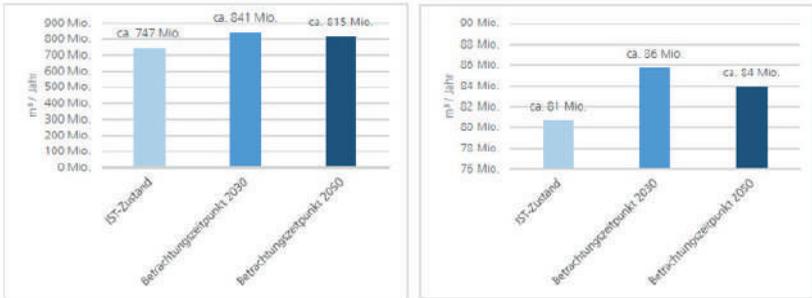


Abbildung 97: Entnahmen für die öffentliche Wasserversorgung aus Grund- (links) und Oberflächenwasser (rechts) (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz 2022)

Die Entnahmen steigen im Vergleich zum Status-quo jeweils an, auch wenn ein leichter Rückgang vom Jahr 2030 zum Jahr 2050 zu verzeichnen ist. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Bedarf in Zukunft einen Anstieg zu verzeichnen hat. Weitere Informationen hinsichtlich der Bedarfsentwicklung, insbesondere zur Entwicklung von Grundwasserentnahme, finden sich im Wasserversorgungskonzept für das Land Niedersachsen.

6.5 Lösungsansätze für die synergetische Nutzung von Pumpspeicherung und Trinkwassergewinnung

Auf Basis des in Kapitel 6.3 aufgeworfenen Status quo in Bezug auf die Pumpspeicherung an Talsperren wurden im Rahmen des EWAZ-Projektes Lösungsansätze für eine Umsetzung entwickelt (Sünnemann 2022). Dazu sind zwei verschiedene Varianten entwickelt worden.

Zum einen wurde ein spezielles Einleitungsbauwerk auf Basis der Beobachtungen von Müller et al. (2013), zur Einwirkung von Pumpspeichersequenzen auf quaderförmige Becken, entwickelt. Dort wurde festgestellt, dass das Wasser bei einem IN-Zyklus (Turbinenvorgang) in Form eines geradlinigen Wasserstrahls eintritt. Bei einer Entnahme aus dem Becken tritt nur ein lokales Geschwindigkeitsfeld in der Nähe des Einlaufbauwerks auf, wobei der restliche Wasserkörper stagniert. Mit dieser Beobachtung und der Kenntnis, dass in den Stagnationsphasen (Sommer; Winter), wenn ein Wasserkörper einen Dichtegradienten aufweist, könnte Wasser entsprechend seiner Temperatur wieder der korrekten Temperaturschicht zugeführt werden. Dies setzt eine Möglichkeit der Zuleitung des Wassers in entsprechendem Umfang in verschiedenen Höhen voraus, damit eine Homogenisierung des Wassers im Unterbecken verhindert wird. Dieser Ansatz ist für die

im Projekt EWAZ gestellten Anforderungen jedoch nicht zielführend, da es bisher keine praktikable technische Lösung für eine solche gezielte Einleitung gibt, abgesehen vom mess- und steuerungstechnischen Aufwand.

Der zweite Ansatz, die Trinkwasserspeicherung und Pumpspeicherung an eine Talsperre zu kombinieren, ist die Idee einer baulichen Trennung bzw. der Abtrennung eines Unterbeckens innerhalb der Talsperre. So könnte im Fall der Odertalsperre oder der Okertalsperre ein Arm eines seitlich in die Talsperre einmündenden Nebengewässers abgetrennt und als Pumpspeicherunterbecken genutzt werden. Die Auswirkungen der Pumpspeichersequenzen auf die eigentliche Talsperre, aus der Rohwasser gewonnen wird, wären in diesem Fall weitgehend unterbunden, durch eine hydraulische Verbindung könnte jedoch in bestimmten Situationen auf das Volumen von Ober- und Unterbecken des PSW zugegriffen werden.

Dieser Lösungsansatz ist für die Untersuchungen in EWAZ eine praktikable Lösung, die für mehrere Standorte weiter untersucht und ausgearbeitet wurde. Folgend werden dieser Ansatz und weitere Alternativen, basierend auf diesem Prinzip, übersichtlich aufgelistet:

- Abtrennung eines Beckens innerhalb der Talsperre
- Ableitung von Rohwasser für die Trinkwasserentnahme im Oberlauf
- Ergänzung des Standortes um eine weitere Talsperre (mit Aufteilung der Systemdienstleistungen)

Einerseits kann eine Rohwasserentnahme in Form eines Ableitungswehres im Oberlauf einer Talsperre stattfinden. In der eigentlichen Talsperre finden in diesem Fall nur Pumpspeicherung, Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung statt. Der Nachteil ist dann allerdings, dass auch die Vorteile eines großen Speicherraumes mit Blick auf die Wasserqualität entfallen.

Eine weitere Möglichkeit bildet der Bau einer weiteren Talsperre an einem Standort, bei ausreichendem wasserwirtschaftlichem Potential im Einzugsgebiet und den entsprechenden topographischen Möglichkeiten. So könnte ein Einzugsgebiet ebenfalls multifunktional um die Pumpspeicherung erweitert werden, ein Konflikt würde jedoch nicht entstehen. In diesem Fall würde jedoch ein zusätzliches Bauwerk entstehen, mit einem zusätzlichen Kostenaufwand und einem zusätzlichen Eingriff in die Landschaft.

Zusammenfassend wurden also drei verschiedene praktikable Ansätze in EWAZ herausgearbeitet, die alle auf dem Prinzip der baulichen Trennung basieren, um Konfliktpotentiale zu minimieren.

7 Energiesystem (AP 6)

Yener Sisik, M. Eng.; Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck; Dr.-Ing. Jens zum Hingst; TU Clausthal

7.1 Inhalte des Arbeitspaketes

Das AP 6 umfasst die energetische Betrachtung der West-Harz-Region und zeigt die in der Region realisierbaren Möglichkeitsräume auf. Es gibt vier Standorte, die für eine Pumpspeicherung geeignet sind und deren Eigenschaften in Kapitel 7.2 aufgelistet und analysiert werden. Die Strommärkte bieten Erlösmöglichkeiten für Speicherkraftwerke. Daher werden in Kapitel 7.3 die Strommärkte aus der Sicht eines Pumpspeicherbetreibers analysiert. Im letzten Kapitel 7.4. wird die Anbindung des Pumpspeicherkraftwerks an ein Netz untersucht. Mögliche Anbindungspunkte werden konzipiert und dienen dem fachlichen Austausch mit den Betreibern von Höchst- und Hochspannungsnetzen. Anhand der gesammelten Informationen wurden die vorgenannten Anschlusspunkte diskutiert und für jeden Standort ein Vorschlag erarbeitet.

7.2 Betrieb und Auslegung des Energiespeichers

Die vier Standorte, die im Rahmen des EWAZ-Projektes für ein Pumpspeicherkraftwerk in Frage kommen, werden auf ihr Gravitationsenergiepotential untersucht. Diese Standorte mit ihrem Potential werden unter dem Aspekt der Energiespeicherung analysiert. Das PSW Okertal verfügt über ein bestehendes Oberbecken sowie ein bestehendes Unterbecken. Das Oberbecken nutzt ein Steinbruch-Industriegebiet auf dem Huneberg, das in ein Pumpspeicherkraftwerk umgewandelt wird. Somit bestehen Vorteile bei der Genehmigung durch die Behörden. Außerdem sind die Kosten für die Umwandlung des Steinbruchs in ein Oberbecken voraussichtlich geringer als die eines Neubaus. Aufgrund der Kostenvorteile und des geringeren Eingriffs in die Natur wird das PSW Okertal als Vorzugsstandort ausgewählt. Die Detailuntersuchung wurde deshalb auch für diesen Vorzugsstandort durchgeführt und kann bei Bedarf in Zukunft auf die anderen Standorte übertragen werden.

Die Maschineneinheiten werden für die Standorte ausgewählt und die hydrologische Simulation für das PSW Okertal durchgeführt. Die hydrologische Simulation beinhaltet die Veränderung der Wasserstände in beidem Becken und die Netto-Höhendifferenz ist abhängig von der gespeicherten Wassermenge. Die möglichen Maschinensätze für das PSW Okertal wurden mit der Fachfirma Voith GmbH erörtert und geeignete drehzahlvariable Maschinensätze wurden ausgewählt.

Die Stromeinspeisung bestehender Pumpspeicherkraftwerke wurde untersucht, um den Betrieb dieser Kraftwerke zu spezifizieren. Der kombinierte Betrieb mehrerer

Maschineneinheiten ist ebenfalls in den Diagrammen ersichtlich. Die Aktivität an Wochentagen und Wochenenden wird für jede Maschineneinheit dargestellt.

7.2.1 Energetisches Potential der Standorte

Das energetische Potential der Pumpspeicherkraftwerke basiert auf der Gravitationsenergie. Die Gravitationsenergie hängt von der Höhendifferenz zur Bezugshöhe, der Masse und der Schwerebeschleunigung ab. Im Fall des Pumpspeichers übersetzt sich der Höhenunterschied in den Wasserdruck der Turbine, der letztlich das Drehmoment erzeugt, die Masse übersetzt sich in die Dauer des Drucks auf die Turbine. Folglich hängt die Menge der gespeicherten Energie vom Wasservolumen des Reservoirs ab und die Leistung der Turbine von der Höhendifferenz. Die gespeicherte Energie wird mit einer Energieflussrate abgegeben. Damit das PSW an dem Regelarbeit- und Regelleistungsmarkt, teilnehmen kann, werden die Ausschreibungsblöcke berücksichtigt. Die Preise z. B. im Regelleistungsmarkt werden blockweise für vier Stunden ausgeschrieben (siehe Kapitel 7.3.2). In erster Näherung wird deshalb ein vierständlicher Betrieb vorgesehen. In Abstimmung mit wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen können auch größere Wassermengen und damit Betriebszeiten der Pumpspeicherkraftwerke vorgesehen.

7.2.1.1 PSW Okertal

UB: Okertalsperre

OB: Huneberg

Pendelwassermenge: 2 Mio. m³

Fallhöhe: 165 m

Turbinienvorgang: 4 h 180 MW

Energieinhalt: 720 MWh

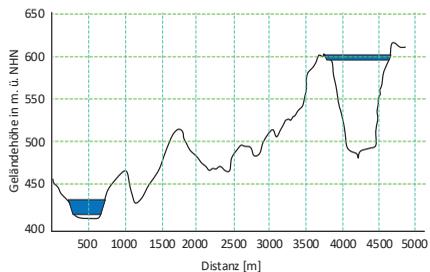


Abbildung 98: Karte und Geoprofil des PSW Okertal (Vgl. Ostfalia AP 5)

Der tiefste Punkt des Hunebergs und der höchste Punkt des Kalbetals (Vorsperre der Okertalsperre) begrenzen die Fallhöhe. Die Wassermenge, die im PSW zirkuliert, beträgt voraussichtlich 2 Mio. m³. Das Kalbetal ist ein Flussarm der Oker und soll von der Okertalsperre abgetrennt werden. Die Abtrennung stellt eine physische Barriere zwischen

dem Okertal, das als Trinkwasserquelle dient, und dem Kalbetal, das als Pendelwasser für das PSW genutzt wird, dar.

7.2.1.2 PSW Odertalsperre

UB: Odertalsperre

Pendelwassermenge: 2 Mio. m³

Turbiniovorgang: 4 h 345 MW

OB: Stöberhai

Fallhöhe: 317 m

Energieinhalt: 1380 MWh

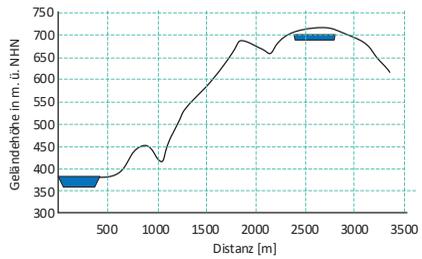
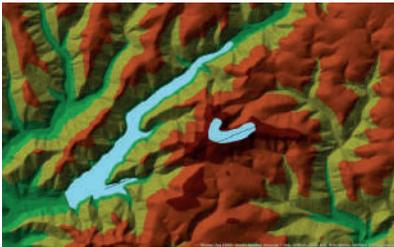


Abbildung 99: Karte und Geoprofil des PSW Odertalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5)

In ähnlicher Weise bestimmen der höchste Punkt des unteren Reservoirs und der niedrigste Punkt des oberen Reservoirs die Fallhöhe. Der Energiegehalt des PSW Odertalsperre beträgt 1380 MWh bei 2 Mio. m³ Pendelwasser.

7.2.1.3 PSW Innerstetal

UB: Innerstetalsperre

Pendelwassermenge: 2 Mio. m³

Turbiniovorgang: 4 h 305 MW

OB: Hohestein

Fallhöhe: 281 m

Energieinhalt: 1220 MWh

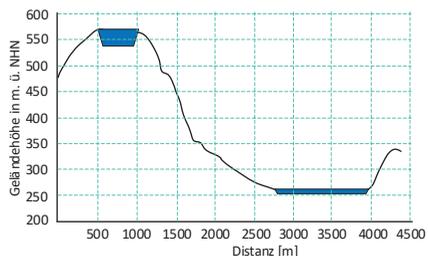


Abbildung 100: Karte und Geoprofil des PSW Innerstetalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5)

PSW Innerstetal nutzt den bestehenden Staudamm in Innerstetal als Unterbecken. Das Oberbecken auf dem Hohenstein ist in der Abbildung 100 als Querschnittsfläche in der gewählten Höhe dargestellt. Das PSW Innerstetal benötigt standardmäßig ein neues Oberbecken auf der Bergspitze vom Hohenstein. Es gibt jedoch auch eine Variante des PSW Innerstetal, die ein untertägliches Oberbecken im Berg vorsieht (siehe AP 3).

7.2.1.4 PSW Siebertal

UB: Siebertalsperre

OB: Oberbecken Siebertalsperre

Pendelwassermenge: 1,3 Mio. m³

Fallhöhe: 217 m

Turbinienvorgang: 4 h 155 MW

Energieinhalt: 620 MWh

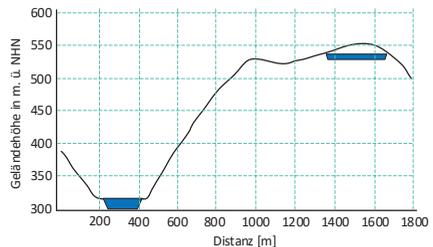
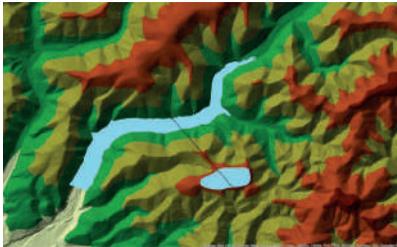


Abbildung 101: Karte und Geoprofil des PSW Siebertalsperre (Vgl. Ostfalia AP 5)

Das in Erwägung gezogene PSW Siebertal hat steile Steigungen zwischen dem Unterbecken und dem Oberbecken. Daher ist die Entfernung zwischen den Becken relativ kurz. Die Anlage Siebertal hat weder einen Unter- noch einen Oberbecken. Das obere Geoprofil mit Querschnittsdarstellung zeigt die Wasserfüllung, für den Fall, dass es im Siebertal eine Talsperre gäbe.

7.2.1.5 Mögliche Gesamtenergiespeicherung im Westharz

Die vorgenannten Standorte eignen sich für Pumpspeicher in der Region Westharz. Etwa die Hälfte der potentiellen Leistung der Pumpspeicherkraftwerke von 1 GW (bei 4-stündiger Vollast) befindet sich im Norden des Westharzes und die andere Hälfte im Süden. Eine Speicherleistung von 1,3 GW mit entsprechender Speicherkapazität kann nach Kaiser und Busch (2014) 1 TWh an elektrischer Windenergie vor Abregelungen sichern. Die Stromversorgung der Region könnte durch diese Speicher in einem zukünftigen Netz mit hohem erneuerbarem Anteil sichergestellt werden.

Für die Anlagen sind drehzahlvariable Maschineneinheiten vorgesehen, die flexibel und mit hohem Wirkungsgrad im Teillastbereich arbeiten können, was in einem Netzscenario ohne konventionelle Kraftwerke erforderlich wäre.

7.2.2 Auswahl der Maschineneinheiten

Die Auswahl der Maschineneinheiten hängt von mehreren Faktoren ab. Der erste von ihnen ist die Fallhöhe, die den Turbinentyp direkt beeinflusst. Der zweite Faktor ist die Wasserqualität, die einen signifikanten Einfluss auf die Korrosion ausübt. Ein weiterer Faktor ist die installierte Leistung des PSW, die sowohl den Ventiltyp als auch die Geometrie der Turbine bestimmt. Das Betriebsverhalten des PSW wird vom Hersteller simuliert und die hydrologische Auslegung kann realisiert werden.

7.2.2.1 Spezifikationen des PSW Okertal

Hydraulische Randbedingungen und Standortdaten

Der tiefste Punkt des Kalbetals liegt bei 401 m über dem Meeresspiegel. Das Kalbetal (siehe Abbildung 102) verfügt über 2 Mio. m³ Wasserspeicher zwischen Level-2 und -3, die als Pendelwasser vorbehalten sind. Wenn man davon ausgeht, dass die Saughöhe 44 m beträgt, liegt die Kaverne 373,5 m (Level-1) über dem Meeresspiegel (je nach Berechnung der Saughöhe muss diese neu festgelegt werden). Der tiefste Punkt des Hunebergs liegt 470 m (Level-4) über dem Meeresspiegel. Die Kaverne liegt etwas unterhalb des Hunebergs. Linie-1 ist die direkte Entfernung vom tiefsten Punkt des Kalbetals zur Kaverne und beträgt 2662 m. Linie-2 ist die direkte Entfernung von der Kaverne zum tiefsten Punkt des Hunebergs und beträgt 716 m.

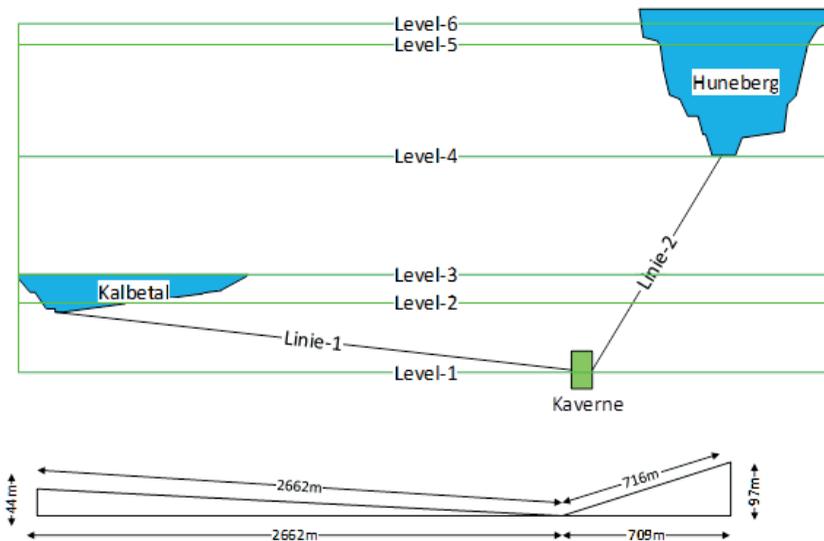


Abbildung 102: Skizze des PSW Okertal

Tabelle 36: Die Höhenstufen des PSW Okertal (Datenquelle: Speicherinhaltslinien aus Ostfalia)

Level-1	Level-2	Level-3	Level-4	Level-5	Level-6
373,5 m ü. NHN	417,5 m ü. NHN	430 m ü. NHN	470 m ü. NHN	595 m ü. NHN	603 m ü. NHN

Wasserqualität

Die Wasserqualität bestimmt die Korrosionseigenschaften und die möglichen Wartungsintervalle der Hydraulikkomponenten. Daher wird diese Information bei der Auslegung der Turbinen benötigt. Bei den Messungen wird auch die Temperatur, der pH-Wert, Anionen und Kationen angegeben. Weitere Mineralien und Messdaten sind verfügbar. Messung 1 ist die Trinkwasseranalyse von Oker aus monatlichen Kontrollen im Jahr 2020. Messung 2 beschreibt die Wasserqualität des Mischwassers im Jahr 2021 aus Hune und Kalbe:

Tabelle 37: Messdaten aus Hune und Kalbe (Datenquelle: Harzwasserwerke)

Allgemein	Einheit	Messung 1			Messung 2	
		Durchschn.	Min	Max	Min	Max
Temperatur	°C	7,1	4,2	11,3	0	15
pH		6,87	6,61	7,32	6,7	7,9
Trübung	FTU	1,28	0,54	2,35		
Kationen						
Natrium	mg/l	8,0	7,4	8,7	5	15
Kalium	mg/l	0,9	0,7	1,1	0,8	3
Magnesium	mg/l	2,3	2,0	3,1	3	7
Calcium	mg/l	7,2	5,8	8,5	6	30
Barium	mg/l	0,03	0,02	0,03		
Ammonium	mg/l	<0,03	<0,03	0,10		<0,05
Anionen						
Chlorid	mg/l	11,7	10,5	12,4	8	15
Nitrat	mg/l	4,7	4,0	4,9	5	16
Sulfat	mg/l	13,4	12,8	14,1	18	55
Fluorid	mg/l	0,05	0,04	0,07		
Nitrit	mg/l	0,010	0,005	0,022	0	0,05
Ortho-Phosphat-P	mg/l	<0,005	<0,005	<0,005	0	0,01

Wasser, das mäßig alkalisch ist (40 bis 70 mg/L) mit einem pH-Wert zwischen 7,0 und 8,2 ist normalerweise nicht korrosiv. Wasser mit einem pH-Wert unter 6,5 ist korrosiv, insbesondere wenn die Alkalität ebenfalls niedrig ist (Mark und McFarland 2009). Die Analyseergebnisse liefern eine Einschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit.

Hydraulische Auslegung des Pumpspeicherkraftwerks Okertal

In Abbildung 103 wird die Höhenänderung in Abhängigkeit von der gestauten Wassermenge für das untere und obere Becken dargestellt. Die polynomiale Curvefitting-Methode kann auf die Geodaten angewandt werden und die entsprechenden Funktionen können abgeleitet werden.

Da das Kalbetal mit dem im Huneberg gespeicherten Wasser gefüllt werden soll, ist bei Festlegung der Wasserstände die blaue Linie und, beim Absinken des Wasserstandes die rote Linie für den Huneberg zu betrachten. Im Ergebnis beträgt der Höhenunterschied 185,5 m – wenn das Wasser hochgepumpt wird, und 165 m – wenn die 2 Mio. m³ Wasser turbinieren werden.

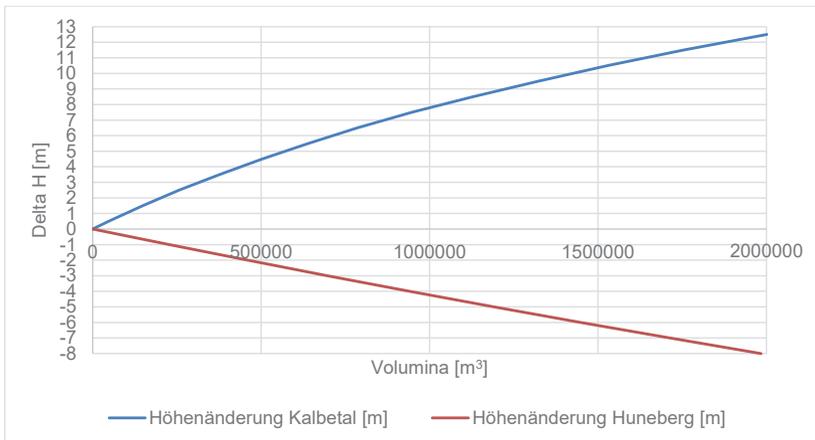


Abbildung 103: Verhältnis zwischen Wasserhöhe und gefüllter Wasserkapazität der PSW Okertal-Becken im Turbinenbetrieb (Datenquelle: Speicherinhaltslinien aus Ostfalia)

Wie der Abbildung 103 zu entnehmen ist, weichen die Wasserstandsänderungen in den Stauseen voneinander ab. Der untere Stausee Kalbetal ist ein Tal, daher steigt der Wasserstand nicht linear an. Der höher gelegene Stausee Huneberg hat ebenfalls einen schmalen Boden, aber die 2 Mio. m³ Wasser, die für das Pendelwasser reserviert sind, liegen zwischen 595 und 603 m über dem Meeresspiegel. Daher ist die Veränderung des Wasserspiegels im Verhältnis zur Wassermenge relativ linear.

7.2.2.2 Kraftwerk, Kaverne und Hauptabmessungen

Die Kaverne ist der Raum, in dem die Maschinen untergebracht sind. Ihre Größe hängt von der Größe der Maschinen ab. Die Berechnungen beziehen sich auf die Abmessungen des Spiralgehäuses der Pumpturbine, des Saugrohrs. Die grobe Schätzung der Kaverne liefert das Ausbruchsvolumen. Der Abstand zwischen den Maschineneinheiten wird mit 2 m berücksichtigt, sowie einer Wanddicke von 1 m berücksichtigt. Als Montage-raum ist eine Werkstatt mit 29 m in der Kaverne geplant.

Die Tabelle 38 zeigt die Abmessungen der Kavernen an den einzelnen Standorten.

Tabelle 38: Abmessungen des Kavernenhauses

Achse	Okertal	Innerstetal	Odertal- sperre	Siebertal
Höhe m	51	51	51	51
Breite m	19	20	20	22
Länge m	60	56	56	59

Die Transformatoren befinden sich in einer anderen Kaverne als die der Maschineneinheiten. Der vom Generator erzeugte Strom wird zunächst zu den Transformatoren und dann an die Oberfläche geleitet, wo die Freileitungen beginnen. Ein 120-MVA-Transformator mit den Abmessungen 10 x 4,5 x 5 m (ABB GmbH) wird skaliert, um die Transformatorabmessungen der Standorte zu schätzen. Der Abstand zwischen den Transformatoren wird auf 3 m festgelegt. Der elektrische Eigenverbrauch sowie die elektrische Speicherenergie werden über Hochspannungskabel zwischen Freileitungen und der Trafokaverne transportiert.

Tabelle 39: Abmessungen der Trafokaverne

Achse	Okertal	Innerstetal	Odertal- sperre	Siebertal
Höhe m	13	22	24	11
Breite m	11	19	22	10
Länge m	22	37	42	19

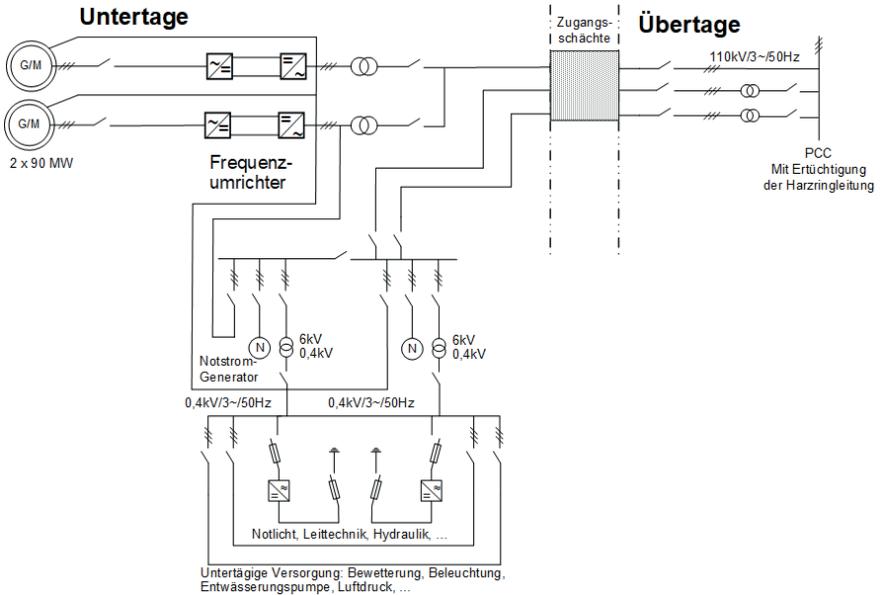


Abbildung 104: Beispiel für ein Prinzipschaltbild mit zwei drehzahlgeregelten Maschinensätzen ($2 \times 90 \text{ MW}$) (nach VDE Kassel 2006)

Die Zugangsschächte bieten Platz für Hochspannungskabel, die überirdige und unterirdige Komponente miteinander verbinden. Der Eigenverbrauch von unter- und oberirdischen Komponenten wird elektrisch über das Netz versorgt. Die Anlagen benötigen Strom für hydraulische Ventile, Beleuchtung, Klimatisierung, Wasserentsorgungspumpen sowie für Steuereinheiten, die vom Bedienpersonal genutzt werden. Der Generator kann den Eigenverbrauch der Komponenten übernehmen, wenn eine Turbine in Betrieb ist.

7.2.3 Betrieb von vorhandenen Pumpspeicherkraftwerken

Das Pumpspeicherkraftwerk nimmt die nicht benötigte Energie auf, speichert sie und gibt sie zu einem geeigneten Zeitpunkt wieder ab. Die Frage, wann der richtige Zeitpunkt für die Einspeisung der Energie ist, soll mit dieser Analyse beantwortet werden. Die Analyse konzentriert sich auf die Abgabe von elektrischer Energie von vorhandenen Pumpspeicherkraftwerken. Die Anzahl der Abgabestunden, die stündlich gemittelte Abgabeleistung an Werktagen und Feiertagen, der Tagesdurchschnitt der abgegebenen Energie sowie die durchschnittliche Abgabedauer spielen eine Rolle. Sie werden verwendet, um den tatsächlichen Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks abzuschätzen. PSW Goldisthal ist

ein Beispiel für die hier vorgesehene drehzahlvariable Maschineneinheiten im Einsatz. Deshalb lohnt es sich, diesen Verhalten zu analysieren.

7.2.3.1 PSW Goldisthal

Goldisthal ist mit 4 Blöcken und über 8 GWh Speicherkapazität und ca. 1 GW Leistung (vgl. Tabelle 40) das größte Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland (Voith GmbH 2023). Sie befindet sich in Thüringen an der Schwarza. Der Betrieb von Goldisthal lässt sich anhand der Energieeinspeisung beobachten. Goldisthal besteht aus vier verschiedenen teilweise drehzahlgeregelten Maschineneinheiten. Die vier Einheiten haben unterschiedliche Betriebsmodellen.

Tabelle 40: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Goldisthal
(Datenquelle: Bundesnetzagentur)

Erzeugungseinheit	Installierte Leistung MW	Tägliche durchschn. Pendelenergie MWh	Volllaststunden h	Durchschn. Betriebsstunden h
A	265	1664	6,28	11,64
B	265	1125	4,25	6,26
C	265	1285	4,85	7,41
D	265	966	3,65	6,48
Total	1060	5040	4,75	

In der obigen Tabelle sind die Maschineneinheiten mit ihren Betriebseigenschaften dargestellt. Die Maschineneinheiten schalten den Betrieb je nach Bedarf schrittweise ein. Eine Maschineneinheit, die mit einer Teillast arbeiten kann, versorgt die Flexibilität, um Schwankungen in der Nachfrage auszugleichen. Die Einheiten haben identische Nennleistung, aber eine unterschiedliche durchschnittliche Pendelenergie pro Tag. Die tatsächlichen Betriebsstunden der Maschineneinheiten sind länger, als wenn sie mit ihrer Nennleistung betrieben würden, um dieselbe Pendelenergie zu erreichen. Dennoch liegen die tatsächlichen durchschnittlichen Betriebsstunden über den Volllaststunden. Das bedeutet, dass die Einheiten im tatsächlichen Betrieb nicht mit ihrer Nennleistung arbeiten.

Die Abbildung 105 beschreibt die durchschnittliche Generatorleistung von PSW Goldisthal. Diese Leistungsspitzen korrespondieren mit den Spitzenstunden des Verbrauchs. Der Verbrauch ist in der Nacht am niedrigsten und zu Tagesbeginn und am Tagesende am höchsten. In der Tagesmitte gibt es viel Energieproduktion aus Photovoltaikanlagen, die den sogenannten "Duck curve effect" verursacht. Die Aktivität des Generatorbetriebs nimmt an den Wochentagen mit Tagesbeginn und Tagesende zu.

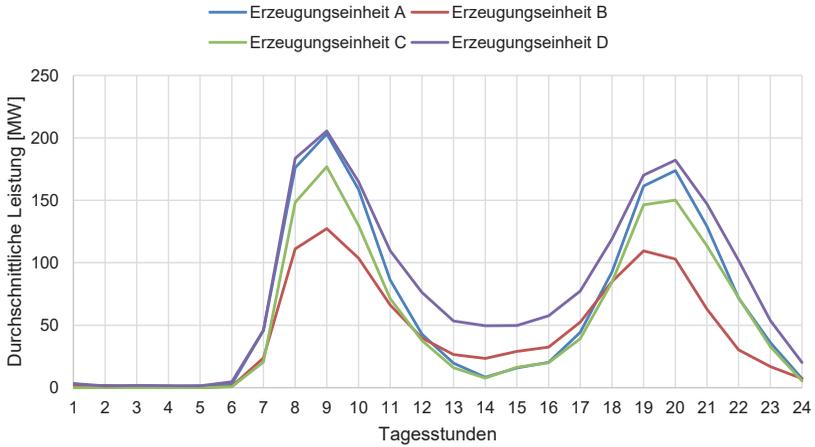


Abbildung 105: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Goldisthal, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

Der Generatorbetrieb des Speichers ist abhängig von der Nachfrage und die morgendliche Nachfrage an arbeitsfreien Tagen ist schwach. Dementsprechend ist der Betrieb von PSW Goldisthal am Morgen deutlich reduziert.

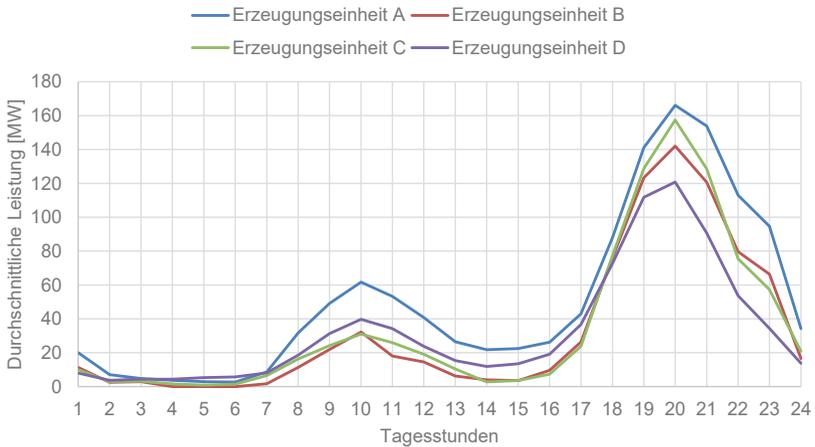


Abbildung 106: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Goldisthal, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

7.2.3.2 PSW Markersbach

Der Pumpspeicher Markersbach ist mit einer Kapazität von über 4 GWh der zweitgrößte in Europa. Er befindet sich in Sachsen am Fluss Große Mittweida. Der Betrieb von Markersbach kann durch seine Stromabgabe beobachtet werden, die aus sechs Kraftwerksblöcken besteht.

Tabelle 41 beschreibt den Betrieb des Pumpspeicher Markersbach, wobei jedes System die gleiche Nennleistung hat, aber im Durchschnitt pro Tag eine unterschiedliche Energiemenge zirkuliert.

**Tabelle 41: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Markersbach
(Datenquelle: Bundesnetzagentur)**

Erzeugungseinheit	Installierte Leistung MW	Tägliche durchschn. Pendelenergie MWh	Volllaststuden h	Durchschn. Betriebsstunden h
A	175	555	3,17	6,22
B	175	133	0,76	1,44
C	175	524	2,99	5,55
D	175	584	3,34	6,26
E	175	501	2,86	5,19
F	175	590	3,37	6,10
Total	1050	2887	2,75	

Aus der Tabelle lässt sich entnehmen, dass nicht alle Einheiten ständig mit ihrer Nennleistung arbeiten. Die Betriebsunterschiede zwischen den Einheiten sind zu beobachten.

Alle Einheiten, mit Ausnahme von B, haben ähnliche durchschnittliche Energiezyklen. Dies kann wie folgt interpretiert werden:

- Alle Einheiten arbeiten häufig mit ähnlichen Leistungsstufen
- Alle Einheiten, außer B, haben eine ähnliche durchschnittliche Betriebsdauer

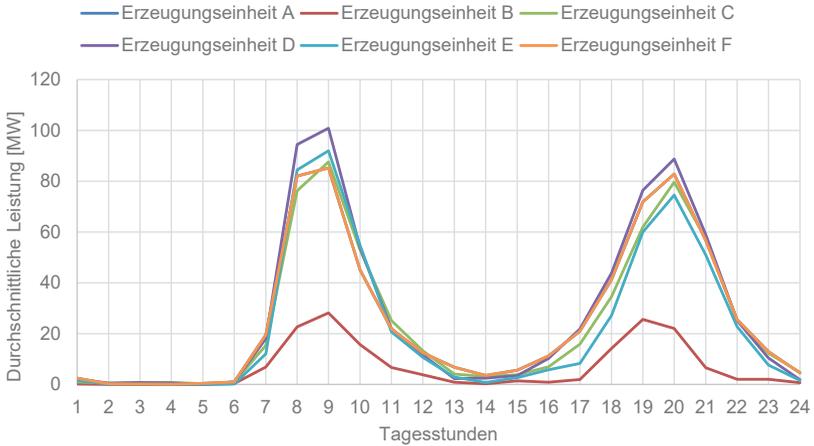


Abbildung 107: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Markersbach, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

Die Arbeitslast ist relativ gleichmäßig auf die Einheiten mit Ausnahme von B verteilt. Betrachtet man die durchschnittlichen Betriebsstunden, so spielt das PSW Markersbach eine traditionelle Lastverschiebungsrolle im Netz. Wie in der Abbildung 108 dargestellt, beginnt die Entladung des PSW Markersbach am Morgen und am Nachmittag. In diesen beiden Hauptzeiten an einem Werktag erreicht die Last ihren Höhepunkt.

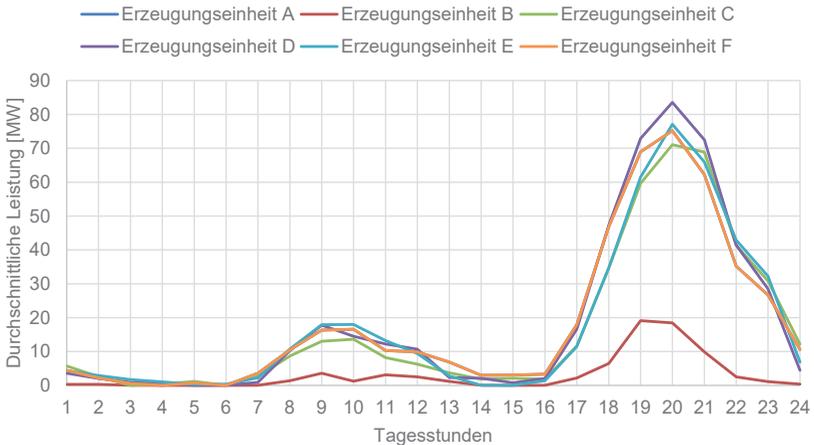


Abbildung 108: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Markersbach, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

An einem arbeitsfreien Tag sinkt die morgendliche Aktivität des Pumpspeichers, so wie auch die Aktivität anderer Speicher zur gleichen Tageszeit.

7.2.3.3 PSW Waldeck II

Das PSW Waldeck II liegt in Hessen am Affolder See. Es besteht aus zwei Kraftwerksblöcken mit einer Gesamtleistung von 480 MW. In der Tabelle 42 wird dargestellt, wie die beiden Blöcke unterschiedlich arbeiten.

Tabelle 42: Der Vergleich der einzelnen Maschineneinheiten des PSW Waldeck II
(Datenquelle: Bundesnetzagentur)

Erzeugungseinheit	Installierte Leistung MW	Tägliche durchschn. Pendelenergie MWh	Volllaststunden h	Durchschn. Betriebsstunden h
A	240	1005	4,19	10,21
B	240	271	1,13	3,15
Total	480	1276	2,66	

Der Unterschied zwischen zwei Einheiten besteht in ihren durchschnittlichen Betriebsstunden. Einheit A ist häufiger in Betrieb und erzeugt im Durchschnitt mehr Energie pro Tag. Die durchschnittliche Pendelenergiemenge in durchschnittlichen Betriebsstunden pro Tag unterscheidet sich geringfügig.

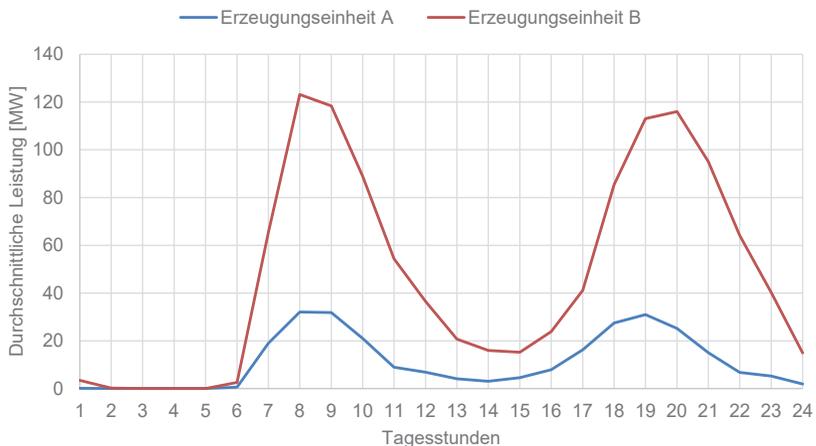


Abbildung 109: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Waldeck II, Energieabgabe an den Wochentagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

Einheit B ist an Wochentagen die führende Einheit mit deutlich mehr Betriebsstunden. Die Einheit A spielt eine ergänzende Rolle. Einheit B ist an Werktagen aktiv, während

Einheit A an arbeitsfreien Tagen aktiver ist. Es ist zu beobachten, dass die Erzeugungseinheiten in diesem speziellen Beispiel ihre Rollen wechseln. Die wechselnden Rollen der Maschineneinheiten sind ein einzigartiges Betriebsverhalten des PSW Waldeck II. Die Merkmale von Werktagen und arbeitsfreien Tagen ähneln dem gleichen Muster wie bei den anderen Pumpspeicherkraftwerken.

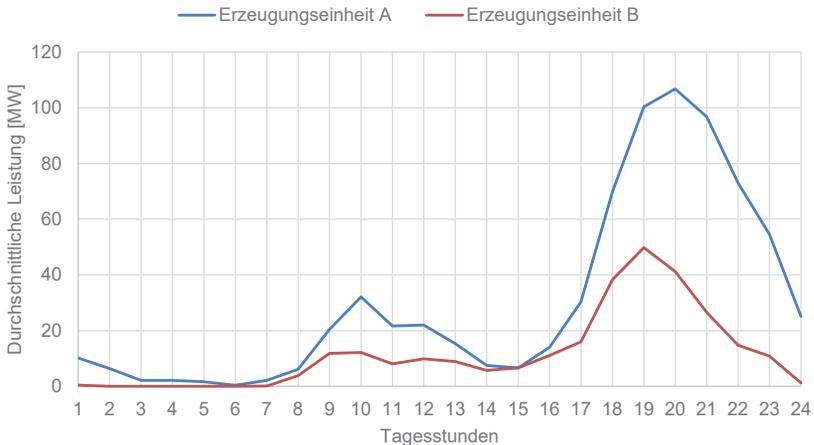


Abbildung 110: Durchschnittliche stündliche Verteilung des PSW Waldeck II, Energieabgabe an den Wochenenden (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

7.2.4 Fazit

Die geologischen Gegebenheiten und das Energiepotential des Standortes lassen einen Vergleich zu, und das PSW Okertal weist vor diesem Hintergrund Vorteile gegenüber den anderen Standorten auf. Dieser Standort wurde deshalb ausgewählt, um ihn genauer zu untersuchen. Die vorgesehenen drehzahlvariablen Maschineneinheiten sind in der Lage, schnell und flexibel zu arbeiten, ohne den Wirkungsgrad nennenswert zu reduzieren. Daher sind drehzahlvariable Maschineneinheiten eine Art von Maschineneinheiten, die gut mit einer Netzstruktur mit hoher erneuerbarer Einspeisung arbeiten können. Der Betrieb von bestehenden Pumpspeicherkraftwerken zeigt, dass die Maschineneinheiten in den verschiedenen Anlagen unterschiedlich arbeiten. Sie sind an den Wochentagen morgens und abends im Betrieb und an den Wochenenden eher abends als vormittags. Dies sind die Spitzenzeiten des Verbrauchs, und die Pumpspeicherkraftwerken speisen in diesen Stunden in das Netz ein. Drehzahlvariable und drehzahlkonstante Maschineneinheiten können auch zusammen arbeiten, PSW Goldisthal ist ein gutes Beispiel dafür. Die Hälfte der Maschineneinheiten von PSW Goldisthal kann mit hoher Flexibilität und Effektivität arbeiten, während die anderen Einheiten einen Teillastbetrieb aufgrund von

Energieverlusten vermeiden. Die Kombination von Maschineneinheiten mit fester und variabler Drehzahl kann die Kosten für das Pumpspeicherkraftwerk senken, geht aber zu Lasten der Flexibilität. Für den Standort Okertal sind zwei Maschinensätze mit drehzahlvariablen Francis-Turbinen, je 90 MW als Vorschlag ausgearbeitet worden.

7.3 Energiemarkt und Betriebsführung

Die Day-Ahead- und Regelleistungs-Regelarbeitsmärkte wurden analysiert und die möglichen Betriebsvarianten eines Speicherbetreibers auf diesen Märkten wurden aufgezeigt. Diese basieren auf den öffentlich verfügbaren Markträumungspreisen der Bundesnetzagentur. Die möglichen Strategien in Abhängigkeit von den Prognosequalitäten wurden ebenfalls diskutiert.

7.3.1 Day-Ahead Strommarktanalyse für ein Pumpspeicherkraftwerk

Die Strompreise auf dem Day-Ahead-Markt werden in diesem Kapitel analysiert. Ein Pumpspeicherkraftwerk zielt darauf ab, die Preisschwankungen auf dem Markt zu nutzen. Daher wurden das Minimum und das Maximum der täglichen Preiskurve in den Jahreszeiten, an Werktagen und an arbeitsfreien Tagen dargestellt.

In der Abbildung 111 ist die Verteilung der Zeiten mit den niedrigsten Preisen an Werktagen dargestellt. Es gibt saisonale Unterschiede, dennoch liegen die niedrigsten Preise überwiegend in den Nachtstunden. Die Preise im Day-Ahead-Markt sind stündlich, zur Bestimmung des Minimums der Preiskurve wurden 4-Stunden-Zeiträume gewählt, da der Pumpspeicher für einen 4-Stunden-Betrieb vorgesehen ist. Die Verteilung der niedrigsten Preise von 4-Stunden-Dauer sind von 0 bis Ende 3 Uhr, 1 bis Ende 4 Uhr und 2 bis Ende 5 Uhr im Sommer insgesamt 90 % bis 97 % und variieren von Jahr zu Jahr. Auf der anderen Seite gibt es im Winter etwas weniger Tage, an denen die Preise in der Nacht am niedrigsten sind. Im Frühling und Herbst liegen ihre Werte zwischen den Werten von Sommer und Winter.

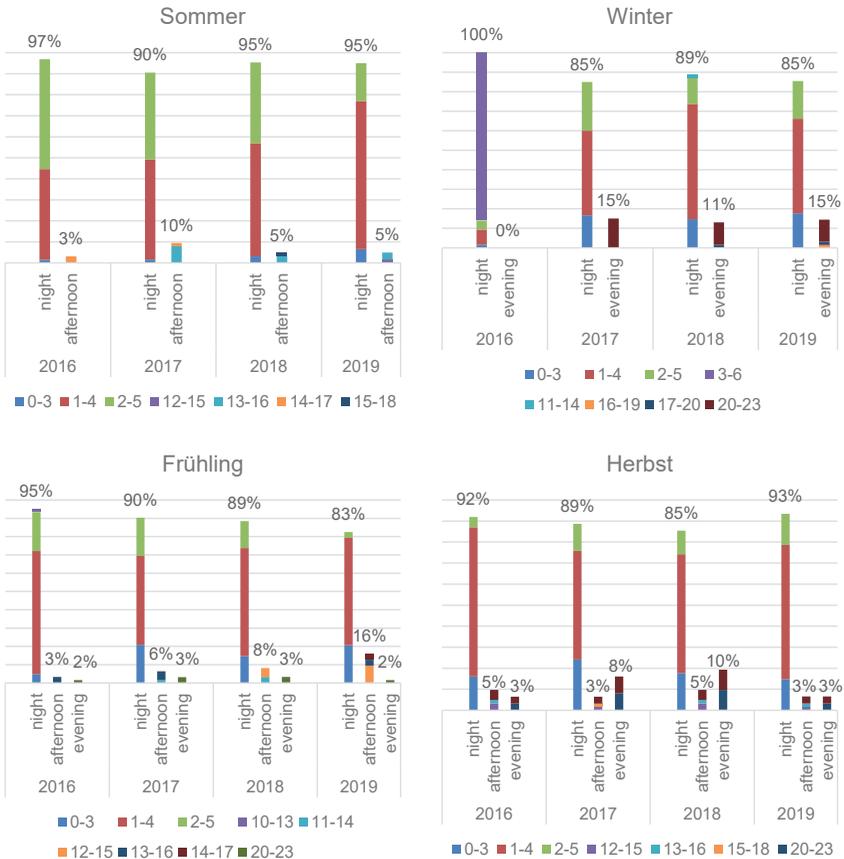


Abbildung 111: Stündliche Mindestpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an Werktagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

In der Abbildung 112 ist die Verteilung der Zeiten mit den niedrigsten Preisen an arbeitsfreien Tagen dargestellt. Als arbeitsfreie Tage gelten die Wochenenden, Feiertage und Überbrückungstage. Diese Tage weisen ein anderes Muster auf als Arbeitstage. Die Zeiten mit den niedrigsten Preisen liegen überwiegend am Nachmittag im Sommer. Die Zeiträume 11-14, 12-15, 13-16 und 14-17 Uhr umfassen 64 % bis 92 % der preisgünstigsten Zeiträume. Während sie im Winter in der Nacht liegen. Die Übergangsjahreszeiten haben die günstigsten Perioden in den Abendstunden.

Die ertragreiche Sommersaison versorgt vor allem in der Mittagszeit mit einem Überschuss an Stromerzeugung. Das Verbrauchsniveau an arbeitsfreien Tagen ist niedriger als an Werktagen, was zu einer geringen Nachfrage und einem hohen Angebot am

Nachmittag führt. Daher sind die Strompreise an den Nachmittagen im Sommer eher niedrig. Die niedrigsten Preise sind jedoch in der Nacht im Winter zu erkennen, was unter anderem mit der schwachen Erzeugung der PV-Anlage erklärt werden kann.



Abbildung 112: Stündliche Mindestpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an arbeitsfreien Tagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

In der Abbildung 113 ist die Verteilung der Zeiten mit den höchsten Preisen an Werktagen dargestellt. Im Sommer sind die Strommarktpreise im 4-Stunden-Zeitraum morgens und abends am höchsten. Im Winter sind jedoch auch am Nachmittag Preisspitzen zu sehen. Die PV-Erzeugung verhindert, dass die Preise während der sonnenreichen Stunden ansteigen. Da die Sonneneinstrahlung im Winter schwächer wird, gibt es auch am Nachmittag hohe Strompreise. Die Preisspitzen können in den meisten Stunden auftreten, außer in der Nacht im Winter und im Herbst an Werktagen.

Die Preiskurve für die arbeitsfreien Tage unterscheidet sich von der Preiskurve für die Arbeitstage. Die höchstpreisigen 4-Stunden-Zeiträume, die am Abend liegen, sind auch am Wochenende sichtbar. Die am Morgen sind jedoch an Wochentagen deutlicher zu erkennen.

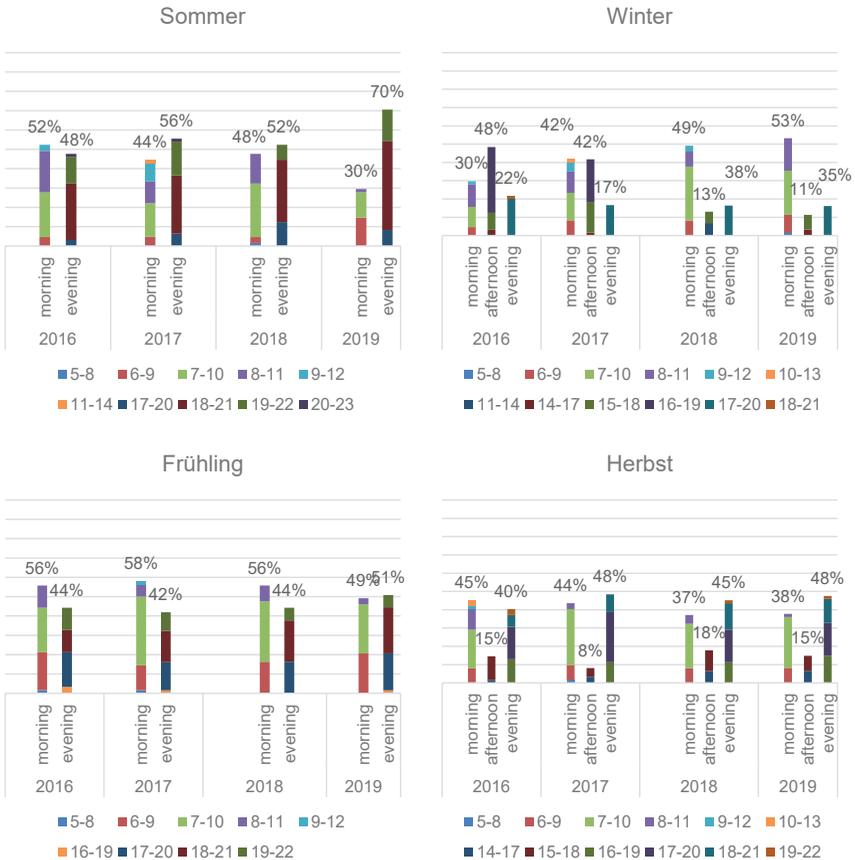


Abbildung 113: Stündliche Höchstpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an Werktagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

In der Abbildung 114 ist die Verteilung der Zeiten mit den höchsten Preisen an arbeitsfreien Tagen dargestellt.



Abbildung 114: Stündliche Höchstpreisverteilung des Day-Ahead-Marktes an arbeitsfreien Tagen (Datenquelle: Bundesnetzagentur)

7.3.2 Regelleistungsmarktanalyse für ein Pumpspeicherkraftwerk

Regelleistungsmarkt geht es um die Sicherung der Erzeugungskapazität in Einheiten von Megawatt. Kraftwerke, die im Regelleistungsmarkt teilnehmen, sind verpflichtet, bei Bedarf aktiv zu sein, und sie werden für ihre Bereitschaft bezahlt. Der Markt für Bereitstellungsentgelte wird Regelleistungsmarkt genannt. Unterschiedliche Leistungsarten werden in folgenden Abschnitten näher erläutert.

7.3.2.1 Primärregelleistung (Frequency Containment Reserve, FCR)

Primärregelleistung ist ein Netzdienst, der automatisiert auf Frequenzschwankungen reagiert. Die Automatisierung ist erforderlich, um schnell reagieren zu können, denn die Anlage benötigt Zeit, um die Erzeugung innerhalb einer halben Minute hochzufahren, und es entstehen keine Zeitverluste durch die Kommunikation. Um Primärregelleistungsprodukte in der Auktion anbieten zu können, muss daher ein Vertrag mit dem ÜNB unterzeichnet werden. Das Kraftwerk muss die technischen Anforderungen erfüllen und die Automatisierung muss validiert werden. Darüber hinaus erfolgt die Versteigerung von Primärregelleistung in 4-stündlichen Blöcken, d. h., es werden 6 Blöcke pro Tag versteigert.

7.3.2.2 Sekundärregelleistung (automatic Frequency Restoration Reserves, aFRR)

Die Sekundärregelleistung übernimmt die Verantwortung für den Frequenzausgleich von Primärregelleistung innerhalb von maximal 5 Minuten. Die Auktion von Sekundärregelleistung ist ebenfalls mit 4-Stunden-Blöcken auf dem Markt. Es gibt negative und positive Angebote, wobei sich die positiven Angebote auf die Erzeugung bei Bedarf beziehen. Diese werden mit ihren Stand-by-Kosten in einer Merit-Order-Liste gesondert aufgeführt. Der Preis wird in der Merit-Order-Liste vom niedrigsten zum höchsten Wert ermittelt, bis der Bedarf gedeckt ist.

7.3.2.3 Minutenreserveleistung (manual Frequency Restoration Reserves, mFRR)

Nach dem 15-minütigen Ungleichgewicht muss die Minutenreserveleistung übernehmen und den Verbrauch und die Produktion ausgleichen. Die Minutenreserve wird auch als "Tertiärregelung" genannt und ist die langsamste Regelleistungsdienst die zur Netzstabilität beiträgt. Der Markt für Minutenreserveleistung ist ebenfalls in negative und positive Minutenreserveleistung unterteilt und wird in 4-Stunden-Blöcken versteigert.

7.3.2.4 Die Preise auf dem Regelleistungsmarkt

Alle Dienstleistungen werden in der Auktion in 4-Stunden-Blöcken angeboten, ebenso basiert die Planung der Anlage auf 4 Stunden Vollastbetrieb. Der Preis ist in den 4-Stunden-Blöcken gleich, da die Auktion für den Blockpreis gilt.

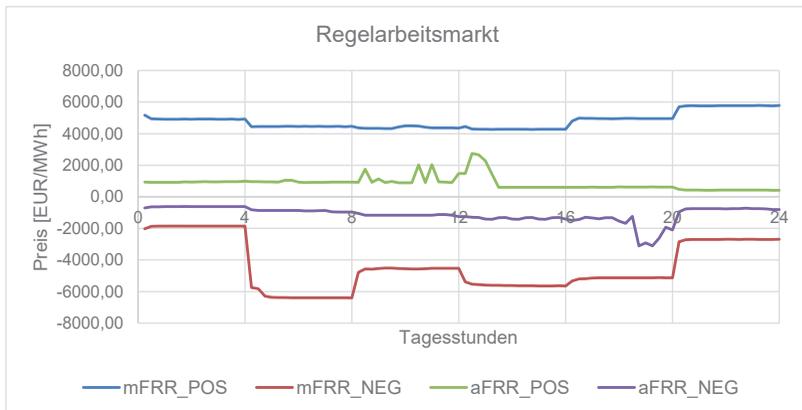
In der Tabelle 43 sind die Regelleistungspreise pro Stunde aufgeführt. Sekundärregelleistung und Minutenreserveleistung hat positive (POS) und negative (NEG) Preise, die in der Tabelle gesondert aufgeführt sind. Der Preis ist pro Stunde, gilt aber für den 4-Stunden-Block.

**Tabelle 43: Ein Beispieltag für die Preise von Regelleistungsmarkt
(Datenquelle: Bundesnetzagentur)**

Am 15-04-2023, 6 Blöcke	FCR (EUR/MW)/h	aFRR_POS (EUR/MW)/h	aFRR_NEG (EUR/MW)/h	mFRR_POS (EUR/MW)/h	mFRR_NEG (EUR/MW)/h
00-04	27,40	2,95	5,06	0,08	0,53
04-08	27,36	4,25	4,46	0,31	0,48
08-12	32,50	8,30	3,64	0,59	0,45
12-16	48,00	2,15	15,55	0,10	4,55
16-20	38,00	8,30	4,80	1,23	1,67
20-24	29,14	7,20	1,36	0,53	0,18

7.3.2.5 Regelleistungsmarkt

Bei Bedarf, werden die Kraftwerke nach ihrer Arbeit bezahlt. Wenn sie ihre Erzeugung reduzieren oder erhöhen, erhalten sie ein Entgelt, das auf dem Regelarbeitsmarkt festgelegt wird. Das bedeutet, dass die Kraftwerke, nachdem sie für ihre Bereitschaft bezahlt wurden, auch für ihre Arbeit bezahlt werden.



**Abbildung 115: Ein Beispieltag für die Preise im Regelarbeitsmarkt
(Datenquelle: Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung)**

7.3.3 Fazit

Der Strommarkt findet sein Gleichgewicht auf der Grundlage von Prognosen für den Verbrauch und die Erzeugung erneuerbarer Energien. Die Vorhersagen sind nie perfekt und ihre Ungenauigkeit ist umso größer, je größer der zu prognostizierende Wert ist. In den Stunden mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien und in den Spitzenzeiten des Verbrauchs steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Systemstabilitätsdienste benötigt werden. Andererseits ist es schwer vorherzusagen, wie hoch die Preise zu welchem Zeitpunkt des Tages sein werden. Aus Sicht des Speicherbetreibers ist die Stromspeicherung mit

Energieverlusten verbunden, und der An- und Verkaufspreis für Strom-Dienstleistungen muss so hoch sein, dass die Speicheranlage keine Verluste macht. Eine Betriebsstrategie erfordert eine zuverlässige Prognose, um die Risiken aus Sicht eines Stromspeicherbetreibers zu minimieren. In Anbetracht der Tatsache, dass der Markt für Regelleistungsarbeit seit 2017 neu ist und sich mit der Zeit weiterentwickeln wird, ist der Markt eine Option für Erlöse. Der Regelleistungs-Arbeitsmarkt ist ein vielversprechender Markt, der mit mehr erneuerbaren und weniger konventionell eingespeisten Stromnetzen wachsen wird. Daher sind drehzahlvariable Maschineneinheiten mit ihrem flexiblen Betrieb von Vorteil. Die Strommärkte und der Betrieb von bestehenden Pumpspeicherkraftwerken deuten darauf hin, dass eine konventionelle Betriebsweise immer noch am sinnvollsten ist.

7.4 Netzanbindung

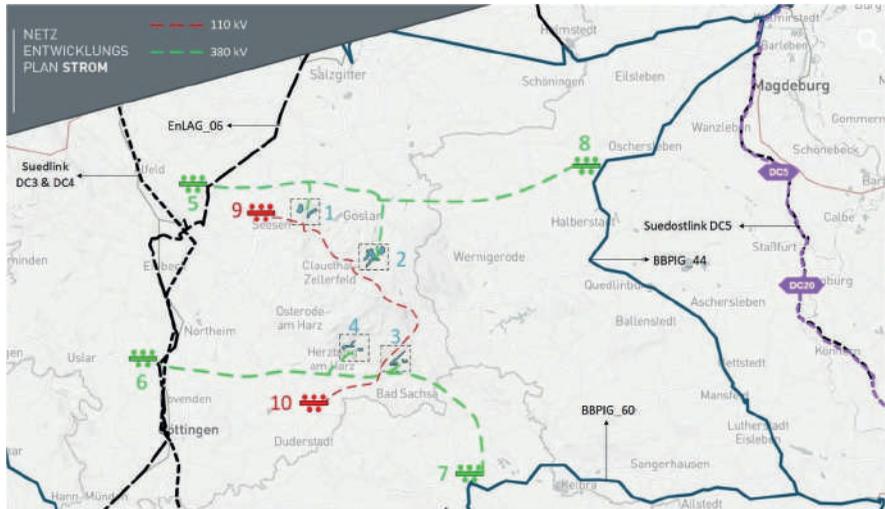
Nachdem das in dieser Studie berechnete Energiespeicherpotential der vier PSW in der Region Westtharz mit ca. 1 GW Leistung ermittelt wurde, stellte sich die Frage, wie diese an das Netz angeschlossen werden könnten. Der erste Ansatz bestand darin, die bestehenden Übertragungsleitungen in der Umgebung der Standorte zu ermitteln. Es gibt öffentlich angekündigte Netzentwicklungspläne für zu bauende Übertragungsleitungen. Einige dieser Pläne sind genehmigt und werden bereits gebaut, andere befinden sich in der Planungs- und Genehmigungsphase. Diese Pläne wurden untersucht, um ein Bild des Netzplans vor Ort zu zeichnen. Bundesnetzagentur ist vielmehr der Ansicht, dass der Ausbau des Stromnetzes für ein mit erneuerbaren Energien betriebenes Energiesystem nicht ausreicht (Neumann 2012).

Die bestehenden, im Bau befindlichen und in Planung befindlichen Leitungen können in drei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Kategorie ist die 110-kV-Spannungsebene, die nur für den Standort Huneberg eine Anschlusslösung vorsieht. Die zweite Kategorie ist die 380-kV-Spannungsebene des Übertragungsnetzes, die eine Option für alle Standorte mit Energiespeicheranlagen darstellt. Die dritte Kategorie ist der Anschluss an eine Hochspannungsgleichstromübertragungsleitung. Diese drei Optionen wurden auch mit dem Projektpartner Harz Energie GmbH sowie den Netzbetreibern Avacon Netz GmbH (Verteilnetzbetreiber) und Tennet GmbH (Übertragungsnetzbetreiber) diskutiert. In den Gesprächen haben sie ihre Ansichten über einen möglichen Energiespeicher in ihrem Netz dargelegt.

Diese Verbindungsvarianten wurden miteinander verglichen und Schlussfolgerungen gezogen.

7.4.1 Netzanbindung der Standorte

Alle Standorte liegen im Naturschutzgebiet im Harz. In der Umgebung der Standorte befinden sich 110-kV-, 380-kV- und HGÜ-Leitungen. Sie sind in Abbildung 116 dargestellt und Informationen zu den Leitungen sind auf der Website der Bundesnetzagentur öffentlich zugänglich.



- | | | | |
|-------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1 PSW Innsertetal | 2 PSW Okertal | 3 PSW Odertal | 4 PSW Siebertal |
| 5 USW Lamspringe | 6 USW Hardegsen | 7 USW Wolframshausen | 8 USW Schwanebeck |
| 9 USW Münchehof | 10 USW Pöhle | | |

Abbildung 116: Übersichtskarte – Netzinfrastruktur rund um die Standorte
(eigene Darstellung nach 50Hertz Transmission GmbH et al. und Harz Energie Netz GmbH 2017)

7.4.1.1 380-kV-Leitungen

EnLAG_06

Im Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG 2017) sind 24 Netzausbauprojekte gelistet, die zeitnah realisiert werden müssen. Eines von 24 Projekten ist Wahle - Mecklar und hat in den Planungsunterlagen die Nummer 06. Daher wird das Projekt Wahle - Mecklar auch kurz EnLAG_06 genannt. Das Projekt EnLAG_06 beginnt in Wahle mit 380-kV-Doppelreileitungen mit teilweiser Erdverkabelung bis Mecklar.

Das EnLAG_06 verläuft größtenteils parallel zur Freileitung Lehrte-Borken, die mit 220 kV nach dem alten Standard von 1934 betrieben wird. Die Leitung brachte kostengünstigen Strom aus Braunkohle und Wasserkraft in den dicht besiedelten Raum Hannover. Die Bundesnetzagentur begründet den Hintergrund des EnLAG_06 mit dem steigenden

Windenergieertrag im Norden. Durch die Anhebung der Spannungsebene wird die Übertragungsleistung erhöht, was zur Netzstabilität zwischen Südniedersachsen und Nordhessen zukünftig beiträgt. Die Kapazitätserweiterung des Netzes zwischen dem Raum Braunschweig und Fulda wird durch eine 380-kV-Verbindung mit zwei Stromkreisen mit einer Stromtragfähigkeit von bis zu 4.000 A ($S = 2,8 \text{ GVA}$) zu der Netzstabilität beitragen. Nach Angaben der Bundesnetzagentur soll das Projekt EnLAG_06 im Jahr 2024 mit einer Gesamtlänge von 224 km von Wahle bis Mecklar in Betrieb gehen. Die 154 von 224 km der Übertragungsleitung werden mit dem Bau bis zum 30.09.2022 abgeschlossen.

BBPIG_44

Laut dem Gesetz über den Bundesbedarfsplan (BBPIG 2013) soll die BBPIG_44 Stromleitung die 220-kV-Leitungen mit den alten Standards ersetzen. Die Bundesnetzagentur nennt zwei Gründe für die neuen Übertragungsleitungen. Zum einen soll die Thüringer Strombrücke entlastet und zum anderen soll der Redispatch-Bedarf reduziert werden. Der von der Bundesnetzagentur gewählte Trassenkorridor beginnt am Umspannwerk Wolkramshausen und verläuft parallel zu bestehenden 220-kV-Leitungen bis Ebeleben. Der weitere Verlauf der Trasse unterscheidet sich von der alten Leitung bis Vieselbach (Bundesnetzagentur 2021/2) (Bundesnetzagentur 2022/1).

Die Leitung liegt in der Region von 50Hertz Transmission GmbH und die Planfeststellung für die Antragstellung ist im dritten Quartal 2022 abgeschlossen. Wie in den Plänen der Bundesnetzagentur dargelegt, soll die 78 km lange Übertragungsleitung im Jahr 2028 in Betrieb genommen werden.

BBPIG_60

Die Maßnahme BBPIG_60 zielt darauf ab, die bestehende Nord-Süd-Verbindung zwischen Siedenbrünzow und Lauchstädt zu verbessern, um die Witterungsabhängigkeit der Übertragung zu verringern und einige Masten neu zu verkabeln. Insgesamt strebt der Betreiber 50Hertz Transmission GmbH eine Verbesserung der Infrastruktur der bestehenden Leitungen an. Das 439 km lange Projekt befindet sich in der Antragsphase und soll 2029 in Betrieb genommen werden.

7.4.1.2 110-kV-Ringleitung der Harzenergie (Harzring)



Abbildung 117: HS-Netz der Harz Energie Netz GmbH und mögliche 110-kV-Anbindungen des PSW Okertals (Harz Energie Netz GmbH 2017)

Die Leitungen in der Region Harzenergie haben eine Gesamtlänge von 140 km ab Münchehof bis Pöhlde mit 110-kV-Spannung (Bialek 2019). Der Harzring besteht aus den Umspannwerken Münchehof, Clausthal-Zellerfeld, Altenau, Braunlage, Bad Lauterberg, Neuhof, Herzberg und Pöhlde. Die Umspannwerke in den Städten Goslar und Osterode werden von der Avacon Netz GmbH aus dem Hochspannungsteil betrieben.

7.4.1.3 HGÜ-Leitungen

Der Grund, warum Suedlink keine Wechselstromleitung ist, liegt in der Physik. Die Spannung des Wechselstroms kann durch Transformatoren fast verlustfrei erhöht und gesenkt werden. Wenn jedoch Energie über große Entfernungen von mehr als 500 km transportiert werden muss, dann hat die HGÜ-Leitung weniger Verluste als Wechselstrom (Csutar et al. 2022). Der Transport von elektrischer Energie mit Wechselstrom über 500 km würde zu einer Instabilität des Netzes aufgrund zu hoher Blindleistung führen. Trotz riesigen

Umrichterstationen werden HGÜ-Leitungen gebaut, um Windstrom in den industrialisierten Süden Deutschlands zu bringen.

Die HGÜ-Leitung ist kein Standard für das bestehende Netz, und die HGÜ-Leitung darf zurzeit nur zwei Kopplungsstellen mit dem Wechselstromnetz haben. Eine am Anfang in Norddeutschland und eine am Ende in Süddeutschland. Die Kopplungseinrichtungen werden Konverter genannt. Der Konverter hat folgende Eigenschaften:

- Er kann Blindleistung abgeben oder aufnehmen sowie Bedarfsschwankungen schnell und flexibel ausgleichen
- Er funktioniert sowohl als Wechselrichter als auch als Gleichrichter, kann also die Richtung des Stromflusses ändern (TransnetBW GmbH 2018)
- Er kann wie ein Kraftwerk arbeiten und die Aufgaben eines Kraftwerkes wie z. B. Systemdienstleistungen erfüllen
- Aus technischen Gründen wird eine HGÜ-Leitung zurzeit nur mit zwei Koppelstellen betrieben. Abzweigungen, die zwischen zwei Punkten ein- oder ausspeisen, sind nicht vorgesehen (Tophofen 2022)

Suedlink

Auf der Grundlage des Bundesbedarfsplangesetzes wird die Erdverkabelung der Gleichstromleitungen 3 und 4 (DC3 und DC4) priorisiert. Zwei parallele Leitungen mit 525-kV-Gleichspannung ermöglichen eine flexible Übertragung sowohl von Nord nach Süd als auch von Süd nach Nord (Mirschel 2022). Die beiden HGÜ-Leitungen von Wilster und Bergrheinfeld/West sowie Brunsbüttel und Großgartach (Leingarten) werden gemeinsam geplant, gebaut und betrieben. Der größte Teil der Trasse besteht aus 2 x 2 GW Erdkabeln nebeneinander. TenneT TSO GmbH ist für die nördlichen Bauabschnitte und den Konverter in Bergrheinfeld/West und TransnetBW GmbH für die südlichen Bauabschnitte und den Konverter in Baden-Württemberg verantwortlich.

SuedOstLink

Der Bau in Sachsen-Anhalt und Thüringen liegt in der Verantwortung von 50Hertz Transmission GmbH, der Rest ist in Bayern, wo TenneT TSO GmbH zuständig ist. Der SuedOstLink ist rund 540 km lang und liegt zwischen Magdeburg (Wolmirsted) und Landshut (Isar). Die Notwendigkeit von SuedOstLink besteht durch die Entkopplung von Atom- und Kohlekraftwerken in Bayern (Arnold 2022). Nahezu alle Übertragungsleitungen in Nord-Süd-Richtung zielen darauf ab, Windstrom in den Süden zu bringen. Die Tatsache, dass der Norden Deutschlands der Bereich ist, in dem Windstrom überwiegend produziert wird, hat Auswirkungen, vielleicht nicht kurz- oder mittelfristig, aber langfristig, was neue Investitionen in den Norden Deutschlands anzieht.

7.4.2 Mögliche Anschlussvarianten von Standorten und deren Vergleich

Die bestehenden Stromleitungen unterscheiden sich durch ihre Strombelastbarkeit, durch die Standorte ihrer Umspannwerke, durch ihre Technik und auch durch ihre Entfernung zum Westharz. Der Kapazitätsunterschied zwischen Hochspannungs- und Höchstspannungsleitungen ist nennenswert, und die Spannungsebene ist ein Faktor für die Kategorisierung von Varianten. Andererseits ist die Technologie von Wechselstrom und Gleichstrom ein Faktor, der Betriebsunterschiede aufweist. Die Varianten lassen sich als 110-kV-, 380-kV- und HGÜ-Varianten kategorisieren.

7.4.2.1 110-kV-Variante (Harzring)

Die 110-kV-Stromleitung verläuft von Münchehof nach Altenau parallel und von Altenau senkrecht zum USW Pöhlde. Sie hat die technische Fähigkeit, 98 MW Leistung zu übertragen. Eine Kapazitätserhöhung wird vom Betreiber Harzenergie als derzeit nicht geplant angesehen. Daher ist die 110-kV-Leitung der Harzenergie (Harzring) keine Option für alle Standorte mit einer Leistung von etwa 1 GW.

Der vorzugsweise zu realisierende Standort PSW Okertal ist ein Kandidat, um den Harzring zusammen mit dem 110-kV-Netz der Avacon Netz GmbH zu nutzen, es sei denn der Harzring wird ertüchtigt, um die gesamte Leistung aufnehmen zu können. Geplant sind mit PSW Okertal zwei Maschinensätze à 90 MW in der Kaverne. Eine Einheit könnte an den Harzring der Harzenergie in Altenau angeschlossen werden und die andere Einheit im 110-kV-Umspannwerk Oker an das Netz von Avacon Netz GmbH.



Abbildung 118: Einer der 110-kV-Masten der Harzring-Freileitung (Bialek 2019)

7.4.2.2 380-kV-Varianten

Die nächstgelegenen 380-kV-Umspannwerke befinden sich an den Leitungen, die in Süd-Nord-Richtung verlaufen. Die USW Lamspringe und Hardegsen liegen auf der gleichen Linie EnLAG_06 auf der Westseite. Schwanebeck und Wolframshausen liegen auf den Linien BBPIG_44 und BBPIG_60 auf der Ostseite.

Die Standorte sind geologisch durch das Westharzgebirge geteilt und das Gebiet ist ein Naturschutzgebiet. Da in den Naturschutzgebieten ein Baugenehmigungsverfahren schwieriger ist, wäre es pragmatisch, die nördlichen Standorte Oker und Innerste an die nördlichen USW Lamspringe und Schwanebeck, sowie die südlichen Standorte Innerste und Oker an die südlichen USW Hardegsen und Wolframshausen anzubinden.

Als Lösung sind die USW Lamspringe und Schwanebeck (Abbildung 116) die Anbindevarianten für das PSW Okertal und Innerstetal. Beide Pumpspeicherkraftwerke können über 380-kV-Leitungen entweder an Lamspringe oder Schwanebeck angeschlossen werden.

USW Lamspringe für PSW Innerstetal und Okertal

Die bergige Beschaffenheit des Geländes zwingt die Straßen parallel zu den Flussufern zu verlaufen. Geht man davon aus, dass ein ähnlicher Ansatz für die Freileitungen gilt, würde die Leitung in Richtung Norden und dann in Richtung Westen zum Umspannwerk verlaufen. In diesem Fall läge der Knotenpunkt in der Nähe von Langelsheim. Die Autobahn A7 liegt auf dem Weg und eine unterirdische Verlegung ist erforderlich. Dies ist eine erste Abschätzung auf Basis der zuvor genannten Randbedingungen. Die Trasse muss nach Erstellung einer Anschlussbegehung der PSW-Betreiber vom Netzbetreiber untersucht und von den Landesbehörden genehmigt werden.

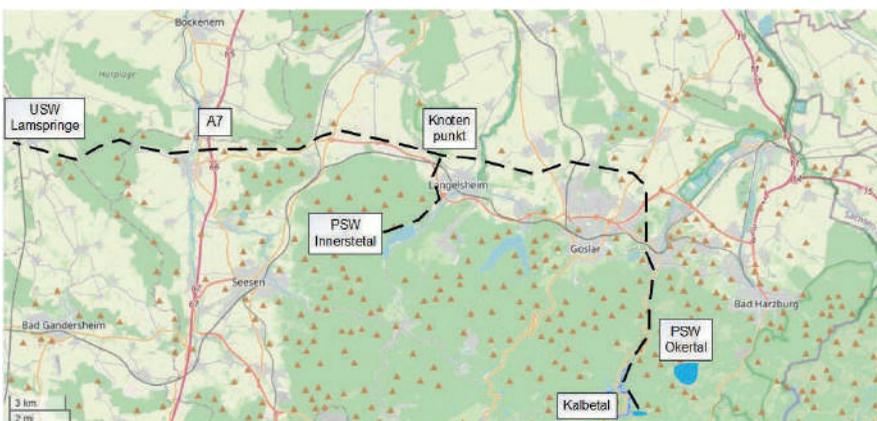


Abbildung 119: Skizze einer möglichen Route zum USW Lamspringe

USW Schwanebeck für PSW Innerstetal und Okertal

Auf der Strecke Wolmirstedt - Schwanebeck - Klostermansfeld wird gemäß den Netzentwicklungsplänen zunehmend mehr Strom aus erneuerbaren Energien installiert werden (Bundesnetzagentur 2021/1). Insbesondere das USW Schwanebeck wird direkt mit erneuerbarem Strom versorgt. Die fluktuierende Stromerzeugung könnte über eine direkte 380-kV-Leitung nach Schwanebeck durch das PSW Okertal und Innerstetal gepuffert und stabilisiert werden. Darüber hinaus ist Schwanebeck an den HGÜ-Umrichter in Wolmirstedt (DC5) angebunden, über den der Offshore-Windstrom in den Süden transportiert wird.



Abbildung 120: Skizze einer alternativen Route zum USW Schwanebeck

USW Hardegsen für PSW Innerstetal und Odertal

USW Hardegsen befindet sich auf derselben Übertragungsleitung wie USW Lamspringe im EnLAG_06. Ähnlich wie die Leitung Lamspringe muss auch die Autobahn A7 per Erdverkabelung zum USW Hardegsen verlegt werden. Für beide Standorte, PSW Odertal und PSW Siebertal, bietet das USW Hardegsen einen möglichen 110-kV-Netzanschluss an.



Abbildung 121: Skizze einer möglichen Route zum USW Hardegsen

USW Wolframshausen für PSW Innerstetal und Odertal

Durch BBPIG_44 "Netzanbindung Südharz" wird die Übertragungskapazität der 400 kV Freileitungen von 2.400 MVA pro Stromkreis gemäß dem Netzentwicklungsplan haben (50Hertz Transmission GmbH und GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH 2020). Für das PSW Odertal und Siebertal könnte das USW Wolframshausen eine Anschlussmöglichkeit darstellen. Wolframshausen ist eine Alternative zum USW Hardegsen und sollte auf die Machbarkeit einer Übertragungsleitung hin untersucht werden.

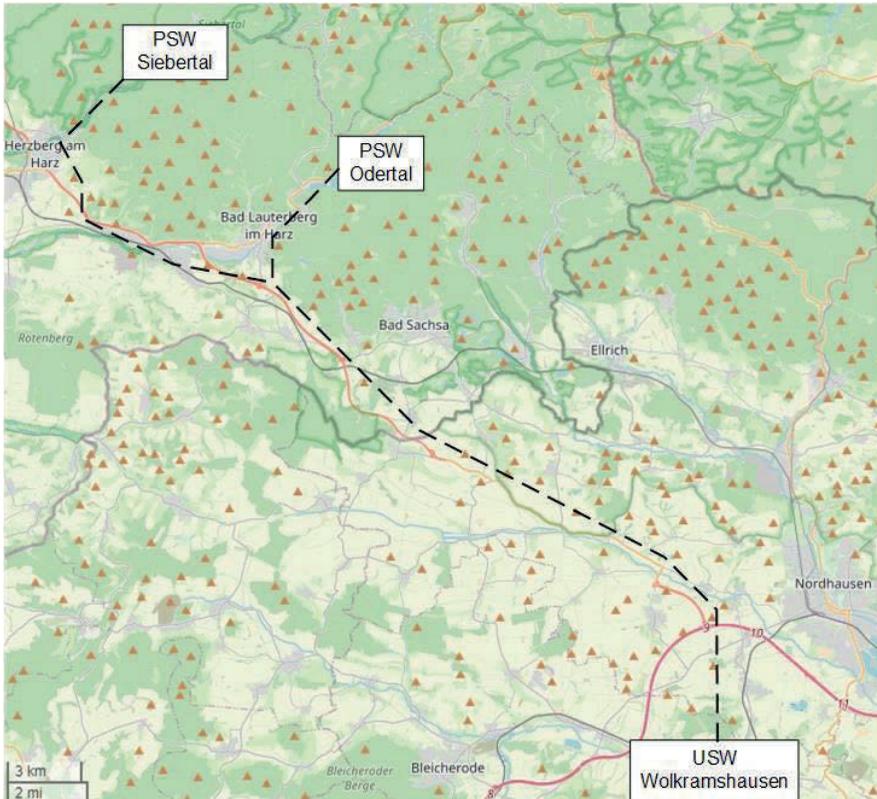


Abbildung 122: Skizze einer alternativen Route zum USW Wolframshausen

7.4.2.3 HGÜ-Varianten

Die HGÜ-Leitungen DC3 und DC4 werden auf der Westseite der Standorte gebaut und auf der Ostseite ist DC5 in Planung. Ein Anschluss an eine HGÜ-Leitung wäre derzeit von den beiden Enden der Leitung her möglich, ist aber keine Option aus Gründen der Entfernung.

7.4.3 Die Diskussion von Anschlussvarianten mit den Netzbetreibern

Avacon Netz GmbH, Tennet TSO GmbH, 50Hertz Transmission GmbH und der Projektpartner Harz Energie GmbH betreiben die Netze, die ein möglicher Anschlusspunkt sein könnten. Es gab dazu einen Ideenaustausch mit Avacon, Tennet TSO und dem Projektpartner Harzenergie.

7.4.3.1 Tennet TSO

Ein netzdienlicher Betrieb der Pumpspeicherkraftwerke in Zeiten, in den das Netz nicht ausgelastet ist, „Turbinenbetrieb“ oder zur Aufnahme des Erneuerbare Stromes zur Einspeisung aus dem Netz „Pumpbetrieb“ ist derzeit in dem Planungssatz nicht berücksichtigt. Denn den Netzbetreibern ist es gesetzlich nicht erlaubt, ein Kraftwerk zu betreiben. Tennet sieht in der zunehmenden Windenergieerzeugung in Norddeutschland eine Schwerpunktverlagerung. Der bestehende Strombedarf in Süddeutschland muss teilweise durch Nord-Süd-Trassen gedeckt werden (siehe HGÜ-Nord-Süd-Trassen). Die HGÜ ist vorteilhaft, wenn die Strecken lang sind, und ein klarer Stromtransport vorliegt. Höchstwahrscheinlich wird sie für die Standorte nicht in Frage kommen. Für das PSW Okertal könnte eine Verbindung der Hochspannungsebene und die anderen der höchstspannungsebene möglich sein.

7.4.3.2 Avacon

Für den Anschluss einer Anlage an das Netz der Avacon sind Netzplanungssätze einzuhalten. Bei der Planung gibt es eine Worst-Case-Situation, die aus zwei Szenarien besteht: Eine Ausspeisung bei hoher Einspeisung erneuerbaren Energien sowie eine hohe Bezugsleistung in Zeiten schwacher Einspeisung aus erneuerbaren Energien. Dabei sind die so genannte FNN-Hinweise der Orientierungsmaßstab für die Netzbetreiber zu berücksichtigen, der besagt, dass jede Anlage über 110 MW Leistung an die höchste Spannungsebene angeschlossen werden sollte. Im Bereich vom USW Oker ist dies im niedrigen zweistelligen MW-Bereich untersuchbar.

7.4.3.3 Harzenergie

Der Projektpartner Harzenergie, der den 110-kV-Harzring betreibt, sieht eine 110-kV-Leitung als mögliche Anschlussvariante an und gibt dazu folgende Anmerkungen an:

Der Netzanschluss erfolgt im USW Altenau mit Einspeisung in den 110-kV-Ring der Harz Energie ausgelegt auf die maximale Belastbarkeit der Betriebsmittel (Leistung ca. 90 MW, pro System). Die Einspeisung erfolgt netzgeführt auf die jeweils verfügbare Größe der freien Kapazität. Dies würde dem Gedanken einer intelligenten Netzinsel entsprechen.

Gemeinsame Nutzung der vorhandenen Leitungstrasse des 110-kV-Ringes und Ausbau desselben wäre möglich, so dass parallel der Harzring in seiner bisherigen Funktion sowie der Netzanschluss des Kraftwerks betrieben werden könnten. In der 110-kV-Ebene könnte pro System von einer Leistung von rund 100 MW ausgegangen werden. Eine Kombination aus beiden vorstehenden Varianten sollten daher näher untersucht werden.

7.4.4 Die Zusammenfassung der Rahmenbedingungen eines Netzanschlusses und Netzzugangs

Netzzugang und Netzanschluss haben unterschiedliche Bedeutungen: Der Netzanschluss ist der erste Schritt und der Netzbetreiber kann den nicht verweigern. Netzanschlussbegehren mit ausgewähltem Umspannwerk, aber auch mit anderen Umspannwerken in der Nähe, wird von dem Netzbetreiber geprüft und wenn das gewählte Umspannwerk elektrisch ausgelegt ist, wird dann begründet ein anderer Netzanschlusspunkt vorgeschlagen. Der Einspeisewillige muss die Übertragungsleitungen bis zu diesem Umspannwerk bauen. Die Eigentumsgrenze ist an der Sammelschiene im Umspannwerk. Idealerweise besitzt der Einspeisewillige ein kleines Grundstück für ein eigenes Schaltfeld wo der Netzbetreiber seine Sammelschiene darauf verlängern kann. Das gesamte Feld wird durch Zäune gesichert und der Eigenbedarf der Anlage soll vom Einspeisewilligen gedeckt werden.

Demgegenüber geht es bei dem Netzzugang um die Nutzung der Übertragungsleitung. Naturgemäß kann man nur eine Prognose über die Belastung machen. Die Prognose der Netzauslastung liefert eine Information, an welchen Tagen und Stunden das Netz elektrisch ausgelastet ist. Das bedeutet, dass obwohl ein Netzanschluss vorhanden ist, die maximale Netznutzung nicht jederzeit zur Verfügung steht.

Die Verfügbarkeit des Netzzugangs durch Prognosen ist eine nützliche Information, um zu entscheiden, ob die Verbindung von diesem Umspannwerk aus sinnvoll ist.

7.4.5 Fazit

Nach einer Untersuchung der Stromnetze in der Umgebung der Standorte ergaben sich mehrere physikalisch mögliche Verbindungen. Diese Varianten wurden mit den Betreibern geteilt, und ihre Gedanken und Ideen wurden gesammelt. Basierend darauf werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

a) 110-kV-Spannungsebene

- Die 110 kV Westharz-Ringleitung (Pöhlde - Braunlage - Altenau - Münchhof) hat die technische Fähigkeit eine Leistung von 98 MW zu übertragen. Durch

Ertüchtigung mit einem zweiten System auf bestehender Trasse könnte eine Verdoppelung der Leistung erreicht werden.

- Die Kapazitätserhöhung einer 110-kV-Leitung auf eine 380-kV-Leitung ist durch den Austausch der Seile nicht möglich (der Harzring liegt auf der 110-kV-Hochspannungsebene). Hierzu wäre ein vollständiger Umbau nötig.
- Wenn eine komplett neue Leitung gebaut werden muss, sollte sie dann nicht unbedingt im Naturschutzgebiet gebaut werden (die Startidee, für Huneberg und Innerste wäre damit eine Verbindung zur Nordseite des Westharzes).

b) 380-kV-Spannungsebene

- Die Strecke vom Kraftwerk bis zum Netzanschlusspunkt ist in jedem Fall Sache des Anschlussnehmers.
- Bei Anschlüssen über 100 MW findet die KraftNAV Anwendung und bereits die Anschlussanfrage ist kostenpflichtig. Diese Kosten werden auch dann nicht erstattet, falls der Anschluss nicht realisiert werden sollte.
- Antrag eines Anschlusses auf der 380-kV-Neubauleitung zwischen Wahle und Mecklar ist möglich. In diesem Fall müsste TenneT TSO GmbH ein neues USW bauen und einen Teil der Kosten auf den Anschlussnehmer umwälzen. Die wahrscheinlichen Umspannwerke auf dieser Strecke wären USW Lamspringe und Hardeggen.
- In ähnlicher Weise wären Wolkranshausen und Schwanebeck die Anschlusspunkte in der Region der 50Hertz Transmission GmbH im Osten.

c) HGÜ-Leitung

- Die HGÜ-Varianten scheiden derzeit aus, da sie derzeit nur mit zwei DC-Anschlusspunkten betrieben werden können. Sogenannte HGÜ-Multiterminalanlagen mit mehr als zwei DC-Anschluss sind in der Entwicklung. Eine weitere Anschlussstelle ist aus technischen Gründen nicht vorgesehen.
- Da Schwanebeck mit Wolmirstedt (BBPIG_60) verbunden ist, würde eine 380-kV-Leitung nach Schwanebeck als indirekte Verbindung zu den HGÜ-Leitungen dienen können. Im Sinne der Netzstabilität wäre es von Vorteil, den fluktuierenden Windstrom am Anfang des nördlichen Teils der HGÜ-Leitung mit einem PSW im Westharz puffern zu können.

Folgende Anschlussvarianten werden auf Grundlage der Randbedingungen aus heutiger Sicht vorgeschlagen, die bei konkreten Planungen (z. B. Machbarkeitsstudie) der Anlagen an den Standorten genauer analysiert werden. Die grobe im folgenden dargestellte Kostenschätzung bezieht sich ebenfalls auf Vorschläge:

- PSW Okertal und Innerstetal mit einer Übertragungsleitung zum USW Lamspringe.

- PSW Siebertal und Odertal mit einer Übertragungsleitung zum USW Hardeggen.
- PSW Okertal könnte an den 110-kV-Harzing angeschlossen werden. Zur Anpassung der PSW-Leistung müsste die Beseilung ertüchtigt werden.

7.4.6 Kosten

Um die Kosten für den Bau einer Übertragungsleitung genauer ermitteln zu können, sollte der Netzbetreiber ein Anschlussbegehren erhalten. Nach der Netzanschlussanfrage, wird zunächst ein Suchkorridor eingerichtet und dann in Abhängigkeit der Detailuntersuchungen (Biotope, Eigentumsverhältnisse, Bodenbeschaffenheit, bereits vorhandene Infrastruktur) eingengt, bis die endgültige Trasse feststeht (TransnetBW GmbH 2022). Deswegen lässt sich eine Trassenverlegung nicht so einfach bestimmen. Als Arbeitshypothese könnte zunächst eine direkte Route angenommen und ein gewisser Aufschlag für eventuelle Umwege eingeplant werden. Da es wichtig ist, Naturschutzgebiete und Städte zu meiden und den großen Straßen zu folgen, wurden vereinfachte Trassen als Arbeitshypothese verwendet. Infrastruktur wie Autobahnen, Kanäle und Eisenbahntrassen werden bei Bedarf mittels einer Horizontalbohrung unterquert. Daher sind die Schätzungen nicht sehr belastbar.

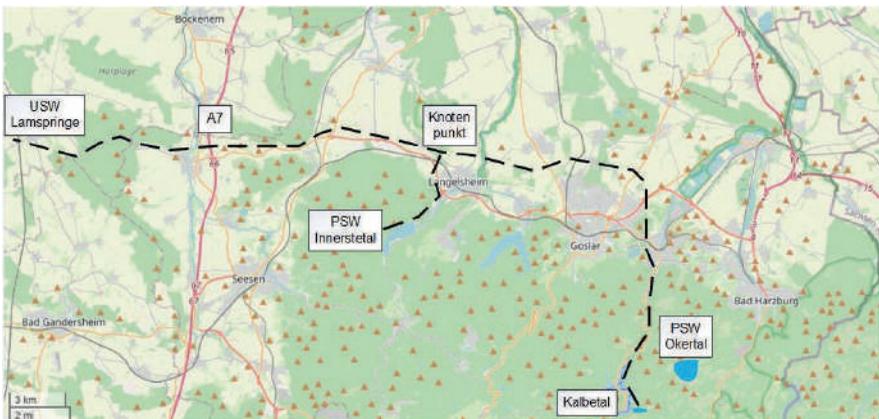
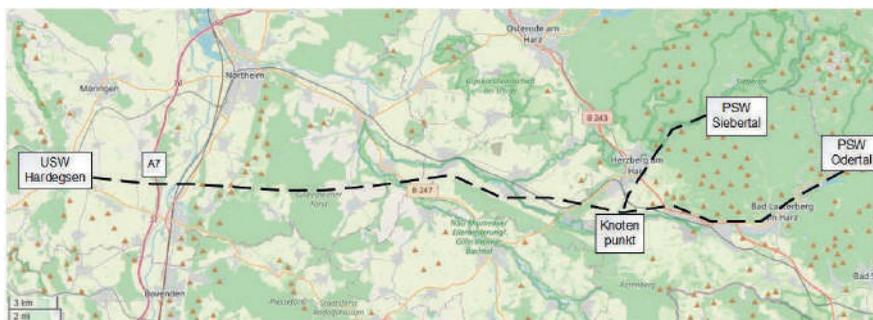


Abbildung 123: Vereinfachte Trasse zum USW Lamspringe

Tabelle 44: Kostenabschätzung für den Anschluss der Standorte Okertal und Innerstetal an das USW Lamspringe (50Hertz Transmission GmbH et al.)

Lamspringe	Anteil km	Leitungskosten Mio. €	Schaltfeld und Transformatorkosten Mio. €	Total Mio. €
Leitungskosten-Okertal	35,2	52,8	9,2	62,0
Leitungskosten-Innerstetal	16,9	25,3	9,2	34,5

**Abbildung 124: Vereinfachte Trasse zum USW Hardegsen****Tabelle 45: Kostenabschätzung für den Anschluss der Standorte Siebertal und Odertal an das USW Hardegsen (50Hertz Transmission GmbH et al.)**

Hardegsen	Anteil km	Leitungskosten Mio. €	Schaltfeld und Transformatorkosten Mio. €	Total Mio. €
Leitungskosten-Siebertal	24,0	36,0	9,2	45,2
Leitungskosten-Odertal	31,0	46,5	9,2	55,7

Eine vereinfachte Kostenschätzung für eine 110-kV-Übertragung speziell für das PSW Okertal würde ca. 30 Mio. € kosten.

8 Sozio- und regionalökonomische Bewertung (AP 7)

Felix Eckenfels, M. Sc.; Prof. Dr. Roland Menges; TU Clausthal

8.1 Inhalte des Arbeitspaketes

8.1.1 Die Bewertungs- und Entscheidungsorientierung des Projektes

Die in den obigen Kapiteln wurden die einzelnen Elemente des EWAZ-Projektes überwiegend separiert betrachtet und aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht analysiert. Aus ökonomischer bzw. sozialwissenschaftlicher Sicht stellt sich nun die Frage, wie sich diese verschiedenen, teilweise komplementären, teilweise aber auch gegenläufigen Projektdimensionen integrieren und entscheidungsorientiert aufbereiten lassen. Selbstverständlich war es nicht Aufgabe des Projektes, eine derartige Entscheidung zu treffen, diese zu simulieren oder auch nur vorzubereiten. Der innovative Ansatz des EWAZ-Projektes besteht vielmehr darin, in einem integrierten Ansatz aufzuzeigen, wie sich mit Blick auf die regionale Anpassung an den Klimawandel (vgl. Kapitel 1 und 2) unterschiedliche Systemdienstleistungen aus

- dem Hochwasserschutz und der Niedrigwasseraufhöhung (vgl. Kapitel 4)
- dem Schutz der Ressource Trinkwasser (vgl. Kapitel 5)
- und der großtechnischen Energiespeicherung (vgl. Kapitel 6)

Investitionsalternativen an unterschiedlichen Standorten generieren und bewerten lassen. Bei dieser entscheidungsorientierten Bewertung müssen natürlich neben den unterschiedlichen gekoppelten Systemdienstleistungen auch deren monetäre Kosten (aus der Investition und dem Betrieb der Anlagen) und der Verzehr an Umweltressourcen (z. B. aufgrund der Eingriffe in Flora und Fauna) Berücksichtigung finden.

Das Vorgehen und die Ergebnisse des EWAZ-Projektes sind hier grundsätzlich komplementär angelegt:

- Ein wesentlicher, das Projekt prägender Strang von Aktivitäten zielte auf die wissenschaftlich-präzise Ausleuchtung der potentiellen Einflüsse, die auf ein Investitionsprojekt mit gekoppelten Systemdienstleistungen einwirken und von ihm ausgehen. Hierbei ist z. B. zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse des zweiten Kapitels zur integrierten regionalen wasserwirtschaftlichen Modellierung und Optimierung auf verschiedenen Annahmen beruhen, die sich aufgrund der Systemzusammenhänge notwendigerweise von denen unterscheiden, die bei der Bewertung der einzelnen Projektalternativen getroffen werden müssen.
- Ein weiterer Strang der Aktivitäten zielte auf die Verdichtung der wissenschaftlichen Teilinformation und ihrer entscheidungsorientierten Aufbereitung zur Lösung des Problems, wie einzelne alternative Investitionsprojekte mit gekoppelten

Systemdienstleistungen zu bewerten sind. Bei diesen Aktivitäten muss notwendigerweise vom gesamten Systemzusammenhang, der beispielsweise im zweiten Kapitel prägend war, zu Gunsten von *ceteris-paribus*-Annahmen abstrahiert werden. Eine sinnvolle ökonomische Bewertung alternativer Projektstandorte lässt sich nur durchführen, wenn diese Alternativen isoliert für sich stehend betrachtet werden, um unter *ceteris-paribus*-Annahmen die von ihnen ausgehenden Systemdienstleistungen bewerten zu können. Auf diesem Strang liegt der Schwerpunkt der in diesem Kapitel vorgestellten Methoden und Ergebnisse. Die damit einhergehenden Vereinfachungen und Verkürzungen komplexer ingenieur- und naturwissenschaftlicher Systemzusammenhänge impliziert nicht, dass im Projekt die eigenen Ergebnisse geringgeschätzt werden. Sie ist lediglich Ausdruck der Tatsache, dass für die Entwicklung und Bewertung der Projektalternativen diese Annahmen notwendig sind.

Im EWAZ-Projekt stehen damit zwei Aspekte im Vordergrund: Wie lassen sich relevante Alternativen generieren, die ein derartiges Nutzenprofil bedienen können? Und wie lassen sich diese Alternativen bewerten? Im *ersten* Schritt geht es um die Generierung und Beschreibung von möglichen Projektalternativen und -standorten. Aufgrund der Gegebenheit geologischer Faktoren (wie etwa Flussverläufen) und bereits vorhandener Wasserspeicherkapazitäten wurden an mehreren Standorten des Oberharzes solche technisch realisierbaren Projektalternativen generiert, von denen simultane, positive Zielbeiträge zu allen o.g. Zieldimensionen ausgehen. In Bezug auf die Entwicklung von Pumpspeichern ist die Untersuchungsregion beispielsweise durch ein Mittelgebirge aus tragfähigem Gestein und nicht mehr genutzten Bergwerken geprägt, so dass die für den Pumpspeicherbetrieb relevante Höhendifferenz zwischen tiefem Schacht und Oberbcken genutzt werden kann. Die Nutzbarmachung älterer Bergwerke ist zwar kostenintensiv, vermeidet aber zu einem Teil die üblichen Umwelt- oder Akzeptanzprobleme, die ansonsten mit derartigen Infrastrukturprojekten verbunden sind. Beim *zweiten* Schritt, d.h. beim Vergleich und der Bewertung dieser Alternativen stellt sich das Problem, auf welche Weise die in den verschiedenen Zieldimensionen potentiell generierten Nutzen in Form von Energiespeicherung und Ökosystemdienstleistungen zu ermitteln, gegeneinander zu gewichten und zu vergleichen sind. Zudem sind diese Zielbeiträge den Kosten des Projektes (Investitionskosten und Kosten des laufenden Betriebs) und den damit verbundenen Eingriffen in die Landschaft und die natürlichen Ressourcen (Verlust an Flora und Fauna, Intensität des Landschaftseingriffs, usw.) gegenüberzustellen.

Bei Anwendung einer ökonomischen Wohlfahrts- oder zumindest einer Kosten-Nutzen-Analyse stellt sich jedoch das Problem der Wertbestimmung. Zwar stehen bei der elektrischen Energieerzeugung aus Pumpspeichern oder bei der Trinkwassererzeugung Marktdaten zur Wertermittlung zur Verfügung, aber es ist schwierig, die sich aus dem marktlichen Betrieb einer derartigen Anlage ergebenden Werte gegen den Wert von

Ökosystemdienstleistungen zu verrechnen. Diese sind erstens aufgrund ihrer Mehrdimensionalität schwierig zu quantifizieren sind und zweitens (etwa im Bereich des Hochwasserschutzes) dem nicht-marktlichen Bereich der öffentlichen Daseinsvorsorge nicht-ausschließbarer öffentlicher Güter zugeordnet. Gerade die simultane Generierung und Betrachtung von ökologischen und energiewirtschaftlichen Systemdienstleistungen stellt jedoch eine wesentliche Innovation dieses Infrastrukturprojektes dar.

Vor dem Hintergrund dieser Komplexitäten wurde im Projekt mit dem Analytischen-Hierarchie-Prozess (AHP) ein Entscheidungsmodell aus dem Bereich des Innovationsmanagements zur Anwendung gebracht (Götze und Bloech 2002). Die Eckpunkte dieses Verfahrens bestehen darin, dass die Struktur eines gegebenen Zielsystems entwickelt und angenommen wird, das für die Bewertung einer Menge hinreichend definierter und unabhängiger Alternativen angewandt werden soll. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Gewichtung der einzelnen Zieldimensionen nicht exogen vorgegeben oder hergeleitet werden muss, sondern von den individuellen Entscheidern bzw. den Mitgliedern eines Entscheidungsgremiums im Zuge einer kollektiven Präferenzangabe ermittelt wird. Die Informationen über die wesentlichen Eigenschaften und die erwarteten Zielbeiträge der Alternativen in den verschiedenen Dimensionen werden in Form von Alternativensteckbriefen aggregiert und veranschaulicht. Die Bewertung der Alternativen wird anschließend von den Entscheidern auf Basis von Paarvergleichen vorgenommen. Bevor in den folgenden Abschnitten auf die Operationalisierung des AHP-Entscheidungsverfahrens und die damit realisierten Ergebnisse eingegangen wird, sollen jedoch zunächst seine theoretischen Grundlagen kurz skizziert werden.

8.1.2 Der Analytische-Hierarchie-Prozess: Methodisches Vorgehen

Die im Projektantrag formulierte Zielstellung einer „ökonomischen Bewertung von Handlungsoptionen als Entscheidungshilfe bei der Planung integrierter Maßnahmen zu den Systemdienstleistungen Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung, Trinkwasserversorgung und Energieproduktion bzw. -speicherung“ zielt auf die mehrdimensionale Bewertung über teilweise konfligierende Dimensionen. In der entscheidungstheoretischen Literatur werden Entscheidungsverfahren, die dem Kriterium der Rationalität bei multidimensionalen Zielen genügen sollen, als multikriteriell bezeichnet. Die Lösung multikriterieller Probleme impliziert sowohl bei Individualentscheidungen als auch – wie im Falle von EWAZ – bei Gruppen- bzw. Kollektiventscheidungen die folgenden Elemente (Laux 2007, Zimmermann und Gutsche 1991):

- Mehrere Ziele: Es sind simultan mehrere Ziele oder Eigenschaften der Alternativen zu berücksichtigen. Diese Ziele müssen vor Beginn des Entscheidungsprozesses klar herausgearbeitet und dann als gegeben angenommen werden. Die

verfügbaren Alternativen sind später anhand dieser Ziele zu bewerten, um eine rationale Entscheidung zu treffen. Die verfügbaren Alternativen müssen also anhand ihrer Merkmalsausprägungen in den relevanten Zieldimensionen unabhängig voneinander beschreibbar sein. Hierbei sollte die Fokussierung auf ein Hauptziel und das Ausblenden anderer Ziele vermieden werden.

- Zielkonflikte: Bei den Ausprägungen der Alternativen in den verschiedenen Zieldimensionen sind die Zielerreichungsgrade einiger Kriterien negativ miteinander verknüpft: Die Verbesserung in einem Kriterium führt häufig zur Verschlechterung in mindestens einem Anderen, so dass Vor- und Nachteile über unterschiedliche Ziele gegeneinander abzuwägen sind. Hinzu kommt, dass die Zielerfüllungsgrade in einer Zieldimension häufig nur schlecht mit den Zielerfüllungsgraden in anderen Dimensionen verglichen werden können.
- Bestimmung der Lösung des Entscheidungsproblems: Es soll diejenige unter den verfügbaren Alternativen ausgewählt werden, die bei simultaner Berücksichtigung aller Ziele am günstigsten erscheint.

Üblicherweise werden multikriterielle Problemlösungsmechanismen in der Entscheidungstheorie in zwei Klassen zerlegt. Die *erste* Klasse besteht aus den sog. MODM-Verfahren (Multi Objective Decision Making). Diese beschreiben das Entscheidungsproblem als mathematisches Optimierungsproblem. Hier wird angenommen, dass sich optimale Handlungsalternativen mit Hilfe einer Zielfunktion und entsprechend formulierten Nebenbedingungen generieren lassen, die den Lösungsraum auf zulässige Lösungen einschränken. Die explizite Angabe einer Zielfunktion ermöglicht die Formalisierung von Trade-Offs zwischen den einzelnen Kriterien. Innerhalb des zulässigen mehrdimensionalen Lösungsraumes wird also mittels mathematischer Optimierung eine optimale Alternative identifiziert. Da im vorliegenden EWAZ-Projekt die verfügbaren Alternativen nicht endogen auf Basis logischer bzw. mathematischer Überlegungen auf der „grünen Wiese“, sondern aus dem Status quo vorhandener Standort- und Infrastrukturfaktoren zu identifizieren waren, wurde mit dem AHP ein Verfahren der *zweiten* Klasse multikriterieller Verfahren zur Anwendung gebracht: Bei den sog. MADM-Verfahren (Multi Attributive Decision Making) ist bereits eine konkrete Menge an zulässigen Lösungen bekannt. Zunächst werden die vom Entscheider gewählten Kriterien miteinander verglichen, um ihre relativen Gewichte festzulegen. Anschließend werden die Alternativen anhand ihrer Attribute miteinander verglichen. Der Vorteil dieser Verfahren liegt darin, dass die Ausprägungen der Zieldimensionen auch in nicht-quantitativer Form berücksichtigt werden können. Angenommen wird lediglich, dass die Entscheider in der Lage sind, eine relationale Präferenzäußerung vorzunehmen. Bei MADM-Verfahren steht also die Suche nach der besten Alternative im Vordergrund – oder im besten Falle sogar die komplette Reihung aller Lösungen.

Beispiele für derartige Verfahren sind die *Kosten-Nutzen-Analyse* und die *Nutzwertanalyse*. Kosten-Nutzen-Analysen kommen beispielsweise bei Investitionsprojekten der öffentlichen Hand zur Anwendung, sind für das EWAZ-Projekt jedoch wenig geeignet, da es hierfür notwendig ist, alle relevanten Informationen über Kosten und Nutzen der betrachteten Projekte in monetären Größen auszudrücken. Hierbei könnte zwar wie etwa im wasser- oder elektrizitätswirtschaftlichen Bereich des EWAZ-Projektes auf Marktwerte zurückgegriffen werden, um andere Dimensionen von Ökosystemdienstleistungen ebenfalls mit der Kosten-Nutzen-Analyse zu erfassen, müssten jedoch weitreichende Annahmen getroffen werden, die sich einem kollektiven Entscheidungsprozess weitgehend entziehen. Von der Anwendung der Nutzwertanalyse (Scoring-Modell) wurde im Projekt ebenfalls abgesehen. Diese hat zwar gegenüber der Kosten-Nutzen-Analyse den Vorteil, dass auch nicht-monetäre Zieldimensionen berücksichtigt werden können. Die Entscheider erhalten hierbei die Aufgabe, die Gewichtung der Ziele explizit vorzunehmen und anschließend die Alternativen innerhalb der Zieldimensionen zu bewerten. Die multiattributive Bewertung einer Alternative stellt sich im Ergebnis dann als eindimensionaler Nutzwert dar. Dieses eher pragmatische Vorgehen der Nutzwertanalyse wird im Verfahren des AHP zwar im Prinzip ähnlich abgebildet, allerdings stellt das AHP-Modell ein mathematisch anspruchsvolleres, auf Matrizenoperationen beruhendes Verfahren dar, in dem die Informationen über die Gewichtung der Zieldimensionen und die Bewertung der Alternativen innerhalb dieser Zieldimensionen nicht absolut erhoben werden, sondern durch eine Serie von paarweisen Vergleichen gewonnen werden. Der Begriff „hierarchisch“ impliziert, dass die Zieldimensionen auf verschiedene Hierarchiestufen heruntergebrochen werden.

Als multiattributives Entscheidungsverfahren wurde der Analytische Hierarchie-Prozess (AHP) in den 1970er Jahren vom Mathematiker Saaty als Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse vorgestellt (Saaty und Vargas 2012). Diese Weiterentwicklung bezog sich v. a. darauf, dass die Gewichte und die Transformation von Merkmalsausprägungen nicht mehr direkt (wie bei der Nutzwertanalyse) vom Entscheider erfragt werden, sondern aus paarweisen Vergleichen ermittelt werden. Dieses Verfahren wird in der angewandten Entscheidungsforschung insbesondere im Bereich des Managements, der Produktentwicklung oder dem Gesundheitswesen angewandt. Es wird vor allem für Gruppenentscheidungen und im Rahmen von Expertenbefragungen verwendet. Entscheidungstheoretisch basiert das Verfahren auf einer Reihe von Rationalitätsaxiomen, auf deren Basis eine hierarchische Gliederung des mehrdimensionalen Entscheidungsproblems angenommen und die Bewertung mittels Paarvergleichen vorgenommen werden kann.

Beim AHP wird das Oberziel in Zieldimensionen „aufgelöst“ um die zur Verfügung und zur Bewertung anstehenden Projekte im Hinblick auf diese Dimensionen bewerten zu können. Dieses Vorgehen lässt sich anhand der folgenden Prozessschritte beschreiben:

- Schritt 1: Das Oberziel wird in Unterziele zerlegt (diese Zielstruktur ist als gegeben zu betrachten, da sie bereits im Projektantrag definiert wurde).
- Schritt 2: Zwischen den Zielen wird ein paarweiser Vergleich vorgenommen. Daraus werden an den Gewichtungen der Zieldimensionen abgeleitet. Die hierbei an die Entscheider gestellte Frage lautet: Wie wichtig ist diese Zieldimension für das Oberziel?
- Schritt 3: Für jede Zieldimension werden Vergleiche zwischen den Alternativen vorgenommen. Die hier gestellte Frage lautet: Wie schneidet jede Alternative in dieser Zieldimension ab? Alle Zieldimensionen werden auf diese Weise abgearbeitet.
- Schritt 4: Es erfolgt eine Verknüpfung der im Zuge von Schritt 2 und 3 gewonnenen Informationen. Da die Entscheidung von einer Gruppe von Entscheidungsträgern (Projektteam und Praxisbeirat) vorgenommen wurde, sind diese Informationen auch einer Aggregation zuzuführen.
- Schritt 5: Es erfolgt eine Prüfung der Konsistenz der gewonnenen Informationen insbesondere in Bezug auf die Heterogenität (Konsens in der Gruppe) und Sensitivitätsanalysen, beispielsweise in Bezug auf Veränderungen der Gewichtungen von Zieldimensionen.

8.1.3 Projektstandorte und Alternativenbeschreibung

Gegenstand der Bewertung, die mittels der Methode des AHP vorgenommen wurde, sind die Alternativen, die im Projekt mit Blick auf die gekoppelten Ökosystemdienstleistungen entwickelt wurden. Über alle Arbeitspakete hinweg wurden vom Projektteam insgesamt 5 Projektalternativen entwickelt. Die Alternativen unterscheiden sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Standorte, ihrer geologischen und ökologischen Standortbedingungen und der dortigen Infrastruktur hinsichtlich des Profils der von ihnen potentiell ausgehenden Systemdienstleistungen.

Das Profil der jeweiligen Alternativen wurde in den Projektsteckbriefen anschaulich aufbereitet, die den Entscheidern des Gremiums im Verfahren vorgelegt wurden. Die wesentlichen Informationen zu den Alternativen lassen sich in den folgenden Abschnitten kurz zusammenfassen.

8.1.3.1 Alternative 1: Okertalsperre (Okertalsperre - Huneberg)

An der Okertalsperre besteht mit dem Steinbruch auf dem Huneberg ein potentiell Oberbecken bereit. Die Okertalsperre soll daher zum Teil um das Volumen des Hunebergs erweitert werden, um so in Zukunft mehr Speicherkapazität für die bestehenden Systemdienstleistungen am Standort bereitstellen zu können. Ziel ist die Schaffung einer zusätzlichen Reserve für Trockenperioden, sowie die Bereitstellung von zusätzlicher Rückhalteraum für starke Hochwasserereignisse. Weiterhin soll der Huneberg in Kombination mit der Okertalsperre als Pumpspeicherkraftwerk genutzt werden. Da die Okertalsperre ein Zwischenspeicher für die Rohwasser der Trinkwassergewinnung darstellt, wird eine bauliche Trennung innerhalb der Okertalsperre angestrebt, um den Hauptstaukörper vor den direkten Auswirkungen der Pumpspeichersequenzen zu schützen.

Aktuelle Nutzungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Trinkwasser-Beileitung

Maßnahme zielt auf:

- Verbesserung Hochwasserschutz
- Verbesserung Niedrigwasseraufhöhung
- Erweiterung um Energiespeicherung

Tabelle 46: Profil Alternative 1 (Okertalsperre)

Wassermengenwirtschaft	Hochwasserschutz	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion der Hochwasservolumina um 24 % (Messstelle Schladen)
	Niedrigwasseraufhöhung	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Niedrigwasserereignisse um 49 % reduziert (Messstelle Schladen)
Trinkwasser		Niedrige Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Leichte Erhöhung des Trinkwasserangebotes der Granetalsperre durch Huneberg (Überleitung zur Granetalsperre kann genutzt werden)
Elektrischer Speicher (Kapazität in MWh)		720
Kosten (Baukosten in €)		296 Mio.
Umwelt und Natur		<ul style="list-style-type: none"> • Flächenverbrauch: Wasserspeicherräume im Landschaftsschutzgebiet (0,26 km²) und im Bereich des Tagebaus Huneberg (0,43 km²) • Raumwiderstände: Landstraße (3,5 km) und Wanderwege (0,6 km)

8.1.3.2 Alternative 2 Innerstetalsperre (obere Innerstetalsperre - Hohenstein)

Im Innerstetal besteht schon eine (untere) Innerstetalsperre, welche gegenwärtig dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung und der Trinkwassergewinnung dient. Der Standort soll um die Systemdienstleistung Energiespeicherung erweitert werden, so dass ein oberirdisches Oberbecken auf dem Höhenzug Hohenstein geplant ist. Zugleich soll weiterer Speicherraum für die bestehenden Nutzungen in Form von Hochwasserschutz und Rohwasserspeicherung für die Trinkwassergewinnung geschaffen werden. Hierfür ist zwischen den Ortslagen Wildemann und Lautenthal die Errichtung einer „oberen Innerstetalsperre“ vorgesehen.

Aktuelle Nutzungen der „unteren“ Innerstetalsperre:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Trinkwassergewinnung

Maßnahme zielt auf: Neubau der „oberen“ Innerstetalsperre zur Verbesserung von:

- Energiespeicherung
- Hochwasserschutz
- Trinkwasserbereitstellung

Tabelle 47: Profil Alternative 2 (Innerstetalsperre)

Wassermengenwirtschaft	Hochwasserschutz	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Hochwasservolumina um 17 % reduziert (Messstelle Heinde)
	Niedrigwasseraufhöhung	Keine Relevanz (keine Auswirkungen auf Niedrigwasserereignisse an der Messstelle Heinde)
Trinkwasser		Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Rohwasserbereitstellung (2,1 hm³/a) durch vermehrte Überleitung zur Granetalsperre
Elektrischer Speicher (Kapazität in MWh)		1220
Kosten (Baukosten in €)		268 Mio.
Umwelt und Natur		<ul style="list-style-type: none"> • Flächenverbrauch im Landschaftsschutzgebiet (0,74 km² an der oberen Innerste; 0,30 km³ in Hohenstein) • Raumwiderstände: Landstraße (4 km), Radweg, Wanderweg, ein Kriegerdenkmal und 4 Flurstücke an der oberen Innerste; Förster-Bauer-Weg (0,5 km) und Grünlandfläche (320 m²) in Hohestein

8.1.3.3 Alternative 3: Odertalsperre (Odertalsperre - Stöberhai)

Am Standort Odertalsperre ist eine Erweiterung der Nutzungen Trinkwassergewinnung und Energiespeicherung vorgesehen. Hierzu muss der Standort um ein Oberbecken erweitert werden. Weiterhin wird zum Schutz des Hauptstaukörpers eine bauliche Abtrennung eines Bereiches innerhalb der Talsperre vorgeschlagen.

Aktuelle Nutzungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung

Maßnahme zielt auf: Verbesserung in den Dimensionen:

- Trinkwasserbereitstellung
- Energiespeicherung

Tabelle 48: Profil Alternative 3 (Odertalsperre)

Wassermengenwirtschaft	Hochwasserschutz	Keine Relevanz (Messstelle Lindau)
	Niedrigwasseraufhöhung	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Niedrigwasserereignisse um 1500 % erhöht.*
Trinkwasser		Deutliche zusätzliche jährliche Rohwasserbereitstellung in der Region (9 hm ³)
Elektrischer Speicher (Kapazität in MWh)		1380
Kosten (Baukosten in €)		277 Mio.
Umwelt und Natur		<ul style="list-style-type: none"> • Flächenverbrauch durch Wasserspeicherräume im Landschaftsschutzgebiet (0,095 km² in Stöberhai) • Raumwiderstände (Stöberhai): Förster-Bauer Weg (0,7 km), Wanderwege (0,5 km), Freizeit- und Erholungsflächen (Grünflächen 0,036 km²), Denkmal (ehem. NATO-Horchposten), Kontrollpunkt für Harzer Wandernadel, Grünland (6491 m²)

* Durch hohe Trinkwasserentnahme bei gleichbleibendem Dargebot und unveränderten Betriebsregeln ergibt sich eine signifikante Verschlechterung der Niedrigwassersituation. Bei Realisierung bzw. Detailplanung dieser Variante müssten entsprechend die Betriebsregeln und ggf. zusätzliche Überleitungen geprüft werden.

8.1.3.4 Alternative 4: Siebertalsperre (Sierbertalsperre - Knollen)

Im Siebertal können verschiedene Systemdienstleistungen an einem bisher ungenutzten und un bebauten Standort etabliert werden. Hierzu ist geplant, eine Talsperre zwischen den Ortslagen Sieber und Herzberg zu errichten. Auf dem Knollen kann ein oberirdisches Oberbecken für ein Pumpspeicherkraftwerk entstehen. Das Wasser für die Trinkwassergewinnung soll oberhalb der Ortschaft Sieber beim Zusammenfluss von Lonau und Sieber mittels eines Ableitungswehrs abgezogen werden und kann auf die Aufbereitungsstandorte Grane- oder Sösetalsperre verteilt werden.

Aktuelle Nutzungen:

- Keine

Maßnahme zielt auf: Neubau und Beiträge in den Dimensionen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Energiespeicherung
- Trinkwassergewinnung

Tabelle 49: Profil Alternative 4 (Siebertalsperre)

Wassermengenwirtschaft	Hochwasserschutz	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Hochwasservolumina um 55 % reduziert (Messstelle Lindau)
	Niedrigwasseraufhöhung	Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Niedrigwasserereignisse um 21 % reduziert (Messstelle Lindau)
Trinkwasser		Keine Auswirkungen
Elektrischer Speicher (Kapazität in MWh)		620
Kosten (Baukosten in €)		208 Mio.
Umwelt und Natur		<ul style="list-style-type: none"> • Flächenverbrauch: Wasserspeicherräume im Bereich eines Nationalparks, Landschafts- und Naturschutzgebietes (Siebertalsperre 0,79 km², Knollen 0,06 km²) • Raumwiderstände: Landstraße (3,7 km), Radweg, Wanderwege, 6 Flurstücke inkl. Paradies-Kiosk (Veranstaltungsort mit insgesamt 0,02 km²), Industrie- und Gewerbefläche der Kategorie Lagerort (1783 m²).

8.1.3.5 Alternative 5: Granetalsperre (Erhöhung Granetalsperre)

Die Erhöhung der Granetalsperre um bis zu 15 m dient in erster Linie der Sicherstellung der Trinkwassergewinnung in der Zukunft. Das Volumen des Standortes kann durch eine solche Erhöhung des Staudammes mehr als verdoppelt werden.

Aktuelle Nutzungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Trinkwasserabgabe
- Stromerzeugung

Erhöhung der Staumauer mit den Zielen:

- Erhöhung der Trinkwasserabgabe

Tabelle 50: Profil Alternative 5 (Granetalsperre)

Wassermengenwirtschaft	Hochwasserschutz	Niedrige Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Hochwasservolumina um 5 % reduziert (Messtelle Heinde)
	Niedrigwasseraufhöhung	Keine Relevanz
Trinkwasser		Hohe Relevanz: <ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche Rohwasserbereitstellung in der Region: 6,6 hm³/a
Elektrischer Speicher (Kapazität in MWh)		-
Kosten (Baukosten in €)		20 Mio.
Umwelt und Natur		<ul style="list-style-type: none"> • Flächenverbrauch: Wasserspeicherräume im Bereich eines Nationalparks sowie Landschaftsschutzgebietes durch Zunahme der Talsperrenoberfläche (1,15 km²) • Raumwiderstände: Landstraße (13 km), Rad- und Wanderwege (5 km)

8.1.4 Bestimmung, Hierarchisierung und Gewichtung des Zielsystems

Die Struktur des in Abbildung 125 dargestellten Zielsystems (nicht aber die jeweilige Gewichtung) wurde im Prinzip dem ursprünglichen Projektantrag entnommen.

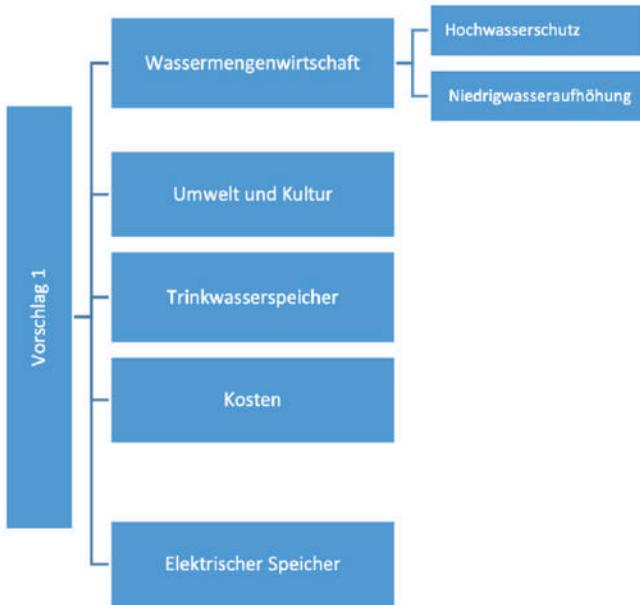


Abbildung 125: EWAZ-Zielsystem

Die Zieldimensionen des Hochwasserschutzes und der Niedrigwasseraufhöhung wurden aufgrund ihrer engen Zusammenhänge der Oberdimension „Wassermengenwirtschaft“ zugeordnet. Auf derselben, höchsten Ebene des Zielsystems wurden die Dimensionen „Trinkwasserspeicher“ und „elektrischer Speicher“ als zentrale Ökosystemdienstleistungen des Infrastrukturprojektes angesiedelt. Da neben den Nutzen dieser Ökosystemdienstleistungen auch der Ressourcenverzehr des jeweiligen Projektes Gegenstand des Entscheidungsprozesses sein sollte und bei der Bewertung berücksichtigt werden muss, wurden die Zieldimensionen „Umwelt und Kultur“ (für die mit der Infrastrukturmaßnahme verbundenen Eingriffe in die Natur) und Kosten (zur Abbildung der Investitionskosten) ebenfalls auf dieser Zielebene angesiedelt.

Wie bereits oben erläutert, wurden in einem zweiten Schritt die Gewichte der einzelnen Zieldimensionen durch paarweise Vergleiche ermittelt. Der Ansatz des AHP-Prozesses besteht hierbei *nicht* (wie etwa bei einfachen Varianten der Nutzwertanalyse) darin, die Entscheider mit der einfachen Frage zu konfrontieren, ob sie eine bestimmte

Zieldimension i (z. B. die elektrische Speicherfunktion) für wichtiger als eine andere Zieldimension j (z. B. die Wassermengenwirtschaft) halten oder wie viele von z. B. insgesamt 100 Punkten sie für die Gewichtung von i und j vergeben würden. Der Ansatz des AHP besteht vielmehr darin, dass die Entscheider alle Zieldimensionen (auf der jeweiligen Ebene des Zielsystems) miteinander vergleichen. Bei dem Vergleich der Zieldimension i und j wird daher nicht nur die Frage gestellt, ob i wichtiger sei als j , sondern wie viel wichtiger i im Vergleich zu j sei. Für die Ermittlung dieser Gewichtung wird eine Likert-Skala mit Werten von 1 bis 9 verwendet, deren Interpretation der folgenden Abbildung 126 entnommen werden kann.

Skalenwert	Definition	Interpretation
9	absolut dominierend	Größtmöglicher Bedeutungsunterschied
7	sehr viel größere Bedeutung	Sehr viel größere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung	Erheblich größere Bedeutung
3	etwas größere Bedeutung	Etwas größere Bedeutung
1	Gleiche Bedeutung	Gleiche Bedeutung
$\frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7}, \frac{1}{9}$	Reziprokwerte, falls j i vorgezogen wird.	

Abbildung 126: Likert-Skala zur Bestimmung der Zielgewichte

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass bei Anwendung dieser Methode eine Reihe von Rationalitätsanforderungen (Axiomen) bei den Entscheidern vorausgesetzt werden. Hierzu zählt beispielsweise die Vollständigkeit, mit der vorausgesetzt wird, dass alle für die Bewertung notwendigen Informationen in den auf den verschiedenen Hierarchiestufen abgebildeten Zieldimensionen und den Alternativen abgebildet sind. Auch wird beispielsweise Reziprozität angenommen. Nimmt man beispielsweise an, dass ein Entscheider der Auffassung ist, Zieldimension i von „sehr viel größerer Bedeutung“ sei als Zieldimension j , so wird er gleichzeitig der Auffassung sein, dass Merkmal j von „sehr viel geringerer Bedeutung“ ist als Merkmal i (Elemente i und j sind also paarweise miteinander so zu vergleichen, dass gilt: $a_{ij} = 1/a_{ji}$).

Bei einem vollständigen paarweisen Vergleich aller Zieldimensionen einer Ebene ergibt sich dann eine Matrixdarstellung. Für den vereinfachenden Fall, dass das Zielsystem aus nur einer Hierarchieebene mit 3 Ziele besteht und ein Entscheider $(3 \times 2)/2 = 3$ paarweise Vergleiche dieser Zieldimensionen vornimmt, können seine Präferenzangaben (hier sei willkürlich „6“, „3“ und „1/3“ angenommen) in der folgenden Abbildung 127 als Ausgangspunkt der Ermittlung der Zielgewichte w benutzt werden. Die Zielgewichte von 0,65 für

Ziel 1, 0,1 für Ziel 2 und 0,25 für Ziel 3 ergeben sich aus dem normierten Eigenvektor der Zeilensumme über die jeweils zuvor normierten Spaltenwerte.

	Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3	Normierte Spaltenwerte [1, 0]			Zellen- summe	Normierter Eigen- vektor w
Ziel 1	1	6	3	0,67	0,6	0,69	1,96	0,65
Ziel 2	1/6	1	1/3	0,11	0,1	0,08	0,29	0,1
Ziel 3	1/3	3	1	0,22	0,30	0,23	0,75	0,25
Summe	3/2	10	13/3	1	1	1	3	1

Abbildung 127: Bestimmung der Zielgewichte (vereinfachtes Beispiel mit drei Zieldimensionen)

Soll der AHP als Gruppenprozess durchgeführt werden, so werden als nächstes die individuellen Bewertungen zur Gruppenbewertung aggregiert. Es bieten sich augenscheinlich unterschiedliche Methoden an: arithmetisches oder geometrische Mittel, Medianwert und Modalwert. Tatsächlich ist aber nur die Aggregation durch das geometrische Mittel zulässig. Nur diese Transformation erfüllt die Anforderung des Transitivitätsaxioms (Goepel 2018, Mühlbacher 2013, Saaty und Vargas 2012).

Die einzelnen Bewertungen n_{ij}^m der Entscheider $m = 1, \dots, M$ können wie folgt zur gemeinsamen Bewertung n_{ij}^{cons} zusammengeführt werden. Die Aggregation über das geometrische Mittel ist sowohl für die Gewichte, als auch für die Alternativenbewertung zulässig (Goepel 2018, Mühlbacher 2013, Saaty und Vargas 2012).

$$n_{ij}^{cons} = \left(\prod_{m=1}^M n_{ij}^m \right)^{1/M}$$

mit:

- n_{ij}^{cons} = gemeinsame Bewertung aller Entscheider
- m = Laufindex der Entscheider
- M = Gesamtanzahl der Entscheider
- n_{ij}^m = Bewertungen der einzelnen Entscheider

8.1.5 Bewertung der Alternativen

In einem dritten Schritt sind nun die verfügbaren Alternativen zu bewerten. Auch hier sind paarweise Vergleiche der Alternativen vorzunehmen. Diese paarweisen Vergleiche sind innerhalb aller Zieldimensionen vorzunehmen. Auch bei dieser Alternativenbewertung kommt die in Abbildung 126 dargestellte Likert-Skala zum Einsatz. Allerdings bezieht sich nun beispielsweise die Präferenzaussage „7“ beim Alternativenvergleich nun darauf, dass eine bestimmte Alternative in der fraglichen Zieldimension „deutlich besser“ bewertet wird als eine andere. In der folgenden Abbildung 128 wird beispielhaft das Vorgehen zur Bestimmung der Zielbeiträge von drei verfügbaren Alternativen innerhalb der Zieldimension „Hochwasserschutz“ abgebildet. Aus den $(3 \times 2)/2$ Alternativenvergleichen mit den jeweiligen (willkürlich gewählten) Präferenzangaben „8“, „4“ und „1/2“ lässt sich über dieselben Transformationen wie in Abbildung 127 ein normierter Eigenvektor w ableiten, der die Zielbeiträge dieser drei Alternativen für das Ziel „Hochwasserschutz“ angibt.

Zieldimension: Hochwasser- schutz	Alter- native 1	Alter- native 2	Alter- native 3	Normierte Spaltenwerte [1, 0]			Zeilen- summe	Normierter Eigenvektor w
Alternative 1	1	8	4	8/11	16/19	8/11	2,30	0,77
Alternative 2	1/8	1	1/2	1/11	2/19	1/11	0,29	0,1
Alternative 3	1/4	1/2	1	2/11	1/19	2/11	0,41	0,13
Summe	11/8	19/2	11/2	1	1	1	3	1

Abbildung 128: Bestimmung der Zielbeiträge innerhalb der Dimension „Hochwasserschutz“ (vereinfachtes Beispiel mit drei Alternativen)

8.1.6 Integration von Zielgewichten und Alternativenbewertungen

Der entscheidende methodische Schritt des AHP besteht nun in der Verknüpfung der Gewichte mit den jeweiligen Alternativenbewertungen in den jeweiligen Zieldimensionen. Die Verknüpfung von Gewichten und Bewertung ergibt den Gesamtnutzen Φ jeder Alternative (Goepel 2018, Mühlbacher 2013, Saaty und Vargas 2012):

$$\Phi(A_i) = \sum_{j=1}^J w_j n_{ij}$$

mit:

- Φ = Nutzwert
- A_i = Alternative i
- w_j = Gewichtung des Ziels j

n_{ij} = Bewertung der Alternative i hinsichtlich der Zieldimension j

Aus den Gesamtbewertungen der Alternativen lässt sich nun ein Ranking ermitteln. Dieses Ranking entspricht einer rationalen Präferenzordnung, die nun von mehreren Seiten aus analysiert und hinterfragt werden kann. Inkonsistenzen dieser Präferenzordnung können sich natürlich bei sehr vielen Zielen und Alternativen ergeben, bei denen die Anzahl der notwendigen paarweisen Vergleiche sehr hoch ist. Allerdings enthält AHP-Modell einige Verfahren zur Konsistenzprüfung, zudem erlaubt es Sensitivitätsanalysen, mit denen sich beispielsweise die Auswirkungen von Gewichtungsänderungen w_j auf das Alternativenranking untersuchen lassen.

Im folgenden Abschnitt wird die Implementierung und die Anwendung des AHP im EWAZ-Projekt näher erläutert und die dabei entwickelte Reihung der im Abschnitt 8.1.3 vorgestellten Alternativen näher analysiert. Die Vorteile dieser Methodik liegen vor allem darin, dass der gesamte Bewertungsprozess aus paarweisen Vergleichen besteht, die ausgehend von den Präferenzangaben der einzelnen Gruppenmitgliedern zu einer kollektiven Präferenz aggregiert werden. Eine „Objektivierung“ der Entscheidung setzt ein gut strukturiertes Entscheidungsproblem voraus, erfordert jedoch keine restriktiven Annahmen zur Gestalt einer individuellen Nutzenfunktion oder einer sozialen Wohlfahrtsfunktion, bei denen eine Übersetzung von „Messgrößen“ in „Nutzengrößen“ vorgenommen werden muss. Die praktischen Grenzen dieses Verfahrens liegen jedoch dort, wo bei einer Vielzahl von Zieldimensionen und Alternativen zu viele paarweise Vergleiche notwendig sind.

8.2 Ergebnisse

Im Laufe des Projektverlaufes zeigt sich, dass der 6. Standort „Hochwasserschutz für Goslar“ realisiert werden soll. Dieser 6. Standort dient lediglich dem Hochwasserschutz und seine Durchführung steht nicht in Konkurrenz zu den anderen Standorten. Daher wird er in der weiteren Abwägung in diesem Kapitel nicht berücksichtigt.

In der Beiratssitzung am 31.08.2022 wurde die Bewertung von zehn Teilnehmern vorgenommen. Der Projektbeirat ist ein Konsortium zivilgesellschaftlicher Akteure, die das Projekt begleiten und in die Bevölkerung tragen. Eingeladen waren: Energieversorger, Wasserversorger, Bürgermeister, Landräte, der Niedersächsische Landesbetrieb Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz, sowie Umweltverbände. Diese begleiteten das Projekt von Anfang an und hatten so Möglichkeit, sowohl mit der Methode, als auch dem zur Erhebung verwendeten Online-Tool vertraut zu sein. Zur Erhebung wurde das Tool „AHP Online System“ von Klaus Goepel genutzt. Es handelt sich dabei um eine kostenlose, per Web-Browser erreichbare Möglichkeit, auch in größeren Gruppen, Zielgewichte zu erheben und Performancebewertungen durchzuführen. Eine ausführliche Beschreibung des Tools durch den Entwickler findet sich in (Goepel 2018).

Die Sitzung zur Datenerhebung war wie folgt gegliedert:

Übersicht über das Gesamtprojekt	<ul style="list-style-type: none"> •Vorstellen der Problemstellung •Betonung des integrierten Projektzusammenhangs
Erklärung der Zieldimensionen	<ul style="list-style-type: none"> •Aufzeigen welche Zieldimensionen genutzt werden •Neutrale und sachliche Erklärung wie wir Performance in einer Dimension abbilden
Einführung in das Online-Tool	<ul style="list-style-type: none"> •Einführung in die Bedienoberfläche •Vorstellen des bebilderten Manuals
Erhebung der Zielgewichte	<ul style="list-style-type: none"> •Die Bewertungen werden eigenständig vorgenommen •Pro Entscheider sind hierbei $\frac{5 \cdot 4}{2} + \frac{2 \cdot 1}{2} = 11$ Vergleiche vorzunehmen
Vorstellung der Standorte	<ul style="list-style-type: none"> •Neutrale und sachliche Vorstellung der Standorte •Austeilen und Vorstellen der Steckbriefe
Erhebung der Alternativenbewertung	<ul style="list-style-type: none"> •Die Bewertungen werden eigenständig vorgenommen •Pro Entscheider sind hierbei $6 \cdot \frac{5 \cdot 4}{2} = 60$ Vergleiche vorzunehmen

Abbildung 129: Ablauf der Beiratssitzung zur Datenerhebung am 31.08.2022

Die Ergebnisse der Auswertung zunächst im Überblick:

		Lokale Prio	Globale Prio	Okertal-sperre	Obere Innerste	Odertal-sperre	Siebertal-sperre	Granetal-sperre	
Trinkwasser		0,444	0,444	0,177	0,275	0,14	0,05	0,358	
Umwelt und Kultur		0,071	0,071	0,485	0,12	0,129	0,052	0,213	
Kosten		0,062	0,062	0,198	0,124	0,101	0,129	0,447	
Elektrischer Speicher		0,189	0,189	0,245	0,277	0,352	0,09	0,036	
Wassermengenwirtschaft	0,234	Hochwasserschutz	0,756	0,177	0,418	0,251	0,059	0,18	0,092
		Niedrigwasserschutz	0,244	0,057	0,493	0,119	0,097	0,189	0,103
			Nutzwert:		27,4%	24,2%	16,0%	9,4%	23,1%

Abbildung 130: Überblick über das Ergebnis der Auswertung

Zeilenweise werden die Zieldimensionen dargestellt. Die globalen Gewichte der Zieldimensionen finden sich in der Spalte „Globale Prio“. Die Performancebewertungen einer Alternative sind spaltenweise aufgetragen. Die Konsistenzratio CR beträgt $2,1 \% = 0,021$, die Ergebnisse sind damit valide und müssen nicht verworfen werden.

Zunächst soll die Auswertung der Zielgewichte vorgestellt werden. Hierbei fällt auf, dass der Dimension Trinkwasser mit 44,5 % sehr viel Gewicht beigemessen wird.

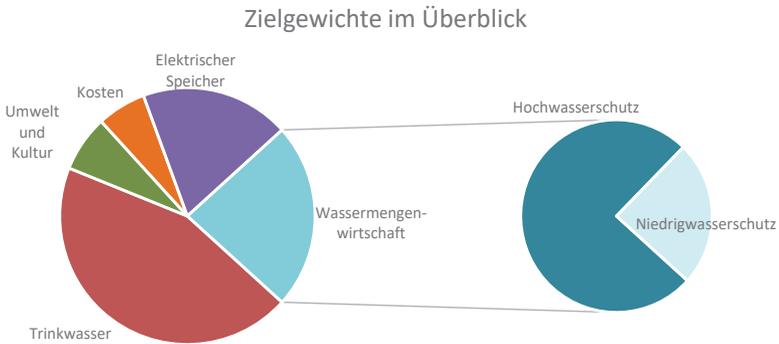


Abbildung 131: Zielgewichte im Überblick

Wie in Kapitel 8.1.6 beschrieben, werden Zielgewichte und Bewertung miteinander zum Nutzwert verknüpft. Diese Nutzwerte sind in Abbildung 130 der untersten Zeile zu entnehmen. Daraus ergibt sich folgendes Ranking¹:

1. Okertalsperre
2. Obere Innerstetalsperre ~ Granetalsperre
3. Odertalsperre
4. Siebertalsperre

Die Performancebewertungen aus Abbildung 130 können übersichtlich als Spinnennetzdiagramm dargestellt werden:

¹ Es ergibt sich auf Platz 2 ein Gleichstand, da der Abstand mehrere Bewertungen zueinander so klein ist, dass sich die zugehörigen Fehlerglieder überlappen.

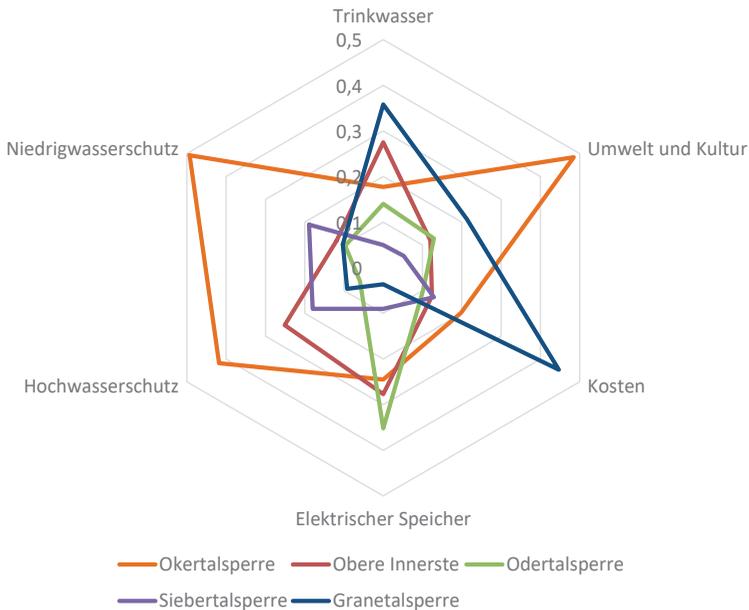


Abbildung 132: Performancebewertungen in den Zieldimensionen (1 pu \triangleq 100 %)

Abbildung 132 können die Stärken und Schwächen der jeweiligen Standorte gut entnommen werden. Gut zu sehen ist, dass der Standort Okertalsperre in vielen Dimensionen sehr gut abscheidet. In den Dimensionen Kosten und Trinkwasser schneidet die Erhöhung der schon bestehenden Granetalsperre zwar besser ab, dieser Standort ist aber in allen anderen Dimensionen der Okertalsperre deutlich unterlegen.

Die Darstellung der Performance-Bewertungen (n_{ij}) ist zwar einfach aus den Daten der Erhebung aus Abbildung 130 zu entnehmen, ist aber für eine genauere Interpretation noch unvollständig, so wird nämlich unterschlagen, dass die unterschiedlichen Zieldimensionen unterschiedlich wichtig sind. Im Folgenden wird daher das Spinnennetzdiagramm aus den Teilnutzenwerten ($w_j n_{ij}$) erstellt. Der Vorteil ist, dass nun auch die Größe der Ausschläge unterschiedlicher Zieldimensionen miteinander verglichen werden können.

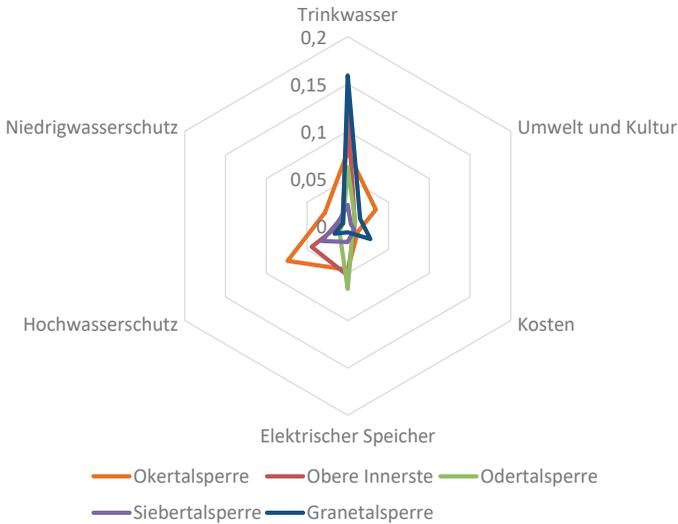


Abbildung 133: Teilnutzenwerte in den Zieldimensionen (1 pu \triangleq 100 %)

In Abbildung 133 ist gut zu erkennen, dass der Dimension Trinkwasser sehr viel Gewicht beigemessen wird. Schon die nächsten Dimensionen sind nur noch circa halb so wichtig.

8.2.1 Sensitivitätsanalyse

In der Sensitivitätsanalyse werden Grenzen ermittelt bei denen eine Änderung im Alternativenranking eintritt. Dies kann wahlweise durch eine Änderung bei den Gewichten oder bei der Alternativenbewertung hervorgerufen werden.

Der kritische Gewichtungsfaktor ist jenes Gewicht, dass die kleinste relative Änderung seines Gewichtes benötigt um die Reihenfolge zweier Alternativen zu ändern. Im vorliegenden Datensatz ist das der Gewichtungsfaktor der Dimension elektrischer Speicher. Ein Senken der 18,9 % um 4,4 Prozentpunkte auf 14,5 % löst den Gleichstand zwischen Obere Innerstetalsperre und Granetalsperre:

Tabelle 51: Obere Innerstetalsperre und Granetalsperre

Altes Ranking	Neues Ranking, bei Änderung des kritischen Gewichtes
1. Okertalsperre	1. Okertalsperre
2. Obere Innerstetalsperre ~ Granetalsperre	2. Granetalsperre
3. Odertalsperre	3. Obere Innerstetalsperre
4. Siebertalsperre	4. Odertalsperre
	5. Siebertalsperre

Die kritische Performancebewertung ist jene Bewertung, die die kleinste relative Änderung benötigt, um die Reihenfolge zweier Alternativen zu ändern. Im vorliegenden Datensatz ist das die Bewertung der Granetalsperre in der Dimension Trinkwasser. Erhöhung der 35,8 % um 2,7 Prozentpunkte ändert Ranking zwischen Granetalsperre und Obere Innerstetalsperre. Damit würde dann die Grane der Oberen Inneren vorgezogen:

Tabelle 52: Neues Ranking, bei Änderung der kritischen Performancebewertung

Altes Ranking	Neues Ranking, bei Änderung der kritischen Performancebewertung
1. Okertalsperre	1. Okertalsperre
2. Obere Innerstetalsperre ~ Granetalsperre	2. Granetalsperre
3. Odertalsperre	3. Obere Innerstetalsperre
4. Siebertalsperre	4. Odertalsperre
	5. Siebertalsperre

8.2.2 Alternative Szenarien

Es wurden Szenarien entwickelt, wie sich die Bewertung ändern kann, wenn wahlweise dem elektrischen Speicher oder den Kosten mehr Gewicht beigemessen wird.

Szenario 1 prüft wie weit das Gewicht des elektrischen Speichers angehoben werden müsste, bevor eine Änderung auf Platz eins im Ranking eintritt. Dazu müsste das Gewicht von 18,9 % um 41 Prozentpunkte auf 59,9 % angehoben werden:

Tabelle 53: Neues Ranking, Szenario 1 bei Änderung des Gewichtes „elektrischer Speicher“

Altes Ranking	Neues Ranking, bei Änderung des Gewichtes „elektrischer Speicher“ auf 59,9 %
1. Okertalsperre	1. Obere Innerste
2. Obere Innerstetalsperre ~ Granetalsperre	2. Okertalsperre
3. Odertalsperre	3. Odertalsperre
4. Siebertalsperre	4. Granetalsperre
	5. Siebertalsperre

Szenario 2 prüft wie weit das Gewicht der Kosten angehoben werden müsste, bevor eine Änderung auf Platz eins im Ranking eintritt. Dazu müsste das Gewicht von 6,2 % um 14 Prozentpunkte auf 20,2 % angehoben werden:

Tabelle 54: Neues Ranking, Szenario 2 bei Änderung des Gewichtes „Kosten“

Altes Ranking	Neues Ranking, bei Änderung des Gewichtes „Kosten“ auf 20,2 %
1. Okertalsperre	1. Granetalsperre
2. Obere Innerstetalsperre ~ Granetalsperre	2. Okertalsperre
3. Odertalsperre	3. Obere Innerste
4. Siebertalsperre	4. Odertalsperre
	5. Siebertalsperre

8.2.3 Fazit

Der ausgewählte AHP hat sich aus Sicht der Autoren für die Fragestellung bewährt, so konnte er seine Stärken in Form Flexibilität Dank seiner paarweisen Vergleiche voll ausspielen und auch sehr unterschiedliche Kriterien miteinander bewerten. Die Berechnung aller Evaluationsmatrizen und die Konsistenzprüfung selbiger ist zwar mathematisch sehr umfangreich, hierzu war aber mit AHP-OS ein sehr gut geeignetes Tool gefunden. Positiv hervorzuheben ist, dass die kostenlose Software nach gewisser Einarbeitung gut zu bedienen ist und stets stabil lief. Die Auswertung der Datenerhebung konnte eine klare und robuste Präferenzreihung ermitteln. Aufgrund der guten Anwendungsmöglichkeiten auch für nicht-monetäre Ziele, oder allgemein für Kriterien zwischen denen es schwierig ist explizit Trade-offs anzugeben, ist zu erwarten, dass der AHP sich auch in Deutschland weiter etablieren wird.

9 Literaturverzeichnis

50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (2021): Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, Erster Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber – Kostenschätzungen. Amprion GmbH. Online verfügbar unter: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-02/NEP_2035_2021_1_Entwurf_Kostenschaetzungen_0.pdf

50Hertz Transmission GmbH; GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH (2020): Netz-anbindung Südharz (BBPLG Nr. 44) – "Höchstspannungsleitung Lauchstädt – Wolkramshausen – Vieselbach; Drehstrom 380 kV". Berlin: 50Hertz Transmission GmbH.

Alterach, J.; Bruno, G.; Danelli, A.; Federici, P.; Constantino, G. (2016): Calcolo del potenziale di accumulo energetico mediante impianti di pompaggio idroelettrico sotterraneo. Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.P.A., S. 104. Milano.

Arnold, C. (2022): SuedOstLink+. 50Hertz Transmission GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.50hertz.com/de/Netz/Netzausbau/ProjekteanLand/SuedOstLinkPlus>

Atlas Copco Rock Drills AB (2007): Mining methods in underground mining. 2. Edition. Örebro.

ATT (2009): Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren gemäß DIN 197000. Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren-Schriftenreihe, Band 7. München: Oldenbourg Industrieverlag.

ATT (2013): Zielkonflikte bei gleichzeitiger Nutzung von Trinkwassertalsperren als Pumpspeicherbecken. Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. Online verfügbar unter: <https://www.trinkwassertalsperren.de/wp-content/uploads/2021/06/Positionspapier-Pumpspeichernutzung.pdf>

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014): Analyse der Pumpspeicherpotentiale in Bayern. Endbericht. Augsburg.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble - Audit und Ensemblebildung. UmweltSpezial. Augsburg.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): Aufgaben staatlicher Wasserspeicher. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/wasser/staatliche_wasserspeicher/aufgaben_wasserspeicher/index.htm

Beck, H.-P. (2016): Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen. Göttingen: Cuvillier Verlag. DOI: ISBN 978-3-7369-9423-2

- Beck, H.-P.; Schmidt, M. (2011): Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. S. 864. Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal. ISBN 978-3-942216-54-8
- Bialek, C. (2019): Harz Energie Netzgesellschaft überprüft Hochspannungsring. EDV-Medienverlag Lutz Pusecker. Online verfügbar unter: <https://www.eseltreiber.de/gehe/produkte/nutzen.php?pg=abo&id=10080#:~:text=Mit%20dem%20Hub-schrauber%20C3%BCberpr%C3%BCft%20die,ab%20und%20steigt%20wieder%20aufw%C3%A4rts>
- Bielitz, E. (2021): Kosten für Talsperrenneubau. 29.01.2021 an Klaus Röttcher.
- Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M.; Höpp, S.; Jensen, C.; Jochumsen, K.; Möller, J.; Krähenmann, S.; Nilson, E.; Rauthe, M.; Razafimaharo, C.; Rudolph, E.; Rybka, H.; Schade, N.; Stanley, K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Bundesnetzagentur (2021/1): Anhang zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, Erster Entwurf. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2021/2): Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 9 Abs. 3 NABEG und § 42 UVPG. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2022/1): Netzausbau-Leitungsvorhaben. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2022/2): Erster Trassenkorridor für das Vorhaben Schraplau/Obhausen – Wolkramshausen – Vieselbach festgelegt. Online verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/20220704_Vorhaben44.html
- Csutar, V. G.; Kallikuppa, S.; Charles, L. (2022): Introduction to HVDC Architecture and Solutions for Control and Protection. Texas Instruments. Online verfügbar unter: <https://www.ti.com/lit/an/sloa289b/sloa289b.pdf?ts=1688127598321>
- Dalelane, C.; Früh, B.; Steger, C.; Walter, A. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. Journal of applied Meteorology and Climatology, Vol. 57, S. 477-491. DOI: 10.1175/JAMC-D-17-0141.
- DIN 19700-10 (2004): Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen.
- DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen - Teil 11: Talsperren.
- DIN 19700-14 (2004): Stauanlagen - Teil 14: Pumpspeicherbecken.
- DIN 4048-1 (1987): Teil 1: Wasserbau; Begriffe; Stauanlagen.

- Donner, C. (2018): Überlegungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes. Harzwasserwerke GmbH. Hildesheim.
- Düsterloh, P. D. (2020): Applied rock mechanics - Lecture. Technische Universität Clausthal. Clausthal Zellerfeld.
- DWA (2012): Dichtungssysteme im Wasserbau - Teil 1: Erdbauwerke (DWA-M 512-1). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef.
- Echterhoff, J.; Meißner, J. (2015): Die gewässerchemischen und chemisch-physikalischen Prozesse einer Trinkwassertalsperre unter Berücksichtigung eines dynamisierten Talsperrenbetriebs. ENERWA-Publikation, Nr. 2. Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. Aachen.
- Eggelsmann, F. (2016): Antrag der Harzwasserwerke GmbH auf Neufassung der wasserrechtlichen Bewilligung für das Nordharzverbundsystem - Erläuterungsbericht. Harzwasserwerke GmbH. Hildesheim.
- Eggelsmann, F. (2019): Antrag der Harzwasserwerke GmbH auf Neufassung der wasserrechtlichen Bewilligung für die Odertalsperre - Erläuterungsbericht. Harzwasserwerke GmbH. Hildesheim.
- Förster, K.; Meon, G.; Marke, T.; Strasser, U. (2014): Effect of meteorological forcing and snow model complexity on hydrological simulations in the Sieber catchment (Harz Mountains, Germany), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4703–4720. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.5194/hess-18-4703-2014>, 2014.
- Giesecke, J.; Mosonyi, E.; Heimerl, S. (2009): Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. 5. aktualisierte und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10328719>
- Goepel, K. D. (2018): Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process* 10 (3).
- Götze, U.; Bloech, J. (2002): Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hakala, K.; Addor, N.; Teutschbein, C.; Vis, M.; Dakhlaoui, H; Seibert, J. (2019): Hydrological Modeling of Climate Change Impacts. Kapitel in: Maurice, P. (Ed.): *Encyclopedia of Water*. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0062>
- Harz Energie Netz GmbH (2017): Darstellung der Netzsituation der Harz Energie Netz GmbH. Osterode am Harz.
- Harzwasserwerke GmbH (1982): Erhöhung der Granetalsperre - Erläuterungsbericht. Hildesheim.

- Hashimoto, T.; Stedinger, J.; Loucks, D. (1982): Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system evaluation. *Water Resources Research*, 18, S. 14–20.
- Herrmann, R. (2011): Planung und Dimensionierung eines PSW zwischen einem Steinbruch und einer Talsperre mit besonderer Herausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten bei kritischen Randbedingungen. Masterarbeit an der Hochschule Bremen (unveröffentlicht). Bremen.
- Hübener, H.; Bülow, K.; Fookan, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S.; Keuler, K.; Menz, C.; Mohr, V.; Radtke, K.; Ramthun, H.; Spekat, A.; Steger, C.; Toussaint, F.; Warrachsagi, K.; Woldt, M. (2017): ReKliEs-De - Ergebnisbericht. Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. Hamburg.
- Jacob, D.; Kottmeier, C.; Petersen, J.; Rechid, D.; Teichmann, C. (2017): Regionale Klimamodellierung. Kapitel in: Brasseur, G. P. (Hrsg.); Jacob, D. (Hrsg.); Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_4
- Kaiser, F.; Busch, W. (2014): Erneuerbare erfolgreich ins Netz integrieren durch Pumpspeicherung. Göttingen: Cuvillier Verlag. DOI: ISBN 978-3-95404-825-0
- Kellner, M. (2012): "Blue Mining" - The future of Mining. Initial considerations for underground pumped storage plants. In cooperation with A. Agasty, E. Clausen, O. Langefeld and J.-G. Swanson. Institute of Mining, Clausthal University of Technology. Clausthal-Zellerfeld.
- Kennedy, R.; Walker, W. (1991): Reservoir nutrient dynamics. Kapitel in: Thornton, K. W. (Hrsg.); Kimmel, B. L. (Hrsg.); Payne, F. E. (Hrsg.): *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. New York: Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc.
- Köngeter, J.; Hermerl, S.; Kohler, B.; Ebert, M.; Libisch C. (2013): Talsperren in Deutschland. Deutsches Talsperrenkomitee e. V. Dresden.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1990): *Limnologie und Bedeutung ausgewählter Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland*. Essen: Woeste-Verlag.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016): *Potentialstudie Pumpspeicherkraftwerke Nordrhein-Westfalen*. LANUV-Bericht 62. Recklinghausen.
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2020): *Mittlerer Niedrigwasser-Abfluss. Halle (Saale)*. Online verfügbar unter: <https://lau.sachsen-anhalt.de/analytik-service/indikatoren-nachhaltigkeit/klimafolgen-indikatoren-fuer-sachsen-anhalt/mittlerer-niedrigwasser-abfluss>

- Lange, A.; Eggelsmann, F. (2011): Der Wasserhaushalt des Westharzes. Hydrologische Untersuchungen 1941-2010. Harzwasserwerke GmbH. Hildesheim.
- Langefeld, O. (2018): Utilisation of Underground Mining Infrastructure as Pumped Storage Power Plant. Mining Report Glückauf 154, Heft 3/2018, S. 209–213.
- Langefeld, O.; Kellner, M. (Hrsg.) (2013): "Blue Mining" - The future of mining. 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry. Milos Island, Greece, 30th June to 3rd July.
- Laux, H. (2007): Entscheidungstheorie. 7. Überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ließmann, W. (2010): Historischer Bergbau im Harz - Kurzführer. S. 470. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN:978-3-540-31327-4
- Lorenz, M.; Zeunert, S.; Nguyen, H. Q.; Meon, G. (2017): Ökohydrologische Modellierung eines Einzugsgebietes in den sommerfeuchten Tropen im Kontext von Klimawandel und anthropogener Entwicklung. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 61 (6), S. 408-423; DOI: 10.5675/HyWa_2017,6_4
- Loucks, D. P.; van Beek, E. (2017): Performance criteria. Water resource systems planning and management. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1_9
- LTV Sachsen (2020): Funktionsweise Hochwasserrückhaltebecken Niederpöbel (Animation). YouTube-Kanal der Landestalsperrenverwaltung (LTV) Sachsen. Online verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=li4LhAUdkKU>
- LWI-HYWAG; IFW (2012): PANTA RHEI Benutzerhandbuch - Programmdokumentation zur hydrologischen Modellsoftware (unveröffentlicht). Leichtweiß-Institut für Wasserbau und Institut für Wassermanagement GmbH. Braunschweig.
- Maniak, U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mark, L.; McFarland, T. L. (2009): Drinking Water Problems: Corrosion. Texas A&M Agrilife Extension Service. Online verfügbar unter: <https://twon.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/3/2021/06/drinking-water-problems-corrosion.pdf>
- Menendez, J.; Loredó, J.; Fernández, J. M.; Galdo, M. (Hrsg.) (2017): Underground pumped-storage hydro power plants with mine water in abandoned coalmines in northern Spain. International Mine Water Association – Mine Water & Circular Economy. Lappeenranta.
- Meon, G.; Müller, T.; Koch, A.; Eggelsmann, F.; Unger L.; Lange, A. (2016): Klimatisch bedingte Anpassungsstrategien für ein Talsperrenverbundsystem im Harz.

- Wasserwirtschaft 6/2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s35147-016-0059-z>
- Meon, G.; Riedel, G.; Anhalt, M.; Hölscher, J. (2015): Innovative Hochwasservorhersage für kleine und mittlere Einzugsgebiete. Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft (FGHW), Heft 35.15.
- Mirschel, S. (2022): SuedLink. TenneT TSO GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.tennet.eu/de/projekte/suedlink>
- Mühlbacher, A. C.; Kaczynski, A. (2013): Der Analytic Hierarchy Process (AHP): Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung im Gesundheitswesen. *PharmacoEconomics German Research Articles* 11 (2), S. 119–32.
- Müller, M.; De Cesare, G.; Schleiss, A. (2013): Einfluss von Pumpspeichersequenzen auf die Strömungsverhältnisse und das Absetzverhalten von Feinsedimenten in Stauseen. *Wasser Energie Luft*, Vol. 105, Heft 3.
- Neumann, C. (2012): Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zur Errichtung des Betriebes eines Untertägigen Pumpspeicherwerks. Göttingen: Cuvillier Verlag. DOI: 978-3-95404-306-4
- NIBIS® Kartenserver (2021): Themenkarten: Bergbau, Bohrungen und Profilbohrungen, und Geologie. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Hannover.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2022): Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. Hannover.
- Niemann, A.; Balmes, J.; Schreiber, U.; Wagner, H.-J.; Friedrich, T. (2018): Proposed Underground Pumped Hydro Storage Power Plant at Prosper-Haniel Colliery in Bottrop: State of Play and Prospects. *Mining Report Glückauf* 154, Vol. 3/2018, S. 214–223.
- NLWKN (2013): Mai-Hochwasser 2013. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz. Norden. Online verfügbar unter: https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/89475/Bericht_zum_Mai-Hochwasser_2013.pdf
- NLWKN (2017): Klimawandel: Extreme Ereignisse werden sich häufen. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. Norden. Online verfügbar unter: <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/klimawandel-extreme-ereignisse-werden-sich-haeufen--157498.html>
- NLWKN (2021/1): KliBiW. Globaler Klimawandel. Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht - Phase 6. Vertiefung Hochwasser. Norden.

- NLWKN (2021/2): Das Juli-Hochwasser 2017 im südlichen Niedersachsen. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz. Norden. Online verfügbar unter: <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/124949>
- Nowosad, S.; Langefeld, O. (2021): How close and far underground pump storage plants from reality are: status quo and challenges. Pre-Print 2021 Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. SME Annual Conference & Expo, Online.
- Ramboll GmbH; Harzwasserwerke GmbH (Hrsg.) (2018): Generalüberholung der Sösealsperre und Instandsetzung der B 498 Planfeststellungsverfahren - Erläuterungsbericht. Harzwasserwerke GmbH. Hildesheim.
- Saaty, T. L.; Vargas, L. G. (2012): Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. 2. Aufl. International Series in Operations, Research & Management Science, Vol. 175. New York: Springer New York.
- Schettler, F. (2021): Machbarkeitsstudie und Technologiekonzept Erweiterung des Oker-Grane-Stollens und Goseschachtes.
- Schmidt, M. (1979): Das Sieberwasser-Problem: Notwendigkeit und Möglichkeiten seiner Lösung. Neues Archiv für Niedersachsen, Band 28(3), S. 323-340. Göttingen.
- Schneider, K.-J.; Albert, A. (Hrsg.) (2014): Bautabellen für Ingenieure. 21. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verlag.
- Strobl, T.; Zunic, F. (2006): Wasserbau: Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-47857-7>
- Sünnemann, J. (2022): Herausforderungen und Möglichkeiten Trinkwassertalsperren im Pumpspeicherbetrieb zu nutzen am Beispiel der Odertalsperre im Harz. Masterarbeit an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Wolfenbüttel.
- Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, S. 485-498. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Tophofen, S. (2022): Stromrichter (Konverter). 50Hertz Transmission GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.50hertz.com/de/Netz/Netzausbau/ProjektanLand/SuedOst-Link/Konverter>
- TransnetBW GmbH (2018): SuedLink KONVERTER - Gleichstrom- und Wechselstromnetz miteinander verbinden. Stuttgart: TransnetBW GmbH.
- TransnetBW GmbH (2022): SuedLink - Planung und Genehmigung. TransnetBW GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.transnetbw.de/de/netzentwicklung/projekte/sued-link/planung-und-genehmigung>

VDE Kassel (2006): Exkursion in das Pumpspeicherwerk Goldisthal / Thüringer Wald Teil 2: Stromrichtertechnik des PSW Goldisthal. VDE Bezirksverein Kassel e.V. Online verfügbar unter: <https://www.vde-kassel.de/de/veranstaltungen/berichte-bis-2011/berichte-2006/2006-07-12---psw-goldisthal>

Voith GmbH (2023): Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal. Voith GmbH & Co. KGaA. Online verfügbar unter: <https://voith.com/corp-de/branchen/wasserkraft/pumpspeicherkraftwerke/goldisthal-germany.html>

Wolfenbüttler Schaufenster (2019): Erster Spatenstich für den geplanten Hochwasserschutz in Schladen. Verlag Schaufenster GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter: <https://www.schaufenster-wf.de/neuigkeiten/2019-erster-spatenstich-fuer-den-geplanten-hochwasserschutz-in-schladen/>

Wörner, V.; Kreye, P.; Meon, G. (2019): Effects of Bias-Correcting Climate Model Data on the Projection of Future Changes in High Flows. *Hydrology*, 6 (2), S. 46. DOI: 10.3390/hydrology6020046.

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991): *Multi-Criteria-Entscheidungen*. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. S. 21-33. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

10 Anhang

Im Folgenden sind als Anhang angefügt:

10.1 A1 – Maßnahmensteckbriefe der Standorte

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

- Okertalsperre - Huneberg (Nr. 1)
- Wassernutzung im Innerstetal (Nr. 2)
- Odertalsperre - Stöberhai (Nr. 3)
- Wassernutzung im Siebertal (Nr. 4)
- Erhöhung Granetalsperre (Nr. 5)

10.2 A2 – Entscheidersteckbriefe zu Kapitel 8

Felix Eckenfels, M. Sc.; Prof. Dr. Roland Menges; TU Clausthal

- Steckbrief: Okertalsperre - Huneberg (Nr. 1)
- Steckbrief: Innerstetalsperre - Hohenstein (Nr. 2)
- Steckbrief: Odertalsperre - Stöberhai (Nr. 3)
- Steckbrief: Siebertal - Knollen (Nr. 4)
- Steckbrief: Erhöhung Granetalsperre (Nr. 5)

10.3 A3 – Fotodokumentation der Standorte

Jan Sünneemann, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher; Ostfalia

10.1 A1 – Maßnahmensteckbriefe der Standorte



Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

Okertalsperre - Huneberg



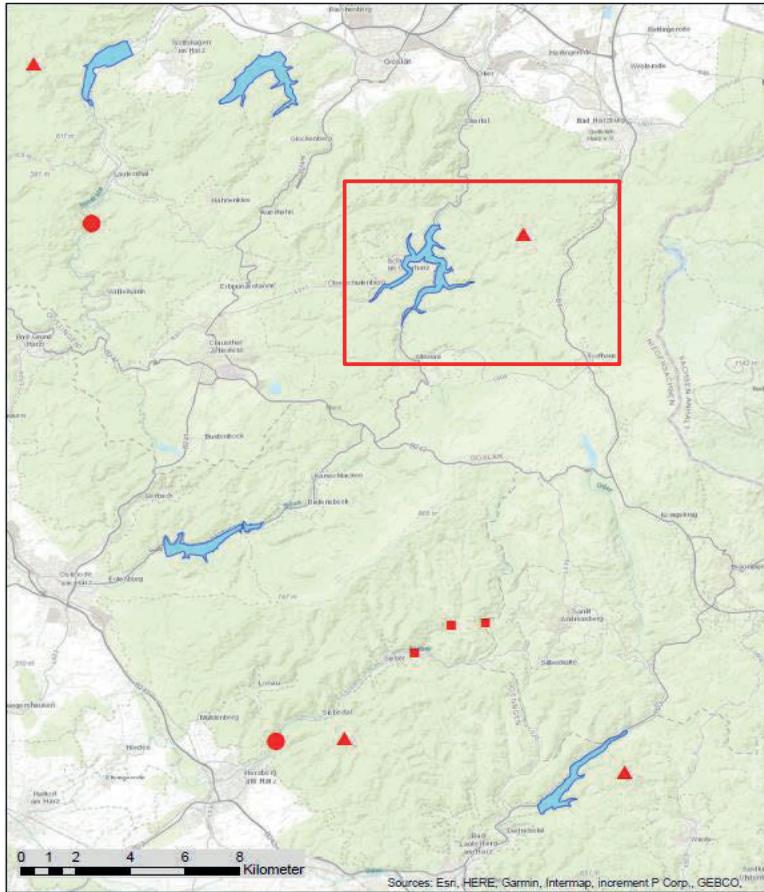
Maßnahmensteckbrief

Nr. 1



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung





Legende

- Ableitungssperren_Neubaustandorte
- Talsperren_Neubaustandorte
- ▲ PSW_Neubaustandorte

Abbildung A1-1: Übersichtskarte Standort 1

Nummer	Standort	Art der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Volumina
1	Okertalsperre - Huneberg	bisherige Nutzungen + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg als OB • Abtrennung UB innerhalb Okertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Mio. m³ (Huneberg) • PW: 2,4 Mio. m³
2	Wassernutzung im Innerstetalsperre	Speicherneubau + PSW: unterirdisch (bestehende Talsperre)	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zw. Lautenthal u. Wildemann • Varianten ol37 u. ol47 	<ul style="list-style-type: none"> • ol37: 5,70 Mio. m³ • ol47: 14 Mio. m³ • 2,3 Mio. m³ (OB-ü an bestehender Talsperre)
3	Odertalsperre - Stöberhai	Trinkwassernutzung + PSW: oberirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Oberbecken bei Stöberhai • Abtrennung UB innerhalb d. Odertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Mio. m³ (UB) • 1,5 Mio. m³ • PW: 1,35 Mio. m³
4	Wassernutzung im Siebertal	kompletter Speicherneubau + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zw. Herzberg u. Sieber • Varianten S47 u. S95 	<ul style="list-style-type: none"> • S47: 16 Mio. m³ (Talsperre; UB) • 2 Mio. m³ • 1,8 Mio m³
5	Granetalsperre	Staudammerhöhung: Erhöhung Gesamtvolumen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung um 15 m • 40 Mio. m³ mehr Stauraum 	<ul style="list-style-type: none"> • 86 Mio. m³ Stauraum
6	Herzberger Teich	Hochwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> • HT als HWR • Ertüchtigung d. Gose-Ableitung oder HWR an Ableitungsstelle 	

Okertalsperre - Huneberg	
Allgemeine Daten	
Übersichtskarte	
Aktuelle Nutzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserschutz • Niedrigwasseraufhöhung • Trinkwasser-Beleitung
Angestrebte Nutzungen	Erweiterung um Energiespeicherung
Gewässer	Oker
Gewässer-km	-
Einzugsgebiet	-
Abflüsse am Standort	<ul style="list-style-type: none"> • MNQ: 1,12 • MQ: 1,93 • MHQ: 9,92
Vorhandene Infrastruktur	Talsperre
Art der Maßnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Bau eines PSW (ober- bzw. unterirdisch) • Anpassung der aktuellen Betriebsstrategie <ul style="list-style-type: none"> • PSW-OB im Huneberg
Beschreibung der baulichen Variante	<ul style="list-style-type: none"> • PSW-UB1 (Oberirdisch): Okertalsperre • PSW-UB2 (oberirdisch; Kalbetal): Abgetrenntes Unterbecken innerhalb der Talsperre
Wasserbau/Wasserwirtschaft	
Stauvolumen [m³]	Okertalsperre (Neu): 46,05 Mio. m³ UB-Kalbe: 2,63 Mio. m³ OB-Huneberg: 16 Mio. m³
Bauwerksvolumen [m³]	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg-Damm: ca. 64.000 m³ • Kalbetal: ca. 0,8 Mio. m³
Überleitungsoptionen	Kein Teil des Überleitungskonzeptes
Betriebsstrategie	<p>Huneberg (V1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • ESW: 2 Mio. m³ (Obere Lamelle; Pendelwasser) • Reserve 14 Mio. m³ (untere Lamelle) <p>Huneberg (V2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • HW: 2 Mio. m³ • PSW: 2 Mio. m³ <ul style="list-style-type: none"> • Betrieb/Reserve (NW/TW): 12 Mio. m³
Speicherdaten	
Stauziel [m ü. NHN]	Huneberg: 610 m ü. NHN Okertalsperre (UB; Kalbetal): 430 m ü. NHN
Staufläche [km²]	
Bauwerksdaten	
Dammvolumen [m³]	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg: ca. 64.000 m³ • Kalbetal: ca. 0,4 Mio. m³
Dammhöhe [m]	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg: ca. 33 m • Kalbetal: ca. 31 m
Dammkrone [m ü. NHN]	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg: 612 m ü. NHN • Kalbetal: 432 m ü. NHN
Kronenlänge [m]	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg: ca. 116 m • Kalbetal: ca. 223 m

Standort/ ...	1. Okertalsperre - Huneberg			
	Okertalsperre	Okertalsperre	Vorsperre Kalbetal	Hunebergspeicher
	Aktuell	Zukunft	Zukunft	Zukunft
Hochwasserentlastung	120 m ³ /s	120 m ³ /s	20 m ³ /s	-
Hochwasser- rückhalteraum	5,0 Mio. m ³	5,0 Mio. m ³	0,0 Mio. m ³	2,0 Mio. m ³
Betriebsraum (TW, NW)	36,85 Mio. m ³ einschl. Flex-Lamelle	36,05 Mio. m³	0	0
Reserveraum (TW, NW)	5 Mio. m ³	5 Mio. m ³	0,63 Mio. m³	12,0 Mio. m ³
PSW-UB	0	0	2,0 Mio. m³	0
PSW-OB	-	-	-	2,0 Mio. m ³
Überleitung zur Grane	24 Mio. m ³ /a im 10jahresmittel	24 Mio. m ³ /a im 10jahresmittel	-	-
Max.-Auslastung (TW)				
Speichervolumen	46,85 Mio. m ³	46,05 Mio. m³	2,63 Mio. m³	16,0 Mio. m ³
Standort-Volumen	46,85 Mio. m ³		64,68 Mio. m³	

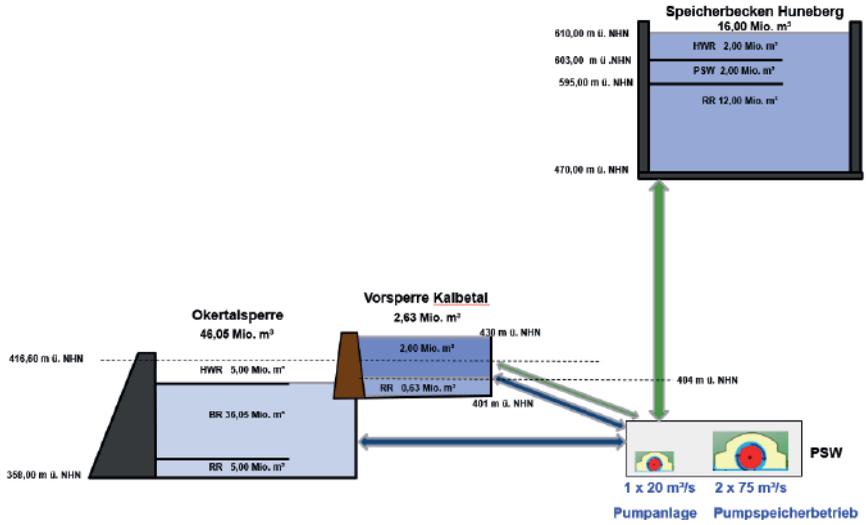


Abbildung A1-2: Systemskizze Standort 1

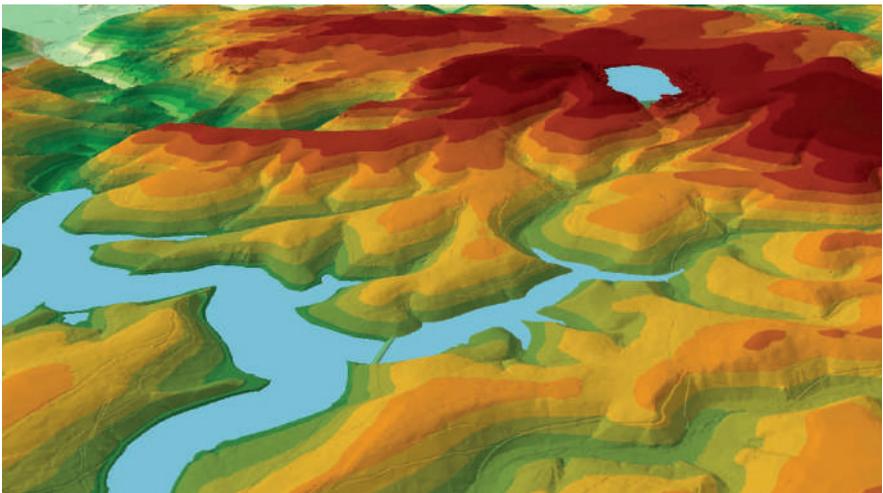


Abbildung A1-3: PSW Okertalsperre - Huneberg (Blick gen Nord-Osten)

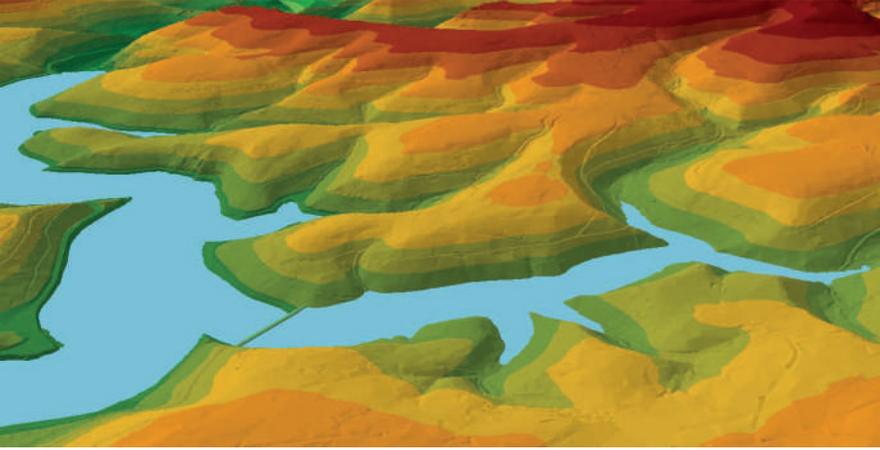


Abbildung A1-4: Unterbecken Kalbetal

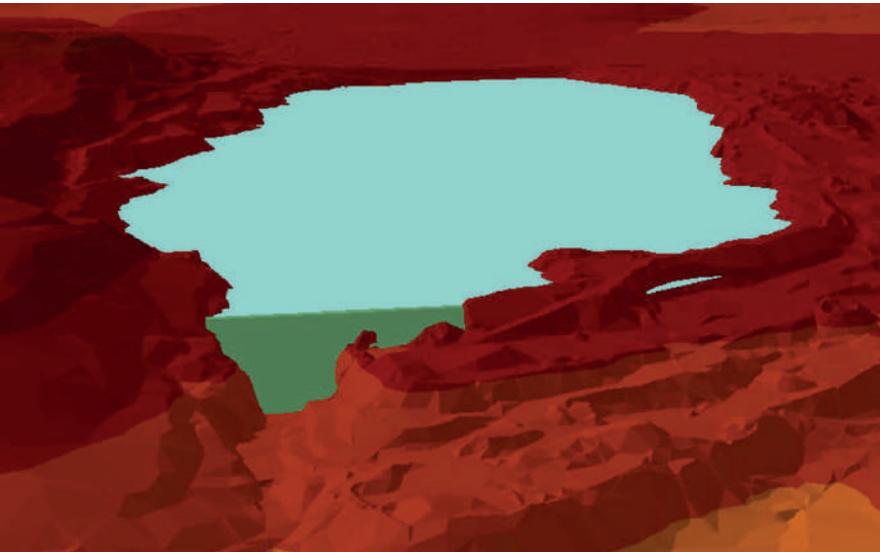


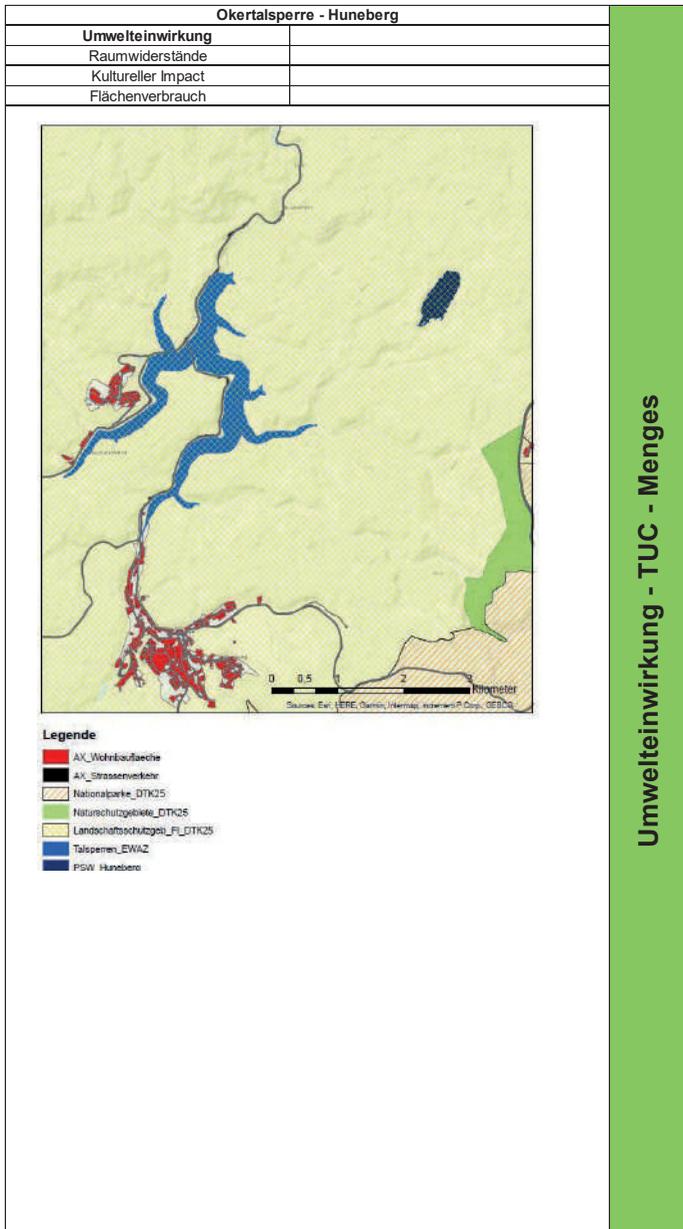
Abbildung A1-5: Oberbecken Huneberg

Okertalsperre - Huneberg	
Geologische Eigenschaften	
Gesteinsformation (en)	<ul style="list-style-type: none"> • Karbon/Unterkarbon (dinant): Grauwacke, Tonschieferlagen • Karbon/Unterkarbon (dinant): Tonschiefer
Tektonische Störung oder Erzgang	-
Altlasten/Altbergbau	-
Gebirgsmechanische Eigenschaften	
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit [MPa]	Grauwacke: 75 - 160 Tonschiefer: 28 - 45
Gebirgsqualität	Grauwacke: 65 - 85 (Mittlere bis gute Gebirgsqualität) Tonschiefer: 45 - 65 (Mittlere Gebirgsqualität)
Bauwerksdaten - Druckstollen	
Druckstollen durchmesser [m]	7
Länge [m] (KW-Huneberg)	1.823,13
Länge [m] (Kalbetal-KW)	1.630,99
Bauwerksdaten - Kraftwerkskaverne	
Volumina der Kraftskaverne [m ³]	61.486,36
Abmaße der Kraftskaverne H x B x L [m x m x m]	51 x 20 x 60
Länge der Zufahrtstollen [m]	1.602,44
Gesamtausbruchsvolumen PSW + Triebwasserstollen [m ³]	491.422,47

Speicher unterirdisch - TUC - Langefeld

Okertalsperre - Huneberg		
Energiesystem		
Kraftwerkstyp:	PSW Huneberg	
Turbinentyp:	Francis-Turbine	
Anzahl der Turbinen:	2	
Gefälle/Fallhöhe [m]	165	
Durchfluss (Theo.) [m³/s]	138,89	
Durchfluss (Hydro) [m³/s]	110	
Nennleistung (4h) [MW]	180	

Energiesystem TUC - Beck



Okertalsperre - Huneberg		
Bauwerkskosten; oberirdisch [Mio. €]		54,5
Maschinensätze [Mio. €]		88,5
Netzanbindung zur Lamspringe [Mio. €]		62
Betriebskosten [Mio. €/a] für 100 MW		1

Kosten - TUC - Menges



Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

Wassernutzung im Innerstetal



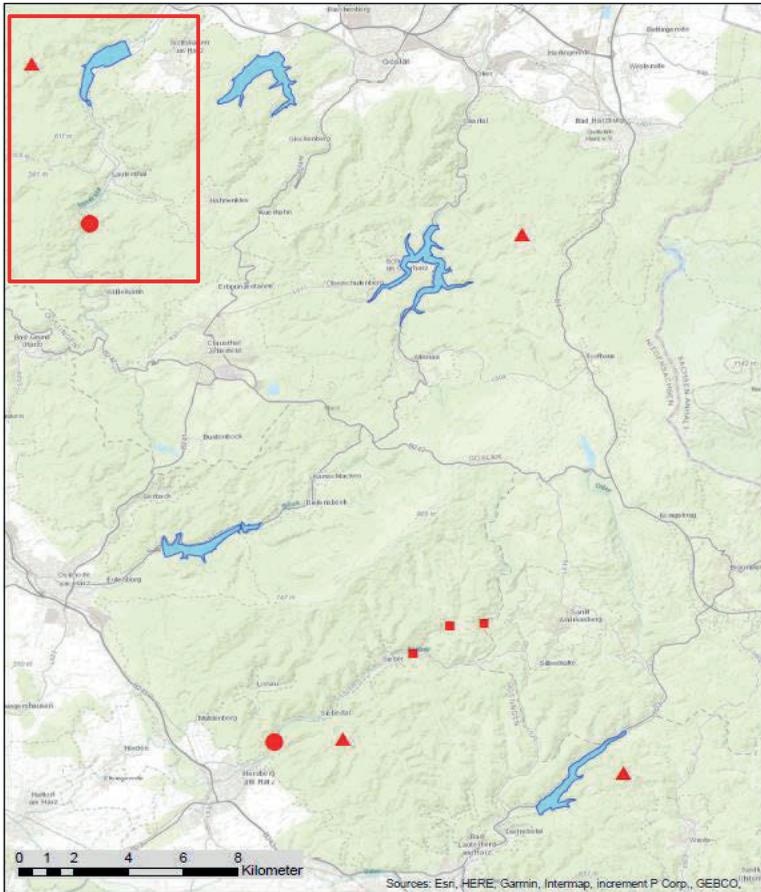
Maßnahmensteckbrief

Nr. 2



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung





Legende

- Ableitungssperren_Neubaustandorte
- Talsperren_Neubaustandorte
- ▲ PSW_Neubaustandorte

Abbildung A1-6: Übersichtskarte Standort 2

Nummer	Standort	Art der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Volumina
1	Okertalsperre - Huneberg	bisherige Nutzungen + PSW: ober-/unterirdisch	• Huneberg als OB • Abtrennung UB innerhalb Okertalsperre	• 16 Mio. m ³ (Huneberg) • PW: 2,4 Mio. m ³
2	Wassernutzung im Innerstetalsperre	Speicherneubau + PSW: unterirdisch (bestehende Talsperre)	• Talsperre zw. Lautenthal u. Willdemann • Varianten ol37 u. ol47	• ol37: 5,70 Mio. m ³ • ol47: 14 Mio. m ³ • 2,3 Mio. m ³ (OB-ü an bestehender Talsperre)
3	Odertalsperre - Stöberhai	Trinkwassernutzung + PSW: oberirdisch	• Oberbecken bei Stöberhai • Abtrennung UB innerhalb d. Odertalsperre	• 2 Mio. m ³ (UB) • 1,5 Mio. m ³ • PW: 1,35 Mio. m ³
4	Wassernutzung im Siebertal	kompletter Speicherneubau + PSW: ober-/unterirdisch	• Talsperre zw. Herzberg u. Sieber • Varianten S47 u. S95	• S47: 16 Mio. m ³ (Talsperre; UB) • 2 Mio. m ³ • 1,8 Mio m ³
5	Granetalsperre	Staudammerhöhung: Erhöhung Gesamtvolumen	• Erhöhung um 15 m • 40 Mio. m ³ mehr Stauraum	• 86 Mio. m ³ Stauraum
6	Herzberger Teich	Hochwasserschutz	• HT als HWR • Ertüchtigung d. Gose-Ableitung oder HWR an Ableitungsstelle	

Wassernutzung im Innerstetal	
Allgemeine Daten	
Übersichtskarte	
Aktuelle Nutzungen	HW, TW, NW an unterer Innerstetalsperre (u. l.)
Angestrebte Nutzungen	TW-Verglagerung an Obere Innerstetalsperre (ol), PSW an u. l.
Gewässer	Innerste
Gewässer-km	-
Einzugsgebiet	-
Abflüsse am Standort	<ul style="list-style-type: none"> • MNQ: 0,10 • MQ: 1,17 • MHQ: 17,37
Vorhandene Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Innerstetalsperre • Talsperren-Neubau
Art der Maßnahme	<ul style="list-style-type: none"> • PSW-Bau (ober- oder unterirdisch)
Beschreibung der baulichen Variante	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zwischen Lautenthal u. Wildemann (2 Varianten) • Überleitungsstollen (Freigefälle) von o. l. zur Granetalsperre • PSW (V1): Oberbecken Hohestein u. Unterbecken (u. l.)
Wasserbau/Wasserwirtschaft	
Stauvolumen [m³]	Variante ol37: 5,7 Mio. m³ Variante ol47: 14 Mio. m³ PSW-OB (Hohestein): 2,40 Mio. m³
Bauwerksvolumen [m³]	Variante ol37: 0,30 Mio. m³ Variante ol47: 0,86 Mio. m³ PSW-OB (Hohestein): 0,55 Mio. m³
Überleitungsoptionen	Überleitung von o.l. zur Granetalsperre
Speicherdaten	
Stauziel [m ü. NHN]	Variante ol37: 370 m ü. NHN Variante ol47: 370 m ü. NHN
Staufäche [km²]	Variante ol37: 0,41 km² Variante ol47: 0,74 km² PSW-OB (Hohestein): 0,30 km²
Bauwerksdaten	
Dammvolumen [m³]	Variante ol37: 0,30 Mio. m³ Variante ol47: 0,86 Mio. m³ PSW-OB (Hohestein): 0,55 Mio. m³
Dammhöhe [m]	Variante ol37: 37 m Variante ol47: 47 m PSW Hohestein: ca. 11 m
Dammkrone [m ü. NHN]	Variante ol37: 372 m ü. NHN Variante ol47: 372 m ü. NHN PSW-OB: 550 m ü. NHN
Kronenlänge [m]	ol47: 250 m PSW-OB: 2,37 km

Standort/ ...	2.1 Obere Innerstetalsperre		2.2 Untere Innerstetalsperre - Hohestein		
	Aktuell	Zukunft	Innerstetalsperre Aktuell	Innerstetalsperre Zukunft	Hohestein Zukunft
Hochwasserentlastung	0	125 m³/s	125 m³/s	125 m³/s	-
Hochwasser- rückhalteraum		2,1 Mio. m³	4,26 Mio.m³	4,26 Mio.m³	0
Betriebsraum (TW, NW)		9,8 Mio. m³	9,74 Mio. m³ einschl. Flex-Lamelle	7,74 Mio. m³ einschl. Flex-Lamelle	0
Reserveraum (TW, NW)		2,1 Mio. m³	5,26 Mio. m³	5,26 Mio. m³	0,40 Mio. m³
PSW-UB		0	0	2,0 Mio. m³	0
PSW-OB		-	-	-	2,0 Mio. m³
Überleitung zur Grane		12 Mio. m³/a im 10jahresmittel	12 Mio. m³/a im 10jahresmittel	-	-
Max.-Auslastung (TW)					
Speichervolumen		14,0 Mio. m³	19,26 Mio. m³	19,26 Mio. m³	2,40 Mio. m³
Standort-Volumen		14,0 Mio. m³	19,26 Mio. m³	21,66 Mio. m³	

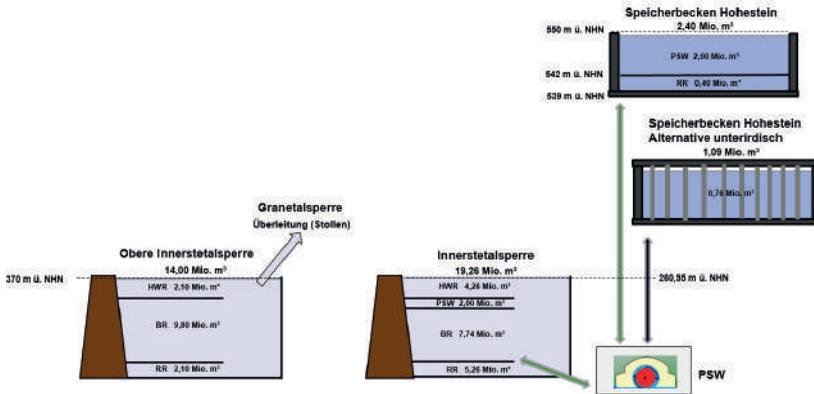


Abbildung A1-7: Systemskizze Standort 2

Wassernutzung im Innerstetal	
Übersichtskarte	
Beschreibung der baulichen Variante	
Bauliche Planung unter Tage	
Oberfläche [m ²]	564 600
Gesamtvolumen [m ³]	2,117 Mio.
Nutzvolumen [m ³]	1,7 Mio.
Fallhöhe [m]	265 m
Geologische Eigenschaften	
Gesteinsformation (en)	• Karbon/Unterkarbon (dinant): Grauwacke, Tonschieferlagen
Tektonische Störung oder Erzgang	• Erzgang (vermutet): 1
Allasten/Altbergbau	-
Gebirgsmechanische Eigenschaften	
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit [MPa]	160
Gebirgsqualität	Mäßig bis gut
Pfeilerbelastung [MPa]	70.644
Ausnutzung der Druckfestigkeit [%]	30 - 62
Sicherheitsfaktor	11
Bauwerksdaten - Speicher	
Anlagentyp	Kammerbau (Room and Pillar)
Pfeileranzahl	5646
Abmaße von Pfeilern [m]	5 x 5
Pfeilerfläche [m ²]	25
Abmaße von Kammern [m]	10 x 10
Systemfläche [m ²]	100
Kammerhöhe [m]	5
Anzahl Bewetterungszugänge	2
Bewetterungszugang Durchmesser [m]	2
Überdeckung	30 - 70
Gesamtausbruchvolumina [m ³] - Speicher	2,568,689.54
Bauwerksdaten - Kraftwerkskaverne	
Volumina der Kraftskaverne [m ³]	77,712.19
Abmaße der Kraftskaverne H x B x L [m x m x m]	51 x 20 x 75
Bauwerksdaten - Druckstollen	
Durchmesser [m]	7
Länge Triebwasserstollen: Hohestein --> KW [m]	• 1.029,668 (Speicher unter Tage) • 1.288,016 (Speicher über Tage)
Länge Triebwasserstollen: KW --> Innerstetalsperre [m]	387,05
Gesamtlänge Triebwasserstollen [m]	• 1.416,718 (Speicher unter Tage) • 1.675,066 (Speicher über Tage)
Gesamtausbruchvolumina [m ³] - KW und Triebwasserstollen	• 251.950,94 (Speicher unter Tage) • 271.833,40 (Speicher über Tage)
Gesamtausbruchvolumina [m ³] Speicher, Kraftwerkskaverne und Druckstollen	2.820.640,48 (Speicher unter Tage)

Speicher unterirdisch - TUC - Langefeld

Wassernutzung im Innerstetal		
Energiesystem		
Kraftwerkstyp:	PSW Innerstetalsperre	
Turbinentyp:	Francis-Turbine	
Anzahl der Turbinen:	3	
Gefälle/Fallhöhe [m]	281	
Durchfluss [m ³ /s]	138,89	
Nennleistung (4h) [MW]	305	

Energiesystem - TUC - Beck

Wassernutzung im Innerstetal		
Bauwerkskosten; oberirdisch [Mio. €]	58,5	
Maschinensätze [Mio. €]	107	
Netzanbindung zur Lamspringe [Mio. €]	34,5	
Betriebskosten [Mio. €/a] für 100 MW	1	

Kosten - TUC - Menges



Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

Odertalsperre - Stöberhai



Maßnahmensteckbrief

Nr. 3



Nummer	Standort	Art der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Volumina
1	Okertalsperre - Huneberg	bisherige Nutzungen + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Huneberg als OB Abtrennung UB innerhalb Okertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> 16 Mio. m³ (Huneberg) PW: 2,4 Mio. m³
2	Wassernutzung im Innerstetalsperre	Speicherneubau + PSW: unterirdisch (bestehende Talsperre)	<ul style="list-style-type: none"> Talsperre zw. Lautenthal u. Willdemann Varianten ol37 u. ol47 	<ul style="list-style-type: none"> ol37: 5,70 Mio. m³ ol47: 14 Mio. m³ 2,3 Mio. m³ (OB-ü an bestehender Talsperre)
3	Odertalsperre - Stöberhai	Trinkwassernutzung + PSW: oberirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Oberbecken bei Stöberhai Abtrennung UB innerhalb d. Odertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> 2 Mio. m³ (UB) 1,5 Mio. m³ PW: 1,35 Mio. m³
4	Wassernutzung im Siebertal	kompletter Speicherneubau + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Talsperre zw. Herzberg u. Sieber Varianten S47 u. S95 	<ul style="list-style-type: none"> S47: 16 Mio. m³ (Talsperre; UB) 2 Mio. m³ 1,8 Mio. m³
5	Granetalsperre	Staudammerhöhung: Erhöhung Gesamtvolumen	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung um 15 m 40 Mio. m³ mehr Stauraum 	<ul style="list-style-type: none"> 86 Mio. m³ Stauraum
6	Herzberger Teich	Hochwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> HT als HWR Ertüchtigung d. Gose-Ableitung oder HWR an Ableitungsstelle 	

Odertalsperre - Stöberhai	
Allgemeine Daten	
Übersichtskarte	
Aktuelle Nutzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserschutz • Niedrigwasseraufhöhung
Angestrebte Nutzungen	Erweiterung um Energiespeicherung u. Trinkwassergewinnung
Gewässer	Oder
Gewässer-km	37 km bis Mündung
Einzugsgebiet	-
Abflüsse am Standort	<ul style="list-style-type: none"> • MNQ: 0,108 • MQ: 0,905 • MHQ: 8,17
Vorhandene Infrastruktur	Talsperre
Art der Maßnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Bau eines PSW • Anpassung der aktuellen Betriebsstrategie
Beschreibung der baulichen Variante	<ul style="list-style-type: none"> • PSW-OB (1,9 Mio. m³) auf dem Höhenzug Stöberhai • PSW-UB1 (oberirdisch): Abgetrenntes
Wasserbau/Wasserwirtschaft	
Stauvolumen [m ³]	<ul style="list-style-type: none"> • Stöberhai: 2,3 Mio. m³ Oberbecken • Herzbek: 2,55 Mio. m³ Unterbecken
Bauwerksvolumen [m ³]	<ul style="list-style-type: none"> • Stöberhai: 0,4 Mio. m³ • Herzbek: 0,8 Mio. m³
Überleitungsoptionen	Teil der Varianten 1.1; 1-2; 2 des Überleitungskonzeptes
Speicherdaten	
Stauziel [m ü. NHN]	Stöberhai: 714 m ü. NHN Herzbek: 381 m ü. NHN
Staufläche [km ²]	Stöberhai: 0,095 km ²
Bauwerksdaten	
Dammvolumen [m ³]	Stöberhai: 0,4 Mio. m ³ Herzbek: 0,8 Mio. m ³
Dammhöhe [m]	Stöberhai: ca. 15 m Herzbek: ca. 30 m
Dammkrone [m ü. NHN]	Stöberhai: 715 m ü. NHN Herzbek: 383 m ü. NHN
Kronenlänge [m]	Stöberhai: 2150 m Herzbek: 345 m

Standort/ ...	3. Odertalsperre - Stöberhai			
	Odertalsperre	Odertalsperre	Vorsperre Herzbek	Stöberhaispeicher
	Aktuell	Zukunft	Zukunft	Zukunft
Hochwasserentlastung	140 m ³ /s	140 m ³ /s	20 m ³ /s	-
Hochwasser- rückhalteraum	5,0 Mio. m ³	5,0 Mio. m ³	0	0
Betriebsraum (TW, NW)	23,61 Mio. m ³ einschl. Flex-Lamelle	20,65 Mio. m ³ einschl. Flex- Lamelle	0	0
Reserveraum (TW, NW)	2 Mio. m ³	2 Mio. m ³	0,55 Mio. m ³	0,3 Mio. m ³
PSW-UB	-	-	2,0 Mio. m ³	-
PSW-OB	-	-	-	2,0 Mio. m ³
Überleitung zur Grane	0	0	-	-
Max.-Auslastung (TW)	0	3,5 Mio. m ³ /a	-	-
Speichervolumen	30,61 Mio. m ³	27,65 Mio m ³	2,55 Mio. m ³	2,3 Mio. m ³
Standort-Volumen	30,61 Mio. m ³	32,45 Mio. m ³		

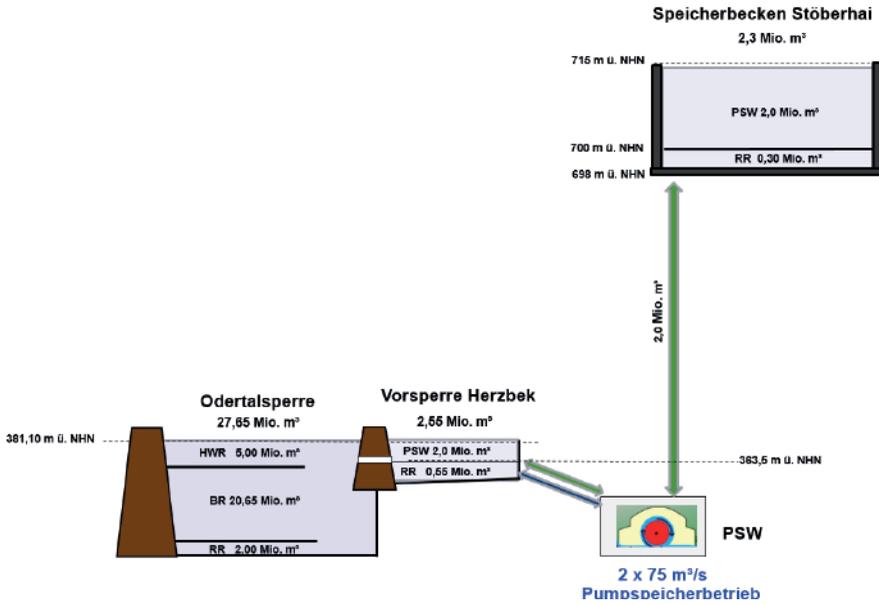


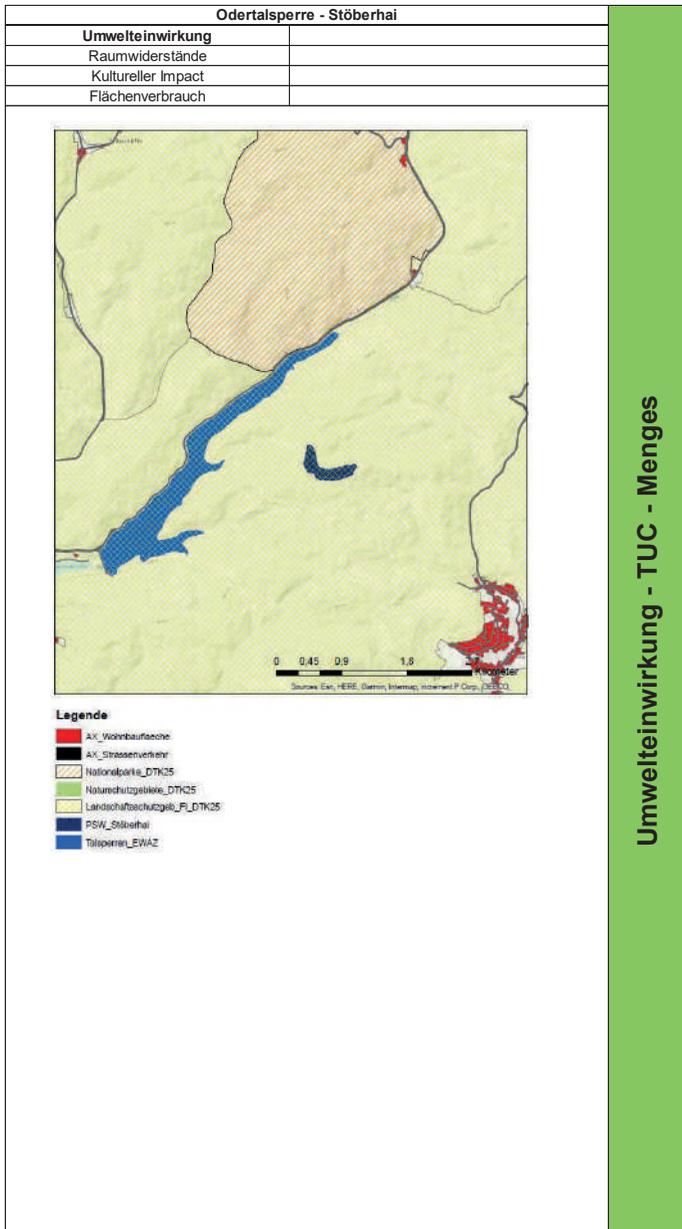
Abbildung A1-9: Systemskizze Standort 3

Odertalsperre - Stöberhai	
Bauliche Planung unter Tage	
Geologische Eigenschaften	
Gesteinsformation (en)	<ul style="list-style-type: none"> • Devon bis Karbon (Oberdevon bis Unterkarbon): Tanne-Grauwacke mit Plattenschiefer • Devon bis Karbon (Oberdevon bis Unterkarbon): Südharz-Grauwacke <ul style="list-style-type: none"> • Devon (Oberdevon): Kieselschiefer
Tektonische Störung oder Erzgang	-
Altlasten/Altbergbau	-
Gebirgsmechanische Eigenschaften	
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit [MPa]	36 - 75
Gebirgsqualität	gut - mäßig
Bauwerksdaten - Druckstollen	
Druckstollen durchmesser [m]	7
Länge [m] (KW-Stöberhai)	1.399
Länge [m] (Herzbek-KW)	875
Bauwerksdaten - Kraftwerkskaverne	
Volumina der Kraftskaverne [m ³]	883.076,17
Abmaße der Kraftskaverne H x B x L [m x m x m]	51 x 20 x 80
Länge der Zufahrtstollen [m]	821.534
Gesamtausbruchsvolumen PSW + Triebwasserstollen [m ³]	338.832,31

Speicher unterirdisch - TUC - Langefeld

Odertalsperre - Stöberhai		
Energiesystem		
Kraftwerkstyp:	PSW Odertalsperre	
Turbinentyp:	Francis-Turbine	
Anzahl der Turbinen:	2	
Gefälle/Fallhöhe [m]	317	
Durchfluss [m ³ /s]	139	
Nennleistung (4h) [MW]	345	

Energiesystem TUC - Beck



Odertalsperre - Stöberhai		
Bauwerkskosten; oberirdisch [Mio. €]	56,2	
Maschinensätze [Mio. €]	82	
Netzanbindung zur Lamspringe [Mio. €]	55,7	
Betriebskosten [Mio. €/a] für 100 MW	1	

Kosten - TUC - Menges



Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

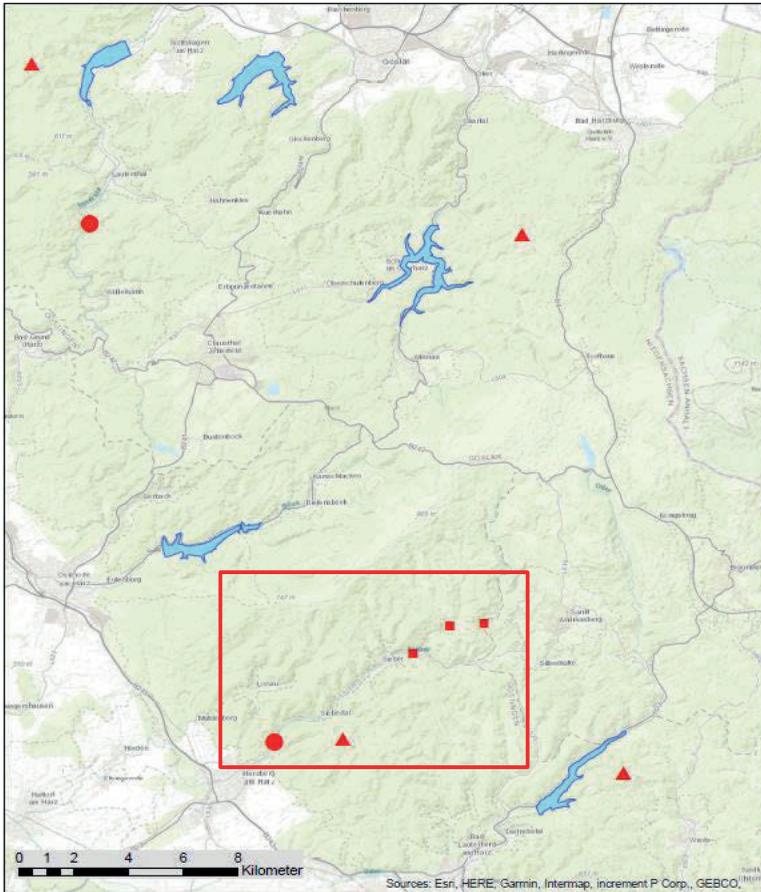
Wassernutzung im Siebertal



Maßnahmensteckbrief

Nr. 4





Legende

- Ableitungssperren_Neubaustandorte
- Talsperren_Neubaustandorte
- ▲ PSW_Neubaustandorte

Abbildung A1-10: Übersichtskarte Standort 4

Nummer	Standort	Art der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Volumina
1	Okertalsperre - Huneberg	bisherige Nutzungen + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Huneberg als OB Abtrennung UB innerhalb Okertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> 16 Mio. m³ (Huneberg) PW: 2,4 Mio. m³
2	Wassernutzung im Innerstetalsperre	Speichereubau + PSW: unterirdisch (bestehende Talsperre)	<ul style="list-style-type: none"> Talsperre zw. Lautenthal u. Willdemann Varianten ol37 u. ol47 	<ul style="list-style-type: none"> ol37: 5,70 Mio. m³ ol47: 14 Mio. m³ 2,3 Mio. m³ (OB-ü an bestehender Talsperre)
3	Odertalsperre - Stöberhai	Trinkwassernutzung + PSW: oberirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Oberbecken bei Stöberhai Abtrennung UB innerhalb d. Odertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> 2 Mio. m³ (UB) 1,5 Mio. m³ PW: 1,35 Mio. m³
4	Wassernutzung im Siebertal	kompletter Speichereubau + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> Talsperre zw. Herzberg u. Sieber Varianten S47 u. S95 	<ul style="list-style-type: none"> S47: 16 Mio. m³ (Talsperre; UB) 2 Mio. m³ 1,8 Mio m³
5	Granetalsperre	Staudammerhöhung: Erhöhung Gesamtvolumen	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung um 15 m 40 Mio. m³ mehr Stauraum 	<ul style="list-style-type: none"> 86 Mio. m³ Stauraum
6	Herzberger Teich	Hochwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> HT als HWR Ertüchtigung d. Gose-Ableitung oder HWR an Ableitungsstelle 	

Wassernutzung im Siebertal	
Allgemeine Daten	
Übersichtskarte	
Aktuelle Nutzungen	-
Angestrebte Nutzungen	Trinkwasser, Hochwasserschutz, Niedrigwasser, Energiespeicherung
Gewässer	Sieberer
Gewässer-km	-
Einzugsgebiet	-
Abflüsse am Standort	Pionierbrücke • MNQ: 0,25 • MQ: 1,53 • HNQ: 24,06
Vorhandene Infrastruktur	-
Art der Maßnahme	• Talsperren-Neubau • PSW-Bau
Beschreibung der baulichen Variante	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zwischen Sieberer u. Herzberg (2 Varianten) • 1-2 Ableitungswehre (Varianten AS I u. II) oberhalb von Sieber (Erfassung von Sieberer u. Kulmke) • 3 potentielle PSW-Standorte (oberirdisch)
Wasserbau/Wasserwirtschaft	
Stauvolumen [m³]	Variante S47: 16 Mio. m³
Bauwerksvolumen [m³]	Variante S47: 0,94 Mio. m³
Überleitungsoptionen	Teil der Überleitungsvarianten 1-1; 2
Speicherdaten	
Stauziel [m ü. NHN]	Variante S47: 316 m ü. NHN
Staufläche [km²]	Variante S47: 0,79 km²
Bauwerksdaten	
Dammvolumen [m³]	Variante S47: 0,94 Mio. m³
Dammhöhe [m]	Variante S47: 47 m
Dammkrone [m ü. NHN]	Variante S47: 317 m ü. NHN
Kronenlänge [m]	306 m

Speicher oberirdisch - Ostfalia

Standort/ ...	4. Siebertal		
		Siebertalsperre	Knollenspeicher
	Aktuell	Zukunft	Zukunft
Hochwasserentlastung	0	250 m ³ /s	
Hochwasser- rückhalteraum		2,4 Mio. m ³	0
Betriebsraum (TW, NW)		9,9 Mio. m³	0
Reserveraum (TW, NW)		2,4 Mio m ³	0,08 Mio. m³
PSW-UB		1,3 Mio. m³	
PSW-OB			1,3 Mio. m³
Überleitung zur Grane		12 Mio. m ³ /a	
Max.-Auslastung (TW)			
Speichervolumen		16 Mio. m ³	1,38 Mio. m³
Standort-Volumen		17,38 Mio. m³	

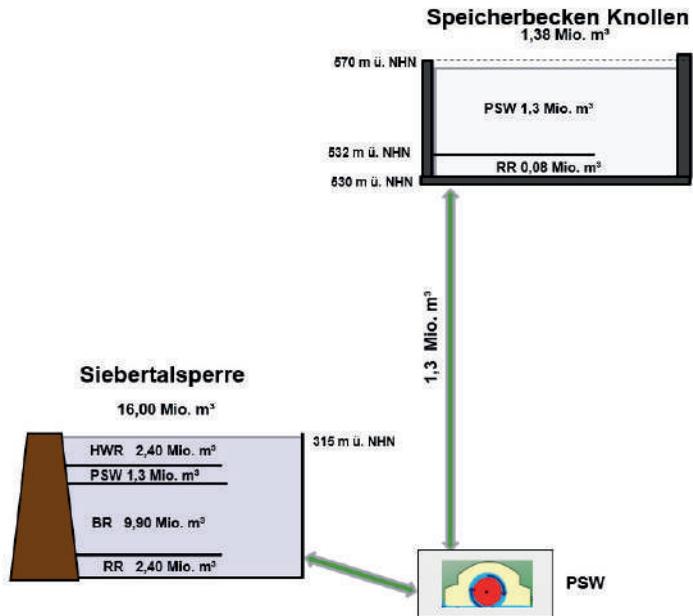


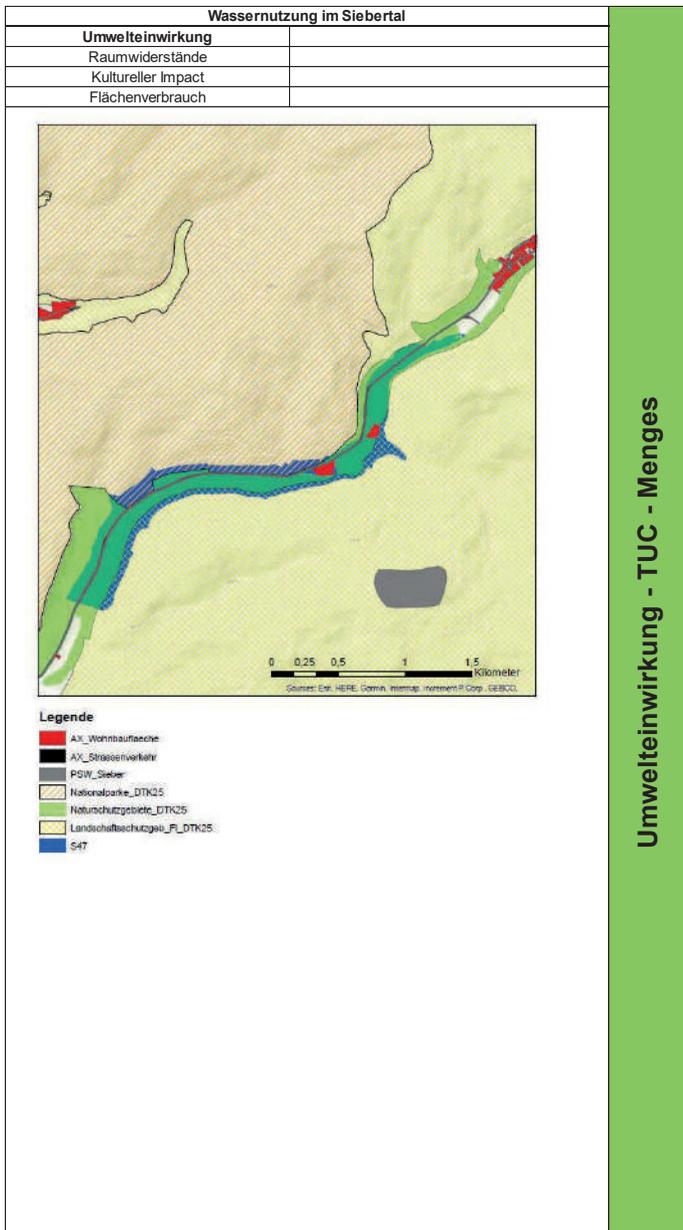
Abbildung A1-11: Systemskizze Standort 4

Wassernutzung im Siebertal	
Übersichtskarte	
Beschreibung der baulichen Variante	
Bauliche Planung unter Tage	
Oberfläche [m ²]	• Option 1: 587 600 • Option 2: 262 440
Gesamtvolumen [m ³]	• Option 1: 2.204 Mio. • Option 2: 904 200
Nutzvolumen [m ³]	• Option 1: 1,763 Mio. • Option 2: 725 760 Mio.
Fallhöhe [m]	• Option 1: 255 • Option 2: 600
Geologische Eigenschaften	
Gesteinsformation (en)	• Karbon/Unterkarbon (dinant): Grauwacke, Tonschieferlagen
Tektonische Störung oder Erzgang	Nein
Altlasten/Altbergbau	Ja
Gebirgsmechanische Eigenschaften	
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit [MPa]	160
Gebirgsqualität	Mäßig bis gut
Pfeilerbelastung [MPa]	• Option 1: 7,569 • Option 2: 58,4478
Ausnutzung der Druckfestigkeit [%]	• Option 1: 31,91 • Option 2: 246,44
Sicherheitsfaktor	• Option 1: 10 - 12 • Option 2: 0,71 - 1
Bauwerksdaten - Speicher	
Anlagentyp	Kammerbau (Room and Pillar)
Pfeileranzahl	• Option 1: 5876 • Option 2: 3240
Abmaße von Pfeilern [m]	5 x 5
Pfeilerfläche [m ²]	25
Abmaße von Kammern [m]	• Option 1: 10 x 10 • Option 2: 9 x 9
Systemfläche [m ²]	• Option 1: 100 • Option 2: 81
Kammerhöhe [m]	5
Anzahl Bewetterungszugänge	• Option 1: 3 • Option 2: 1
Bewetterungszugang Durchmesser [m]	2
Überdeckung [m]	• Option 1: 30 - 75 • Option 2: 620 - 715
Gesamtausbruchvolumina [m ³] - Speicher	2.646.900,00
Bauwerksdaten - Kraftwerkskaverne	
Volumina der Kraftskaverne [m ³]	5.646.678.865
Abmaße der Kraftskaverne H x B x L [m x m x m]	51 x 20 x 55
Bauwerksdaten - Druckstollen	
Durchmesser [m]	7
Länge Triebwasserstollen:	• 295,27 (Speicher unter Tage)
Langfast/Knollen --> KW [m]	• 688,523 (Speicher über Tage)
Länge Triebwasserstollen: KW --> Siebertalsperre [m]	• 950,664 (Speicher unter Tage) • 853,081 (Speicher über Tage)
Gesamtlänge Triebwasserstollen [m]	• 1.245,934 (Speicher unter Tage) • 1.541,604 (Speicher über Tage)
Gesamtausbruchvolumina [m ³] - KW und Triebwasserstollen	• 216.758,41 (Speicher unter Tage) • 250.408,54 (Speicher über Tage)
Gesamtausbruchvolumina [m ³] Speicher, Kraftwerkskaverne und Druckstollen	2.8757.928,20 (Speicher unter Tage)

Speicher unterirdisch - TUC - Langefeld

Wassernutzung im Siebertal		
Energiesystem		
Kraftwerkstyp:	PSW Sieber	
Turbinentyp:	Francis-Turbine	
Anzahl der Turbinen:	2	
Gefälle/Fallhöhe [m]	217	
Durchfluss [m³/s]	90	
Nennleistung (4h) [MW]	155	

Energiesystem TUC - Beck





Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)

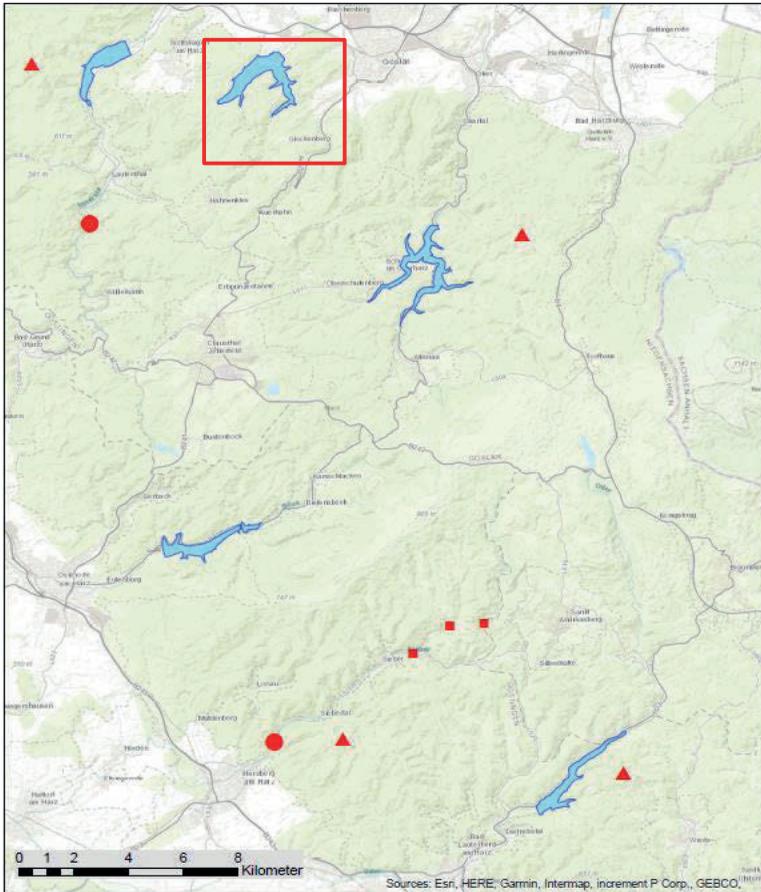
Erhöhung Granetalsperre



Maßnahmensteckbrief

Nr. 5





Legende

- Ableitungssperren_Neubaustandorte
- Talsperren_Neubaustandorte
- ▲ PSW_Neubaustandorte

Abbildung A1-12: Übersichtskarte Standort 5

Nummer	Standort	Art der Maßnahme	Kurzbeschreibung	Volumina
1	Okertalsperre - Huneberg	bisherige Nutzungen + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Huneberg als OB • Abtrennung UB innerhalb Okertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Mio. m³ (Huneberg) • PW: 2,4 Mio. m³
2	Wassernutzung im Innerstetalsperre	Speicherneubau + PSW: unterirdisch (bestehende Talsperre)	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zw. Lautenthal u. Willdemann • Varianten ol37 u. ol47 	<ul style="list-style-type: none"> • ol37: 5,70 Mio. m³ • ol47: 14 Mio. m³ • 2,3 Mio. m³ (OB-ü an bestehender Talsperre)
3	Odertalsperre - Stöberhai	Trinkwassernutzung + PSW: oberirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Oberbecken bei Stöberhai • Abtrennung UB innerhalb d. Odertalsperre 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Mio. m³ (UB) • 1,5 Mio. m³ • PW: 1,35 Mio. m³
4	Wassernutzung im Siebertal	kompletter Speicherneubau + PSW: ober-/unterirdisch	<ul style="list-style-type: none"> • Talsperre zw. Herzberg u. Sieber • Varianten S47 u. S95 	<ul style="list-style-type: none"> • S47: 16 Mio. m³ (Talsperre; UB) • 2 Mio. m³ • 1,8 Mio m³
5	Granetalsperre	Staudammerhöhung: Erhöhung Gesamtvolumen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung um 15 m • 40 Mio. m³ mehr Stauraum 	<ul style="list-style-type: none"> • 86 Mio. m³ Stauraum
6	Herzberger Teich	Hochwasserschutz	<ul style="list-style-type: none"> • HT als HWR • Ertüchtigung d. Gose-Ableitung oder HWR an Ableitungsstelle 	

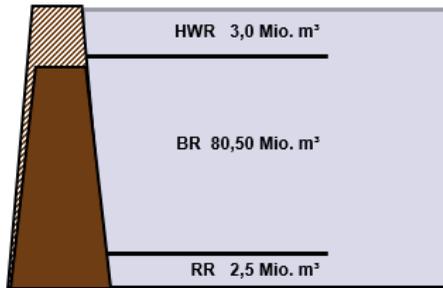
Granetalsperre	
Allgemeine Daten	
Übersichtskarte	<p>Granetalsperre (Erhöhung: Dunkelblau)</p>
Aktuelle Nutzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserschutz • Trinkwassergewinnung • Niedrigwasseraufhöhung
Angestrebte Nutzungen	-
Gewässer	Grane
Gewässer-km	-
Einzugsgebiet	-
Abflüsse am Standort	<ul style="list-style-type: none"> • MNQ: 0,019 • MQ: 0,135 • MHQ: 2,19
Vorhandene Infrastruktur	Talsperre
Art der Maßnahme	Staudammerhöhung
Beschreibung der baulichen Variante	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Erhöhung des Staubauwerks um 15 m • Abhängigkeit von Überleitungskonzeption
Wasserbau/Wasserwirtschaft	
Stauvolumen [m³]	• 40 Mio. m³ zusätzliches Stauvolumen
Bauwerksvolumen [m³]	
Überleitungsoptionen	Überleitung aus dem Innerstetal, Teil von Überleitungsvariante 2
Speicherdaten	
Stauziel [m ü. NHN]	325 m ü. NHN
Staufäche [km²]	3,34 km²
Bauwerksdaten	
Dammvolumen [m³]	0,9 Mio. m³
Dammhöhe [m]	82 m
Dammkrone [m ü. NHN]	328 m ü. NHN

Speicher oberirdisch - Ostfalia

Standort/ ...	5. Granetalsperre	
	Aktuell	Zukunft
Hochwasserentlastung	70 m ³ /s	70 m ³ /s
Hochwasser- rückhalteraum	2,0 Mio. m ³	3,0 Mio. m ³
Betriebsraum (TW, NW)	41,89 Mio. m ³ einschl. Flex-Lamelle	80,5 Mio. m ³
Reserveraum (TW, NW)	2,5 Mio. m ³	2,5 Mio. m ³
PSW-UB	-	-
PSW-OB	-	-
Überleitung zur Grane	-	-
Max.-Auslastung (TW)	50 Mio. m ³ Rohwasser	65,5 Mio. m ³
Speichervolumen	46,39 Mio. m ³	86 Mio. m ³
Standort-Volumen	46,39 Mio. m ³	86 Mio. m ³

Granetalsperre Zukunft

86,00 Mio. m³



Granetalsperre Ist-Zustand

46,39 Mio. m³



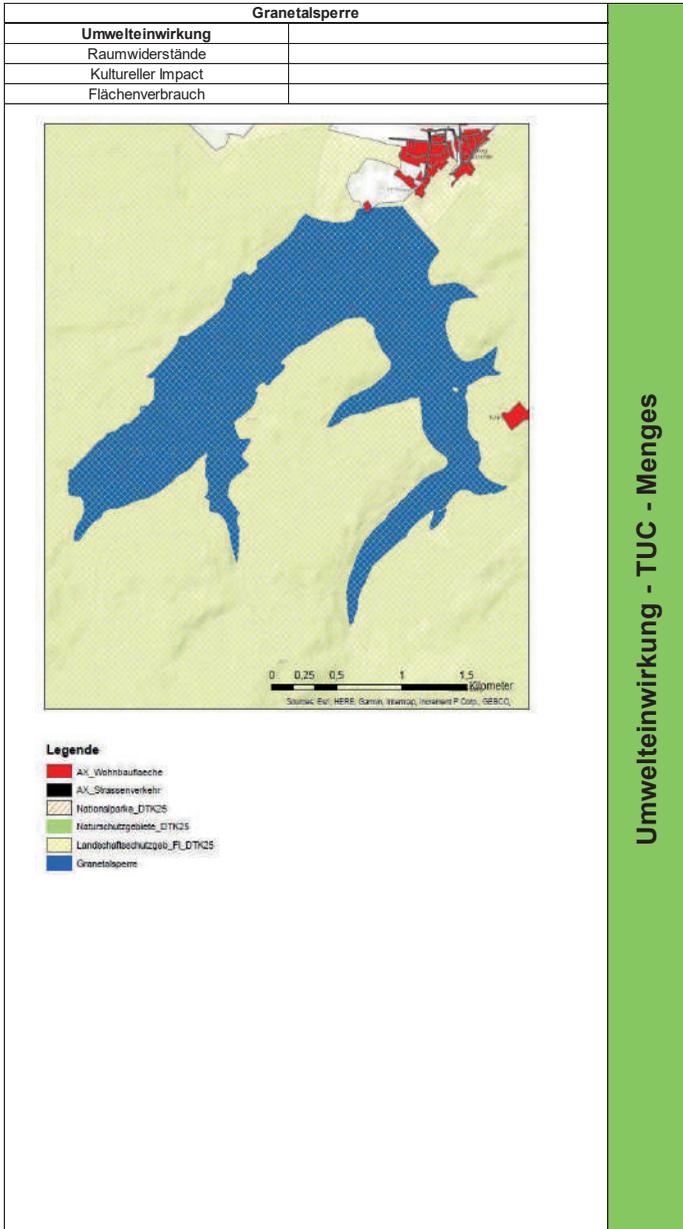
Abbildung A1-13: Systemskizze Standort 5

Granetalsperre	
Geologische Eigenschaften	
Gesteinsformation (en)	
Tektonische Störung oder Erzgang	
Altlasten/Altbergbau	
Gebirgsmechanische Eigenschaften	
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit [MPa]	
Gebirgsqualität	
Bauwerksdaten - Druckstollen	
Druckstollen durchmesser [m] (KW-Hüneberg)	
Druckstollen durchmesser [m] (Kalbetal-KW)	
Verbindungspunkte	
Länge [m] (KW-Hüneberg)	
Länge [m] (Kalbetal-KW)	
Bauwerksdaten - Kraftwerkskaverne	
Abmaße der Kraftskaverne	
Sicherheitsfaktor	

Speicher unterirdisch - TUC - Langefeld

Granotalsperre		
Energiesystem		
Kraftwerkstyp:		
Turbinentyp:		
Anzahl der Turbinen:		
Gefälle/Fallhöhe [m]		
Durchfluss [m ³ /s]		
Nennleistung [MW]		

Energiesystem TUC - Beck

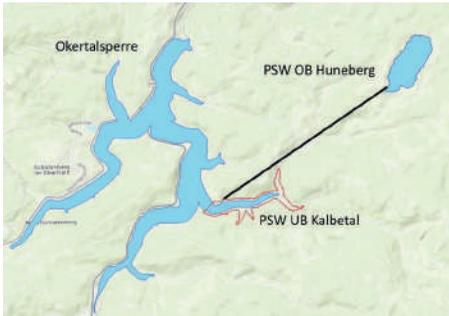


Granetalsperre																	
Bauwerkskosten; oberirdisch	20 Mo. €																
Bauwerkskosten; unterirdisch	0																

Kosten - TUC - Menges

10.2 A2 – Entscheidersteckbriefe zu Kapitel 8

Steckbrief: Okertalsperre - Huneberg (Nr. 1)



Aktuelle Nutzungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Trinkwasser-Beileitung

Ausbau mit dem Ziel:

- Verbesserung Hochwasserschutz
- Verbesserung Niedrigwasseraufhöhung
- Erweiterung um Energiespeicherung

An der Okertalsperre besteht mit dem Steinbruch auf dem Huneberg ein potentielles Oberbecken bereit. Die Okertalsperre soll daher zum Teil um das Volumen des Hunebergs erweitert werden, um so in Zukunft mehr Speicherkapazität für die bestehenden Systemdienstleistungen am Standort bereitstellen zu können. Ziel ist die Schaffung einer zusätzlichen Reserve für Trockenperioden, sowie die Bereitstellung von zusätzlichem Rückhalteraum für starke Hochwasserereignisse. Weiterhin soll der Huneberg in Kombination mit der Okertalsperre als Pumpspeicherkraftwerk genutzt werden. Da die Okertalsperre ein Zwischenspeicher für die Rohwasser der Trinkwassergewinnung darstellt, wird eine bauliche Trennung innerhalb der Okertalsperre angestrebt, um den Hauptstaukörper vor den direkten Auswirkungen der Pumpspeichersequenzen zu schützen.

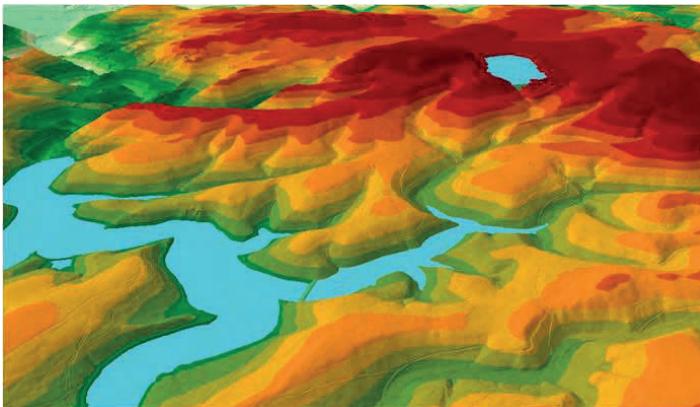


Abbildung A2-1: Okertalsperre mit abgetrenntem Kalbeta und gefülltem Huneberg

Wassermengenwirtschaft

Hochwasserschutz: Erwartete Hochwasservolumina an der Messstelle Schladen:	um 24 % reduziert		
Auswirkungen auf Hochwasserschutz:	Keine:	Niedrig:	Hoch: X
Niedrigwasseraufhöhung: Dauer der Niedrigwasserereignisse an der Messtelle Schladen:	um 49 % reduziert		
Auswirkung auf Niedrigwasserschutz:	Keine:	Niedrig:	Hoch: X

Trinkwasserbereitstellung

Veränderung des 1 %-Perzentils an der Granetalsperre durch Huneberg:*	um 5 % erhöht		
Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Region:	Keiner:	Niedrig: X	Hoch:

* Die Variante Huneberg beinhaltet keine eigene Trinkwasser-Aufbereitung, allerdings wird durch diese Baumaßnahme die Überleitung zur Granetalsperre unterstützt. Damit steht an der Granetalsperre mehr Rohwasser zur Verfügung. Diese Wirkung wird z. B. am 1 %-Perzentil der Granetalsperre deutlich, so stehen in sehr trockenen Perioden (die 1 %-trockenste Zeit) 5 % mehr Rohwasser zur Verfügung.

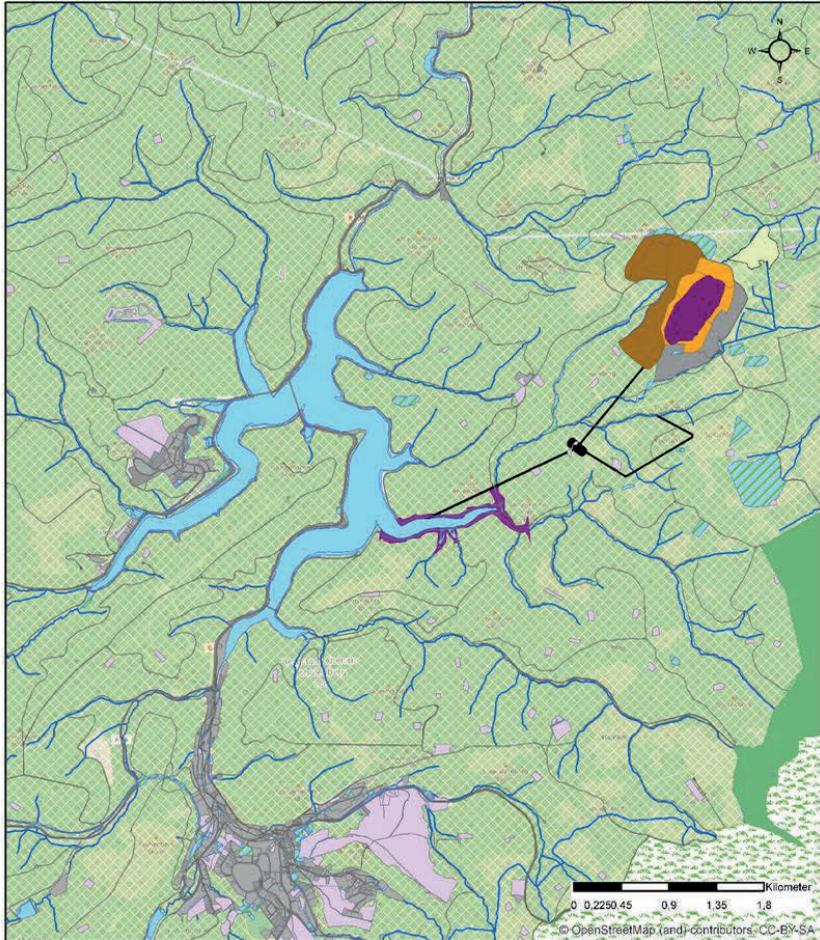
Kosten

Baukosten:	296 Mio. €
------------	------------

Elektrischer Speicher

Größe des Speichers in MWh:	720
Entspricht im Jahr 2050 des niedersächsischen Speicherbedarfs.	0,5 %

Umwelt und Kultur



Legende

 AX_Gebaeude	 Landschaftsschutzgeb_FL_DTK25
 AX_Gehoelz	 Nationalparke_DTK25
 AX_Halde	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 PSW_Huneberg
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 AX_TagebauGrubeSteinbruch	 Talsperren

Abbildung A2-2: Überblick über die Maßnahme 1 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

Flächenverbrauch:	Wasserspeicherräume im Bereich eines Landschaftsschutzgebietes: <ul style="list-style-type: none">• Kalbeta: 0,26 km² Wasserspeicherräume im Bereich eines Tagebaus: <ul style="list-style-type: none">• Huneberg: 0,43 km²
Raumwiderstände:	Hohestein: <ul style="list-style-type: none">• Landstraße ca. 3,5 km• Wanderwege ca. 0,6 km

Steckbrief: Obere Innerstetalsperre - Hohenstein (Nr. 2)



Aktuelle Nutzungen:

- „Untere“ Innerstetalsperre
 - Hochwasserschutz
 - Niedrigwasseraufhöhung
 - Trinkwassergewinnung

Neubau der „oberen“ Innerstetalsperre mit den Zielen:

- Energiespeicherung
- Verbesserung von:
 - Hochwasserschutz
 - Trinkwasserbereitstellung
 - Energiespeicherung

Im Innerstetal besteht schon eine (untere) Innerstetalsperre, welche gegenwärtig dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung und der Trinkwassergewinnung dient. Der Standort soll um die Systemdienstleistung Energiespeicherung erweitert werden, so dass ein oberirdisches Oberbecken auf dem Höhenzug Hohenstein geplant ist. Zugleich soll weiterer Speicherraum für die bestehenden Nutzungen in Form von Hochwasserschutz und Rohwasserspeicherung für die Trinkwassergewinnung geschaffen werden. Hierfür ist zwischen den Ortslagen Wildemann und Lautenthal die Errichtung einer „oberen Innerstetalsperre“ vorgesehen.

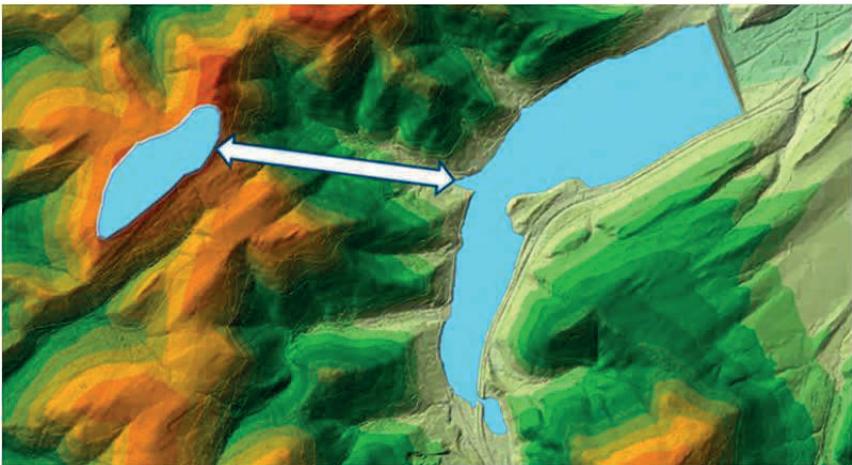


Abbildung A2-3: Bestehende "untere" Innerstetalsperre erweitert um ein oberirdisches Becken auf dem Hohenstein

Wassermengenwirtschaft

Hochwasserschutz: Erwartete Hochwasservolumina an der Messstelle Heinde:	um 17 % reduziert		
Auswirkungen auf Hochwasserschutz:	Keine:	Niedrig:	Hoch: X
Niedrigwasseraufhöhung: Dauer der Niedrigwasserereignisse an der Messtelle Heinde:	unverändert		
Auswirkung auf Niedrigwasserschutz:	Keine: X	Niedrig:	Hoch:

Trinkwasserbereitstellung

Zusätzliche jährlich Rohwasser-Bereitstellung:*	2,1 hm ³ /a		
Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Region:	Keiner:	Niedrig:	Hoch: X

* Durch vermehrte Überleitung zur Grane

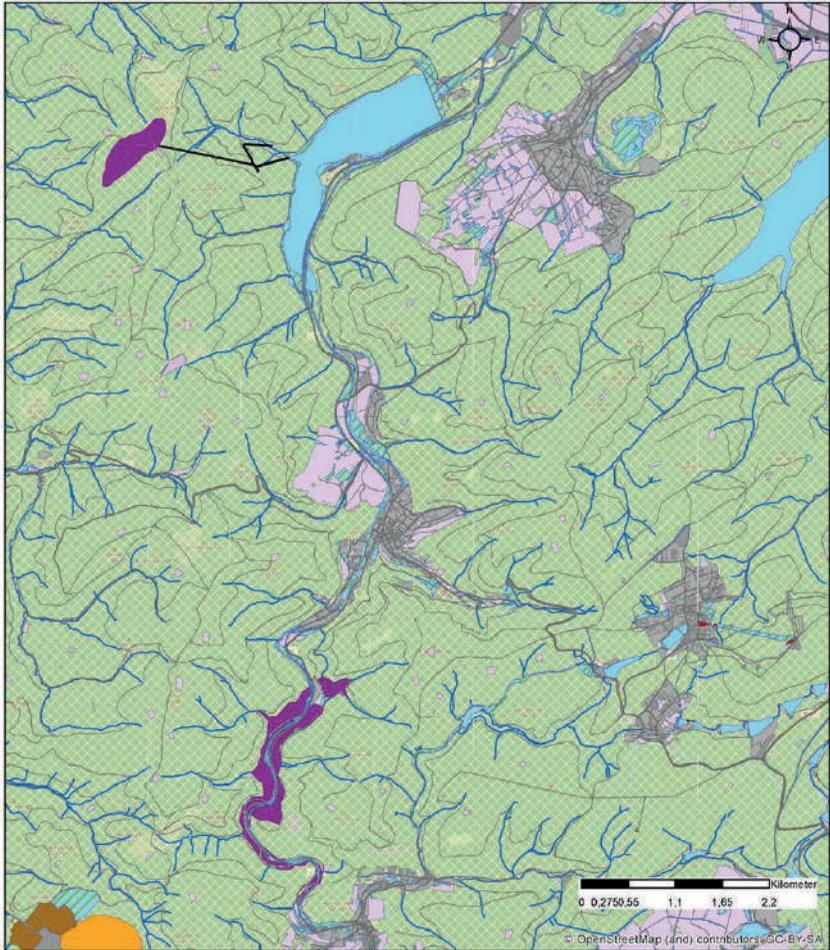
Kosten

Baukosten:	268 Mio. €
------------	------------

Elektrischer Speicher

Größe des Speichers in MWh:	1220
Entspricht im Jahr 2050 des niedersächsischen Speicherbedarfs.	0,9 %

Umwelt und Kultur



Legende

 AX_Gebaeude	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 PSW_Innerste
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25	 Talsperren
 Nationalparke_DTK25	

Abbildung A2-4: Überblick über die Maßnahme 2 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

Flächenverbrauch:	<p>Wasserspeicherräume im Bereich eines Landschaftsschutzgebietes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Obere Innerste: 0,74 km² • Hohenstein: 0,30 km²
Raumwiderstände:	<p>Obere Innerste:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Landstraße L515 ca. 4 km, Radweg, Wanderweg, • 1 Kriegerdenkmal • 4 Flurstücke inkl. 1 Hunderanch mit insgesamt 1,69 km² <p>Hohenstein:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forster-Bauer-Weg ca. 0,5 km • Grünland (eine Grasfläche, die gemäht oder beweidet wird) 320 m²

Steckbrief: Odertalsperre - Stöberhai (Nr. 3)



Aktuelle Nutzungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung

Ausbau mit den Zielen:

- Trinkwasserbereitstellung
- Energiespeicherung

Am Standort Odertalsperre ist eine Erweiterung der Nutzungen Trinkwassergewinnung und Energiespeicherung vorgesehen. Hierzu muss der Standort um ein Oberbecken erweitert werden. Weiterhin wird zum Schutz des Hauptstaukörpers eine bauliche Abtrennung eines Bereiches innerhalb der Talsperre vorgeschlagen.

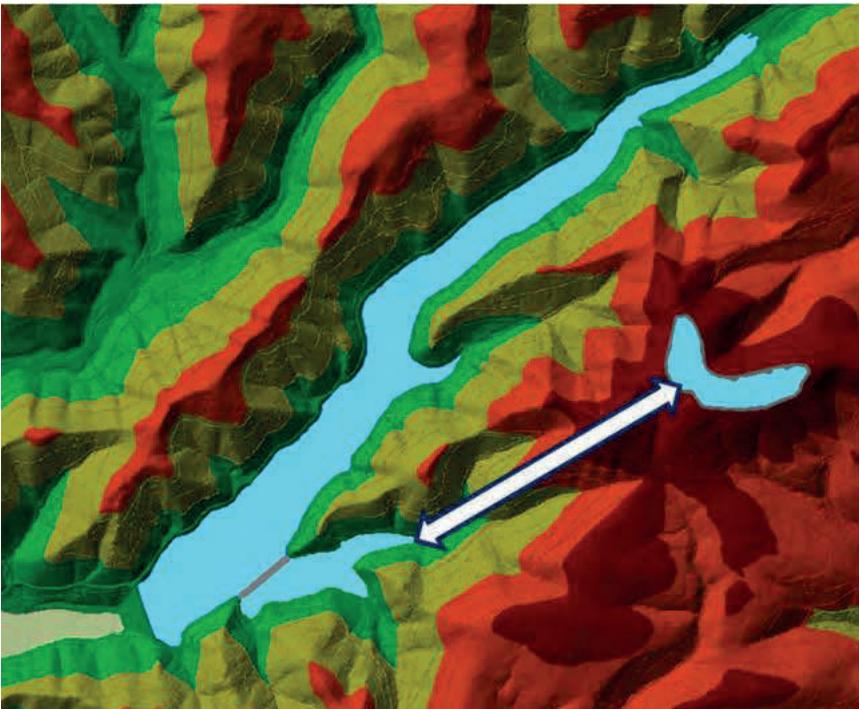


Abbildung A2-5: Odertalsperre mit abgetrenntem Seitenarm und oberirdischen Oberbecken Stöberhai

Wassermengenwirtschaft

Hochwasserschutz: Erwartete Hochwasservolumina an der Messstelle Lindau:	unverändert		
Auswirkungen auf Hochwasserschutz:	Keine: X	Niedrig:	Hoch:
Niedrigwasseraufhöhung: Dauer der Niedrigwasserereignisse an der Messtelle Lindau:	um 1500 % erhöht		
Auswirkung auf Niedrigwasserschutz:*	Keine:	Niedrig:	Hoch: X

* Durch hohe Trinkwasserentnahme bei gleichbleibendem Dargebot und unveränderten Betriebsregeln ergibt sich eine signifikante Verschlechterung der Niedrigwassersituation. Bei Realisierung bzw. Detailplanung dieser Variante müssten entsprechend die Betriebsregeln und ggf. zusätzliche Überleitungen geprüft werden.

Trinkwasserbereitstellung

Zusätzliche jährlich Rohwasser-Bereitstellung:	9 hm ³ /a		
Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Region:	Keiner:	Niedrig:	Hoch: X

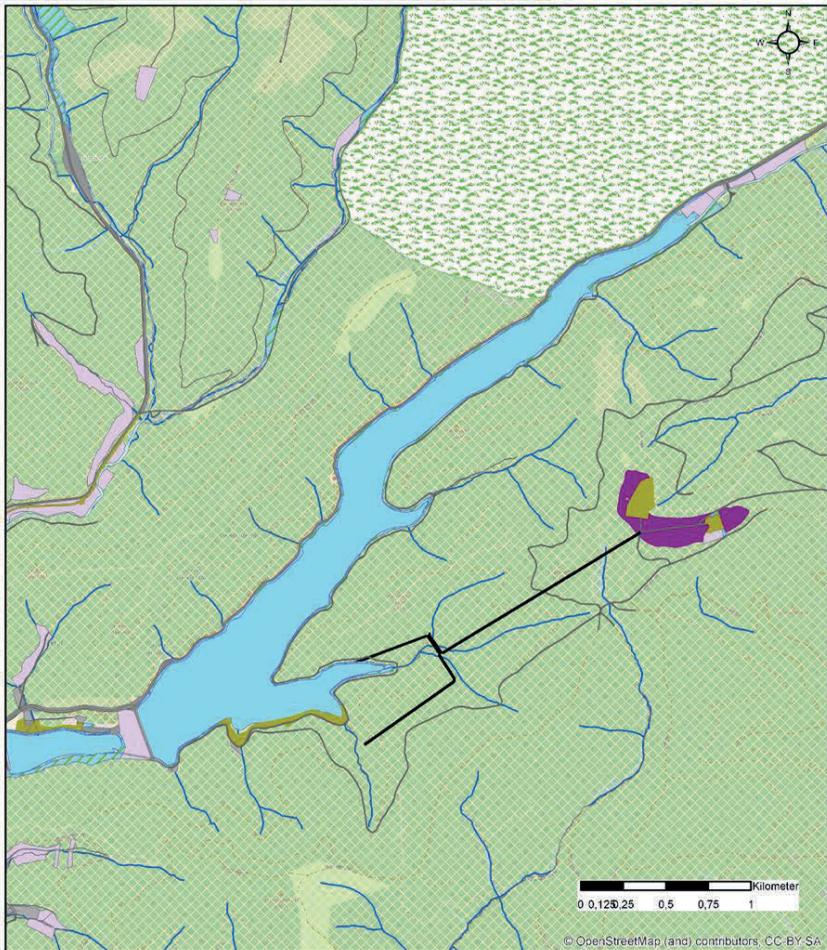
Kosten

Baukosten:	277 Mio. €
------------	------------

Elektrischer Speicher

Größe des Speichers in MWh:	1380
Entspricht im Jahr 2050 des niedersächsischen Speicherbedarfs.	1,0 %

Umwelt und Kultur



Legende

 AX_Gebaeude	 Nationalparke_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_SportFreizeitUndErholungsflaeche	 PSW_Oder
 AX_Strossenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25	 Talsperren

Abbildung A2-6: Überblick über die Maßnahme 3 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

Flächenverbrauch:	Wasserspeicherräume im Bereich eines Landschaftsschutzgebietes: <ul style="list-style-type: none">• Stöberhai: 0,095 km²
Raumwiderstände:	Stöberhai: <ul style="list-style-type: none">• Forster-Bauer-Weg ca. 0,7 km• Wanderwege ca. 0,5 km• Freizeit und Erholungsflächen (Grünfläche) 0,036 km²• 1 Denkmal NATO-Horchposten• 1 Kontrollpunkt im Harzer Wandernadel Wandernetz (Nr. 159)• Grünland (eine Grasfläche, die gemäht oder beweidet wird) 6491 m²

Steckbrief: Siebertal - Knollen (Nr. 4)

Aktuelle Nutzungen:

- Keine

Neubau mit den Zielen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Energiespeicherung
- Trinkwassergewinnung

Im Siebertal können Systemdienstleistungen an einem Standort etabliert werden. Hierzu ist geplant, eine Talsperre zwischen den Ortslagen Sieber und Herzberg zu errichten. Auf dem Knollen kann ein oberirdisches Oberbecken für ein Pumpspeicherkraftwerk entstehen. Das Wasser für die Trinkwassergewinnung soll oberhalb der Ortschaft Sieber beim Zusammenfluss von Lonau und Sieber mittels eines Ableitungswehrs abgezogen werden und kann auf die Aufbereitungsstandorte Grane- oder Sösetalsperre verteilt werden.

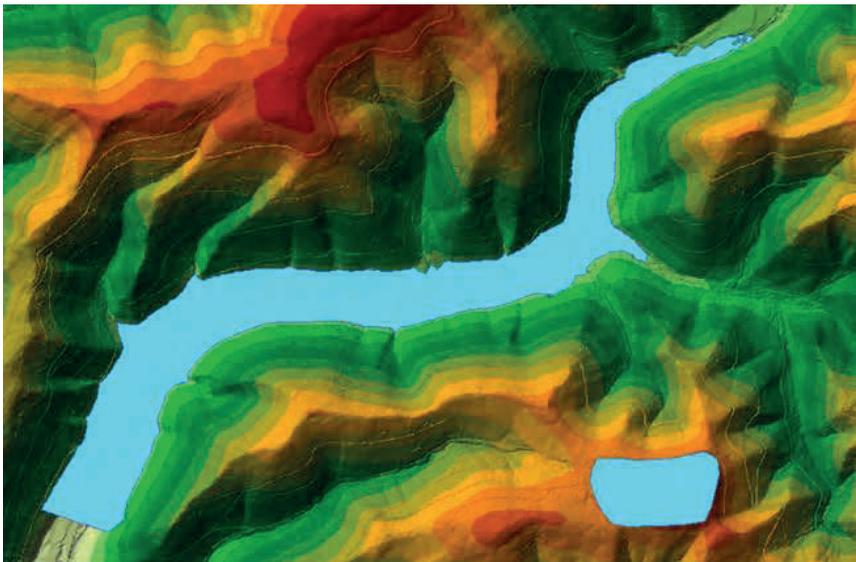


Abbildung A2-7: Siebertalsperre mit Oberbecken auf dem Knollen

Wassermengenwirtschaft

Hochwasserschutz: Erwartete Hochwasservolumina an der Messstelle Lindau:	um 55 % reduziert		
Auswirkungen auf Hochwasserschutz:	Keine:	Niedrig:	Hoch: X
Niedrigwasseraufhöhung: Dauer der Niedrigwasserereignisse an der Messtelle Lindau:	um 21 % reduziert		
Auswirkung auf Niedrigwasserschutz	Keine:	Niedrig:	Hoch: X

Trinkwasserbereitstellung

Keine Trinkwasserbereitstellung geplant			
Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Region:	Keiner: X	Niedrig:	Hoch:

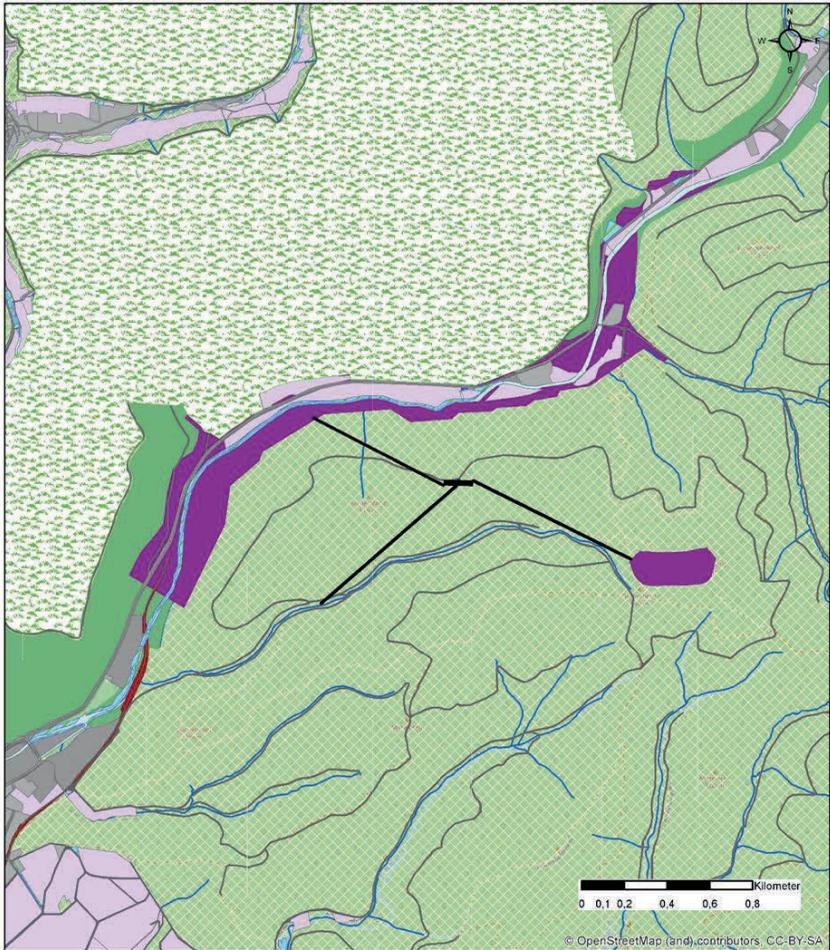
Kosten

Baukosten:	208 Mio. €
------------	------------

Elektrischer Speicher

Größe des Speichers in MWh:	620
Entspricht im Jahr 2050 des niedersächsischen Speicherbedarfs.	0,5 %

Umwelt und Kultur



Legende

 AX_Gebäude	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 PSW_Sieber
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25	 Talsperren
 Nationalparke_DTK25	

Abbildung A2-8: Überblick über die Maßnahme 4 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

Flächenverbrauch:	<p>Wasserspeicherräume im Bereich eines Nationalparks, sowie Landschaftsschutz- und Naturschutzgebietes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Siebertalsperre: 0,79 km² <p>Wasserspeicherräume im Bereich eines Landschaftsschutzgebietes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Knollen: 0,06 km²
Raumwiderstände:	<p>Siebertalsperre:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Landstraße L521 ca. 3,7 km, Radweg, Wanderwege • 6 Flurstücke inkl. das Paradies Kiosk (Kiosk und Veranstaltungsort) mit insgesamt 0,02 km² • Industrie- und Gewerbefläche unter der Kategorie Lagerort 1783 m²

Steckbrief: Erhöhung Granetalsperre (Nr. 5)**Aktuelle Nutzungen:**

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasseraufhöhung
- Trinkwasserabgabe
- Stromerzeugung

Erhöhung der Staumauer mit den Zielen:

- Erhöhung der Trinkwasserabgabe

Die Erhöhung der Granetalsperre um bis zu 15 m dient in erster Linie der Sicherstellung der Trinkwassergewinnung in der Zukunft. Das Volumen des Standortes kann durch eine solche Erhöhung des Staudammes mehr als verdoppelt werden.

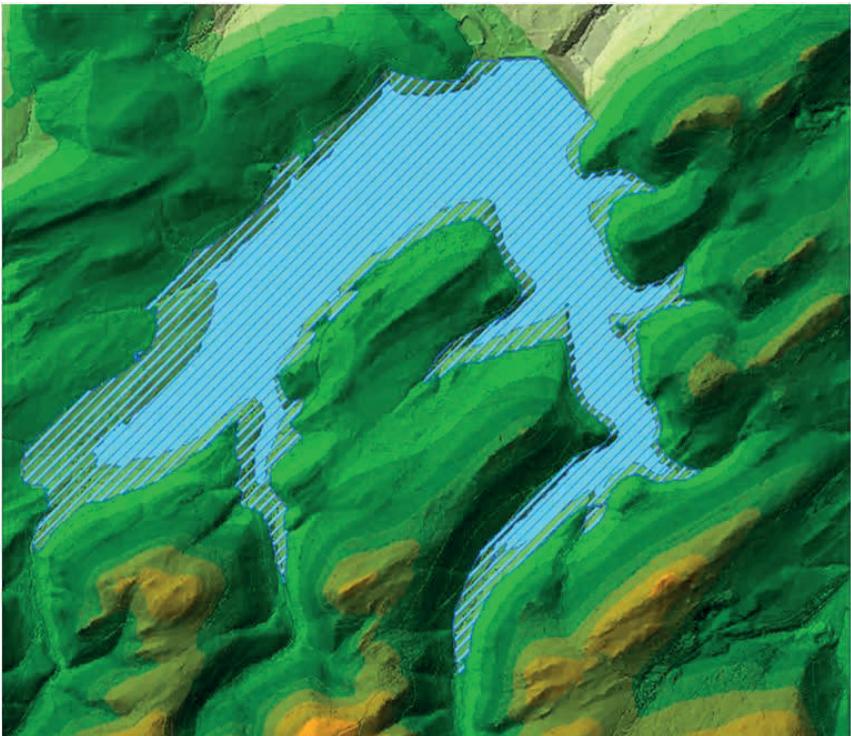


Abbildung A2-9: Stauraum der Granetalsperre bei Erhöhung um 15 m

Wassermengenwirtschaft

Hochwasserschutz: Erwartete Hochwasservolumina an der Messstelle Heinde:	um 5 % reduziert		
Auswirkungen auf Hochwasserschutz:	Keine:	Niedrig: X	Hoch:
Niedrigwasseraufhöhung: Dauer der Niedrigwasserereignisse an der Messtelle Heinde:*	um 12 % erhöht		
Auswirkung auf Niedrigwasserschutz:	Keine: X	Niedrig:	Hoch:

* Durch eine erhöhte Trinkwasserabgabe wird die Niedrigwassersituation verschlechtert. Die erwartete Dauer der Niedrigwasserereignisse über 30 Jahre erhöht sich aber von 71 h auf 80 h aber nur unwesentlich.

Trinkwasserbereitstellung

Zusätzliche jährlich Rohwasser-Bereitstellung:	6,6 hm ³ /a		
Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Region:	Keiner:	Niedrig:	Hoch: X

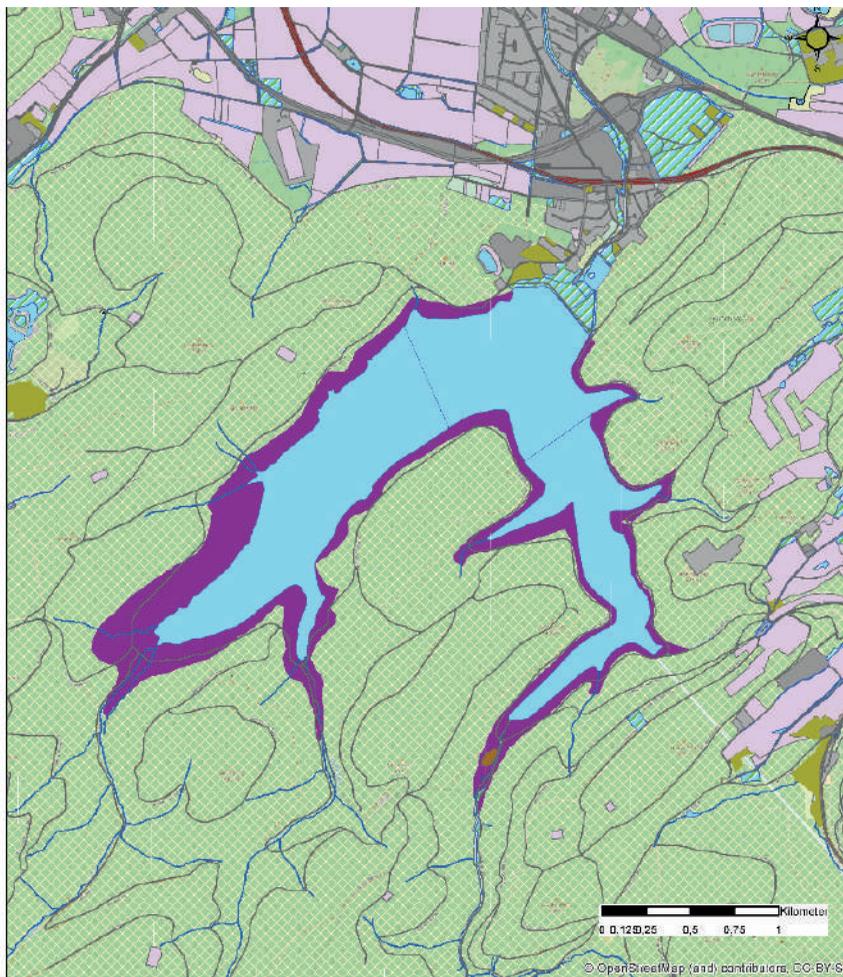
Kosten

Baukosten:	20 Mio. €
------------	-----------

Elektrischer Speicher

Größe des Speichers in MWh:	0
Entspricht im Jahr 2050 des niedersächsischen Speicherbedarfs.	0,0 %

Umwelt und Kultur



Legende

 AX_Gebäude	 Landschaftsschutzgeb_FI_DTK25
 AX_Landwirtschaft	 Nationalparke_DTK25
 AX_SportFreizeitUndErholungsflaeche	 Naturschutzgebiete_DTK25
 AX_Strassenverkehr	 Speicherbecken_EWAZ
 AX_Halde	 Talsperren

Abbildung A2-10: Überblick über die Maßnahme 5 und die geplanten unterirdischen Bauwerke

Flächenverbrauch:	Wasserspeicherräume im Bereich eines Nationalparks sowie Landschaftsschutzgebiets: <ul style="list-style-type: none">• Granetalsperre: Zunahme der Oberfläche um 1,15 km²
Raumwiderstände:	Granetalsperre: <ul style="list-style-type: none">• Landstraße ca. 13 km• Rad- und Wanderwege ca. 5 km

10.3 A3 – Fotodokumentation der Standorte



Abbildung A3-1: Staubauwerk der Odertalsperre (Luftseite)



Abbildung A3-2: Überlauf Unterwasserbecken der Odertalsperre



Abbildung A3-3: Odertalsperre (Blick gen Stöberhai und Herzbek)



Abbildung A3-4: Unterwasserbecken der Odertalsperre mit Schussrinne



Abbildung A3-5: Wehrüberlauf der Hochwasserentlastung an der Odertalsperre



Abbildung A3-6: Blick auf das Staubauwerk der Odertalsperre (Wasserseite)



Abbildung A3-7: Stöberhai



Abbildung A3-8: Stöberhai



Abbildung A3-9: Herzbek-Arm der Odertalsperre



Abbildung A3-10: Blick aus Sieber gen Süden



Abbildung A3-11: Sieber bei Herzberg (Blickrichtung flussaufwärts)



Abbildung A3-12: Oker im Oberlauf der Okertalsperre (Blickrichtung flussaufwärts)



Abbildung A3-13: Staubauwerk der Vorsperre der Okertalsperre



Abbildung A3-14: Vorsperre der Okertalsperre



Abbildung A3-15: Energieumwandlung der Okertalsperre



Abbildung A3-16: Staubauwerk der Okertalsperre



Abbildung A3-17: Innerstetal zwischen Lautenthal und Wildemann (Blickrichtung Norden)



Abbildung A3-18: Innerstetal zwischen Lautenthal und Wildemann (Blick gen Süden)



Abbildung A-19: Innerstetal zwischen Lautenthal und Wildemann (Blickrichtung gen Süden)



Abbildung A3-20: Innerste (Blickrichtung flussabwärts)



Abbildung A3-21: Staudamm der Granetalsperre



Abbildung A3-22: Unterwasserbecken der Granetalsperre



Abbildung A3-23: Grane-Stausee



Abbildung A3-24: Auslauf des Oker-Grane-Stollen



Abbildung A3-25: Oker bei Schladen (Blickrichtung flussaufwärts)



Abbildung A3-26: Hochwasserschutzmauer in der Ortschaft Schladen



Abbildung A3-27: Hochwasserschutzmaßnahme in der Ortschaft Schladen



Abbildung A3-28: Hochwasserschutzmauer an der Oker in Schladen (Blickrichtung flussabwärts)



Abbildung A3-29: Oker bei Schladen (Blickrichtung flussabwärts)



Abbildung A3-30: Innerste oberhalb von Hildesheim



Abbildung A3-31: Innerste oberhalb von Hildesheim (Kultur-Campus)



Abbildung A3-32: Innerste in Hildesheim (Blickrichtung flussaufwärts)



Abbildung A3-33: Innerste in Hildesheim (Blickrichtung flussabwärts)



Abbildung A3-34: Möglicher Retentionsraum an der Innerste in Hildesheim



Abbildung A3-35: Hochwasserschutzmaßnahme in Hildesheim



Abbildung A3-36: Hochwasserschutzmaßnahme "Bleicherstraße" in Hildesheim



Abbildung A3-37: Hochwasserschutzmaßnahme "Bleichestraße" in Hildesheim

