Wärmegewinnung aus dem Grundwasser im Infiltrationsbereich der Limmat in Zürich

Autor(en): **Kempf, Theo / Walter, Ulrike**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **77 (1985)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940968

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Wärmegewinnung aus dem Grundwasser im Infiltrationsbereich der Limmat in Zürich

Theo Kempf und Ulrike Walter

Zusammenfassung

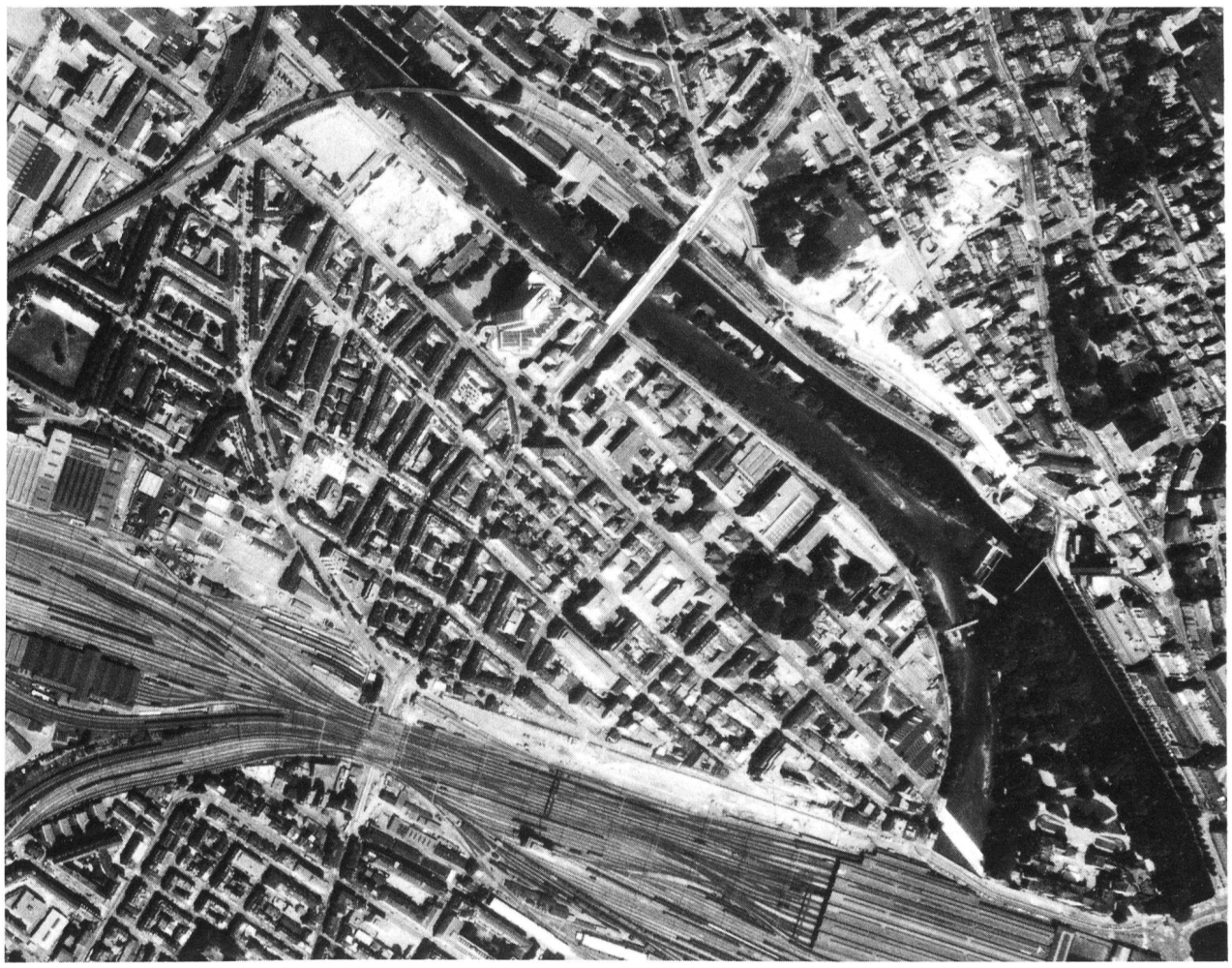
Der Bau einer Grundwassergewinnungs- und Versickerungsanlage mit einer konzedierten Leistung von 2500 l/min für eine Wärmepumpe im Verwaltungsgebäude des Migros-Genossenschafts-Bundes am Limmatplatz, Zürich, gab Anlass zu umfangreichen Untersuchungen der Grundwassertemperaturen und ihrer Veränderung nach Aufnahme der Wasserrückversickerung.

Die Grundwasserfassung liegt in 150m Distanz linksseitig der Limmat; sie wird dank spezieller hydrogeologischer Verhältnisse bis zu einer Entnahme von etwa 1000l/min vorwiegend von relativ warmem Grundwasser von der Stadtseite her angeströmt. Die Versickerungsanlage liegt im ausgeprägten Infiltrationsbereich der Limmat, nur 30m vom Flussufer entfernt. Weil die Temperatur des Rücklaufwassers der Wärmepumpe im Winter bei den derzeitigen Betriebsverhältnissen 5 bis 8°C höher liegt als die Temperatur des Flussinfiltrates, wird die natürliche winterliche Abkühlung des Grundwassers im Abströmbereich der Versikkerungsanlage weitgehend unterbunden, während im Sommer bei Rückgabetemperaturen, die nahe bei den Temperaturen des Flussinfiltrates liegen, keine Beeinflussung der Grundwassertemperatur festzustellen ist. Die Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur werden erhöht. Die positive Temperaturanomalie ist bis in eine Entfernung von etwa 300m unterstrom der Versickerungsanlage zu verfolgen.

1. Einleitung

Bei der zunehmenden Zahl von Gesuchen und Bewilligungen für eine Wärmeenergienutzung des Grundwassers in Wärmepumpenanlagen drängt es sich auf, die Auswirkungen von Kaltwasserversickerungen auf das Grundwasser zu überwachen, um anhand fundierter Kenntnisse Grundlagen für die Erteilung weiterer Bewilligungen zu erarbeiten. Anlass zur vorliegenden Untersuchung gab der Bau einer Grundwassergewinnungs- und Versickerungsanlage für eine Grundwasserwärmepumpe, die einen Teil des Wärmeenergiebedarfs für den Neubau des Verwaltungsgebäudes des Migros-Genossenschafts-Bundes am Limmatplatz in Zürich deckt. Im Sommer wird das Grundwasser zu Kühlzwecken genutzt. Die konzedierte Grundwasserentnahme beträgt 2500 l/min; die Temperaturveränderung darf gemäss Konzession maximal $\triangle T = \pm 5°C$ betragen.

Ausschnitt aus einer Flugaufnahme vom 9. August 1983 im Massstab von etwa 1 : 8000; Norden oben. In der rechten unteren Bildecke fliesst beim Platzspitz die Sihl in die Limmat. Das Drahtschmidli-Wehr staut die Limmat und reguliert den Zürichsee. Von dort zweigt der rechtsufrige Wasserwerkkanal ab, der Limmatwasser zum Kraftwerk Letten führt. Die Limmat begrenzt hier den Grundwasserstrom gegen Nordosten. In der Bildmitte führt die Kornhausbrücke über die Limmat zum Limmatplatz, wo das Hochhaus des Migros-Genossenschaftsbundes steht. Nordwestlich davon, zwischen Sihlquai (linksufrig entlang der Limmat) und der Limmatstrasse, ist die Alterssiedlung Limmatstrasse im Bau und die Baugrube für die Überbauung Sihl-Center offen. Vergleiche auch den Planausschnitt von Bild 3. (Swissairphoto)



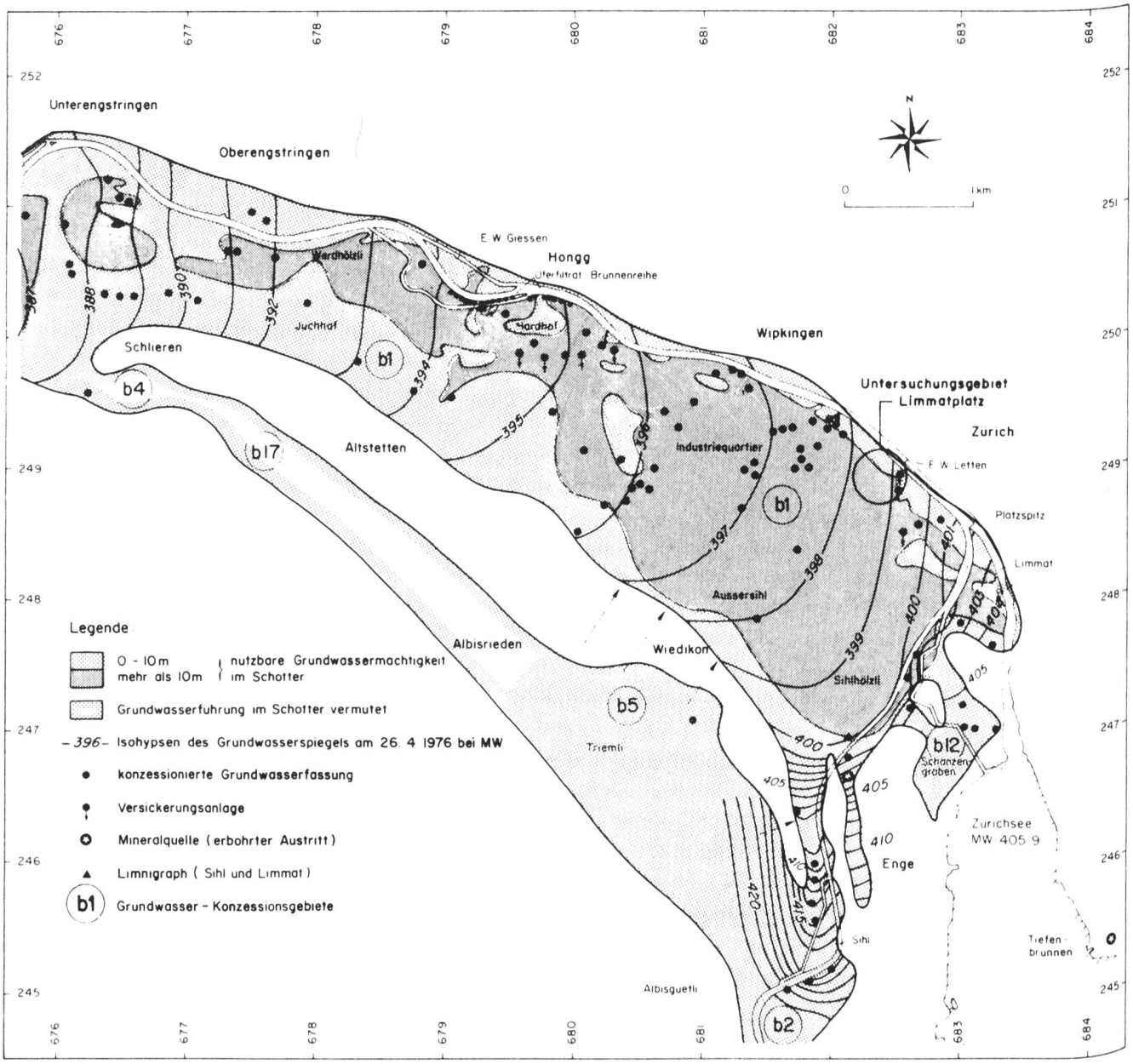
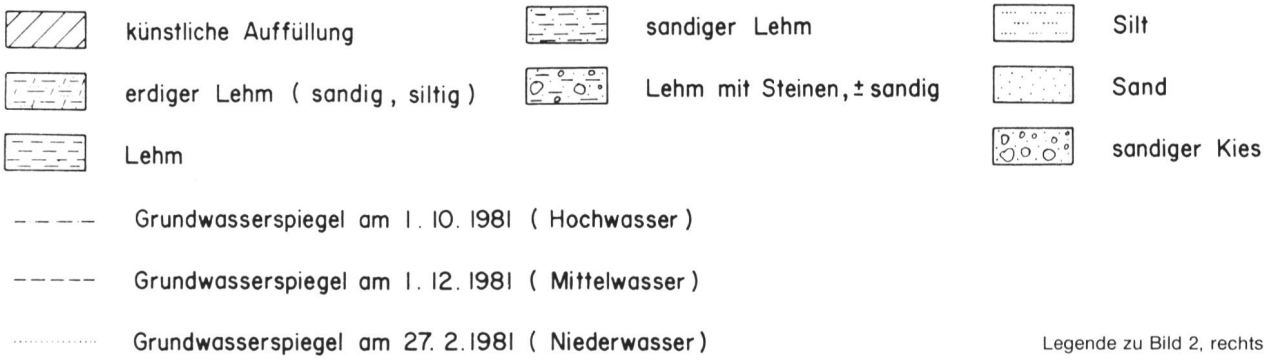
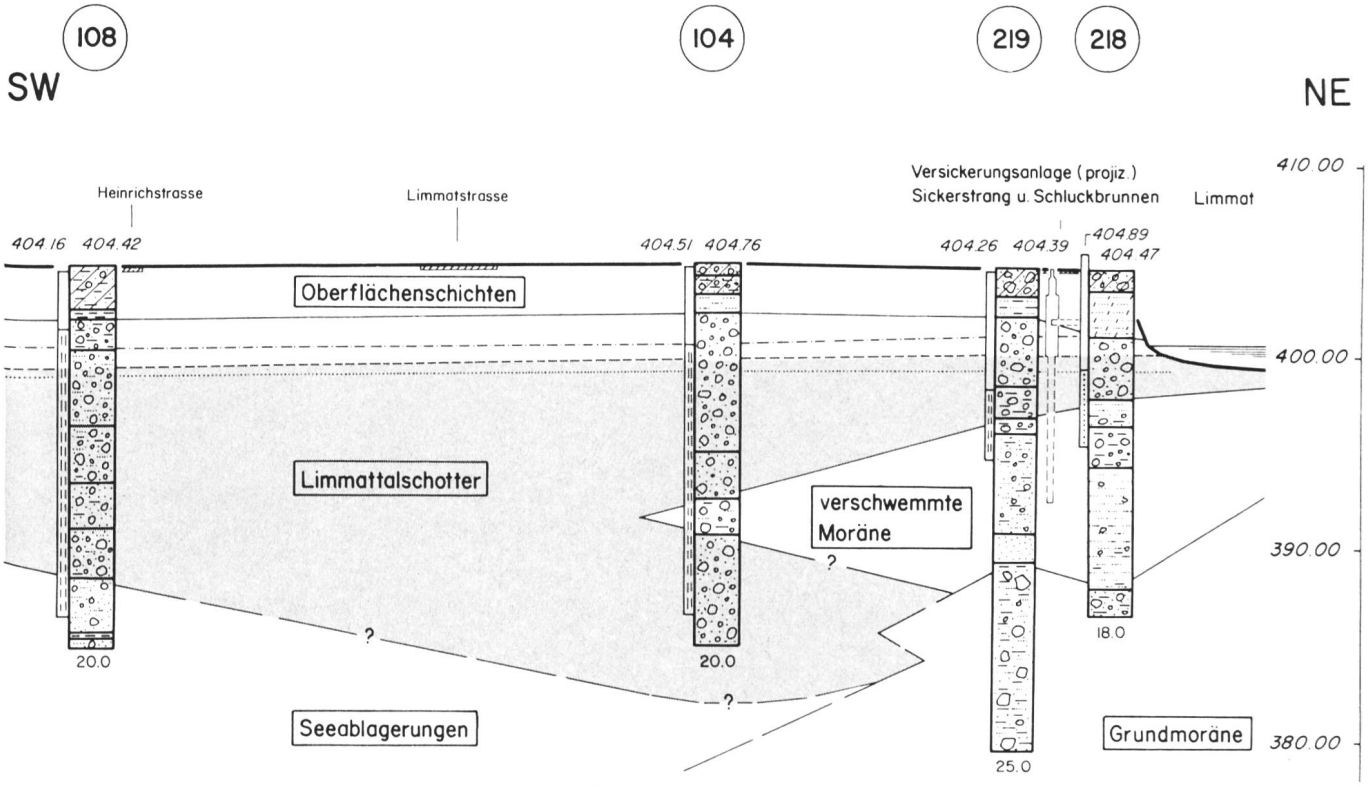


Bild 1. Grundwasserkarte 1:50000 des Limmattales zwischen Zürich und Unterengstringen.

Beim vorgestellten Fall liegt die Rückversickerungsanlage sehr nahe am Limmatufer im Bereich starker Flusswasserinfiltration. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Grundwassertemperaturen in einem weiteren Umkreis während rund 3 Jahren gemessen, graphisch ausgewertet und die Temperaturverhältnisse unter Einfluss der Rückversickerung mit den früheren natürlichen Verhältnissen verglichen. Der Migros-Genossenschafts-Bund übernahm die Kosten für die Ergänzung des Grundwasser-Messstellennetzes. Die Kosten für die umfangreichen Messungen und Auswertungen wurden vom Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich unter Beteiligung der Stadt Zürich und des Migros-Genossenschafts-Bundes getragen.



Legende zu Bild 2, rechts



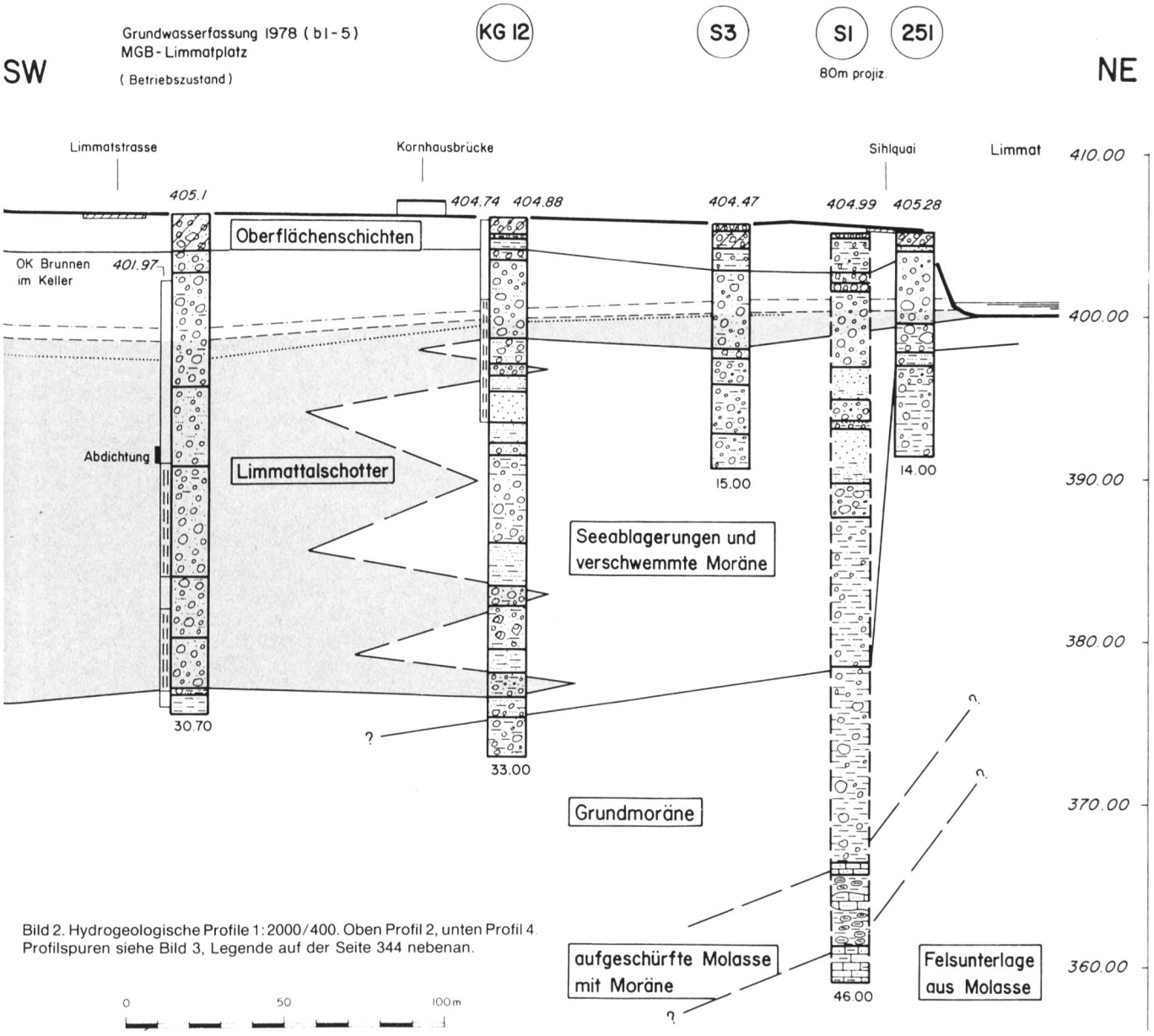
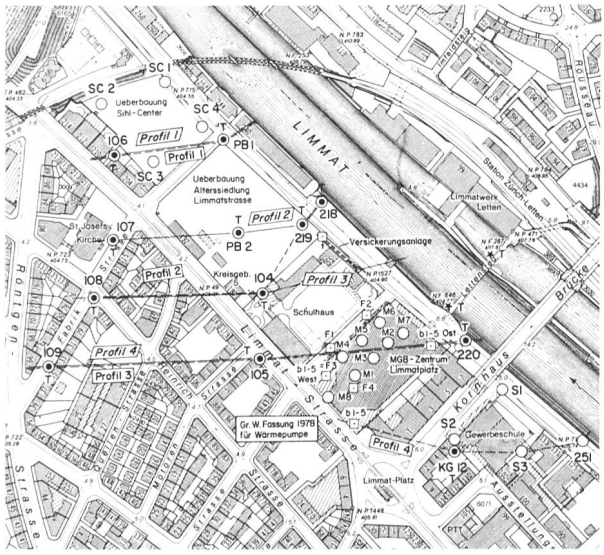


Bild 2. Hydrogeologische Profile 1:2000/400. Oben Profil 2, unten Profil 4. Profilspuren siehe Bild 3, Legende auf der Seite 344 nebenan.



○ Kernbohrung

◉ Kernbohrung mit Beobachtungsrohr
⌀ 4½": Nr. 104 - 109, KG 12, PB 1, PB 2, Sc 2
⌀ 2" : Nr. 218, 219, 220

T Temperaturmessstellen

⊡ Vertikalfilterbrunnen ⊡ Schluckbrunnen am Sihl-Quai

⊡ Vertikalfilterbrunnen aufgehoben
F1, F2, F4 = ehemalige Wasserhaltungsbrunnen

✶ Messstellen Limmat und Wasserwerk-Kanal

Profil I Profilspuren für die hydrogeologischen Querprofile

Profil I Profilspuren für die Temperatur-Querprofile

Bild 3. Situation 1:7500 mit Darstellung der Bohrungen, Messstellen und Profilspuren.

2. Lage des Untersuchungsgebietes und geologische Verhältnisse

Das weitgehend überbaute Untersuchungsgebiet liegt in der Stadt Zürich am rechten Rand des Limmattal-Grundwasserstromes bzw. im linken Uferbereich der Limmat (Bilder 1 und 3). Die Grenze des grundwasserführenden Schotters verläuft hier im Flussbett der Limmat; seine Mächtigkeit beträgt am linken Flussufer ca. 7 m, weiter stadtwärts 25 m (Bild 2). Der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert liegt bei $k_f = 1{,}2 \times 10^{-3}$ m/s. Als Grundwasserstauer unter dem Schotter folgen kompakte Grundmoräne, feinkörnige Seeablagerungen oder verschwemmtes, lehmiges Moränenmaterial.

3. Hydrologie

3.1 Abflussverhältnisse der Limmat

Die Limmat führt im Untersuchungsgebiet auf der linken Flussseite Wasser der Sihl, auf der rechten Flussseite Zürichseewasser aus dem Schanzengraben und dem Wehrüberlauf Drahtschmidli. Die verschiedenen Wässer sind hier noch nicht vermischt. Bis zu maximal 125 m³/s Seewasser fliessen oberhalb des Untersuchungsgebietes beim Wehr Drahtschmidli in den Lettenkanal und werden im Flusskraftwerk Letten zur Stromerzeugung genutzt.
Die Abflussmenge der Limmat im Untersuchungsgebiet bei der Kornhausbrücke beträgt etwa 3,5 m³/s bei Niederwasser und 10 m³/s bei Mittelwasser. Bei mittleren Abflussverhältnissen führt die Limmat hier etwa zu gleichen Teilen Seewasser und Sihlwasser.

3.2 Grundwasserverhältnisse

Der Wasserspiegel der Limmat liegt stets höher als der Grundwasserspiegel im Schotter, so dass die Limmat auf ihrer linken Flusshälfte, wo ihr Flussbett im Schotter liegt, ins Grundwasser infiltriert. Die Infiltration erfolgt meistens perkolativ, bei extremem Hochwasserstand direkt. Die Infiltrationsleistung der Limmat dürfte im untersuchten Abschnitt etwa 1,5 l/min pro Meter Flussstrecke bei Mittelwasser- und bis zu 5 l/min bei Hochwasserabfluss betragen.
Die Gefälls- und Strömungsverhältnisse des Grundwassers im natürlichen Zustand und bei Betrieb des Entnahmebrunnens b 1–5 (1978) und der Rückversickerungsanlage des Migros-Genossenschafts-Bundes sind auf den Bildern 4 bzw. 5 dargestellt.
Der Flurabstand des Grundwasserspiegels ist im ganzen Untersuchungsgebiet gleich gross und beträgt bei Mittelwasserstand 4,5 m.

4. Technische Angaben zur Wärmepumpenanlage

4.1 Heizungsanlage

Das Verwaltungsgebäude des Migros-Genossenschafts-Bundes am Limmatplatz in Zürich umfasst ein umbautes Volumen von 245000 m³ bei einer Bruttogeschossfläche von 63000 m².
Gemäss Energiekonzept wird der Wärmeenergiebedarf des Gebäudes gedeckt durch zwei 200-kW-Block-Heizkraftwerkaggregate, welche mit einem Gas/Ölgemisch betrieben werden, sowie durch zwei Elektromotoren-Wärmepumpen, welche nach Angaben der Herstellerfirma eine Maximalleistung von je 640 kW aufweisen. Davon können je ca. 370 kW aus dem Grundwasser gewonnen werden. Das Heizsystem wird durch einen Spitzen- und Stand-by-Kessel mit Gas/Öl-Zweistoffbrenner mit einer Gesamtleistung von 2320 kW ergänzt.

4.2 Grundwasserfassung Konzession Nr. b 1–5 (1978)

Für die Grundwasserentnahme bis zu 2500 l/min zur Speisung der Wärmepumpen wurde im Jahre 1978 eine neue Grundwasserfassung (b 1–5, 1978) erstellt. Die Untergrenze des durchlässigen Schotter-Grundwasserleiters liegt beim Vertikalfilterbrunnen auf 29,1 m unter Terrain, die mittlere nutzbare Grundwassermächtigkeit beträgt 24 m.
Weil die Fassung in nur 130 m Fliessdistanz von der Limmat liegt, musste versucht werden, den direkten und raschen Zustrom von Limmatinfiltrat zum Filterbrunnen so weit als möglich zu vermindern, um allzu grosse jahreszeitliche Temperaturschwankungen und namentlich tiefe Grundwassertemperaturen im Winter zu vermeiden. Dies wurde durch tiefes Einsetzen der geschlitzten Filterrohre zwischen 15 m und 29 m unter Terrain weitgehend erreicht. Eine Verfingerung von verschwemmtem lehmigem Moränenmaterial mit dem Schotter zwischen Limmat und Fassung, also eine Art hydrogeologische Barriere (vgl. Bild 3), begünstigte das Vorhaben.
Der Zustrom zur Grundwasserfassung erfolgt bei Entnahmemengen bis zu 1000 l/min vorwiegend in den tiefen Teilen des Schotters von der Stadtseite her, was durch den Chemismus des Wassers und durch die ganzjährig hohe Grundwassertemperatur von 12 bis 13°C (vgl. Kap. 7) sowie durch die kleinen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen belegt wird. Bei grösseren Entnahmen vergrössert sich der Infiltratanteil und dementsprechend auch die Temperaturschwankungen des gepumpten Grundwassers.

4.3 Versickerungsanlage

Die Versickerungsanlage am Sihlquai liegt 30 m neben dem Limmatufer und in ca. 150 m Entfernung vom Entnahme-

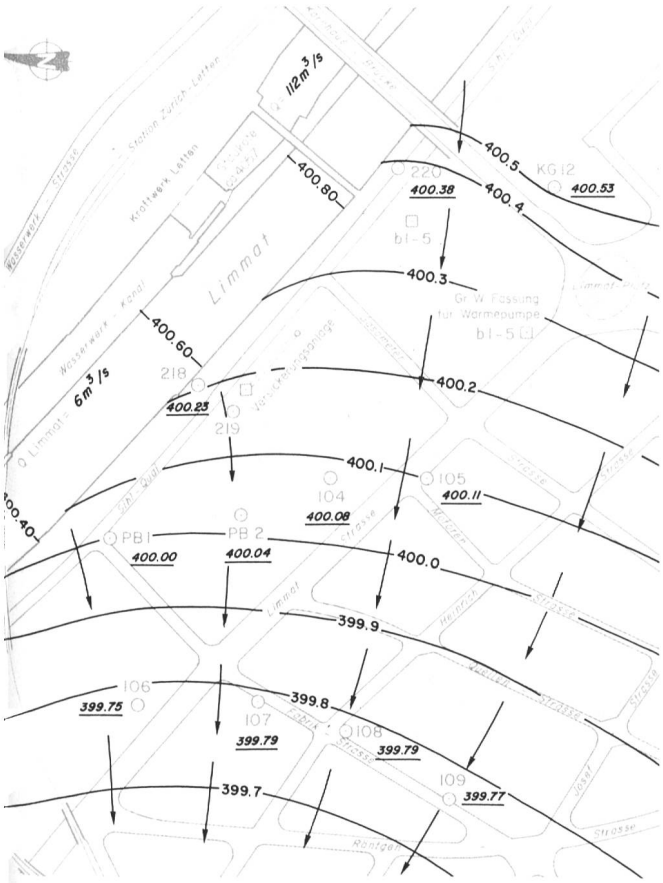
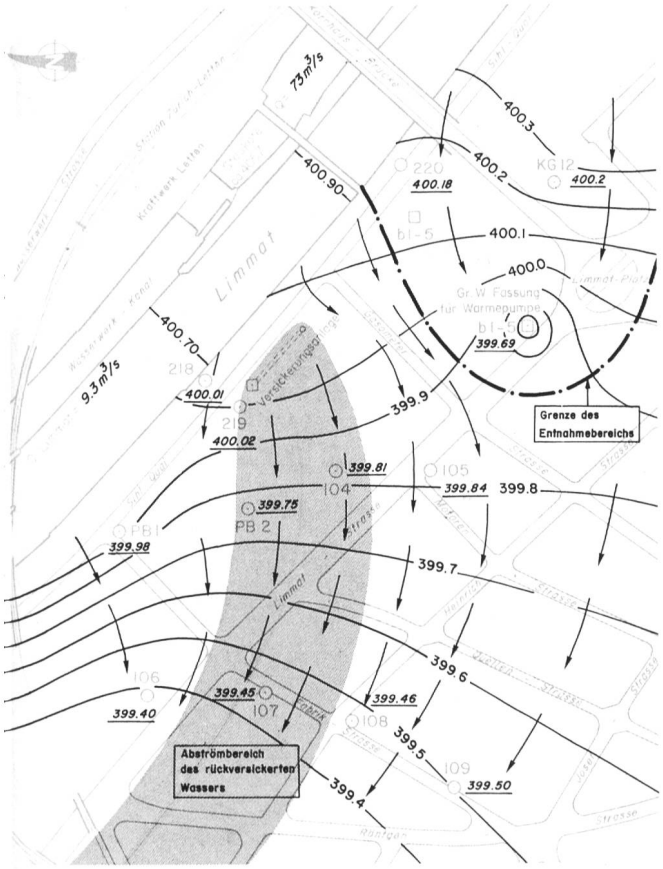


Bild 4. Isohypsen des Grundwasserspiegels am 1. Juni 1983 bei Ruhelage (hoher Mittelwasserstand). Massstab 1:5000.

Bild 5. Isohypsen des Grundwasserspiegels am 29. März 1983 bei Pumpbetrieb mit Rückversickerung, Q = ca. 850 l/min (Mittelwasserstand). Massstab 1:5000.



brunnen. Es handelt sich um ein 50 m langes, in 3 m Tiefe unter Terrain verlegtes Sickerrohr mit 2‰ Längsgefälle, welches an seinem nordwestlichen Ende in einen 12 m tiefen vertikalen Schluckbrunnen mündet. Anlässlich eines Probelaufes wurde beobachtet, dass bei einer Rückgabemenge von rund 2500 l/min alles Wasser bereits in der horizontalen Filterstrecke versickerte, ohne den Schluckbrunnen zu erreichen.

4.4 Rezirkulation

Auswertungen von Isohypsendarstellungen der Grundwasseroberfläche haben gezeigt, dass ab einer Betriebswassermenge von 2000 bis 2500 l/min eine bescheidene Rezirkulation des versickerten Wassers zum Entnahmebrunnen zu erwarten ist.

4.5 Erweiterung der Grundwassernutzung seit 1983

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Konzession zur Entnahme von Grundwasser aus dem Filterbrunnen des Migros-Genossenschafts-Bundes 1983 um 800 l/min auf 3300 l/min erhöht worden ist, um die Wärmepumpe der städtischen Überbauung «Altersiedlung Limmatstrasse» aus demselben Filterbrunnen mit Grundwasser zu speisen. Im Normalfall wird das für die städtische Wärmepumpe benötigte Wasser aus dem Rücklaufwasser der Wärmepumpe des Migros-Genossenschafts-Bundes bezogen, um weitere 2°C abgekühlt und anschliessend in der Versickerungsanlage am Sihlquai dem Grundwasserstrom zurückgegeben.

4.6 Kühlung

Im Sommer wird das Grundwasser zur Kühlung verwendet. Das um 2 bis 4°C erwärmte Kühlwasser wird ebenfalls in der Versickerungsanlage am Sihlquai rückversickert.

5. Betriebsverhältnisse in den Jahren 1981–1983

Die Betriebsverhältnisse in der Wärmepumpenanlage sind aus Bild 6 ersichtlich. Die Wärmepumpe wurde Mitte November 1980 in Betrieb genommen. Zu diesem Zeitpunkt war die Versickerungsanlage noch nicht gebaut; bis zu ihrer Betriebsbereitschaft wurde daher das Rücklaufwasser der Wärmepumpe während eines Jahres in die Limmat abgeleitet.

Mit der Rückgabe ins Grundwasser wurde im November 1981 begonnen und bis Mai 1982 im Mittel ca. 18000 m³ Wasser pro Woche versickert. Im Juni/Juli 1982 musste die Rückversickerung wegen einer nahegelegenen Baugrube für zwei Monate eingestellt werden. Ab August 1982, nach nunmehr abgeschlossener Einregulierung der Heizungs- und Kühlungsanlagen, betrug die durchschnittliche Entnahme- bzw. Rückversickerungsmenge im Sommer nur noch rund 3000 m³/Woche, im Winter bis zu 12000 m³/Woche.

Die *Entnahmetemperatur* des Grundwassers in der Fassung b 1–5 (1978) schwankte in den ersten beiden Betriebsjahren zufolge der konstant grossen Fördermenge von 18000 bis 25000 m³/Woche und des dadurch verstärkten Infiltrationseinflusses der Limmat relativ stark zwischen 9,5 und 15°C. Ab August 1982 schwankte sie bei kleineren Fördermengen nur noch zwischen 12,5 und 14°C und war damit bedeutend höher und auch ausgeglichener als in den umliegenden Messstellen mit gleichem Abstand zur Limmat. Dies ist auf die in Kap. 4.2 erwähnte spezielle hydrogeologische Lage des Entnahmebrunnens zurückzuführen.

Die *Rücklauftemperatur* des Kühlwassers schwankte im Sommer 1982 meist zwischen 12 und 18°C und war damit 2 bis 3°C höher als die Entnahmetemperatur; im Sommer

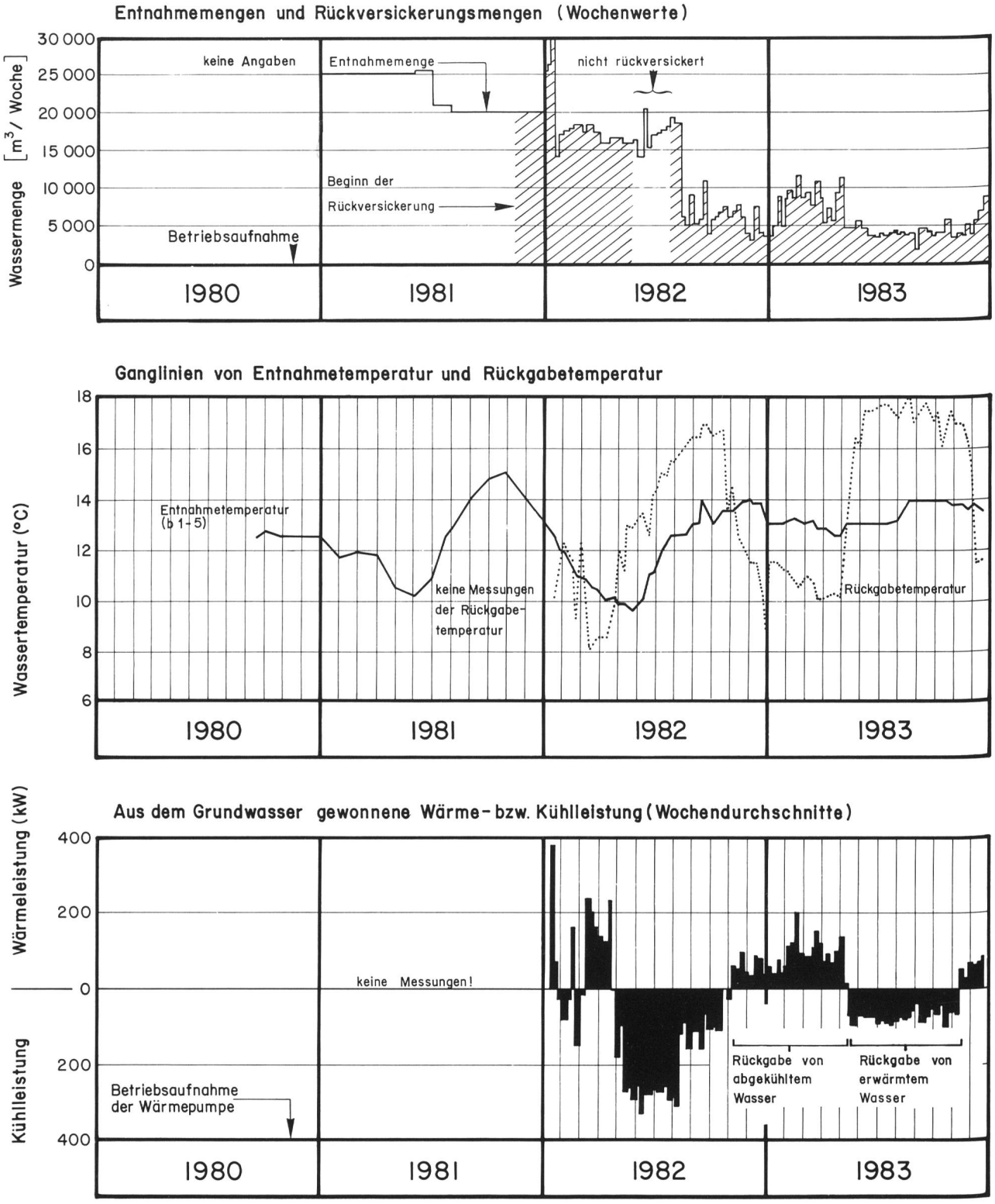


Bild 6. Betriebsverhältnisse im Entnahmebrunnen b 1–5 (1978) und in der Rückversickerungsanlage am Sihlquai.

1983 lag sie zwischen 16 und 18°C und war zeitweise bis zu 4,5°C höher als die Entnahmetemperatur. Im Winter 1982/83 betrug die Temperatur des rückversickerten Wassers normalerweise 10 bis 11°C, die Abkühlung in der Wärmepumpe somit 2 bis 3°C. Es ist zu beachten, dass diese Temperatur um 5 bis 8°C wärmer war als die Temperatur des natürlicherweise ins Grundwasser infiltrierenden Limmatwassers (vgl. Ganglinie der Limmattemperatur auf Bild 7).

In der Heizperiode von Anfang November 1982 bis Mitte Mai 1983 lag die dem Grundwasser entzogene *Wärmeleistung* zwischen 50 und 200 kW im Wochenmittel; die entnommene Wärmeenergiemenge betrug in dieser Zeitperiode ca. 350000 kWh. Bei einem angenommenen Heizwert für 1 kg Heizöl EL von 10,7 kWh (= Kesselwirkungsgrad 90%) konnten damit rund 27 t Heizöl substituiert werden.

Im Sommer 1983 lag die Kühlleistung des Grundwassers bei durchschnittlich 80 kW, die dem Grundwasser während der warmen Jahreszeit zugeführte Wärmeenergie betrug 325000 kWh. Damit ergab sich für die im Wechselbetrieb gefahrene Anlage eine beinahe ausgeglichene Wärmeenergie-Jahresbilanz.

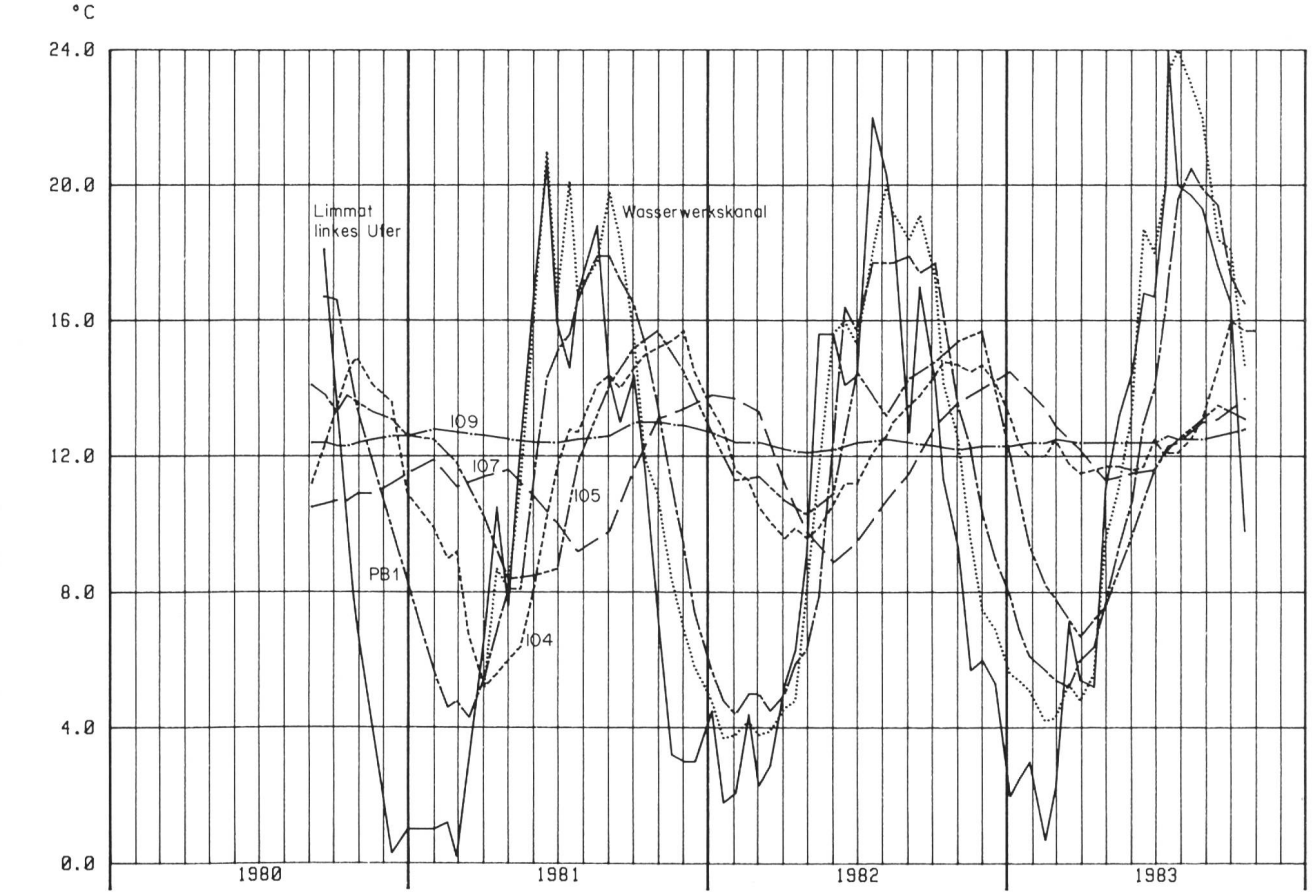
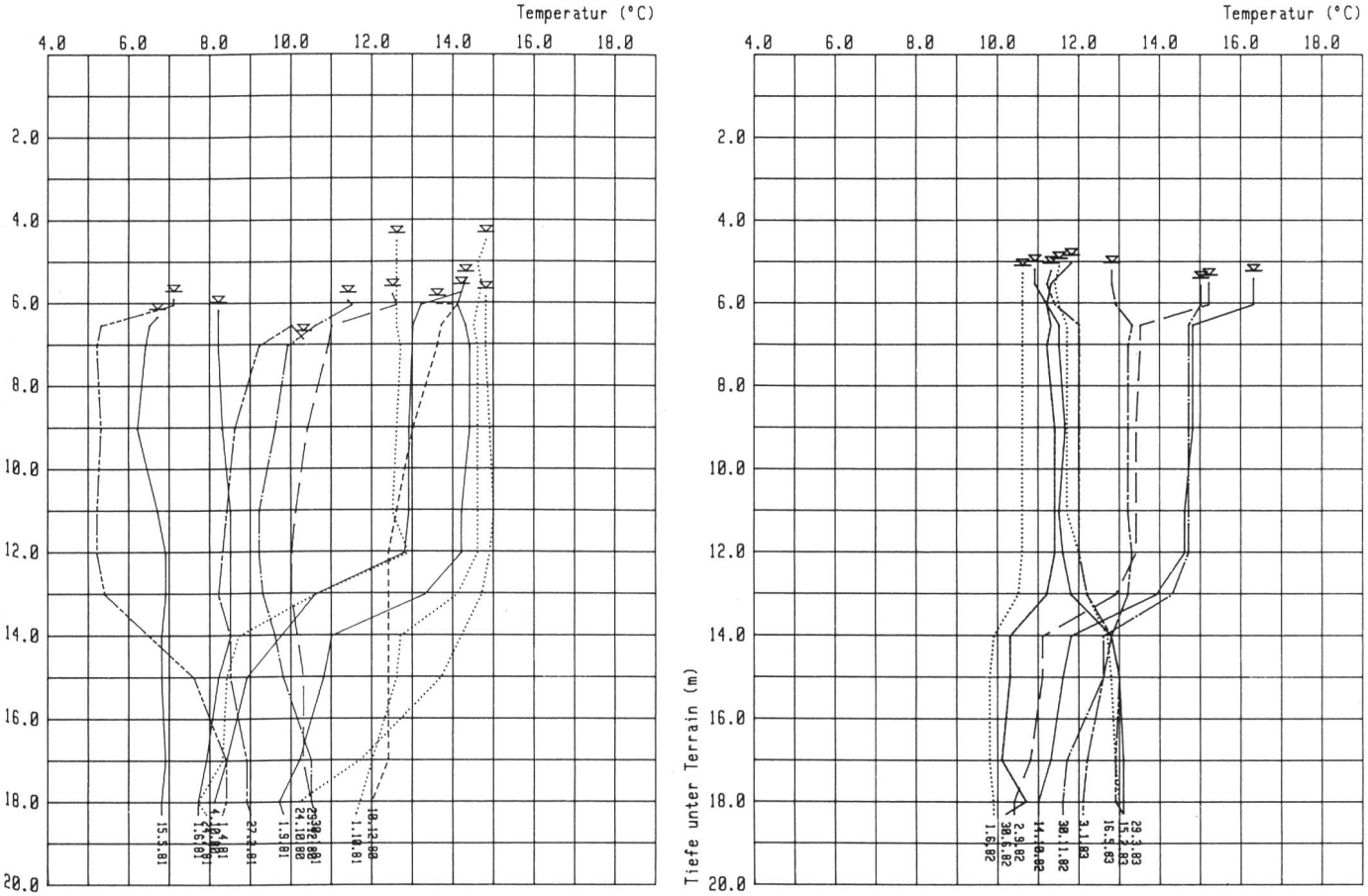


Bild 7. Ganglinien der Temperaturen der Oberflächengewässer und des Grundwassers in 7 m Tiefe unter Terrain.

Bild 8. Temperatur-Vertikalprofile in der Messstelle 104. Links ohne und rechts mit Rückversickerung.



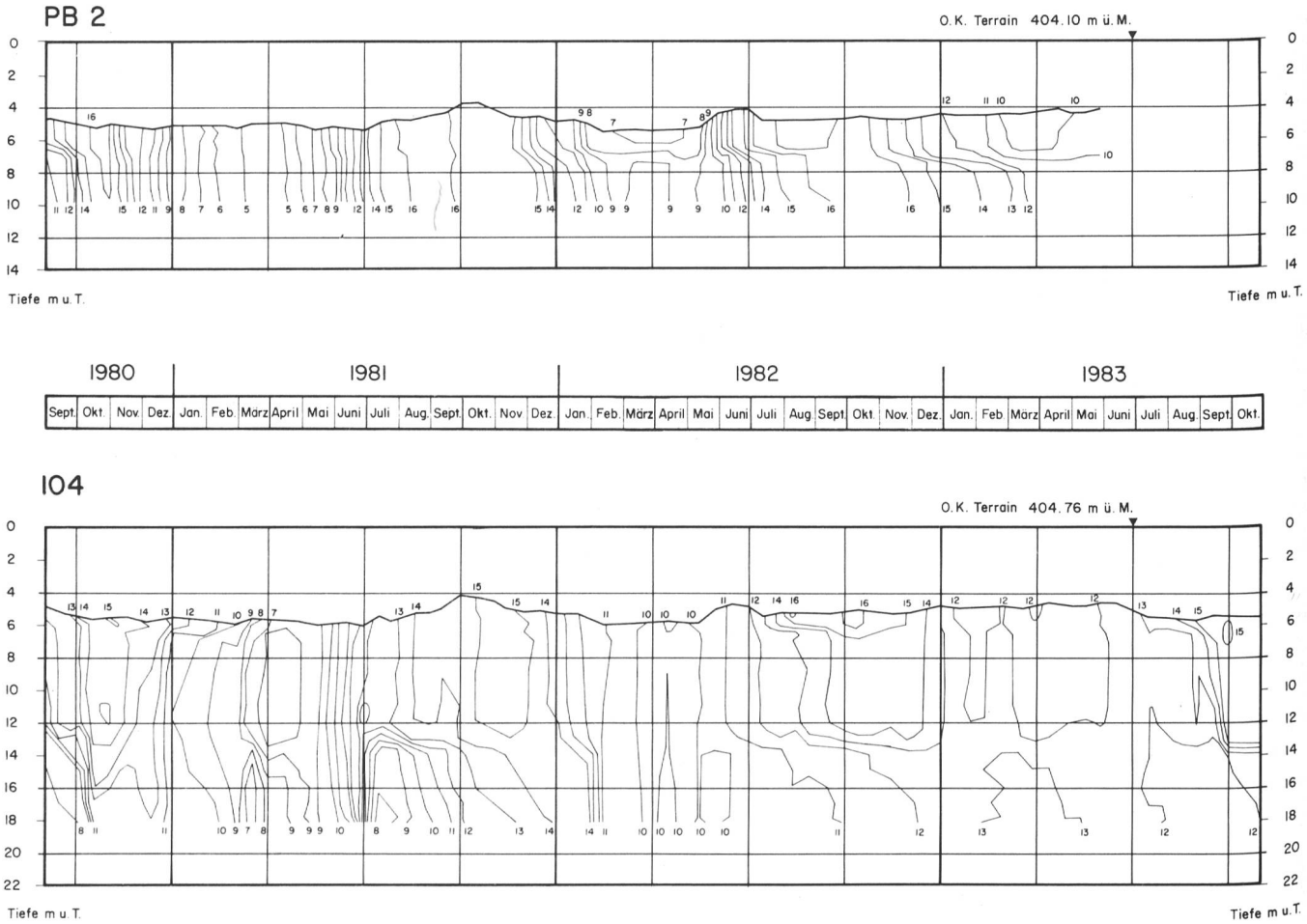


Bild 9. Isoplethen der Grundwassertemperatur bei den Messstellen PB 2 und 104.

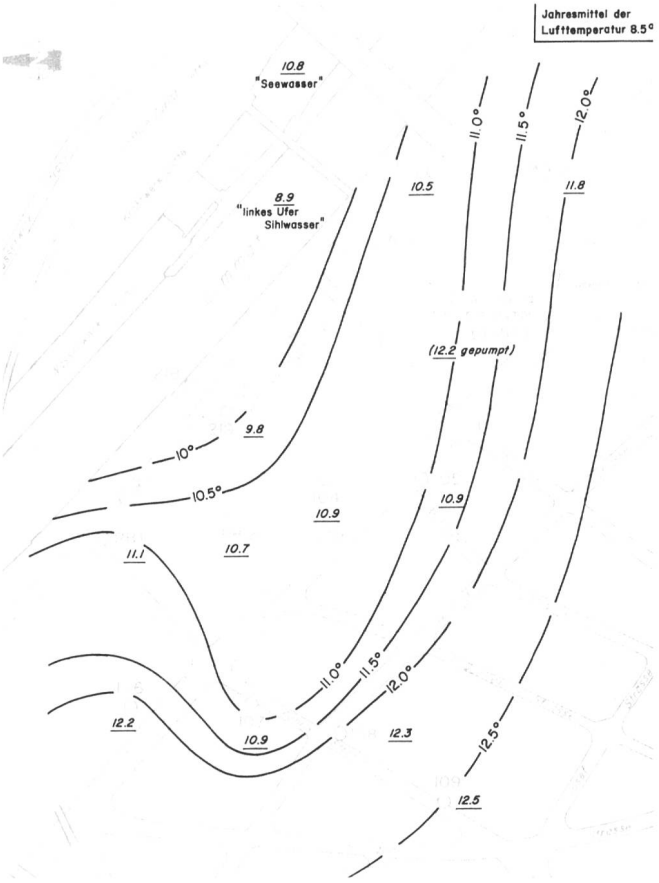


Bild 10. Isolinien der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur in 7 m Tiefe unter Terrain in der Zeit von November 1980 bis Oktober 1981, ohne Rückversicherung.

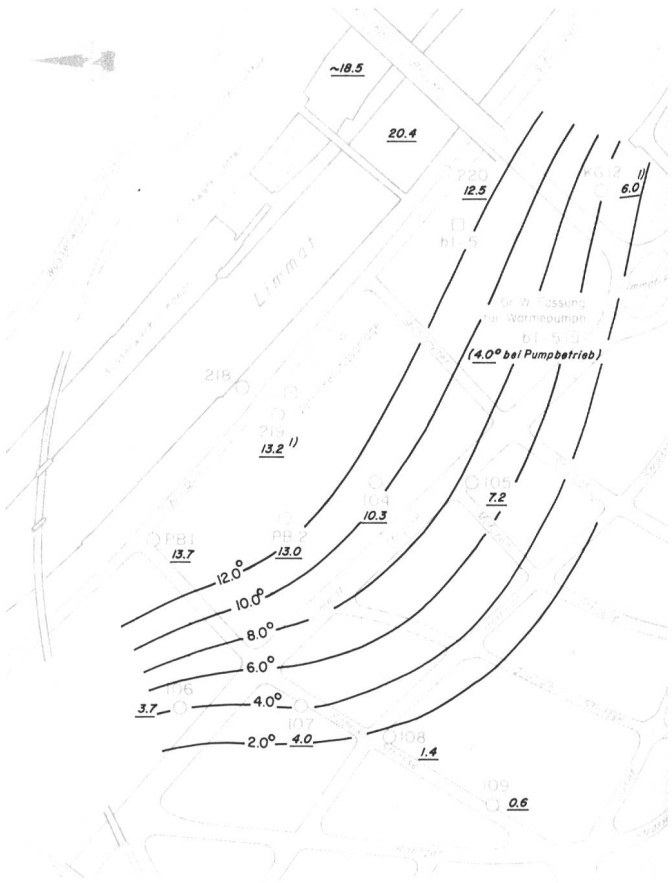


Bild 11. Karte der Temperaturamplitude im Grundwasser im Jahre 1981, ohne Rückversicherung.

6. Temperaturmessungen

Die Temperaturmessungen wurden im August 1980 nach der Erstellung der zusätzlichen neuen Messstellen aufgenommen und bis Herbst 1983 weitergeführt. Die Grundwassertemperaturen wurden somit während gut eines Jahres *vor* Aufnahme der Rückversickerung und während 1¾ Jahren unter Einfluss der Rückversickerung erfasst.
Als Messstellen wurden gelochte Stahlpiezometerrohre mit Durchmesser 2″ und PVC-Kleinfilterrohre mit Durchmesser 4½″ mit durchgehend geschlitzten Filterstrecken im Grundwasserbereich benutzt. Die Temperaturmessungen wurden mit einem Temperatur-Lichtlot und mit frei in den Rohren auf verschiedenen Tiefen ins Grundwasser eingehängten elektrischen Widerstandsthermometern (PT-Sonden) ausgeführt. In den limmatnahen Beobachtungsrohren wurde zweimal monatlich, in den weiter von der Limmat entfernt gelegenen einmal monatlich gemessen. Die Vertikalprofile wurden je nach Messstelle in Abständen von 0,5 m, 1 m oder 2 m aufgenommen.

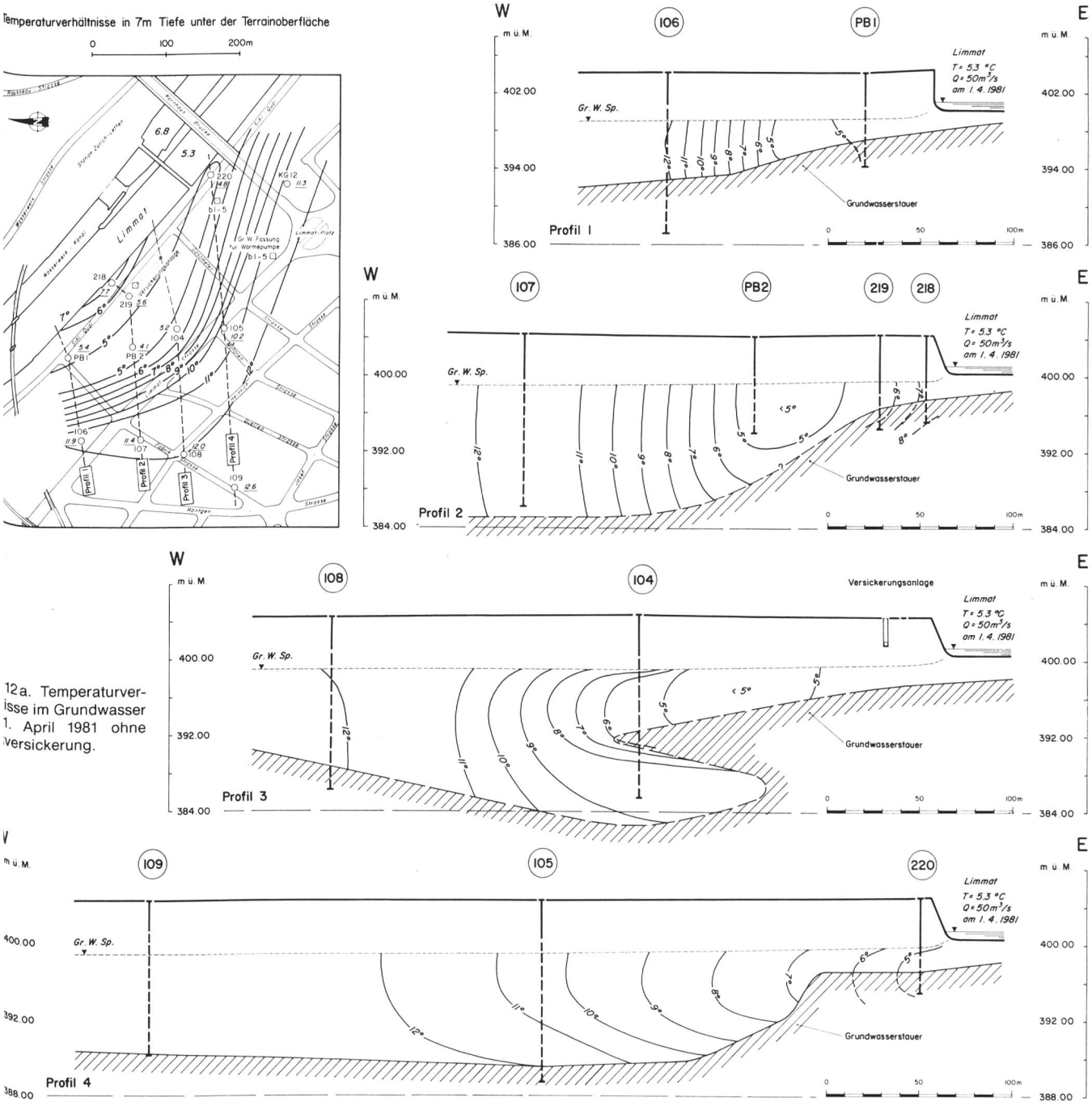
Von einigen wenigen Rohren abgesehen, kann aus den Messergebnissen gefolgert werden, dass trotz grosser Temperaturdifferenzen im Vertikalprofil und trotz des grossen Durchmessers der Kleinfilterrohre keine verfälschenden Vertikalströmungen in den Rohren aufgetreten sind. Zusätzlich zur Temperatur wurde im Jahr 1983 auch die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers und der Limmat zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Die Resultate der Leitfähigkeitsmessungen bestätigen die Schlüsse, die aus den Temperaturmessungen gezogen werden können.

Die Temperaturmessungen wurden für die einzelnen Messstellen in folgenden Darstellungen aufgezeichnet:

– Temperatur-Ganglinien für verschiedene Tiefenstufen (Bild 7)

– Temperatur-Vertikalprofile für verschiedene Zeitpunkte (Bild 8)

– Isoplethen der Grundwassertemperatur als Darstellung



12a. Temperaturverhältnisse im Grundwasser am 1. April 1981 ohne Versickerung.

der zeitlichen Temperaturveränderung im Vertikalprofil (Bild 9).

7. Die Temperaturverhältnisse im Grundwasser vor Aufnahme der Rückversickerung (September 1980 bis November 1981)

Den hydrogeologischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet entsprechend schwanken die Grundwassertemperaturen jahreszeitlich stark unter dem Einfluss der Limmatinfiltration. Die Temperaturganglinien (Bild 7) weisen sinusförmige Schwankungen auf, Amplitude und Verzögerung sind von der Distanz zur Limmat abhängig.

In Bild 12a sind die Temperaturverhältnisse des Grundwassers vom 1. April 1981 dargestellt. Die winterliche Infiltration von kaltem Flusswasser führte zu tiefen Grundwassertemperaturen von weniger als 5°C bis in eine Fliessdistanz von ca. 100 m von der Limmat. Mit grösserer Entfernung vom Fluss nahmen die Grundwassertemperaturen schnell zu, bis in ca. 300 m Fliessdistanz vom Fluss die Zone homothermen Grundwassers ausserhalb des Infiltrationsbereiches mit Temperaturen von 12 bis 13°C beginnt.

Bild 12b zeigt die Temperaturverhältnisse im Frühsommer am 29. Juni 1981. Am Limmatufer und an der Grundwasseroberfläche hatte sich das Grundwasser durch Infiltration sommerlich warmen Flusswassers bereits stark erwärmt. Das kalte Grundwasser, dessen Front Anfang April in 100 bis 150 m Distanz von der Limmat lag, hatte sich inzwischen weiter vom Fluss entfernt. Es fand sich Ende Juni in 220 bis 250 m Fliessdistanz von der Limmat, wobei sich die Minimaltemperatur von knapp 5°C auf 9 bis 10°C erhöht hatte. In 300 m Fliessdistanz von der Limmat betrugen die Grundwassertemperaturen immer noch 12 bis 13°C.

Im weiteren Jahresverlauf baute sich die Zone warmen Grundwassers in Limmatnähe weiter auf, während die zwischenzeitlich schon stark aufgewärmte Kaltwasserzone des vorangegangenen Winters unter Abschwächung weiter stromabwärts abzog. Ab Oktober begann erneut die Abkühlung des Grundwassers in Limmatnähe.

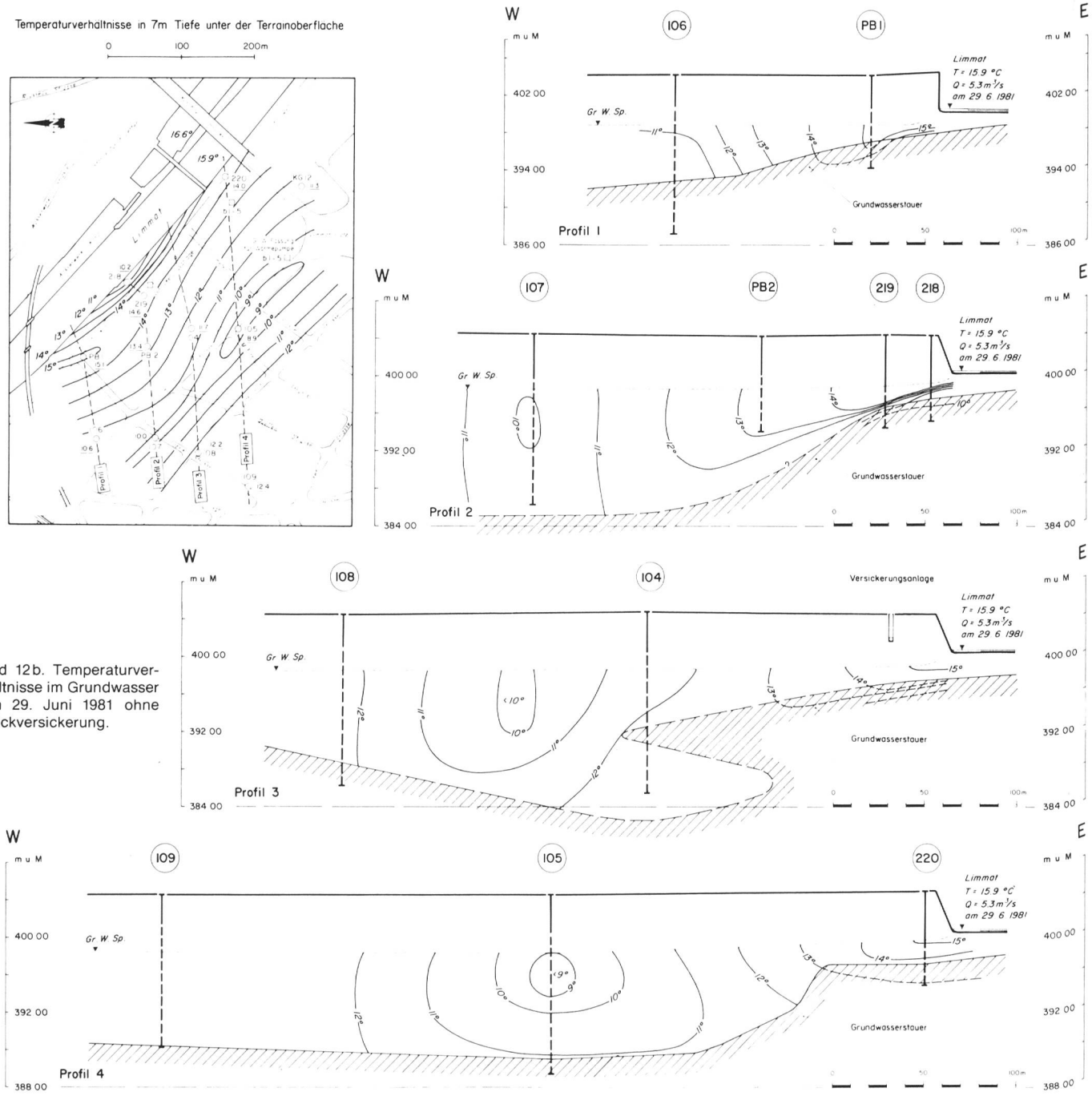


Bild 12b. Temperaturverhältnisse im Grundwasser am 29. Juni 1981 ohne Rückversickerung.

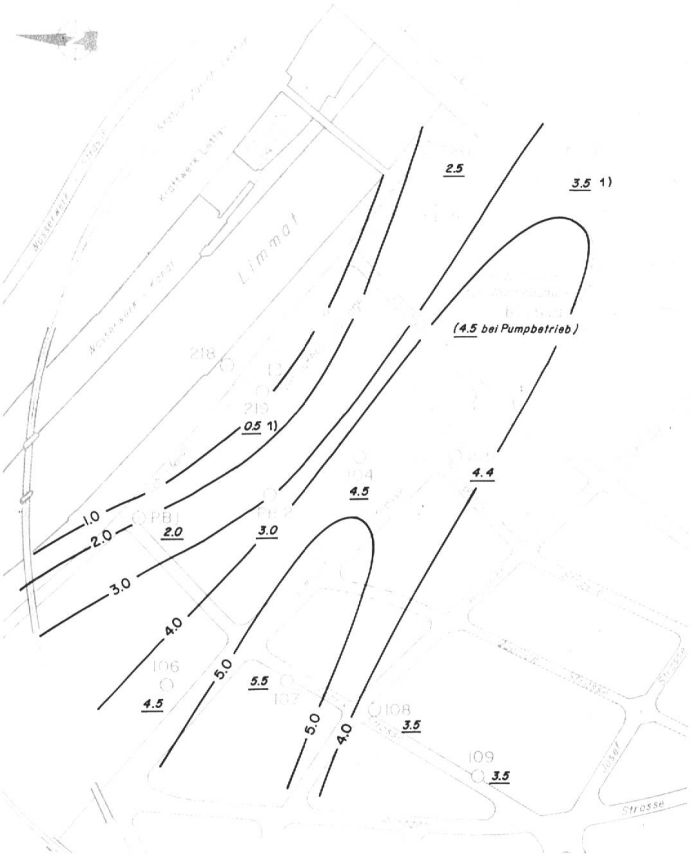


Bild 13. Karte der Verzögerung der Grundwassertemperaturschwankung gegenüber der Limmat in 7 m Tiefe unter Terrain am Beispiel des Sommer-Maximums 1981 (Angaben in Monaten).

7.1 Mittelwert der Temperaturen

Im Zeitraum November 1980 bis Oktober 1981 betrug der Jahresmittelwert der *Lufttemperatur* in der Messstation SMA Zürich, 556 m ü.M., 8,5°C. Im Untersuchungsgebiet selbst dürfte er 0,5 bis 1°C höher gelegen haben.

Die *Limmatwassertemperatur* betrug in diesem Zeitraum am linken Ufer im Bereich des «Sihlwassers» durchschnittlich 8,9°C, im Wasserwerkkanal mit «Zürichseewasser» durchschnittlich 10,8°C.

Die Jahresmittelwerte der *Grundwassertemperatur* in 7 m Tiefe unter Terrain sind für denselben Zeitraum *vor* Aufnahme der Rückversickerung in Bild 10 dargestellt. Sie betrug in Limmatnähe minimal 9,8°C und stieg mit zunehmender Fliessdistanz von der Limmat kontinuierlich an, bis sie in Messstelle 109 ausserhalb der direkten Limmatinfiltration 12,5°C erreichte. Das infiltrierende, im Jahresmittel kältere Limmatwasser wird also im Grundwasserleiter erwärmt und nähert sich mit zunehmender Aufenthaltszeit allmählich dem für das Stadtgebiet abseits der Infiltrationszone typischen Mittelwert von 12 bis 13°C an.

An der Sohle der Beobachtungsrohre, d.h. teils in der Moräne, teils im tiefsten Teil des Schotter-Grundwasserleiters lag die mittlere Jahrestemperatur stellenweise bis zu 1°C tiefer.

7.2 Schwankungen der Temperaturen

Die Wassertemperatur in der *Limmat* schwankte im Zeitraum 1980 bis 1981 am linken Ufer mit «Sihlwasser» zwischen 0°C im Winter und über 21°C im Sommer, im Wasserwerkkanal mit «Seewasser» zwischen 3,6°C im Winter und 20°C im Sommer (Bild 11). Zwischen dem linken und dem rechten Limmatufer differierte die Wassertemperatur häufig bis zu 5°C.

Im *Grundwasser* schwankte die Temperatur im Zeitraum September 1980 bis November 1981 an der *Grundwasseroberfläche* im Uferbereich der Limmat zwischen minimal 4°C im Winter und maximal 18°C im Sommer. Mit zunehmender Fliessdistanz von der Limmat werden die Temperaturschwankungen generell gedämpft, so dass beispielsweise in der Messstelle 107 in 230 m Fliessdistanz die Grundwassertemperatur nur noch zwischen 9 und 14°C schwankte.

In den tiefen, von Limmatinfiltrat weniger stark durchflossenen Teilen des Schotters (Messstellen PB 2, 104 und 105) waren die Schwankungen bedeutend schwächer als im oberen Teil des grundwasserführenden Schotters.

Ausserhalb des Infiltrationsbereiches der Limmat schliesst sich das Gebiet homothermen Grundwassers an (Messstelle 109), wo die Grundwassertemperatur ganzjährig zwischen 12 und 13°C schwankte.

7.3 Verzögerung der Schwankung der Grundwassertemperatur gegenüber der Limmattemperatur

Im Uferbereich der Limmat erfolgen die jährlichen Schwankungen der Grundwassertemperaturen zeitlich parallel zur Schwankung der Limmattemperatur. Mit zunehmender Fliessdistanz verzögern sie sich um durchschnittlich 1½ Monate pro 100 m (Bild 13). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperaturfront beträgt damit grössenordnungsmässig 2 m/Tag.

Trotz der grossen Distanz zur Limmat ergaben sich in den Messstellen 108 und 109 Verzögerungen von nur 3 bis 4 Monaten. Diese Messstellen liegen aber bereits ausserhalb des direkten Infiltrationsbereiches der Limmat, wo infolgedessen die konduktiv übertragenen Temperatureinflüsse der Atmosphäre gegenüber den konvektiven der Limmat überwiegen.

Die Verzögerung nimmt im grundwasserführenden Schotter in vertikaler Richtung im allgemeinen kaum zu. In den von der direkten Limmatinfiltration abgeschirmten tieferen Abschnitten des Grundwasserleiters der Messstellen 104 und 105 hingegen war sie um 1 bis 2 Monate grösser (vgl. auch Bild 9), im Grundwasserstauer häufig ebenfalls.

8. Einfluss der Rückversickerung auf die Grundwassertemperatur (Juni 1982 bis Mai 1983)

Ein allgemein gültiges Bild der Auswirkungen der Versickerung des Rücklaufwassers der Wärmepumpe ergibt sich aus dem Vergleich der Isothermenquerprofile vom 29. März 1983 (Bild 14a) nach einem Winter mit normal funktionierender Rückversickerung mit denjenigen vom 1. April 1981 (Bild 12a) *vor* Aufnahme der Versickerung. Ausserhalb des Einflussbereiches der Versickerungsanlage waren die Temperaturverhältnisse jeweils Ende Winter sehr ähnlich. Im Abströmbereich der Versickerungsanlage sank die Grundwassertemperatur während des Winters 1982/83 jedoch nicht mehr unter 10°C, was ziemlich genau der durchschnittlichen Temperatur des rückversickerten Wassers entspricht. Das Vordringen der winterlichen Abkühlungsfront durch die Limmatinfiltration blieb hier aus.

Auch im Frühsommer waren die Unterschiede in den Temperaturverhältnissen ohne und mit Rückversickerung deutlich erkennbar (siehe Bilder 12b und 14b). In Limmatnähe waren die Temperaturen ähnlich, und es trat 1983 wie 1981 die normale sommerliche Erwärmung ein, weil das rückversickerte Wasser zu diesem Zeitpunkt etwa die gleiche Temperatur aufwies wie das infiltrierende Limmatwasser. In grösserer Entfernung vom Fluss fand sich jedoch 1983 nicht das Kaltwasser des vorangegangenen Winters, wie es 1981 bei ungestörter Limmatinfiltration der Fall war, sondern das relativ warme Rückversickerungswasser.

Besonders deutlich treten die durch die Rückversickerung hervorgerufenen Temperaturveränderungen auf der Isoplethendarstellung (Bild 9) und in den Temperaturprofilen (Bild 8) der Messstelle 104 im Abströmbereich der Versickerungsanlage hervor.

8.1 Änderung der Jahresmittelwerte der Grundwassertemperatur

In der Periode Juni 1982 bis Mai 1983 (Bilder 15 und 16) betrug die Lufttemperatur im Mittel 9,5°C und lag damit 1°C höher als in der Referenzperiode 1980/81 *vor* Aufnahme der Rückversickerung. Daher lag auch die durchschnittliche Wassertemperatur in der Limmat um 1°C und im Wasserwerkkanal um 0,3°C höher.

Die natürlichen Grundwassertemperaturen lagen vor allem in Limmatnähe im Jahresmittel ebenfalls um bis zu 1°C höher als 1980/81. In den Messstellen ausserhalb des Abströmbereiches der Versickerungsanlage und ausserhalb der direkten Limmatinfiltration wiesen die nur schwach schwankenden Temperaturen keine wesentliche Veränderung auf; sie lagen ganzjährig zwischen 12 und 13°C. Die Jahresdurchschnittstemperatur des im Sommer erwärmten, im Winter abgekühlten rückversickerten Wassers lag bei ca. 14°C. Dementsprechend erhöhte sich im Abströmbereich der Versickerungsanlage die Jahresmitteltemperatur um bis zu 3,3°C. Sie erreichte 14°C bei der Versickerungsanlage, 13,3°C in 80 m Entfernung davon (Messstelle PB2) und 12,2°C in 200 m Entfernung bei Messstelle 107. In 250 bis 300 m Entfernung von der Versickerungsanlage verwischte sich die «Wärmefahne» des versickerten Wassers im stadteinwärts vorherrschenden wärmeren und homothermen Grundwasser.

Zieht man die klimabedingte Veränderung des Jahres-Temperaturmittelwertes ab, so bleibt als Auswirkung der Rückversickerung von im Mittel etwa 800 l/min ein Anstieg der mittleren Grundwassertemperatur um maximal 2,3°C. Die Erwärmung ist über die ganze Tiefe des grundwasserführenden Schotters etwa gleich gross; es findet also kein oberflächliches Einschichten des versickerten Wassers

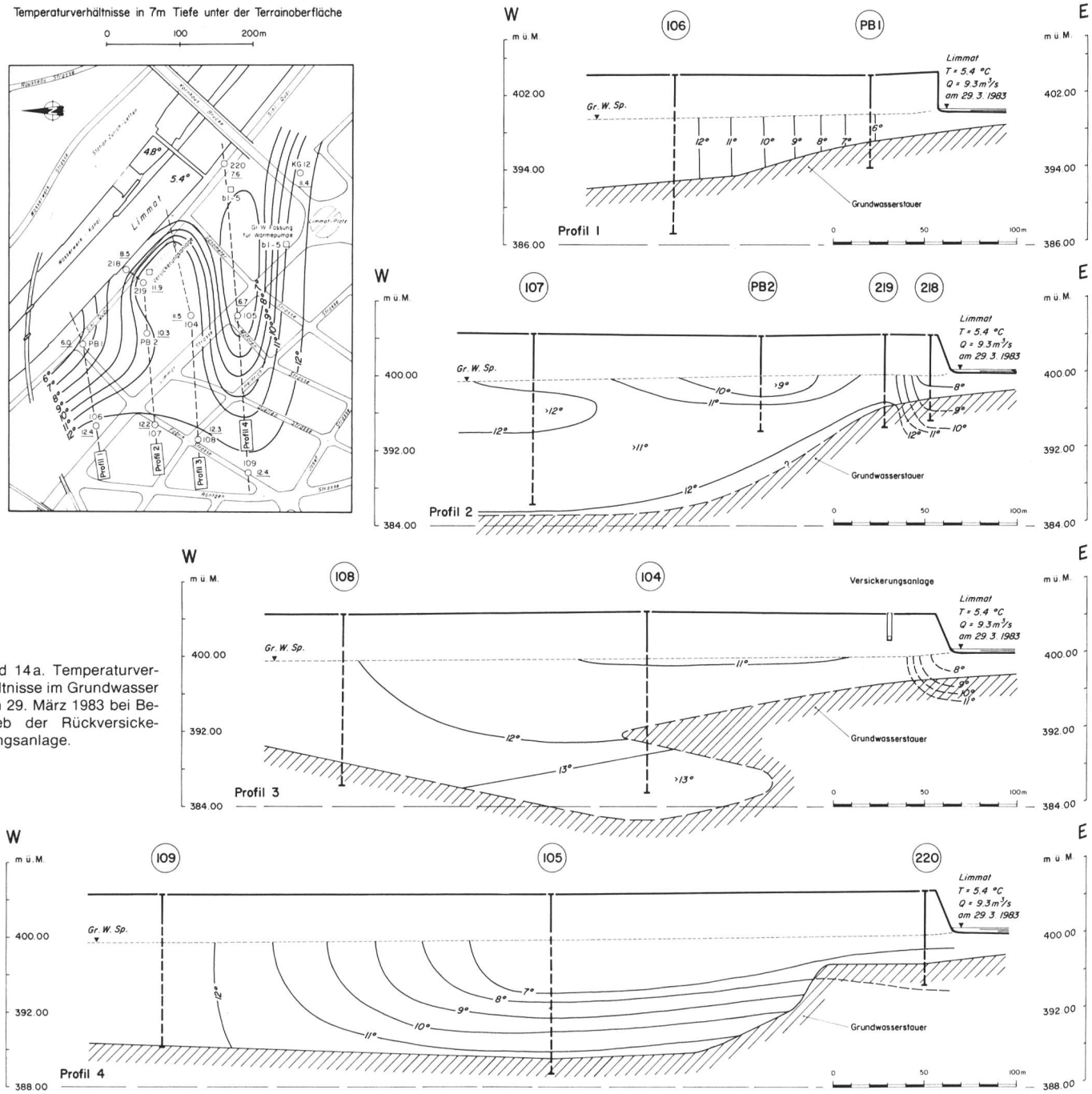


Bild 14a. Temperaturverhältnisse im Grundwasser am 29. März 1983 bei Betrieb der Rückversickerungsanlage.

statt, und die Unterströmung der Versickerungsanlage durch Limmatinfiltrat wird hydraulisch unterbunden.
Bei den Messstellen in der seitlichen Randzone des Abströmbereiches waren die Grundwassertemperaturen stark von der jeweiligen Versickerungsmenge, den Grundwasserspiegelschwankungen und den Infiltrationsverhältnissen der Limmat abhängig. Örtlich war ein Anstieg der Minimaltemperatur und des Jahresmittelwertes zu beobachten, andernorts traten verstärkte Temperaturschwankungen und Absenkung des Jahresmittelwertes auf.

9. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Die natürlichen Grundwasserverhältnisse im Untersuchungsgebiet zeigen einen sehr ausgeprägten Infiltrationsbereich entlang der Limmat, welcher sich durch hohe Grundwassertemperaturen im Sommer, tiefe Temperaturen im Winter und durch Jahresmittelwerte zwischen 10 und 12°C auszeichnet. Dieser Infiltrationsbereich grenzt stadteinwärts in etwa 300 m Fliessdistanz an eine homotherme Grundwasserzone mit Jahresmittelwerten von 12 bis 13°C. Die neue Grundwasserfassung b 1–5 (1978) des Migros-Genossenschafts-Bundes liegt zwischen diesen beiden Grundwasserzonen. Sie ist dank besonderer geologischer Verhältnisse vom direkten Infiltrationseinfluss der Limmat teilweise abgeschirmt und profitiert dank der tiefen Fassung vom Zustrom ganzjährig recht hoch temperierten Grundwassers von der Stadtseite her, sofern die mittlere Fördermenge 800 bis 1000 l/min nicht übersteigt. Bei grösseren Pumpmengen erhöht sich der Limmatinfiltratanteil, was grössere Temperaturschwankungen des geförderten Grundwassers zur Folge hat.
Das im Winter abgekühlte und im Sommer erwärmte Wasser der Fassung b 1–5 (1978) wird in der Horizontal-Versickerungsanlage am Sihlquai ins Grundwasser zurückgegeben. In der kalten Jahreszeit weist es trotz des Temperaturentzuges von ca. 2°C mit 10 bis 11°C noch ein um 5 bis 8°C höheres Temperaturniveau auf als das infiltrierende Limmatwasser. Im Sommer beträgt die Versickerungstemperatur 16 bis

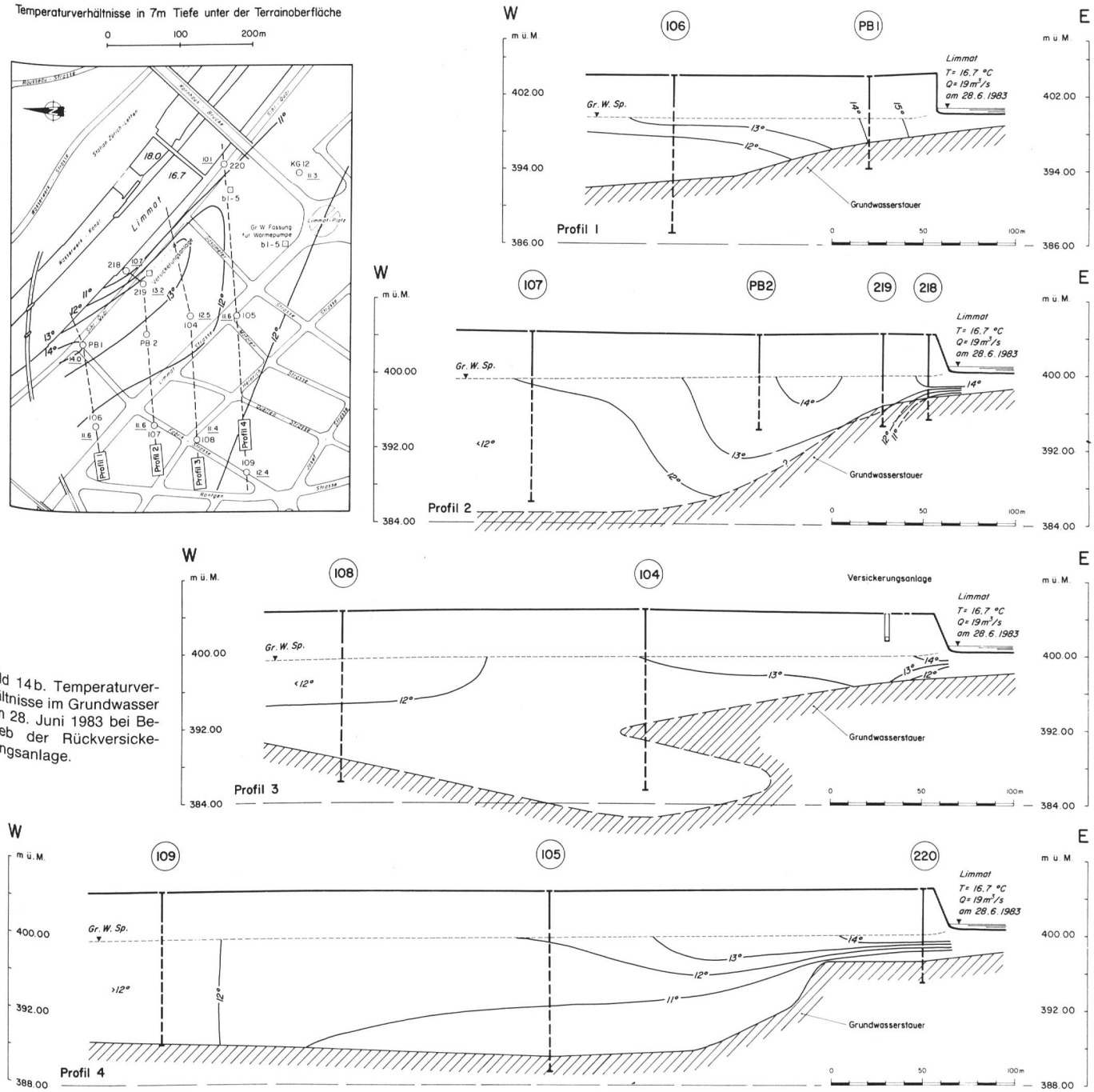


Bild 14b. Temperaturverhältnisse im Grundwasser am 28. Juni 1983 bei Betrieb der Rückversickerungsanlage.

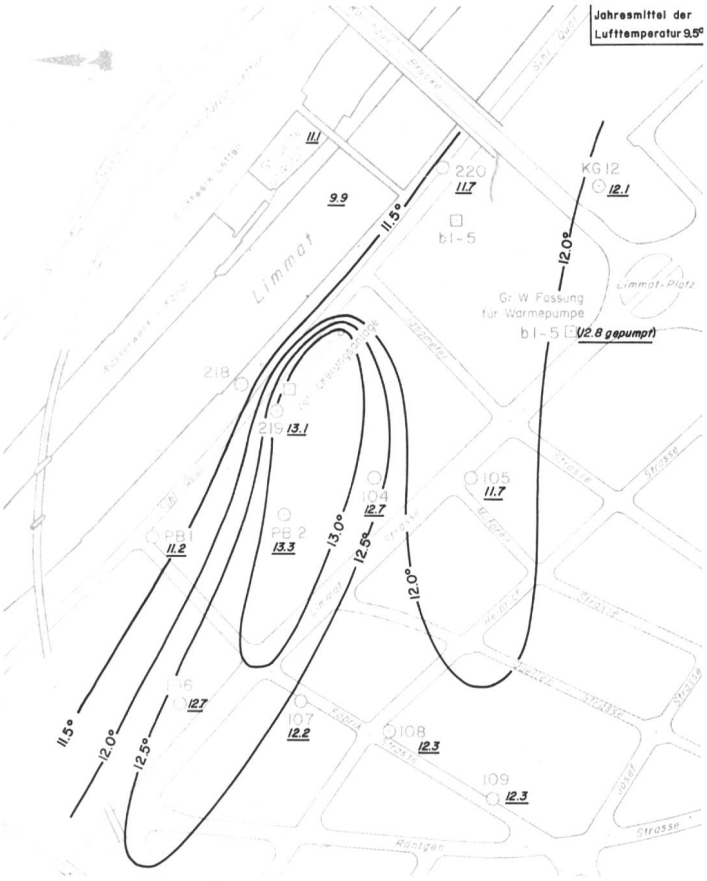


Bild 15. Karte der Jahresmitteltemperatur des Grundwassers in 7 m Tiefe unter Terrain im Zeitraum Juni 1982 bis Mai 1983 bei Betrieb der Rückversickerung.

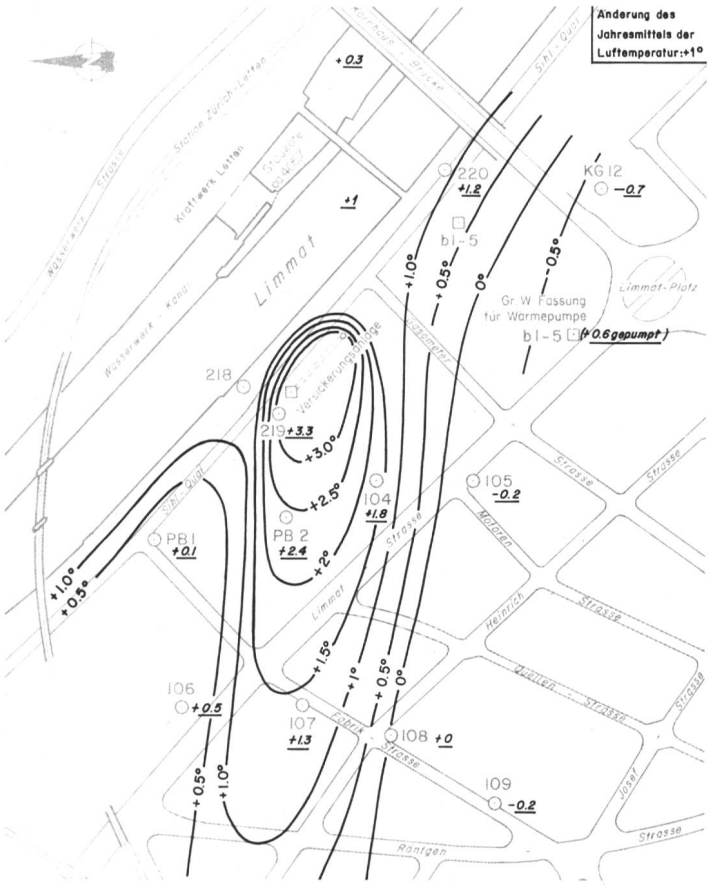


Bild 16. Änderung der Jahresmitteltemperatur des Grundwassers in 7 m Tiefe unter Terrain nach Aufnahme der Rückversickerung.

18°C und liegt damit in einem ähnlichen Temperaturbereich wie die Limmat.

Die mittlere Jahrestemperatur des Grundwassers stromabwärts der Versickerungsanlage erhöhte sich in der Beobachtungsperiode 1980 bis 1983 von 10 bis 11°C (1980/81 ohne Versickerung) auf 13 bis 14°C (1982/83 mit Versickerung). Der Temperaturanstieg war über die ganze Tiefe des Grundwasserleiters von ähnlicher Grössenordnung und betrug bei der Versickerungsanlage nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Lufttemperatur in den beiden Vergleichsperioden effektiv noch etwa 2,3°C. In einer Entfernung von 100 m schwächte sich die positive Temperaturanomalie etwa auf die Hälfte ab, und in 300 m Entfernung war sie nicht mehr mit Sicherheit nachweisbar.

Diese Ergebnisse sind überraschend und im wesentlichen auf folgende Gründe zurückzuführen:

– Relativ hohe und ausgeglichene Temperatur des der Wärmepumpe zugeführten Grundwassers.
– Trotz Abkühlung in der Wärmepumpenanlage ist das Versickerungswasser im Winter in der Regel einige Grade wärmer als das infiltrierende Limmatwasser.
– Im Sommer weist das rückversickerte Kühlwasser etwa dieselbe Temperatur wie das Limmatwasser auf; im Frühsommer und Herbst liegt die Kühlwassertemperatur sogar noch etwas höher.
– Das infiltrierende Limmatwasser wird am Unterströmen der Versickerungsanlage aus hydraulischen Gründen weitgehend gehindert.

Die ermittelten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass im vorliegenden Fall dank der speziellen Verhältnisse eine wesentlich grössere Wärmeenergiegewinnung aus dem Grundwasser möglich wäre, ohne stromabwärts der Versickerungsanlage eine Kältefahne im Grundwasser zu erzeugen. Es wäre indessen falsch, diese günstigen Ergebnisse generell auf alle Fälle der Wärmeenergiegewinnung aus dem Grundwasser im Uferbereich von infiltrierenden Flüssen zu übertragen.

10. Folgerungen

Für eine generelle Vorhersage der raumzeitlichen Auswirkungen von Kaltwasserversickerungen auf die Grundwassertemperatur müssen die hydrogeologischen Verhältnisse, die lokalen Strömungsverhältnisse und die natürlichen Temperaturschwankungen des Grundwassers sowohl beim Entnahmebrunnen als auch bei der Versickerungsanlage ausreichend bekannt sein. Bei komplizierten Verhältnissen können die richtige Plazierung der Voruntersuchungen je nach Grösse der Wärmepumpenanlage oft sehr umfangreich sein, um die Entnahme- und Versickerungsanlage vorzunehmen.

Adresse der Verfasser: Dr. *Theo Kempf*, Geologe, und *Ulrike Walter*, dipl. Geol., Geologisches Büro Dr. Heinrich Jäckli AG, Limmattalstrasse 289, CH-8049 Zürich.