Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 78 (1986)
Heft: 3-4

Artikel: Die Inbetriebnahme der erweiterten Kläranlage Werdhölzli, Zürich
Autor: Wiesmann, Jürg / Heierli, RIchard / Gyr, Albert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940846

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: 09.07.2025

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

Die Inbetriebnahme der erweiterten Kläranlage Werdhölzli, Zürich

Am 17. Januar 1986 wurde im Beisein von Bundespräsident Dr. A. Egli, den kantonalen und städtischen Behörden sowie Fachleuten aus dem In- und Ausland die erweiterte Kläranlage Werdhölzli wie geplant vollumfänglich dem Betrieb übergeben.

Damit fand ein Projekt im bewilligten Kostenrahmen seinen Abschluss, das in mehr als 10 Jahren an die 5000 Personen beschäftigt hatte.

Die Erweiterung der Kläranlage Werdhölzli ist mit den Investitionskosten von rund 300 Mio Franken und einer Abmessung von 1 km Länge und 250 m Breite das grösste kommunale Bauvorhaben, das die Stadt Zürich je realisierte. Nach Abzug der Beiträge von Bund und Kanton sowie den beiden angeschlossenen Seegemeinden Kilchberg und Zollikon verbleiben für die Stadt Zürich rund die Hälfte der Gesamtaufwendungen. Diese Summe soll vollumfänglich nach dem Verursacherprinzip über Abwassergebühren gedeckt werden.

Die Behandlungsverfahren und die erzielte Wirkung

Blick in die Zukunft

Jürg Wiesmann

1. Der Zufluss zur Anlage

In die Kläranlage Werdhölzli fliesst das Abwasser von rund 320000 Einwohnern und etwa die gleiche Menge aus Industrie, Gewerbe und Dienstleistungsbereich. Das Einzugsgebiet umfasst etwa ¾ des Stadtgebietes von Zürich und die beiden Seegemeinden Kilchberg und Zollikon. Dies ergibt täglich eine durchschnittliche Abwassermenge von 250000 m³ oder rund 3000 l/s bei Trockenwetter. Diese Abwassermenge ist so gross, dass innerhalb 20 Minuten sämtliche Becken im grössten Hallenbad der Stadt Zürich gefüllt werden könnten.

2. Die Stufen der Abwasserreinigung

Das Abwasser wird während rund 15 Stunden in vier Behandlungsstufen gereinigt. Es sind weitgehend Prozesse, die der Natur abgeschaut sind und unter günstigen Bedingungen nachvollzogen werden.

Mechanische Reinigungsstufe

Das Abwasser durchfliesst vorerst den Grobsandfang, wo sich durch die Verzögerung der Geschwindigkeit der grobkörnige Sand absetzt. Am Ende des Sandfanges angeordnete Rechen halten Textilien, Papier und sperrige Stoffe zurück.

Im nachgeschalteten belüfteten Ölsandfang steigen durch das Einblasen von Luft Öl und Fett an die Oberfläche, während sich der feine Sand am Beckenboden absetzt.

Im anschliessenden Vorklärbecken hält sich das Abwasser so lange auf, bis sich die noch vorhandenen ungelösten Stoffe absenken.

Während die 3,5 m³ Sand pro Tag zu einer Multikomponentendeponie abtransportiert werden, gelangt nach einer Entwässerung das täglich anfallende Rechengut von 2,5 t zusammen mit den 500 kg Fetten und Ölen in die Kehrichtverbrennungsanlage. Die aus dem Vorklärbecken entnommenen 1200 m³ Schlamm sind zur Schlammbehandlung zu fördern.

Biologische Reinigungsstufe

In den Belüftungsbecken der biologischen Stufe bauen Bakterien die im Wasser gelösten organischen Schmutzstoffe ab. Durch lange Aufenthaltszeit des Abwassers in diesen Becken (rund 5 Stunden) ist es möglich, den vor allem im Harn enthaltenen Ammonium-Stickstoff in den harmloseren Nitrat-Stickstoff umzuwandeln. Die sogenannte Nitrifikation, die grosse Mengen an Sauerstoff benötigt, wurde nötig, weil sich der Prozess bis zur Inbetriebnahme im natürlichen Gewässer abspielte. Dies führte zu einem bedenklichen Sauerstoffmangel in der Limmat und im benachbarten Grundwasserstrom. Zudem liegt das Ammonium bei bestimmten Verhältnissen im Gewässer in Form von Ammoniak vor, welches ein gefährliches Fischgift ist. Die erwähnten Mikroorganismen schliessen sich in den folgenden Nachklärbecken in Schlammflocken zusammen und lagern sich am Beckenboden ab. Der grösste Teil dieses Schlammes wird ins Belüftungsbecken zurückgepumpt, und die Bakterien bauen von neuem Schmutzstoffe ab.

Chemische Reinigungsstufe

Durch Zugabe von Eisensalzen, pro Tag rund 22 t, wird im biologischen Anlageteil dem Abwasser auch Phosphor (Waschmittel!) entnommen. Der durch die Simultanfällung entstehende unlösliche, schwere Schlamm kann zusammen mit dem biologischen Schlamm im Nachklärbecken abgesetzt werden.

Filtration

Bevor das gereinigte Abwasser der Limmat übergeben wird, durchfliesst es einen Filter aus Sand und Blähschiefer. Hier werden ihm die feinsten Schwebestoffe, die als Trübung sichtbar sind, entnommen. Mit kleinen Mengen an Chemikalien wird weiterer Phosphor eliminiert.

3. Reinigungsleistung der Anlage, erste Ergebnisse

Die Reinigungsleistung der Anlage ist je nach Stoff verschieden. Mit dem bei Abwasserreinigungsanlagen oft verwendeten BSB_5 – er gibt an, wieviel Sauerstoff innerhalb von 5 Tagen verbraucht wird – ist ein Mass für die organischen Schmutzstoffe, die im Abwasser festgehalten werden, gegeben. Der erzielte Ammoniumgehalt zeigt vor allem die Wirksamkeit der biologischen, der erzielte Phosphatgehalt diejenige der chemischen Reinigungsstufe. Die Werte

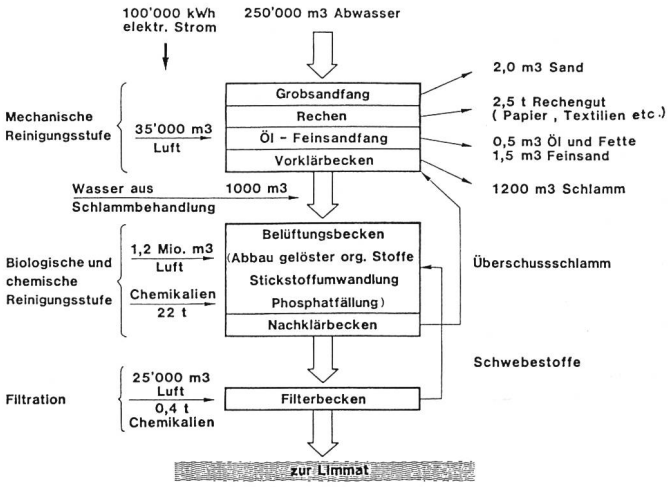


Bild 1. Erweiterte Kläranlage Werdhölzli. Abwasserbehandlung – Tagesfrachten.

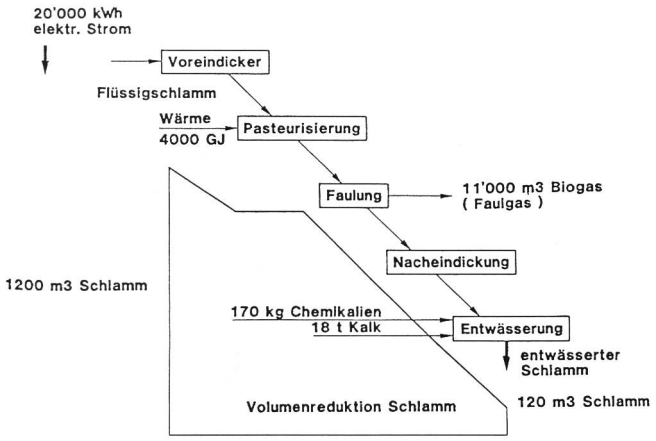


Bild 2. Erweiterte Kläranlage Werdhölzli. Schlammbehandlung – Tagesfrachten.

gemäss Bild 1 sind aktuell und wurden anhand der ersten Probenahmen am 14. Januar 1986 zusammengestellt. Trotz der in dieser kurzen Zeit noch nicht erreichten Optimierung der Anlage ist bereits heute offensichtlich, dass alle geforderten Ablaufwerte erfüllt, ja sogar unterschritten wurden. Der Reinigungsgrad bezüglich BSB_5 wie auch bezüglich Ammonium und Phosphor liegt bei 90%. Die Schmutzstoffmenge, die zur Limmat abgeleitet wird, ist heute je nach Stoff um das 5- bis 10fache kleiner als vor Inbetriebnahme der Erweiterungsbauten.
Die Anlage erfüllt also die in sie gesteckten Erwartungen. Man darf heute annehmen, dass in absehbarer Zeit damit das Problem der weitergehenden Abwasserreinigung als gelöst betrachtet werden kann. Anders sieht das leider bei der umweltgerechten Entsorgung der aus dem Abwasser entnommenen Schmutzstoffe aus.

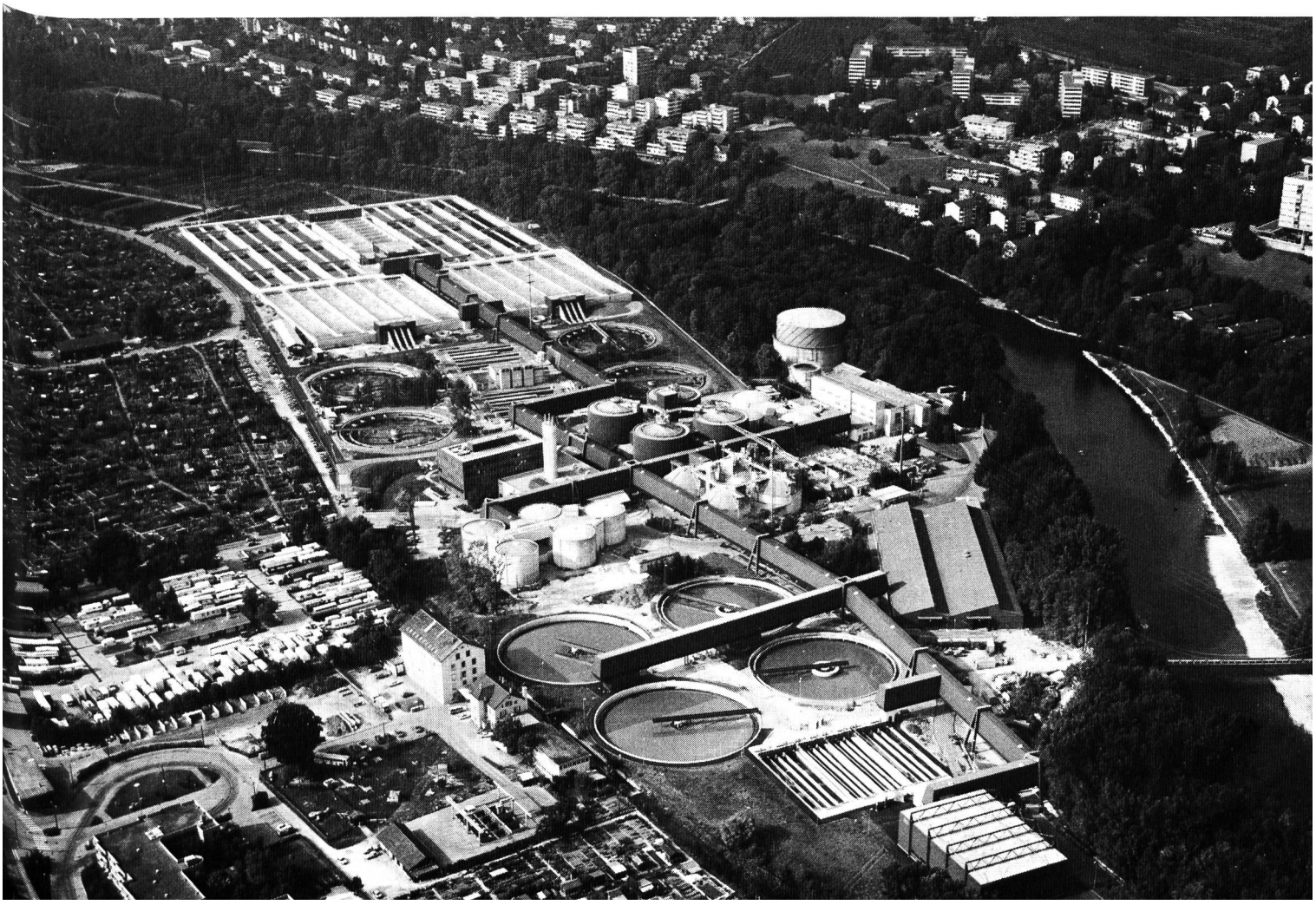
4. Die Schlammbehandlung

Bei der Schlammbehandlung geht es darum, das Schlammvolumen zu verkleinern und den Schlamm in eine Form zu bringen, in der er nicht mehr stinkt und hygienisch einwandfrei ist.
Im Werdhölzli sieht die Lösung wie folgt aus: Die 1200 m^3 Schlamm werden täglich im Voreindicker durch das Eigengewicht des Schlammes eingedickt. In der anschliessenden Pasteurisierungsanlage wird der Schlamm auf 70° C erhitzt, und dadurch werden Krankheitskeime unschädlich gemacht. Die nachgeschaltete zweistufige Faulung und Nacheindickung erlaubt es, den Schlamm so aufzubereiten, dass er als Flüssigdünger in die Landwirtschaft abgegeben werden kann.
Für die bei 35° C unter Luftabschluss ablaufende und einen Monat dauernde Faulung sind wiederum Mikroorganismen die Ursache. Das aus dem Faulprozess gewonnene Gas wird mit Gasturbinen in elektrische Energie und Wärme umgewandelt. Als Verbrennungsluft in den Turbinen dient die an verschiedenen Orten der Kläranlage gefasste übelriechende Abluft, die damit gleichzeitig gereinigt wird.
Als Ausweichmöglichkeit zur landwirtschaftlichen Verwertung besteht eine Schlammentwässerung mit Zentrifugen. Um den Schlamm anschliessend in einer Multikomponentendeponie zu lagern, muss er stichfest sein. Dies wird mit der Zugabe von gebranntem Kalk erreicht. Der Verbrauch an Kalk ist mit 18 t/Tag beträchtlich.

5. Blick in die Zukunft

Weil es an geeigneten landwirtschaftlichen Flächen an Deponierraum mangelt, muss in den nächsten Jahren nach neuen Lösungen für die Schlammentsorgung gesucht wer-

Bild 3. Flugaufnahme der erweiterten Kläranlage Werdhölzli. Im Vordergrund die mechanische Reinigungsstufe; in der Mitte die Tanks der Schlammbehandlung und das Betriebsgebäude mit dem Kamin der Energiezentrale. Im Hintergrund die biologische Reinigungsstufe mit der eingebetteten Filtrationsstufe (ganz oben im Bild). (Comet Flugbild)



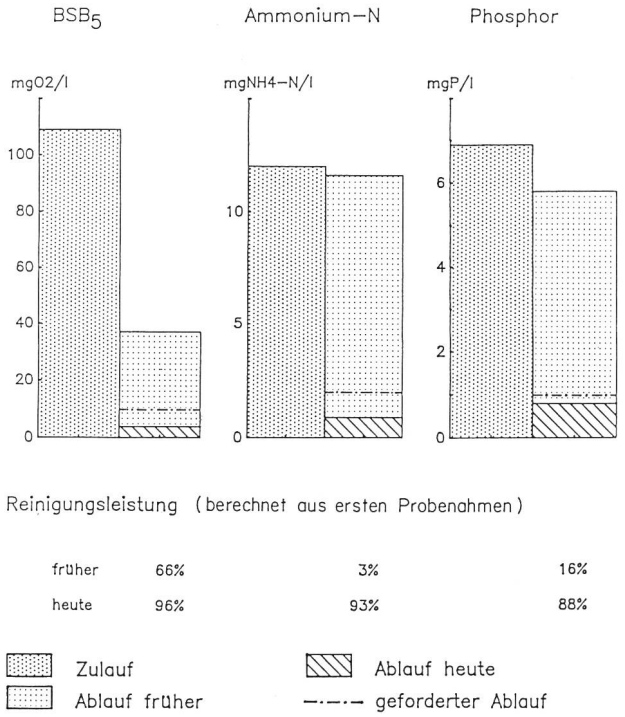


Bild 4. Die Reinigungsleistung der erweiterten Kläranlage Werdhölzli.

den. Erste Abklärungen haben ergeben, dass vorerst eine weitere Volumenreduktion durch eine Trocknung erreicht werden muss. Der getrocknete Schlamm könnte anschliessend als Brennstoff und Zuschlagsstoff bei der Baustoffherstellung oder als Trockendünger verwendet werden.

Der Hebel muss verstärkt an der Quelle, am Anfallort im Haushalt, in der Industrie und im Gewerbe angesetzt werden. Es geht darum, verschiedene Schadstoffe durch weitere Vorreinigungsanlagen zurückzuhalten oder gar nicht erst ins Abwasser zu bringen. Man wird in der Zukunft kaum darum herumkommen, gewisse, bei der Entsorgung besonders problematische Produkte zu verbieten. Ich denke an Produkte mit Cadmium oder mit Quecksilber.

Um die teuren Reinigungsstufen im Werdhölzli gut auszunützen, ist es notwendig, möglichst viel Abwasser auf diese Anlage zu leiten. Dies wird erreicht, indem die zurzeit noch bestehenden Engpässe im Kanalnetz durch den Bau von grösseren Kanälen vermindert werden und vermehrt Speichervolumen durch den Bau von weiteren Regenbecken im Kanalnetz geschaffen wird. Das zurzeit grösste Regenbekken der Stadt wird auf der Werdinsel vis-à-vis des Werdhölzli gebaut. Das 50-Millionen-Bauwerk wird 1988 in Betrieb genommen.

Weitere Bauten im Kanalnetz sind notwendig, damit das Grundwasser, unser Trinkwasserreservoir, auch für Notzeiten geschützt werden kann. Da die Stadt Zürich über einem mächtigen Grundwasserstrom liegt, muss unser Kanalnetz dicht sein. Um das zu erreichen, sind jährlich rund 30 Mio Franken in die sukzessive Erneuerung unseres 800 km langen städtischen Kanalnetzes zu investieren.

Weiter ist auch die Reinigung der Abwässer aus dem Gebiet im Norden der Stadt noch zu verbessern, um die heute äusserst stark verschmutzte Glatt zu sanieren.

Leider kann die angestrebte regionale Lösung nicht verwirklicht werden, so dass die Sanierung der Glatt wohl mindestens um 2 weitere Jahre verzögert wird. Die Stadt Zürich wird nun eine neue, eigene Anlage projektieren, welche eine weitergehende Abwasser- und Schlammbehandlung auch in der zweiten städtischen Kläranlage (Glatt), ähnlich den Verfahren im Werdhölzli, vorsehen wird.

Schade um die verpasste Chance, ein Umweltschutzproblem in einer Region gemeinsam anzugehen. Die Zusammenarbeit wird aber in Zukunft nötig sein, damit wir überhaupt eine Chance haben, die weitere Zerstörung unserer Umwelt zu verhindern.

Adresse des Verfassers: *Jürg Wiesmann,* dipl. Ing. ETHZ, Leiter Stadtentwässerung, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Bändlistrasse 108, 8064 Zürich.

Die gesetzten Ziele sind erreicht worden

Richard Heierli

Nach der Bewilligung des Kredites von 232 Mio Franken im Mai 1978 stand die Stadt Zürich vor dem kostenmässig grössten Bauvorhaben ihrer Geschichte. Da war es zweifellos angebracht, sich noch vor Baubeginn Klarheit zu verschaffen über die wichtigsten Ziele, Marschrichtungen und Eckpunkte. Heute, nach Abschluss des grossen Werks, kann beurteilt werden, ob die anvisierten Vorgaben erreicht wurden.

Der Termin

Die erweiterte Kläranlage sollte Ende 1985 fertig gebaut und in Betrieb sein. Der Kanton verlieh dieser Forderung dadurch Nachdruck, dass er die Ausrichtung eines ausserordentlichen Staatsbeitrages von 9% (neben 18% ordentlichem Beitrag) nur an jene Anlageteile in Aussicht stellte, die bis Ende 1985 in Betrieb stehen würden. Mit Genugtuung darf vermerkt werden, dass das gewässerschützerisch motivierte Ziel erreicht wurde und der ausserordentliche Beitrag an alle Anlageteile ausgerichtet werden wird.

Die Kosten

Der Kredit von 232 Mio Franken musste auf jeden Fall eingehalten werden. Für die Ausarbeitung des Projektes waren vor der Volksabstimmung fast 10 Mio Franken aufgewendet worden; es war entsprechend detailliert und der Kostenvoranschlag präzis. Der Einbezug der weiteren technischen Entwicklung bis heute war eine selbstverständliche Forderung, durfte aber nicht zu einer Kreditüberschreitung führen. 1980 erteilte der Gemeinderat einen Zusatzkredit von 7,3 Mio Franken für den Bau der Fahrzeug- und Lagerhalle sowie für Anpassungen beim Projekt des Betriebsgebäudes. Unter Aufrechnung der Teuerung (der Kredit von 232 Mio Franken basiert auf den Preisen von 1977, der Kredit von 7,3 Mio auf den Preisen von 1980) steht für das ganze Bauwerk ein Kredit von rund 300 Mio Franken zur Verfügung. Obwohl die definitive Bauabrechnung noch nicht vorliegt, dürfen wir heute davon ausgehen, dass diese Limite eingehalten wird.

Die Qualität

Die Projektierung der Kläranlagenerweiterung setzte schon zu Beginn der siebziger Jahre mit einem internationalen Ideenwettbewerb ein. Es versteht sich, dass die Entwicklung der Abwassertechnologie von damals bis heute nicht stillgestanden ist. Es wurde daher noch vor Baubeginn verlangt, es müsse der laufende technische Fortschritt ständig berücksichtigt werden. Heute ist die Feststellung berechtigt, die Kläranlage Werdhölzli sei eine moderne Anlage der achtziger Jahre – man würde sie heute nicht anders bauen und konzipieren, als sie jetzt dasteht. Die namhaftesten Fortschritte, die es zu berücksichtigen galt, lagen übrigens nicht auf dem Gebiet der Reinigungsverfahren, sondern –

wen wundert's – im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung, nämlich bei der Mess- und Steuerungstechnik.

Die Bauorganisation

Der Ausbau der Kläranlage Werdhölzli war eine grosse, mehrjährige – aber eben doch vorübergehende Aufgabe der Stadt. Es wurde deshalb eine Bauorganisation verlangt, die ohne Aufstockung des Verwaltungspersonals auskommt und sich nahtlos in die Stammorganisation der Verwaltung – mit ihrer klaren hierarchischen Gliederung und Aufteilung der Verantwortungen – einfügen lässt. Auch dieses Ziel ist erreicht worden; nur ein einziger Mitarbeiter der Stadtverwaltung hat sich hauptamtlich mit dem Kläranlagenausbau befasst. Der gewaltige Koordinations- und Administrationsaufwand auf Seite des Bauherrn wurde weitgehend bewältigt durch ein Team aus Fachleuten aus der Privatwirtschaft, das dem städtischen Projektleiter zur Seite gestellt wurde.

Adresse des Verfassers: Prof. *Richard Heierli,* Stadtingenieur, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Werdmühleplatz 3, Postfach, 8023 Zürich 1.

Presseorientierung vom 16. Januar 1986

Die Rätsel der Geysire

Albert Gyr

Nicht im klassischen Griechenland, sondern im sagenumwobenen Island erhielten sie ihren Namen nach «gusher« am Mt. Hekla, der seine Dampf-Wasser-Fontäne 60 m hoch schleudert. Noch höher ist der Ausstoss des Giant im Yellowstone Park, er schleudert 2,5 Millionen Liter pro Stunde auf eine Höhe von 66 m. Muss aber deshalb die Physik dieses Spektakels rätselhaft sein? Dieser Frage soll hier nachgegangen werden hinab zu Tiefen, wo die Zusammenhänge nur noch durch indirekte Schlussfolgerungen verstanden werden können.

Geysire sind ein geothermisches Phänomen. Da wo das Magma bis nahe unter die Oberfläche reicht, erhitzt es den Fels und dieser wiederum über Wärmeleitung das Wasser von Grundwasserquellen. Gesammelt steigt es in einem kaminähnlichen Schlot hoch. In ihm bildet sich unter Entspannung Wasserdampf, der, mit Wasser gemischt, in typischen Fontänen ausgestossen wird, und zwar nicht fortwährend, sondern in für jeden Geysir individuellen Intervallen. Allerdings ändern sich diese üblicherweise schon im Laufe weniger Jahre. Eine Ausnahme ist hierin Old Faithful (Yellowstone Park), der ja seinen Namen deshalb erhielt, weil er über Jahrzehnte hinweg sein Wasser mit grösster Regelmässigkeit ausspeit, allerdings seltsamerweise in zwei verschiedenen Perioden. Die Eruptionsperioden sind aber nicht die einzigen Rätsel, denen wir bei Geysiren begegnen; wir werden gleich noch mehrere kennenlernen.

Geysire sind keineswegs seltene Phänomene. Sie sind an den verschiedensten Orten auf dieser Erde anzutreffen und, sofern die Aufnahmen, die Mariner 9 und die Viking-Sonden zur Erde funkten, richtig interpretiert wurden, gab es sie auch auf dem Mars. Dort entstanden sie vermutlich durch Aufschmelzen verdeckter Eisschichten.

Verzichten wir auf die Beschreibung von heissen Quellen, auf reine Dampfausstösse und auf unterirdische Geysire – auch solche gibt es – sondern wenden wir uns nur den echten Geysiren zu; die Palette der Fragen ist immer noch gross genug: Wie entstehen sie? Woher stammt das Wasser, das sie auswerfen? Wie wird dieses Wasser aufgeheizt? und anderes mehr. Dabei wollen wir nicht nur unsere naturwissenschaftliche Neugier stillen, sondern einen Einblick erhalten, der uns in die Lage versetzt, Technologien zu entwickeln, um über künstlich gebohrte Geysire die Erdwärme zu nutzen. Dabei handelt es sich keineswegs um utopische Energiequellen; schon heute gibt es sie, allerdings eher als Fehlleistung, denn zur Energiegewinnung wären reine Dampfquellen geeigneter.

Gerade die Resultate solcher Bohrungen sind aber der Anlass dafür, dass recht einfache und plausible Erklärungen, die zum Teil noch in unseren Schulbüchern stehen, heute verworfen, ja manchmal durch entgegengesetzte Modelle ersetzt werden müssen. Dies beginnt schon mit der Theorie der Entstehung solcher Geysire. Aus dem Untergrund stiege durch Felsspalten warmes Wasser hoch und wasche sich so den typischen Kamin aus, wollte man noch zu unserer Schulzeit wissen. Nun enthält aber das Geysirwasser soviel gelöstes SiO_2, dass oberflächennahe Rohrsysteme durch Ausfällen eher verstopfen. Geysire begehen auf diese Art «Selbstmord». Bevor sich aber die Quelle selbst versiegelt, hat dieses Abdichten des Kamins auch eine Eruptionssteigerung zur Folge, da im abgedichteten Kamin viel kleinere thermische Verluste auftreten. Ja, es ist anzunehmen, dass gewisse heisse Quellen erst zu Geysiren werden, wenn der Kamin genügend abgedichtet ist. Die Kamine sind demnach primär vorhanden oder werden, wie dies der heutigen Vorstellung entspricht, geschaffen, indem sich Wasserdampf unter hohem Druck gewaltsam ein Steigrohr freipustet. Der Waimangu-Geysir in Neuseeland spie sich 1909 in der grössten je beobachteten Fontäne von 330 m Steighöhe seinen Weg frei. Seit 1917 schweigt er und dichtet sich vermutlich innerlich ab, um unsere Nachfahren im nächsten Jahrhundert zu ergötzen.

Die typischen SiO_2-Gehalte von 250 ppm, meist aber mehr, sind ein sicheres Indiz dafür, unter welchen Temperatur- und Druckverhältnissen der Lösungsvorgang ablief. Nämlich bei 200 bis 300°C, also in Tiefen, die nicht im Bereich des oberen Kaminsystems anzutreffen sind. Die typischen

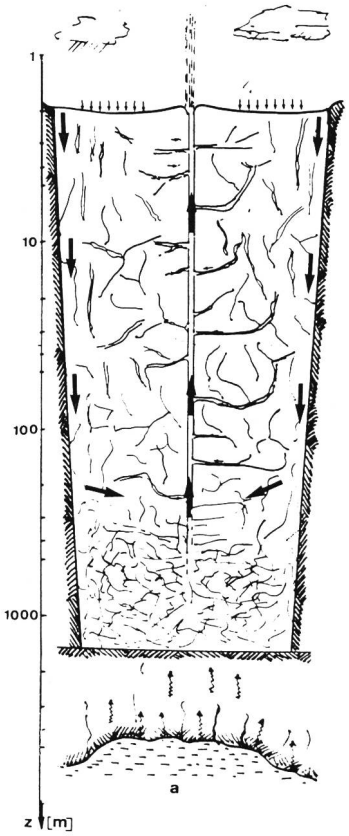
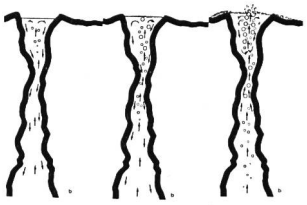


Bild 1, links. Schematische Darstellung eines Geysirsystems, Tiefe in log-Massstab.

Bild 2, unten. Prinziperklärung der Entspannungskettenreaktion.



Ablagerungen von amorphem Opal-βChristobalit und Geyserit trugen somit bei, die alten Entstehungstheorien anzuzweifeln. Nicht genug damit, die Analyse des ausgeworfenen Wassers ergab, dass mindestens 95% dieses Wassers aus Meteorwasser stammt, wenn auch besagtes Regenwasser recht tief, das heisst 1,5 bis 3 km ins Erdinnere versickern muss, ehe es wieder eruptiv ausgeschleudert wird. Die durchgeführten Gasanalysen zeigten aber auch, dass keine vulkanischen Gase gelöst vorzufinden sind oder höchstens in so kleinen Spuren, dass nicht daran zu denken ist, dass sie das Wasser erhitzten. Wieder stürzte eine alte Vorstellung in sich zusammen und musste durch eine Theorie ersetzt werden, die auf der Wärmeleitung über den Fels beruht.

Die Wasserchemie ist nun also behilflich gewesen, die meisten jener Fragen zu beantworten, die sich nicht auf das eigentliche Schauspiel beziehen; letzterem wollen wir nun durch physikalische Überlegungen auf die Spur kommen.

Bei den oben zitierten Tiefen ist der hydrostatische Druck an der Basis enorm. Dadurch kann das Wasser auf recht hohe Temperaturen erhitzt werden, ohne dass es verdampft. Bei einem Druck von 873 m WS ist die Gleichgewichtstemperatur bei 300° C. Nun ist aber warmes Wasser leichter als kühleres und möchte dementsprechend aufsteigen; ein Vorgang, der in alten Zentralheizungen zur Aufrechterhaltung der Zirkulation genutzt wurde; in diesem Fall wird das aufsteigende Wasser durch seitlich zuströmendes ersetzt. Fliesst nicht genügend zu, so kommt es zu Konvektionsströmungen. Durch einen solchen Prozess werden auch höhere Regionen recht rasch erhitzt. Dieses Zirkulationssystem erfasst immer höhere Regionen, wodurch überhitztes Wasser in Gebiete vordringt, wo der Druck nicht mehr ausreicht, um das Verdampfen zu verhindern. Aber schon mit der ersten Blase beginnt die Kettenreaktion.

Das Wasser entspannt, immer mehr Blasen entstehen, und die bereits entstandenen dehnen sich während des Emporsteigens aus. Das Wasser-Dampf-Gemisch ist aber wesentlich leichter und der Druck im Kamin nimmt ab. Dadurch entstehen Blasen in viel tieferen Regionen. Der Kreis ist geschlossen, die Rückkoppelung führt zu einem explosionsartigen Anwachsen des Wasserdampfgehaltes im oberen Steigrohrbereich. Besitzt dieses gar noch eine Verengung, so verstärkt sich diese Wirkung: Das Wasser-Dampf-Gemisch wird ausgespien.

Ein Miniphänomen dieser Art können Sie in Ihrem Badezimmer nachvollziehen. Drehen Sie den Warmwasserhahn stark auf, so wird das Wasser mit steigender Temperatur trüber, da es mehr und mehr Blasen enthält, und der Strahl selbst wird bei seinem Austritt aufgebläht.

Die verblüffende Periodizität der Geysire lässt sich nun durch diesen Prozess beschreiben. Notwendig ist hierfür allerdings eine Beschränkung des Vorganges, das heisst es hat eine Art Ventil zu wirken. Da kein mechanisches eingebaut ist, hat dieses strömungsmechanischer oder thermodynamischer Art zu sein.

Nach dem Ausbruch sinkt der Pegelstand im Kamin ab. Wie in einem Brunnen strömt nun seitlich Wasser zu in Abhängigkeit der örtlichen Durchlässigkeit des Gesteins und des herrschenden Gegendrucks; dies legt den strömungsmechanischen Zeitmassstab fest. Gleichzeitig beginnt das System, über Wärmeleitung auch thermisch zu regenerieren, da es beim Verdampfen erheblich abgekühlt wurde. Dadurch wird das System in jene Lage zurückgeführt, die einen neuen Ausbruch erlaubt. Dies legt eine systemimmanente Periode fest. Je nachdem, welcher Zeitmassstab dominant ist, handelt es sich um ein hydro- oder thermodynamisch gesteuertes System. Meist ist es aber durch die Wärmeleitung begrenzt und, da diese ein sehr langsamer Prozess ist, können Geysire Tages-, ja Monatsperioden aufweisen. Mehrfachperioden, wie sie etwa der Old Faithful aufweist, sind die Folge von Teilentladungen durch Instabilitäten im mittleren Bereich des Kamins, die besonders regelmässig werden, wenn in diesem Bereich noch Verzweigungen vorliegen, die sich selbst entladen können. Was im einzelnen vorliegt, ist aber äusserst schwierig zu bestimmen, weshalb es nicht verwundert, dass sich Forscher gerade bei den berühmtesten Geysiren über Detail-Fragen in die Haare geraten.

Adresse des Verfassers: Dr. *Albert Gyr,* Institut für Hydromechanik und Wassserwirtschaft, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

Durchstrahlung von Gestein mit Schallwellen

Wie die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) mitteilt, ist es ihr gelungen, in ihrem unterirdischen Felslabor auf der Grimsel Gestein mit einer bisher nicht erreichten Auflösung zu «durchleuchten». Dabei ist auf Tausenden von Strahl-Laufwegen zwischen drei parallelen Bohrlöchern, welche eine Fläche von rund 30000 m² begrenzen, die Laufzeit von Schallwellen gemessen worden. Das entsprechende Verfahren soll auch bei den bevorstehenden Sondierungen im Hinblick auf die Endlagerung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle eingesetzt werden.

Die Durchstrahlung mit Schallwellen – ein Schichtaufnahmeverfahren, wie man es auch in der Medizin kennt – dient dazu, die Struktur von möglichem Endlagergestein zu prüfen, ohne es dabei zu beschädigen. Auf der Grimsel hat man für die Untersuchungen einen Gebirgsabschnitt ausgewählt, welcher sowohl kompaktes Gestein als auch Kluftzonen aufweist. Zwischen Juli und Oktober 1985 sind jeweils in einem der drei waagrechten Bohrlöcher in verschiedener Tiefe Schallwellen ausgesandt worden. Empfänger, sogenannte Geophone, in den anderen Bohrungen haben das Eintreffen der Wellen registriert. Durchlaufen diese eine Schwächezone, werden sie gedämpft und benötigen mehr Zeit für den Weg zum Empfänger.

Ein Computer setzt die umfangreichen Messdaten in ein farbiges Tomogramm (Schichtbild) um. Die Farben drücken die unterschiedlichen Grade der Stabilität des Gesteins aus. Erste Ergebnisse zeigen, dass man mit der Wellendichte, wie sie von der Nagra gewählt worden ist, Störungszonen von etwa einem Meter Mächtigkeit erkennen und solche mit etwa 2,5 m Abstand voneinander unterscheiden kann.

Auf der Grimsel ist neben den horizontalen Flächen zwischen den Bohrungen auch eine senkrechte seismisch durchstrahlt worden. Dabei hat man an der Erdoberfläche – 420 m über dem Felslabor – mit schwachen Sprengladungen Schallwellen erzeugt und deren Eintreffen im Laborstollen registriert.

Verglichen mit ähnlichen Messungen, welche bereits in Kanada und Schweden durchgeführt worden waren, hat man bei jenen der Nagra mit einer sehr viel grösseren Anzahl Strahl-Laufwegen (16200) gearbeitet. Ein Schlussbericht soll bis Ende Jahr vorliegen. Voraussichtlich ebenfalls noch 1986 wird eine schwedische Spezialfirma auf der Grimsel eine ähnliche Messkampagne mit elektromagnetischen Wellen (Radar) durchführen. Vorversuche im Herbst 1985 sind erfolgreich verlaufen. *Karl Schori*