

## Anhang G: Gezeiten II

### Leistungsdichte von Gezeitenbecken

Um die Leistung eines künstlichen Gezeitenbeckens abzuschätzen, nehmen wir an, es würde sich schnell bei Flut füllen und bei Ebbe auch schnell wieder leeren. Energieerzeugung findet in beiden Flussrichtungen statt, bei Ebbe und bei Flut. Die Änderung der potentiellen Energie des Wassers alle sechs Stunden ist  $mgh$ , wobei  $h$  die Höhenänderung des Schwerpunkts des Wassers ist, die die Hälfte des Tidenhubs ist (der Tidenhub ist die Differenz der Wasserhöhe bei Ebbe und bei Flut, siehe Fig.G.1. Die Masse pro Flächeneinheit, die das Gezeitenbecken fasst, ist  $\rho \times (2h)$ , wobei  $\rho$  die Dichte des Wassers ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) bezeichnet. Die Leistung pro Flächeneinheit des Gezeitenbeckens ist damit

$$\frac{2\rho h g h}{6 \text{ Stunden}} ,$$

wenn man perfekt effiziente Generatoren annimmt. Setzt man  $h = 2 \text{ m}$  (d.h. einen Tidenhub von  $4 \text{ m}$ ) ein, liefert die Formel eine Leistungsdichte des Gezeitenbeckens von  $3,6 \text{ W/m}^2$ . Mit einem realen Generator-Wirkungsgrad von  $90\%$  erhalten wir

$$\text{Leistung pro Flächeneinheit beim Gezeitenbecken} \approx 3 \text{ W/m}^2 .$$

Um  $1 \text{ GW}$  mittlere Leistung zu generieren, benötigen wir eine Gezeitenbecken von etwa  $300 \text{ km}^2$ . Ein kreisförmiges Becken mit  $20 \text{ km}$  Durchmesser würde das schaffen. (Zum Vergleich: Die Severnmündung hinter dem geplanten Sperrwerk fasst etwa  $550 \text{ km}^2$ , und die Fläche in „The Wash“ ist über  $400 \text{ km}^2$ .)

Produziert ein Gezeitenbecken nur in einer Fließrichtung Strom, erzeugt es so die Hälfte dieser Leistung. Die mittlere Leistungsdichte des Gezeitenperrwerks in La Rance, wo der mittlere Tidenhub  $10,9 \text{ m}$  beträgt, lag jahrzehntelang bei  $2,7 \text{ W/m}^2$  (Seite 100).

### Die natürlichen Ressourcen der Gezeiten

Die Gezeiten rund um England sind echte Flutwellen. (Tsunamis, die auch manchmal „Flutwellen“ genannt werden, haben nichts mit Ebbe und Flut zu tun: Sie werden durch unterseeische Erdrutsche oder Seebeben ausgelöst.) Die Position des Flut-Hochwassers (der Kamm der Flutwelle) bewegt sich viel schneller als der Gezeitenfluss – um die  $100$  Seemeilen pro Stunde etwa, dagegen bewegt sich das Wasser lediglich mit etwa einer Seemeile pro Stunde.

Die Energie, die wir aus diesen Gezeiten mit Becken oder Gezeitenfarmen gewinnen können, kann niemals mehr sein als die Energie der atlantischen Gezeitenwellen. Wir können die Energie dieser großen atlantischen Gezeitenwellen auf dieselbe Weise bestimmen wie bei normalen, windgenerierten Wellen. Der nächste Abschnitt beschreibt ein Standardmodell für die Energie in einer ankommenden Welle bei einer Wassertiefe  $d$ , die im Vergleich zur Wellenlänge seicht ist (Fig.G.2). Die Leistung pro Einheitslänge Wellenkamm einer Gezeitenwelle in seichtem Wasser ist

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d h^2 / 2} . \quad (\text{G.1})$$

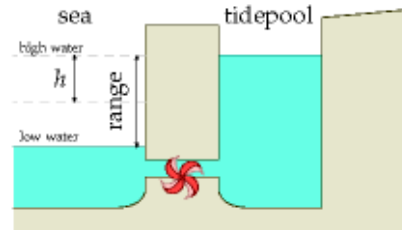


Fig.G.1: Ein Gezeitenbecken im Querschnitt. Das Becken wurde bei Flut gefüllt, im Bild dargestellt ist Ebbe. Wir lassen das Wasser aus dem Becken und durch einen Stromgenerator fließen und verwandeln so die potentielle Energie in Elektrizität.

Tabelle G.3 zeigt die Leistung pro Einheitslänge für einige plausible Werte. Bei  $d = 100$  m und  $h = 1$  oder 2 m liegt die Leistung pro Einheitslänge Wellenfront bei 150 kW/m bzw. 600 kW/m. Das sind beeindruckende Zahlen im Vergleich mit der natürlichen Leistung einer normalen Atlantik-Hochseewelle von 40 kW/m (Anhang F). Atlantikwellen und atlantische Gezeiten haben ähnliche Amplituden (etwa 1 m), doch die natürliche Leistung in den Gezeiten ist etwa 10mal höher als bei normalen windgenerierten Wellen.

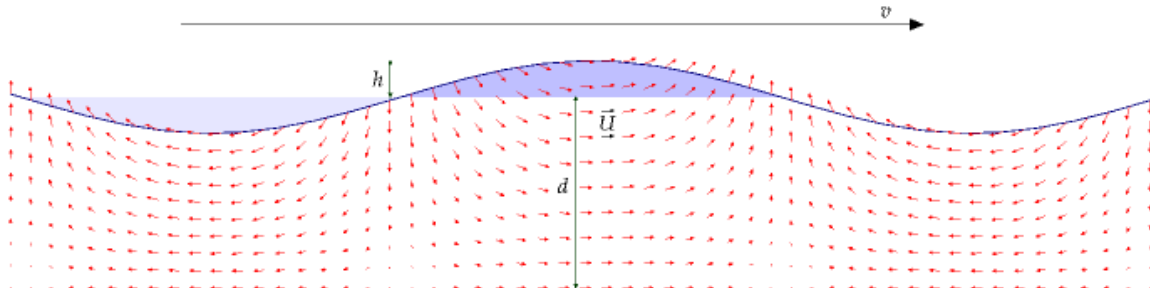


Fig.G.2: Eine Welle im seichten Wasser. Wie die Welle im tiefen Wasser trägt sie Energie in zwei Formen: Potentielle Energie in Verbindung mit dem Hochheben des Wassers aus dem hell-schraffierten Tal in den dunkel schraffierten Kamm; und kinetische Energie aus all den kleinen Bewegungen des Wassers, wie sie durch die kleinen roten Pfeile angedeutet sind. Die Geschwindigkeit der Welle, die von links nach rechts läuft, ist durch den viel größeren Pfeil oben angedeutet. Für Gezeitenwellen könnte eine typische Wassertiefe 100 m sein, die Geschwindigkeit des Kamms 30 m/s, die vertikale Amplitude an der Oberfläche 1 oder 2 m, und die Amplitude der Wassergeschwindigkeiten 0,3 oder 0,6 m/s.

Taylor (1920) erarbeitete ein detaillierteres Modell der Gezeitenkraft, das auch wichtige Details wie die Corioliskraft (ein Effekt aus der Erdrotation), die Existenz gegenläufiger Gezeitenwellen und den direkten Effekt des Mondes auf den Energiefluss in der Irischen See berücksichtigt. Seitdem haben experimentelle Messungen und Computermodelle diese Studien von Taylor bestätigt und erweitert. Flather (1976) erstellte ein detailliertes numerisches Modell der lunaren Gezeiten, indem er das Kontinentalschelf um England in etwa 1000 quadratische Einzelzellen unterteilte. Flather schätzte die gesamte mittlere Energie, die diese Region trifft, mit 215 GW ab. Nach diesem Modell fließen 180 GW in den Bereich zwischen Frankreich und Irland. Von Nordirland bis herum zu den Shetlandinseln liegt die ankommende Leistung bei 49 GW. Zwischen Shetland und Norwegen ist der Nettoverlust 5 GW. Wie in Fig.G.4 gezeigt, bestimmten Cartwright et al. (1980) die mittleren Leistungsflüsse experimentell zu 60 GW zwischen Malin Head (Irland) und Florø (Norwegen) und zu 190 GW zwischen Valentia (Irland) und der bretonischen Küste nahe Ouessant. Die Leistung, die in die Irische See fließt, bestimmten sie zu 45 GW, und den Leistungsfluss in die Nordsee durch die Straße von Dover zu 16,7 GW.

$h$ (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{dh^2/2}$ (kW/m)
0.9	125
1.0	155
1.2	220
1.5	345
1.75	470
2.0	600
2.25	780

Tabelle G.3: Leistungsflüsse (Leistung pro Einheitslänge Wellenfront) für Wassertiefe 100 m.

### Die Leistung von Tidenwellen

Dieser Abschnitt, der gefahrlos übersprungen werden kann, behandelt weitere Details hinter der Formel für Gezeitenkraft, die im letzten Abschnitt verwendet wurde. Ich möchte in dieses Modell der Gezeitenkraft tiefer einsteigen, weil die meisten offiziellen Abschätzungen englischer Gezeitenressourcen auf einem Modell beruhen, das ich für fehlerhaft halte.

Fig.G.2. zeigt ein Modell für Gezeitenwellen, die durch relativ seichtes Wasser laufen. Das Modell ist beispielsweise für Flutwellen gedacht, die den Kanal von England oder die Nordsee entlang laufen. Es ist wichtig, zwischen der Geschwindigkeit  $U$ , mit der das Wasser selbst fließt (etwa eine Seemeile pro Stunde), und der Geschwindigkeit  $v$ , mit der die Flutwelle läuft (etwa 100 oder 200 Seemeilen pro Stunden), zu unterscheiden.

Die Wassertiefe ist  $d$ . Kämme und Täler kommen von links, erzeugt von den 12-stündlichen Ozeantiden. Sie bewegen sich mit der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{gd} \quad . \quad (G.2)$$

Wir nehmen an, dass die Wellenlänge viel größer als die Wassertiefe ist, und wir vernachlässigen Details wie die Corioliskraft oder Dichteschwankungen im Wasser. Die vertikale Amplitude der Tide nennen wir  $h$ . Unter der Standard-Annahme der nahezu wirbelfreien Strömung ist die horizontale Wassergeschwindigkeit nahezu tiefenunabhängig. Diese Horizontalgeschwindigkeit  $U$  ist proportional zur Auslenkung an der Oberfläche und kann aus der Erhaltung der Masse abgeleitet werden:

$$U = vh/d \quad . \quad (G.3)$$

Mit zunehmender Tiefe nimmt die Wellengeschwindigkeit  $v$  ab (Gleichung (G.2)). Für die folgende Diskussion werde ich die Tiefe als konstant annehmen. Energie fließt von links nach rechts mit einer gewissen Rate. Wie kann diese gesamte Gezeitenleistung abgeschätzt werden? Und was ist die maximale Leistung, die extrahiert werden kann?

Ein Ansatz ist, eine Querschnittsfläche zu nehmen, den mittleren kinetischen Energiefluss durch diese Fläche abzuschätzen und dann anzunehmen, dass diese Größe die extrahierbare Leistung beinhaltet. Diese Energiefluss-Methode wurde von Black and Veatch zur Abschätzung der englischen Ressourcen verwendet. In unserem Modell können wir die Gesamtleistung auf andere Art bestimmen. Wir werden herausfinden, dass die kinetische-Energiefluss-Methode eine signifikant zu kleine Leistung ergibt.

Der Spitzenfluss an kinetischer Energie in einer Querschnittsfläche  $A$  ist

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad , \quad (G.4)$$

(Das ist die Formel für den Fluss kinetischer Energie, die wir auch in Anhang B verwendeten.)

Die gesamte auftretende Leistung ist nicht gleich dem kinetischen Energiefluss. Die gesamte auftretende Leistung in einer Welle ist eine Standard-Lehrbuchrechnung; eine Art sie zu ermitteln ist, die Energie in einer ganzen Welle zu bestimmen und sie dann durch



Fig.G.4: Mittlere Gezeitenleistung nach Messungen von Cartwright et al. (1980)

die Periode zu teilen. Die Gesamtenergie einer Welle ist die Summe aus ihrer potentiellen und ihrer kinetischen Energie. Kinetische und potentielle Energie sind in der Tat gleich groß (Das ist eine Standardeigenschaft fast aller schwingenden Systeme, seien es Massen an Federn oder Kinder auf Schaukeln.) Um die Gesamtenergie zu bestimmen reicht es also aus, einen dieser beiden Anteile - die potentielle Energie einer Wellenlänge oder die kinetische Energie einer Wellenlänge - zu berechnen und dann zu verdoppeln. Die potentielle Energie einer Welle (pro Wellenlänge und pro Einheitslänge einer Wellenfront) kann durch Integration bestimmt werden zu

$$\frac{1}{4} \rho g h^2 \lambda . \quad (\text{G.5})$$

Durch Verdoppeln und Teilen durch die Periode erhält man daraus die tatsächliche Gesamtleistung der Modellwelle (Tide im seichten Wasser)

$$\text{Leistung} = \frac{1}{2} (\rho g h^2 \lambda) \times w / T = \frac{1}{2} \rho g h^2 v \times w , \quad (\text{G.6})$$

wobei  $w$  die Breite der Wellenfront ist. Mit der Substitution  $v = \sqrt{gd}$  folgt

$$\text{Leistung} = \rho g h^2 \sqrt{gd} \times w / 2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w / 2 . \quad (\text{G.7})$$

Vergleichen wir diese Leistung mit dem Fluss der kinetischen Energie  $K_{BV}$ . Offensichtlich skalieren beide Ausdrücke unterschiedlich mit der Amplitude  $h$ . Benutzen wir die Umrechnungsformel für die Amplitude, Gleichung (G.3), die Kammgeschwindigkeit Gl. (G.2) und  $A = wd$ , so können wir den Fluss der kinetischen Energie umschreiben zu

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 = \frac{1}{2} \rho w d (v h / d)^3 = \rho (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3 \times w / 2 . \quad (\text{G.8})$$

Die kinetische-Energiefluss-Methode legt also nahe, dass die Gesamtleistung der Welle mit der *dritten Potenz* der Amplitude skaliert (Gleichung (G.8)); doch die korrekte Formel zeigt, dass die Leistung mit dem *Quadrat* der Amplitude skaliert (Gleichung G.7)).

Das Verhältnis ist

$$\frac{K_{BV}}{\text{Leistung}} = \frac{\rho w (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d} . \quad (\text{G.9})$$

Da  $h$  gewöhnlich viel kleiner als  $d$  ist ( $h$  ist etwa 1 m oder 2 m, dagegen ist  $d$  aber 100 m oder 10 m), sind Schätzungen der Leistungsressourcen auf Basis des Flusses kinetischer Energie wohl viel zu gering, jedenfalls in Fällen, wo das Modell der Tidenwelle im seichten Wasser anwendbar ist.

Darüber hinaus gehen Modelle auf Basis des Flusses von kinetischer Energie fälschlicherweise davon aus, dass die Leistung bei Springtiden (den höchsten Tiden) achtmal höher als bei Nipptiden (den niedrigsten Tiden) sei, mit einem angenommenen Amplitudenverhältnis Spring- zu Nipptide von 2:1. Doch richtig ist, dass die gesamte Leistung einer laufenden Welle mit dem Quadrat der Amplitude skaliert, woraus sich das Leistungsverhältnis einlaufender Spring- zu Nipptiden mit vier zu eins ergibt.

### ***Effekte aus der Abstufung des Meeresbodens und der Corioliskraft***

Wenn die Tiefe  $d$  schrittweise abnimmt und die Breite konstant bleibt, so dass die Reflexion und die Absorption der ankommenden Leistung minimal sind, bleibt die Leistung der Welle konstant. Das bedeutet,  $\sqrt{d} h^2$  ist eine Konstante, woraus wir ableiten,

dass der Tidenhub mit der Tiefe skaliert wie  $h \sim 1/d^{1/4}$ . Das ist ein grobes Modell. Ein vernachlässigtes Detail ist der Corioliseffekt. Die Corioliskraft drückt die Gezeitenkämme und Täler in Laufrichtung nach rechts – beispielsweise ist im Kanal auf der französischen Seite die Flut höher und die Ebbe niedriger. Durch Vernachlässigung dieses Effektes kommt ein gewisser Fehler in die Abschätzungen.

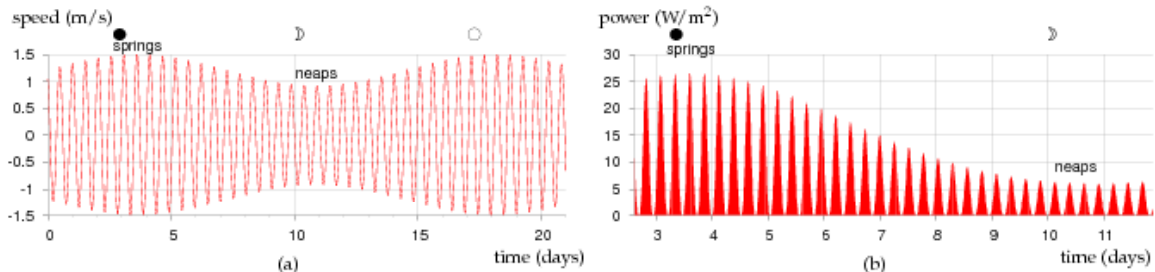


Fig.G.5: (a) Gezeitenstrom über einen Zeitraum von 21 Tagen an einer Stelle, bei der der maximale Strom bei Springtide 2,9 Knoten (1,5 m/s) und bei Nipptide 1,8 Knoten (0,9 m/s) beträgt. (b) Die Leistung pro Meeresboden-Flächeneinheit über eine Zeitspanne von neun Tagen von Spring- zu Nipptide. Die Leistung hat vier Spitzen pro Tag, mit bis zu 27 W/m<sup>2</sup>. Die mittlere Leistung der Gezeitenfarm ist 6,4 W/m<sup>2</sup>.

## Leistungsdichte von Gezeitenstromfarmen

Stellen Sie sich vor, wir stellen Unterwasser-Windmühlen am Meeresgrund auf. Der Wasserfluss wird die Windmühlen antreiben. Weil die Dichte des Wassers etwa 1000mal größer als die der Luft ist, ist auch die Leistung 1000mal größer als bei Wind gleicher Geschwindigkeit.

Wie viel Leistung können Gezeitenfarmen extrahieren? Das hängt kritisch davon ab, ob sich die Beiträge benachbarter Gebiete addieren oder nicht. Für Wind ist diese Additivitäts-Annahme recht gut gewährleistet: So lange die Windmühlen genügend weit voneinander entfernt sind, ist die Leistung von zehn benachbarten Windfarmen die Summe der Leistungen, die jede liefert, wenn sie alleine da stünde.

Stimmt das auch für Gezeitenfarmen? Oder interagieren Unterwasser-Windmühlen mit der Leistungsentnahme der anderen auf unterschiedliche Weise? Ich glaube nicht, dass die Antwort darauf in voller Allgemeinheit bekannt ist. Wir können aber zwei alternative Annahmen treffen und Modellsituationen bestimmen, in denen jede davon zutrifft. Die Annahme „Gezeiten sind wie der Wind“ besagt, dass man Gezeitenturbinen über den gesamten Meeresgrund aufstellen kann, etwa 5 Durchmesser voneinander entfernt, und dass diese sich nicht gegenseitig stören, egal wie viele sie sind.

Die Annahme „nur eine Reihe“ besagt, dass die maximal extrahierbare Leistung einer Gegend diejenige ist, die eine quer zur Strömung angeordnete Reihe von Turbinen erzeugt. Eine Situation, in der dies zutrifft, ist ein Staudamm, wenn das Wasser aus dem Staubeereich durch eine einzige richtig dimensionierte Turbine fließt. Es gibt dann keine Möglichkeit, weitere Turbinen dahinter zu schalten. Man kann nicht 100mal mehr Leistung erzeugen, wenn man weitere 99 Turbinen stromabwärts dazunimmt. Die Power wird in der ersten extrahiert, es bleibt nichts mehr für die weiteren übrig. Die Annahme „nur eine Reihe“ ist zutreffend bei der Berechnung der extrahierbaren Leistung an einer Stelle, wo Wasser durch eine enge Verbindung zwischen einem nahezu stationären Wasser einer gegebenen Höhe in ein tiefergelegenes Becken strömt. (Dieser Fall ist in Garrett und Cummins (2005, 2007) analysiert.)

Meine persönliche Vermutung ist, dass an vielen Stellen rund um England die Annahme „Gezeiten sind wie der Wind“ eine gute Näherung darstellt. Vielleicht haben

manche Stellen die Charakteristik eines engen Durchflusses. An diesen Stellen wäre die Annahme „wie der Wind“ eine Überschätzung des Potenzials.

Nehmen wir an, dass die Regeln zur Planung einer Gezeitenfarm ähnlich denen einer Windfarm sind, und dass die Effizienz der Gezeitenmühlen vergleichbar mit der der besten Windmühlen ist, also etwa 1/2. Wir können dann die Formel für die Leistung von Windfarmen (pro Landfläche) von Seite 283 (Gl. (B.8)) übernehmen. Die Leistung pro Flächeneinheit Meeresgrund ist dann:

$$\frac{\text{Leistung pro Turbine}}{\text{Fläche pro Turbine}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3 . \quad (\text{G.10})$$

Tabelle G.6 zeigt die Leistung von Gezeitenfarmen bei verschiedenen Gezeitenströmen nach dieser Formel.

$U$ (m/s)	$U$ (Knoten)	Gezeiten- leistung (W/m <sup>2</sup> )
0.5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabelle G.6: Gezeitenfarm-Leistungsdichte (in Watt pro qm Meeresboden) als Funktion der Fließgeschwindigkeit  $U$ . (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde = 0,514 m/s.) Die Leistungsdichte berechnet sich nach  $\frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$  (Gleichung (G.10)).

Was sind typische Gezeitenströme? Tabellen beinhalten meist die Ströme in Verbindung mit dem größten Tidenhub (Springtide) und dem kleinsten Tidenhub (Nipptide). Springtiden treten kurz nach jedem Voll- oder Neumond auf, Nipptiden bei Halbmond nach dem ersten bzw. dritten Quartal des Mondzyklus. Die Leistung einer Gezeitenfarm würde über den Tag in einer voraussagbaren Weise schwanken. Fig.G.5 illustriert die Leistungsdichte einer Gezeitenfarm mit einem maximalen Gezeitenstrom von 1,5 m/s. Die mittlere Leistung dieser Farm läge bei 6,4 W/m<sup>2</sup>. Es gibt viele Plätze um die britischen Inseln, wo 6 W/m<sup>2</sup> oder mehr erzielbar wären. Dieser Wert ist vergleichbar mit unseren Abschätzungen für Windfarmen (2-3 W/m<sup>2</sup>) und Solarparks (5-10 W/m<sup>2</sup>).

Wir verwenden die „Gezeiten sind wie Wind“-Theorie um die durch Gezeitenfarmen extrahierbare Leistung in vielversprechenden Regionen um die britischen Inseln abzuschätzen. Als Konsistenzcheck berechnen wir auch die gesamte Gezeitenleistung, die durch jede dieser Regionen fließt, nach der Theorie der „Leistung von Gezeitenwellen“, und stellen damit sicher, dass unsere Abschätzung für die Gezeitenfarm nicht größer als die gesamte verfügbare Leistung ausfällt. Die wichtigsten Regionen mit hohen Gezeitenströmen sind in Fig.G.7 gezeigt.

Ich schätzte die Spitzenströme für vielversprechende sechs Regionen ab mit den Daten aus „Reed’s Nautical Almanac“ (Diese Daten können leicht 30% falsch sein.) Habe ich die Flächen der einen oder anderen Region über- oder unterschätzt? Ich habe den Meeresgrund nicht untersucht – gut möglich, dass der auf die eine oder andere Weise unpassend ist, zu tief, zu seicht oder zu kompliziert zu bebauen.

Mit diesen ganzen Unsicherheiten gelangte ich zu einer Abschätzung für die Gesamtleistung aus Gezeitenfarmen von **9 kWh/d pro Person**. Das korrespondiert mit 9% der natürlichen ankommenden Wellenleistung, die ich auf Seite 95 erwähnte, 100 kWh pro Tag pro Person. (Die Leistung von 1,1 kWh/d/p im Kanal von Bristol, Region 2, könnte in Konkurrenz stehen zum Severn-Stauwehr; das hängt davon ab, ob die

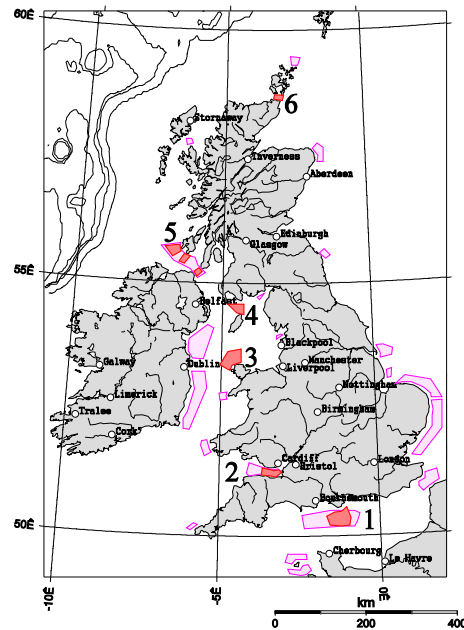


Gezeitenfarm sich zur natürlichen durch den Kanal erzeugten Reibung addiert, oder diese ersetzt.)

Fig.G.7: Regionen um die britischen Inseln, wo der Spitzen-Gezeitenfluss 1 m/s übersteigt. Die sechs dunkel schraffierten Stellen sind in Tabelle G.8 aufgeführt:

1. Kanal von England (südlich der Isle of Wight)
2. Der Kanal von Bristol
3. nördlich von Anglesey
4. nördlich des Isle of Man
5. zwischen Nordirland, Mull of Kintyre und Islay; und
6. der Pentland Firth (zwischen den Orkney und Schottland) und zwischen den Orkney-Inseln.

Zudem gibt es gewaltige Strömungen um die Kanalinseln, doch stehen die nicht unter englischer Verwaltung. Weitere vielversprechende Regionen finden sich in der Nordsee, von der Themse (London) bis zu The Wash (Kings Lynn). Die Konturen zeigen Wassertiefen über 100 m. Gezeitendaten stammen aus Reed's Nautical Almanac und DTI Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources (2004).



Region	$U$ (Knoten)		Leist.- dichte ( $W/m^2$ )	Fläche ( $km^2$ )	mittlere Leistung ( $kWh/d/p$ )	natürl. Leistung			
	N	S				$d$ (m)	$w$ (km)	N	S
1	1.7	3.1	7	400	1.1	30	30	2.3	7.8
2	1.8	3.2	8	350	1.1	30	17	1.5	4.7
3	1.3	2.3	2.9	1000	1.2	50	30	3.0	9.3
4	1.7	3.4	9	400	1.4	30	20	1.5	6.3
5	1.7	3.1	7	300	0.8	40	10	1.2	4.0
6	5.0	9.0	170	50	3.5	70	10	24	78
Gesamt					9				

Tabelle G.8: (a) Abschätzungen Gezeitenleistung unter der Annahme, dass Gezeitenfarmen wie Windfarmen sind. Die Leistungsdichte ist die mittlere Leistung pro Flächeneinheit Meeresboden. Die genannten sechs Regionen sind in Fig.G.7 eingezeichnet. N=Nipptide, S=Springtide. (b) zum Vergleich, Abschätzung der ankommenden natürlichen Leistung nach Gleichung (G.1) (Seite 331).

$v$ (m/s)	$v$ (Knoten)	Reibungs-Leistungsdichte ( $W/m^2$ )		Leistungsdichte Gezeitenfarm ( $W/m^2$ )
		$R_f = 0.01$	$R_f = 0.003$	
0,5	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	373	1000

Tabelle G.9: Reibungs-Leistungsdichte  $P_f \rho U^3$  (in Watt pro  $qm$  Meeresboden) als Funktion der Flussgeschwindigkeit, unter der Annahme  $R_f=0,01$  oder  $0,003$ . Flather (1976) benutzt  $R_f=0,0025-0,003$ ; Taylor (1920) benutzt  $0,002$ . (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde =  $0,514$  m/s). Die letzte Spalte zeigt die Gezeitenfarm-Leistung wie in Tabelle G.6 abgeschätzt. Als weiterführende Literatur siehe Kowalik (2004), Sleath (1984).

### Abschätzung der Gezeiten-Ressourcen aus der Bodenreibung

Eine andere Möglichkeit, die verfügbare Leistung aus den Gezeiten herzuleiten, ist auszurechnen, wie viel Leistung schon durch die Reibung am Meeresboden verloren geht. Ein Mantel aus Turbinen, knapp über dem Meeresboden montiert, könnte wie ein Bodenersatz wirken und annähernd denselben Widerstand dem vorbeifließenden Wasser entgegensetzen wie der normale Boden, ohne die Gezeitenströmungen nennenswert zu beeinflussen.

Welche Leistung geht also in der Bodenreibung verloren? Leider gibt es kein konsistentes Modell der Bodenreibung. Die Reibung hängt von der Rauigkeit des Meeresbodens ab und vom Material, aus dem er besteht – und auch wenn man diese Parameter kennt, ist nicht klar, welche Formel man benutzen sollte. Ein häufig benutztes Modell sagt, dass die Größe der mechanischen Scherspannung (Kraft pro Fläche) gegeben ist durch  $R_f \rho U^2$ , wobei  $U$  die mittlere Flussgeschwindigkeit ist und  $R_f$  eine dimensionslose Größe namens Scher-Reibungskoeffizient (shear friction coefficient). Wir können die verlorene Leistung abschätzen, indem wir die Scherkraft mit der Geschwindigkeit multiplizieren. Tabelle G.9 zeigt die in der Reibung verlorene Leistung bei angenommenem  $R_f = 0,01$  oder  $R_f = 0,003$ . Liegt der Wert des Scher-Reibungskoeffizienten in diesem Bereich, erhält man für die Reibungsleistung ganz ähnliche Werte wie bei obigen Abschätzungen für die Gezeitenfarmen. Das ist eine gute Nachricht, weil es nahe legt, dass ein Wald von Unterwasser-Windmühlen, jeweils 5 Durchmesser voneinander entfernt auf dem Meeresgrund, die Strömungen nicht tiefgreifend verändern wird. Die natürliche Reibung hat bereits einen Effekt in ähnlicher Größenordnung.

### Gezeitenbecken mit Pumpen

„Der Pump-Trick“ erhöht künstlich die Amplitude der Gezeiten in einem Becken und verstärkt so die erzielbare Leistung. Der Energieeinsatz für das Einpumpen zusätzlicher Wassermassen bei Flut wird mit Zinsen wieder zurückgewonnen, wenn man dasselbe Wasser bei Ebbe wieder herausfließen lässt. Genauso kann man bei Ebbe zusätzlich Wasser aus dem Becken pumpen und es bei Flut wieder einfließen lassen. Der Pump-Trick wird in La Rance manchmal angewandt und erhöht die Netto-Leistung um 10% (Wilson und Balls, 1990). Sehen wir uns die theoretischen Limits dieser Technologie an. Ich werde annehmen, dass die Generatoren einen Wirkungsgrad von  $\varepsilon_G = 0,9$  haben und die Pumpen  $\varepsilon_P = 0,85$ . Der Tidenhub sei  $2h$ . Der Einfachheit halber nehme ich an, dass die Preise zum Kauf und Verkauf von Elektrizität gleich und konstant sind. Dann ist die optimale Zusatz-Pumphöhe  $b$ , auf die das Becken über den Flut-Füllstand vollgepumpt werden soll, gegeben durch (Grenzkosten fürs Zusatzpumpen = Grenznutzen des zusätzlichen Wassers)

$$b/\varepsilon_P = \varepsilon_G(b + 2h) .$$

Mit der Zyklus-Effizienz  $\varepsilon = \varepsilon_G \varepsilon_P$  erhalten wir

$$b = 2h \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} .$$

Mit einem Tidenhub von  $2h = 4$  m beispielsweise und einer Zyklus-Effizienz von  $\varepsilon = 76\%$  ist die optimale Zusatzhöhe  $b = 13$  m. Das ist die maximale Zusatzhöhe, bis zu der Pumpen ökonomisch sinnvoll ist bei konstanten Strompreisen.

Nehmen wir an, der umgekehrte Trick würde bei Ebben angewandt. (Das erfordert, dass das Becken eine senkrechte Ausdehnung von 30 m hat!) Dann ist die abgegebene Leistung pro Flächeneinheit

$$\left( \frac{1}{2} \rho g \varepsilon_G (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\varepsilon_P} b^2 \right) / T ,$$

wobei  $T$  die Zeit zwischen Flut und Ebbe ist. Wir können dies ausdrücken als die maximal mögliche Leistungsdichte ohne Pumpen,  $\varepsilon_G 2 \rho g h^2 / T$ , erhöht um den Pumpfaktor

$$\left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right) ,$$



der etwa einen Faktor 4 ausmacht. Tabelle G.10 zeigt die theoretischen Leistungsdichten, die man mit Pumpen erreichen kann. Leider wird der Pump-Trick nur sehr selten in vollem Umfang auszubeuten sein wegen der Ökonomie des Becken-Bauens: Volles Ausnutzen des Pump-Tricks erfordert ein Becken, das etwa 4mal so hoch wie der Tidenhub ist, und erhöht die erzeugte Leistung 4fach. Doch die Menge erforderlichen Materials beim Bau eines Stauwehrs der Höhe  $H$  skaliert mit  $H^2$ , also sind die Baukosten einer 4mal höheren Wand mehr als 4mal größer. Zusätzliche Geldmittel sind wahrscheinlich besser in einer horizontalen Vergrößerung des Beckens angelegt als in einer vertikalen.

Tiden-Amplitude (halber Hub) $h$ (m)	optimale Pumphöhe $b$ (m)	Leistung mit Pumpen (W/m <sup>2</sup> )	Leistung ohne Pumpen (W/m <sup>2</sup> )
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Tabelle G.10: Theoretische Leistungsdichte der Gezeitenkraft unter Verwendung des Pump-Tricks, wenn es keine Beschränkungen aus der Beckenhöhe gibt.

Der Pump-Trick kann aber dennoch ohne Zusatzkosten angewandt werden an jedem Tag, an dem der natürliche Tidenhub kleiner ist als die maximale Beckenhöhe: Der Wasserlevel bei Flut kann hochgepumpt werden bis zum Maximal-Pegel. Tabelle G.11 gibt die Leistung an, wenn nur eine Höhe  $h$  gepumpt wird ( $b = h$ ), d.h. die Höhe im Becken ist gerade zweimal die externe Tidenhöhe. Verdoppeln der Höhe ist bei Nipptide einfach, weil Nipptiden gewöhnlich nur halb so groß wie Springtiden sind. Die Becken bei Nipptide bis zum Springtiden-Level zu pumpen, verdoppelt etwa die Leistung bei Nipptide im Vergleich zum ungepumpten Betrieb. Ein System mit Pumpen würde also zweiwöchige Variationen nur um den Faktor 2 anstatt um den Faktor 4 zeigen.

Tiden-Amplitude (halber Hub) $h$ (m)	Pumphöhe $b$ (m)	Leistung mit Pumpen (W/m <sup>2</sup> )	Leistung ohne Pumpen (W/m <sup>2</sup> )
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

Tabelle G.11: Leistungsdichte, die der Pump-Trick eröffnet, wenn die Zusatz-Pumphöhe so hoch wie der Tidenhub ist. Diese Annahme ist z.B. bei Nipptide erfüllt, wenn durch Pumpen der Tidenhub auf die Größenordnung der natürlichen Springtide angehoben werden soll.

### **Wie man ein „dauernd laufendes“ Gezeitenkraftwerk mit zwei Becken macht**

Hier eine nette Idee: Man nehme zwei Becken, eines davon ist das „volle“ und eines das „leere“; bei jeder Flut wird das „volle“ wieder aufgefüllt; bei jeder Ebbe wird das „leere“ vollständig geleert. Das Füllen und das Leeren kann entweder passiv mittels Schleusen geschehen oder (zusätzlich) durch Pumpen mit dem oben erwähnten Pump-Trick. Immer wenn Leistung benötigt wird, lässt man Wasser vom „vollen“ Becken ins „leere“ laufen oder (für die Leistungsausbeute noch besser) von einem Becken ins offene Meer. Die Kapitalkosten einer Zwei-Becken-Lösung (einer sog. Tidenlagune) dürften höher liegen, weil zusätzliche Sperrwände erforderlich werden, doch ist der große Vorteil, dass Leistung jederzeit verfügbar ist, so dass das Kraftwerk dem Energiebedarf folgen kann.

Wir können Leistung, die im „leeren“ Becken erzeugt wird, benutzen, um bei Flut zusätzliches Wasser ins „volle“ Becken zu pumpen und in gleicher Weise Leistung aus dem „vollen“ Becken zum Absenken des Wasserspiegels im „leeren“ Becken bei Ebbe. Mit diesem „Pumpen aus eigener Kraft“ könnte man die Leistung des Kraftwerks

erhöhen, ohne dafür Energie aus dem Netz ziehen zu müssen. Es ist eine erfreuliche Eigenschaft dieser Zwei-Becken-Lösung, dass der optimale Zeitpunkt, Wasser ins „volle“ Becken zu pumpen gerade bei Flut ist, was auch der optimale Zeitpunkt ist, um Leistung mit dem „leeren“ Becken zu gewinnen. Genauso ist umgekehrt Ebbe die beste Zeit, das „leere“ Becken auszupumpen und zugleich auch der perfekte Zeitpunkt zur Energiegewinnung im „vollen“ Becken. In einer einfachen Simulation konnte ich zeigen, dass ein Zwei-Becken-System an einer Stelle mit 4 m natürlichem Tidenhub eine Dauerleistung von  $4,5 \text{ W/m}^2$  liefern kann (MacKay, 2007a). Dies ist um 50% höher als die maximal erzielbare mittlere Leistung eines gewöhnlichen Gezeitenbeckens an derselben Stelle ( $3 \text{ W/m}^2$ ). Zudem wäre die stetige Leistungsabgabe des Zwei-Becken-Systems wertvoller als die intermittierende und weniger flexible Energieerzeugung bei herkömmlichen Gezeitenbeckens.

Ein Zwei-Becken-System könnte auch als Pumpspeicherwerk betrieben werden.

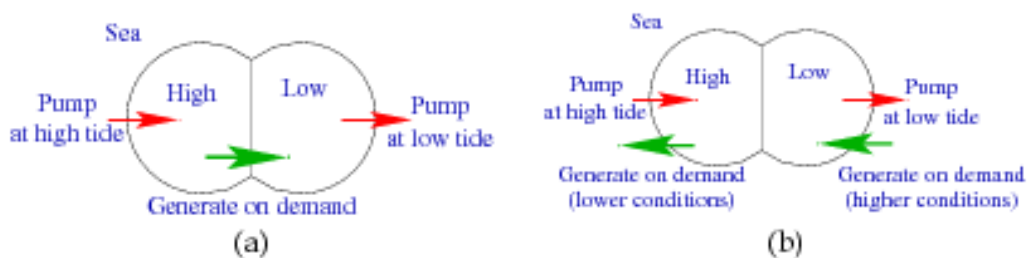


Fig.G.12: Verschiedene Anwendungen des Pump-Tricks bei Gezeiten. Die zwei Becken (Lagunen) liegen auf Meereshöhe. (a) Eine einfache Möglichkeit zwei Becken zu nutzen ist, das eine als das „volle“ und das andere als das „leere“ Becken zu markieren; ist das umgebende Meer nahe dem Flutpegel, lässt man Wasser in das „volle“ Becken, oder man pumpt es aktiv (mit Energie aus anderer Quelle); genauso leert man bei Ebbe das „leere“ Becken entweder passiv oder durch Pumpen. (b) Eine andere Anordnung, die noch mehr Leistung pro Beckenfläche liefern könnte, sieht keinen Wasserfluss zwischen den beiden Becken vor. Während ein Becken gerade voll oder leer gepumpt wird, kann das andere stetig Leistung nach Bedarf ins Netz abgeben. Die Pumpenergie könnte auch durch kurzzeit-schwankende Ressourcen wie Wind oder zusätzliche Quellen im Netz (etwa Kernkraftwerke) geliefert werden, oder durch die andere Hälfte des Beckensystems, indem die Energie des einen Beckens verwendet wird, um das andere Becken voll oder leer zu pumpen.

## Anmerkungen

Seite

329 **Generator-Wirkungsgrad von 90%** 311 *Efficiency of 90%...* Turbinen erreichen etwa 90% Effizienz bei Kopfdurchmessern von 3,7 m oder darüber. Baker et al. (2006).

337 **ein „dauernd laufendes“ Gezeitenkraftwerk mit zwei Becken** 320 *Getting “always-on” tidal power by using two basins.* Es gibt eine Tidenlagunen-Kraftwerk mit zwei Becken in Haishan, Maoyan Island, China. Ein einzelner Generator zwischen den beiden Becken (Anordnung wie in Fig.G.12(a) ) liefert kontinuierliche Leistung mit 39 kW im Mittel [2bqapk].

Weiterführende Literatur: Shaw and Watson (2003b); Blunden and Bahaj (2007); Charlier (2003a,b). Zur Bodenreibung und der Abhängigkeit des Flusses von der Tiefe, siehe Sleath (1984). Für weiterführende Abschätzungen der englischen Gezeitenressourcen siehe MacKay (2007b), zu Tidenlagunen MacKay (2007a).