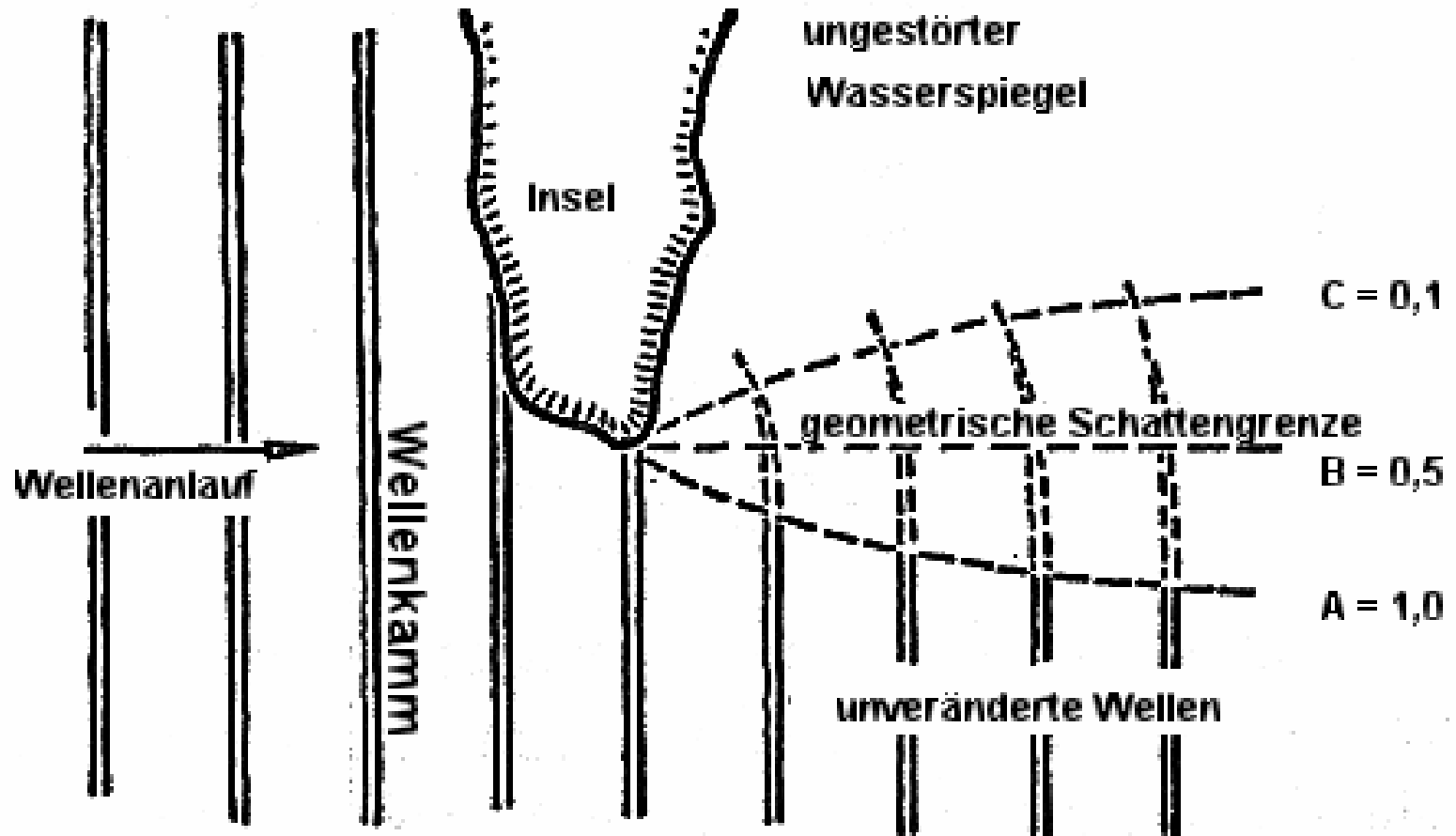
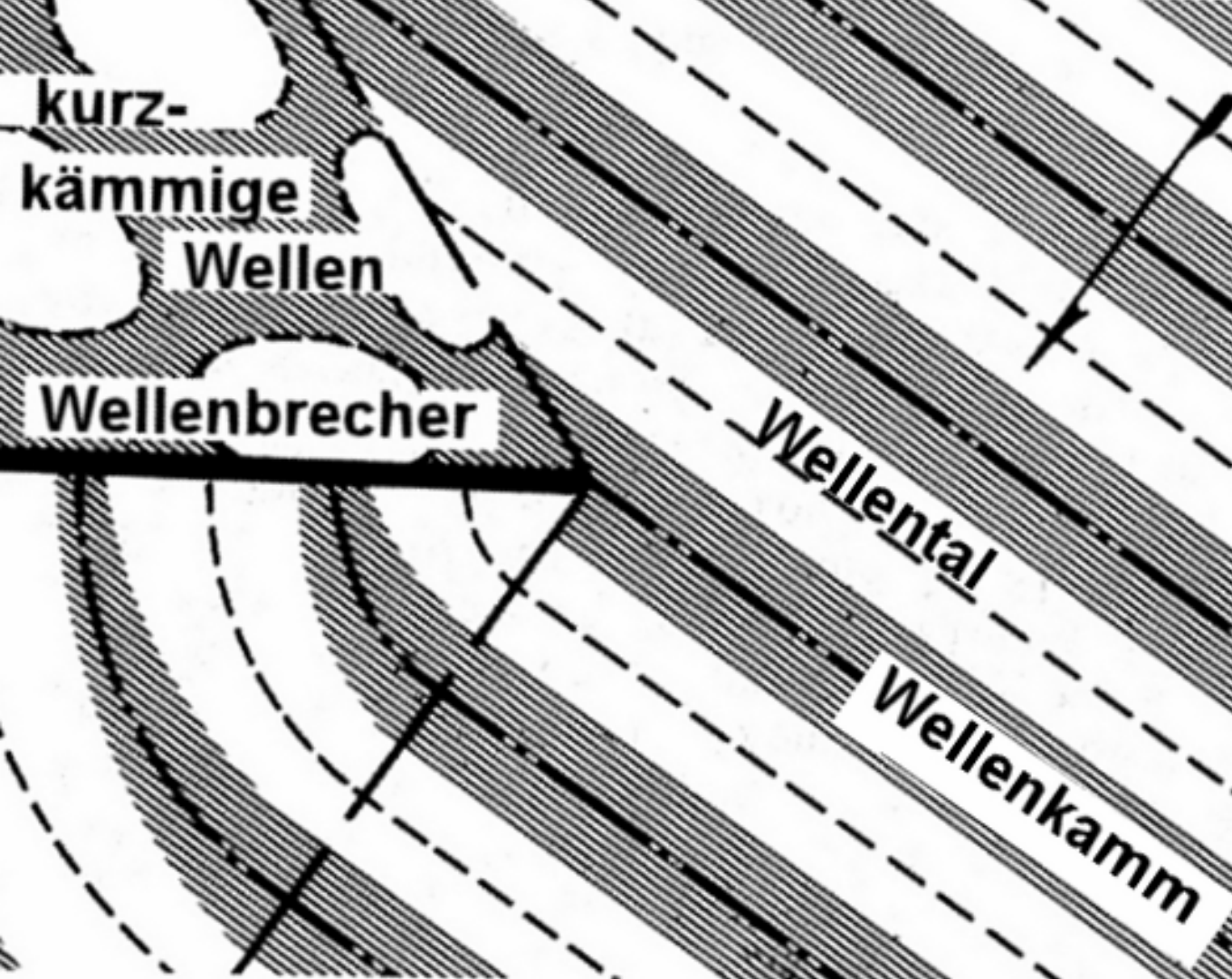




Ähnlich der Streuung des Lichtes an einer Kante breiten sich auch Wasserwellen hinter Hindernissen aus. Dabei gelangt Wellenenergie entlang der Kammrichtung aus dem Gebiet A - B in das Gebiet B - C. Die Wellenhöhe nimmt dabei von A nach C ab.



Die Diffraction ist eine Erscheinung, die sowohl im Tiefwasser als auch in Bereichen geringerer Wassertiefe beobachtet wird.

In dieser Skizze ist die Diffraction als *einzig*er Effekt dargestellt.

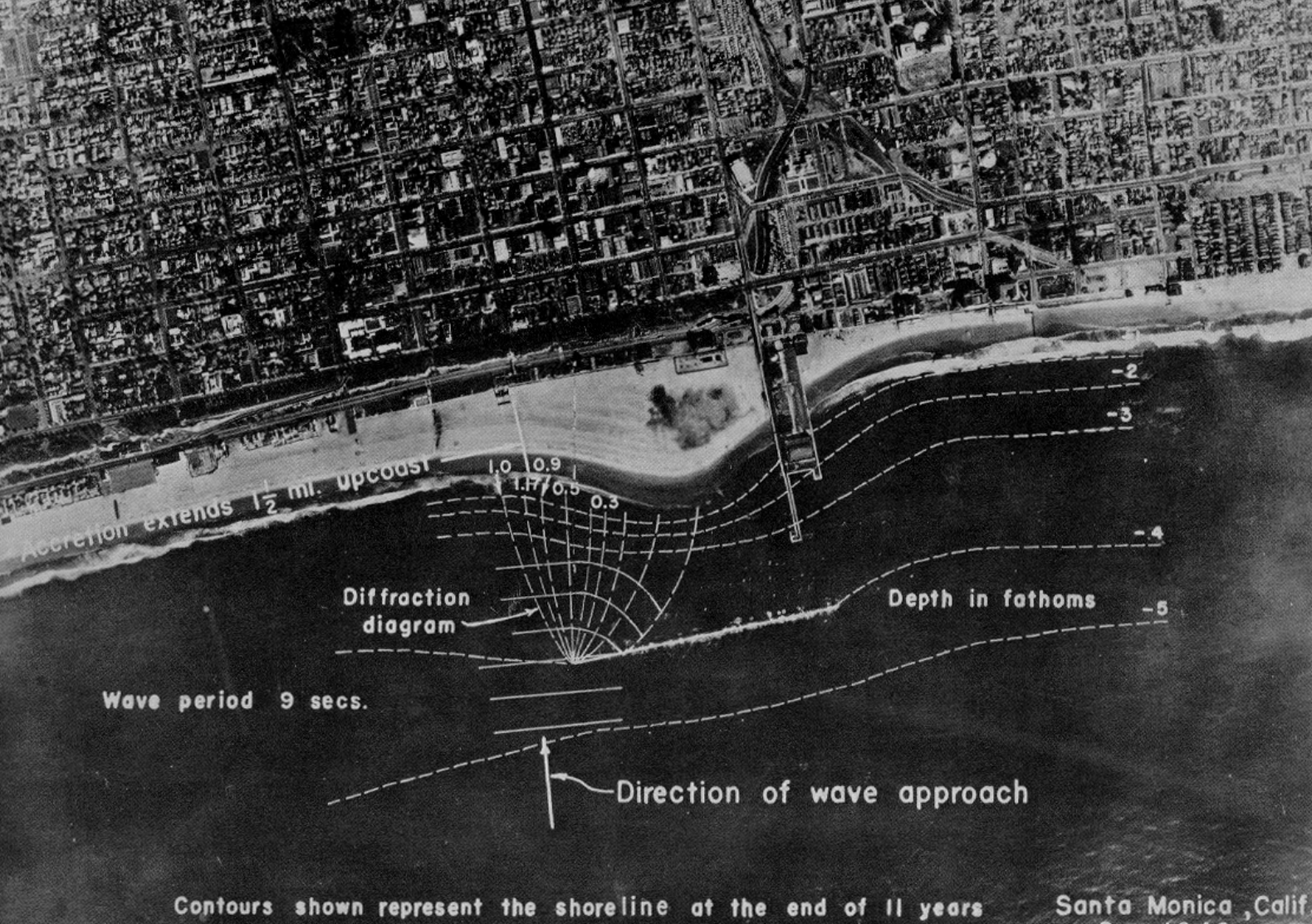
*Hinter* dem Bauwerk erscheinen die Wellenkämme "gebeugt". In Bauwerksnähe ist die Richtung des Wellenfortschritts etwa parallel zur Bauwerkslängsachse. Vor dem Bauwerk: Kabbelsee.



Insbesondere ist die *Diffraktion* für die Anordnung von Wellenbrechern und Molen vor Hafeneinfahrten von Bedeutung. Hier kommen *Refraktion* und *Reflexion* hinzu. Bei ungünstigen Anordnungen kann Refraktion der Auslöser von Hafenbeckensesonanzen sein. (→ Beckenschwingungen)

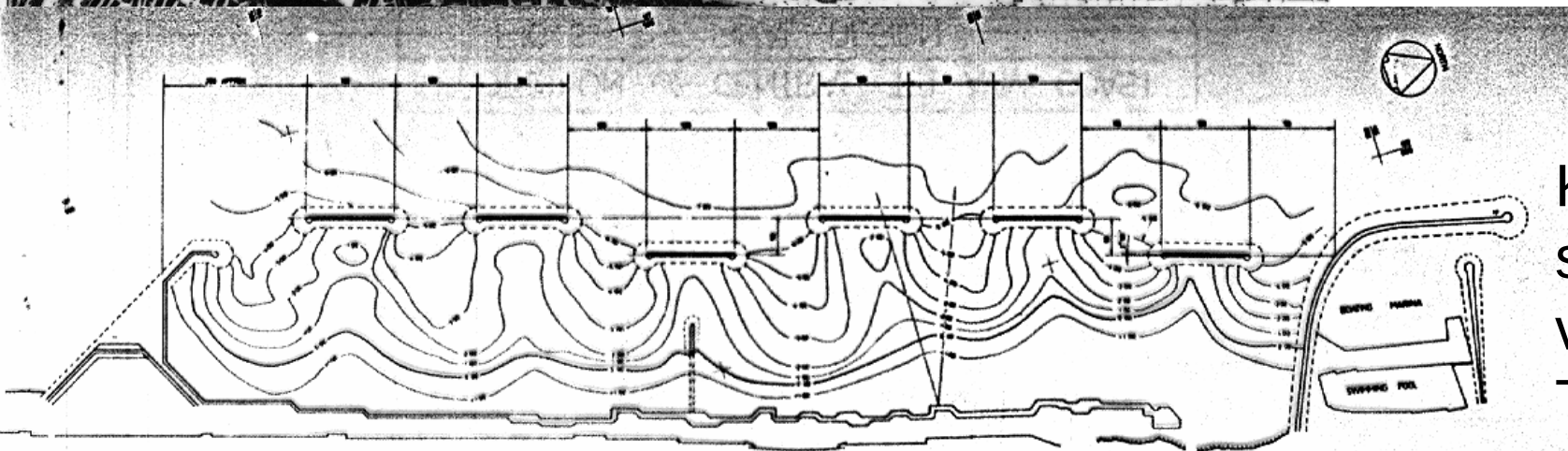
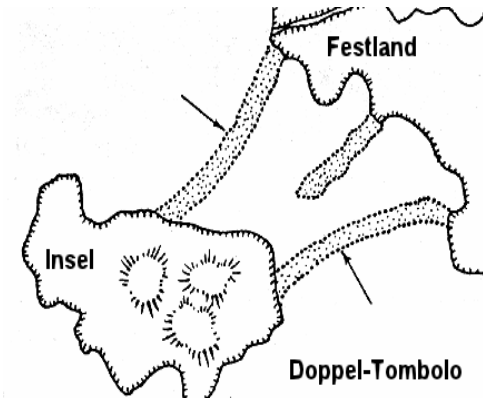
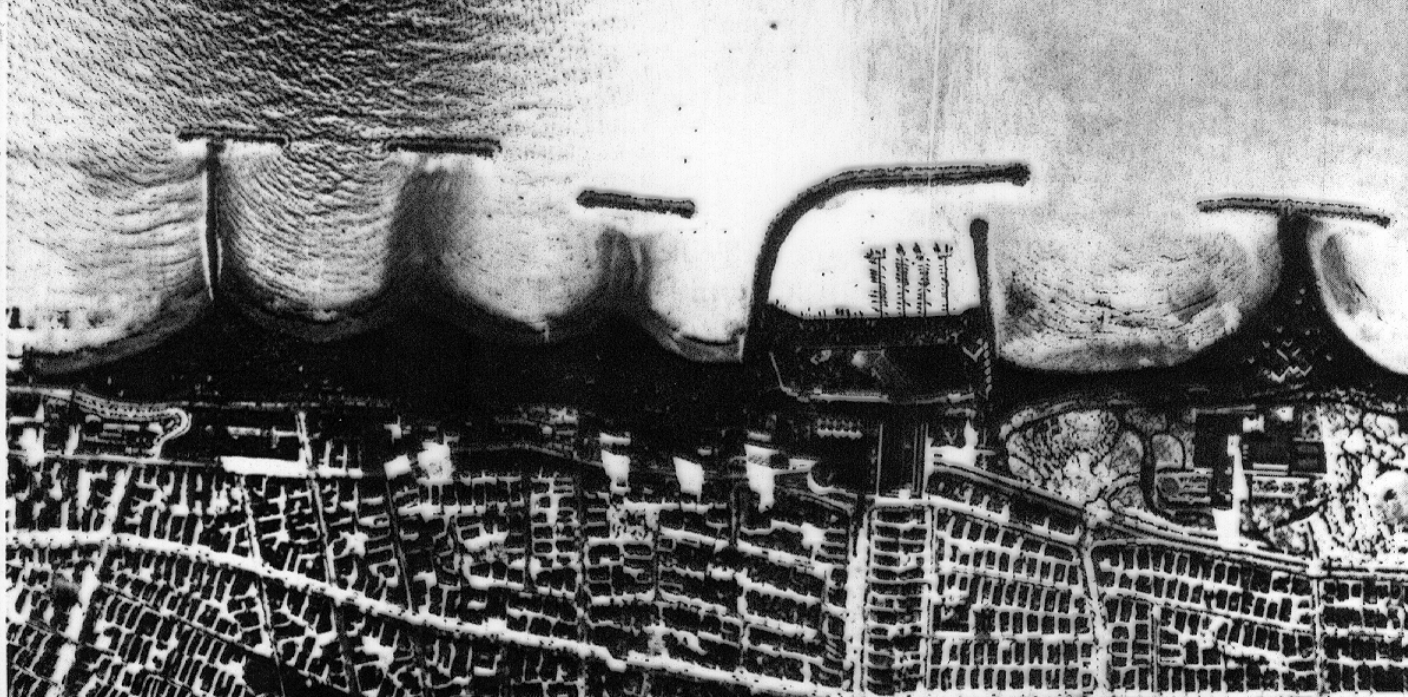


Tombolo-Effekt an der Lee-seite.



An den beiden Enden eines küstenparallelen Wellenbrechers transportieren gebeugte Wellen Feststoff (Sand) hinter das Bauwerk.  
Ggf. besteht auch die Gefahr der Versandung einer Hafeneinfahrt.

# Diffraktion und Tombolo- Effekt.

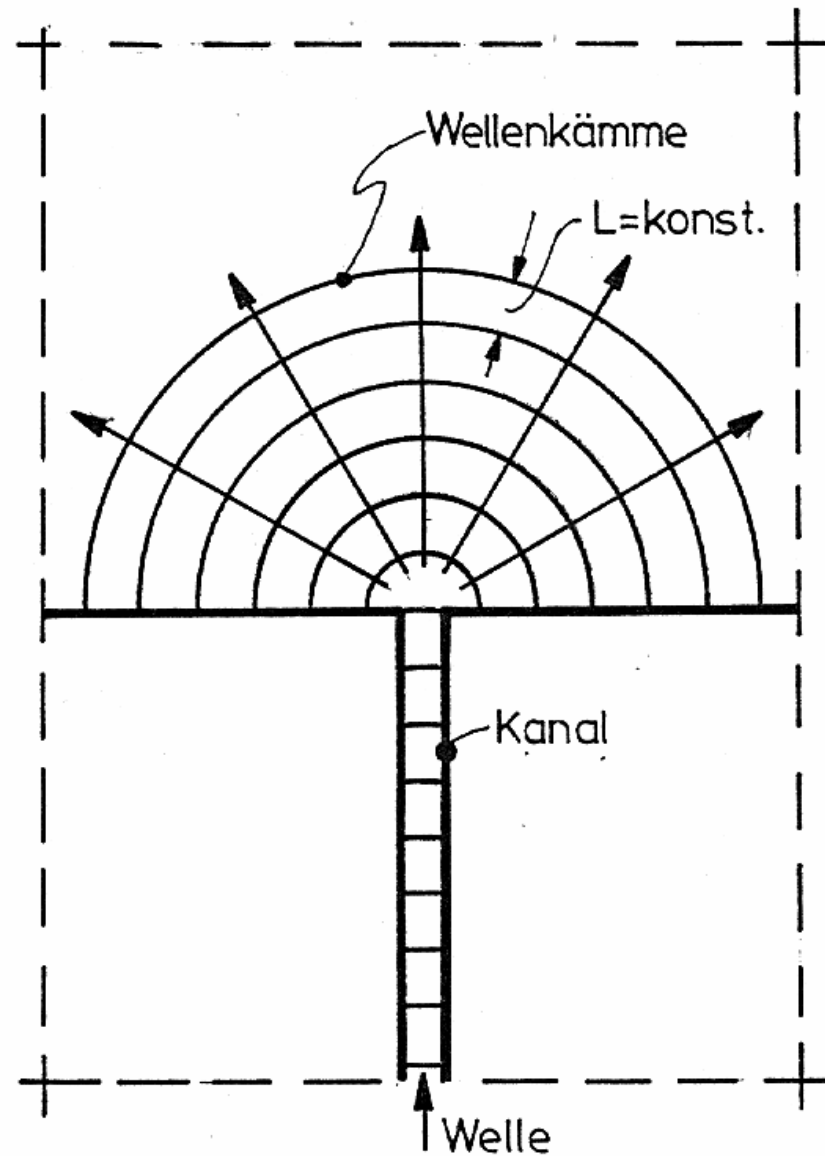


Küsten-  
schutz  
vor  
Tel Aviv

PROTECTION OF CENTRAL TEL AVIV COAST  
RESULTS OF HYDRAULIC MODEL TESTS  
DATE: 10.10.2011 BY: DR. F. BÜSCHING SCALE: 1:100

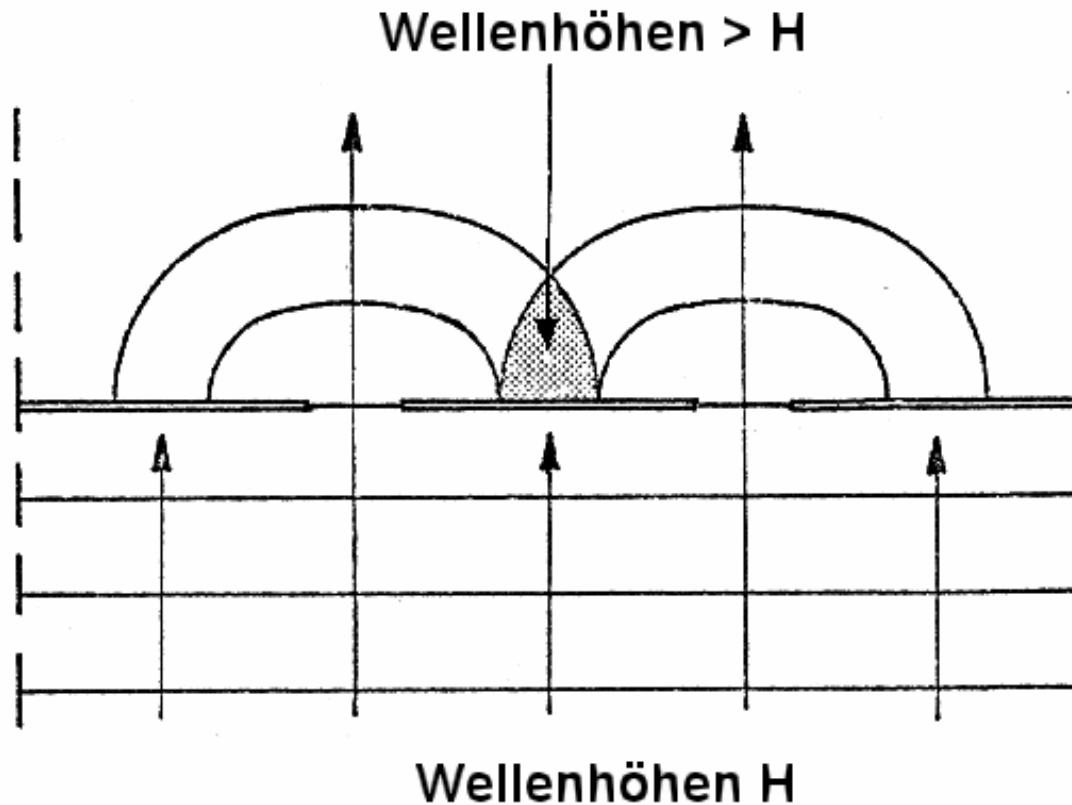


# Huygenssches Prinzip der Wellenausbreitung



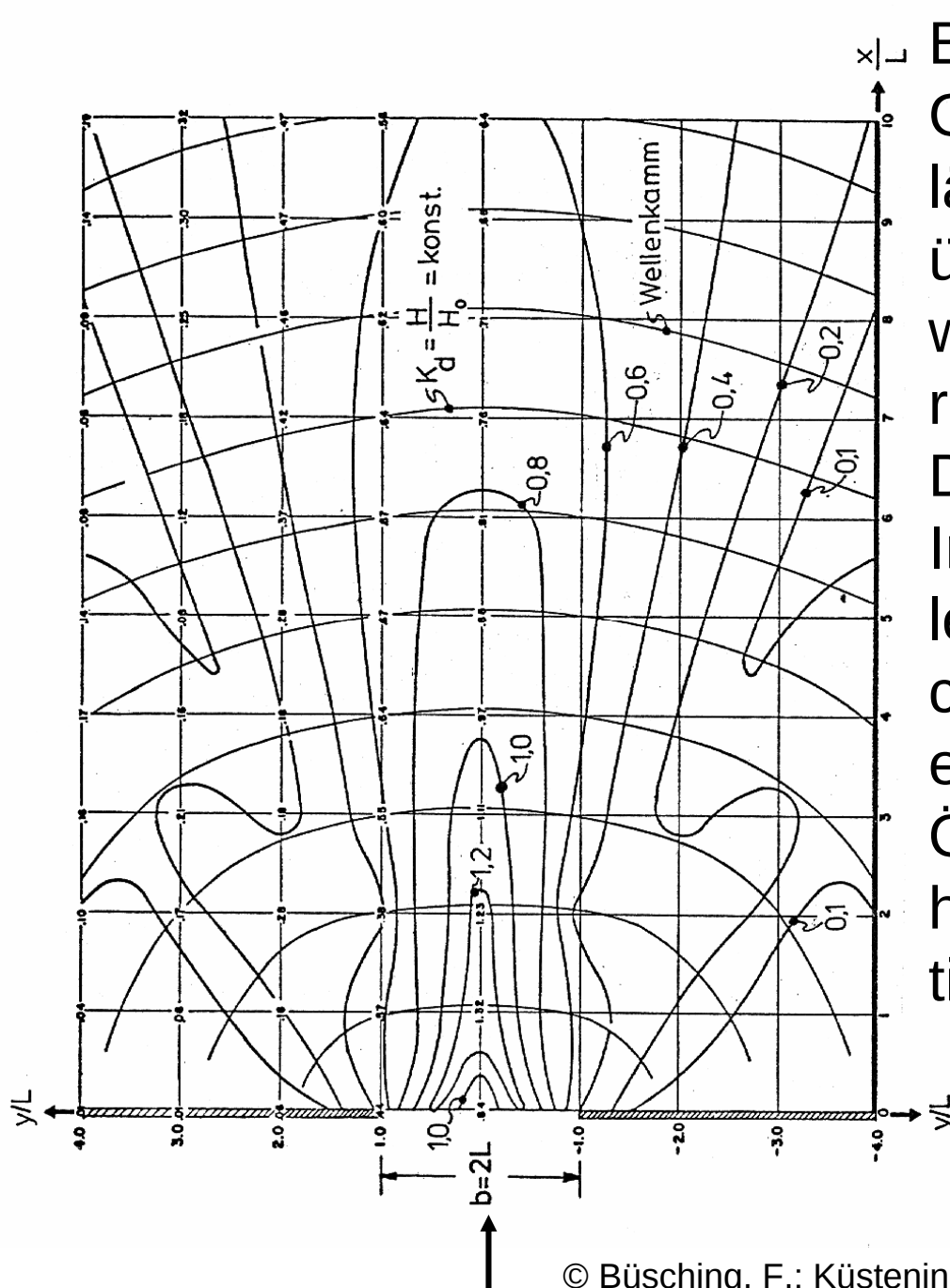
Diffraktion liegt auch bei dem Fall des Austretens einer Welle aus einem Kanal in ein Becken vor, dessen Wassertiefe etwa konstant sein möge. Die Beugung erfolgt hier an den Endkanten des Kanals.

Bei *sehr schmalem* Austritt entstehen *annähernd konzentrische* Ringwellen, deren Höhen mit zunehmender Entfernung abnehmen. Dabei verteilt sich die Wellenenergie senkrecht zur Wellenausbreitrichtung entlang des Kammes. Da der Kamm länger wird, muss die Wellenhöhe abnehmen. (→ Energiesatz)



Bei größerer Austrittsbreite entstehen durch die Beugung an den beiden Kanten (bzw. durch das Fehlen der seitlichen Begrenzungen) annähernd *elliptische* Wellen.

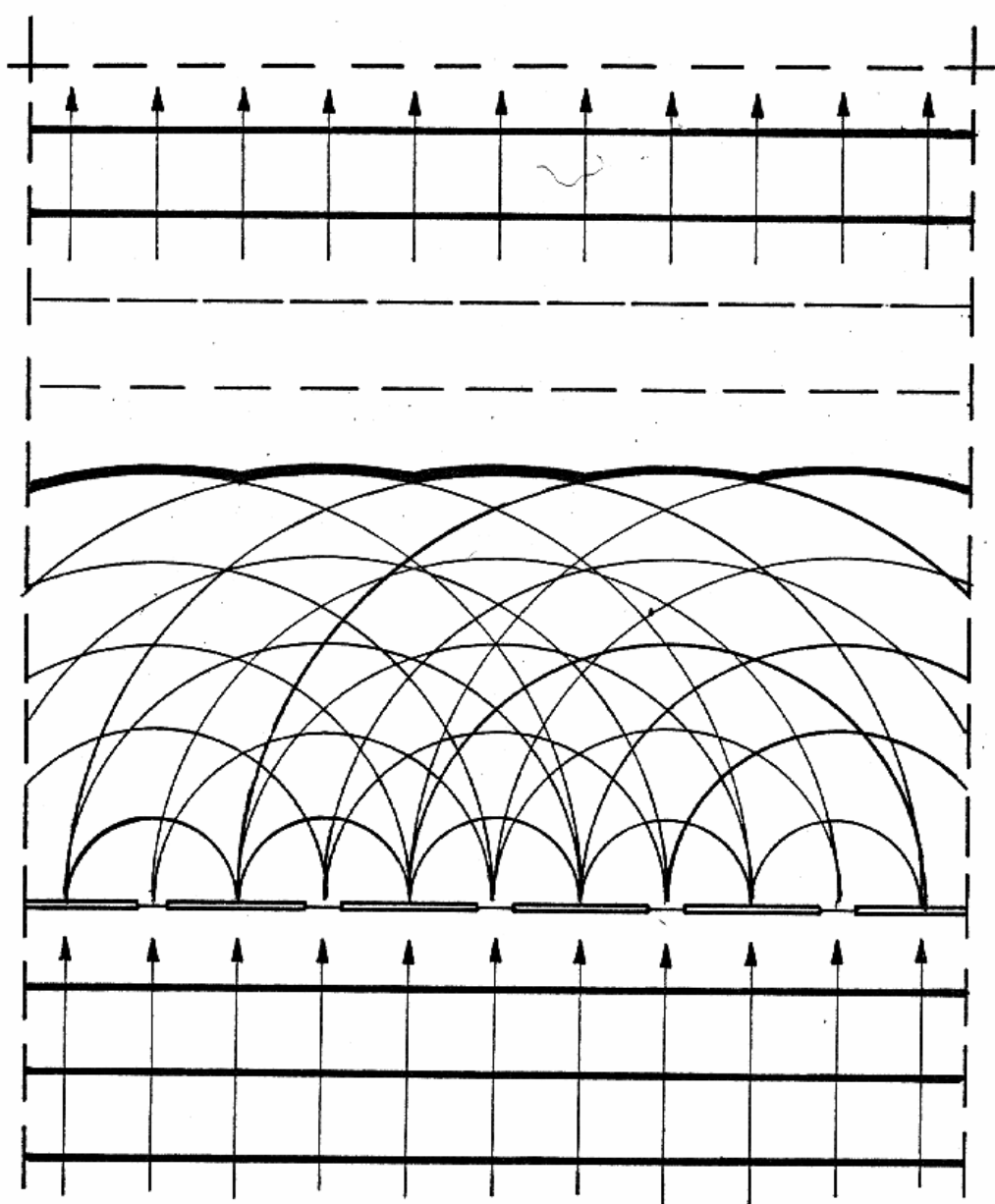
Durch Interferenzen können in Diffraktionsgebieten Wellenhöhen entstehen, die größer sind als die Ausgangswellenhöhe  $H$ .



Bei Öffnungsweiten in der Größenordnung der Wellenlänge (oder einem Vielfachen) überlagern sich die Beugungswirkungen beider Kanten bereits zu sehr komplizierten Diffraktionsbildern.

Im Bild sind außer den Wellenfronten noch die Linien gleicher Wellenhöhe als  $k_d = \text{const.}$  eingetragen. Ist  $H_0$  die an der Öffnung ankommende Wellenhöhe, wird die örtlich resultierende Wellenhöhe:  $H = k_d \cdot H_0$

Hier etwa  $\max k_d = 1,3$  im zentralen Wellenstrahl.



Neue Wellenfront

Überlagerung von  
Elementarwellen

Wand mit  
Schlitz

ankommende Wellen

Nach dem Huygens'schen Prinzip wird die Wellenausbreitung durch *Überlagerung kreisförmiger Elementarwellen* beschrieben. So entsteht hinter einem Hindernis mit gleichen Öffnungsabständen wieder eine geradlinie Wellenfront.

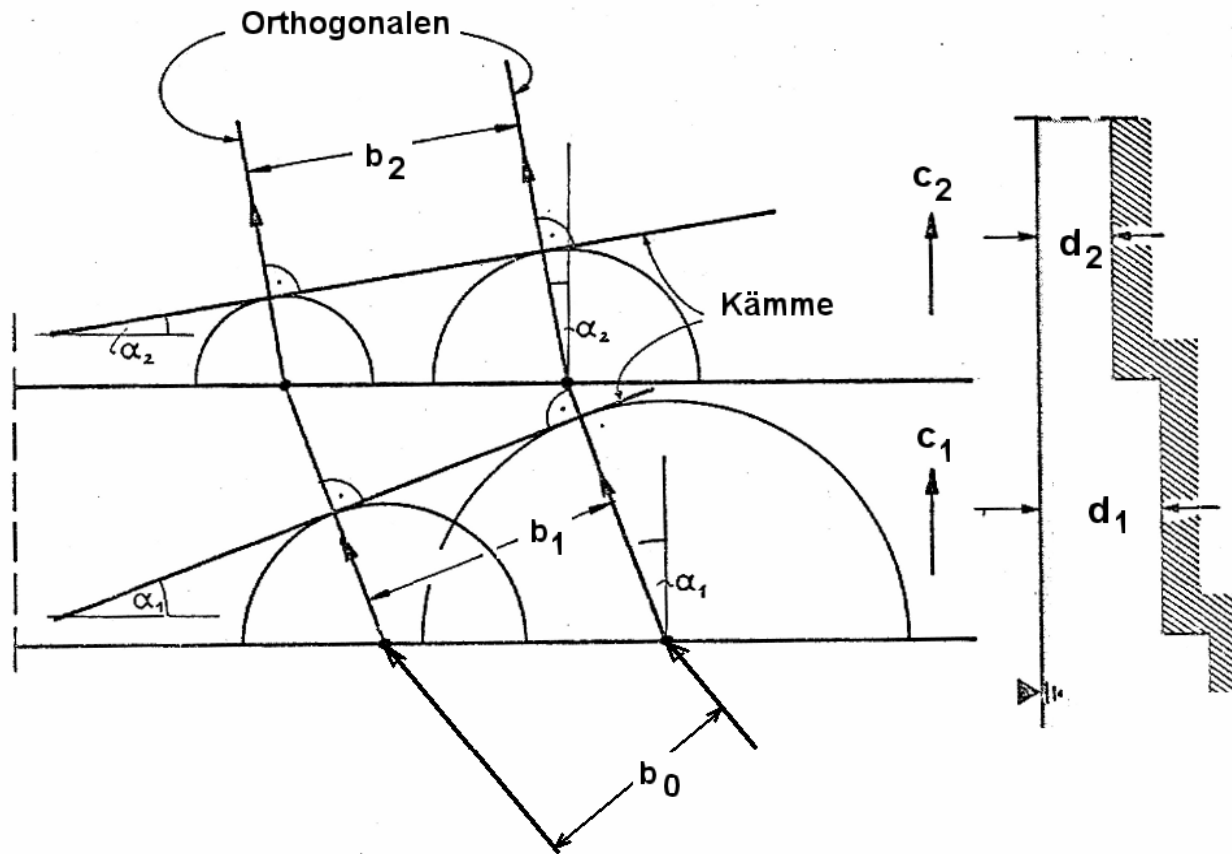


## Refraktion

Die Wellenrichtung wird umso stärker normal zu den Tiefenlinien eingebeugt je geringer die Wassertiefe wird. Das von anderen Wellen bekannte, nach SNELLIUS benannte Brechungsgesetz gilt auch für Wasserwellen. Die Richtungsänderung der Wellen kann auf die Abhängigkeit der Wellenfortschrittschwindigkeit von der Wassertiefe zurückgeführt werden.

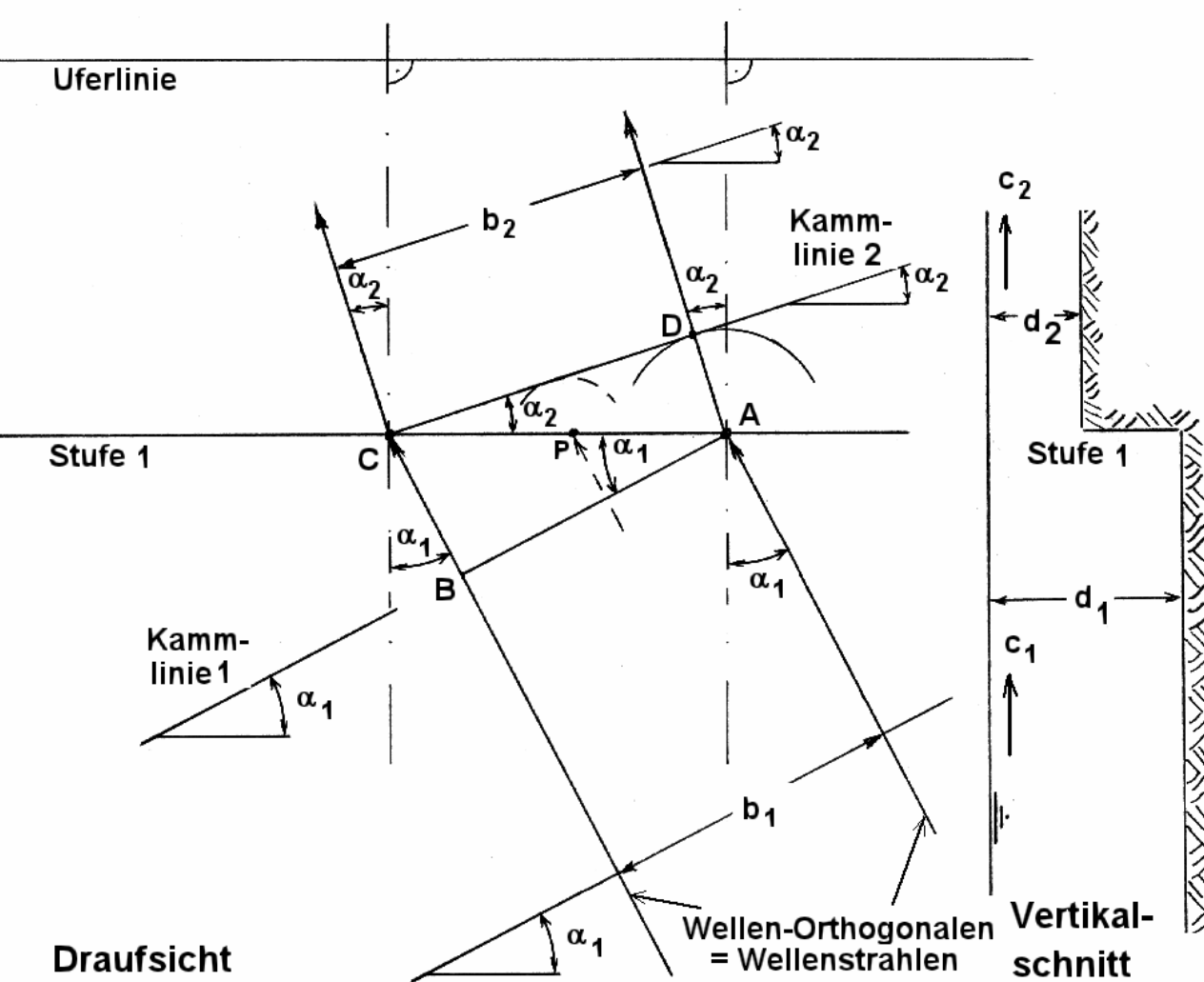


Wellen-Orthogonalen



Seewärts der Tiefenlinie  $d = L/2$  ist die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit von der Wassertiefe unabhängig. Refraktion findet nicht statt.

Der Prozess der Refraktion wird durch eine diskontinuierliche Tiefenabnahme genähert: Gelangen Wellen der Schnelligkeit  $c_i$  an einer Stufe  $i$  unter dem Winkel  $\alpha_i$  in ein Gebiet geringerer Wassertiefe  $d_{i+1} < d_i$ , erfolgt Brechung der Wellen-Orthogonalen zur jeweiligen Lotlinie der Stufe derart dass  $\alpha_{i+1} < \alpha_i$ .



Zwischen A und C (z.B. bei P) auftreffende Strahlen verursachen ebenfalls Ringwellen. Zum Zeitpunkt des Auftreffens des linken Strahls bei C ergibt sich die Kammlinie 2 als Tangente (C-D) an die Ringwellen.



In *derselben* Zeitspanne wird vom rechten Wellenstrahl die Strecke AD und vom linken Wellenstrahl die Strecke BC zurückgelegt.

Mit der Strecke AC = a, der Strecke BC ~ c<sub>1</sub> und Strecke AD ~ c<sub>2</sub> ergeben sich in dem aus zwei rechtwinkligen Dreiecken bestehenden Poligon A-B-C-D die folgenden Kreisfunktionen:

$$\begin{array}{ll} \sin \alpha_1 = \frac{c_1}{a} & \cos \alpha_1 = \frac{b_1}{a} \\ \sin \alpha_2 = \frac{c_2}{a} & \cos \alpha_2 = \frac{b_2}{a} \end{array} \quad \text{und}$$

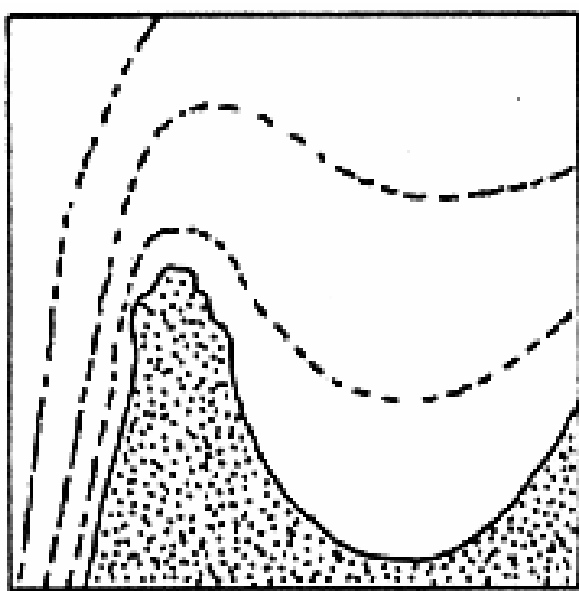
und weiterhin die Verhältniswerte des *Snellius'schen* Brechungsgesetzes zu:

$$\boxed{\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{L_1}{L_2}} \quad \text{und} \quad \boxed{\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{b_1}{b_2}}$$

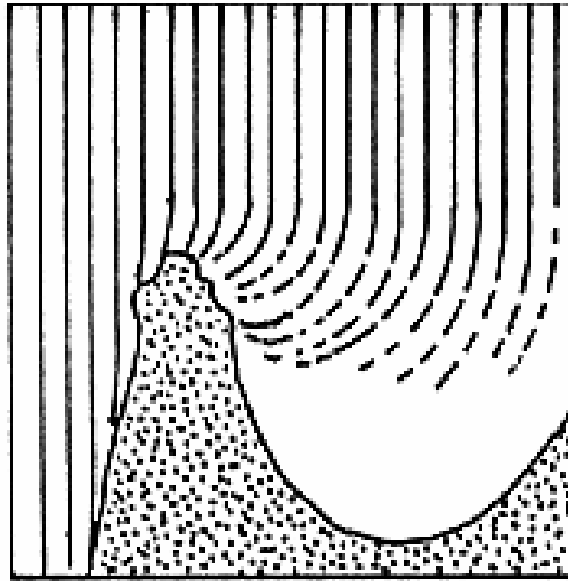


Folgerungen:

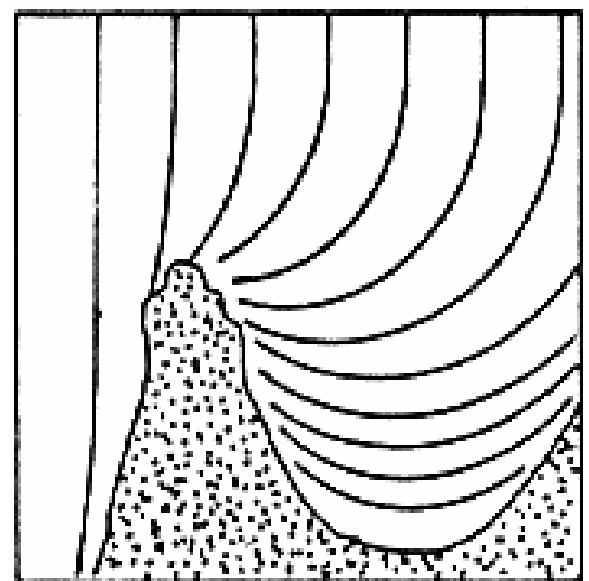
Seewärts der Tiefenlinie  $d = L/2$  ist die Wellenfortschritts-  
geschwindigkeit von der Wassertiefe unabhängig. *Refraktion* findet  
hier nicht statt. Lange Wellen können demnach über einer ent-  
sprechenden Wassertiefe von der Refraktion betroffen sein,  
während kurze Wellen weitgehend vom Boden unbeeinflusst  
bleiben, vergl. Wellenausbreitung hinter einem Kap:



**Tiefenlinien  
an einem Kap**



**Kurze Wellen**  
Nur Diffraktion

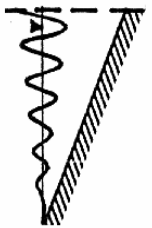
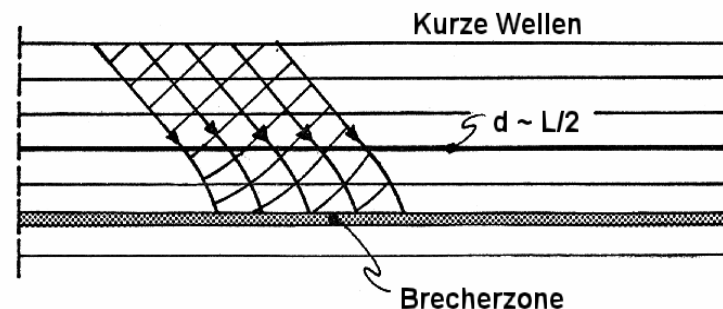
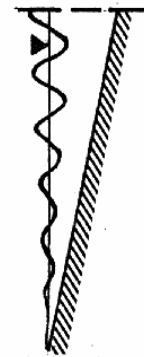
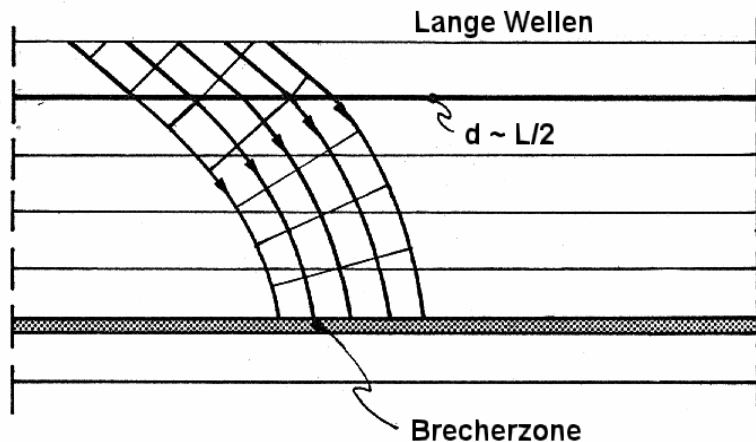


**Lange Wellen**  
Diffraktion und  
Refraktion



Bei uferparallelen Tiefenlinien wären die Wellenkämme an der Uferlinie ( $d = 0$ ) parallel und die Orthogonalen dazu senkrecht, wenn nicht vorher das Wellenbrechen einsetzen würde.

Bei schräger Wellenanlaufrihtung gibt es dementsprechend immer noch eine küstenparallele Richtungskomponente, die die Ursache für eine küstenparallele “Brandungsströmung” darstellt.





Zu der Aufsteilung der Wellen im Flachwasser, die oben bezüglich der *normalen* Wellenanlaufrihtung behandelt worden war, vergl. Wellentransformation (*Shoaling*), kommt bei der Refraktion noch der Einfluss des veränderlichen Abstandes  $b$  zwischen den Wellen-Orthogonalen hinzu.

Wird der Satz von der Erhaltung der Energie angewandt in der Form:

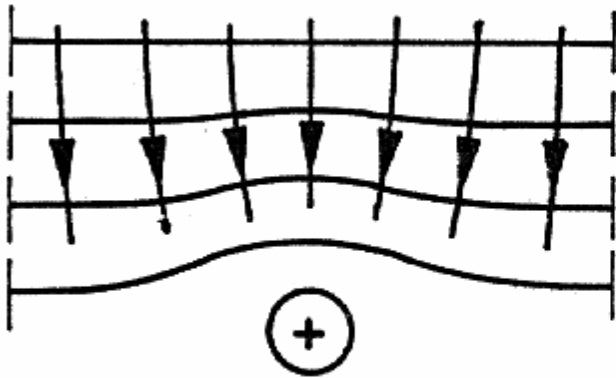
$$E = \frac{\gamma}{8} \cdot H_0^2 \cdot L_0 \cdot b_0 = \frac{\gamma}{8} \cdot H^2 \cdot L \cdot b$$

ergibt sich:

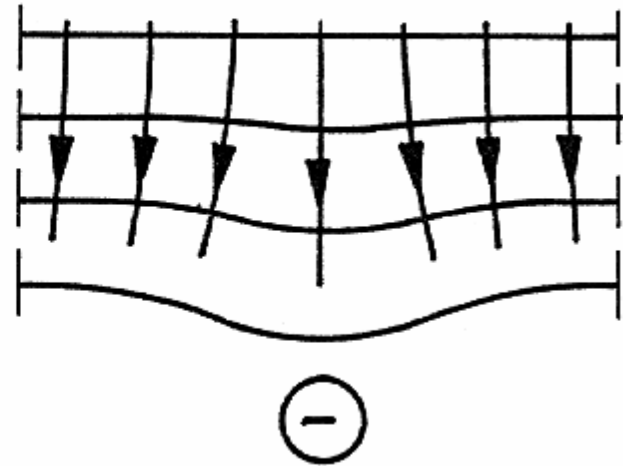
$$H = H_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \frac{c_0}{c}} \cdot \sqrt{\frac{b_0}{b}} = H_0 \cdot k_s \cdot k_r$$

Bei zwei Wellen im Flachwasser:

$$H_2 = H_1 \cdot \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \cdot \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad \text{und mit } c = \sqrt{g \cdot d} : \quad H_2 = H_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{d_1}{d_2}} \cdot \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$



Bei höftartiger Unterwas-  
sertopographie tritt mit  
 $b_2 < b_1$  eine Konzentration  
der Wellenenergie auf.

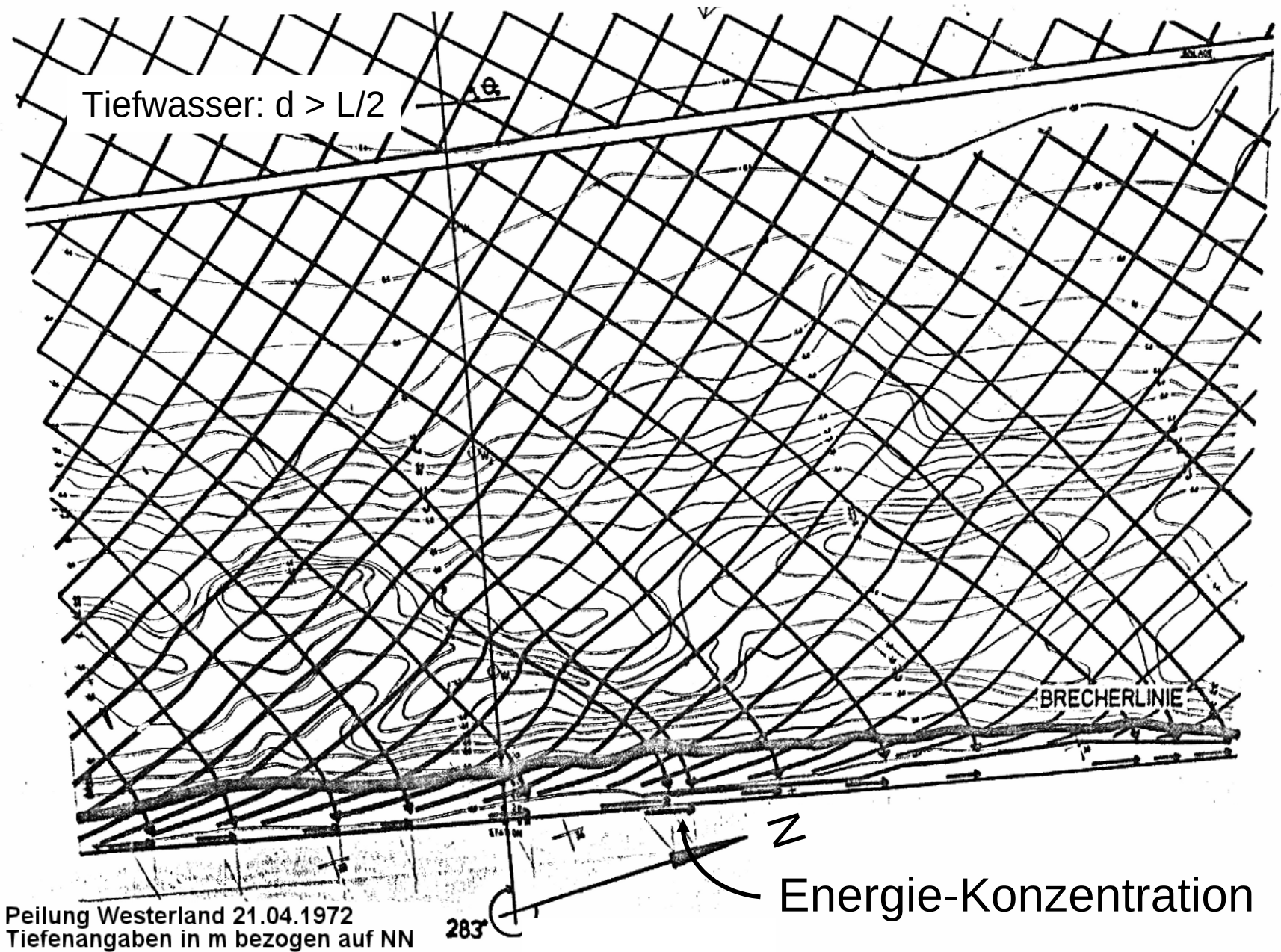


Bei buchtartiger Unterwas-  
sertopographie tritt eine  
Verminderung der Wellen-  
energie auf.

Für die Konstruktion von Refraktionsplänen, die insbesondere Aus-  
kunft über besonders gefährdete Küstenabschnitte geben, sind ver-  
schiedene Verfahren bekannt. Die Verfahren versagen jedoch, so-  
bald die Unterwassermorphologie durch Formen gekennzeichnet  
ist, deren horizontale Abmessungen kleiner sind als die Wellen-  
länge.



Tiefwasser:  $d > L/2$



Peilung Westerland 21.04.1972  
Tiefenangaben in m bezogen auf NN

283°

Energie-Konzentration