

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Schweizerische Bauzeitung |
| Herausgeber: | Verlags-AG der akademischen technischen Vereine |
| Band: | 90 (1972) |
| Heft: | 34 |
| Artikel: | Geotechnische Untersuchungen für die Erweiterung des Utoquais in Zürich: Probleme in einem labilen Ufergebiet und ihre Lösung |
| Autor: | Schindler, G. / Gautschi, M.A. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-85294 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

c) Der Verlauf der Kluftflächen

Der Verlauf der oberflächenparallelen Entspannungsklüfte in den steilen Ostwänden des Mönchsberges war schon mit freiem Auge verhältnismässig leicht auszunehmen. Im Baubereich ist ein Grossteil der abgelösten Platten durch den Aushub für die Bühne bereits in Wegfall gekommen. Einige Reste von solchen Platten, besonders hoch oben an der Kante des Voreinschnittes des Neutortunnels, wurden absichtlich belassen, um die Symmetrie dieses Voreinschnittes nicht zu zerstören. Diese Platten wurden mit Felsankern gesichert.

Kritisch aber war das Umbiegen der grösseren Entspannungsklüfte bzw. der von ihnen begrenzten Felsplatten zunächst am Fusse der Bergwand in die Felsterrasse und dann ihr neuerliches Abbiegen in die Tiefe, parallel zum verschütteten tieferen Salzachtal. Es war ja zu erwarten, dass sich diese Entspannungsplatten bereits mehr oder minder voneinander getrennt hätten und dass sie im Falle einer Belastung gegen die weiche Schluffausfüllung des Tales ausweichen könnten. Nun wären die südöstlichen Pfeiler des Bühnenhauses gerade auf die Schichtköpfe solcher Platten zu stehen gekommen. Es wurden vier Brunnen mit Tiefen von 11 bis 12 m abgeteuft (sie dienten später zum Teil zur Aufnahme der Gegengewichte der Orchesterpodien). Diese Brunnenschächte haben die warnende Voraussage des Geologen voll bestätigt: Überall zeigten sich die steilstehenden, offenen, zum Teil wasserführenden Felsklüfte (Bild 6); ein Beweis dafür, dass sich diese Entspannungsplatten tatsächlich schon vom Felsmassiv abgelöst (bzw. sich ihre Trennflächen geöffnet) hatten und dass ihre Belastung durch die südöstlichen Bühnenhauspfeiler mit einer Stützenlast von 1800 t nicht mehr in Frage kam.

Es musste also die Fundierung des Bühnenhauses umgeplant werden. Nach dem Vorschlag von Prof. O.K. Fröhlich wurde diese Pfeilergruppe des Bühnenhauses auf kräftige Stahlbeton-Konsolen gestellt, die tief in den Fels eingreifen. Übrigens wurden ihre Holme auf den Schluffbereich verlängert und dort auf Ramm-Pfähle gestellt. Die Fundamente dieser Bühnenpfeilergruppe wurden überdies durch mächtige lange Betonanker (zwei mit 6 m und einer mit 9,50 m Länge) gegen die Hinterwand des Mönchsberges verhängt (Bild 10).

Nach dieser geänderten Fundierung ruht nun also das Bühnenhaus vollkommen auf Fels, der Zuschauerraum (der innerlich ganz umgebaute ehemalige Marstall) mit Streifenfundamenten auf Schluffboden. Ähnliche Kragkonstruktionen wurden auch an Nebengebäuden durchgeführt, so am Künstlergärtnerobentrakt und am Personaltrakt (Darstellung der statischen Konstruktion durch Ernst Mühlberg in [4].)

Literaturverzeichnis

- [1] Crammer H.: Überschiebungen und Formenwelt bei Salzburg. I. Die Berge der Stadt Salzburg. Bibliothek. Geogr. Handbücher NF, Festband Albrecht Penck, Stuttgart 1918.
- [2] Kieslinger A.: Restspannung und Entspannung im Gestein. Geologie und Bauwesen, 24, 95-112, Wien 1958.
- [3] Kieslinger A.: Die nutzbaren Gesteine Salzburgs. 436 pp, Verlag «Das Bergland-Buch», Salzburg 1963.
- [4] Das neue Salzburger Festspielhaus. Festschrift zur Eröffnung am 26. Juli 1960 (darin besonders die Beiträge von O.K. Fröhlich, A. Kieslinger, E. Mühlberg).

Adresse des Verfassers: Dr. Alois Kieslinger, o. Professor T. H. Wien, Schönlatergasse 5, A-1010 Wien.

Geotechnische Untersuchungen für die Erweiterung des Utoquais in Zürich

Probleme in einem labilen Ufergebiet und ihre Lösung

Von G. Schindler, Oetwil am See, und M. A. Gautschi, Pfaffhausen

DK 550.8.001.2

Vor der Erweiterung des Utoquais wurden zur Abklärung der geotechnischen Verhältnisse zahlreiche Bohrungen, Flügelversuche, Probepfähle und Laboruntersuchungen von Bodenproben ausgeführt. Für die Beurteilung der Stabilität der Ufergebiete erwies sich insbesondere der Verlauf der Grenze zwischen den siltig-sandigen eiszeitlichen Seeablagerungen und dem überlagernden, labilen Komplex als wichtig. Dieser besteht aus Seekreide und Seebodenlehm, wobei eine Wechsellagerung beider Lockergesteinsarten besonders ungünstige Eigenschaften aufweist. Seekreide in überkonsolidiertem Zustand verhält sich wie ein Reibungsmaterial, wird sie dagegen im normalkonsolidierten Zustand rasch beansprucht, so reagiert sie ähnlich einem rein kohäsiven Boden.

Je nach Verlauf der Untergrenze des labilen Komplexes entstehen bei Schüttungen massive Setzungen, können Seekreide und Seebodenlehm in grossen Paketen seitlich ausweichen oder bilden sich Rutschungen. Eine quantitative Erfassung der Stabilitätsverhältnisse ist infolge des wirren Aufbaus des bereits gestörten Untergrundes nicht möglich. Alle Überlegungen sprachen am Utoquai aber gegen Schüttungen, so dass eine auf Pfählen fundierte Kunstaute errichtet wurde. Auf Grund der günstigen Ergebnisse einer Probebelastung und zur Vermeidung hoher Porenwasserspannungen wurden Bohrpfähle gewählt, welche in die eiszeitlichen Seeablagerungen abgestellt wurden.

Einleitung

Das Tiefbauamt der Stadt Zürich beabsichtigte, das Utoquai zwischen dem Hotel Eden im Seefeld und dem Bellevue um rund 15 m zu verbreitern, dies auf eine Länge

von rund 600 m. In der Folge wurde das geotechnische Büro Dr. A. von Moos mit der geotechnischen Voruntersuchung und der Beratung während des Baues betraut. Projektierung, Planung und Bauleitung lagen in den Händen des Ingenieurbüros Bernardi in Zürich.

Zunächst war die Frage abzuklären, ob eine Schüttung ohne Gefährdung der heutigen Uferpartien möglich sei oder ob eine Pfählung notwendig werde. An älteren Unterlagen standen Pläne für die Quaiauffüllungen durch Stadtgenieur Bürkli in den Jahren 1881 bis 1888 zur Verfügung, ferner Untersuchungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH Zürich, VAWE, für das Projekt Seepark (Bericht vom 9.8.1958) und einzelne Sondierungen für andere Bauvorhaben. Als Ergänzung wurden in den Jahren 1967 und 1968 8 Bohrungen und 7 Flügelsondierungen abgeteuft, zudem wurden durch die Firma W. Stäubli AG in Zürich 6 Probepfähle aus Holz gerammt. Zwei von diesen wurden einer Probebelastung bis zu je 50 t unterworfen. Auf der Sechseläutenwiese erstellte die Swissboring einen Bohrpfahl von 56 cm Durchmesser, an welchem Probebelastungen bis zu 320 t ausgeführt wurden. Im weiteren wurden Echolotprofile des Seebodens aufgenommen und zahlreiche gestörte wie auch ungestörte Proben im Erdbaulaboratorium der VAWE untersucht. Wichtige Ergänzungen ergaben die Beobachtungen während des Baues und ferner spätere Untersuchungen unseres Büros für den projektierten Umbau von Bellevue und Quaibrücke. Das erweiterte Utoquai ist ausschliesslich den Fussgängern reserviert und wurde am 22.4.71 der Öffentlichkeit übergeben.

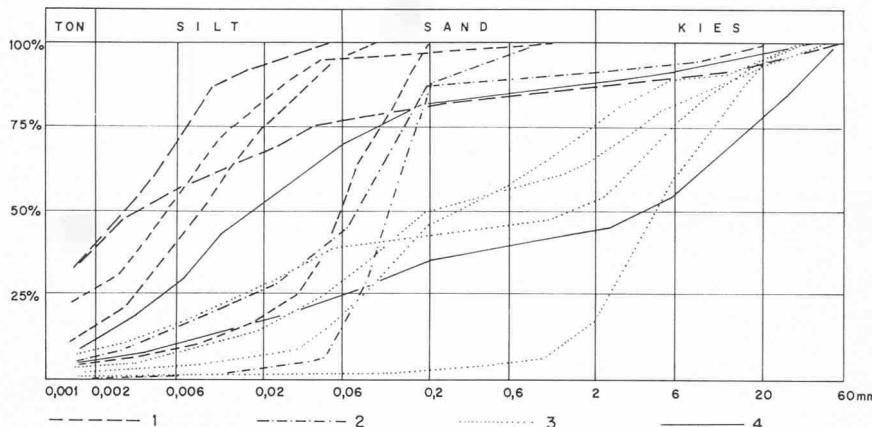


Bild 1. Kornverteilung einiger typischer, eiszeitlicher Seeablagerungen. Man beachte die Knickung vieler Summationskurven, welche auf gleichzeitige Materialzufuhr aus verschiedenen Sedimentationsquellen zurückzuführen ist.
1 feinkörnige Seebodenablagerungen, z.T. Kies von Eisbergen, 2 Ablagerungen in turbulentem Wasser, 3 Ablagerungen in unmittelbarer Nähe der Gletscherfront, 4 Grundmoräne.

1. Geologie

Obwohl das untersuchte Gebiet in einem zentralen Teil der Stadt Zürich liegt, war es doch sehr wenig bekannt, dies schon deswegen, weil die heutige Oberfläche keinen Aufschluss über die sehr unruhigen und recht komplexen Verhältnisse im Untergrund gibt.

a) Fels und glazial vorbelasteter Untergrund

Die Felsoberfläche liegt im Gebiet der ETH, des Zeltwegs und von Tiefenbrunnen hoch, sinkt aber gegen das Seebecken hin in mehreren Stufen rasch ab und dürfte bereits unter dem Utoquai im Minimum 70 m tief liegen. Auch die glazial vorbelasteten Ablagerungen – Moräne und ältere eiszeitliche Seeablagerungen – liegen derart tief, dass sie am Quai auch von der längsten, 64,5 m tiefen Bohrung nicht erreicht wurden. Erst im Gebiet der Quaibrücke steigen sie langsam hoch (Bild 3, Profil 3).

b) Eiszeitliche Seeablagerungen

Im Gegensatz zu früheren Annahmen besteht der tiefere Anteil der zahlreichen ehemaligen oder noch heute erkennbaren Untiefen im untersten Zürichseebecken (Kleiner und Grosser Hafner, Bauschänzli usw.) nicht aus Moräne, sondern aus weich gelagerten, feinkörnigen und oft deutlich geschichteten Seeablagerungen. Diese sind äusserst unruhig aufgebaut und weisen eigentlich geknickte Kurven der Kornverteilung auf (Bild 1). Zum besseren Verständnis dieser Erscheinungen sei kurz auf ihre Entstehung eingegangen (eine ausführlichere Beschreibung wie auch eine zusammenfassende Darstellung der geologischen Zusammenhänge finden sich in [2] und [3]).

Als sich die Stirn des Gletschers in der letzten Eiszeit vom Moränenkranz von Zürich löste, entstand talaufwärts ein See mit Spiegel um 418 bis 420 m, also gut 12 m höher als heute. In diesem relativ tiefen Wasser bildete sich an der Gletscherzunge eine senkrechte Eisfront, von welcher sich immer wieder Eisberge lösten. Es traten hier auch die Schmelzwasser des mächtigen vergletscherten Areals am Eistunnel direkt in den See aus, wobei grosse Mengen von feinkörnigen Schwebestoffen das Wasser trübten, während die gröberen Fraktionen des Bachschutts – Sand und Kies – rasch auf den Boden sanken. Die Sedimentation erfolgte deshalb aus drei verschiedenen Quellen: Kegel aus grobem Material vor der Ausmündung von Eistunnels, welche ihre Stellung rasch wechseln konnten; Ablagerung von Schwebestoffen aus der Gletschermilch, wobei oft eine feine Warwenschichtung entstand; Absturz von Moränenmaterial oder einzelnen Steinen an der Eisfront, derartiges Material wurde gleichzeitig aber auf dem ganzen See durch allmählich abschmelzende Eisberge verstreut. Die Sedimentation erfolgte rasch und oft gleichzeitig aus verschiedenen Quellen, was noch heute aus den geknickten Kornverteilungs-

kurven abgelesen werden kann. Durch die Mischung vieler Fraktionen wird häufig eine recht dichte Lagerung erreicht, obwohl diese Sedimente in den höheren Lagen eindeutig glazial nicht vorbelastet sind. Am Utoquai treten Ton, aber auch Blöcke, nur sehr untergeordnet auf. Wie aus den Profilen abgelesen werden kann, ist die Lagerung derart unruhig, dass kaum je eine Verbindung zwischen zwei benachbarten Bohrungen in den eiszeitlichen Seeablagerungen hergestellt werden kann.

c) Oberfläche der eiszeitlichen Seeablagerungen

So unruhig wie ihr innerer Bau ist auch die Oberfläche dieser Sedimente, welche hier aber nur aus Sondierungen bestimmt werden kann. Charakteristisch ist das Auftreten von kegelartigen Erhebungen wie zum Beispiel dem Kleinen Hafner, aber auch von Steilborden und breiten Depressionen. All diese Strukturen sind vom heutigen Uferverlauf unabhängig und liegen schief zu ihm. Trotzdem ist diese Oberfläche von hervorragender Bedeutung für die Stabilität der Schüttungen wie auch für die Pfahlung (Bild 2, oben).

d) Seebodenlehm und Seekreide

Die Oberfläche der eiszeitlichen Seeablagerungen wird durch dunkelgraue, mässig bis stark tonige Silt bedeckt, welcher meist sehr plastisch und weich gelagert ist. Er erreicht 1 bis 2 m Mächtigkeit und wird von Seekreide bedeckt, welche im Gebiet des Utoquais meist weitgehend rein ist. An ihrer Basis findet sich häufig eine schichtige Wechsellegerung mit Seebodenlehm. Die Seekreide erreichte ursprünglich am Utoquai 9 bis 12 m Mächtigkeit, ist aber fast überall nachträglich gestört und verschoben worden.

e) Auffüllung

Im wesentlichen gehen diese im Gebiet des Utoquais auf die Zeit von Bürkli zurück, welcher 1881 bis 1888 dem See einen breiten Uferstreifen entriss. Vorerst wurde ungefähr im Gebiet des künftigen Quais ein Abschlussdamm geschüttet. Hinter diesen wurde dann aus Schiffen Material gepumpt, wobei neben Kies und Sand in unberechenbarem Nebeneinander auch Seekreide und Faulschlamm zur Ablagerung kam. Zuletzt erfolgte mit grobkörnigem Material eine Schüttung vor Kopf.

2. Verhalten von Seekreide und Seebodenlehm in steilen Halden und unter Auffüllung

Die Topographie des heutigen Seebodens vor dem Utoquai ist zwar etwas unruhig, Steilhänge fehlen aber mit Ausnahme des Kleinen Hafners (Bild 2, links). Von Kote 392 bis 397 m wird der Grund flach, oder es treten sogar Gegensteigungen auf. Es mag daher vorerst erstaunen, dass Seekreide, wie auch Seebodenlehm, fast durchweg Spuren

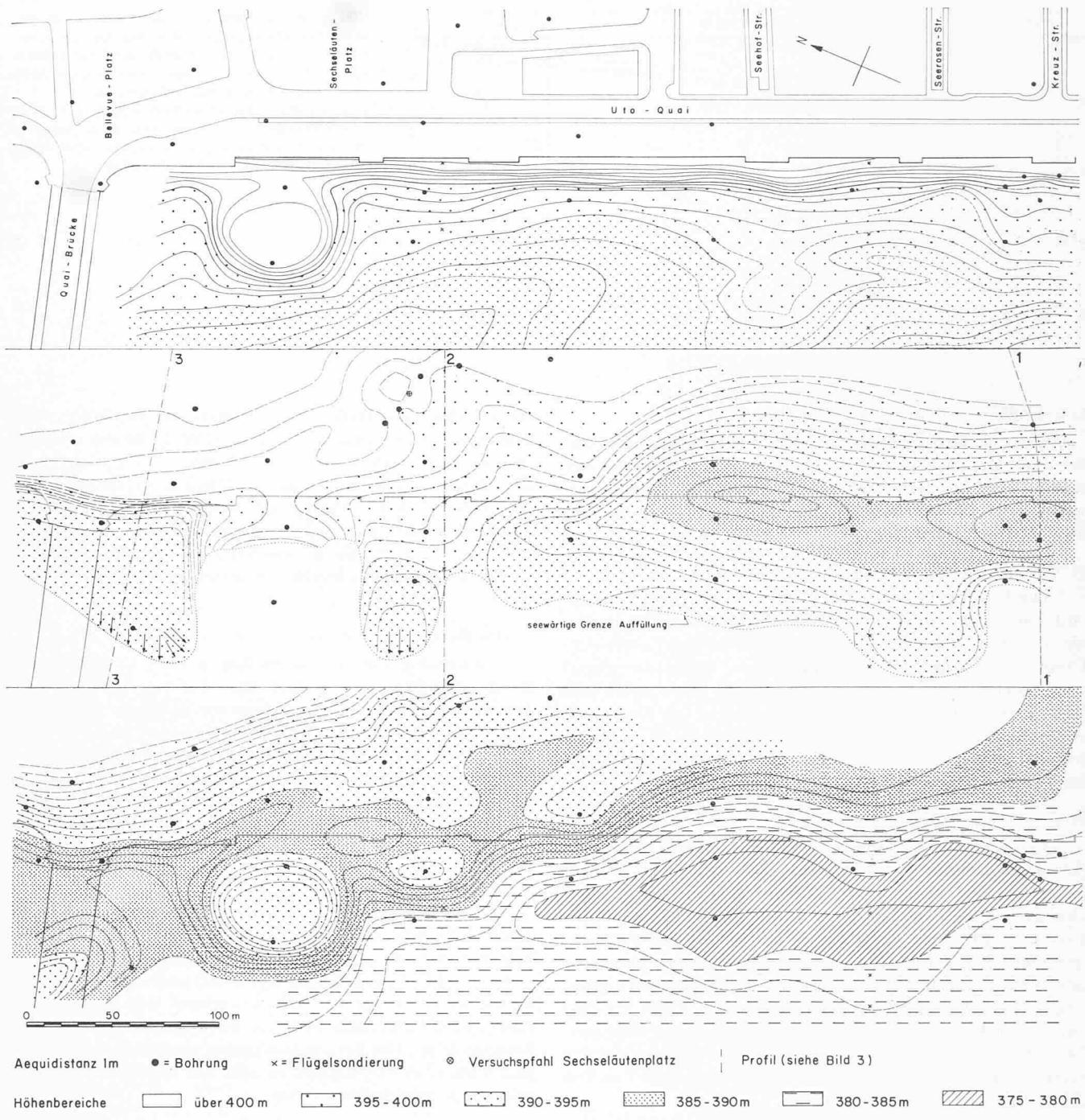


Bild 2 Situation (oben), Höhenlinien der Unterfläche Auffüllung (Mitte), Obergrenze der eiszeitlichen Seeablagerungen (unten)

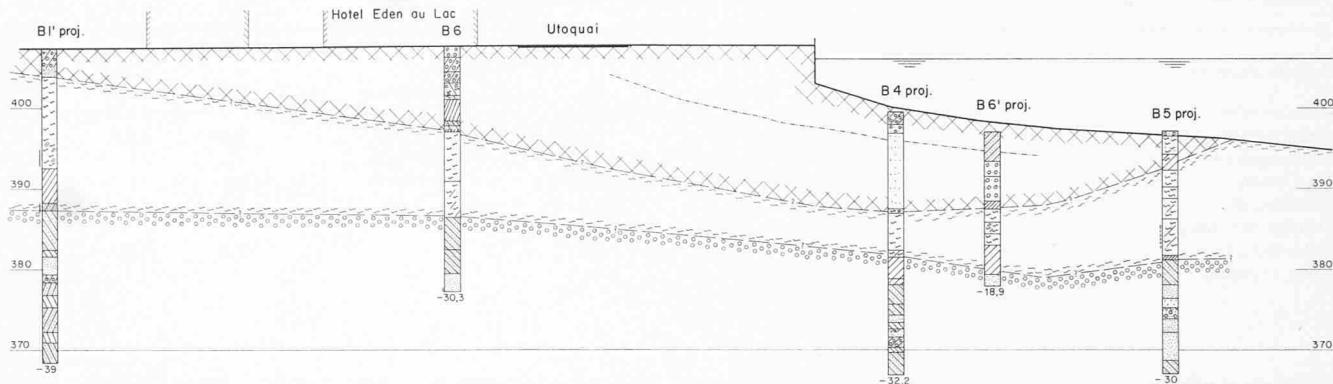
von Kriech- oder Gleitbewegungen aufweisen und dass in vielen Fällen noch in 50 m, ja sogar 100 m Entfernung vom Ufer Auffüllung erbohrt wurde.

Der seewärtige Teil des Kleinen Hafners sinkt sehr rasch ab. Die aus Seekreide bestehende Flanke wurde in einem über 4 m tiefen Sondierschlitz durch Taucher unter der Leitung des Stadtarchäologen *U. Ruoff* untersucht, da hier Kulturschichten von mindestens vier Siedlungsperioden aus Neolithikum und Bronzezeit zu finden sind (Bild 4). Die äusserst detaillierten Aufnahmen sind neben ihrer archäologischen Bedeutung auch deswegen von Interesse, weil sie Kriecherscheinungen zeigen. Die ursprünglich senkrecht stehenden Pfähle wurden schiefgestellt, dies in den älteren, tieferen Kulturschichten bedeutend stärker als in den jüngeren. Gleichzeitig kann man beobachten, wie einzelne Stämme gekrümmmt sind, wobei ihr unterer, im damals bereits besser konsolidierten Untergrund

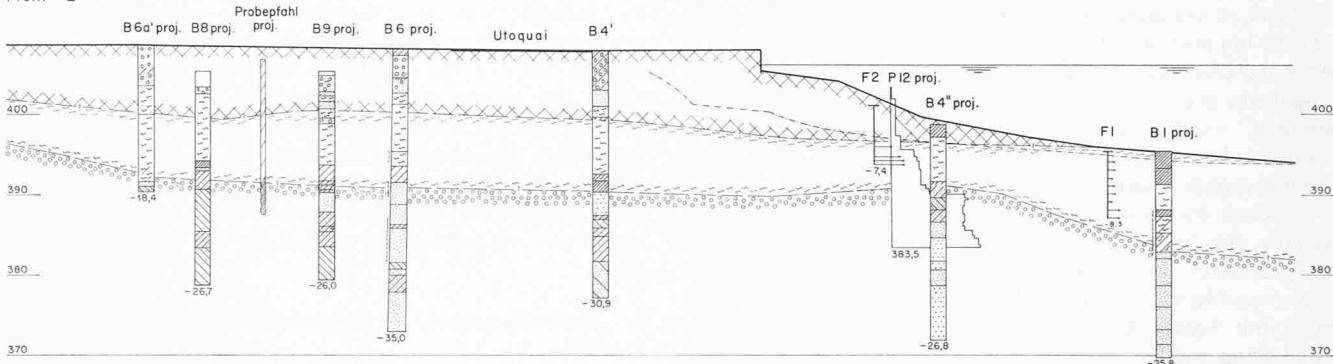
steckender Teil steiler ist als die obersten, wohl erst nachträglich von Seekreide umhüllten Partien. Dort erfolgten parallel zu starken Setzungen auch Kriechbewegungen. Am Verlauf der Kulturschichten ist auch zu erkennen, dass diese infolge der Kriecherscheinungen gezerrt wurden. Da die Hügelkuppe stabil blieb, die Flanken aber krochen, ist diese Erscheinung leicht zu verstehen.

Abgesehen vom Kleinen Hafner wurden die Störungen in der Lagerung der Seekreide vom Menschen ausgelöst oder mitbestimmt, indem er ehemalige seichte Partien des Sees auffüllte. Die Unterfläche der Auffüllung ist meist scharf, wenn auch oft einzelne grössere Steine tief in die Seekreide absinken können. Mit Ausnahme von zwei Rutschgebieten (Bild 2, Mitte) fand keine wirre Durchmischung von Auffüllung und Seekreide statt, ganz im Gegenteil ist eine weitgeschwungene Grenzfläche zu beobachten. Glücklicherweise kennt

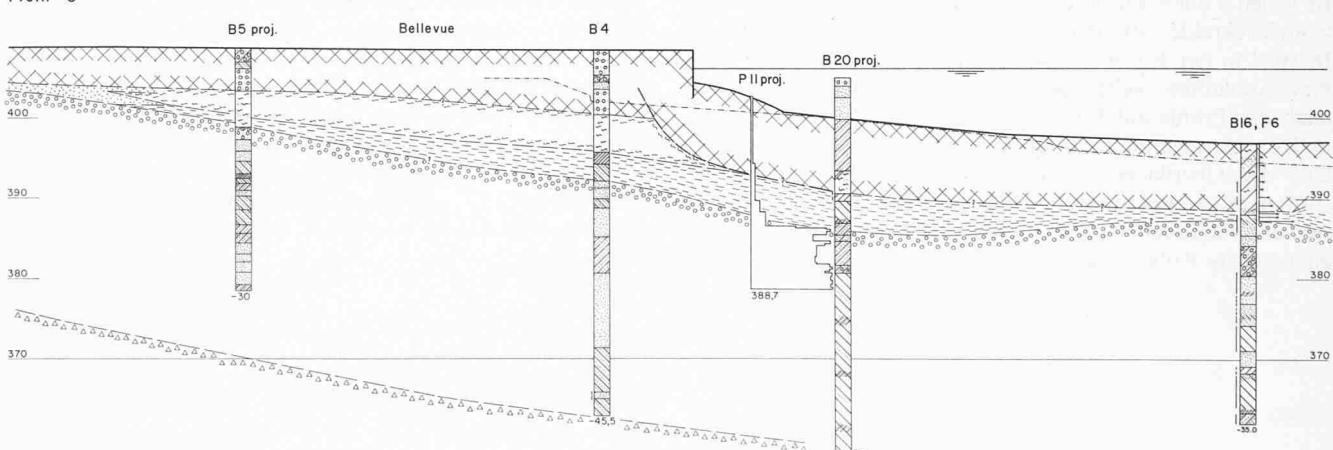
Profil 1



Profil 2



Profil 3



Allgemeines

- Auffüllung und Rutschmaterial
- ~ Seekreide und Seebodenlehm
- Seebodenlehm (nur in Profil 3 ausgeschrieben)
- Eiszeitliche Seeablagerungen
- △△△ Moräne
- Gleitfläche
- - - Seebodenverlauf vor Auffüllung
- Quaiverbreiterung

Bohrungen (B)

- Kies - Sand
- /○ Kies - Sand, siltig - tonig
- Grob- und Mittelsand
- Feinsand
- Feinsand / Silt
- Silt
- ▨ Toniger Silt
- || Strich auf Seite: ausgeprägte Schichtung

Flügelsondierungen (F), ungestört

10t/m²

Proberammung (P), Holzpfahl

100 kg/cm² spezifischer Rammwiderstand

Bild 3 Typische Querprofile des Ufergebiets zwischen Hotel Eden (Profil 1) und Quaibrücke (Profil 3)

Tabelle 1. Scherfestigkeiten bestimmt mit einer verrohrten norwegischen Flügelsonde

| Anzahl untersuchte Proben | Seekreide | | | Seebodenlehm | | | eiszeitliche Seeablagerungen | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|------|--------|--------------|------|--------|------------------------------|------|--------|------|
| | Min. | Max. | Mittel | Min. | Max. | Mittel | Min. | Max. | Mittel | |
| Nassraumgewicht | t/m ³ | 1,44 | 1,66 | 1,54 | 1,59 | 1,99 | 1,88 | 2,06 | 2,21 | 2,12 |
| Wassergehalt | % | 55 | 88 | 70,4 | 24 | 49 | 33,7 | 13 | 23 | 18,8 |
| Ca-Gehalt | % | 75 | 99 | 90,2 | 42 | 58 | 49,0 | 43 | 52 | 48,5 |
| Sensitivität | | 1,6 | 15,0 | 26,1 | 1,8 | 10,5 | 4,9 | 1,8 | 4,1 | 2,3 |
| Winkel der inneren Reibung | | | | 37° | 28° | 31° | | | | 35° |
| Scherfestigkeit | 1/2 d _c t/m ² | 0,62 | 10,8 | | 0,58 | 8,8 | | 1,8 | 6,6 | |
| Spez. Gewicht | t/m ³ | | | 2,64 | | | 2,72 | | | 2,73 |

man aus Aufnahmen von Bürkli den ehemaligen Verlauf des Seebodens. Man kann deshalb feststellen, dass die Obergrenze der Seekreide zum Teil massiv abgesenkt wurde, doch fand dies anscheinend langsam und ohne Katastrophe statt.

Rasche Bewegungen sind einzig beidseits des Kleinen Hafners zu erwarten, wobei eine Rutschung gegen die Quai-brücke hin auch aus Archiven belegt ist. Gerade hier fällt aber auch die Oberfläche der eiszeitlichen Seeablagerungen äusserst ungünstig gegen den See hin ab, so dass sehr leicht in den tonigen, weichgelagerten Seebodenlehmen Verschiebungen eintreten könnten, vermutlich gefolgt von einem Strukturzusammenbruch in den höheren Teilen der Seekreide.

Sehen wir von diesen Rutschgebieten ab, so blieb die Grenze zur Auffüllung, wie übrigens meist auch die Schichtung, erhalten. In flachliegenden, landwürtigen Gebieten kann die ursprüngliche Schichtfolge Seebodenlehm/Wechsellagerung mit Seekreide/reine Seekreide/Auffüllung noch häufig beobachtet werden, während seewärts offenbar Schichtpakete übereinander geschoben wurden, so dass zum Beispiel Seebodenlehm über Seekreide liegt. Nirgends wurden aber verschleppte, eiszeitliche Seeablagerungen festgestellt, so dass diese offensichtlich in der ursprünglichen Lage geblieben sind. In vielen Fällen wurde das gesamte Schichtpaket Seebodenlehm–Seekreide von Bewegungen ergriffen, augenfällig zum Beispiel in der Form von Ausquetschungen unter dem Quai, bzw. Anhäufung weiter seewärts. Das Studium von Bild 2 wie auch der Profile auf Bild 3 zeigt, dass die Art, das Ausmass und die Ausdehnung der Bewegungen weitgehend vom Verlauf der Oberfläche der eiszeitlichen Seeablagerungen bestimmt wird. Besonders günstig für die Stabilität war ein seewärts liegender Buckel, wie beim Kleinen Hafner, während andererseits Rutschungen ausgelöst wurden, wo diese Fläche

auf grössere Strecken abfiel (Bild 3, Profil 1). Sehr häufig folgt einem Steilhang aber ein flaches Becken (Bild 3, Profil 1). Hier wurde die Seekreide ungefähr im Bereich der Quaimauer besonders stark verdrängt, während sie weiter seewärts auf bis zu 16 m Mächtigkeit angehäuft wurde. Die Auffüllung greift im Ufergebiet weit unter den ehemaligen Seeboden, so dass in einzelnen Profilen etwa doppelt soviel geschüttet werden musste, als dies bei stabilem Untergrund der Fall gewesen wäre. Der heutige Zustand entspricht einem Gleichgewicht, welches aber recht labil ist, konnten doch Setzungen der auf Auffüllung gegründeten Quaimauer im Zusammenhang mit relativ geringfügigen Belastungen während der Arbeiten für die Quaiverbreiterung beobachtet werden, ja sogar kleine Hebungen und Senkungen im Gefolge von Seespiegelschwankungen.

3. Bodenmechanische Charakterisierung der geologischen Schichten

Aus den Bohrungen wurde eine grössere Anzahl ungestörter Proben mit einem Kolbenentnahmegerät gewonnen und im Erdbaulabor der VAWE untersucht. Naturgemäß beschränkten sich diese Untersuchungen auf die mehr oder weniger kohärenten Bodenarten Seebodenlehm und Seekreide, die sich zur Entnahme eignen, während die sandigen, eiszeitlichen Seeablagerungen meist nur in mehr oder weniger gestörtem Zustand gewonnen werden können. Da die reine Seekreide in früheren Untersuchungen sehr eingehend getestet wurde – so im Zusammenhang mit den Projekten Seepark und Ufergestaltung Tiefenbrunnen, wie auch in einer wissenschaftlichen Arbeit [3] –, wurde das Hauptgewicht der Versuche auf diese Seebodenlehme und deren Übergangsschichten zu Seekreide gelegt.

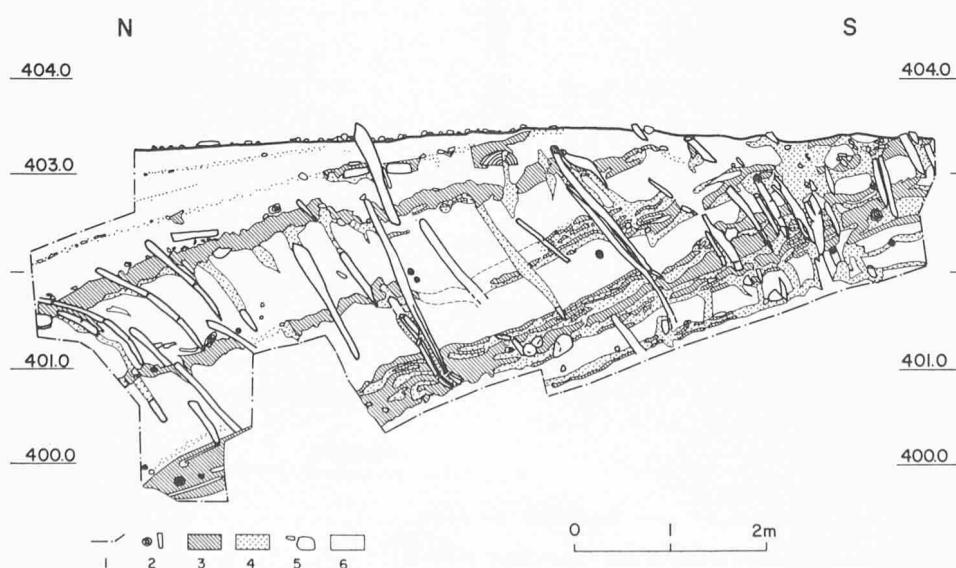


Bild 4. Profil im Kleinen Hafner, Kuppe rechts. Aufnahme U. Ruoff, etwas schematisiert.

1 Grenze des Sondierschlitzes, 2 Pfahl, Holz, 3 Kulturschicht, 4 Partie mit Sand oder Holzkohle, 5 Stein, 6 normale Seekreide

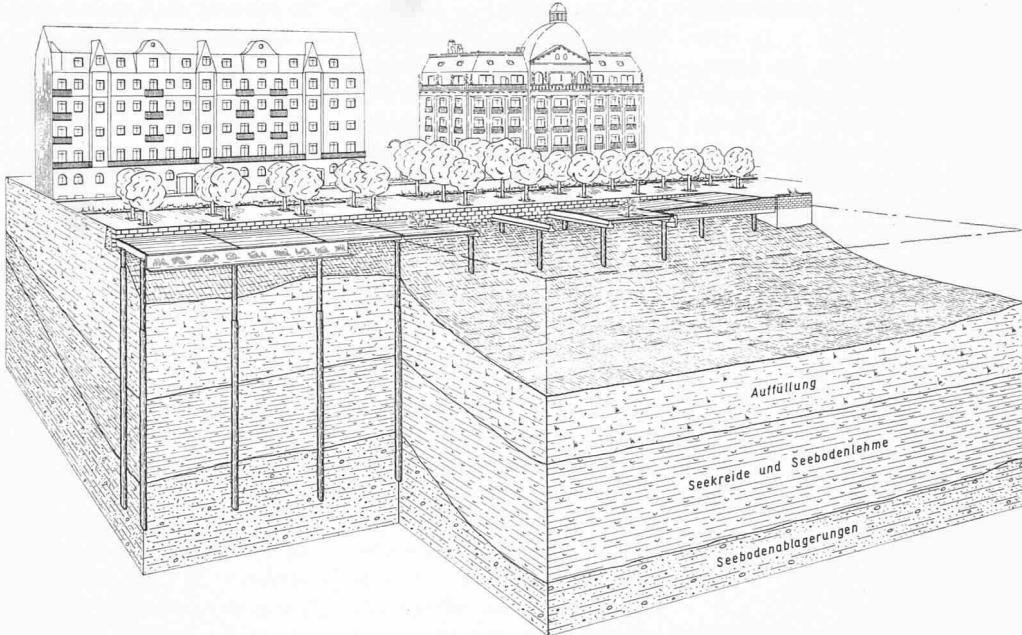


Bild 5. Ansicht der Uferpromenade am Utoquai in Zürich, links Hotel Eden (Plan der Soexperts SA, Zürich)

In situ wurden an sieben Stellen mit einer verrohrten norwegischen Flügelsonde die Scherfestigkeiten in verschiedenen Tiefen gemessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

a) Seekreide

Sehr häufig ist die Seekreide nicht rein, sondern mit Silt oder Ton durchsetzt. Noch ausgeprägter sind die Schwankungen der Scherfestigkeiten im einfachen Druckversuch. Die Messungen der Flügelversuche können zwar nicht unterteilt werden nach Seebodenlehm und Seekreide, sie zeigen aber dasselbe wenig systematische Bild (Bild 6).

Für das Verständnis des Verhaltens von Seekreide unter Scherbeanspruchung ist ihre besondere Struktur von ausschlaggebender Bedeutung. Die Seekreidepartikel entstanden durch chemische Ausscheidung von Kalk aus der übersättigten Wasserlösung. Sie flockulieren während der Sedimentation zu sehr losen Gebilden mit honigwabenähnlicher Struktur. Die Schereigenschaften dieses recht speziellen Bodenmaterials wurden durch J. Huder [3] systematisch untersucht. Danach kann festgestellt werden, dass bei normal konsolidierten, undrainierten Triaxialversuchen die Seekreide zunächst namhafte Scherkräfte ($s \sim 0.35 \sigma_c$) aufnimmt, dies bei geringen Porenwasserspannungen [$\Delta u / \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = A < 1$] und beschei-

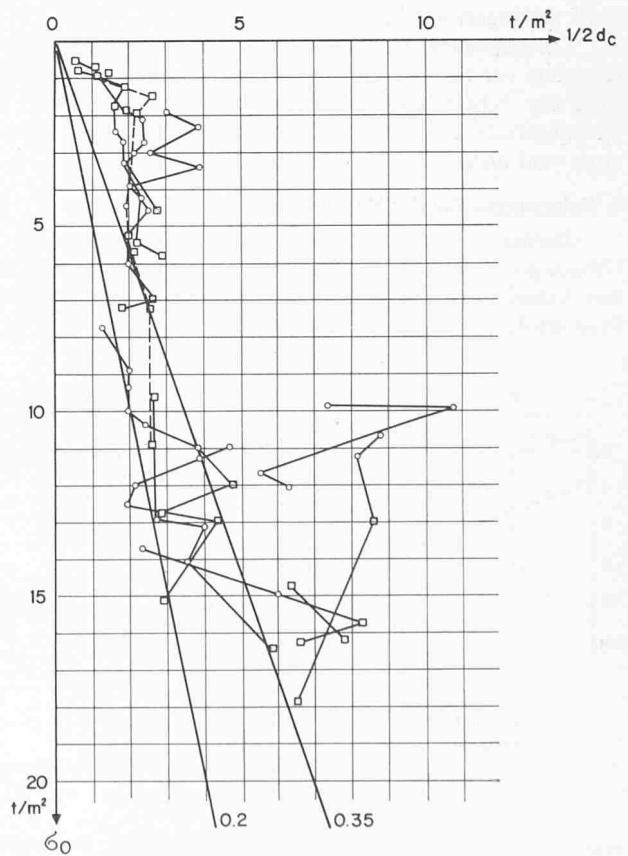
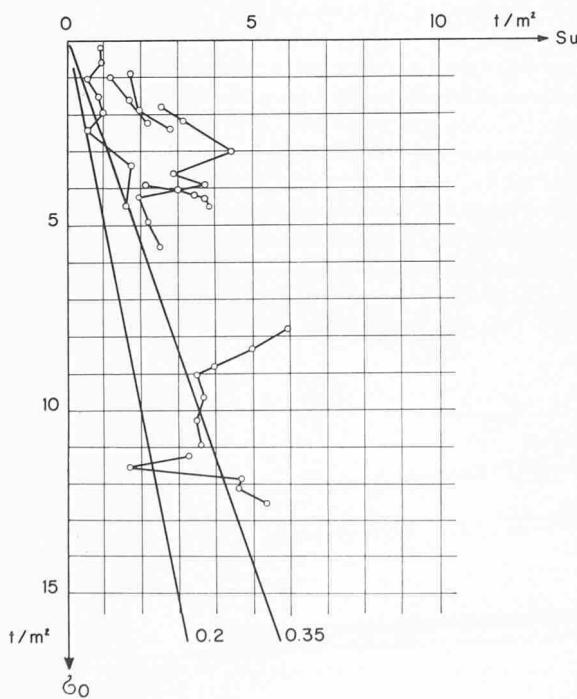


Bild 6. Scherfestigkeit aus Flügelversuchen in Funktion des Überlagerungsdrucks (links) und aus einfachen Druckversuchen (rechts)

denen Deformationen ($\Delta h/h_0 = 1$ bis 2%). Anschliessend steigen die Porenwasserspannungen rasch an ($A > 1$). Die wirksame Scherspannung τ nimmt kaum mehr zu, das heisst, der Anstieg der wirksamen Reibung wird weitgehend kompensiert durch die Reduktion der Normalspannung σ' infolge der steigenden Porenwasserspannung u . Die Seekreide verhält sich im undrainierten Zustand wie ein rein kohäsiver Boden (Ton) mit konstanter Scherfestigkeit s_u . Im überkonsolidierten Zustand treten dagegen keine besonders grossen Porenwasserspannungen auf ($A < 1$), so dass hier, ebenso wie im drainierten Zustand, Seekreide wie ein Reibungsmaterial (Silt oder Feinsand) mit einem Winkel der inneren Reibung $\Phi \sim 38^\circ$ reagiert.

b) Seebodenlehm

Der hohe Ca-Gehalt und die zum Teil namhafte Sensitivität zeigen, dass die Seebodenlehme meist etwas Seekreide enthalten, dies häufig in dünnen Einschaltungen. Wie Bild 6 zeigt, nimmt die undrainierte Scherfestigkeit mit steigendem Überlagerungsdruck zu. Sie weist aber besonders bei grösseren Drücken bedeutende Schwankungen auf.

c) Eiszeitliche Seeablagerungen

Die wenigen ungestörten Proben, welche in diesen Schichten entnommen werden konnten, gehören zu den bindigeren Vorkommen. Trotzdem zeigen die Ergebnisse eine bessere Konsolidation und günstigere Schereigenschaften.

d) Wechselwirkungen zwischen den einzelnen geologischen Formationen

Bei einer Wechsellagerung von Seebodenlehm und Seekreide können sich die ungünstigen Eigenschaften der beiden Bodenarten kumulieren. Der in der Seekreide entstandene hohe Porenwasserdruck teilt sich dem benachbarten Seebodenlehm mit, so dass sich hier, zusammen mit den wesentlich schlechteren Reibungseigenschaften, geringere Scherfestigkeiten ergeben können, als es in reinem Seebodenlehm der Fall ist. Auch die Konsolidationszeit kann bei einer Wechsellagerung oder Durchmischung von Seekreide und Seebodenlehm als Folge der reduzierten Durchlässigkeit sehr stark verlängert werden.

Demgegenüber ist bei einer Wechsellagerung oder Verunreinigung von Seekreide mit Sand und Silt keine Verschlechterung der Schereigenschaften des Bodens zu erwarten. Die Reibungseigenschaften und Durchlässigkeiten dieser Bodenarten sind nicht wesentlich voneinander verschieden.

4. Folgerungen für das Bauvorhaben

Zunächst war abzuklären, ob die Verbreiterung des Utoquais durch Auffüllungen ohne Gefährdung der bestehenden Anlagen und mit vertretbarem Aufwand innert nützlicher Frist erfolgen könne.

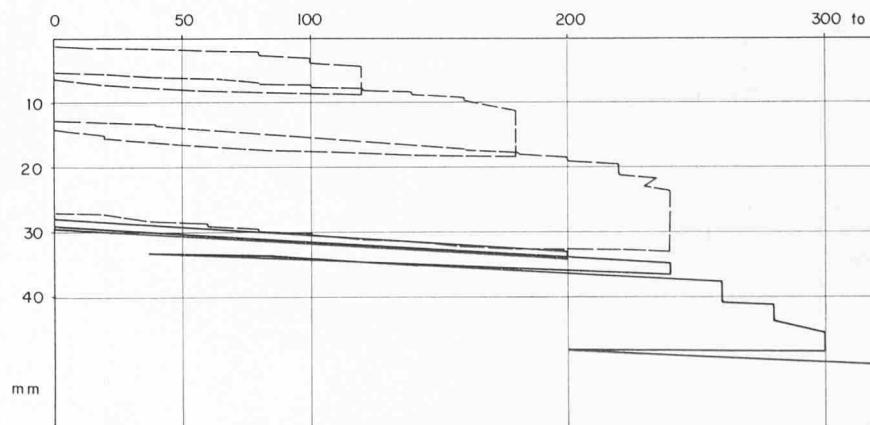
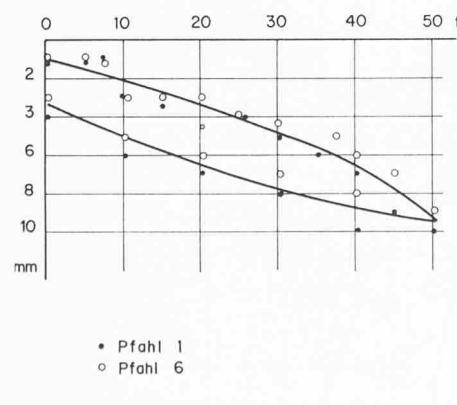


Bild 7. Lastsetzungsdiagramme der Probefahlversuche; Holzpfähle (links), Bohrpfaß (rechts)

Die qualitative geologische Beurteilung der Uferstabilität führte, wie unter 2 dargelegt, zum Schluss, dass sich ein mehr oder weniger labiles Gleichgewicht eingestellt habe. Eine zuverlässige quantitative Beurteilung mit bodenmechanischen Berechnungen setzt entweder eine gute Kenntnis der relevanten Eigenschaften aller Schichten voraus, oder dann führt man die Berechnung mit Werten durch, welche auf der sicheren Seite liegen. Bereits eine überschlägige Berechnung des durch die Sondierungen ermittelten Zustandes mit den minimal gemessenen Parametern ergab Sicherheiten, die wesentlich unter 1,0 lagen. Eine genauere Berechnung wäre auch bei weit grösserem Aufwand an Sondierungen und Materialuntersuchungen aus folgenden Gründen nicht möglich:

Ein nur angenähert richtiges Bodenmodell für die Auffüllung und die durch sie verdrängten Seebodenlehm- und Seekreideschichten kann beim seinerzeit von Bürkli angewandten Schüttvorgang nicht erstellt werden. Damit lässt sich keine zuverlässige Angabe über die bodenmechanischen Parameter für den Grossteil des vorhandenen Baugrundes machen. In der Auffüllung wechseln Sande und Kies-Sande mit gepumpter Seekreide und Seebodenlehm ab. Die Seekreide wurde teils ohne wesentliche Störung des internen Aufbaus paketweise seewärts gestossen, doch brach ihre Struktur weitgehend zusammen. Die gemessenen Scherfestigkeiten entsprechen nicht überall den aus der heutigen Überlagerung zu erwartenden Werten ($s_u \sim 0.2 \sigma$ für Seebodenlehm und $\sim 0.35 \sigma$ für Seekreide). Offenbar entstand dort, wo $s < 0.2 \sigma$ ist, eine Art Brücke durch das benachbarte weniger kompressible Material.

Dadurch, dass Seebodenlehm- und Seekreideschichten besonders am Fusse der Auffüllung durch diese in unüberblickbarer Weise ineinander und übereinander gestossen wurden waren, konnte auch diese Zone in ihren Schereigenschaften nicht wirklichkeitsnah erfasst werden.

Auf Grund dieser Überlegungen wäre eine Verwirklichung des Bauvorhabens durch weitere Schüttungen ohne die Gefahr katastrophaler Folgen für die bestehenden Anlagen nur dann möglich gewesen, wenn die Beanspruchungen stets unter den minimalen Scherfestigkeiten gehalten worden wären. Es hätte dies durch ausgedehnte Schüttungen mit Böschungsneigungen bewerkstelligt werden können, welche so flach gehalten worden wären, dass keine Instabilität eintreten könnte. Dementsprechend hätten diese Schüttungen bedeutende Teile des unteren Seebeckens erfasst und Kubaturen erheischt, die nur in mehrjährigen und umfangreichen Schüttarbeiten hätten bewältigt werden können, dies verbunden mit vielen unangenehmen Nebenerscheinungen in einem verkehrreichen See- und Ufergebiet. Die Schüttungen hätten zudem über Jahrzehnte dauernde Setzungen zur Folge gehabt, welche sicher auch grosse Teile des bestehenden Utoquais erfasst hätten.

Die Uferanschüttung wurde deshalb zugunsten einer auf Pfählen fundierten Kunstbaute fallengelassen.

Im Vordergrund standen zunächst die an unseren Seen altbewährten Holzpfähle. Um eine möglichst gute Tragfähigkeit und ein ausgeglichenes Setzungsverhalten zu erzielen, wäre es wünschenswert gewesen, dass die Pfahlspitzen in die eiszeitlichen Seeablagerungen gereicht hätten. Die zum Teil sehr grosse Mächtigkeit der Auffüllung, gerade unter der bestehenden Ufermauer, machte es – wie die Rammversuche zeigten – unmöglich, diese Bedingung überall einzuhalten. Zwei Probepfähle, deren Spitze im Seebodenlehm rund 4 m über den eiszeitlichen Seeablagerungen steckenblieb, zeigten trotzdem ein sehr gutes Tragverhalten. Die 25 m langen Pfähle mit einem Durchmesser von 32 cm hatten bei der letzten Hitze (10 Schläge) mit dem 2-t-Freifallbär (Hubhöhe 1 m) eine Eindringung von 17, bzw. 11 cm. Sie setzten sich um 8 bis 9 mm unter einer Last von 50 t pro Pfahl ohne wesentliche Konsolidierungszeit, um bei der Entlastung bei total 3 mm Setzung stehenzubleiben (Bild 7). 1 mm Setzung bewirkte die negative Mantelreibung beim Aufbringen der Gegenlast auf die benachbarten acht Hilfspfähle.

Bei der Annahme einer Nutzlast von 25 t pro Pfahl wäre alle 5 m ein auf fünf Pfählen ruhender Riegel notwendig gewesen, bei den Verbreiterungen entsprechend mehr. Es hätten somit etwa 800 Pfähle gerammt werden müssen. Bei Tiefenbrunnen wurden beim Rammen von Holzpfählen in Seekreide Porenwasserspannungen gemessen, welche dem vorhandenen Überlagerungsdruck entsprachen ($u/\gamma \cdot n = B = 1$). Während die Porenwasserspannungen in der dort vorhandenen mehr oder weniger reinen Seekreide in rund 12 Stunden rasch abgebaut wurden, konnte bei Rammarbeiten in Rüschlikon im Seebodenlehm unterhalb der Seekreide ein Abklingen erst nach drei Monaten festgestellt werden. Eine systematische Überwachung der Porenwasserspannungen in den Seekreide-Seebodenlehm-Schichten war deshalb bei den intensiven Rammarbeiten, welche wenn möglich in einem einzigen Winter hätten durchgeführt werden sollen, unumgänglich. Eine erste Serie von Messgeräten (frei spielende Mikropiezometer) wurde noch während der

Submissionsarbeiten versetzt und zeigte das überraschende Resultat, dass der Porenwasserdruck fast durchweg tiefer als der vorhandene Seewasserspiegel lag.

Bei der Submission war es den Unternehmern gestattet, Varianten mit anderen Pfahlarten zu offerieren. Eine solche Variante mit gebohrten Pfählen war trotz höheren Pfahlkosten dank der grösseren Tragfähigkeit der Pfähle (120 t) und ihrer Witterungsbeständigkeit konkurrenzfähig. Die Probebelastung eines Versuchspfahles auf dem Sechseläutenplatz, der rund 4 m in die eiszeitlichen Seeablagerungen eingebunden war, zeigte bei 120 t eine Setzung von 9 mm und nach Entlastung eine bleibende Setzung von 5 mm, bei 240 t eine bleibende Setzung von 33 mm und eine Grenztragfähigkeit von rund 330 t (Bild 7).

5. Beobachtungen während des Baues

Die Variante mit Bohrpfählen kam zur Ausführung, da bei vergleichbaren Kosten keine Gefährdung durch Porenwasserüberdrücke zu befürchten war. Messungen mit den bereits versetzten Geräten während der Bohrarbeit und des Betonierens von Pfählen in etwa 5 m Entfernung zeigten während des Bohrens kaum eine Reaktion, beim Betonieren dagegen einen Anstieg um 38 bis 55 cm Wassersäule. Dieser Überdruck baute sich in den nächsten sieben Tagen wieder ab.

Ein Vergleich der veranschlagten Pfahlängen mit den ausgeführten zeigte eine geringere Abweichung als 10%. Die Sondierungen haben also eine recht gute Prognose der Oberfläche der eiszeitlichen Seeablagerungen erlaubt.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Huder: Bestimmung der Scherfestigkeit strukturempfindlicher Böden unter besonderer Berücksichtigung der Seekreide. Mitt. Nr. 58 VAWE, 1963.
- [2] C. Schindler: Zur Quartärgeologie zwischen dem untersten Zürichsee und Baden. «Eclogae geol. helv.» Vol. 61, Nr. 2, 1968.
- [3] C. Schindler: Geologie von Zürich und ihre Beziehung zu Seespiegelschwankungen. «Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich», Jahrg. 116, Heft 2, 1971.

Adresse der Verfasser: Dr. sc. nat. C. Schindler und M. A. Gautschi, dipl. Bauing. ETH, Geotechnisches Büro Dr. A. von Moos, Bachofnerstrasse 5, 8037 Zürich.

Probleme der Naturbausteinindustrie

Von Dr. P. Eckardt, Zürich

DK 691.2.002.2

Francis de Quervains «Die nutzbaren Gesteine der Schweiz»¹⁾ gibt einen umfassenden Überblick über diesen fast einzigen Bodenschatz der Schweiz, der volkswirtschaftlich eine vielfach verkannte Bedeutung hat, werden doch jährlich um die 30 Mio t Gesteine, Schotter, Kiese und Sande ihrer viertausendjährigen Ruhe entrissen und über wenige Dutzend Meter bis mehrere tausend Kilometer weit verfrachtet und einer neuen Bestimmung zugeführt. So hoch die genannte Menge von 30 Mio t erscheint (in der die für jegliche Zwecke entnommenen Bodenmaterialien enthalten sind), ergibt sie doch nur einen Würfel von 220 m Kantenlänge, oder entspricht einem jährlichen Abtrag auf der ganzen Fläche der Schweiz von 0,25 mm, also weniger als die natürliche Erosion.

Das darf allerdings nicht darüber hinweg täuschen, dass am einzelnen Abbauort, besonders dann, wenn grosse Mengen gewonnen werden, wie in der Kiesausbeutung oder der Zementfabrikation, doch erhebliche Eingriffe in das natürliche Gefüge stattfinden, deren Folgen besser überdacht werden müssen, als dies vielfach bis heute geschah. Einerseits bedürfen die vor allem bei der Kiesgewinnung wichtigen Langzeit-

folgen durch hydrologische und bodenklimatische Veränderungen genauer Untersuchung, und anderseits steckt das Sicherheitsdenken bei der Anlage von Steinbrüchen in Steilwänden immer noch in den Kinderschuhen, wie Beispiele aus alter (Elm), junger (Felsrutsche in den Walensee und in den Vierwaldstättersee) und jüngster Zeit (Gotthardstrasse, St-Léonard) eindrücklich zeigen.

Im folgenden seien einige wirtschaftliche Probleme am Beispiel der Naturbausteingewinnung im Tessin besprochen.

Aus dem Maggia-, Verzasca- und dem Calancatal kommen die dunkeln, gut spaltbaren Zweiglimmergneise, die meist mit natürlicher Fläche im Garten- und Hochbau verwendet werden; im Strassenbau werden diese seltener gebraucht. In der Leventina und der Riviera werden helle bis graue, schlecht spaltbare Granitgneise gewonnen, die im Strassenbau als Stellsteine und Pflastersteine, daneben auch als Marchsteine und im Hochbau als gesägte Platten verwendet werden.

Spitzeisen gegen Maschine

Nur bei der Herstellung gesägter Platten wurden schon sehr früh Maschinen (Sägegatter, Seilsäge, Kreissäge) verwendet; bei der Produktion von gespaltenen Platten, Stellsteinen

¹⁾ 3. Auflage 1969, Kümmerly & Frey, Bern.