

Drei Milliarden Jahre und ein Meeresspiegel, der ansteigt

Trois milliards d'années et une élévation du niveau de la mer

Franz Schenker

Der Gletschergarten in Luzern überrascht weiter. Nicht nur bietet er mit der neuen Attraktion «FELSENWELT» ein architektonisch spannendes Erlebnis, sondern er ist auch für geologische Überraschungen gut. Im Heft 2/2021 ging es um sehr hohe Konzentrationen von Germanium, jetzt geht es um Zirkone, die das Alter des Sandsteins verraten, und um Strömungsrippel, die über Millionen von Jahren erhalten geblieben sind.

Im März 2015 wurde im Projektperimeter FELS eine vertikale Kernbohrung von 46 m Tiefe abgeteuft. Ziel der Bohrung war es, den Aufbau der Formation an und nahe der verwitterten Oberfläche abzuklären und die Festigkeit des Gebirges in Hinblick auf den Untertagebau zu prüfen. Im Bohrloch wurden anschliessend Probesprengungen mit damit verbundenen Erschütterungsmessungen durchgeführt. Daraus ergaben sich wichtige Informationen zur optimalen Ausbruchstechnik, zur Dosierung der Sprengungen, zur Vortriebsleistung und zur Möglichkeit, das aufbereitete Ausbruchsmaterial als Betonzuschlag zu verwenden. Die Bohrkern wurden von Lea Coray im Rahmen einer ETH-Bachelor-Arbeit¹ untersucht. Der Schwerpunkt der Studie lag in der Altersbestimmung der im Sandstein abgelagerten Zirkone und damit der Rekonstruktion ihrer Entwicklungsgeschichte. Die geochronologischen und isotopischen Untersuchungen sollen auch zur Identifizierung der Liefergebiete des Sediments beitragen.

Gesteinsproben fragmentiert

Insgesamt wurden drei Kernproben aus unterschiedlichen Tiefen untersucht und im Dünnschliff konnten die gesteinsbildenden Mineralen Quarz, Plagioklas, Calcit, Muskovit und Glaukonit bestimmt werden (Bild 2). Die Schwerminerale Zirkon, Apatit, Epidot, Klinozoisit und Turmalin wurden nach einer Schwereretrennung in Körnerpräparaten nachgewiesen. Damit sich die Zirkone aus dem Gestein möglichst unbeschädigt lösen, wird eine kleine Gesteinsprobe (ca. 100 g) in ein mit Wasser gefülltes Metallgefäss verbracht und dann durch Schockwellen, erzeugt durch kurze elektrische Impulse von bis zu 150 kV, fragmentiert². Durch die Einwirkung der Schockwellen werden, im Gegensatz zum herkömmlichen Mahlen, die Minerale entlang ihrer Korn-

Avec sa nouvelle attraction «FELSENWELT», le Jardin des glaciers de Lucerne offre une aventure architecturale passionnante, et nous réserve en plus des surprises géologiques. Le cahier 2/2021 traitait des très fortes concentrations de germanium, dans celui-ci, il s'agit de zircons qui révèlent l'âge du grès et des rides de courant qui sont conservées depuis des millions d'années.

En mars 2015, un carottage vertical de 46 m de profondeur a été réalisé dans le périmètre du projet FELS. L'objectif de ce carottage était de clarifier la structure de la Formation au niveau et à proximité de la surface érodée et de mesurer la résistance de la roche en vue de travaux souterrains. Des essais de minage ont ensuite été réalisés dans le trou de forage pour mesurer les secousses. Cela a permis d'obtenir des informations importantes sur la technique d'excavation optimale, le dosage du minage, la vitesse de percement et la possibilité d'utiliser le matériau d'excavation traité comme agrégat de béton.

Les carottes ont été analysées par Lea Coray dans le cadre d'un travail de bachelor à l'EPFZ.¹ L'objectif principal de l'étude était de déterminer l'âge des zircons déposés dans le grès et donc la reconstruction de leur histoire évolutive. Les études géochronologiques et isotopiques devraient également contribuer à l'identification des zones de provenance des sédiments.

Fragmentation des échantillons rocheux

Trois échantillons de carotte provenant de différentes profondeurs ont été examinés, les lames minces ont permis de déterminer les minéraux constituant la roche: le quartz, le plagioclase, la calcite, la muscovite et la glauconite (ill. 2). Les minéraux lourds zircon, apatite, épidote, clinozoisite et tourmaline ont été documentés après une séparation gravimétrique dans des préparations de grains. Un échantillon de roche (env. 100 g) est placé dans un récipient métallique rempli d'eau puis fragmenté par des ondes de chocs, générées par de courtes impulsions électriques allant jusqu'à 150 kV. Ce processus permet de séparer les zircons de la roche sans trop les endommager². Contrairement au

¹ Lea Coray (2015): Zirkonalter und Schwermineraliengehalt des Luzerner Sandsteins. Departement Erdwissenschaften, ETH-Zürich. Hauptbetreuer Dr. Albrecht von Quadt, Ko-Examinator Dr. Franz Schenker

² Die «electric puls disaggregation» (EPD) wird in Geräten der Schweizer Firma Selfrag (www.selfrag.com) verbaut. Selfrag begann als Start-up und EPD-Maschinen werden mittlerweile nicht nur im Labormassstab, sondern auch industriell, beispielsweise für die Anreicherung von Erzen, eingesetzt.

¹ Lea Coray (2015): Zirkonalter und Schwermineraliengehalt des Luzerner Sandsteins (Âge des zircons et teneur en minéraux lourds du grès lucernois). Département des sciences de la Terre, EPF Zurich Responsable principal Albrecht von Quadt, coexaminateur Franz Schenker

² La désaggrégation par impulsions électriques «electric puls disaggregation» (EPD) est installée dans des appareils de l'entreprise suisse Selfrag (www.selfrag.com). Selfrag a commencé comme start-up et les machines EPD sont maintenant utilisées non seulement à l'échelle du laboratoire mais aussi à l'échelle industrielle, par exemple pour l'enrichissement des minerais.

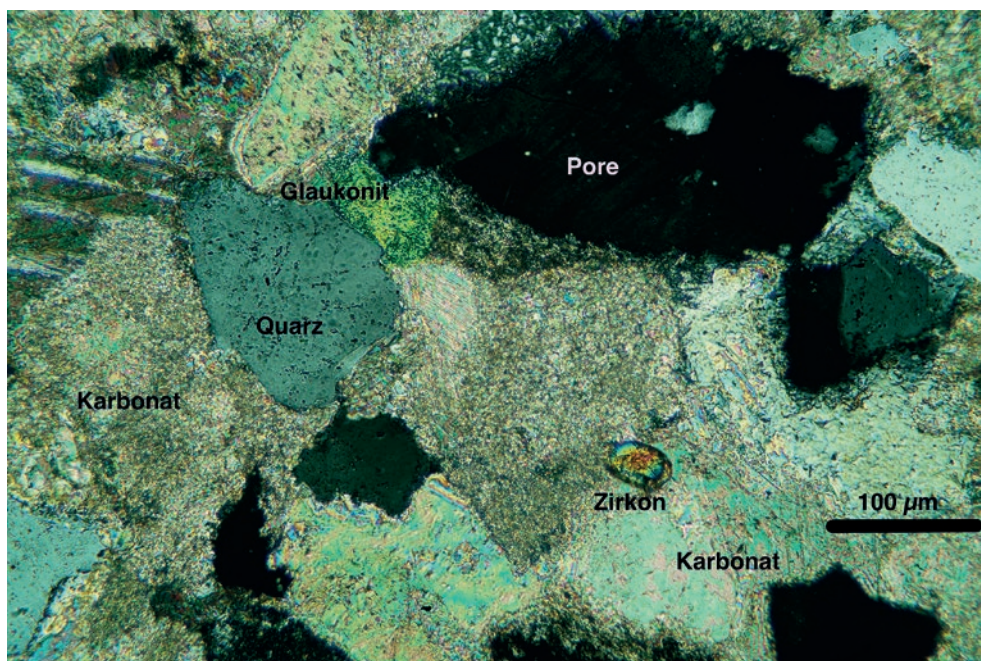


Bild 1: Die spezielle Geometrie des Besucherschachtes ergibt sich aus dem Vortrieb entlang der Schicht- und den senkrecht dazu stehenden Klüftflächen.

📷 Robert Wicki

Bild 2: Dünnschliffphoto einer Probe des Bohrkerns. Die Gesteinsporen erscheinen unter gekreuzten Polarisatoren schwarz, der Zirkon zeigt, im Vergleich zu den anderen Mineralien, starke Interferenzfarben und ein starkes Relief resp. eine hohe Lichtbrechung.

Illustration 2: photo d'une lame mince d'un échantillon de carotte. Les pores de la roche apparaissent noirs sous les polariseurs croisés, le zircon montre, par rapport aux autres minéraux, de fortes teintes de polarisation et un fort relief resp. une réfraction élevée de la lumière.



grenzen voneinander gelöst und zerbrechen deshalb nicht oder selten. Anschliessend werden die Schwerminerale mit der Waschpfanne angereichert und nach Entfernung der magnetischen Komponenten mit Methyleniodid im Scheidetrichter aufkonzentriert.

Nach dem Waschen mit Aceton und dem Trocknen werden die Zirkone – es sind um die 80 kleine Kriställchen pro Probe und sie haben eine Grösse von 80–350 µm – unter dem Auflichtmikroskop mit der Pinzette aus dem Körnerpräparat gepickt, in Epoxidharz eingebettet, geschliffen und mit polykristalliner Diamantpaste (Korngrösse 1–3 µm) poliert.

broyage conventionnel, les minéraux se détachent, sous l'action des ondes de choc, les uns des autres le long des joints de grains et ne se cassent que rarement. Les minéraux lourds sont ensuite concentrés au moyen de la battée et, après élimination des composants magnétiques, séparés avec du diiodométhane dans une ampoule à décanter.

Après le lavage à l'acétone et le séchage, les zircons – au nombre d'environ 80 petits cristaux par échantillon avec une taille dans la gamme de 80–350 µm – sont prélevés de la préparation de grains au moyen de brucelles sous le microscope en lumière réfléchie, coulés dans de la résine époxyde, meulés et polis avec de la pâte de diamants polycristallins (taille des grains 1–3 µm).

Die so präparierten Zirkone werden mittels Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) analysiert. Hinter dieser Bezeichnung stehen folgende Verfahrensschritte, welche Lea Coray im Detail wie folgt beschrieben hat:

- Mit Hilfe eines Laserstrahls werden kleinste Mengen (im Nanogramm Bereich) des Probenmaterials abgetragen. Der Prozess wird im Mikroskop beobachtet und die dabei entstehenden Abtragungsstellen in den Zirkonen mittels Digitalkamera dokumentiert (Bild 3).
- Das abladierte Probenmaterial wird in einem Ar-He Gasgemisch als Aerosol in einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld zu Plasma erhitzt. Dabei verdampft das Probenaerosol und die Atome werden ionisiert.
- Die so generierten Ionen werden in den Analysator eines Massenspektrometers geleitet, in welchem diese nach ihrem Masse-zu Ladung-Verhältnis sortiert und in den Detektoren quantitativ bestimmt werden.

Unterschiedliche Alter

Für die Altersbestimmung der Zirkone dienen die Zerfallsreihen von ^{238}U zu ^{206}Pb (Halbwertszeit 4.468 Mrd. Jahre) und von ^{235}U zu ^{207}Pb (Halbwertszeit 703.8 Mio. Jahre). Aus den gemessenen Gewichtsanteilen der genannten Uran- und Bleiisotopen ergeben sich, in Kombination mit der Halbwertszeit, Daten über den Zeitpunkt, wann die Zirkone sich bei der Abkühlung des Magmas zwischen 900–700 °C auskristallisiert haben. Unter Anregung der Proben durch einen Elek-

Les zircons ainsi préparés sont analysés dans un spectromètre de masse à plasma inductif par ablation laser (LA-ICP-MS). Derrière cette appellation se cachent les étapes suivantes du procédé, que Lea Coray a décrites en détail comme suit:

- un rayon laser est utilisé pour détacher des quantités infimes (de l'ordre du nanogramme) du matériel d'échantillon. Le processus est observé au microscope et les sites d'ablation résultants dans les zircons sont documentés à l'aide d'un appareil photo numérique (ill. 3).
- L'aérosol produit avec le laser à partir de l'échantillon est introduit par un flux gazeux Ar-He dans un champ électromagnétique à haute fréquence où le gaz forme un plasma. Dans ce plasma l'aérosol de l'échantillon s'évapore et les atomes sont ionisés.
- Les ions ainsi générés sont introduits dans l'analyseur d'un spectromètre de masse, où ils sont triés en fonction de leur rapport masse/charge et déterminés quantitativement dans les détecteurs.

Différents âges

Les chaînes de désintégration radioactive de ^{238}U à ^{206}Pb (demi-vie de 4,468 milliards d'années) et de ^{235}U à ^{207}Pb (demi-vie de 703,8 millions d'années) servent à déterminer l'âge des zircons. Les proportions pondérales mesurées des isotopes d'uranium et de plomb susmentionnés, en combinaison avec la demi-vie, fournissent des données sur le moment où les zircons ont cristallisé entre 900 et 700°C lors

Bild 3: Kathodenlumineszenz-Fotografie von polierten Zirkon-Einzelkristallen aus dem Bohrkern. Die kleinen Krater sind durch die Energie des Laserstrahls entstanden.

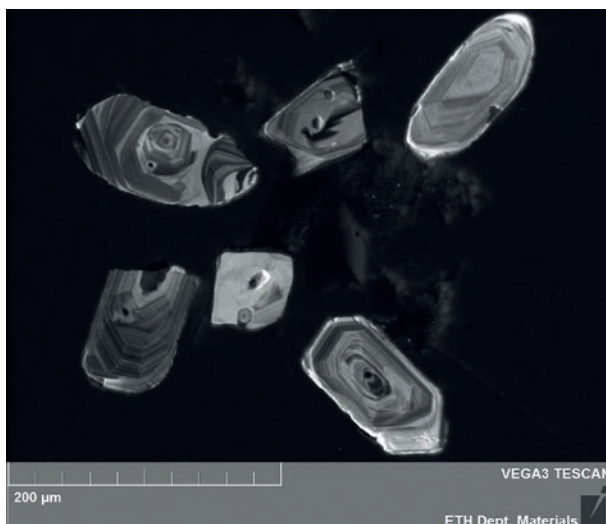


Illustration 3: photomicrographie par cathodoluminescence de monocristaux de zircon polis provenant d'une carotte de forage. Les petits cratères ont été formés par l'ablation au rayon laser.



Bild 4: Rippelmarken im nördlichen Bereich des Löwendenkmals, ganz oben an der Kante des ehemaligen Steinbruchs.

Illustration 4: rides de plage dans la partie nord du Lion de Lucerne, tout en haut sur l'arête de l'ancienne carrière.

Bild 5: Ein Beispiel der vielen im neuen Felsrundgang aufgeschlossenen Schichtflächen mit Rippelmarken.

Ill. 5: un exemple des nombreuses surfaces de couches affleurantes avec rides de plage dans le nouveau circuit.



tronenstrahl aus der Kathodenstrahlröhre zeigt sich, dass die Zirkone zoniert sind und auch Wachstumsstörungen aufweisen (Bild 3).

Mittels der LA-ICP-MS -Analyse kann festgestellt werden, dass die äusseren Zonen der Zirkone tendenziell immer jüngere Alter aufweisen als die inneren Bereiche. Daraus kann geschlossen werden, dass Zirkone aus alten magmatischen Gesteinen während eines oder mehreren anschliessenden Ereignissen wieder stark erhitzt wurden und damit weiterwachsen konnten. Eine andere Möglichkeit der späteren Beeinflussung der Zirkonalter ist eine Veränderung der Uran- und Bleikonzentrationswerte durch hydrothermale Lösungen oder durch kurzfristige Hitzeimpulse. Es ist somit eine grosse Herausforderung, die Alterszonierung in den Zirkonen einzelnen geologischen Prozessen zuzuordnen und diese möglichst plausibel zu erklären. Was genau bedeuten die Altersdaten in Hinblick auf die geologischen Prozesse? Eines ist in jedem Fall sicher: die ältesten in einem Zirkon gemessenen Alter dürften dem ersten magmatischen Kristallisationsalter entsprechen.

Insgesamt wurden an 158 einzelnen Zirkonkristallen Uran/Blei-Altersbestimmungen durchgeführt. Dabei ergab sich mit 109.9 Mio. Jahre das jüngste Alter, der älteste Wert betrug 2929 Mio. Jahre. Eine deutliche Häufung der Alter zeigte sich zwischen 240 und 340 Mio. Jahren, eine zweite Häufung, jedoch weniger ausgeprägt, zwischen 500 und 800 Mio. Jahren. Der Mittelwert aller Altersdaten ergab rund 300 Mio. Jahre. Dieser Wert stimmt gut mit dem magmatischen Intrusionsalter des Zentralen Aaregranits und anderer herzynischer Granitkörper überein. Bei der Ablagerung des Luzerner-Sandsteins in das Molassemeer vor rund 20 Mio. Jahren waren diese Intrusivgesteine also bereits an der Erdoberfläche aufgeschlossen und der Erosion ausgesetzt. Die Erosion erfasste jedoch auch viel ältere Gesteinsformationen, was das oben erwähnte Zirkon-Alter von rund 3 Milliarden Jahren illustriert.

Wie alt ist nun der Luzerner Sandstein des Gletschergartens? Die Wissenschaft gibt hier verschiedene Antworten. An der Oberfläche freigelegt wurde dieses Sediment durch die Gletscher vor rund 20'000 Jahren, ins marine Molassebecken wurde das noch unverfestigte Sediment vor rund 22 Millionen Jahren abgelagert. Viele Mineralkörner im Sandstein entstanden vor rund 300 Millionen Jahren durch magmatische Prozesse, und einige davon entstanden sogar vor rund 3 Milliarden Jahre. So erweitert sich die Zeitreise

du refroidissement du magma. L'excitation des échantillons par un faisceau d'électrons du tube à rayons cathodiques montre que les zircons sont zonés et présentent également des défauts de croissance (ill. 3).

Au moyen de l'analyse LA-ICP-MS, on peut constater qu'au contraire des zones internes, les zones externes des zircons indiquent tendanciellement un âge plus jeune. On peut donc en déduire que les zircons provenant de roches magmatiques anciennes ont été fortement chauffés au cours d'un ou de plusieurs événements ultérieurs et ont pu ainsi poursuivre leur croissance. L'âge des zircons aurait également pu être influencé par une modification des concentrations de l'uranium et du plomb par des solutions hydrothermales ou par des impulsions thermiques de courte durée. C'est donc un grand défi que d'attribuer les zonations d'âge dans les zircons à des processus géologiques individuels et de les expliquer de la manière la plus plausible possible. Que signifie exactement les données d'âge en termes de processus géologique? Une chose est certaine: les âges les plus anciens mesurés dans un zircon devraient correspondre à l'âge de la première cristallisation magmatique.

Au total, l'âge par l'uranium et le plomb a été déterminé sur 158 cristaux de zircon individuels. Le plus jeune âge était de 109,9 millions d'années, la valeur la plus ancienne de 2929 millions d'années. Un regroupement clair des âges a été localisé entre 240 et 340 millions d'années, un second regroupement, mais moins prononcé, entre 500 et 800 millions d'années. La moyenne de toutes les données d'âge était d'environ 300 millions d'années. Cette valeur correspond bien à l'âge de l'intrusion magmatique du granite de l'Aar et d'autres corps granitiques hercyniens. Ainsi, lorsque le grès de Lucerne s'est déposé dans la mer molassique il y a environ 20 millions d'années, ces roches intrusives affleuraient déjà à la surface du sol et étaient soumises à l'érosion. Toutefois, l'érosion a également affecté des formations rocheuses beaucoup plus anciennes, comme l'illustre l'âge du zircon d'environ 3 milliards d'années mentionné ci-dessus.

Quel est à présent l'âge du grès lucernois du Jardin des glaciers? La science donne ici diverses réponses. Ces sédiments ont été dégagés en surface par les glaciers il y a environ 20 000 ans, et les sédiments encore non consolidés se sont déposés dans le Bassin molassique marin il y a environ 22 millions d'années. De nombreux grains de minéraux dans le grès se sont formés il y a près de 300



Bild 6: Die Betonbauten im Portalbereich des Besucherganges übernehmen die Geometrie der gegen NNW einfallenden Schichtflächen.

Illustration 6: les constructions en béton dans le secteur d'entrée des visiteurs rappellent la géométrie des plans de couches inclinés en direction NNW.

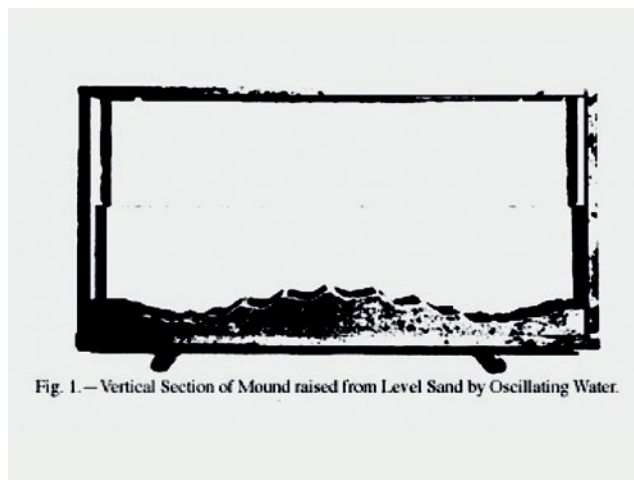


Fig. 1.—Vertical Section of Mound raised from Level Sand by Oscillating Water.

Bild 7: Versuchsanordnung zur Erzeugung von Wellenrippeln in der von Hertha Ayrton 1910 publizierte Arbeit «The Origin and Growth of Ripple-mark».

Illustration 7: dispositif expérimental pour la formation de rides de plage dans le travail «The Origin and Growth of Ripple-mark» de Hertha Ayrton, publié en 1910.

im Gletschergarten bis in das erste Drittel der Entstehung unseres schönen Planeten.

Faszinierende Rippelmarken

Im nördlichen Teil des Löwendenkmals ganz oben an der Felskante finden sich schöne Rippelmarken (Bild 4). Auch auf der gegenüberliegenden Talseite an der Fluhmatt wurden solche beim Ausbruch von neuen Baugruben aufgeschlossen. Die Chance war somit gross, dass «versteinerte Wellen», wie ich diese damals interpretierte, auch im Perimeter des zukünftigen Felsengangs vorhanden sind. Nur wenn beim Stollenvortrieb die mit ca. 55 Grad nach NNW einfallenden Schichtflächen freigelegt würden, kämen solche Rippelmarken zum Vorschein. Dies war dann sogar viel häufiger der Fall als erhofft (Bild 5). Die Architekten vom MILLER+MARANTA nahmen die natürliche vorgegebene Geometrie des Trennflächengefüges von Schichtflächen und Klüftung in ihre Planung auf; mehr noch, sie setzten diese auch in den Kunstbauten um (Bild 6).

Ich liess mich dann belehren, dass es sich bei den Rippelmarken mehrheitlich nicht um Wellen-, sondern um Strömungsrippeln handelt, welche zur Zeit der Ablagerung des Molassesandsteins beim Ein- und Ausströmen der Tiden entstanden sind (Keller B. 1990³). Somit wurde nicht nur die Wirkung von oszillierendem Wasser, sondern vor allem jene der auf die von Sonne und Mond zurückzuführende Gravitationsänderungen über 20 Millionen Jahre hinweg konserviert. Die Mathematikerin und Physikerin Hertha Ayrton hat im Jahr 1904 an einem Treffen der Royal Society in London einen Vortrag zur Entstehung und Wachstum von Rippelmarken gehalten und diesen dann später publiziert⁴. Sie war die erste Frau, welche einen Vortrag in der illustren Männergesellschaft halten durfte. Dabei berichtete sie über

millions d'années grâce à des processus magmatiques et quelques-uns d'entre eux se sont même formés il y a près de 3 milliards d'années. Ainsi, le voyage dans le temps dans le Jardin des Glaciers s'étend jusqu'au premier tiers de la formation de notre belle planète.

Fascinantes rides de plage

Dans la partie nord du Lion de Lucerne, tout en haut de l'arête rocheuse, on peut voir de belles rides de plage (ill. 4). De l'autre côté de la vallée, au lieu-dit Fluhmatt, de telles rides ont également été mises au jour lors de terrassements. Il y avait donc de fortes chances que les «vagues pétrifiées», comme je les interprétais à l'époque, soient également présentes dans le périmètre du futur passage rocheux. De telles rides de plage ne pouvaient être découvertes que si les plans de couches inclinés d'environ 55 degrés en direction NNW, étaient dégagés lors de l'excavation de la galerie. Cela a été plus souvent le cas qu'espéré (ill. 5). Les architectes de MILLER+MARANTA ont intégré la géométrie naturelle de la discontinuité géologique des couches et des fissures dans leur planification; ils l'ont également mise en œuvre dans les ouvrages d'art (ill. 6).

On m'a alors appris que la majorité de ces traces n'étaient pas des rides de plage mais des rides de courant, qui se sont formées lorsque le grès de molasse s'est déposé au rythme des marées (Keller B. 1990³). Ainsi, non seulement l'effet de l'eau oscillante, mais surtout celui des changements gravitationnels dus au soleil et à la lune, ont été préservés pendant plus de 20 millions d'années.

Lors d'une réunion de la Royal Society à Londres en 1904, la mathématicienne et physicienne Hertha Ayrton a donné une conférence sur la formation et la croissance des rides de plage qu'elle a par la suite publiée.⁴ Elle a été la première

³ Keller B. (1990): Wirkung von Wellen und Gezeiten bei der Ablagerung der Oberen Meeresmolasse. Mitt. Natf. Ges. Luzern, 31.

⁴ Hertha Ayrton (1910): The Origin and Growth of Ripple-mark: Proceedings of the Royal Society of London A84: 285. Hertha Ayrton hat auch über Lichtbögen und das dabei entstehende Plasma geforscht und ist dafür mit der Hughes Medaille ausgezeichnet worden, sie erfand physikalische Methoden zur Entfernung von Kampfgasen in Schützengräben, war eine Freundin von Marie Curie und eine grosse Kämpferin für Frauenrechte.

³ Keller B. (1990): Wirkung von Wellen und Gezeiten bei der Ablagerung der Oberen Meeresmolasse. Mitt. Natf. Ges. Luzern, 31.

⁴ Hertha Ayrton (1910): The Origin and Growth of Ripple-mark: Proceedings of the Royal Society of London A84: 285. Hertha Ayrton a également effectué des recherches sur les arcs électriques et le plasma qu'ils produisent, ce qui lui a valu la médaille Hughes; elle a inventé des méthodes physiques pour éliminer les gaz de combat dans les tranchées; elle était une amie de Marie Curie et une grande militante des droits des femmes.



Bild 8: Rezente Wellenrippeln in einem kleinen Hafenbecken am Meggenhorn, hervorgerufen durch den Wellenschlag auf dem See.

Illustration 8: rides de plage récentes dans le bassin du petit port à Meggenhorn, formées par l'action des vagues du lac.



Bild 9: Rezente Strömungsrippeln am Churchill-Quai, hervorgerufen durch die Strömung im Luzerner-Becken des Vierwaldstättersees.

Ill. 9: rides de courant récentes dans la zone du Churchill-Quai formées par le courant dans le bassin lucernois du lac des Quatre Cantons.

die Resultate ihrer Experimente mit auf Rollen gelagerten, wassergefüllten Glasgefässen, in welche sie eine Lage von feinem Meeressand sedimentieren liess. Durch horizontale Stösse entstanden Wellen und als Folge davon bildeten sich in der ursprünglich flach gelagerten Sandschicht Rippelmarken (Bild 7). Wellenrippeln sind symmetrisch aufgebaut, dies im Gegensatz zu Strömungsrippeln, welche analog zu Wüstendünen eine flache Luv- und eine steile Leeseite haben.

Beobachtungen im See

Bei Spaziergängen entlang des Vierwaldstättersees eröffnete sich nun ein neues Beobachtungsfeld: Die Formen und die Entstehung von heutigen Rippelmarken im Uferbereich. In einen fast vollständig vom See abgeschlossenen kleinen Hafen beim Meggenhorn ist keine Strömung vorhanden, aber wenn Dampfschiffe vorbeifahren, pflanzen sich die Wellen durch die enge Hafeneinfahrt fort mit der Folge, dass das Wasser im seichten Hafenbecken oszilliert und im Sand symmetrische Rippeln entstehen (Bild 8). Im ungeschützten Uferbereich des Churchillquais hingegen sind die Rippel asymmetrisch und somit auf strömendes Wasser zurückzuführen (Bild 9).

B. Keller untersuchte das Ablagerungsmilieu der Sandsteine akribisch und kam zum Schluss, dass zwischen der Ablagerung der Gesteine im Bereich des Löwendenkmals (wellendominiert) und jenen des Gletschergartens (gezeitendominiert) ein Meeresspiegelanstieg von rund 20 Metern stattfand. Ausgehend von einer durchschnittlichen Sedimentationsrate von 0.2 mm/Jahr und einer Sandsteinmächtigkeit von 100 Metern zwischen Löwendenkmal und Gletschergarten fand diese Meerestransgression im Zeitraum einer halben Millionen Jahren statt⁵. Ob dieser Meeresanstieg auf eine Klimaveränderung zurückzuführen sei, fragte eine junge Teilnehmerin anlässlich einer Stollen-Begehung, und ob das Ansteigen des Meeresspiegels kontinuierlich war oder sich während einer kurzen Episode abspielte. Interessante, jedoch offene Fragen, denn vielfältig sind die Ursachen,

femme autorisée à donner une conférence devant cette illustre société masculine. Elle a rendu compte des résultats de ses expériences avec des récipients en verre remplis d'eau, et stockés sur des rouleaux, dans lesquels elle a fait sédimenter une couche de sable marin fin. Des impulsions horizontales ont créé des vagues et, par conséquent, formés des rides de plage dans la couche de sable initialement plane (ill. 7). Contrairement aux rides de plage qui ont une structure symétrique, les rides de courant ressemblent à des dunes dans le désert, dont le côté face au vent est plat et le côté sous le vent est plus raide.

Observations faites dans le lac

Lors de promenades aux abords du lac des Quatre-Cantons s'ouvre désormais un nouveau champ d'observation: les formes et la formation des rides de plage d'aujourd'hui sur le rivage du lac. Dans le petit port de Meggenhorn, qui est presque complètement fermé vers le lac, il n'y a pas de courant, mais lorsque des bateaux à vapeur passent, les vagues se propagent à travers l'étroite entrée du port, de sorte que l'eau oscille dans le bassin portuaire peu profond et que des rides symétriques se forment dans le sable (ill. 8). Dans la zone côtière non protégée du Churchill-Quai à Lucerne, les rides sont par contre asymétriques et donc dues à l'eau qui s'écoule (ill. 9).

B. Keller a étudié méticuleusement l'environnement des dépôts de grès et est arrivé à la conclusion qu'entre les dépôts rocheux dans la zone du Lion de Lucerne (dominée par les vagues) et celles du Jardin des Glaciers (dominée par les marées), une élévation du niveau de la mer d'environ 20 mètres se serait produite. En supposant un taux de sédimentation moyen de 0,2 mm/an et une épaisseur de grès de 100 mètres entre le Lion de Lucerne et le Jardin des Glaciers, cette transgression marine a eu lieu sur une période d'un demi-million d'années.⁵ Une jeune participante a demandé lors d'une visite guidée de la galerie si la montée du niveau de la mer était due à un changement climatique et

⁵ Geotest AG, Peter Spillmann und Daniel Bieri (2021): Luzern Gletschergarten – Vermittlung der geologischen Phänomene im Felsengang. Interner, unpublizierter Bericht zu Händen der Stiftung Gletschergarten.

⁵ Geotest AG, Peter Spillmann und Daniel Bieri (2021): Luzern Gletschergarten – Vermittlung der geologischen Phänomene im Felsengang. Rapport interne, non publié à l'attention de la fondation Stiftung Gletschergarten.



Der Ausgang aus der neuen Attraktion «Felsenwelt».

La sortie de la nouvelle attraction «Felsenwelt».

© Gletschergarten Luzern

die Wirkung und die zeitliche Dynamik von Meeresspiegelschwankungen im Verlauf der Erdgeschichte.

Noch sind zum heutigen Zeitpunkt die Inszenierungen mit Projektionen, Klang und bewegtem Bergseewasser noch ausstehend. Aber schon die pure Spannung zwischen Fels und den massiven Betonbauten ist kraftvoll. Aus der mutigen Kombination von Gewachsenem und Gemachtem entstand ein bemerkenswertes, wohl einzigartiges Werk.

Dank

Der Sandstein-Fels stand mitten in der Stadt schon seit langer Zeit für eine Neunutzung bereit; dies mit allen seinen Trennflächen, Vererzungen, Rippeln, Mineralen und dem Bergwasser. Ihn zu erschliessen und ein Kunstwerk daraus zu gestalten, ist der Offenheit, dem Gestaltungswillen und der Ausdauer des Bauherrn (Stiftung Gletschergarten), der Direktion (Dr. Andreas Burri) und der Bauleitung (Sergio Caverio, Peter Hunkeler) zu verdanken. Ohne das kreative Zusammenwirken der Geologen (Dr. Peter Spillmann und Dani Bieri von der Geotest AG), der Architekten (Paola Maranta, Quintus Miller und Sven Wälti von MILLER + MARANTA) und den Felsmechanikern (LOMBARDI AG, insbesondere dem leider während der Planungsphase zu früh verstorbenen Denker und Ingenieur Andy Theiler) wäre die Transformation der Vision in ein Bau- und Ausführungsprojekt nicht gelungen. Und mit dem Felsausbruch von Gasser Felstechnik AG und den Bauten der Schmid AG wurde das anspruchsvolle Projekt FELS in einer Art und Weise in die Wirklichkeit umgesetzt, dass in Zukunft jährlich wohl mehr als 150'000 Menschen staunen und etwas Aussergewöhnliches erleben können. Ihnen allen, und nicht zuletzt auch den Sponsoren (Albert Koechlin Stiftung, Stadt und Kanton Luzern und viele, viele weitere), sei herzlich gedankt. Mente et Malleo!

Die neue Attraktion FELSSENWELT ist seit Juli fürs Publikum offen.

Franz Schenker, Dreilindenstrasse 3, 6045 Meggen

si cette hausse du niveau était continue ou s'était passée sur une courte période. Des questions intéressantes, mais qui restent ouvertes, car les causes, les effets et la dynamique temporelle des fluctuations du niveau de la mer au cours de l'histoire de la Terre sont multiples.

À l'heure actuelle, les mises en scène avec projections, sons et mouvements d'eau du petit lac sont encore en attente. Mais on ressent déjà un suspense captivant entre la roche et les constructions massives en béton. La combinaison audacieuse entre le naturel et l'artificiel a donné naissance à une œuvre remarquable et certainement unique.

Remerciement

Le rocher de grès au milieu de la ville était prêt depuis longtemps pour une nouvelle utilisation; ceci avec tous ses clivages, ses minéralisations, ses rides, ses minéraux et avec l'eau de source. Le rendre accessible et en faire une œuvre d'art est le fruit d'une ouverture d'esprit, de la volonté créative et de la persévérance du maître d'ouvrage (Stiftung Gletschergarten), de la direction (Andreas Burri) et de la direction des travaux (Sergio Caverio, Peter Hunkeler). Sans l'interaction créative des géologues (Peter Spillmann et Dani Bieri de Geotest AG), des architectes (Paola Maranta, Quintus Miller et Sven Wälti de MILLER + MARANTA) et de spécialistes dans la mécanique des roches (LOMBARDI AG, en particulier Andy Theiler, penseur et ingénieur, hélas décédé trop tôt pendant la phase de planification), la transformation de la vision en un projet d'exécution définitif n'aurait pas eu lieu. Et avec Gasser Felstechnik AG pour l'excavation des roches et Schmid AG pour les constructions, l'ambitieux projet FELS est devenu réalité de telle sorte qu'à l'avenir, plus de 150 000 personnes par an pourront s'émerveiller et vivre une expérience extraordinaire. Nous les remercions tous sincèrement, sans oublier les sponsors (la fondation Albert Koechlin, la ville et le canton de Lucerne et bien d'autres encore). Mente et Malleo!

La nouvelle attraction «Felsenwelt» est ouverte au public depuis juillet.

Traduction: Véronique Petermann