

bahnen haben die Tendenz sich zu gabeln und zu verlagern, d. h. sie divergieren flußab. Das flache Vorgelände der tropischen Inselberge dagegen ist, da durch Flachmuldentäler gegliedert, in der Richtung parallel zum Inselbergrande flach gewellt. Die Talanfänge sind breit und muldenförmig. Sie haben nicht einen leicht nach oben gewölbten Boden wie die Pedimentkegel. Die Gerinnebahnen der Flachmuldentäler konvergieren daher talabwärts, im Gegensatz zu den Gewässerbahnen der Pedimentflächen.

Wegen dieser Unterschiede erscheint es mir nicht vorteilhaft, das flache Vorgelände der tropischen Inselberge als Spülpediment zu bezeichnen, so wie J. BÜDEL (1957)²⁾ dies vor-

geschlagen hat. Der Begriff Pediment sollte doch wohl besser auf die aus Kegelmantelflächen und deren seitlichem Verfließen bestehenden Einebnungen der ariden und semiariden Gebiete beschränkt bleiben.

Das flache Vorgelände der Inselberge wie auch der Rumpfstufen in den wechselfeuchten Tropen könnte vielleicht als Spülmuldenflur bezeichnet werden. In dieser Wortbildung wäre der Spülvorgang als maßgebendes Agens, die Muldenform der sehr flachen Talzüge im Gegensatz zur Kegelform der Pedimente und durch das Wort Flur das sanftwellige Abweichen von einer eigentlichen Ebene zum Ausdruck gebracht.

DIE GROSSEN SEEN NORDAMERIKAS

REINER KELLER

Mit 7 Abb. und 10 Bildern und 13 Tabellen

Summary: The Great Lakes of North America:

According to their origin and morphology, the Great Lakes may well be likened to the Baltic Sea. On the other hand, rapids and waterfalls cut them off from the influence of the ocean, whereas the Baltic has become a tributary sea. Because of their being the largest continuous fresh water surface on earth and their relatively small catchment areas, the Great Lakes are especially suited for water cycle studies. The paper investigates level changes for the individual lakes for the period from 1860 to 1956, both by annual values over long periods and as regards changes over the years, depending on climatic oscillations. It appears that the amount of water discharged from the Great Lakes has declined during recent decades (table 8).

The water cycle was calculated for the individual lakes and for the Great Lakes as a whole (table 5); the influence the different climatic locations is emphasised.

While it was possible to calculate the annual values of precipitation, discharge, and evaporation, this could not be done for the individual months because of lack of sufficient data about the regime of the tributary rivers and the annual course of evaporation (the percentage per month). There are obviously no such direct connexions between the average monthly lake levels and the average monthly discharge that the monthly cycle could have been calculated on this basis. The complicated monthly cycles, without the evaporation data, are shown in table 6 and figure 3.

The level changes, be they natural or human conditioned, have their bearing on hydro-electric power utilisation and shipping within the area of the Great Lakes. Because of the shallowness of the "Rivers" which link the lakes with each other only part of the available tonnage of the cargo fleet of the lakes can be utilised to the full. Despite this, shipping within the Great Lakes has lately overtaken that of the Suez and Panama canals. In this connexion the importance of the "Great Lake — St. Lawrence Deep Waterway" is emphasised.

Die sechs großen laurentischen Seen sind des amerikanischen Doppelkontinentes bedeutendster Großschiffahrtsweg. Die Frachtleistungen und die Schiffsdurchgänge an den See-Engen haben 1953 erstmals die entsprechenden Zahlen für den Panamakanal und Suezkanal übertroffen. Die Großen Seen umfassen mit einer Ausdehnung von ca. 246 480 qkm die größte zusammenhängende Süßwasserfläche der Erde. Sie verbinden die Atlantikküste über verschiedene Klimabereiche von der Maiszone bis zum Nadelwaldgürtel mit dem Mittelpunkt des nordamerikanischen Kontinents und scheinen daher sehr geeignet zu sein, neben wirtschafts- und siedlungsgeographischen Aspekten (vgl. E. C. SEMPLE) der Gewässerkunde als Modellfall zu dienen, zumal seit nunmehr 125 Jahren hydrometrische Beobachtungen systematisch durchgeführt werden.

Die laurentischen Seen verdanken, wie die Ostsee in Europa, der letzten Eiszeit ihre Entstehung, wobei allerdings in beiden Fällen großräumige tektonische Einmuldungen im Tertiär und Diluvium am Rande starrer Schilde die Bildung der Hohlformen unterstützten. Die verhältnismäßig geringe Tiefe beider Seegebiete, die Formgleichheit der umgebenden Landschaften mit ihrer im einzelnen weitgehenden Differenzierung mit niedrigen Höhen glazial geformter Rundhöcker, mit verzweigten Seewannen, Sümpfen und Bruchwäldern, mit unausgeglichenem Gewässernetz ohne bevorzugte Laufentwicklung und mit wechselnder Höhenlage u. a. ist beiden Bereichen gemeinsam. Zahlreiche Wasserfälle kennzeichnen die Jugend der Formen; hier wie dort sind sie ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor geworden, wäh-

²⁾ BÜDEL, JULIUS: Die Flächenbildung in den feuchten Tropen und die Rolle fossiler solcher Flächen in den anderen Klimazonen. Verh. u. Wiss. Abh. d. 31. Deutsch. Geogr. Tages in Würzburg 1957, Wiesbaden 1959, S. 89—121. Dort auch weitere Literatur.

rend sie andererseits eine weit ins Land hineinreichende Schifffahrt verhindern oder zumindest erschweren.

Nach dem Abschmelzen des Eises wird eine Heraushebung des Landes beobachtet; in beiden Fällen zeigen die Südküsten eine leichte Senkungstendenz. Dementsprechend sind an den Nordküsten, d. h. im Gebiet der Großen Seen auf der kanadischen Seite, bedeutendere Wasserkräfte vorhanden als an den Südküsten. Eine belebte Szenerie mit beachtlicher Reliefenergie wurde durch junge Formen am Nordufer des Lake Superior geschaffen. Diese Küsten aus Diabas, Gneisen und anderen harten Gesteinen stehen in eindrucksvollem Gegensatz zu den flachen Küsten der Unterseen, deren Relief nur von Moränenablagerungen und deren Varianten oder flach geneigten Kalken, die weithin mit ihren Escarpments das Landschaftsbild beherrschen, belebt wird. Sowohl der „Glinc“ der estnischen Küste als auch der Niagara-Nordamerikas und der von dort nach N ausholende Bogen von Inseln und Halbinseln in den Seen sind an silurische Kalke gebunden.

Die Gleichgewichtslinie zwischen Hebung und Senkung verläuft im Ostseegebiet etwas nördlich der deutschen Küste (vgl. Atlas over Sverige), im Bereich der laurentischen Seen wurde ihr Verlauf bisher auf der Linie Conneaut (zwischen Cleveland und Erie) — Port Huron — Sheboygan (nördlich Milwaukee) angenommen. SH. MOORE (1948) veröffentlichte eine Karte über die isostatischen Bewegungen im Gebiet der Großen Seen.

Neuere Messungen haben ergeben, daß im ganzen Bereich der Großen Seen eine relative Heraushebung zu beobachten ist (mündl. Mitteilung von M. HUNT, U.S. Lake Survey Detroit). Dabei ist noch nicht zu sagen, ob dies eine Wirkung der isostatischen Bewegungen ist oder ob es sich um eine scheinbare Heraushebung handelt, welche durch ein Absinken der Wasserspiegel besonders im Michigan-Huronseegebiet verursacht wurde.

Nach der Herausstellung einiger gemeinsamer Züge — N. KREBS führte in seiner meisterhaften vergleichenden Länderkunde (1951) den Vergleich noch weiter — sollen nun noch einige uns interessierende Verschiedenheiten erwähnt werden: Die Seen sind mit ca. 246 500 qkm kleiner als die Ostsee, deren Wasserfläche 400 000 bis 450 000 qkm umfaßt. Allerdings sind die laurentischen Seen nur ein Teil der amerikanischen „Ostsee“, denn das Hudsonmeer, das nördlich der großen kanadischen Schwelle liegt — wie der Bottnische Meerbusen nördlich der Ålandsschwelle — gehört mit seinen 800 000 qkm ebenfalls zur laurentischen „Ostsee“.

Während bei der Ostsee die Einflüsse des Atlantik nicht zu übersehen sind, sind die Großen Seen

durch ihre Höhenlage ganz der Meereswirkung entzogen. Die Tide reicht nur bis Montreal. In der Spät- und Postglazialzeit hatte nur der Ontariiosee zeitweilig Meeresbeeinflussung, während auf der anderen Seite die ganze Ostsee mehrfach ein Salzwassergebiet war. Sowohl die Ostsee als auch die laurentischen Seen haben in den vergangenen 12 000 Jahren ihre Ausdehnung und ihre Verbindungen zum Weltmeer mehrfach geändert.

Bis etwa 12 000 v. Chr. bedeckte die Eiskappe den größten Teil der laurentischen Seen und nur der Südteil des heutigen Michigansees (= Lake Chicago) und des heutigen Erie- und St.-Clair-Sees (= Lake Maumee) waren eisfrei. Den Schmelzwässern war der heutige Seeausfluß versperrt und sie flossen über den heutigen Chicago River und Chicago Sanitary and Ship Canal (bzw. in deren Nachbarschaft) sowie aus dem Lake Maumee bei der Stadt Toledo zum Mississippigebiet ab. Der direkte Abfluß zum Atlantischen Ozean über das Gebiet des späteren St.-Lorenz-Stromes wurde nach Rückzug des Eises um 9500 v. Chr. frei und schon zeichneten sich die Umrisse der heutigen Seen ab, wobei jedoch die Verbindungen zwischen den einzelnen Seen anders als heute verliefen: Der Keweenawsee, ein Vorläufer des Lake Superior (Oberer See), hatte quer durch die Halbinsel Nord-Michigan eine direkte Verbindung zum Michigansee. Die Mackinac-Straße war mehr als „River“ ausgebildet; sie war schmaler als heute, und der Huronsee hatte wohl über die Georgian Bay zwei Abflüsse zu einer Meeresbucht im Bereich des heutigen Ontariosees und St.-Lorenz-Stromes bei Montreal.

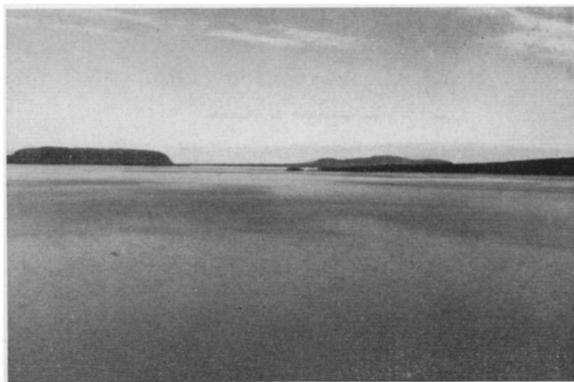
Noch einmal sollte das Seenbild verändert werden durch den „Valders-Vorstoß“ des Eises um 8800 v. Chr. Letztmalig wird der nördliche Teil der Seen vom Eis bedeckt, und die genannten Seeausgänge nach dem Osten und Südosten werden versperrt. Noch einmal muß die alte Senke am Chicago River die Entwässerung des Seegebietes übernehmen. Der südliche Huronsee, der eisfrei blieb, und die im Bereich des heutigen Erie- und Ontariosees gelegenen Seen entwässerten ebenfalls zum Mississippi, aber nun nicht über den Ausgang bei Toledo, der um 12 000 benutzt wurde, sondern zum Michigansee durch die Niederung, welche sich quer durch die Michigan-Halbinsel von der Saginaw-Bucht nach Grand Rapids hinzieht. Diese Entwässerungslinie bestand bereits einmal um 11 700 als sich das Eis vom Maximalstand zurückzog (vgl. HOUGH, J. L. 1953, 1955, FLINT, R. F. 1947, ZUMBERGE u. POTZGER 1955 und BRETZ 1951).

Bei dem nun folgenden weiten Eisrückzug wird die Entwässerung zum Mississippi vom Algonquinsee (Michigansee) wieder aufgegeben zugun-

sten ostwärts gerichteter Abflüsse (um 6000 v. Chr.). Der St. Clair River und St.-Clair-See, der Detroit River, Eriesee und Niagara River sind ähnlich gebildet wie heute. Der Abfluß erfolgt vom Iroquois-See (Ontariosee) über das St.-Lorenz-Tiefland, aber auch durch die Utica-Mohawk-Senke zum Hudson River, während dann um 3200 v. Chr. im St. Lorenz-Tiefland bis vor die Niagarafälle das Meer eindringt.

Wie schon einmal um 9500 v. Chr. schrumpfen die landeinwärts gelegenen Seen merklich mit Ausnahme des Lake Superior und Eriesees. Der um 9500 bereits aktive Ausfluß über den Ottawa River, der vom Eisrand noch berührt wird, reicht nun alleine zur Entwässerung aus. Der Eriesee entwässert direkt zur Meeresbucht (Ontariosee).

Im dritten vorchristlichen Jahrtausend führen die reichlichen Schmelzwässer des rasch weichen-



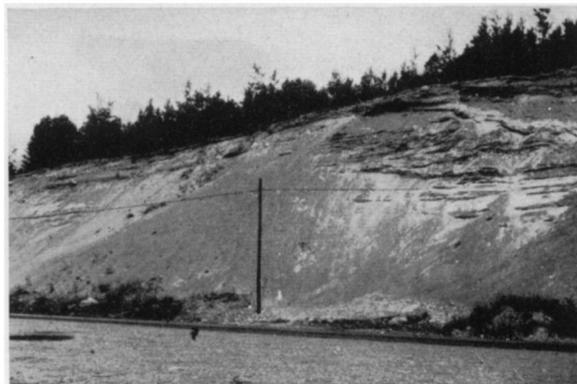
1



2



3



4

Bild 1: Die Nordgestade des Lake Superior sind in junger Zeit herausgehoben worden.

Das Bild zeigt den Blick vom „Loukout“ (300 m + NN) zwischen Nipigon und Terrace Bay auf die Bucht von Mazokama (mittl. Wasserspiegel 184 m). Links die La Grange Insel; im Hintergrund die Halbinsel an der Black Bay. Der dazwischenliegende weiße Rauch zeigt die Papierfabriken von Red Rock an. Präkambrische Gesteine und Granite, Gneise, Syenite Diorite u. a. verschiedenen Alters.

(Aufnahme R. Keller, Sept. 1957)

Bild 3: Im Gegensatz zu den jung gehobenen Gebieten im Norden der Großen Seen sind die Südufer weithin sehr flach.

Die Wasserstandsmarken in der Schleuse an der Einfahrt vom Michigansee zum Chicago River zeigen, daß der Wasserspiegel des Michigansees z. Z. der Aufnahme höher liegt als der Wasserspiegel des Chicago River. Der Chicago River entwässert heute durch künstlichen Eingriff zum Mississippi. Das Bild gibt den Blick vom Michigansee (Schleuseneinfahrt) landeinwärts gegen den „Loop“ von Chicago wieder.

(Aufnahme R. Keller, Juli 1957)

Bild 2: Der Ausfluß des Nipigon River in den Lake Superior.

Die junge Morphologie wird durch die starke Strömung sichtbar. Der Fluß durchbricht vor der Einmündung in den L. Superior einen schmalen Riegel aus glazialen und fluvio-glazialen Ablagerungen (Bild 4). In der Bildmitte (heller Fleck) Holzflößerei.

(Aufnahme R. Keller, Sept. 1957)

Bild 4: Aufschluß bei Nipigon unweit des Durchbruchs des Nipigon River (Bilde 2), etwa 70 bis 90 m über dem Flußniveau.

Junge fluvioglaziale Ablagerungen, überwiegend geschichtet mit Deltaschichtung, feinsten tonigen Staublagen und groben Moränenlagen (wenig).

(Aufnahme R. Keller, Sept. 1957)

den Eises zur maximalen Ausdehnung der Seen, welche auch die heutigen Restseen wie Nipigon-See, Nipissing-See, Simcoe-See, um nur die größten zum heutigen Einzugsgebiet der Großen Seen gehörenden zu nennen, umschlossen. Die Unterseen, d. s. St.-Clair-See, Erie- und Ontariosee und die dazwischen gelegenen „River“ entsprachen ganz den heutigen Verhältnissen. Aber die drei großen Seen besaßen im Ottawa River und Chicago River zwei zusätzliche Abflurrinnen.

Im Gegensatz zur Ostsee hat es im Bereich der Großen Seen eine Meeresüberflutung nur im Gebiet des Ontariosees gegeben. Die Abflußrichtungen wechselten hier wie dort. Die einzelnen laurentischen Seen hatten manchmal divergierende Abflüsse, was die an sich durch die Eisübertiefung schon gegebenen Chancen für recht unterschiedliche Seespiegel noch verstärkte. Infolgedessen verbinden die River heute die einzelnen Seen über relativ schmale Stromschnellen und Wasserfälle.

Die alten Abflurrinnen als neue Kanäle

Die Geschichte der Seen ist für die heutigen Wasserstraßen bedeutsam geworden, weil die alten Abflurrinnen — teilweise durch den Menschen veranlaßt — wieder in Funktion gesetzt wurden: Die Rinne, welche vom Ontariosee über Syracuse-Utica nach Albany am Hudson River führt, wird heute als Schifffahrtsweg — natürlich neben Straße und Eisenbahn — benutzt. Bei den Niagarafällen wird den Großen Seen Wasser entzogen und in die New York Canals geleitet. In den acht Schifffahrtsmonaten werden dem Niagara je etwa 1100 cfs (Kubikfuß pro Sekunde) entnommen; in den Wintermonaten ist die entnommene Wassermenge unbedeutend, im Februar wird praktisch nichts entnommen. Dadurch besteht eine Binnenwasserstraße von New York über die Großen Seen und einen Kanal bei Chicago zum Mississippi und Golf von Mexiko. Zwar sind auf diesem Wege eine Anzahl von Schleusen zu passieren.

Tabelle 1:
Die New York Canals

| Kanal | Länge km | Zahl der Schleusen |
|---|-------------|-----------------------|
| Erie Canal von Troy am Hudson River nach Tonawanda am Niagara River. | 544 | 35 |
| Champlain Canal von Waterford am Hudson River nach Whitehall am Champlainsee | 97 | 11 |
| Oswego Kanal von Three Rivers (Zusammenfluß von Seneca, Oneida u. Oswego) nach Oswego am Ontariosee | 38 | 7 |
| Die Cayuga- u. Seneca-Kanäle | 149 | 4 |

Wirtschaft und Verkehr

Bild 5: Der St. Mary's River.

Links Sault Ste. Marie/Michigan, rechts am Bildrand die gleichnamige Stadt in Ontario.

Die vier us.-amerikanischen Schleusen in der Bildmitte (links) von Osten gegen Westen gesehen. Oben links zweigt ein Kraftwerkskanal ab. In der Bildmitte das us.-amerikanische Kraftwerk mit breitem Zuleitungskanal; rechts daneben die St. Mary's Falls mit der Insel; am rechten Bildrand oben die kanadische Schleuse und der Kraftwerkskanal der Abitibi Power und Paper Co. Rechts oben im Hintergrund die Algoma Steel Company.

(Nach einer käuflichen Aufnahme)

Bild 6: Ein Erzfrachter aus Duluth verläßt die Mac-Arthur-Schleuse in Sault Ste. Marie/Michigan in Richtung Osten

Auf der anderen Seite des hier verhältnismäßig schmalen St. Mary's River die kanadische Stadt.

(Aufnahme R. Keller, August 1957)

Bild 7: Teilansicht aus der langen Reihe der Getreideelevatoren in Port Arthur/Ontario.

Anlieferung aus dem Westen durch die Eisenbahn. Neben den Getreideelevatoren ist ein großes Erzverladedock (im Bild nicht sichtbar).

(Aufnahme R. Keller, Sept. 1957)

Bild 8: Der Chicago River, die Schifffahrtsverbindung zwischen den Großen Seen und dem Mississippi.

Kilometerweit begleiten im zentralen Stadtgebiet von Chicago die Laderampen der Industriewerke und Handelshäuser den von zahllosen Brücken überquerten Fluß, der neben der verkehrswirtschaftlichen Aufgabe abseits vom engeren Stadtgebiet auch der Abwasserwirtschaft der Stadt dient.

(Aufnahme R. Keller, Juli 1957)

Bild 9: Im kanadischen Waldland am Nipigonsee, wo keine Landwirtschaft, aber Holzwirtschaft und in Zukunft vielleicht auch Bergwirtschaft (Kupfer, Uran, u. a.) betrieben werden kann, werden die reichen und durch Zuleitungen aus dem Einzugsbereich der Hudson Bay vermehrten Wasserkräfte in mehreren Kraftwerken genutzt.

Im Bild: Ausbau der Cameroun Falls nördlich Nipigon. Für die Flößerei werden bei allen diesen Kraftwerken und Staudämmen Überläufe eingebaut. In Verbindung mit dem Kraftwerk wurde eine neue Siedlung angelegt.

(Aufnahme R. Keller, Sept. 1957)

Bild 10: Der Detroit River, von Detroit gegen Windsor/Ontario gesehen.

Unter dem schmalen Detroit River verbindet ein Tunnel die beiden Städte miteinander.

(Aufnahme R. Keller, August 1957)

Während die New York Canals die Wasserspiegel des Erie- und Ontariosees nicht merklich beeinflussen, ist die größere Seewasserableitung über den Chicago River und die angeschlossenen Kanäle für die Wasserspiegel des Michigan- und Huronsees und die Abflußmengen der Seen bedeutender.

Der 1836 begonnene und 1848 fertiggestellte Illinois-Michigan Canal diente zunächst nur der Schifffahrt. Aus dem Chicago River wurde das Wasser in den Kanal gepumpt. Indessen rückte



5



6



7



8



9



10

aber mehr und mehr eine andere wasserwirtschaftliche Überlegung in den Vordergrund: Mit dem unaufhaltsamen Wachstum von Chicago stellt sich das Problem der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung ein. Für die Wasserversorgung sind die Großen Seen von den verschiedensten Städten herangezogen worden, so auch in Chicago. Die Abwasserlast übertrug man nun zunächst dem Chicago River, der bald zu einem gesundheitsgefährdenden Fluß wurde. Die Lösung des Problems bot sich mit der Überleitung zum Mississippibecken an. So wurde an Stelle des alten Schifffahrtskanals 1902 bis 1910 der „Chicago Sanitary and Ship Canal“ fertiggestellt, wobei ein

Teilstück des alten Kanals aufgegeben wurde. Schleusen, die 1922 bzw. 1938 erbaut wurden, regeln an der Mündung des Chicago River und an der Einmündung des Calumet-Sag-Kanals bei Blue Island, Ill. die Zuflüsse. Der Wasserspiegel des Chicago River liegt heute in der Regel unter dem Seespiegel. An drei Stellen im Raume Chicago wird aus dem Michigansee Wasser in dieses Kanalsystem und damit zum Mississippi geleitet: einmal über den 1910 erstellten North-Shore-Kanal, der bei Wilmette im Norden von Chicago vom See abzweigt, dann über den Chicago River und schließlich über die Mündung des Calumet River im S. von Chicago.



Abb. 1: Das Einzugsgebiet der Großen Seen

1. Wasserüberleitung aus dem Ogoki River (Albany R./Hudson Bay) zum Nipigon See und Lake Superior (~ 3700 cfs = 105 m³/s);
2. Wasserüberleitung aus dem Long Lake (Kenogami River/Hudson Bay) (~ 1300 cfs = 40 m³/s);
3. Schleusen und Kraftwerke am St. Marys River bei Sault Ste. Marie;
4. Wasserableitung zum Mississippi über den Chicago Sanitary and Ship Canal (~ 3200 cfs = 90 m³/s, maximal $10\,000$ cfs = 283 m³/s);
5. Ableitung zum Welland Canal mit Schleusen und Kraftwerken;
6. Ableitung zu den New York Canals und den us.-amerikanischen Kraftwerken an den Niagarafällen;
7. Kanadischer Kraftwerkskanal (Niagarafälle);
8. Gut-Damm bei Ogdensburg. „Anfang“ des St.-Lorenz-Stromes

Im Zusammenhang mit dieser Fremdwasserzufuhr zum Mississippi wird auch der günstige Einfluß auf die Mississippi-Schifffahrt in Niedrigwasserzeiten diskutiert. Man würde gerne das Mississippi-Niedrigwasser stärker erhöhen durch Ableitungen aus den Großen Seen, aber das wirft weitere Probleme auf.

Die von dem alten Illinois-Michigan Canal abgeleiteten Wassermengen waren mit kaum 1000 cfs (Kubikfuß pro Sekunde) nicht besorgniserregend (vgl. Anmerkung zu Abb. 5). Im Jahre 1928 wurden aber bei Chicago im Durchschnitt $10\,000$ cfs abgeleitet. Im Januar 1957 waren es 9100 cfs und im Durchschnitt der letzten Jahre 3100 bis 3500 cfs¹⁾ (nach Unterlagen des Sanitary District of Chicago).

Durch die alte Abflußrinne bei Toledo führt heute kein leistungsfähiger Schifffahrtsweg (nach Great Lakes Pilot 1956), wenn auch ein Kanal den bei Toledo mündenden Mumee mit dem zum Ohio fließenden Miami River verbindet.

Die beiden alten Abflußrinnen, die auf kanadischem Gebiet aus dem Huronsee herausführen, werden nicht als größere Wasserstraßen genutzt. Aus dem Südtteil der Georgian Bay führt von Port Severn der Trent-Kanal über den Simcoesee zum Ontariosee. Er ist größtenteils nur für kleine Schiffe mit $1,80$ m Tiefgang und 20 m Länge benutzbar. Dieser Kanal besteht eigentlich nur aus einer Serie schiffbarer Seen und Flußstrecken, welche durch

¹⁾ 1 cfs = $28,3$ Liter/sec = 2450 m³ pro Tag.

kurze künstliche Wasserstraßen und mehr als 40 Schleusen verbunden sind. In der nördlichen alten Talung über den Nipissingsee zum Ottawa River besteht überhaupt keine Schiffsverbindung.

Der Wasserhaushalt der Großen Seen

Das Einzugsgebiet

Die Großen Seen sind durch natürliche Wasserscheiden sehr gut abgegrenzt. Nur an wenigen Stellen, die im vorangehenden Abschnitt genannt sind, wird Wasser in andere Flußgebiete geleitet. Diese Wasserübergänge sind durch die spät- und nacheiszeitlichen Ausflüsse bereits vorgezeichnet und aus neuzeitlichen wasserwirtschaftlichen Interessen wieder ausgenutzt worden. Die Höhe der Wasserleitungen ist bekannt, so daß dadurch die Ermittlung der Wasserbilanz der Seen nicht gestört wird.

Seit 1940 bzw. 1943 werden dem Lake Superior Fremdwasser aus anderen Flußgebieten zugeleitet. Diese künstlichen Zuleitungen aus anderen Flußgebieten und Wasserleitungen in andere Flußgebiete haben das Einzugsgebiet der Großen Seen verändert. Die Wasserspiegelhöhen und Abflüßmengen werden insbesondere durch 5000 cfs beeinflusst, die dem Oberen See über den Nipigonsee aus dem Flußgebiet des Albany River zugeleitet werden. Der Albany River entwässert natürlicherweise zur Hudson Bay (Abb. 2). Mit dieser Fremdwasserzufuhr, die in erster Linie der Erzeugung von Hydroelektrizität im kanadischen Waldland dient, wird gleichzeitig die Reduktion der Wasserspiegel in den mittleren und unteren Seen ausgeglichen, welche durch die Ableitung aus dem Michigansee über den „Illinois Waterway“ oder „Chicago Sanitary Ship Canal“ hervorgerufen wird. Die Wasserableitung ist auf 3200 cfs gesetzlich beschränkt, d. i. eine Menge, die kaum ausreicht, den wachsenden Anforderungen (gesteigerte Trinkwasserentnahme und gesteigerter Abwasseranfall, bessere Schiffsverbindung zum Mississippi-Becken) zu genügen. Es wird daher erwogen, mehr Wasser aus dem Michigansee abzuleiten; aber das kann nur in Übereinstimmung mit Kanada geschehen, denn obwohl der Michigansee als einziger der Großen Seen ganz zu den USA gehört, gibt ein Vertrag von 1909 Ontario das Recht mitzusprechen, denn „der Michigansee ist ein fester Bestandteil im System der Großen Seen und . . . jede Veränderung der natürlichen Abflußverhältnisse bedarf einer vertraglichen Regelung“ mit dem Nachbarland.

Zur Zeit ist die Vergrößerung der zum Illinois Waterway abzuleitenden Wassermengen wieder in der Diskussion zwischen Kanada und den USA.

Das Einzugsgebiet der Großen Seen wird gegen den St.-Lorenz-Strom durch den Pegel Ogdensburg, der zwischen den „Thousand Islands“ und den

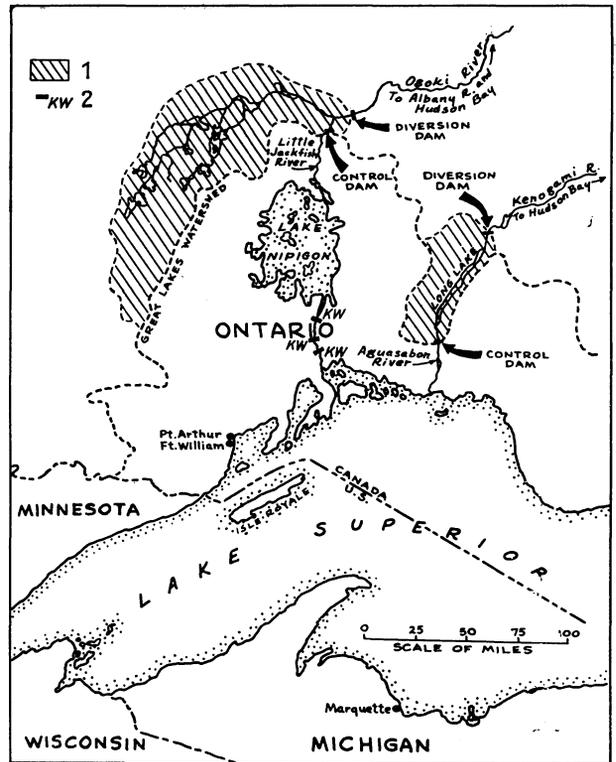


Abb 2: Die Wasserüberleitungen aus dem Gebiet der Hudson Bay

(nach „The Great Lakes News Letter“ Vol. I, 8, 1957.)

1. Gebiete, die natürlicherweise zur Hudson Bay entwässern, deren Wasser aber künstlich zum Lake Superior umgeleitet wird; 2. Die Wasserkraftwerke am Nipigon River.

„International Rapids“ liegt, begrenzt. Das Verhältnis von Land- und Seeflächen ist im Einzugsgebiet der Seen bemerkenswert.

Die Wasserflächen der fünf großen Seen und des dazwischen liegenden St.-Clair-Sees umfassen 32,2% (= 246 481 km²) des gesamten Niederschlagsgebietes bis zum Pegel Ogdensburg. Der tatsächliche Anteil der Wasserflächen am Niederschlagsgebiet dürfte bei etwa 45% liegen, denn der Nipigonsee (4350 km²), Simcoe- und Nipissingsee östlich der Georgian Bay und die Flächen der vielen tausend durch die diluviale Eisbedeckung entstandenen Seen sind in den 32,2% Wasserflächen noch nicht eingeschlossen. Mc. NAMEE (1930) gibt an, daß z. B. auf der großen Halbinsel Lower Michigan zwischen Huron- und Michigansee 11,6% des Gesamtareals Seen und Teiche sind. (Im Einzugsgebiet des Bodensees einschl. Seebecken sind demgegenüber nur 4,9% Seeflächen).

Es ist selbstverständlich, daß bei diesem prozentualen Anteil der Wasseroberflächen die Hoch- und Niedrigwasserabflüsse der Seegebiete keine großen Unterschiede aufweisen.

Die Wasserscheiden sind im Bereich der Großen Seen nirgendwo weiter als 170 km von einem der

Seen entfernt und in manchen Fällen (Chicago, Erie, Duluth) nur 5 bis 15 km.

Die einzelnen Seen, deren Wasserspiegel auf verschiedenen Niveaus liegen, sind durch „Rivers“ miteinander verbunden. Diese teilweise verhältnismäßig engen River ermöglichen es, die Abflüsse aus den Seen zu bestimmen. Nur die Becken von Huron- und Michigansee sind nicht durch einen River wie in früheren Zeiten verbunden. Die Mackinac-Straße war lange Zeit ein Hindernis im Verkehr von der Michiganhalbinsel nach Nordmichigan. Erst 1958 wurde eine Brücke über die Straße von Mackinac fertiggestellt*). Die Strömungen in der Mackinac-Straße sind mitunter sehr stark. Der Abfluß aus dem Michigansee wird von MENEFFEE mit 47 000 cfs bei Mittelwasser angegeben. Jedoch sind die Abflußwerte in der an der schmalsten Stelle 3300 m breiten Mackinac-

Die Seespiegel schwanken von Jahr zu Jahr und Monat zu Monat. Dabei bestimmen Regen- und Schneefall, Zufluß, Abfluß und Verdunstung das Ausmaß der Schwankungen. Die Gezeiten der Meere beeinflussen die Großen Seen natürlich nicht, aber es werden doch Seespiegelschwankungen mit Amplituden von Stunden und Tagen beobachtet, welche gezeitenähnlich sind. Die durch tellurische Kräfte erzeugten Schwankungen können Beträge von wenigen Inches bis zu mehreren Fuß erreichen. Solche Fluktuationen von unregelmäßiger Dauer und Größe werden durch Windströmungen oder auch durch Luftdruckgradienten über den Seeflächen veranlaßt.

Im Jahresgang ist bei allen Seen der Wasserspiegel in den Wintermonaten am tiefsten und im Sommer am höchsten. Dabei verlagert sich das Minimum vom Spätwinter, d. h. vom März am

Tabelle 2 :

Die Wasserstände in den Großen Seen 1860–1956

| | Monatsmittel des Wasserstandes | | | | Mittlere Wasserspiegelhöhe in m 1860–1956 |
|----------------------|--------------------------------|-------------|------------------|---------------|--|
| | höchstes m | Datum | niedrigstes m | Datum | |
| Oberer See | 184,12 | August 1876 | 182,87 | April 1926 | 183,55 |
| Michigan-Huron | 177,91 | Juni 1886 | 175,98 | Februar 1926 | 176,97 |
| St. Clair*) | 176,03 | Juli 1952 | 174,25 | Januar 1938 | 175,23 |
| Erie | 175,17 | Mai 1952 | 173,56 | Februar 1936 | 174,46 |
| Ontario | 75,98 | Juni 1952 | 73,97 | November 1934 | 75,00 |

*) Beobachtungen erst seit 1898.

Straße nicht einwandfrei zu bestimmen. Beide Seen haben einen einheitlichen Seespiegel; sie werden daher als hydrologische Einheit im Folgenden zusammengefaßt.

Demgegenüber haben der St. Marys River, St. Clair River, Detroit River und Niagara River Mindestbreiten zwischen 100 und 600 Meter mit Strömungsverhältnissen, die eine genauere Abflußmengenbestimmung zulassen.

Die Wasserspiegelschwankungen

Der einleitend skizzierten jungen spät- und postglazialen Umgestaltung der Seebecken und ihrer im Laufe der Jahrtausende wechselnden Entwässerung entsprechend, haben die einzelnen Seen verschiedene Wasserspiegelhöhen und Tiefen.

Die Wasserspiegelhöhen werden an den Großen Seen seit 1835 beobachtet. Dieser Darstellung liegen die Beobachtungen von 1860–1956 einschließlich zugrunde, weil auch seit 1860 die Abflußmengen bestimmt wurden.

*) Länge der Suspension Bridge = 2 625 m, Höhe 153 m, Länge der Brücke mit Auffahrten 8 km.

Lake Superior auf den Februar an den mittleren Seen und den Januar am Ontariosee. Die Höchststände der Seespiegel verlagern sich dementsprechend vom September am Oberen See auf den Juli beim Michigan- und Huronsee; am Erie- und Ontariosee hat der Juni das höchste Monatsmittel des Wasserstandes. Die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Monatsmittel des Wasserstandes ist mit 1,25 m am Lake Superior am geringsten und mit 2,01 m am Ontariosee am größten. Die mittlere Jahresschwankung des Wasserstandes, d. i. das höchste langjährige Monatsmittel minus dem tiefsten Monatsmittel (März—September) beträgt am Oberen See etwa 37 cm, am Michigansee (aus Februar minus Juli) 34 cm.

Seit 1922 werden die Wasserstände des Oberen Sees beeinflußt durch die Bauwerke an den Stromschnellen des St. Marys River bei Sault Ste. Marie — neuerdings oft „Soo“ genannt. Nach einem Vorschlag der International Joint Commission sollte der Wasserstand des Lake Superior möglichst zwischen 183,52 und 183,98 m gehalten

werden. Die Abflußkontrolle soll außerdem so gehandhabt werden, daß der St. Marys River unterhalb der Schleusen von Sault Ste Marie die Spiegelhöhe von 178,16 m nicht überschreitet. In der Zeit nach 1922, in welcher der Seeabfluß reguliert ist, betrug die absolute Schwankung der Monatsmittel der Wasserstände 1,11 m.

Der beschriebene Jahresgang der Seespiegelstände ist für die Schifffahrt günstig, die in den Wintermonaten infolge der Eisverhältnisse in den Häfen ohnedies eingestellt ist (s. Tab. 12).

Die monatlichen Abflußmengen zeigen einen ähnlichen Jahresgang wie die mittleren Wasserstände, wobei allerdings gewisse Divergenzen beobachtet werden: es entspricht einem bestimmten Monatsmittel des Wasserstandes nicht eine bestimmte mittlere monatliche Abflußmenge.

Ich bin dem Great Lake Survey, U. S. Army, Corps of Engineers in Detroit für das große Entgegenkommen in der Bereitstellung der Unterlagen zu besonderem Dank verpflichtet. Ich konnte aus dem dortigen Archiv die Monatsmittel der Wasserstände und Abflußmengen für jeden See und für jeden einzelnen Monat seit 1860 entnehmen, ferner die zugehörigen Niederschlagswerte. Weitere Klimadaten überließen mir das U. S. Weather Bureau in Washington und die Wetterdienstzentrale von Ontario in Toronto. Ich kann hier nicht die zahlreichen Freunde und Kollegen in Chicago, Toronto, Nipigon, Fort William usw. nennen, die meine Arbeiten bereitwilligst förderten, möchte aber doch Prof. EARNEST BOYCE, Chairman of the Department of Civil Engineering an der University of Michigan in Ann

damit notfalls die ursprünglichen Feet und Inches-Werte rekonstruiert werden können.

Die Abflußzahlen sind auf wahre Monatslänge umgerechnet worden, um sie mit dem Niederschlag vergleichen zu können. Bei den an sich in Seegebieten mit großem Rückhalte- und Ausgleichsvermögen geringen Schwankungen machen sich die unterschiedlichen Monatslängen in den Abflußzahlen schon bemerkbar.

Bei den umfangreichen Rechenarbeiten stand mir wieder als zuverlässige Hilfe meine Frau, Dr. MARGARETA KELLER-HAFFENNEGGER, zur Seite.

Die Niederschlagsmessungen über den Landflächen reichen in einigen Reihen im Seegebiet bis 1860 und 1870 zurück, aber die Niederschläge über den Seeflächen wurden erst seit 1900 ermittelt.

In der Bestimmung des über den Seeflächen fallenden Niederschlags dürfte der größte Fehler der hydrologischen Berechnungen liegen und der Great Lake Survey möchte neuerdings versuchen, die über den Seeflächen fallenden Niederschläge mit Radargeräten zu erfassen. Bisher wird der Niederschlag auf die Seeflächen über Küsten- und Inselstationen interpoliert (vgl. die Anmerkung zur Abb. 7 betr. Niederschlag am Oberen See).

Die Temperaturverhältnisse

Die unterschiedlichen Klimate im Bereich der einzelnen Seen variieren die hydrologischen Daten (Tab. 5). Der Obere See hat mit einem Jahresmittel

Tabelle 3 :

Die mittleren monatlichen Temperaturen des Oberflächenwassers der Großen Seen in Grad Celsius, Werte nach Angaben des U.S. Lake Survey Detroit für den Zeitraum 1904–1943 und in (...) nach G. Millar, 1952

| | Superior | Michigan | Huron | St. Clair | Erie | Ontario |
|---------------------|-------------|-------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| Januar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 (2,7) |
| Februar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 (1,7) |
| März | 0 | 1,1 | 0,6 | 2,2 | 2,8 | 2,2 (1,7) |
| April | 1,1 | 4,4 | 3,3 | 5,5 | 5,5 | 5,0 (2,7) |
| Mai | 2,8 (1,7) | 6,7 (5,0) | 6,1 (3,9*) | 11,1 | 9,4 (10,0) | 8,9 (5,5) |
| Juni | 4,4 (3,9) | 12,2 (10,5) | 12,2 (8,9) | 16,7 | 18,3 (17,2) | 15,6 (12,2) |
| Juli | 7,8 (6,7) | 17,2 (16,1) | 17,8 (17,8) | 21,1 | 22,2 (21,1) | 18,3 (19,5) |
| August | 12,2 (12,8) | 18,3 (20,6) | 18,9 (20,0) | 22,2 | 22,2 (22,8) | 19,5 (20,6) |
| September | 11,1 (12,2) | 15,6 (18,3) | 16,7 (16,1) | 20,0 | 20,6 (19,5) | 17,2 (18,4) |
| Oktober | 8,3 (8,9) | 11,1 (12,2) | 12,2 (12,2) | 13,3 | 15,5 (16,1) | 13,3 (12,6) |
| November | 5,0 (5,5) | 6,7 (7,8) | 6,7 (6,1) | 5,5 | 6,7 (9,4) | 6,7 (7,3) |
| Dezember | 1,1 | 2,2 | 2,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |

*) alle Werte in (...) beziehen sich auf die Georgian Bay.

Arbor und den Direktor am Great Lakes Research Institute Herrn Dr. G. BALLERT, an der gleichen Universät, erwähnen.

Aus den in Inches und Kubikfuß pro Sekunde (cfs) gegebenen Originalwerten wurden die langjährigen Mittelwerte u. a. gebildet und in mm und andere entsprechende deutsche Maßsysteme umgerechnet. So ergaben sich auch die gelegentlich hier aufgeführten Stellen hinter dem Komma, die eine Genauigkeit auf 1 Dezimale vortäuschen. Obwohl diese Genauigkeit bei hydrologischen Arbeiten nicht zu erreichen ist, wurden die Zahlen nicht auf- oder abgerundet,

der Temperatur des Oberflächenwassers von nur 4,5°C weitaus das kühlfte Wasser (1904–1943) — er ist auch der tiefste der Großen Seen —, während der um fast 10 Breitengrade südlicher gelegene Eriesee eine mittlere Temperatur des Oberflächenwassers von 12,4°C hat. Die entsprechenden Temperaturen sind für den Michigansee 8°, den Huronsee 8,1°, den St.-Clair-See 9,9° und für den Ontariosee 9,0°C. Der kühlfte See hat mit

430 mm auch die geringste jährliche Verdunstung (auf das Einzugsgebiet des Lake Superior bezogen) und der relativ warme Eriesee mit 622 mm die größte Jahresverdunstung.

Die hohen Verdunstungs- und Temperaturwerte gehen teilweise auf die geringere Tiefe des Eriesees zurück. Dieser See erreicht als der flachste See am frühesten das Temperaturmaximum. Die Tiefenverhältnisse und die Wärmebilanz der Seen sind nicht nur für den Wasserhaushalt von Bedeutung, sondern auch für das Leben in den Seen. Der Eriesee ist somit auch das ergiebigste Fischereigebiet. Von dem Gesamtfang der Großen Seen entfielen auf die einzelnen Seen (nach ANDERSON, A. W. und POWER, E. A. aus F. BARTZ [1953]) im Jahre 1947 auf den Eriesee 36,7%, den Michigansee 28,5%, den Oberen See 20,3%, den Huronsee 11,5% und den Ontariosee 3,0%. F. BARTZ stellt in diesem Zusammenhang die Unterschiede in der Fischereiwirtschaft der einzelnen Seen heraus.

F. G. MILLAR (1952) studierte mehrere horizontale Temperaturprofile entlang der Schifffahrtslinien durch die Seen. Grundlage seiner Untersuchung waren Thermographenaufzeichnungen, die 5—10 Jahre lang, vorwiegend in den Jahren 1934—1946 regelmäßig auf verschiedenen Dampfschiffen gemacht wurden. Es zeigt sich dabei natürlich, daß die in den vorstehenden Tabellen mitgeteilten monatlichen Durchschnittswerte der einzelnen Seen nicht die rechte Vorstellung von der wirklichen Temperaturverteilung geben. Im Januar sind die Küstengewässer des Ontariosees mit +1 bis +1,8°C kühler als das Wasser der Seemitte, welches eine Oberflächentemperatur von +4 bis +4,3°C besitzt. Die Küstenwassertemperatur ändert sich bis zum März, d. i. der Monat, in dem der See den geringsten Wärmeinhalt hat, nicht mehr; dagegen kühlt sich die Seemitte nun ebenfalls bis auf etwa 1,5°C ab.

Im August ist der Wärmeinhalt aller Seen am größten und die Küstengewässer sind wärmer als die Wasser der Seemitte. Im Lake Superior erreichen die Küstengewässer Temperaturen von 15 bis 16°C, während die küstenfernen Teile nicht über +10°C hinauskommen. Im Sommer setzt sich der Einfluß der geographischen Breitenlage stärker als im Winter durch, weil im Winter die Kontinentalität die Breitenlage überdeckt. Das wärmste Seewasser ist nach den Aufzeichnungen von MILLAR in der westlichen Hälfte des Eriesees, wo im August eine mittlere Temperatur des Oberflächenwassers von 23 bis 23,5°C berechnet wurde; zum Niagara hin wird das Seewasser an der Oberfläche kühler. Im Michigansee verlaufen die August-Isothermen vorwiegend von Westen nach Osten; das wärmste Wasser (22,2 bis 23°C) ist im Süden und das kühlfte im Gebiet des nörd-

lichen Seebeckens mit Temperaturen von nur 18 bis 19°C. Die Küstengewässer sind auch hier überall gegenüber der Seemitte wärmer.

Die Verteilung der Wassertemperatur wird, wie die Karten von MILLAR und noch besser die detaillierte Studie über Strömungen und Wassermassen im Huronsee von J. C. AYERS, D. V. ANDERSON, D. C. CHANDLER und G. H. LAUFF (1956) zeigen, von den Strömungen in den Seen und den Zuflüssen der oberhalb liegenden Seen stark beeinflusst. In der letztgenannten Darstellung über den Huronsee sind mehrere vertikale Temperaturprofile wiedergegeben.

Der Gang der Erwärmung und Abkühlung des Oberflächenwassers ist in den einzelnen Seen sehr unterschiedlich, und da gerade die Temperatur des Oberflächenwassers auf die Verdunstungsgröße Einfluß nimmt, sei auf den Temperaturgang kurz hingewiesen: In allen Seen werden im November die Temperaturen des Dichtemaximums beobachtet (etwa +4°C je nach chemischer Konzentration). In dieser Zeit dürfte bei allen Seen die stärkste vertikale Zirkulation stattfinden; bei den flacheren Seen ist mit Vollzirkulation zu rechnen, ob auch bei den größeren Tiefen, ist mir bisher auf Grund der Literatur nicht bekannt geworden. Kurze Zeit später findet sich bereits an der Oberfläche das leichtere kalte Wasser, d. h., der vertikale Wasseraustausch reicht nur noch bis in geringe Tiefen. Dabei breitet sich von den Küsten her eine Eisdecke aus. In der Seemitte ist der vertikale Wasseraustausch aber immer noch so stark, daß ein vollständiges Zufrieren selbst beim Oberen See selten ist.

Die zweite Periode des vertikalen Wasseraustausches liegt beim St. Clair- und Eriesee im Frühjahr, beim Ontariosee ist sie etwas verzögert. Im Michigansee und Huronsee wird die Temperatur von +4°C im April—Mai überschritten und im Lake Superior sogar erst im Juni. Genaue ließen sich die Zirkulations- und Stagnationsperioden bei Kenntnis der vertikalen Temperaturprofile untersuchen.

Die Wassertemperatur der Seen beeinflusst nicht nur die Verdunstungshöhe, sondern in Verbindung mit der Lufttemperatur auch die Niederschlagshöhe.

Die Wasserbilanz der einzelnen Seegebiete

Für die einzelnen Seebecken sind die mittleren Niederschlags-, Abfluß- und Verdunstungshöhen in Tabelle 5 gegeben (in mm). Alle Werte sind für den 57jährigen Zeitraum 1900 bis 1956 berechnet worden. Da Michigan- und Huronsee nicht durch einen River getrennt sind, müssen sie in der Bilanz als eine Einheit angesehen werden.

Die Bezugspunkte für die Teilgebiete und die Orte der Abflußbestimmungen sind: für den Lake Superior der St. Marys River oberhalb der St. Marys Falls bei Sault Ste. Marie; für die Mittelseen der St. Clair und Detroit River, für den Eriesee der Niagara oberhalb der Fälle, wobei auch die Wassermengen berücksichtigt sind, die in den Wellandkanal und zu den Kraftwerken abgeleitet werden. Bezugspunkt für die Abflußbestimmungen aus dem Ontariosee und für das Gesamtgebiet der Großen Seen ist der Pegel Ogdensburg.

Das an Stromschnellen, Inseln und seenartigen Erweiterungen reiche Gewässer unterhalb Ogdensburg wird als St.-Lorenz-Strom bezeichnet.

Der unterschiedlichen geographischen Lage der Seen und den verschiedenen morphologischen Gegebenheiten entsprechen auch die unterschiedlichen Verdunstungshöhen. Das kühle Waldklima im Be-

reich des Oberen Sees läßt im Mittel nur 429,8 mm Verdunstung pro Jahr zu, während der südlichste See, der Eriesee, dessen Gestade man den kanadischen Obstgarten oder das kanadische Kalifornien nennt, eine um fast 200 mm höhere Verdunstung aufweist. Für die Zukunft ergeben sich hier zwei Aufgaben:

Tabelle 4 :

Morphometrische Daten der Großen Seen Nordamerikas
(zusammengestellt und berechnet nach Great Lakes Pilot 1956)

| See | | Seefläche | | Niederschlagsgebiete | | Tiefe | |
|-----------|--------|-----------------|---|---|---|-------------|---------------|
| | | km ² | in % des Niederschlagsgebietes (Teilgebietes) | Teilgebiete der einzelnen Seen in km ² | Gesamtgebiet einschließlich der Oberlieger in km ² | größte in m | mittlere in m |
| Superior | (2)*) | 82 414 | 39,8 | 207 200 | 207 200 | 397 | 148 |
| Huron | (5) | 59 586 | 31,7 | 188 086 | | 229 | 60 |
| Michigan | (6) | 58 016 | 33,0 | 175 757 | 571 043 | 281 | 84 |
| St. Clair | | 1 269 | 6,6 | 19 244 | 590 287 | 6,5 | 3 |
| Erie | (12) | 25 719 | 30,6 | 84 149**) | 674 436 | 64 | 18 |
| Ontario | (14) | 19 477 | 21,6 | 90 132***) | 764 568 | 237 | 80 |

*) Die Ziffern in () hinter den Seenamen geben an, an welcher Stelle die Seen unter den nach der Fläche größten Seen der Erde stehen, z. B. (2) = zweitgrößter See der Erde.

***) Einschließlich Niagara River oberhalb der Fälle.

****) Einschließlich Niagara River unterhalb der Fälle und St.-Lorenz-Strom bis Ogdensburg.

Unter „Teilgebiet“ ist zu verstehen das Niederschlagsgebiet des Michigansees bis zur Straße von Mackinac, das Niederschlagsgebiet des Lake Superior bis zu den Stromschnellen von Sault Ste. Marie (in diesem Falle ist Teilgebiet = Gesamtniederschlagsgebiet), das Teilgebiet des Huronsees umfaßt nur das Gebiet zwischen der Mackinacstraße und den Schleusen von Sault Ste. Marie einerseits sowie dem St. Clair River andererseits.

Tabelle 5 :

Die mittleren jährlichen Niederschlags-, Abfluß- und Verdunstungshöhen 1900–1956 für die Großen Seen Nordamerikas

(Berechnet nach Unterlagen des U.S. Army Lake Survey Detroit 1957)

| See | Niederschlag | | Abfluß | | Verdunstung | |
|-----------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|
| | im Teilgebiet mm | im Gesamt-niederschlagsgebiet mm | im Teilgebiet mm | im Gesamt-niederschlagsgebiet mm | im Teilgebiet mm | im Gesamt-niederschlagsgebiet mm |
| Superior | 746 | 746 | 316 | 316 | 430 | 430 |
| Huron | } 790 | } 775 | } 244 | } 269 | } 546 | } 506 |
| Michigan | | | | | | |
| St. Clair | | | | | | |
| Erie | 860 | 785 | 238 | 266 | 622 | 519 |
| Ontario | 871 | 796 | 337 | 274 | 534 | 522 |

Die Abflußhöhen für den Ontariosee wurden errechnet aus dem Abfluß bei Ogdensburg minus Abfluß am Niagara; für den Eriesee entsprechend Abfluß Niagara minus Abfluß Detroit und St. Clair River. Die Abflüsse Detroit und St. Clair River werden als gleichwertig angesehen. Für die mittleren Seen wurde die Abflußdifferenz zwischen Detroit River und dem St. Marys River eingesetzt. Für die gleichen Gebiete wurden die Niederschläge berechnet. Die Abflußverlusthöhe $V = N - A$ kann hier der Verdunstungshöhe gleichgesetzt werden, weil der angegebene Zeitraum so lang ist, daß Rücklage und Verbrauch keine Rolle spielen.

1. Die genannten Verdunstungshöhen, die sich bis heute trotz aller geophysikalischen und meteorologischen Versuche noch immer am sichersten aus der Wasserbilanz ermitteln lassen, müssen zu den klimatischen Gegebenheiten in Beziehung gesetzt werden (Niederschlagsregime, Temperatur des Sommers und des Winters, Wassertemperatur, Wind u. dgl.).
2. Die Verdunstung von den Seeflächen, die nicht minder schwer zu erfassen ist als die Landesverdunstung, kann aus der Differenz Gesamtbilanz minus Bilanz der Landflächen im Gebiet der Großen Seen besser ermittelt werden als an anderer Stelle. Denn einerseits machen die Landflächen im Vergleich zu anderen Seen nur einen sehr kleinen Teil aus und andererseits besitzen die Seen die größte zusammenhängende Süßwasserfläche der Erde.

Da die Verdunstung von freien Wasserflächen neben der geographischen Lage und morphologischen Gestalt des Sees sehr von der Größe der Wasserfläche beeinflusst wird, kommt der Feststellung der Verdunstung der größten vorhandenen Süßwasserflächen besondere Bedeutung zu.

In einem kurzen Bericht des U. S. Army Engineers District, Corps of Engineers, Lake Survey Detroit, Mich., den Major HUNT auf dem Internationalen Kongreß für Geophysik und Geodäsie in Toronto im September 1957 vorlegte, wurde versucht, für den Ontariosee die Verdunstung zu berechnen, und zwar nur für die Wasserfläche (Zeitraum 1934—1952). Dazu wurde die folgende Gleichung verwendet

$$E = -\Delta S + RO + kP - (O-I).$$

Dabei bedeuten:

E = Evaporation,

ΔS = Seespiegeländerung von Monat zu Monat,

RO = in den See mündende Zuflüsse,

O — I = Abfluß St.-Lorenz-Strom minus Zufluß durch den Niagara River,

kP = berechneter Niederschlag über der Seefläche.

Danach verdunsten jährlich von der Seefläche 621,3 mm Wasser. Von diesem Wert sollen 335 mm, also mehr als 50 % der Jahresverdunstung, in den vier Monaten Oktober bis Januar einschließlich verdunsten, während in den Monaten Mai und Juni sogar eine negative Verdunstung von insgesamt 8 mm errechnet wird. Dieser ungewöhnliche negative Verdunstungswert wird mit starker Kondensation über der im Sommer relativ kühlen Wasseroberfläche erklärt (mündl. Mitteilung). Gemessen an mitteleuropäischen Verhältnissen ist der ganze berechnete Verdunstungsgang ungewöhnlich mit der maximalen Verdunstungshöhe im Oktober und dem Verdunstungsminimum im Juni. Möglicherweise erklärt sich dies daraus, daß zwischen der Seespiegeländerung und dem Abfluß kein eindeutiger Zusammenhang besteht.

Aber auch an anderer Stelle wird die überaus große winterliche Verdunstung der Wasserflächen der Großen Seen hervorgehoben (s. F. N. MENFEE, 1940, S. 39): „Der Lake Superior verliert durch Evaporation im Winter mehr Wasser als er durch Niederschlag auf seine Oberfläche und durch Zuflüsse erhält. Die Evaporation ist im Winter größer als im Sommer.“ Dieser Frage soll der folgende Abschnitt nachgehen.

Die monatlichen Verhältnisse von Niederschlag, Abfluß, und Seespiegeländerungen für die einzelnen Seegebiete und den Gesamtbereich der Großen Seen sind in Abb. 3 und 4 und Tabelle 6 dargestellt. In diesen Daten sind nicht nur die Wasserflächen, sondern auch wieder die zu den Seen entwässernden Landflächen einbezogen, so wie es die morphometrischen Daten der Tabelle 4 angeben.

Zunächst sei die methodische Seite der Diagramme etwas erläutert: Der Niederschlag und der Abfluß sind in Millimeter dargestellt und unmittelbar miteinander vergleichbar, da stets der Zeitraum 1900 bis 1956 zugrunde gelegt ist. Niederschlag und Abfluß sind für den 57jährigen Zeitraum für die Teilgebiete berechnet worden und nur im letzten der fünf Diagramme ist eine Zusammenfassung über alle Seen und deren Einzugsgebiete gegeben.

Der Unterschied zwischen den Jahressummen von Niederschlag und Abfluß (s. Tab. 5) ist die Verdunstungshöhe, aber für die einzelnen Monate entspricht diese Differenz nicht der Verdunstungsgröße, denn im Januar, Februar und März wird ein großer Teil des Niederschlags als Eis und Schnee gespeichert. Der auf das Land fallende Niederschlag bleibt besonders im Norden fast restlos als Schnee liegen und kommt erst im Frühjahr zum Abfluß; der auf die Wasserflächen fallende Niederschlag steht dem Abfluß sofort zur Verfügung, soweit er nicht auf die eisbedeckten küstennahen Flächen fällt. In Duluth erreicht die Eisdecke eine Mächtigkeit von etwa 70 cm, in den Häfen des Ontariosees sind dagegen 35 cm Eis schon das Maximum.

Die komplexen Bilanzverhältnisse zeigt ein Beispiel: Am Lake Superior fallen im Januar durchschnittlich 47,2 mm Niederschlag, davon gelangen unmittelbar auf die Seefläche 26,6 mm. Es fließen ab 24,3 mm. Die Differenz müßte eigentlich der Verdunstung zugeschrieben werden (= 2,3 mm). Es müßte aber auch das Wasser verdunsten, welches im Januar über die einmündenden Bäche in den See gelangt. Diese Rechnung wäre halbwegs annehmbar, wenn der Seespiegel sich nicht verändern würde. Der Seespiegel sinkt aber im Januar verhältnismäßig stark ab. Auf die Fläche des Niederschlagsgebietes umgerechnet (Land- + Wasserflächen) beträgt die Seespiegel-senkung 30,3 mm. Das heißt, daß außer dem Niederschlag auf die Seefläche und dem nicht gesondert erfaßten Zufluß²⁾ von den Landflächen

²⁾ M. PARDE (1948), teilt in einer Studie über den St. Lorenzstrom und seine Zuflüsse für mehrere Zuflüsse Niederschlags-, Abfluß- und Verdunstungshöhen mit, die aber nur grobe Näherungswerte (auf 50 mm geschätzt) sind. Die Darstellung behandelt vorwiegend den Jahresgang des Abflusses (Abfluskoeffizienten) und die Hoch- und Niedrigwasser der Flüsse im Gebiet der Großen Seen.

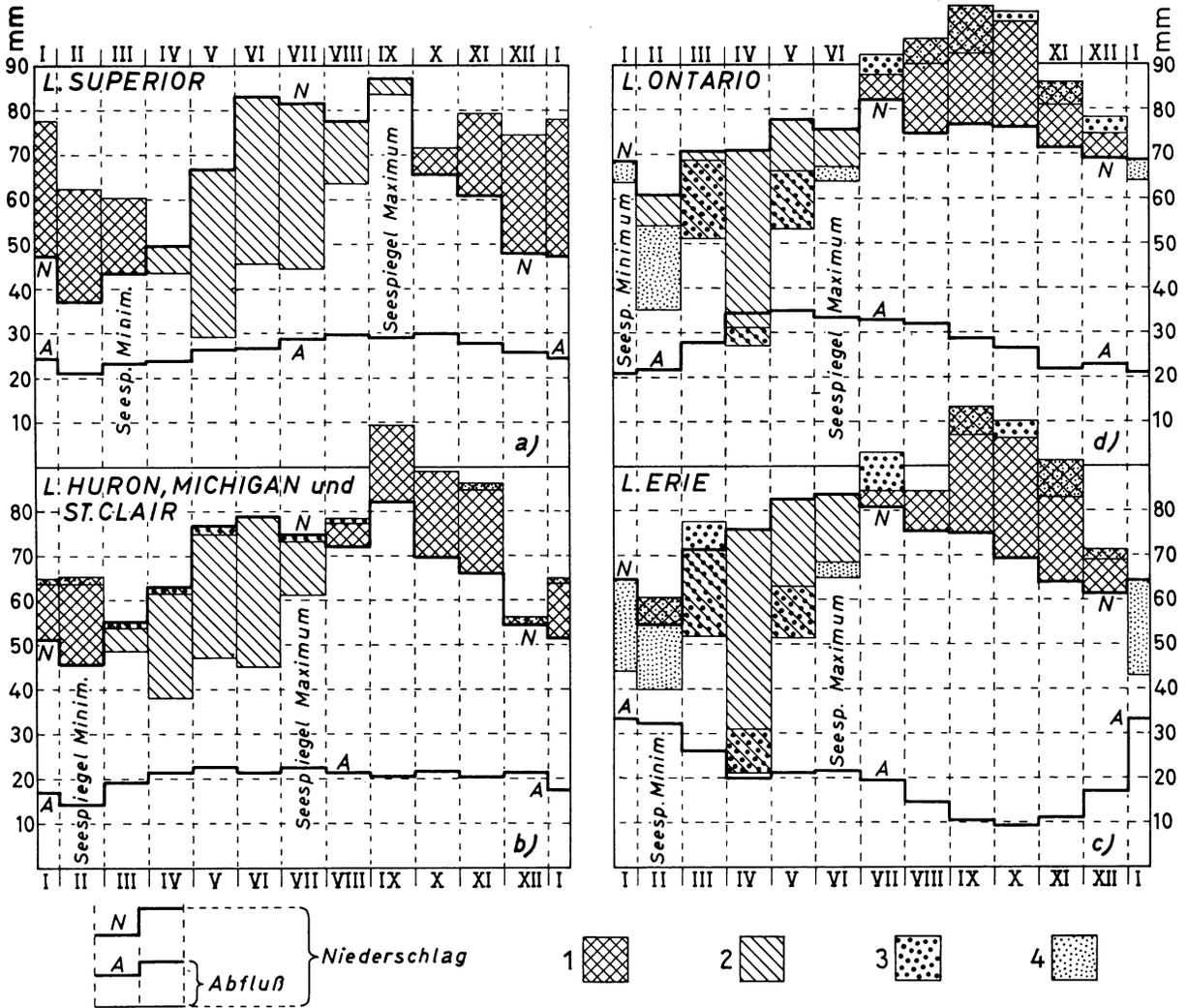


Abb. 3: Die Wasserbilanz der einzelnen Seegebiete 1900—1956. Monatliche Niederschlags- und Abflußhöhen, die Änderung der Seespiegelhöhen und Zuflüsse von den oberhalb gelegenen Seen

1. Senkung des Seespiegels gegenüber dem Vormonat. Sie entspricht einem Teil des Aufbrauchs von Wasserreserven; 2. Anstieg des Seespiegels. Der Anstieg entspricht einem Teil der Rücklage; 3. Zunahme der Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Seen; 4. Abnahme der Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Seen.

Anmerkung: Alle Werte sind dargestellt in mm Wasserhöhe, bezogen auf die Land- und Seeflächen der betreffenden Teilgebiete. Seespiegel-Minimum = Monat des tiefsten Wasserstandes. (Die Wasserstandshöhen können nicht aus dem Diagramm entnommen werden.)

Bei den Zuflußänderungen konnten nur die Abflußmengen des St. Marys River, Detroit River und Niagara River berücksichtigt werden, aber nicht die kleineren in die Seen einmündenden Flüsse. Dadurch kann die bei den Untersen im Frühjahr auftretende Divergenz von Zufluß-, Niederschlags- und Abflußänderung einerseits und der Seespiegeländerung andererseits teilweise erklärt werden.

(durch den Nipigon River, French River und vielen anderen) noch weitere 30,3 mm für den Abfluß und die Verdunstung zur Verfügung stehen. Es müßten also mindestens 30,3 mm + 26,6 mm — 24,3 mm = 32,6 mm im Einzugsgebiet des Lake Superior verdunsten. („Mindestens“, weil dazu noch die Zuflüsse vom Land kommen).

Der gesamte Niederschlag auf die Landflächen (= 20,6 mm) wäre Rücklage (Schnee, Eis). Die Schneedecken erreichen im Norden der Seen 2 m Mächtigkeit und im Nordosten des Oberen Sees 2,50 bis 3 m (nach MORLEY K. THOMAS, 1954).

Bei mitteleuropäischen Verhältnissen rechnet man nach K. FISCHER, W. FRIEDRICH u. a. im Ja-

nuar mit 1% der Jahresverdunstung; das wären am Lake Superior 4 mm. Auf der anderen Seite steht fest, daß am Lake Superior andere Gegebenheiten vorliegen als in Mitteleuropa: insbesondere beeinflussen die großen Anteile der Wasserflächen (vgl. Tab. 4) und das wintertrockene kontinentale Klima die Verdunstungshöhe.

Die oben an einem Beispiel durchgeführte Bilanzberechnung über die Seespiegeländerung, den Niederschlag auf die Wasserfläche und den Abfluß ist sicher nicht einwandfrei, denn zwischen den mittleren monatlichen Wasserständen und dem mittleren monatlichen Abfluß besteht kein fester Zusammenhang wie etwa in einer Abflußkurve mit dem Verhältnis von Wassermenge und Höhe des Wasserstandes. Daher muß die Ermittlung der monatlichen Rücklage bzw. des Aufbruches zurückgestellt werden, bis geeignete Voruntersuchungen gemacht sind.

In den Diagrammen der Abbildung 3 sind also die Niederschlags- und Abflußhöhen streng vergleichbar, während die eingetragenen Wasserstandsänderungen von Monat zu Monat nicht unbedingt mit den Abflußhöhen korreliert werden. Die Seespiegeländerungen von Monat zu Monat sind ebenfalls auf die Fläche der Einzugsgebiete der einzelnen Seen umgerechnet worden.

Zur Darstellungsweise ist noch zu bemerken, daß eine Senkung des Seespiegels einem zusätzlichen Wasserdargebot zum Niederschlag entspricht, daß aber ein Anstieg des Seespiegels eine Rücklage bezeichnet, die aus dem Niederschlag oder aus den Zuflüssen entstehen kann. Dementsprechend wurde in der Darstellung ein Anstieg des Seespiegels vom Niederschlag subtrahiert und ein Fallen des Seespiegels zum Niederschlag addiert und so bedeutet die obere ausgezogene Linie im Diagramm stets die Höhe des im jeweiligen Monat verfügbaren Wassers. Rücklagen und Aufbrauch auf den Landflächen konnten nicht eliminiert werden.

Der Jahresgang des Niederschlages stimmt bei den vier Seegebieten darin überein, daß das Minimum stets im Februar und das Maximum in den Monaten Juni bis September liegt. Der Lake Superior hat wie der Michigan- und Huronsee die Niederschlagsspitze im September. Am Eriesee liegt das Maximum im Mai-Juni und am Ontariosee im August. Die Juniregen können an den mittleren Seen und am Oberen See ein sekundäres Maximum erzeugen. Das Niederschlagsgebiet des Oberen Sees hat mit 746 mm die geringste Niederschlagspende. Von hier aus nehmen die Wassereinnahmen aus dem Niederschlag bis zum Ontariosee zu, der mit 871 mm die höchste Jahressumme erreicht. Das Ontariosee-Gebiet hat auch den ausgeglichensten Jahresgang des Niederschlages, denn der Monat der größten Nieder-

schlagssumme, der Juli, verzeichnet 81,8 mm und der niederschlagsärmste Monat, der Februar, verzeichnet 60,7 mm. Demgegenüber beträgt der Unterschied zwischen dem niederschlagsreichen September (86,9 mm) und dem Februar (37,1 mm) am Lake Superior 49,8 mm im Durchschnitt der Jahre 1900—1956.

Fast der gesamte Niederschlag fällt in den Monaten Dezember bis Februar als Schnee. Nach M. K. THOMAS (1953) fallen in den Wintermonaten Dezember bis Februar weniger als 1 Inch (25,4 mm) als Regen, während südlich der Georgian Bay bereits über 2,5 Inches (63,5 mm) als Regen fallen.

Die Abflußkurven und die Seespiegeländerungen sind bei den einzelnen Seen weniger einheitlich als das Niederschlagsregime. Beim Lake Superior ist die Abflußspitze in den Monaten August bis Oktober fast gleichbleibend hoch. Im gleichen Zeitraum fließt aus dem Teilgebiet des Eriesees das wenigste Wasser ab. Monat des geringsten Abflusses ist beim Lake Superior und Michigan-Huronsee der Februar. Bei allen Seen sind die Wintermonate abflußarm. Nur der am südlichsten gelegene Eriesee hat eine deutliche Abflußspitze im Winter.

Der Michigan- und Huronsee haben während des ganzen Jahres einen recht wenig veränderten Abfluß; die monatlichen Abflußhöhen schwanken nur zwischen 14,5 und 22,7 mm. Die Differenzen sind teilweise so gering, daß die unterschiedliche Monatslänge den Ausschlag für die größere Abflußhöhe in diesem oder jenem Monat gibt.

Die mittlere Jahresschwankung der monatlichen Abflußhöhen errechnet sich für das Niederschlagsgebiet des Eriesees zu 24,2 mm.

Die unterschiedlichen Abflußregime der Seen müssen vor allem auf die unterschiedlichen Schneerücklagen und Verdunstungskräfte zurückgeführt werden. In den Unterseen werden die hohen sommerlichen Niederschläge durch die Verdunstung weitgehend aufgebraucht; am Oberen See führen sie zu einem Abflußmaximum, das von der Schneeschmelze unterstützt wird. Die Schneeschmelze ist am Oberen See am stärksten verzögert und die Verzögerung wird noch ausgedehnter durch die zahllosen kleinen Seen, die die Zuflüsse des Lake Superior queren.

Die Zuflußänderung und Seespiegeländerung

Die Höhe des Seespiegels wird nicht nur von Niederschlag, Abfluß und Verdunstung sowie den Luftdruck-, Wind- und Strömungsverhältnissen reguliert, sondern auch von den Zuflußänderungen. Die Zuflußänderungen des Eriesees wurden aus den Abflußdifferenzen des Detroit River von Monat zu Monat ermittelt, die Zuflußänderungen

zum Ontariosee aus den monatlichen Gesamtabflusssummen des Niagara River usw.

Die Zuflußänderungen wurden ebenfalls in die Diagramme der Abbildung 3 eingetragen.

Es sind dabei die folgenden Fälle zu unterscheiden:

- a) Zuflußzunahme bei gleichzeitiger Senkung des Vorfluterspiegels, d. h. obwohl mehr Wasser in den See (Vorfluter) hineinfließt als im Vormonat, sinkt der Seespiegel ab.
- b) Zuflußzunahme bei gleichzeitigem Anstieg des Sees, in den der Zufluß einmündet.
- c) Zuflußabnahme bei gleichzeitiger Senkung des Vorfluterspiegels.
- d) Zuflußabnahme bei gleichzeitigem Anstieg des Vorfluterspiegels.

b) und c) sind die erwarteten Reaktionen des Seespiegels. Dagegen ist es als Besonderheit zu werten, wenn der Seespiegel fällt, obwohl mehr Wasser hineinfließt und u. U. die Niederschläge zunehmen. Es ist ferner bemerkenswert, daß in einigen Fällen der Seespiegel ansteigt, obwohl weniger Wasser als im Vormonat durch die großen Rivers zufließt. Zuflußzunahme und -abnahme sind in dem Diagramm mit der Seespiegeländerung in Verbindung gebracht.

Die Schneeschmelze äußert sich in den Seespiegeländerungen stärker als im Abfluß. Der winterliche Seeabfluß zehrt von der Rücklage in den Seen. Der Wasserspiegel des Lake Superior fällt im Oktober um 6 mm, im November um weitere 18,2 mm, im Dezember um 26,7 mm und im Januar erneut um 30,3 mm. Bis Ende März wurden aus den Rücklagen im See insgesamt 123,7 mm Wasser aufgebraucht. In der gleichen Zeit flossen 152,5 mm ab. In jedem der Wintermonate (Dezember bis Februar) ist aber die Seespiegelabsenkung größer als der Abfluß, so daß man geneigt ist, die winterliche Seespiegelabsenkung teilweise der Verdunstung zuzuschreiben. Die schon einmal gestellte Frage: wo bleiben die winterlichen Niederschläge auf die Seefläche? bleibt unbeantwortet (vgl. aber die obigen Bemerkungen zu diesem Problem).

Ich habe auch versucht, die Beziehung zwischen Niederschlag und Seespiegeländerung zu erfassen. Im Winter ist überhaupt keine Relation erkennbar, dagegen ab April ergibt sich eine deutliche Beziehung zwischen dem Niederschlag auf die Seefläche + Vormonatsniederschlag auf die Landfläche zur Seespiegeländerung.

Mit dem Überwiegen des Regens über den Schneefall und mit der beginnenden Schneeschmelze im April steigt der Seespiegel um 6 mm, im Mai und Juni sogar um je 37,6 mm an. Ende September ist der See auf seinen Maximalstand aufgefüllt. Bei keinem der anderen Seen sind die sommerlichen Rücklagen in diesem Ausmaß zu beobachten. Die verdunstungsstarken Sommermonate bedingen schon beim Michigan-Huronsee ab

August ein Fallen des Seespiegels trotz des Regenmaximums. Beim Erie- und Ontariosee fallen die Wasserspiegel sogar schon vom Juli ab. Die Auffüllung beginnt der früheren Schneeschmelze entsprechend auch bereits im März bzw. Februar. Beim Erie- und Ontariosee steigt der Seespiegel nur während vier Monaten, beim Ontariosee und Michigansee dauert die Auffüllung 5 und beim Oberen See 6 Monate.

Im April würde der gesamte Niederschlag, der im Teilgebiet des Ontariosees fällt, nicht ausreichen, die Seespiegeländerung und den Abfluß zu bestreiten; denn für den Abfluß und die Spiegeländerung alleine werden bereits 79,9 mm Wasser benötigt, während der Niederschlag nur 70,6 mm Wasser zur Verfügung stellt. Der Fehlbetrag und die im April verdunstende Wassermenge werden aus den Schneerücklagen genommen, die in erster Linie den See auffüllen. Der Teil der Spiegeländerung, der durch den erhöhten Zufluß aus dem Niagara River und Welland-Kanal verursacht sein kann, ist in der Abbildung besonders gekennzeichnet. Er allein würde nicht ausreichen das Defizit zu decken. Die Abfluß- bzw. Zuflußänderungen aus den oberhalb liegenden Seen spielen nur in den verhältnismäßig kleinen Unterseen eine Rolle.

Am Erie- und Ontariosee hält sich im Januar der Seespiegel, obwohl der Abfluß aus dem Seegebiet das Maximum hat und die Zuflüsse vom Detroit River sich gegenüber dem Vormonat um 20,7 mm vermindert haben. Im Februar wird nach einem erneuten Absinken der Zuflüsse aus dem Detroit River um 19,7 mm (bezogen auf das Erie- und Ontarioseegebiet mit Land- und Seeflächen) der Tiefststand des Seespiegels erreicht, zumal auch die Niederschläge ihre geringste Höhe erreichen. Aber der Abfluß zum Ontariosee bleibt auf seinem winterlichen Höchststand. Der Anstieg des Niederschlags im März bedeutet gleich einen Anstieg des Seespiegels um 19 mm; gleichzeitig nehmen aber auch die Zuflußmengen aus dem Detroit River um 26 mm zu und der Abfluß zum Ontariosee geht zurück. Die Schneeschmelze dürfte in diesem Monat wie auch besonders im April zur Auffüllung des Seebeckens beitragen.

Im zweiten Halbjahr werden die Wasservorräte im Erie- und Ontarioseegebiet aufgezehrt, woran in erster Linie die Verdunstung beteiligt ist, denn die Abflußmengen zum Ontariosee bzw. zum St.-Lorenz-Strom werden geringer. Obwohl von den mittleren Seen und dem Lake Superior in einigen Monaten die Wasserzufuhr zu den Unterseen erhöht ist, sinken deren Seespiegel weiter ab.

Ich möchte hier nicht alle Details der Bilanzdiagramme der Abbildung 3 beschreiben. Sie geben auch ohne Kenntnis der monatlichen Verdunstungsraten einen Einblick in den regional differenzierten Wasserhaushalt.

Tabelle 6:

Die mittleren Seespiegeländerungen, Niederschlags- und Abflußhöhen im Gebiet der Großen Seen Nordamerikas 1900—1956

(Berechnet nach Unterlagen des U.S. Lake Survey Detroit)

| | Lake Superior | | | | Lake Michigan, Lake Huron, Lake St. Clair | | | | |
|-----------|---------------|---------|---------|-----------|--|-----------|---------|---------|-----------|
| | S mm | N mm | A mm | N-A mm | Z mm | S*) mm | N mm | A mm | N-A mm |
| Januar | — 30,3 | 47,2 | 24,3 | 22,9 | — 0,8 | — 13,1 | 51,9 | 17,3 | 34,6 |
| Februar | — 25,5 | 37,1 | 21,6 | 15,5 | — 1,5 | — 19,7 | 45,6 | 14,5 | 31,1 |
| März | — 17,0 | 43,4 | 23,2 | 20,2 | + 0,9 | + 6,6 | 55,2 | 19,3 | 35,9 |
| April | + 6,0 | 49,3 | 23,6 | 25,7 | + 0,2 | + 24,4 | 62,5 | 21,3 | 41,2 |
| Mai | + 37,6 | 66,8 | 26,3 | 40,5 | + 1,4 | + 29,0 | 76,1 | 22,7 | 53,4 |
| Juni | + 37,6 | 82,8 | 26,4 | 56,4 | + 0,1 | + 22,5 | 78,1 | 21,7 | 56,4 |
| Juli | + 26,7 | 81,5 | 28,8 | 52,7 | + 1,3 | + 13,1 | 74,6 | 22,2 | 52,4 |
| August | + 13,3 | 77,2 | 29,9 | 47,3 | + 0,6 | — 5,6 | 71,8 | 21,6 | 50,2 |
| September | + 2,4 | 86,9 | 29,0 | 57,9 | — 0,5 | — 16,9 | 82,4 | 20,7 | 61,7 |
| Oktober | — 6,0 | 65,5 | 29,7 | 35,8 | + 0,4 | — 19,7 | 69,8 | 21,1 | 48,7 |
| November | — 18,2 | 61,0 | 27,9 | 33,1 | — 1,0 | — 19,7 | 66,4 | 20,3 | 46,1 |
| Dezember | — 26,7 | 47,5 | 25,8 | 21,7 | — 1,3 | — 0,9 | 55,1 | 21,1 | 34,0 |
| Jahr | | 746 | 316 | 430 | | | 790 | 244 | 546 |

| | Lake Erie | | | | | Lake Ontario | | | | | Great Lakes insgesamt | | |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|-----------|--------------|---------|---------|---------|-----------|--------------------------|---------|-----------|
| | Z mm | S mm | N mm | A mm | N-A mm | Z mm | S mm | N mm | A mm | N-A mm | N mm | A mm | N-A mm |
| Januar | — 20,7 | — | 64,8 | 33,3 | 31,5 | — 4,2 | — 0,1 | 68,6 | 21,0 | 47,6 | 54,1 | 21,4 | 32,7 |
| Februar | — 19,7 | — 6,5 | 54,6 | 32,8 | 21,8 | — 18,9 | + 5,9 | 60,7 | 21,5 | 39,2 | 46,2 | 19,2 | 27,0 |
| März | + 26,0 | + 19,5 | 71,4 | 26,1 | 45,3 | + 18,0 | + 18,4 | 70,1 | 27,8 | 42,3 | 56,1 | 22,1 | 34,0 |
| April | + 10,1 | + 54,9 | 75,9 | 20,0 | 55,9 | + 3,8 | + 43,5 | 70,6 | 34,2 | 36,4 | 61,7 | 23,3 | 38,4 |
| Mai | + 11,5 | + 30,7 | 82,6 | 21,6 | 61,0 | + 12,2 | + 23,7 | 77,4 | 34,5 | 42,9 | 74,7 | 24,8 | 49,9 |
| Juni | — 2,8 | + 14,9 | 83,6 | 21,8 | 61,8 | — 2,4 | + 7,9 | 75,2 | 33,4 | 41,8 | 79,8 | 24,4 | 55,4 |
| Juli | + 8,2 | — 3,7 | 80,8 | 19,8 | 61,0 | + 5,8 | — 5,9 | 81,8 | 32,8 | 49,0 | 78,2 | 25,0 | 53,2 |
| August | — | — 18,6 | 75,9 | 14,4 | 61,5 | — 5,0 | — 21,1 | 74,7 | 32,0 | 42,7 | 73,9 | 24,3 | 49,6 |
| September | — 6,4 | — 27,9 | 75,2 | 10,5 | 64,7 | — 9,7 | — 27,0 | 76,2 | 28,5 | 47,7 | 81,8 | 22,7 | 59,1 |
| Oktober | + 3,7 | — 27,0 | 69,3 | 9,1 | 60,2 | + 2,1 | — 23,7 | 75,9 | 26,9 | 49,0 | 69,3 | 22,8 | 46,5 |
| November | — 8,1 | — 27,0 | 64,0 | 11,3 | 52,7 | — 5,4 | — 15,1 | 71,1 | 22,0 | 49,1 | 65,0 | 21,6 | 43,4 |
| Dezember | — 1,8 | — 9,3 | 61,5 | 17,1 | 44,4 | + 3,7 | — 5,9 | 68,8 | 22,7 | 46,1 | 55,6 | 22,1 | 33,5 |
| Jahr | | | 860 | 238 | 622 | | | 871 | 337 | 534 | 796 | 274 | 522 |

In der Tabelle 6 bedeuten:

- Z Zuflußänderung aus den oberhalb gelegenen Seen gegenüber dem Vormonat; Monatsmittel 1900—1956.
 S Seespiegeländerung gegenüber dem Vormonat; Monatsmittel 1900—1956.
 N mittlere monatliche Niederschlagssumme 1900—1956.
 A mittlere monatliche Abflußhöhe 1900—1956.
 N—A Unterschiedshöhe aus Niederschlag minus Abfluß. Für das Jahresmittel ist der Wert gleich der mittleren Verdunstungshöhe 1900—1956.

Bei den mittleren monatlichen Unterschiedshöhen sind Rücklagen und Aufbrauch in der Differenz N—A eingeschlossen.

Alle Werte sind auf die in Tabelle 4 angegebenen Flächen der Teilgebiete (Landflächen + Seeflächen) bezogen worden, ausgenommen die Werte für das Gesamtgebiet der Großen Seen.

*) Lake Michigan, Lake Huron und Lake St. Clair mußten zusammengefaßt werden, weil für den Lake St. Clair keine gesonderten Niederschlags- und Seespiegeldaten vorlagen. Lake Michigan und Lake Huron sind als Einheit behandelt worden, weil sie gleiche Seespiegelhöhen haben.

Die Zuflußänderungen wurden natürlich aus dem Gesamtzufluß ermittelt und nicht nur aus dem vom oberhalb gelegenen Teilgebiet abgeflossenen Wasser. Die Seespiegeländerungen resultieren in gleicher Weise aus dem ganzen Einzugsgebiet der einzelnen Bezugspunkte (St. Marys

River, St. Clair und Detroit River, Niagara River, St.-Lorenz-Strom bei Ogdensburg). Da in obiger Tabelle 6 die Niederschlagssummen für Michigan- und Huronsee zusammengefaßt werden mußten, seien sie nachfolgend für jedes der Seebecken mitgeteilt (Zeitraum 1900—1956):

Tabelle 7:

- a) Lake Michigan, mittlere monatliche Niederschlagssumme (in mm)
b) Lake Huron, mittlere monatliche Niederschlagssumme (in mm)

| | Jan. | Febr. | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug. | Sept. | Okt. | Nov. | Dez. | Jahr |
|----|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| a) | 43,7 | 40,1 | 53,8 | 66,8 | 83,8 | 87,1 | 78,2 | 76,7 | 85,3 | 67,1 | 61,2 | 46,2 | 790,4 |
| b) | 58,9 | 50,3 | 56,4 | 58,9 | 69,6 | 70,4 | 71,6 | 67,6 | 80,0 | 72,1 | 70,9 | 62,7 | 789,4 |

Die Wasserbilanz für das Gesamtgebiet der Großen Seen

Die Summe der vier Niederschlags- und Abflußdiagramme der Einzelseen in Abbildung 3 und Tabelle 6 wird in einem fünften Diagramm gegeben als Wasserbilanz des St.-Lorenz-Stromes bei Ogdensburg. Die über das ganze Gebiet der Großen Seen summierten Niederschlags- und Abflußhöhen sind in der Verteilung über das Jahr ziemlich ausgeglichen. Der kontinentale Niederschlagsgang, wie er für die Ostseiten der Kontinente der nördlichen Hemisphäre kennzeichnend ist, dominiert mit vorherrschenden Sommerregen: Juni und Juli haben 79,8 bzw. 78,2 mm Niederschlag, während der kürzeste Monat des Jahres mit 46,2 mm auch den wenigsten Niederschlag erhält. Die Schwankungskoeffizienten sind immer noch größer als beim Ontariosee und Huronsee, aber kleiner als beim Lake Superior.

Im 57jährigen Zeitraum 1900—1956 einschließlich fielen im Gesamteinzugsgebiet der Großen Seen bis zum Pegel Ogdensburg (764 568 km²) im Jahresmittel 796,4 mm Niederschlag. Nur 34,5% = 273,7 mm flossen durch den St.-Lorenz-Strom ab, während 522,7 mm verdunsteten. Diese Bilanzwerte repräsentieren einen Durchschnittswert verschiedener Klimabereiche; denn das Einzugsgebiet der Großen Seen reicht über 10 Breitengrade hinweg von 41° bis 51° nördl. Breite.

Der Abfluß ist von einer der Schifffahrt auf dem St.-Lorenz-Strom sehr willkommenen Gleichmäßigkeit. Weniger die Abflußschwankungen als vielmehr die ständig vorhandenen Untiefen, Stromschnellen und Flußbarren erschweren die Schifffahrt auf dem St.-Lorenz-Strom. Im Februar fließen 19,2 mm ab (= Minimum) und im Juli 25 mm (= Maximum), eine Differenz, die sich bei Reduktion auf gleiche Monatslänge weiter vermindern würde.

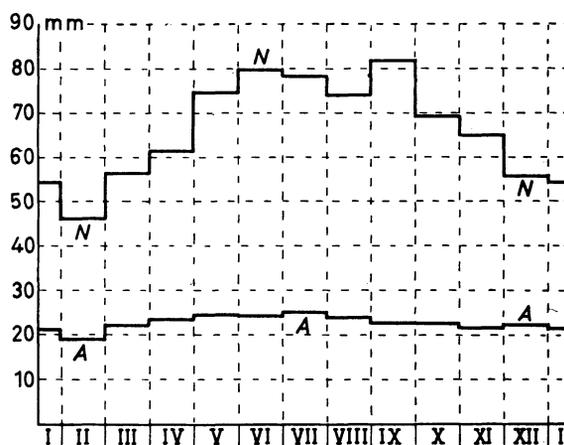


Abb. 4: Die Wasserbilanz im Gesamtgebiet der Großen Seen 1900—1956.

In Tabelle 8 sind für die großen Seen die wirklichen Abflußmengen in Kubikfuß pro Sekunde zusammengestellt. Die Zahlen sind für die jeweiligen Gesamteinzugsgebiete und nicht nur für die Teilgebiete berechnet.

Die Abflußschwankungen seit 1860

Wenn schon die wirtschaftlichen Auswirkungen der verhältnismäßig geringfügigen Ableitungen von Wasser aus dem Seegebiet bei Chicago zu internationalen Verträgen und Diskussionen in der wissenschaftlichen Literatur führen, ist es verständlich, daß die klimatisch bedingten Abflußänderungen noch größere Beachtung verdienen, da sie den Wasserhaushalt der Seen noch wirkungsvoller beeinflussen.

Die Tabellen 8 a und 8 b zeigen, daß die Mittelwerte der monatlichen Abflußmengen der Jahre 1860 bis 1899 alle merklich über den Abflußmengen der Jahre 1900 bis 1956 lagen. Eine Ausnahme macht der St. Marys River im April. In

den Sommermonaten ist die Wasserführung des St.-Lorenz-Stromes im Durchschnitt der Jahre seit 1900 um 16 000—19 000 cfs geringer als vorher. Dabei ist die Wassermenge der Großen Seen seit 1939 bzw. 1943 durch Fremdwasserzuführungen im Long Lake- und Ogoki-Projekt (Lake Superior) um etwa 5000 cfs erhöht worden, während die ersten Ableitungen bei Chicago schon 1836 begannen. Insgesamt ist die Wasserführung der unteren Seen und River durch die Fremdwasserzufuhr, bei Berücksichtigung der Ableitungen bei Chicago, also seit 1945, um ca. 1500 cfs gegenüber dem natürlichen Abfluß vergrößert worden.

Zweifelloos geht ein Teil des verminderten Abflusses auf künstliche Eingriffe zurück; denn erst seit 1945 werden die Ableitungen ganz durch die Fremdwasserzufuhr ausgeglichen. Aber trotz allem bleibt doch die Feststellung bestehen, daß auch der natürliche Abfluß in den letzten 50 Jahren geringer geworden ist. Zeichnet man jedes einzelne Monatsmittel des Wasserstandes für jeden

See seit 1860 auf, dann treten die jüngsten Klimaschwankungen gut in Erscheinung. Diese monatlichen Wasserstandsganglinien können wegen der notwendigen großen Blattdimensionen hier nicht wiedergegeben werden.

Die Jahresmittelwerte für 10jährige Folgen (Abb. 5) oder die jährlichen Abflusssummen einzelner Seen können das stetige im mehrjährigen Rhythmus sich gebende Auf und Ab der Seespiegel nur unvollkommen veranschaulichen.

Kein Jahrzehnt nach 1900 erreicht die Abflußfülle der 30 Jahre 1860—1889. Der Tiefstand des Abflusses liegt in den Jahren 1920 bis 1939. Seither ist eine Abflußsteigerung zu beobachten. Eine Ausnahme macht der St. Marys River, dessen Wasserführung seit 1940 relativ hoch ist und in den sieben Jahren 1950—1956 sogar einen Wert erreicht, der alle vorangehenden Dekadennmittel übertrifft. Das ist eine Auswirkung der 4900 cfs Wasser, die im jüngsten Zeitraum dem Oberen See als Fremdwasser zugeführt wurden.

Tabelle 8 :

*Die mittleren monatlichen Abflusssummen der Großen Seen
für die Jahre 1860 bis 1899 und 1900 bis 1956 in 1000 Kubikfuß pro Sekunde (cfs)
(Berechnet nach Unterlagen des U.S. Lake Survey Detroit)*

| a) 1860 bis 1899 | Jan. | Febr. | März | April | Mai | Juni | Juli | Aug. | Sept. | Okt. | Nov. | Dez. | Jahr |
|---|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| St. Marys River bei „Soo“ | 69,3 | 66,1 | 65,4 | 66,6 | 74,4 | 79,7 | 83,2 | 84,6 | 85,0 | 84,2 | 81,4 | 76,0 | 76,3 |
| St. Clair u. Detroit River | 195 | 184 | 190 | 200 | 206 | 212 | 215 | 216 | 214 | 212 | 210 | 203 | 205 |
| Niagara River bei Buffalo N.Y. *) | 207 | 200 | 203 | 213 | 221 | 225 | 225 | 221 | 216 | 211 | 208 | 208 | 216 |
| St.-Lorenz-Strom bei Ogdensburg N.Y. | 228 | 225 | 237 | 258 | 268 | 270 | 271 | 263 | 254 | 246 | 242 | 240 | 250 |
| b) 1900 bis 1956 | | | | | | | | | | | | | |
| St. Marys River bei „Soo“ | 66,4 | 64,7 | 63,5 | 66,8 | 71,9 | 74,7 | 78,7 | 81,8 | 82,0 | 81,2 | 78,8 | 70,5 | 74,4 |
| St. Clair u. Detroit River | 154 | 145 | 161 | 178 | 185 | 188 | 191 | 191 | 190 | 188 | 185 | 177 | 178 |
| Niagara River bei Buffalo N.Y. *) | 191 | 185 | 190 | 201 | 209 | 213 | 213 | 207 | 202 | 198 | 198 | 196 | 197 |
| St.-Lorenz-Strom bei Ogdensburg N.Y. | 216 | 213 | 223 | 243 | 250 | 254 | 252 | 245 | 237 | 230 | 225 | 223 | 231 |

Anmerkung: Dem Lake Superior werden seit 1943 etwa 5 000 cfs an Fremdwasser aus dem Einzugsgebiet der Hudson Bay zugeführt, die damit im Abfluß der übrigen Seen ebenfalls enthalten sind. Die Wasserableitungen bei Chicago betragen durchschnittlich 3 200 cfs.

*) Einschließlich der durch den Wellandkanal abfließenden Mengen.

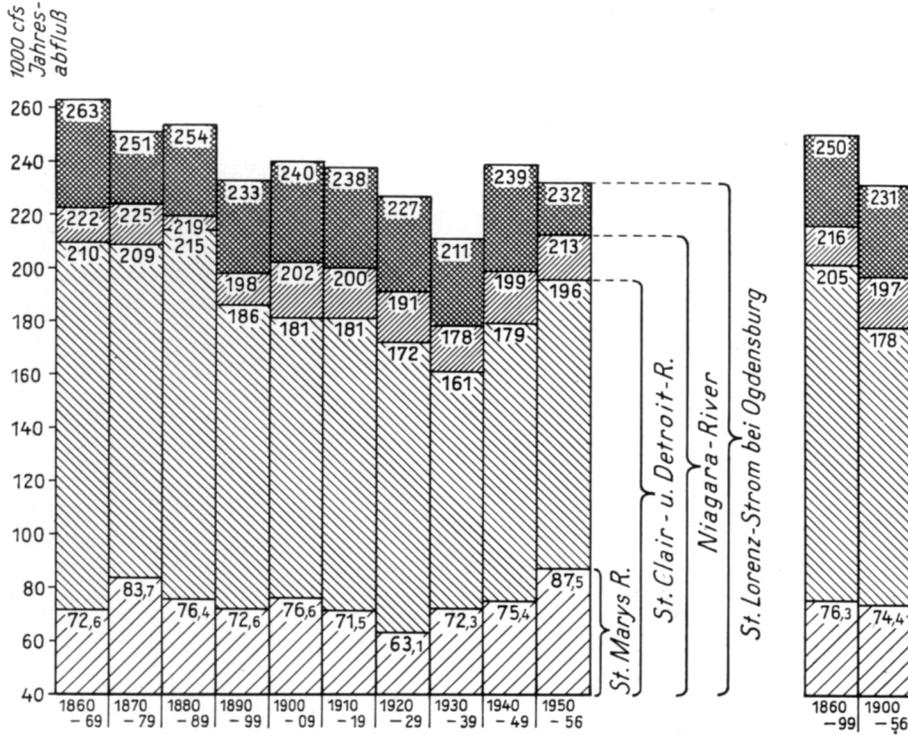


Abb. 5: Die mittleren jährlichen Abflußmengen der Seen für aufeinanderfolgende Perioden.

In den 10jährigen Mittelwerten für 1940—1949 ist in den Abflußmengen ein Fremdwasserüberschuß aus dem Ogoki- und Long Lake-Gebiet, das natürlicherweise über den Albany River zur Hudson Bay entwässert, in Höhe von 1 400 cfs und für 1950—1956 von 1 650 cfs enthalten.

In den Jahren vor 1940 ist der natürliche Abfluß vermindert um die bei Chicago zum Mississippi abgeleiteten Wassermengen.

| Es wurden bei Chicago entzogen | | | |
|--|----------|-----------|----------|
| 1860—1870 | 150 cfs | 1891—1894 | 600 cfs |
| 1871—1883 | 300 cfs | 1895—1897 | 500 cfs |
| 1884—1886 | 1000 cfs | 1898—1903 | 600 cfs |
| 1887—1890 | 800 cfs | 1904—1910 | 700 cfs |
| und für den neu erbauten Chicago Sanitary und Ship Canal | | | |
| 1900—1909 | 4810 cfs | 1930—1939 | 7180 cfs |
| 1910—1919 | 7840 cfs | 1940—1949 | 3130 cfs |
| 1920—1929 | 8640 cfs | 1950—1956 | 3210 cfs |

Der Einfluß des Chicago Sanitary and Ship Canals ist in den verminderten Abflußhöhen des Detroit River seit 1900 zu erkennen.

Die graphische Darstellung der jährlichen Abflußmengen (Abb. 6) beginnt mit einem Höchststand um 1860, der für den St.-Lorenz-Strom ein absolutes Maximum bedeutet, für den St. Marys River allerdings nicht so ausgeprägt ist. Es ist bei der klimatischen Verschiedenheit der einzelnen Seegebiete und dem Rückhaltevermögen der weiten Seeflächen nicht zu erwarten, daß die Abflußspitzen und Abflußklemmen stets zeitlich beieinander

liegen. Aber allen Kurven gemeinsam ist die große absinkende Tendenz des Linienbildes von etwa 1890 ab. Dies ist zweifellos im Zusammenhang mit großklimatischen Veränderungen zu verstehen, was noch im einzelnen untersucht werden soll.

Die markantesten Abflußspitzen des Lake Superior liegen um 1876 (1906), 1916 und 1951, wobei aber zwischen 1928 und 1943 fünf weitere abflußstarke Jahre sind. Die Abflußspitze um 1860, welche bei allen anderen Seen beobachtet werden kann, ist im Norden weniger hervorstechend.

Am Detroit River ist die Spitze von 1876 ebenfalls ausgeprägt, sie wird aber übertroffen von den abflußreichen Jahren um 1885. Der darauf folgende Tiefstand der Wasserführung des Detroit River dauert von 1895 bis 1951. Um 1926 und 1934 werden Jahresabflüsse beobachtet, welche 77 000 cfs bzw. 79 000 cfs unter dem Höchststand von 1885 liegen. Was in den Jahren 1860 bis 1889 der geringste Abfluß im Detroit River war, wird 1890 bis 1949 eben noch von den abflußstärksten Jahren erreicht (1917 und 1929). Alle anderen Abflußmengen 1890 bis 1949 liegen unter dem Minimalabfluß der Jahre 1860 bis 1889.

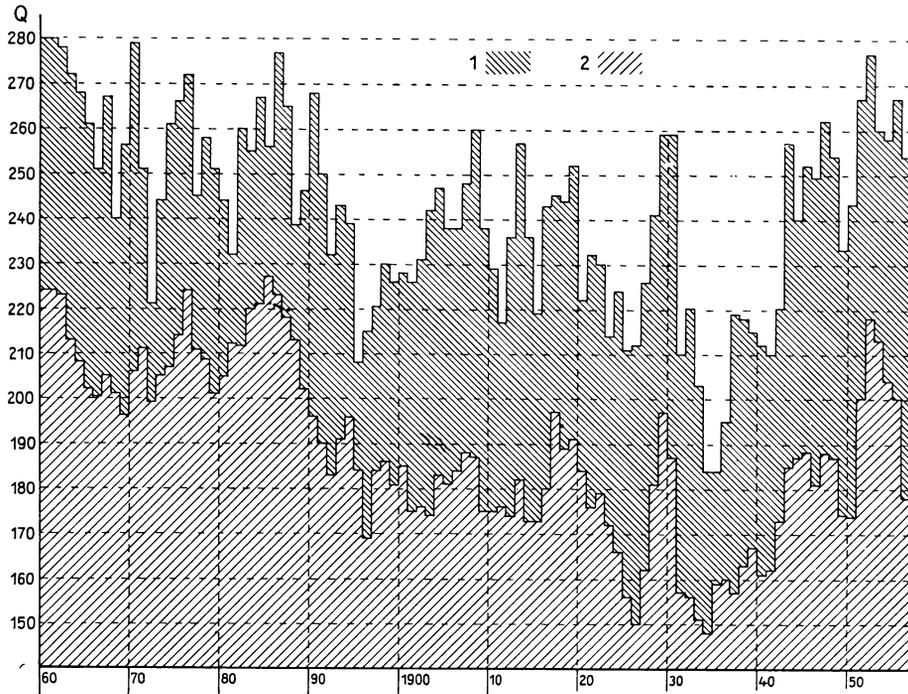


Abb. 6: Die jährlichen Abflußmengen Q (in 1000 cfs) 1860—1956 für den St.-Lorenz-Strom (= 1) und den Detroit River (= 2).

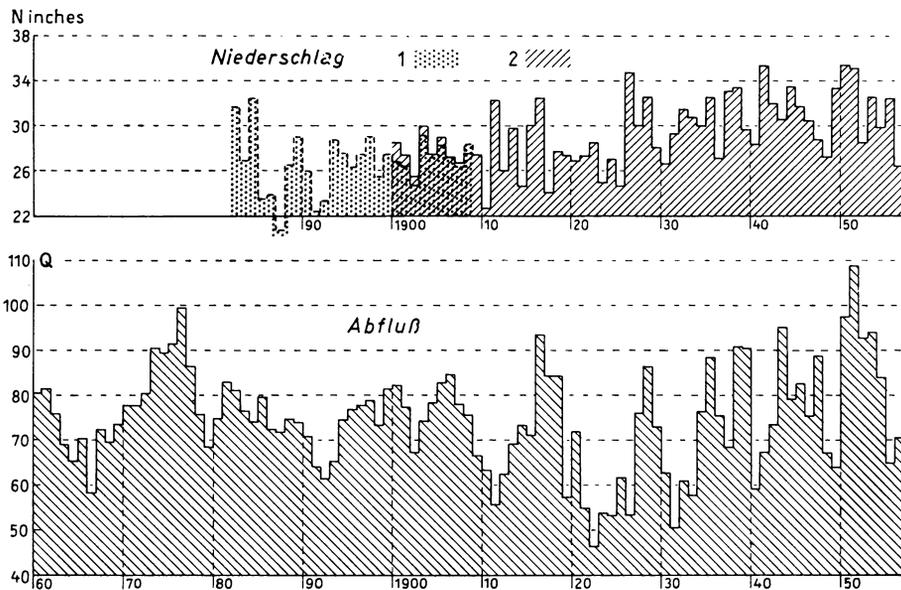


Abb. 7: Die jährlichen Niederschlags- und Abflußhöhen im Gebiet des Lake Superior (2 = Gebiets-Niederschlag, 1 = Niederschlag auf die Landflächen). Q in 1000 cfs.

Die genannten Tendenzen sind auch beim St.-Lorenz-Strom (bei Ogdensburg, N. Y.) erkennbar, aber die Minimalabflüsse der Jahre 1860 bis 1889 werden in der Folgezeit beim St.-Lorenz-Strom noch sehr oft überschritten — ganz im Gegensatz

zum Detroit River. Die Differenzen zwischen den benachbarten Abflußspitzen und Abflußklemmen sind größer als bei den vorher beschriebenen Beispielen; es sind auch mehr Spitzen ausgeprägt, was auf eine stärkere Beeinflussung der Wasser-

führung durch die Einzugsgebiete der Unterseen hindeutet, deren relativ kleine Wasserfläche kein so großes Retentions- und Ausgleichsvermögen hat.

Die größten Abflußmengen am St. Lorenzstrom bringt gleich das erste Jahr, das Jahr 1860 mit 280 000 cfs, ein Wert, der mit 277 000 cfs 1952 fast wieder erreicht wurde. Den geringsten Abfluß hatten die Jahre 1934 und 1935 mit je 184 000 cfs. Noch wenige Jahre vorher (1929 und 1930) wurden markante Abflußspitzen gebracht mit 259 000 cfs.

Der jährliche Gebietsniederschlag ist vom U. S. Lake Survey Detroit für das ganze Einzugsgebiet und die Jahre 1930—1956 ermittelt worden. Eine Zuordnung aller Abflußspitzen zu den Niederschlagsspitzen ist in manchen Fällen möglich, wenn man eine Verzögerung des Abflusses gegenüber dem Niederschlag von 1—2 Jahren einsetzt. Aber nicht jede Niederschlagsspitze findet ihr Gegenstück im Abfluß. Das war auch nicht zu erwarten, da die Wasserflächen viele Niederschlagsspitzen auffangen und ausgleichen.

Bedeutend mehr Parallelen finden sich aber im Niederschlags- und Abflußgang des Lake Superior (Abb. 7), da dessen Einzugsgebiet geographisch einheitlicher ist als das Gesamtgebiet der Great Lakes. Für die Jahre 1900 bis 1956 wurde der Gebietsniederschlag zum Vergleich mit den jährlichen Abflußmengen eingesetzt; für die Jahre 1882—1910 konnte lediglich der auf die Landfläche gefallene Niederschlag ermittelt werden. Die Niederschläge auf die Landflächen liegen im Gebiete der Großen Seen, von Ausnahmefällen abgesehen, 0,5 bis 1 Inch unter dem Niederschlag, der auf die Seeflächen fällt.

Schifffahrt und Wasserkraftnutzung im Gebiet der Großen Seen

In den Ausführungen über die Kanäle im Bereich der Großen Seen wurde herausgestellt, daß die geomorphologischen Gegebenheiten, insbesondere die ehemaligen Ausflußstellen der Seen im Bereich der USA im Gegensatz zu Kanada als leistungsfähige Binnenwasserstraßen ausgebaut wurden. Das hängt natürlich mit dem unterschiedlichen wirtschaftlichen Ausbau des Landes im Norden und Süden der Seen zusammen. Das ist aber auch ein Beispiel für die unterschiedlichen wasserwirtschaftlichen Interessen beider Staaten. In den USA steht die Schifffahrt auf den Seen an erster Stelle. Man ist am St. Lorenz-Großschiffahrtsweg, der zur Mitte des Kontinents führt und an der Verbindung der Großen Seen mit dem Mississippi und dem Süden des Landes interessiert. An zweiter Stelle bemüht man sich um den Schutz der Küstenlinie auf der Grundlage der 125jährigen Seespiegelbeobachtungen, da die Küstenlinie

für die Häfen und Siedlungen bedeutsam ist. Die Nutzung der Wasserkraft tritt demgegenüber zurück, wenn auch die USA Pläne entwickelt haben, einen größeren Teil der Wasserkraft des St.-Lorenz-Stromes auszubauen.

In Kanada steht jedoch eindeutig die Nutzung der Wasserkraft im Vordergrund.

Es ist berechnet worden (Lake Survey, 1957), daß durch eine Vermehrung der zum Mississippi abgezweigten Wassermengen um 1000 cfs die Leistung der Wasserkraftwerke am Niagara River, Wellandkanal und im St.-Lorenz-Strom vermindert würde. Der Ausfall soll 123 400 000 kwh in den u. s.-amerikanischen Wasserkraftwerken (State New York) und ebensoviel in den Kraftwerken von Ontario betragen, wozu noch 56 300 000 kwh Verluste in Quebec kommen. Diese Zahlen sind unter bestimmten Voraussetzungen berechnet worden (3 Jahre Abflußvermehrung um 1000 cfs), die im einzelnen hier nicht wiedergegeben werden können. Die angegebenen Werte sollen hier nur die Größenordnung veranschaulichen mit der bei einer Abflußmengenänderung von 1000 cfs gerechnet wird. Der Verlust an Energie beträgt etwa 0,4 %. Der finanzielle Ausfall wird mit etwa 580 000 \$ angegeben.

Dieses Beispiel wurde gegeben, um die intensive wasserwirtschaftliche Nutzung der Großen Seen zu demonstrieren.

Man befürchtet aus einer Verminderung der Wassermengen ferner eine Beeinträchtigung der Schifffahrt, besonders in den untiefen Rivers und den sehr flachen Teilstücken des St.-Lorenz-Stromes sowie in den Verbindungskanälen zwischen Seen und Häfen.

Die diskutierte Ableitung von 1000 cfs mehr als bisher würde im Michigan-Huronsee den Wasserspiegel um 1 Inch, im Erie- und Ontariosee um 5/8 Inch absenken. Es wurde berechnet unter Berücksichtigung der Entwicklung der USA-Seeflotte bis 1985, daß das einer jährlichen Verminderung der Ladekapazität von etwa 300 000 tons gleichkommt. Dabei ist die Schifffahrtsentwicklung auf dem im Juni 1959 eröffneten St.-Lorenz-Seeweg und die Entwicklung der kanadischen Handelschifffahrt auf den Großen Seen nicht berücksichtigt.

Bei den vorstehenden Erörterungen, die immer einen Wert von 1000 cfs für die Erhöhung der Ableitung bei Chicago zugrunde legen, muß daran erinnert werden, daß durch den Chicago River 1928 im Jahresdurchschnitt bereits 10 000 cfs abgeleitet wurden und die besprochenen Effekte natürlich in größerem Umfang auftreten müssen. Diese Zahl möge die folgende Mitteilung veranschaulichen:

Am Niagarafluß in der Nachbarschaft der Fälle nutzen 5 kanadische und 2 amerikanische Elektrizitätswerke die Wasserkraft neben 8 kleineren kanadischen Werken am Wellandkanal. Am 27. Februar 1950 wurde zwischen den Regierungen der USA und Kanadas vereinbart, daß das ungewöhnliche Schauspiel der Niagarafälle erhalten

Tabelle 9:

Die größeren Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet der Großen Seen
(nach U.S. Lake Survey 1957 und List of Water Powers in the Province of Ontario 1946)

| | Wasser- fassungs- vermögen des Kraft- werkes cfs | Installierte Kapazität in Kilowatt | „Kilowatt- Äquivalent“ d. i. kw pro cfs | Installierte Kapazität in PS |
|---------------------------------------|--|--|--|------------------------------------|
| Niagara River | | | | |
| 2 US-amerikanische Kraftwerke | 16 400 | 190 000 | 9,1 –15,6*) | |
| 5 kanadische Kraftwerke | 102 700 | 1 769 000 (1956) | 7,12–22,0*) | 1 037 200 (1946) |
| Welland River | | | | |
| De Cew (kan.) | 7 600 | 149 000 | 19,6 | 70 000 und 51 000 |
| St.-Lorenz-Strom | | | | |
| U.S.-Kraftw. Barnhart Island (i. Bau) | 158 400 | 912 000 | 6,16 | |
| kan. Kraftw. Barnhart Island (i. Bau) | 158 400 | 912 000 | 6,16 | |
| unterhalb d. Intern. Rapids | | | | |
| Cedars (kan.) | 68 000 | 147 000 | 2,7 | |
| Beauharnois (kan.) | 175 000 | 1 065 000 | 6,0 | |
| Long Lake (Nipigon-Lake Superior) | | | | 55 000 |
| Nipigon River | | | | |
| Pine Portage | | | | 172 000 |
| Cameroun Falls | | | | 75 000 |
| Alexander Falls | | | | 73 000 |
| Kakabeka Falls (L. Sup.) | | | | 35 000 |
| St. Marys River | | | | |
| 1 kan., 2 US-amerik. | | | | 72 000 (43 600 kan.) |
| Spanish River (Huronsee) | | | | 50 400 |
| Espanola (Huronsee) | | | | 20 800 |

*) Bedeutet: Die Äquivalentwerte der einzelnen Kraftwerke liegen zwischen den angegebenen Zahlen.

bleiben soll und zu diesem Zwecke während der Touristen-Saison tagsüber eine Mindestwasserführung von 100 000 cfs den Fällen erhalten bleiben soll und zur Nachtzeit und außerhalb der Saison eine Wasserführung von 50 000 cfs. Alles übrige Wasser kann durch die Kraftwerke um die Niagarafälle herumgeleitet werden.

Die Schifffahrt auf den Großen Seen

Im Jahre 1953 wurden allein im amerikanischen Verkehr auf den Großen Seen 242 612 000 tons befördert, davon gingen 122 724 000 tons durch die Schleusen von Sault Ste. Marie und 140 729 000 durch den Detroit River (nach Great Lake Survey 1957). Im Jahre 1955 waren die Leistungen der Seeschifffahrt etwas geringer wie die Tabelle 10 zeigt:

Die Verschiffung von Eisenerz von Duluth, Port Arthur und Marquette/Mich. am Lake Su-

perior beherrscht den Verkehr Richtung Osten auf dem Lake Superior. Die auf dem Oberen See beförderte Kohle geht demgegenüber fast ausschließlich westwärts. Die kanadische Schifffahrt ist in den obigen Zahlen nicht eingeschlossen, sonst wäre die Getreidefracht von Fort William und Port Arthur Richtung Osten mit merklich höheren Zahlen in der Statistik zu finden. Im Jahre 1953 wurden nach A. G. BALLERT (1957) durch die Sault Ste. Marie Canals insgesamt 128 510 232 net tons geschleust, davon Richtung Osten 102 141 546 von der amerikanischen Schifffahrt und 14 578 377 im kanadischen Verkehr. Westwärts gingen 11 198 751 (amerikanische) mit Kohlen, Koks und Kalk und 587 697 net tons im kanadischen Verkehr, wovon fast die Hälfte Erdölprodukte waren. Dazu kamen noch 3861 net tons aus Übersee (Papier). Im kanadischen Schiffsverkehr von Westen nach Osten dominiert natürlich das Getreide mit 10 912 081 net tons.

Tabelle 10:
Die Leistungen der Schifffahrt auf den Großen Seen 1955
(in 1000 tons)

| | Gesamt- menge | Eisenerz | davon | | |
|---------------------------------|------------------|----------|----------|--------|--------|
| | | | Getreide | Kalk | Kohle |
| Große Seen insgesamt | 239 263 | 98 746 | 5 524,9 | 29 654 | 58 787 |
| durch St. Marys River | 111 741 | 90 837 | 3 426,0 | 3 928 | 10 171 |
| durch Detroit River | 132 507 | 68 607 | 3 301 | 14 434 | 34 582 |

Fast 75 % des Eisenerzes werden über den Detroit River nach Cleveland und weiter nach Osten zu den amerikanischen Schwerindustriegebieten transportiert. Denselben Weg nehmen auch mehr als 50 % des auf den Großen Seen verschifften Kalkes. Die Hauptverschiffungshäfen für Kalk sind Calcite-Rogers City (über 12 Mill. short tons), Alpena (ca. 2,2 Mill.) und Rockport (1,2 Mill.) am Huronsee und der erst seit 1930 entwickelte Hafen Port Inland am nördlichen Michigansee (ca. 4 Mill. short tons). Die über die Eisenerztonnage des Lake Superior hinausgehenden Eisenerzfrachten (Tabelle 10) kommen größtenteils aus dem Hafen Escanaba (ca. 5 Mill. tons) an der Green Bay.

Im Jahre 1955 passierten 22 525 Schiffe die Schleusen von „Soo“. 1953 waren es sogar 26 122 mit einer Tonnage von 128 510 000 net tons. Damit ist der St. Marys River mit seinen Schleusen zum verkehrsreichsten Kanal der Welt geworden wie die folgende Gegenüberstellung zeigt (Tab. 11).

Die Verkehrsdichte in den Kanälen von Soo ist um so beachtlicher als auf den Großen Seen im Gegensatz zu Suez und Panama die Schifffahrt nur während 7—8 Monaten offen ist (s. Tabelle 12).

Tabelle 11:

Schiffsverkehr auf den Kanälen von Sault Ste. Marie, Suez und Panama 1953—1955 in 1000 net tons
(nach A. G. Ballert, 1957)

| Kanal | Jahr | Netto-Tonnen | Schiffsdurchgänge |
|------------------|------|--------------|-------------------|
| Sault Ste. Marie | 1953 | 128 510 | 26 122*) |
| | 1954 | 85 418 | 17 405 |
| | 1955 | 114 555 | 22 525*) |
| Suez | 1953 | 99 647 | 12 731 |
| | 1954 | 106 792 | 13 215 |
| | 1955 | 118 506 | 14 666 |
| Panama | 1953 | 47 888 | 8 850 |
| | 1954 | 45 098 | 8 256 |
| | 1955 | 50 035 | 8 397 |

*) Die Anzahl der Schiffsdurchgänge ist in der Statistik des U. S. Lake Survey 1957 mit 27 142 bzw. 24 820 angegeben.

Die Dauer der Schifffahrtssaison ist von Jahr zu Jahr verschieden. Sie hängt einmal von den Wetterbedingungen (Eisverhältnissen) ab und zum anderen aber auch von der Tonnagenachfrage, welche den Einsatz von Eisbrechern zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt rechtfertigt.

Im St. Marys River werden von den 6,83 m Niveauunterschied zwischen dem Lake Superior und Lake Huron-Michigan (s. Tab. 2) 5,80 in den Stromschnellen von Sault Ste. Marie überwunden. Der erste Kanal mit dessen Hilfe die Schifffahrt in diesem Gebiet gefördert werden sollte, wurde 1783—1787 auf der kanadischen Seite von der Northwest Fur Company erbaut (Mitt. des Industrial Committee). Er wurde 1814 von amerikanischen Truppen zerstört. 1853 bis 1855 wurde der erste Schifffahrtskanal auf der amerikanischen Seite erbaut mit zwei Schleusen und 3,50 m Tiefe. Zwischen 1870 und 1881 wurde die später ersetzte Weitzel-Schleuse (3,40 m tief) erbaut. Die bis

Tabelle 12:

Die mittleren Daten des Beginns und des Endes der Schifffahrtszeit
(nach Great Lakes Pilot 1957)

| | Beginn | Ende |
|-----------------------------|----------|----------|
| Oberer See | | |
| Duluth, Minn. | 22. IV. | 10. XII. |
| Keweenaw Waterway | 21. IV. | 8. XII. |
| St. Marys Falls | 6. IV. | 17. XII. |
| Michigan-See | 12. IV. | 15. XII. |
| Huronsee | | |
| Mackinac-Straße | 12. IV. | 15. XII. |
| St. Clair River | 19. III. | 15. XII. |
| Detroit River | 28. II. | 15. XII. |
| Eriesee | | |
| Toledo, Ohio | 21. II. | 20. XII. |
| Cleveland | 31. III. | 13. XII. |
| Buffalo, N.Y. | 11. IV. | 23. XII. |
| Welland Canal | 15. IV. | 10. XII. |
| Ontariosee | | |
| Toronto | 21. III. | 19. XII. |
| Oswego, N.Y. | 16. IV. | 15. XII. |
| Cape Vincent, N.Y. | 4. IV. | 15. XII. |

heute einzige kanadische Schleuse geht auf die Jahre 1888 bis 1895 zurück, in denen auch auf der amerikanischen Seite in der Poe-Schleuse ein neues Bauwerk entstand. Beide haben Tiefen von 5,50 m. Es folgen die Bauten der Davis-Schleuse 1908 bis 1914 und der Sabin-Schleuse 1913—1919 (Tiefe 7,04 m, 24,35 m breit und 411,50 m lang). Die „Mac Arthur Lock“ wurde 1943 an Stelle der Weitzel-Schleuse errichtet und ist 9,45 m tief, 24,40 m breit und 243,85 m lang.

Der St. Marys River wurde vertieft auf etwa 6,50 m (21 ft). Das ist auch die Tiefe, die unterhalb im St. Clair und Detroit River gehalten wird.

Die Niagarafälle werden durch den Welland-Kanal umgangen. Zwischen 1824 und 1833 wurde hier ein erster Kanal gebaut, der aber nur 2,30 m tief war. Diesen von einer Privatgesellschaft betriebenen Kanal übernahm später die kanadische Regierung und erweiterte ihn 1841—1850. 1848 konnte das erste Schiff mit 2,70 m Tauchtiefe von Montreal zum Eriesee gelangen, nachdem auch der St.-Lorenz-Kanal fertiggestellt war. Der Welland-Kanal sollte aber noch häufiger umgebaut werden. Bis 1887 war er auf eine Tiefe von 4,25 m gebracht worden und so konnten, nachdem 1901 der St.-Lorenz-Kanal, der die Stromschnellen unterhalb des Ontariosees überwindet, ausgebaut war, Schiffe mit einem Tiefgang von 2,25 m, einer Länge von 78 m und einer größten Breite von 13,10 m von Montreal zum Lake Superior gelangen (vgl. LINDSAY, L. A., 1949).

In den Jahren 1913 bis 1932 wurde der Welland-Kanal zum Welland Ship-Canal erweitert, einem Kanal, der vom Ontariosee bis nach Thorold einer ganz neuen Route folgt, dann aber den alten Weg benutzt. Der große Vorteil dieses Schifffahrtsweges liegt nicht allein in der größeren Tiefe und Weite, sondern darin, daß jetzt eine Schleusentreppe mit nur 8 Schleusen genügt, um den Höhenunterschied zwischen Eriesee und Ontariosee zu bewältigen. Vorher mußten die Schiffe 26 Schleusen auf dieser Strecke passieren. Auf etwa 27 km ist der Welland Ship-Canal auf eine Tiefe von 8,20 m gebracht, die übrige Strecke ist 7,60 m tief. Im Rahmen des Ausbaues des „Great Lakes — St. Lawrence Deep Waterway“ soll die ganze Wasserstraße zunächst auf eine Tiefe von 8,20 m gebracht werden.

Die Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die Zahl der Schiffe, die im Jahre 1953 und 1955 mit größeren und kleineren Tauchtiefen den St. Marys River und Detroit River passierten. 1953 wurden in „Soo“ 303 Schiffe mit Tauchtiefen von 7,92 m (26 ft) gezählt; 1955 nur 1 Schiff dieses Tiefanges. Gewiß können unterschiedliche Tonnagenachfrage oder andere wirtschaftliche Gründe für den

Tabelle 13 :

Die Zahl der US-amerikanischen Schiffe, die den St. Marys River und Detroit River 1953 und 1955 passierten, geordnet nach ihrem Tiefgang (nach Great Lake Survey 1957)

| Tiefgang bei der Fahrt in m (feet) | Zahl der Schiffe | | | |
|--|------------------|--------|---------------|--------|
| | St. Marys River | | Detroit River | |
| | 1953 | 1955 | 1953 | 1955 |
| 7,92 (26) | 303 | 1 | 251 | 11 |
| 7,62 (25) | 856 | 745 | 711 | 827 |
| 7,32 (24) | 560 | 811 | 433 | 496 |
| 7,01 (23) | 1 434 | 1 218 | 1 195 | 1 138 |
| 6,71 (22) | 2 616 | 2 393 | 2 928 | 2 590 |
| 6,40 (21) | 2 784 | 2 504 | 3 437 | 2 952 |
| 6,10 (20) | 2 262 | 2 127 | 2 984 | 3 010 |
| 5,79 u. weniger | 16 327 | 15 021 | 18 183 | 16 744 |
| | 27 142 | 24 820 | 30 122 | 27 768 |

geringeren Anteil vollgeladener Schiffe 1955 ausschlaggebend sein. Es verdient aber in diesem Zusammenhang doch die Tatsache Erwähnung, daß während der Schifffahrtszeit 1953 die Wasserspiegel des Lake Superior und des Michigan-Huronsees stets höher als im Sommer 1955 waren. In einigen Monatsmittelwerten erreicht der Unterschied 1,3 ft.

Bei voller Ausnutzung der maximalen Ladelinie würden von der gegenwärtigen amerikanischen Handelsflotte auf den Großen Seen von 257 Frachtschiffen alle mindestens 21 ft Tauchtiefe und mehr laden können; 103 dieser Schiffe könnten bis zu einer Tauchtiefe von mindestens 22 ft, 50 mindestens 23 ft, 46 mehr als 24, 20 Schiffe mehr als 25 ft und 10 Schiffe könnten bis zu einer maximalen Tauchtiefe zwischen 26 ft und 26 ft 10 in. laden. Die letztgenannten Schiffe sind die größten auf den Seen verkehrenden Frachtschiffe. Sie haben eine Länge von mehr als 225 m und eine mittlere Kapazität bei maximaler Ausnutzung der Ladelinie von 26 800 tons bzw. bei Selbstentladern von 25 700 tons. Die erstgenannten Schiffe mit geringerem Tiefgang können etwa 6000 tons laden.

Mit den Wasserspiegel- und Abflußschwankungen verbinden sich für die Praxis die Schwankungen in der Energieerzeugung und in der verschiffbaren Tonnage. Für die Wissenschaft wird überdies die Frage nach dem Einfluß der Klimaschwankungen von Interesse. Die letztgenannte Frage konnte hier nur angedeutet werden, weil die entsprechenden Klimadaten noch nicht ausgewertet werden konnten.

Die Beziehung zwischen den Niederschlags- und Abflußmengen zu erfassen, ist ein wichtiges Problem in der amerikanischen Forschung. Es ist für

die Wasserkraftwirtschaft sehr vorteilhaft zu erfahren, daß sie auf Grund der diesjährigen Niederschläge mit dieser oder jener Energieerzeugung rechnen kann. Es sei nochmals daran erinnert, welche Komplikationen durch die Wasserabgabe an das Mississippigebiet, die maximal 10 000 cfs erreichten, verursacht wurden, wo doch auf der anderen Seite die jährlichen Abflusssmengen des St.-Lorenz-Stromes um 96 000 cfs differieren.

Man ist natürlich darum bemüht, im Gebiet der Great Lakes einen ausgeglichenen Abfluß zu erreichen und die flachen Stromstrecken und Stromschnellen zu beseitigen, um die Schifffahrt und die Wasserkraftnutzung zu fördern. Der Wasserspiegel des Lake Superior unterliegt bereits bis zu einem gewissen Grade seit 1922 der Kontrolle durch den Ausbau des St. Marys River bei Sault Ste. Marie. Der Niagara River ist ebenfalls seit einigen Jahren soweit unter Kontrolle, daß man die zum Schifffahrtskanal und zu den einzelnen Kraftwerkskanälen bzw. zu den Wasserfällen abzuzweigenden Wassermengen regeln kann. Um die Kontrolle des Abflusses aus dem Ontariosee bemüht man sich z. Z. in Verbindung mit dem Ausbau des „Great Lakes — St. Lawrence Deep Waterway“.

Vom Ausbau des St.-Lorenz-Stromes erwartet man eine weitere merkliche Belebung der Schifffahrt auf den Großen Seen und in Verbindung mit dem Ausbau sollen die Wasserkräfte des St.-Lorenz-Stromes genutzt werden.

Die Kanäle des St.-Lorenz-Stromes erlaubten bisher nur Schiffen mit einem Tiefgang von höchstens 4,27 Metern die Durchfahrt, während weiter landeinwärts die Schleusen und Kanäle zwischen den Seen bereits von Schiffen mit 6,40 m Tiefgang benutzt werden konnten. Das Projekt des St.-Lorenz-Großschifffahrtsweges sieht nach LINDSAY vor, die Kanäle auf 8,25 m Tiefe auszubauen. Das Ziel dieses Unternehmens ist, den größten Frachtschiffen der Binnenseen die Durchfahrt bis zum Atlantik und den Ozeanschiffen den Zugang zu den Binnenhäfen an den Großen Seen zu öffnen, der bisher durch die Untiefen des St.-Lorenz-Stromes versperrt war.

Am 26. Juni 1959 eröffneten Königin Elisabeth II. von England und Präsident Eisenhower den St.-Lorenz-Seeweg und seither können Ozeanschiffe von 25 000 Tonnen und 80 % aller Handelsschiffe der Erde die Binnenhäfen anlaufen und die ebenso großen Getreideschiffe der Seeflotte können zur Atlantikküste gelangen.

Schrifttum

- AYERS, J. C., ANDERSON, D. V., CHANDLER, D. C., und LAUFF, G. H.: Currents and Water Masses of Lake Huron (1954 synoptic Survey). Great Lakes Res. Institute (Mich.) Technical Paper Nr. 1, Div. of Res. (Ontario) Res. Rep. Nr. 35, 1956.
- BALLERT, A. G.: Commerce of the Sault Canals. In: Economic Geogr. 33, 1957, S. 135—148.
- , The major Ports of Michigan. In: Papers of the Mich. Academy of Science, Arts, and Letters, Vol. XXXV, 1949, veröff. 1951, S. 137—157.
- , The Lake Trade and Ports of Georgian Bay, Ontario. In: Papers of the Mich. Ac. of Sc., Arts and Letters, Vol. XXXIX, 1954, S. 283—300.
- BARTZ, Fr.: Das Fischereigebiet der Großen Seen in Nordamerika. In: Geographica Helvetica 1953, 4.
- BEATTY, F. W.: List of Water Powers in the Province of Ontario. Dep. of Lands and Forests, Toronto 1946.
- BRAUN, G.: Die Bedeutung des Verkehrswesens für die politische und wirtschaftliche Einheit Kanadas. Bonner Geogr. Abh., H. 16, 1955.
- BRETZ, J. H.: The stages of Lake Chicago, their causes and conditions. In: Americ. Journ. of Sc. 249, 1951.
- FLINT, R. F.: Glacial Geology and the Pleistocene Epoch. New York 1947.
- FLINT, R. F., and DEEVAY, E. S.: Radiocarbon Dating of late Pleistocene events. In: Americ. Journ. of Sc., 249, 1951.
- ohne Verfasser, Great Lakes Pilot, 1956, 1957, herausgegeben vom U. S. Lake Survey Corps of Engineers, U. S. Army, Detroit.
- HOUGH, J. C.: Final Report on the Project Pleistocene Chronology of the Great Lakes Region. Off. of Naval Res. Contract. Univ. Illinois 1953.
- HOUGH, J. H.: Lake Chippewa, a low stage of Lake Michigan indicated by bottom sediments. Bull. geol. Soc. Amer. 1955.
- KREBS, N.: Vergleichende Länderkunde. Stuttgart 1951.
- LINDSEY, G. A.: The Great Lakes — St. Lawrence Deep Waterway. General Engineering Branch. Dep. of Transport. Ottawa 1949.
- MCMAMEE, R. L.: The surface Waters of Michigan. Hydrology and qualitative Characteristics and Purification for public Use. Engineering Res. Bull. Nr. 16. Ann Arbor 1930.
- MENEFFEE, F. N.: The St. Lawrence Seaway. Ann Arbor 1940 (Rotaprint).
- MILLAR, F. G.: Surface Temperatures of the Great Lakes. In: Journ. Fish. Res. Bd. Can. 9 (7), S. 329—376. 1952.
- MOORE, SHERM.: Crustal movement in the Great Lakes Area. Bull. Geol. Surv. of U. S. Vol. 57, 697—710. 1948.
- PARDE, M.: Hydrologie du Saint Laurent et de ses affluents. In: Revue Canadienne de Géogr. Vol. II, 2—4. Montreal 1948.
- SEMPLE, E. C.: American History and its geographic Conditions. Boston 1903.
- , Influences of geographic environment. New York 1911.
- THOMAS, MORLEY, K.: Climatological Atlas of Canada. Ottawa 1953.
- ZUMBERGE, J. H., und POTZGER, J. E.: Pollen profiles, radiocarbon dating, and geologic chronology of the Lake Michigan Basin. In: Science, Vol. 121, S. 309—311. 1955.
- ohne Verfasser, Effects of an additional Diversion of Water from Lake Michigan at Chicago. A Letter from the assistant. Chief of Engineers for Civil Works Dep. of the Army, 85. Congress Senate Doc. Nr. 28. Washington 1957.