

# Wasserkraftnutzung am See Genezareth im Zusammenspiel mit Meerwasserentsalzung und Solarenergie

Vor dem Hintergrund der Erhöhung des Wassertransfers nach Jordanien sowie zur Stabilisierung des Wasserspiegels des See Genezareth wird dessen Versorgung mit entsalztem Meerwasser von der Küste diskutiert. Da der See unter dem Meeresspiegel liegt, könnte dabei die Höhendifferenz zur Stromerzeugung durch Wasserkraft genutzt werden. Diese Studie untersucht daher das Wasserkraftpotenzial am See Genezareth auf Basis der Zuleitung von entsalztem Meerwasser unter der Ausnutzung des vorhandenen Gefälles. Dazu wird neben dem kontinuierlichen Betrieb auch ein intermittierender Betrieb im Zusammenspiel mit anderen Energiequellen, wie der Solarenergie, betrachtet.

Martin Klein und Stephan Theobald

## 1 Wasserkraft und Stromerzeugung in Israel

Die israelische Stromversorgung wird derzeit stark von fossilen Energieträgern dominiert. Im Jahr 2020 wurden rund 68 300 GWh Strom aus Kohle, Öl oder Gas erzeugt, was einem Anteil von 94 % entspricht. Der größte erneuerbare Energieträger Photovoltaik trug im selben Jahr mit 4 066 GWh 5,6 % zur nationalen Stromproduktion bei [1]. Aufgrund der hohen Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und Verpflichtungen für den Klimaschutz hat Israel im Februar 2020 die im Vorfeld der Pariser Klimakonferenz 2015 selbstgesetzten Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien erhöht. Bis zum Jahr 2025 sollen 17-20 % und bis 2030 30 % der Stromversorgung durch regenerative Energien sichergestellt werden, was vor allem durch die Vermeidung von Kohleverstromung bei gleichzeitigem Ausbau von Solarenergie erreicht werden soll [2]. Bei dem Ausbau der Solarenergie konnte dabei in den letzten Jahren eine deutliche Erhöhung der Stromproduktion festgestellt werden. So betrug der Zubau in den Jahren 2019 und 2020 mit 1 720 GWh und 772 GWh 52 % bzw. 19 % der jeweiligen Jahresproduktionen des Solarstroms [1]. Die installierte Leistung der Photovol-

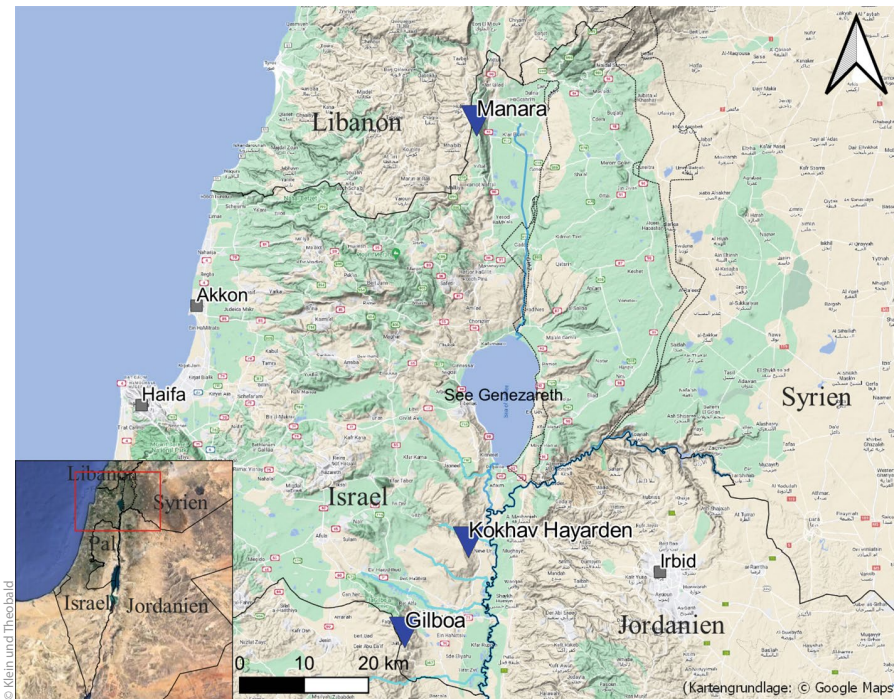
taikanlagen betrug dabei im Jahr 2020 rund 1,04 GW [2], und damit rund 5 % der israelischen Gesamtleistung von rund 19,7 GW. Andere erneuerbare Energieträger, wie die Windkraft, sind aufgrund gesellschaftlicher und behördlicher Widerstände in Israel nur von geringer Bedeutung für die Stromversorgung [2]; so wurden im Jahr 2020 lediglich 227 GWh Strom durch Windkraft erzeugt [1].

Der Ausbau der Solarenergie wird aufgrund ihres durch den Tag-Nacht-Zyklus intermittierenden Betriebs von einem Ausbau der Wasserkraft flankiert. Durch die Wasserkraft soll das Stromnetz stabil gehalten und Bedarfsspitzen abgefangen werden. Dazu plant das israelische Energieministerium die Inbetriebnahme von drei Pumpspeicherkraftwerken mit insgesamt 800 MW Leistung im Norden Israels (**Bild 1**). Mit dem 300-MW-Gilboa-Pumpspeicherkraftwerk ist im Juli 2020 das erste dieser Kraftwerke ans Netz gegangen und nutzt mit seinen beiden 150-MW-Francis-Pumpturbinen eine Fallhöhe von 500 m. Das Kokhav-Hayarden-Pumpspeicherkraftwerk mit einer Leistung von 344 MW befindet sich derzeit im Bau, wobei mit einer baldigen Fertigstellung zu rechnen ist. Im Betrieb wird die Anlage ebenfalls mit zwei Francis-Pumpturbinen mit je 172 MW Leistung und einer Fallhöhe von 450 m Energie speichern und Strom erzeugen. Das dritte Kraftwerk ist nördlich des See Genezareth an der libanesischen Grenze geplant. Die Anlage wurde 2020 genehmigt und wird mit einer voraussichtlichen Leistung von 156 MW das kleinste der drei Pumpspeicherkraftwerke sein [2].

Der Bau von Wasserkraftanlagen in Israel ist aufgrund der nur wenigen natürlichen Oberflächengewässer im Land begrenzt. Bei der Versorgung tieferliegender Gebiete mit entsalztem Meerwasser kann jedoch ein für die Wasserkraft nutzbares Energiepotenzial entstehen. So wird zum Beispiel für den See Genezareth vor dem Hintergrund geringer und schwankender Wasserstände sowie im Kontext einer zunehmenden Wasserversorgung Jordaniens [3], [4] die Zuleitung von entsalztem

### Kompakt

- Eine Wasserkraftanlage am See Genezareth könnte in Verbindung mit der Meerwasserentsalzung und dem vorhandenen Gefälle 78-400 GWh/a Strom erzeugen.
- Es könnten 11-16 % der von der Meerwasserentsalzung benötigten Strommenge zurückgewonnen werden.
- Ein intermittierender Betrieb der Wasserkraftanlage im Zusammenspiel mit Solarenergie erhöht den Anteil regenerativer Stromerzeugung.



**Bild 1:** Israelische Pumpspeicherkraftwerke

Meerwasser von der Mittelmeerküste diskutiert. Durch die tiefe Höhenlage des Sees von rund 209 m asl. ergibt sich dabei ein Energiepotenzial, das mit einer Wasserkraftanlage zur Stromerzeugung genutzt werden könnte. Für die Ermittlung der realisierbaren Leistung müssen dabei verschiedene Aspekte, wie die Wasserproduktion der Meerwasserentsalzungsanlage (MWE) sowie hydraulische und energetische Randbedingungen, berücksichtigt werden. Auch die derzeitige israelische Energiepolitik mit dem Ausbau der Solarenergie sollte in der Analyse Berücksichtigung finden. Das Ziel dieser Studie ist es daher, eine hydraulische und energetische Analyse des Wasserkraftpotenzials am See Genezareth in Verbindung mit der Meerwasserentsalzung und der Nutzung von Solarstrom durchzuführen. Dabei werden verschiedene Süßwasserproduktionsoptionen der Entsalzung sowie das hydraulische System des Zuleitungstollens betrachtet sowie Überlegungen zum Standort und Betrieb einer Wasserkraftanlage am See angestellt.

## 2 Untersuchungsgebiet und Berechnungsgrundlagen

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Der See Genezareth (**Bild 2**) liegt im Norden Israels nahe der Grenze zu Syrien und Jordanien. Er ist mit einem Volumen von rund 4 325 Mio. m<sup>3</sup> das größte regionale und nationale Süßwassergewässer und gleichzeitig mit seiner tiefen Höhenlage von -209 m asl. der weltweit am tiefsten gelegene Süßwassersee. Der größte Zufluss ist der Jordan, der durch den See in den Oberen und den Unteren Jordan geteilt wird. Wasserentnahmen erfolgen vor allem durch den National Water Carrier ins Landesinnere, lokale Verbraucher am See sowie Wassertransfers nach Jordanien. Auf Grundlage bilateraler Vereinbarun-

gen wird Jordanien aktuell mit jährlich 50 Mio. m<sup>3</sup> Wasser aus dem See versorgt. Aufgrund neuer Vereinbarungen zwischen Israel und Jordanien im Jahr 2021 wurde diese Menge auf nun 100 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr verdoppelt [5]. Weitere Ausführungen zum See Genezareth und dessen Wasserversorgung für Jordanien finden sich auch in Klein und Theobald [6].

Es gibt gegenwärtig sehr konkrete Überlegungen, die Versorgung des Sees mit entsalztem Meerwasser von einer MWE-Anlage an der Mittelmeerküste nahe Haifa durchzuführen [4]. Ein Zuleitungstollen soll dabei die Entsalzungsanlage und den See Genezareth auf einer Länge von rund 47 km verbinden (**Bild 3**); der See würde somit als Oberflächenwasserspeicher für entsalztes Meerwasser dienen. Neben der Stabilisierung des Sees würden es die zusätzlichen Wassermengen auch ermöglichen, Jordanien und die palästinensischen Gebiete im Zuge der regionalen Kooperation mit zusätzlichem Süßwasser zu versorgen [7], [8]. Ein konkretes Beispiel hierfür ist der bereits 2021 von Israel und Jordanien vereinbarte Austausch von zusätzlich 200 Mio. m<sup>3</sup>/a israelischen Süßwassers für die Energie aus 600 MW jordanischer Solarenergieleistung (Water-Energy-SWAP) [5].

Die von Bensabat et al. [9] adaptierte Trasse des Zuleitungstollens orientiert sich an der natürlichen Topografie und vermeidet größere Siedlungsgebiete. Für den Stollen ist dabei ein Gefälle von 1 m/km ( $I_s = 0,001$ ) in Richtung des Sees angesetzt. Ein Geländelängsschnitt entlang des Zuleitungstollens mit beispielhaften Standorten für die Wasserkraftanlage ist in **Bild 3** abgebildet. Im Bild ist die Wasserkraftanlage dabei als Kavernenkraftwerk (orange) und als Kraftwerk mit oberirdischer Fallleitung (blau) dargestellt. Unter der Annahme, dass sich die MWE an der Küste auf einer Höhe von 5 m asl. befindet, ergibt sich zum See auf -209 m asl. eine potenzielle Energiehöhe von rund 214 m.





**Bild 2:** Blick auf den See Genezareth von Jordanien aus in nordwestliche Richtung

## 2.2 Berechnungsgrundlagen

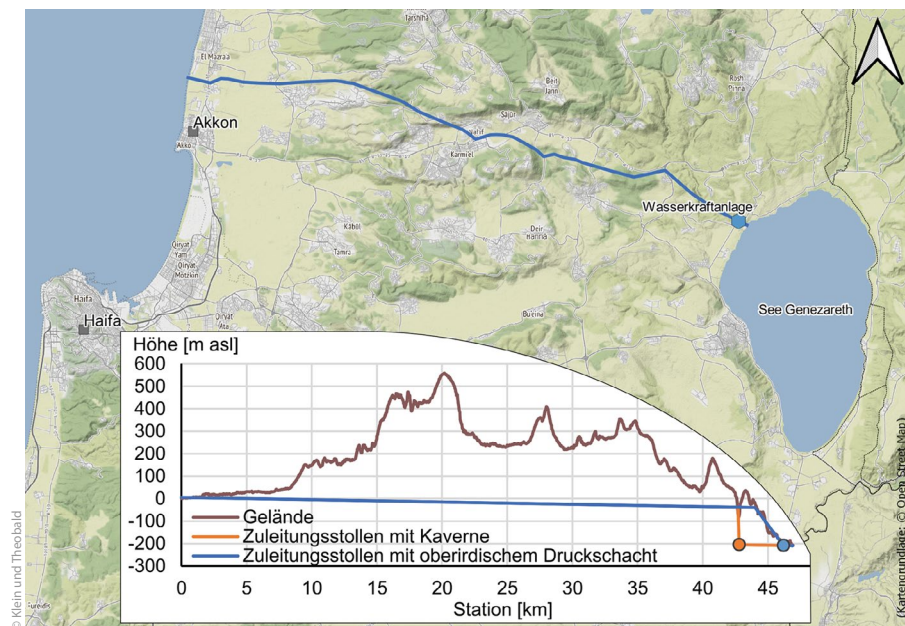
In der vorliegenden Studie einer mit entsalztem Meerwasser betriebenen Wasserkraftanlage am See Genezareth wird das Wasserkraftpotenzial in einer ersten Näherung analysiert. Dabei wird die Hydraulik des Zuleitungsstollens im Freispiegel- und Druckabfluss betrachtet.

Die nutzbare effektive Energiehöhe  $h_{eff}$  [m] der Wasserkraft beim Freispiegelabfluss entspricht im vorliegenden Fall der Höhendifferenz zwischen dem Einlauf der Fallleitung und dem Wasserspiegel des Sees. Die Wasserstandshöhe im Zuleitungsstollen wird über das Gefälle der Freispiegelleitung rechnerisch abgeschätzt, wobei für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von einer Teilfüllung ausgegangen wird. Diese wird dabei im ersten Schritt auf Grundlage des Rohrdurchflusses

bei Vollfüllung  $Q_v$  [m<sup>3</sup>/s] nach der Allgemeinen Abflussformel von Colebrook-White (Gl. (1), nach [10]) für Kreisprofile des Durchmessers  $d$  [m] berechnet. Die hydraulischen Größen beim Teilabfluss  $Q_t$  [m<sup>3</sup>/s] können dann anhand der empirischen Beziehung von Voll- und Teilfüllung in Gl. (2) mit einer guten Genauigkeit berechnet werden [11]:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left( -2 \cdot \lg \left[ \frac{2,51 \cdot \nu}{d \sqrt{2g \cdot d \cdot I_E}} + \frac{k}{3,17 \cdot d} \right] \cdot \sqrt{2g \cdot d \cdot I_E} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Q_t}{Q_v} = \frac{A_t}{A_v} \cdot \frac{v_t}{v_v} = \frac{A_t}{A_v} \cdot \left( \frac{r_{hy,t}}{r_{hy,v}} \right)^{0,625} \quad (2)$$



**Bild 3:** Übersicht und Längsschnitt des Zuleitungsstollens von der Küste zur Wasserkraftanlage am See Genezareth

Bei der Druckleitung berechnet sich die effektive Energiehöhe aus der Höhendifferenz zwischen dem Leitungsanfang an der Küste und dem Wasserspiegel des Sees sowie den Energieverlusten  $h_v$  [m]. Aufgrund des vorliegenden konzeptionellen Ansatzes wird sich bei der Bestimmung der Energieverluste vereinfacht auf die Rohrreibungsverluste infolge der Rauheit  $k$  [m] entlang der Leitungslänge  $L$  [m] (Gl. (3)) beschränkt, lokale Verluste werden vernachlässigt:

$$h_v = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

mit

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3,71} \cdot \frac{k}{d} \right) \quad (3)$$

Die resultierende Arbeit bei beiden hydraulischen Systemen wird entsprechend Gl. (5) durch das Integral der Leistung  $P$  [W] (Gl. (4)) über die Zeit als Jahresstromerzeugung  $E$  [Wh/a] berechnet [10]. Dabei werden für die Anlage 351 Vollbetriebs-tage bzw. 8 424 Arbeitsstunden sowie ein Gesamtwirkungsgrad von  $\eta = 0,85$  [-] angenommen:

$$P = \rho \cdot g \cdot h_{\text{eff}} \cdot Q \cdot \eta \quad (4)$$

$$E = \int P(t) dt \quad (5)$$

### 3 Wasserkraft am See Genezareth

#### 3.1 Hydraulisches System des Zuleitungsstollens

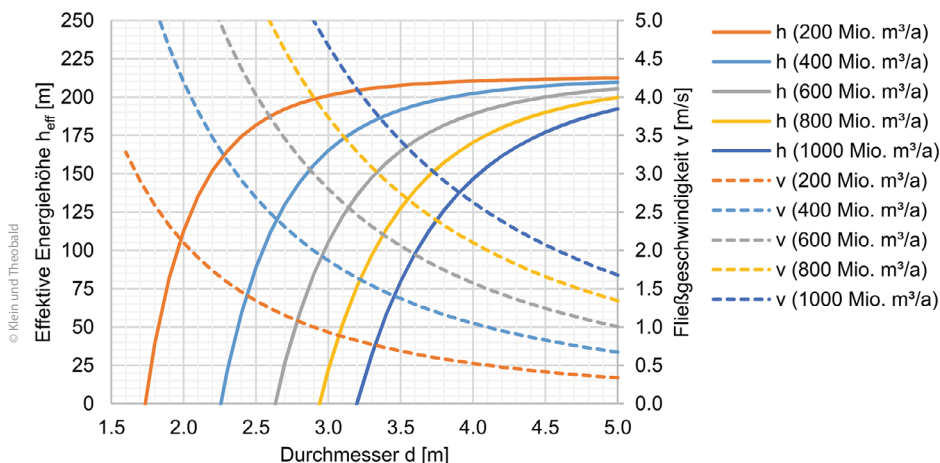
Vor dem Hintergrund des bereits vereinbarten Water-Energy-SWAP mit Jordanien sowie möglichen weiteren Vereinbarungen über Wassertransfers in der Zukunft wird eine Spanne von 200 Mio. m<sup>3</sup> bis 1 000 Mio. m<sup>3</sup> als Wasserproduktionsoptionen der Entsalzungsanlage untersucht [4]. Für den rund 47 km langen Zuleitungsstollen wird sowohl beim Freispiegelabfluss als auch beim Druckabfluss ein Kreisquerschnitt gewählt.

Beim Freispiegelabfluss wurde der Stollendurchmesser anhand der berechneten Wassertiefe  $h$  [m] im Rohr dimensioniert. Der Durchmesser wurde dabei so gewählt, dass die Was-

sertiefe maximal 80 % ( $h/d < 0,8$ ) des Durchmessers beträgt, wodurch ein Zuschlagen des Stollens vermieden werden soll [11]. Bei der größten Wasserproduktionsoption von 1 000 Mio. m<sup>3</sup> ergibt dies einen Stollendurchmesser von  $d = 4,4$  m. Dieser Durchmesser wurde im Folgenden für alle Wasserproduktionsoptionen angenommen, da der Querschnitt beim Freispiegelabfluss dann keinen Einfluss auf die effektive Energiehöhe hat. Bei den kleineren Wasserproduktionsoptionen ermöglicht dieser Querschnitt darüber hinaus aufgrund der noch vorhandenen hydraulischen Kapazitäten eine nachträgliche Erhöhung der Produktionsleistung.

Anders als beim Freispiegelabfluss geht beim Druckabfluss gemäß Gl. (3) sowohl der Durchmesser als auch die mit dem Durchmesser gekoppelte Fließgeschwindigkeit in die Berechnung der Energieverluste ein. Daher wurde zur Abschätzung des Einflusses des Stollendurchmessers auf die effektive Fallhöhe eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Für die potenzielle Energiehöhe zwischen der Entsalzungsanlage und der Wasserkraftanlage wird dabei, wie in **Bild 3** dargestellt, von  $h_{\text{pot}} = 214$  m ausgegangen. In **Bild 4** sind die effektiven Fallhöhen (durchgezogene Linien) der fünf Wasserproduktionsoptionen der Entsalzungsanlage in Abhängigkeit des Stollendurchmessers dargestellt. An der rechten Achse sind außerdem die dazugehörigen Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Durchmessers abgebildet (gestrichelte Linien). Erwartungsgemäß sinken die Fließgeschwindigkeiten mit zunehmendem Durchmesser (bei konstantem Durchfluss) entsprechend der Kontinuitätsgleichung. Die Energieverluste der jeweiligen Durchflussoptionen nehmen mit steigendem Durchmesser ab, so dass die effektive Fallhöhe ansteigt. Hohe effektive Fallhöhen sind beim Druckabfluss somit vor allem mit geringen Fließgeschwindigkeiten und großen Stollendurchmessern zu erreichen. Beide Größen haben daher großen Einfluss auf die Stromerzeugung der Wasserkraftanlage.

Für die Abschätzung des Energiepotenzials beim Druckabfluss werden hinsichtlich des Durchmessers zwei Beispiele analysiert. Im ersten Beispiel wird das Energiepotenzial bei einem konstanten Durchmesser mit  $d = 4,4$  m, analog zum Durchmesser des Freispiegelabflusses, für alle Wasserproduktionsoptionen untersucht. Im zweiten Fall wird der Durchmesser individuell für eine jeweils angestrebte Fließgeschwindigkeit von ca.



**Bild 4:** Effektive Energiehöhe und Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wasserproduktion und des Stollendurchmessers für den Druckabfluss

**Tabelle 1:** Leistung und Stromproduktion der Wasserkraftanlage für verschiedene Ausbaustufen und hydraulischen Systeme  
(Quelle: Klein und Theobald)

Wasserproduktion	Durchfluss $Q$	Durchmesser $d$ (h/d)	Fließgeschwindigkeit $v$	Eff. Energiehöhe $h_{eff}$	Leistung $P$	Energie $E$
[Mio. m <sup>3</sup> /a]	[m <sup>3</sup> /s]	[m] ([-])	[m/s]	[m]	[MW]	[GWh/a]
Freispiegelabfluss						
200	6,6	4,4 (0,29)	2,59	169,3	9,3	78,4
400	13,2	4,4 (0,42)	2,51	169,3	18,6	156,8
600	19,8	4,4 (0,54)	2,36	169,3	27,9	235,2
800	26,4	4,4 (0,65)	2,14	169,3	37,2	313,6
1000	33,0	4,4 (0,78)	1,78	169,3	46,5	392,0
Druckabfluss $d$ konstant						
200	6,6	4,4	0,43	211,5	11,6	98,0
400	13,2	4,4	0,87	206,6	22,7	191,4
600	19,8	4,4	1,30	198,5	32,7	275,8
800	26,4	4,4	1,73	187,2	41,2	346,8
1000	33,0	4,4	2,17	172,7	47,5	399,9
Druckabfluss $d$ individuell						
200	6,6	3,0	0,93	201,0	11,0	93,1
400	13,2	3,0	1,87	165,1	18,2	152,9
600	19,8	3,2	2,46	136,3	22,5	189,4
800	26,4	3,7	2,45	149,2	32,8	276,4
1000	33,0	4,1	2,50	154,8	42,5	358,4

$v = 2,5$  m/s festgelegt. Um bei den Wasserproduktionsoptionen von 200 Mio. m<sup>3</sup>/a und 400 Mio. m<sup>3</sup>/a jedoch unverhältnismäßig hohe Energieverluste zu vermeiden, wird ein Minstdurchmesser von  $d_{min} = 3,0$  m festgelegt.

### 3.2 Leistung und Stromproduktion der Wasserkraftanlage

Für eine Wasserkraftanlage am See Genezareth wurde für die vorgestellten hydraulischen Systeme eine abschätzende Leistungs- und Energieberechnung durchgeführt (**Tabelle 1**). Je nach Produktionsoption der MWE und hydraulischem System des Zuleitungsstollens beträgt die rechnerische Leistung der Wasserkraftanlage zwischen 9,3 MW und 47,5 MW. Die resultierende jährliche Stromproduktion liegt dabei zwischen 78,4 GWh/a und 399,9 GWh/a.

Die effektive Fallhöhe beim Freispiegelabfluss mit  $h_{eff} = 169,3$  m ist entsprechend der vorherigen Ausführung für alle Wasserproduktionsoptionen gleich. Die Leistung der Wasserkraftanlage steigt im vorliegenden Fall somit proportional mit der Wasserproduktion der Entsalzungsanlage und liegt zwischen 9,3 MW und 46,5 MW.

Beim Druckabfluss mit konstantem Durchmesser nimmt die nutzbare Energiehöhe erwartungsgemäß mit abnehmenden Durchflüssen zu. Die nutzbare Energiehöhe liegt über der des Freispiegelabflusses und variiert für die verschiedenen Ausbaustufen zwischen  $h_{eff} = 172,7$  m und  $h_{eff} = 211,5$  m. Die Leistung liegt somit zwischen 11,6 MW und 47,5 MW. Neben den geringen Energieverlusten ermöglicht der große Durchmesser deutliche Kapazitätserweiterungen über alle dargestellten Ausbaustufen.

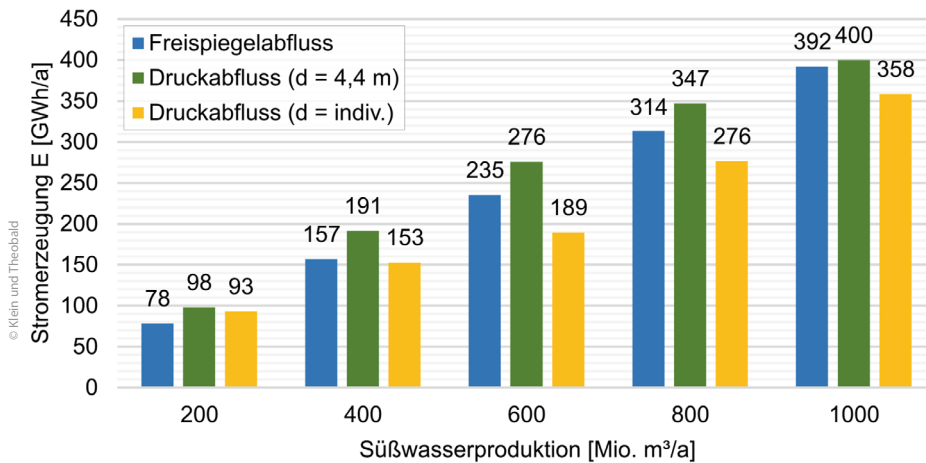
Zu berücksichtigen sind dabei jedoch die vermutlich erhöhten Investitionen für den vergleichsweise großen Durchmesser.

Beim Druckabfluss mit individuellem Durchmesser sind in der vorliegenden Untersuchung die größten Energieverluste zu verzeichnen. Die effektive Fallhöhe liegt in diesem Fall zwischen 136,3 m und 201 m. Hier ergeben sich vor allem durch den Minstdurchmesser von  $d = 3$  m bei den 200 Mio. m<sup>3</sup>/a und 400 Mio. m<sup>3</sup>/a Optionen nur vergleichsweise geringe Energieverluste. Die Optionen 600-1 000 Mio. m<sup>3</sup>/a weisen dagegen aufgrund der gewählten Durchmesser die geringsten Energiehöhen auf. Die Leistung in diesem Beispiel liegt zwischen 11,0 MW und 42,5 MW.

Bei der Betrachtung des Stromertrags führt die Druckleitung mit individuellem Durchmesser im Vergleich zur Freispiegelleitung bei geringeren Durchflussoptionen von 200 Mio. m<sup>3</sup>/a und 400 Mio. m<sup>3</sup>/a zu höheren oder vergleichbaren Ergebnissen (**Bild 5**). Bei Wasserproduktionen über 400 Mio. m<sup>3</sup>/a ist die Stromerzeugung bei der Druckleitung mit individuellem Durchmesser aufgrund der durch Wandreibung verursachten Energieverluste im Vergleich zur Freispiegelleitung geringer. Die höchsten Stromerträge über alle Wasserproduktionsoptionen liefert die Druckleitung mit konstantem Durchmesser mit 98-400 GWh/a.

Mit einer Wasserkraftanlage am See Genezareth könnten somit signifikante Mengen Strom von bis zu 400 GWh/a aus dem erzeugten Süßwasser einer MWE an der Mittelmeerküste und dem vorhandenen Gefälle zum See erzeugt werden. Dies würde einen Beitrag zur Reduzierung der fossilen Energieträger in Israel liefern und gleichzeitig die Möglichkeit eröffnen, die





**Bild 5:** Vergleich der Stromproduktion aus Freispiegel- und Druckabfluss für verschiedene Wasserproduktionen

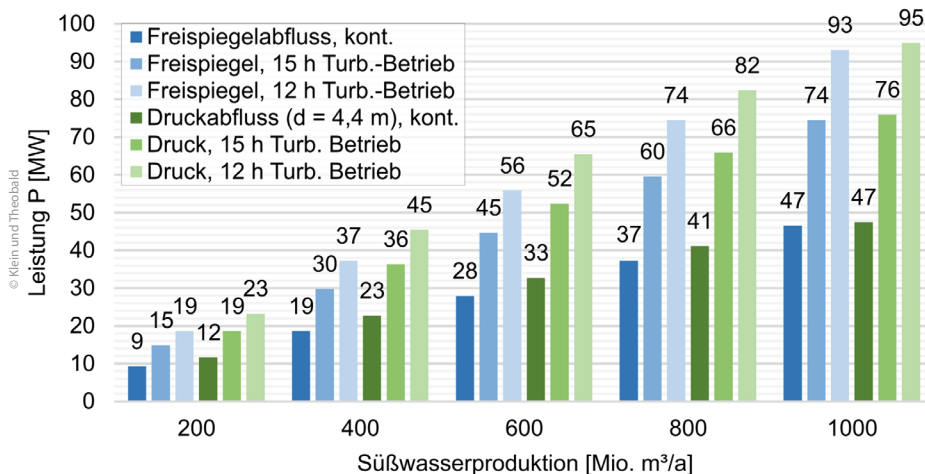
MWE an der Küste direkt mit Wasserkraftstrom zu versorgen. Bei einem angenommenen Energiebedarf der Entsalzungsanlage von  $3 \text{ kWh/m}^3$  [4] könnten so im Beispiel des Freispiegelabflusses rund 13 % der benötigten Energie von der Wasserkraftanlage als Strom erzeugt werden. Beim Druckabfluss könnten bei einem konstanten Durchmesser im Mittel 15 %, bei individuellen Durchmessern ebenfalls rund 13 % der für die Entsalzung benötigten Energie als Strom gewonnen werden. Der Anteil der Stromproduktion durch die Wasserkraftanlage am Energiebedarf der Meerwasserentsalzung liegt dabei über alle untersuchten Wasserproduktionsoptionen und hydraulischen Systeme zwischen 11 und 16 %. Bei der Steigerung der Energieeffizienz der MWE verzeichnen Forschung und Industrie derzeit jedoch stetig Fortschritte, weshalb der Energiebedarf mittelfristig auf  $2,5 \text{ kWh/m}^3$  reduziert werden könnte [4]. Der Anteil der Energierückgewinnung durch die Wasserkraftanlage könnte dadurch auf 13-20 % gesteigert werden.

### 3.3 Intermittierende Betriebsweise

Die Wasserkraft ist, wie auch im vorliegenden Beispiel, aufgrund ihrer kontinuierlichen Betriebsweise grundlastfähig. Zur Generierung von Synergien mit anderen regenerativen Energieträgern wie der Photovoltaik wurde zusätzlich ein intermittierender

Betrieb zur diskontinuierlichen Stromerzeugung analysiert. Im intermittierenden Betrieb wechselt die Wasserkraftanlage zwischen dem Turbinenbetrieb zur Stromerzeugung und einem Speicherbetrieb zur Zwischenspeicherung des kontinuierlich von der Entsalzungsanlage zufließenden Wassers. Durch diese Betriebsweise wäre es somit möglich, die Stromerzeugung im Turbinenbetrieb auf die Nachtstunden während des Lastabfalls der Photovoltaik zu konzentrieren. Wegen des dann erhöhten Anlagendurchflusses aus gespeichertem und kontinuierlich zufließendem Wasser könnte die Wasserkraftanlage in diesem Zeitraum Strom bei einer erhöhten Leistung produzieren. Während des Photovoltaikbetriebs am Tag würde die Anlage in den Speicherbetrieb wechseln, wodurch der Verbraucher den verfügbaren Solarstrom nutzt. Das zur temporären Fassung des kontinuierlich zufließenden Wassers notwendige Speicherbecken sollte dabei in möglichst kurzer Distanz vor dem Druckschacht angeordnet sein, da der Stollen unterhalb des Speicherbeckens aufgrund des vereinten Durchflusses von Entsalzungsanlage und Speicher entsprechend größer zu dimensionieren wäre.

Das notwendige Volumen des Speicherbeckens ist dabei abhängig von der Dauer des Turbinenbetriebs, welche entsprechend der jeweiligen Zielsetzung definiert wird. Für eine Stromerzeugung während des nächtlichen Lastabfalls der Photovoltaik



**Bild 6:** Vergleich der Leistung aus Freispiegel- und Druckabfluss für verschiedene Wasserproduktionen im kontinuierlichen und intermittierenden Turbinenbetrieb

ikanlagen wird im vorliegenden Beispiel ein Turbinenbetrieb von 12 h und 15 h untersucht. Das resultierende Volumen bei einem Turbinenbetrieb von 12 h beträgt dabei, je nach Wasserproduktionsoption, zwischen 0,28 und 1,42 Mio. m<sup>3</sup>, während beim 15-stündigen Turbinenbetrieb ein Volumen zwischen 0,21 und 1,07 Mio. m<sup>3</sup> notwendig ist. Bei einer zulässigen Wasserspiegelschwankung im Speicherbecken von 20 m würde die Grundfläche der Becken somit 10 000-72 000 m<sup>2</sup> betragen. Die Anordnung von Speicherbecken dieser Größe erscheint dabei oberhalb des See Genezareth in nordwestlicher Richtung möglich, dies wäre im konkreten Fall jedoch zu verifizieren.

Die Leistung im intermittierenden Betrieb der Wasserkraftanlage ist ebenfalls abhängig von der Dauer des Turbinenbetriebs. Bei einem Turbinenbetrieb von 15 h liegt die Leistung der Wasserkraftanlage zwischen 15 und 76 MW (**Bild 6**). Der Betrieb im 12-Stunden-Zyklus führt zu einer Leistung von 19-95 MW, was einer Verdopplung der Leistung des kontinuierlichen Betriebs entspricht. Für die energetische Analyse der hydraulischen Systeme wurde sich auf den Freispiegelabfluss sowie den Druckabfluss mit konstantem Durchmesser beschränkt. Die Leistung bei der Druckleitung mit konstantem Durchmesser liegt dabei durchgehend über der des Freispiegelabflusses.

Durch eine intermittierende Betriebsweise würde sich somit bei gleicher Stromproduktion die Leistung der Wasserkraftanlage erhöhen, was neben der Errichtung und dem Betrieb eines Speicherbeckens zu erhöhten Investitionen und Betriebskosten führen kann. Die durch Wechselwirkungen mit intermittierenden Energieträgern - wie der Photovoltaik - entstehenden Synergien könnten die möglicherweise erhöhten Kosten jedoch rechtfertigen.

#### 4 Fazit

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass die Höhendifferenz zwischen der MWE an der Küste und dem See Genezareth genutzt werden kann, um signifikante Strommengen zu erzeugen. Die Relevanz der durchgeführten Analyse wird durch den bereits vereinbarten Austausch von Wasser und Energie zwischen Israel und Jordanien [5] sowie durch mögliche Folgevereinbarungen zusätzlich hervorgehoben. Für die Stromerzeugung der Wasserkraftanlage wurde daher eine Spannweite von Wasserproduktionsoptionen der MWE untersucht. Die resultierende Leistung wäre dabei, abhängig von der Wasserproduktion sowie dem hydraulischen System des Zuleitungsstollens, zwischen 9,3 MW und 47,5 MW. Die produzierte Strommenge würde zwischen 78 GWh/a und 400 GWh/a betragen. Durch eine Wasserkraftanlage am See Genezareth könnte somit zwischen 11 und 16 % der von der MWE benötigten Strommenge zurückgewonnen werden. Der Tunnel zur Versorgung des Sees wäre dabei unabhängig von der Wasserkraftanlage bereits vorhanden, daher würden bezüglich der Finanzierung nur die Investitionen für das Kraftwerk selbst anfallen. Hinsichtlich des Einflusses einer Wasserkraftanlage auf die spezifischen Wasserkosten wurde in Schär und Geldermann [12] eine ökonomische Analyse durchgeführt.



Mehr erfahren durch aktuelle Berichterstattung branchenübergreifend zu den Themen **Wasser, Abfall, Energie, Umwelt** und **Recht**. Informieren Sie sich zehn Mal im Jahr mit den aktuellen Ausgaben zum Vorteilspreis sowie exklusiv für alle Abonnenten kostenlos das digitale und interaktive E-Magazin und das PDF-Archiv mit allen Fachbeiträgen seit 1999.



[www.wasserundabfall.de](http://www.wasserundabfall.de)

Durch eine zusätzliche Speicheroption für einen intermittierenden Betrieb der Wasserkraftanlage könnten außerdem synergetische Wechselwirkungen mit anderen Energiequellen wie der Solarenergie erzielt werden. Dies würde einen Beitrag zur Erhöhung der Netzstabilität leisten und der derzeitigen israelischen Energiepolitik entsprechen.

Im operationellen Betrieb könnten die Wasserkraftanlage und die Zuleitung des entsalzten Meerwassers in die Betriebssteuerung des Sees integriert werden [6]. Dadurch könnte die Stromerzeugung der Wasserkraftanlage sowie die Wasserabgabe des Sees, vor allem im intermittierenden Betrieb und unter Berücksichtigung des Wassertransfers nach Jordanien, möglichst effektiv koordiniert werden.

## Dank

Die vorliegende Forschung ist Teil der SALAM-Initiative. Die SALAM-Initiative ist ein gemeinschaftliches Verbundprojekt, in dem 20 Partnerinstitutionen aus Palästina, Jordanien, Israel und Deutschland gemeinsam an Strategien zur Lösung des Wasserdefizit-Problems im Nahen Osten arbeiten (<https://salam2.uni-goettingen.de>).

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WM1533E gefördert, wofür an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Des Weiteren danken wir den nationalen und internationalen Projektpartnern sowie der Projektkoordination für die gute und konstruktive Zusammenarbeit.

Martin Klein and Stephan Theobaldt

### **Hydropower at Lake Tiberias in connection with seawater desalination and solar energy**

Currently, hydropower is only of minor importance for the energy sector in Israel. However, in the process of transforming the energy sector with focus on solar power, hydropower is expected to support the expansion of this intermittent energy source in the future. Supplying Lake Tiberias, which lies on an altitude below the sea level, with desalinated seawater could synergistically combine both efforts. In this context, the present study analyses the seawater-driven hydropower potential at Lake Tiberias. The analysis of the hydropower potential at Lake Tiberias shows, that the potential energy between the coast and the lake could be used to produce substantial amounts of electricity. A hydropower plant at Lake Tiberias could thus recover 11-16 % of the energy used by the desalination plant. In addition, the coordination of the hydropower plant with other energy sources like photovoltaic could optimize the usage of the electrical energy produced. Regarding the economic feasibility, only the investment costs of the hydropower plant would be accrued as the tunnel would be already in place to supply the lake.

## Autoren

Martin Klein, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Universität Kassel

Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel

[m.klein@uni-kassel.de](mailto:m.klein@uni-kassel.de)

[s.theobald@uni-kassel.de](mailto:s.theobald@uni-kassel.de)

## Literatur

- [1] IEA (Hrsg.): Electricity generation by source, Israel 1990-2020 (<https://www.iea.org/countries/israel>; Abruf 13.01.2022).
- [2] Ashwarya, S.: Israel's Renewable Energy Strategy: A Review of its Stated Goals, Current Status, and Future Prospects. In: *Perceptions: Journal of International Affairs* (2022), Heft 26, S. 321-340.
- [3] Tal, A.: The implications of climate change driven depletion of Lake Kinneret water levels. In: *The Science of the total environment* (2019), Nr. 664, S. 1 045-1 051.
- [4] Janowitz, D.; Yüce, S.: Innovative Konzepte zur großskaligen Meerwasserentsalzung im Nahen Osten. In: *WasserWirtschaft* 112 (2022), Heft 7-8, S. 18-24.
- [5] Münch, P.; Schröder, T.: Solarstrom gegen Wasser. In: *Süddeutsche Zeitung* 22.11.2021 (2021).
- [6] Klein, M.; Theobald, S.: Modellbasierte prädiktive Regelung des See Genezareth zur verbesserten Wasserversorgung des Unteren Jordantals. In: *WasserWirtschaft* 112 (2022), Heft 7-8, S. 47-54.
- [7] Scheday, M.; Gibran, Z.: Evaluierung von Transfersystemen zur Wasserversorgung von Jordanien und Palästina. In: *WasserWirtschaft* 112 (2022), Heft 7-8, S. 25-30.
- [8] Rusteberg, B.; Bourgoing, P. de; Bensabat, J.: Grenzüberschreitender Wassertransfer aus der Meerwasserentsalzung im Nahen Osten. In: *WasserWirtschaft* 112 (2022), Heft 7-8, S. 10-17.
- [9] Bensabat, J.; Tamimi, A.; Salman, A. et al.: Sustainable management of available water resources with innovative technologies: Management of highly variable water resources in semi-arid regions. SALAM in SMART-MOVE, Deliverable No. 4. 2018.
- [10] Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E.: *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*. 6. A. Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2014.
- [11] DWA (Hrsg.): *Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen*. In: *DWA-Arbeitsblätter* (2006), Nr. A-110.
- [12] Schär, S.; Geldermann, J.: Techno-ökonomische Analyse integrierter Wasserinfrastrukturprojekte. In: *WasserWirtschaft* 112 (2022), Heft 7-8, S. 39-46.



Springer Professional

Wasserkraft



Eckstein, K.; Kaiser, F.; Harbach H.: Projekt der Hochschule Hof zur Förderung der Nutzung von Wasserkraft in bestehenden Wasseranlagen. In: *WasserWirtschaft*, Ausgabe 4/2022.

Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.

[www.springerprofessional.de/link/20284088](http://www.springerprofessional.de/link/20284088)

Watter, H.: *Wasserkraft*. In: *Regenerative Energiesysteme*.

Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.

[www.springerprofessional.de/link/20244680](http://www.springerprofessional.de/link/20244680)