

### Schrifttum:

- [1] Özis, Ü.: Akislilik katsayıları vâsıtasıyla ortalama ve düşük akımların tayini, güvenilir su kuvveti potansiyelinin hesaplanması (Bestimmung der mittleren und niedrigen Abflüsse durch Hydraulizitätsbeiwerte und Berechnung des verfügbaren Wasserkraftpotentials). TBTA (Institut für Wissenschaftliche und Technische Forschung der Türkei), MAG-206, Ankara, 1971.
- [2] U.N. Economic Commission for Europe: The hydroelectric potential of Europe's water resources. United Nations, ST/ECE/EP/39, New York, 1968.
- [3] Mosonyi, E.: Wasserkraftwerke. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1966.
- [4] DSI (Staatliches Wasserbaumamt): Haritalı istatistik bülteni (Statistische Mitteilungen mit Karten). DSI, Ankara, 1971.
- [5] DSI (Özis, Ü.; Kargı, Y.; Akinci, V.): Hidroelektrik yıllığı 1963 (Hydroelektrisches Jahrbuch 1963). DSI, Ankara, 1965.
- [6] DSI (Ural, O. M.; Ungan, Ü.): Large dams in Turkey. DSI, Ankara, 1967.
- [7] Özis, Ü.: Die Hydroenergie in der Entwicklung der Türkei. Dissertation, Technische Hochschule, München, 1961.
- [8] Cecen, K.: Die Wasserfassung bei Gebirgsflüssen. Die Wasserwirtschaft, H. 10, Stuttgart, 1967.

Anschrift des Verfassers: Dozent Dr.-Ing. Ünal Özis. Mühendislik Bilimleri Fakültesi. Ege Üniversitesi. İzmir, Türkei.

Hans-Joachim Späth

DK 556.552 – 556.551.45 (73)

## Der Wasser- und Salzhaushalt des Salton Sea in Kalifornien

### Kurzfassung/Summary

Der Salton Sea als Endsee in der Colorado Wüste nimmt Dränagewasser aller Art aus dem bewässerten Coachella Valley und Imperial Valley auf. Ferien- und Erholungsorte, Pensionärs-siedlungen, Naturschutz- und Testgebiete der U.S. Navy säumen seine Ufer. Der multifunktionale Charakter des Sees führt zwangsläufig zu Interessenkonflikten: Zum einen beeinflusst hauptsächlich das Ausmaß der Feldentwässerung den Wasserhaushalt des Sees; sowohl ein steigender als auch fallender Seespiegel wirkt sich destruktiv auf die Bewässerungs- und Erholungslandschaft aus. Zum anderen bedroht auch bei stabiler Spiegelhöhe die Salzzufuhr das ohnehin bereits labile ökologische Gleichgewicht des Sees. Wasser- und Salzhaushaltsberechnungen zeigen den Grad der dringend erforderlichen Kontrollmaßnahmen an.

The Salton Sea is the only natural storage basin for drainage water and waste within the irrigated Colorado Desert. Additionally this lake represents e.g. a recreational area of national importance. This multifunctional character has led to quite a dilemma: The water budget of the lake is mainly subject to the amount of drainage water and waste from the irrigated valleys; rising or falling water level, however, affects destructively both the irrigated and the recreational area. Furthermore the ecological balance of the Salton Sea is slowly being destroyed because of an increasing rate of salinity. Computations of historical and present water and salt budgets show that both water level and salinity control should be put into practice immediately.

### 1. Problemstellung

Die Colorado Wüste im Südosten Kaliforniens (Bild 1) ist nach Blake [2] ein dreiseitig von Gebirgsketten umrahmtes ideales abflußloses Becken. Der zentrale Teil reicht bis 83,9 m u. NN.

Innerhalb dieser Wüste lagen während verschiedener erdgeschichtlicher Zeiten Salz- und Süßwasserseen, welche durch das Vordringen des Golfes v. Kalifornien oder durch Lauf-

verlegungen des Colorado River entstanden. Den klimatischen Gegebenheiten zufolge verdunsteten diese Wasseransammlungen regelmäßig und rasch.

Zur Zeit der Landnahme durch weiße Siedler im Jahre 1900 lag die Wüste wieder trocken. Dann strömten die Abwässer des besiedelten und bewässerten Arealen unkontrolliert zum Zentrum der Depression. Ihre Summe war jedoch kleiner als das Ausmaß der potentiellen Evaporation, und somit verdunstete dieses Wasser restlos. 1905 brach bei Arbeiten zur Erweiterung des Alamo Kanals die Einlaßschleuse am Colorado, und der Strom ergoß sich über die Trockenbetten des New River und Alamo River bis 1907 in die Depression. Der Salton Sea entstand. Seit dieser Zeit sind Coachella Valley im Norden und Imperial Valley im Süden der Wüste wieder voneinander getrennt. Beiden Tälern bot sich der neue Endsee mit einer Spiegelfläche in 60,3 m u. NN als einziges natürliches Auffangbecken für Dränagewasser aller Art an (Abwasser- und Salzexportdaten, die sich auf das Imperial Valley beziehen, schließen im folgenden jenen Teil des Mexicali Valley/Mexiko ein, der vom Norden an die Wasserscheide auf dem Coloradoschwemmkegel heranreicht und über die U.S.-amerikanisch-mexikanische Staatsgrenze zum Salton Sea hin entwässert). Diese reliefbedingte Funktion des Salton Sea ist in der weiteren Betrachtung als Primärfunktion zu berücksichtigen.

Bis zum Jahre 1922 war das Ausmaß der Verdunstung an der Spiegelfläche größer als der Oberflächenzufluß, und der Seespiegel fiel auf ca. 76 m u. NN (Bild 2); doch für die Folgezeit ist im ganzen ein kontinuierliches Ansteigen des im Winter-Sommer-Rhythmus oszillierenden Seespiegels (Bild 3) bis heute zu verzeichnen.

Im Zuge der Vergrößerung und Verlagerung der Bewässerungsfläche säumten bald kultivierte Felder im Norden und Süden die Ufer des Salton Sea. An beiden Längsufern reihen sich seit 1940 dringend benötigte Ferien- und Erholungsorte für die Ballungsräume an der Pazifikküste, Pensionärsiedlungen

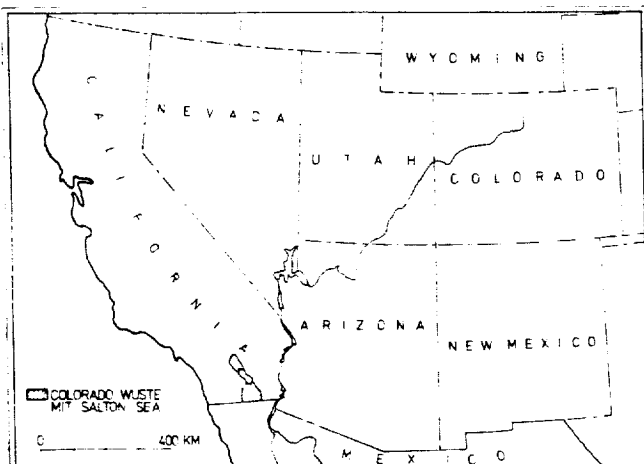


Bild 1. Die Lage der Colorado Wüste.

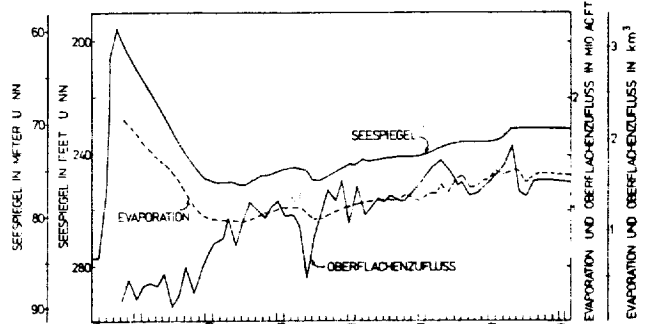


Bild 2. Die jährliche Veränderung des Seespiegels, des Zuflusses und der Verdunstung auf der Spiegelfläche des Salton Sea von 1904 bis 1971. (Nach I.I.D., Eng. File 654.12 und U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 486-C, 1966.)

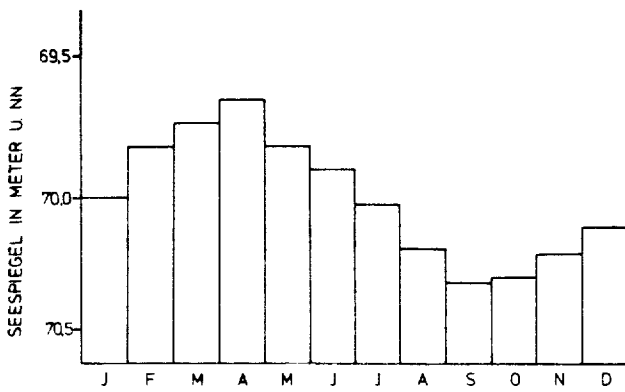


Bild 3. Seespiegelschwankungen während eines typischen Jahres. (Nach Daten des I.I.D., Eng. File 654.12.)

gen, Naturschutzgebiete und Testareale der U.S. Navy und der Atom Energie Kommission auf. Der multifunktionale Charakter des Sees mußte somit zu Interessenkonflikten führen: Steigt der Seespiegel an, dann sind die benachbarten Felder zunächst bei steigendem Grundwasserspiegel vermehrt der Gefahr der Bodenversalzung ausgesetzt, ehe sie und die angrenzenden Siedlungen überflutet werden. Sinkt der Seespiegel ab, dann fallen breite Landstreifen zwischen neuer und alter Strandlinie trocken. Auf Grund des flachen Seebodens bewirkt schon eine kleine Volumenveränderung eine beträchtliche Verlagerung der Strandlinie (Bild 4). Deshalb wurde dem IMPERIAL IRRIGATION DISTRICT und dem COACHELLA VALLEY COUNTY WATER DISTRICT ab 1964 nur noch insofern bedingtes Nutzungsrecht des Seebeckens zugesprochen, als der Wasserspiegel vorläufig nicht höher als 67 m u. NN ansteigen darf (mündliche Mitteilung des IMPERIAL IRRIGATION DISTRICT, El Centro/Calif.). Doch auch diese einseitige Einschränkung der primären Nutzung des Sees kann nur ein erster Schritt zu stabilen, alle Betroffenen zufriedenstellenden Nutzungsverhältnissen sein, zumal durch diese Einschränkung nur ein provisorischer Beitrag zur Lösung der Wasserquantitäts-, nicht aber der Wasserqualitätsfrage geleistet wurde. Der stetige Salzimport und die dadurch anhaltende Eutrophierung ist nicht nur Ursache ästhetischer Bedenken sondern auch praktischer Besorgnis: Durch die konstante Zufuhr mineralischer Stoffe wird das Algenwachstum in bedenklichem Maße angeregt und der Fischbestand gefährdet. Der Salton Sea droht ein totes Gewässer zu werden.

Um die Problematik, die mit den Spiegelschwankungen und der Abflußlosigkeit des Salton Sea verbunden ist, aufzuzeigen, werden die in Bild 2 zusammengefaßten historischen

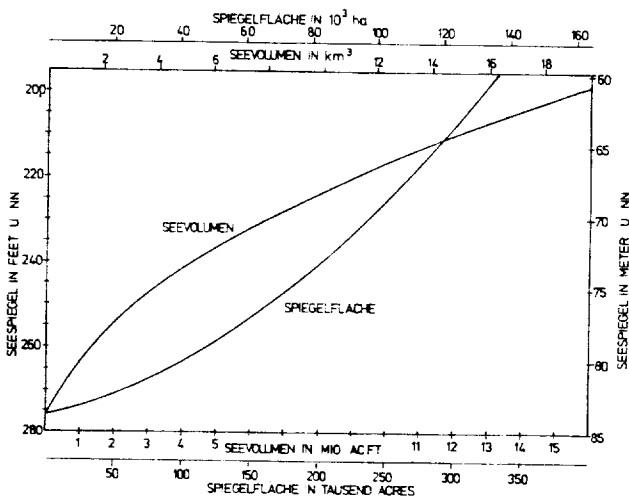


Bild 4. Spiegelfläche und Seevolumen des Salton Sea bei verschiedenen Wasserständen

und künftigen Folgen von Zufluß und Evaporation erörtert; weiterhin sind die aus der Intensivierung der Feldbe- und -entwässerung resultierenden Folgen für den Salzgehalt des Seewassers aufzuzeigen. Sowohl sinnvolle als auch praktikable Möglichkeiten der Wasser- sowie Salzhaushaltskontrolle stehen am Ende der Studie.

## 2. Der Wasserhaushalt

Im Hinblick auf die Wasserbilanz ist die Salton Depression eine geschlossene hydrologische Einheit. Die Kämme der Santa Rosa und Vallecito Mountains im Westen, der San Bernadino und Chocolate Mountains im Osten und die Wasserscheide auf dem Coloradobinnendelta im Süden begrenzen diese endorheische Einheit. Die Differenz zwischen Zufluß zum Salton Sea plus Niederschläge und Verdunstung drückt sich nur in Schwankungen des Seespiegels aus.

Der Gesamtzufluß zum See (Z) setzt sich aus episodischem oberirdischem Zufluß in Wadis ( $Z_e$ ) und Dränagewasser ( $Z_d$ ), aus Grundwasserzufluß ( $Z_{gw}$ ) und Direktniederschlägen auf dem Seespiegel ( $N_d$ ) zusammen:

$$Z = N_d + Z_d + Z_e + Z_{gw}$$

Da die hinreichend exakte direkte Ermittlung der Komponenten des Gesamtzuflusses teilweise unmöglich ist, wird der Oberflächen- plus Grundwasserzufluß über den Wasserhaushalt des Salton Sea errechnet. Hiernach ist der Gesamtzufluß (Z) die Summe aus Direktniederschlag ( $N_d$ ), Verdunstung an der Spiegelfläche (V) und Seevolumenveränderung ( $\Delta S$ ) pro Beobachtungsperiode:

$$Z = V - N_d + \Delta S$$

Da die monatlichen und jährlichen Summen des Dränagewassers aus dem Coachella Valley, dem Imperial und Mexicali Valley bekannt sind (seit 1950 werden für das Coachella Valley an der Mündung des Whitewater River in den Salton Sea und weiteren 19 direkten Dränageröhren Abflüsse und Salzgehalt des Dränagewassers gemessen; seit 1920 werden für das Imperial Valley an den Mündungen des New River und des Alamo River die gleichen Messungen durchgeführt [13]), kann für Direktniederschläge (nach IMPERIAL IRRIGATION DISTRICT, El Centro, und U.S. DATE AND CITRUS STATION, Indio, für einen Meßzeitraum von 1914 bis 1971 74 mm/a), Grundwasserzufluß und oberirdischen Zufluß in Wadis im mehrjährigen Durchschnitt (1948 bis 1972) ein Gesamtvolumen von 123 hm<sup>3</sup>/a ermittelt werden. Dieser Betrag stellt einen konstanten Faktor dar, welcher in der Wasserbilanz zwar berücksichtigt werden muß, bei künftigen Wasser- und Salzhaushaltskontrollmaßnahmen jedoch weder von Bedeutung noch zu beeinflussen sein wird. In der weiteren Betrachtung spielt deshalb nur noch die Wechselbeziehung zwischen Seespiegellhöhe, Verdunstung (nach IMPERIAL IRRIGATION DISTRICT, El Centro, und U.S. DATE AND CITRUS STATION, Indio, für einen Meßzeitraum von 1914 bis 1971 1830 mm/a) und Dränagewasserzufluß eine Rolle (Bild 2).

Die Morphometrie des Seebeckens ist durch einen Vergleich mit einer sehr flachen Schale am besten gekennzeichnet. Hohe Wasserstände bewirken demnach große Verdunstungsvolumen, und es sind große Zuflüsse erforderlich, um die Verdunstungsverluste auszugleichen oder gar die Position des Seespiegels zu erhöhen. Bei niedrigen Wasserständen hingegen bewirkt die gleiche Verdunstungshöhe eine geringere Volumenreduzierung, und es sind geringere Zuflüßraten zum Ausgleich des Verdunstungsverlustes vonnöten (Bild 4).

Während eines typischen Jahres überwiegt die Verdunstung im Sommer den Zufluß; der Seespiegel fällt ab. Im Winter ist der Zufluß auf Grund der reduzierten Verdunstungstätigkeit größer und der Seespiegel steigt wieder an (Bild 3). Die im Winter aktivierte Desalinationstätigkeit unterstützt ihrerseits diesen Anstieg.

Bis 1923 übertraf die Verdunstung den Zufluß, und der Seespiegel fiel beträchtlich ab. In diesen Jahren wurde jedoch in den drei Tälern keinerlei künstliche Entwässerungstätigkeit

ausgeübt; der Zufluß aus dem bewirtschafteten Areal bestand im wesentlichen aus ungenutztem Wasser, das abgeführt werden mußte und aus jenem Wasser, das nach der Feldüberflutung die Ableiter erreichte. 1925 lag der Seespiegel in einer Höhe von 76 m u. NN. Der Umfang der bewässerten Fläche stieg rasch an, und so nahm auch die Zuflußquote ständig zu und erreichte 1930 ein erstes Maximum. Die Trockenperiode von 1931 bis 1934 im Einzugsgebiet des Colorado [20] macht sich in einem deutlichen steilen Abfall der Kurve bemerkbar. In der zu dieser Zeit gegebenen Spiegelhöhe übertraf die Verdunstung den Zufluß. 1935 lag der verzögert abgesenkte Seespiegel in 75 m u. NN. Die immer zahlreicheren Kunstbauten am unteren Colorado und die dadurch gewährleistete gleichförmige Wasserlieferung und die Konsolidierung einer geregelten Nutzungsstruktur im bewässerten Areal haben dazu geführt, daß seit dieser Zeit hohe Zuflußraten meist die durch die Evaporation verursachte Volumenreduzierung wieder ausgleichen und zusätzlich den Wasserspiegel ansteigen lassen. Die mittlerweile verstärkte praktizierte Feldentwässerung findet hier ihren Niederschlag. Seit 1963 liegt der Seespiegel in 70 m u. NN. In dieser Höhe überwiegt das Verdunstungsvolumen das gegebene Zuflußvolumen von 1,476 km<sup>3</sup>/a nur geringfügig. Hieraus resultiert die gegenwärtig leicht fallende Tendenz des Wasserspiegels.

In Zukunft werden nur bei weiter sich ausdehnender Feldentwässerung und anhaltender Bevölkerungskonzentration noch größere Oberflächenzuflußraten erwartet werden müssen. (1970 lebten im Coachella Valley und Imperial Valley ca. 180 000 Einwohner. Bis zum Jahre 2020 werden ca. 800 000 Einwohner erwartet [21]. Anzeichen einer Flächenexpansion in der Bewässerungswirtschaft sind gegenwärtig jedoch nicht zu erkennen [13]). Sollten die Bewässerungsdistrikte dann von ihrem Recht Gebrauch machen müssen und alles Land unterhalb 67 m u. NN überfluten, so würde die Seefläche in dieser Höhe eine Ausdehnung von 106 147,5 ha erreichen (Bild 4). Bei einer Verdunstungshöhe von 1830 mm/a würden von dieser Fläche 1 935,774 hm<sup>3</sup> Wasser verdampfen. Und dies entspricht jener Summe aus Oberflächen- und Grundwasserzufluß und Direktniederschlägen, die maximal dem See zugeführt werden kann, um den Spiegel stabil zu halten. Da Direktniederschläge, Grundwasserzufluß und Zufluß in Wadis bereits ca. 123 hm<sup>3</sup>/a ausmachen, dürften bei Erreichen der -67 m-Marke jährlich noch 1 812,774 hm<sup>3</sup> Drainagewasser dem Salton Sea aus dem bewässerten und besiedelten Bereich zugeleitet werden. Ohne Möglichkeiten der zusätzlichen, künstlichen Reduzierung des Seevolumens wäre also die Ausdehnung des bewässerten Areals in der Colorado Wüste selbst bei unbegrenztem Wasserangebot durch das maximal zulässige Ausmaß der Drainagetätigkeit begrenzt.

### 3. Der Salzhaushalt

Als Endsee nimmt der Salton Sea gelöste Stoffe auf und führt sie nicht wieder ab. Sie verbleiben beim Verdunstungsprozeß im See und häufen sich an. Die reiche Nährstoffzufuhr fördert die rasche Algenvermehrung. Schwimmende Algenrasen, Verfärbungen des Wassers und Gefährdung des Fischbestandes durch die Salzkonzentration und abgestorbene Algenkulturen sind neben üblen Gerüchen die schwerwiegendsten Folgen.

1907 wurde erstmals das Wasser chemisch analysiert und ein Salzgehalt von 77 Mt [7] ermittelt (Bild 5). Die Evaporate an der Beckensohle als Zeugen früherer Seen wurden gelöst und bewirkten bis zum Jahre 1914 die rasche Erhöhung des Salzgehaltes auf 110 Mt. Nach 1920 spielten diese in situ gelösten Stoffe keine Rolle mehr; es ist nachzuweisen, daß die Salzkonzentration im Salton Sea hauptsächlich um jene Mengen weiter anstieg, die ihm ständig über die Drainagesy- eingeführt werden.

Die Be- und Entwässerung wurde im Coachella Valley, im Imperial und Mexicali Valley in den 50er und 60er Jahren immer stärker intensiviert [13]. Die Abwasserbeseitigung

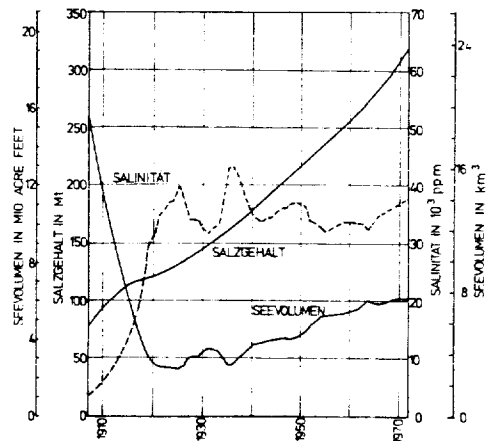


Bild 5. Die Veränderung der Salinität, des Salzgehaltes und des Seevolumens zwischen 1907 und 1972. (Nach Daten des I.I.D., Eng. File 600.001, des C.V.C.W.D., Form E-3-B und U.S.D.I., Geol. Survey, Prof. Paper 486-C, 1966.)

stieg an (Bild 2). Ebenso nahm der Salzgehalt des Colorado-wassers ständig weiter zu [6]. Von 1948 bis 1958 wurden dem Salton Sea dadurch jährlich 3,95 Mt [18, 8, 3] gelöste Stoffe zugeführt, zwischen 1958 und 1962 durchschnittlich 4,37 Mt/a, 1962 bis 1967 5,06 Mt/a und seit 1967 5,59 Mt/a. 1972 enthielt das Seebecken insgesamt 320 Mt Salze. Ungeachtet des sich verändernden Wasserstandes bleibt diese Summe erhalten und erhöht sich gegenwärtig jährlich um weitere 5,59 Mt, wenn keine wirksamen Salzhaushaltskontrollen eingeführt werden.

Die folgende Zusammenstellung zeigt, daß der Salton Sea gegenwärtig (1972) mit 41,9 kg/m<sup>3</sup> einen geringfügig höheren Salzgehalt aufweist als das Weltmeer mit 38,8 kg/m<sup>3</sup>.

|                     | Salzgehalt<br>in kg/m <sup>3</sup> [5] |
|---------------------|--|
| Totes Meer          | 246,3                                  |
| Großer Salzsee/Utah | 216,3                                  |
| Salton Sea/Calif.   | 41,9                                   |
| Weltmeer            | 38,8                                   |

Bei der gegenwärtigen Salzzufuhr von 5,59 Mt/a würde es 238 Jahre dauern, ehe der Salton Sea bei konstanter Spiegelhöhe in 70 m u. NN den Salzgehalt des Großen Salzsees von Utah erreicht hätte. Man hat jedoch erkannt, daß es gilt diese Entwicklung aufzuhalten, denn bereits eine Salinität von 40 000 ppm (Bild 5) bedeutet das Ende des Fischbestandes im See und der damit verbundenen sportlichen Aktivitäten. Dieser Wert wird zwischen 1975 und 1980 erreicht sein, wenn bei anhaltender Salzzufuhr das Seevolumen konstant bleibt und keine Maßnahmen zur Salzreduzierung ergriffen werden.

### 4. Möglichkeiten der Wasser- und Salzhaushaltskontrolle

Ausgehend von der Tatsache, daß gegenwärtig keine Expansion der Bewässerungsfläche zu erkennen ist, kann zunächst gefolgert werden, daß bei gegebener Nutzungsstruktur ein markantes Ansteigen des Seespiegels nicht zu erwarten ist. Doch auch ein Abfallen ist, wie oben bereits erwähnt, von unliebsamen Folgen begleitet. Maßnahmen zur Stabilisierung des Spiegels sind also in jedem Falle erforderlich. Da aber diese Maßnahmen sinnvollerweise auch gleichzeitig den Salzhaushalt regulieren sollen, ist vorauszusehen, daß der Eingriff in den Wasser- und Salzhaushalt des Salton Sea recht komplexer Natur sein muß; bereits die jährliche Salzzufuhr setzt eine große Arbeitskapazität der Kontrolleinrichtungen voraus.