Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Versinterung von Entwässerungsleitungen Ursachen und Gegenmassnahmen

Concrétions dans les réseaux de drainage
Causes principales et exigences

Dr. von Moos AG, Zürich
M. A. Gautschi, dipl. Bauing. ETH/SIA
R. Weber, dipl. Bauing. ETH/SIA

Ingenieurbureau Heierli AG, Zürich
Dr. W. Heierli, dipl. Bauing. ETH/SIA
Dr. J. Peter, Chemiker ETH/SIA

Institut Bachema AG, Schlieren
Dr. M. Schurter, Chemiker ETH/SIA

Forschungsauftrag 16/90 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Januar 1996

352

Inhalt Seite

1. Zusammenfassung, Résumé 4, 5

2. Auftraggeber und Forschungsteam 7

3. Auftrag und Ziele 8

4. Forschungskonzept (Methodik und Vorgehen) 9

5. Unterlagen 10

6. Ursachen und Wirkung der Versinterung 10
   - 6.1 Beschaffenheit von Sickerwasser 10
   - 6.2 Chemisch-physikalische Zusammenhänge der Versinterung 11
   - 6.3 Physikalische Aspekte der Versinterung 14
   - 6.4 Einfluss von Beton 15
   - 6.5 Erscheinungsformen 17

7. Umfrage 18

8. Objektauswahl 18

9. Kurzer Objektbeschrieb und durchgeführte Untersuchungen 19
   - 9.1 N1 Anschluss Neuenhof 19
   - 9.2 Kantonsstrasse Leutwil-Boniswil 21
   - 9.3 N8 Umfahrungstunnel Sachseln 22

10. Untersuchungsergebnisse 23
    - 10.1 Wasseranalysen 23
    - 10.2 Feststoffanalysen 27
    - 10.3 Kanalfernsehaufnahmen und Spülversuche 30

11. Schlussfolgerungen 31
    - 11.1 Zusammenfassung 31
    - 11.2 Anforderungen an das Entwässerungskonzept 32

12. Offene Fragen 33

13. Anregungen für weitere Untersuchungen 33
    - 13.1 Für weitere Untersuchungen 33
    - 13.2 Für eine Norm "Entwässerungen" 34

14. Vorläufige Empfehlungen 34

Exkurse 37
- I. Beeinflussung der Kristallform durch Magnetfelder
- II. Chemische Beeinflussung der Löslichkeit von Calciumcarbonat

Anhang:

A1 Fragebogen
A2 Übersicht über die Umfrage-Ergebnisse
A3 Fotos
A4 Röntgendiffraktogramme

Beilage: - Objekt 1: Situation und Schnitte der Tiefendrainage in Neuenhof

1. Zusammenfassung

Gefasstes Grund- oder Bergwasser verursacht in Leitungen oft harte Ablagerungen, sogenannte **Versinterungen**, welche die Funktionstüchtigkeit der Leitungen mittel- bis langfristig in Frage stellen. Deshalb fallen jährlich hohe Unterhaltskosten für die Reinigung, d.h. das Entfernen von Ablagerungen in Entwässerungssystemen an. Bei massiven Ablagerungen wird der Abfluss eingeschränkt, so dass die Leitungen aufgebohrt oder ersetzt werden müssen.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es, aufgrund vorhandener Literatur und anhand von Beispielen aus der Praxis die chemischen und physikalischen Zusammenhänge der Versinterung und die wichtigsten Einflussfaktoren abzuklären und Schlussfolgerungen daraus zu ziehen. Schliesslich sollten erste Grundsätze für die Projektierung und Ausführung von Entwässerungssystemen formuliert werden.

Als **Hauptursachen von Versinterungen** sind zu nennen:

- Die CO_2-Konzentration (CO_2-Partialdruck) der Porenluft im Boden nimmt i.a. mit zunehmender Tiefe zu und damit steigt auch der Anteil der Kohlensäure (H^+ und HCO_3^-) im Wasser, sodass zusätzliches $CaCO_3$ gelöst wird.
- Beim Kontakt des Grund- oder Bergwassers mit atmosphärischer Luft nimmt der CO_2-Partialdruck i.a. wieder ab, d.h. CO_2 entweicht aus dem Wasser in die Luft, sodass weniger $CaCO_3$ in Lösung bleiben kann und ein Teil ausgefällt wird.
- Im Zusammenhang mit der Versinterung von Entwässerungsleitungen spielen die zementgebundenen Baustoffe mit ihrem basischen Charakter und dem hohen Gehalt an Ca^{2+} eine entscheidende Rolle: Kohlensäure wird durch die Base $Ca(OH)_2$ "neutralisiert" und steht damit nicht mehr zur Lösung von $CaCO_3$ zur Verfügung. Zudem enthält vor allem junger Beton in den Poren selbst viel leicht lösliches Calciumhydroxyd ($Ca(OH)_2$). Beides führt schliesslich zu vermehrter Ausfällung von $CaCO_3$.

Der **Versinterungsprozess könnte theoretisch** mit den folgenden Massnahmen mindestens **gemildert werden**:

- Veränderung des CO_2-Partialdruckes beim Übertritt des Grund- oder Bergwassers vom Untergrund in das Leitungssystem verhindern
- Kontakt des Wassers mit basischen Medien (z.B. zementgebundenen Baustoffen) verhindern oder mindestens verringern
- Künstliche Beigabe von z.B. Härtestabilisatoren zum gefassten Grund- oder Bergwasser

Daraus lassen sich im Hinblick auf das Versinterungsproblem folgende **Anforderungen an Entwässerungssysteme** und **deren Baustoffe** ableiten:

- Zementgebundene Rohre, Schächte und Fugen- sowie Bettungsmörtel usw. sind zu meiden.
- Der Zutritt von atmosphärischer Luft zum Entwässerungssystem ist z.B. durch einen Einstau zu vermeiden. Die Versinterung, d.h. das Ausfällen von $CaCO_3$, erfolgt dann erst beim Überlauf, wo der Sinter leichter zu entfernen ist.

1. Résumé

Après captage, les eaux phréatiques ou de percolation occasionnent dans les conduites des dépôts souvent durcis, appelés **concrétions**, qui compromettent à moyenne et lonque échéance leur bon fonctionnement. Ce phénomène oblige annuellement à de coûteuses interventions de nettoyage et d'enlèvement des dépôts dans les réseaux de drainage. S'ils sont importants, ces dépôts gênent les écoulements et les conduites doivent être reperforées, voire remplacées.

Le travail de recherche dont il est question ici avait pour but de mettre en évidence les données chimiques et physiques du phénomène de concrétion ainsi que les facteurs susceptibles de l'influencer, en s'apuyant sur la littérature disponible, sur des observations faites dans la pratique et d'en tirer des conclusions. Il était finalement demandé d'émettre des directives préliminaires pour l'étude et l'exécution de réseaux de drainage.

Les **causes principales de l'apparition de concrétions** sont les suivantes:

- La concentration en CO_2 (pression partielle du CO_2) dans l'air contenu dans les pores du terrain augmente en général avec la profondeur. Il s'ensuit également une augmentation de la quantité d'acide carbonique (H^+ und HCO_3^-) dans l'eau, conduisant à la dissolution d'un supplément de $CaCO_3$.
- Dès que les eaux phréatiques ou de percolation entrent en contact avec l'air athmosphérique, la pression partiellle du CO_2 diminue à nouveau; il y a échange de CO_2 entre l'eau et l'air, avec pour conséquence une diminution de la quantité de $CaCO_3$ pouvent rester en solution. Ainsi le surplus de $CaCO_3$ précipite
- Les matériaux à base de ciment, milieu basique avec une forte proportion de Ca^{2+}, jouent un rôle prépondérant dans la formation de concrétions dans des réseaux de drainage. L'acide carbonique est neutralisé par la base $Ca(OH)_2$ et par conséquent n'est plus à même de contribuer à la dissolution du $CaCO_3$. De plus, les pores du béton, surtout s'il est récent, contiennent une quantité importante d'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$), qui est facilement soluble. Ces conditions favorisent donc une précipitation supplémentaire de $CaCO_3$.

En théorie, le processus de formation de concrétions devrait pouvoir être enrayé par les mesures suivantes:

- Empêcher une modification de la pression partielle du CO_2 s'exerçant sur les eaux souterraines au moment du passage du terrain au réseau des conduites.
- Empêcher ou du moins réduire le contact de l'eau avec des milieux basiques, tels que des matériaux à base de ciment.
- Procéder, après captage, à l'adjonction un stabilisateur de dureté de l'eau aux eaux phréatiques ou de percolation

Sur la base de ces considérations et en rapport avec le problème de concrétion, il est possible de formuler **les exigences suivantes pour des réseaux de drainage et pour les matériaux utilisés**:

- Proscrire l'emploi de tuyaux, regards, mortiers de jointoyage, etc. à base de ciment.
- Empêcher l'accès d'air athmosphérique au réseau de drainage, par exemple en noyant le système. Les concrétions dues à la précipitation de $CaCO_3$ ne se produisent alors qu'après le déversoir, où elles sont plus faciles à éliminer.

2. Auftraggeber und Forschungsteam

Auftraggeber:	Bundesamt für Strassenbau Monbijoustr. 40, 3003 Bern vertreten durch: VSS, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Seefeldstr. 9, 8008 Zürich
Auftrag:	Forschungsauftrag: 16/90
Auftrags Nr.	2613.01
Titel:	Versinterung von Entwässerungsleitungen, Ursachen und Gegenmassnahmen
Auftragserteilung:	Mit Brief vom 9.5.90 des VSS bzw. Auftrag des Bundesamtes für Strassenbau vom 1.5.90

Forschungsteam:

Dr. von Moos AG Geotechnisches Büro, Zürich	**Institut Bachema AG Zürich**	**Ingenieurbureau Heierli AG Zürich**
M.A. Gautschi + R. Weber	Dr. M. Schurter	Dr. W. Heierli + Dr. J. Peter

3. Auftrag und Ziele

Veranlassung für den Forschungsantrag:
Die weitverbreiteten Probleme mit dem Phänomen der Versinterung und die dadurch landesweit verursachten hohen Kosten für den Unterhalt und die Erneuerung von Entwässerungsleitungen waren der Auslöser für dieses Forschungsprojekt.

Problemstellung: Grundwasser, welches an die Erdoberfläche bzw. in Entwässerungsleitungen austritt und damit in Kontakt mit atmosphärischer Luft gelangt, kann Ablagerungen in Form von harten Sinterbelägen verursachen, welche erfahrungsgemäss vorwiegend aus Calciumcarbonat ($CaCO_3$) bestehen. Die Beseitigung solcher Ablagerungen verursacht jährlich hohe Unterhalts- und Sanierungskosten.

Ziel der Untersuchung war es, anhand von Beispielen sowie vorhandener Literatur

- die chemischen und physikalischen Ursachen der Versinterung abzuklären,
- den Versinterungsvorgang und die Zusammenhänge zwischen dem Grundwasser sowie den wichtigsten Einflussfaktoren zu beschreiben,
- Massnahmen zur Verhinderung der Versinterung und zur Behebung von durch Versinterung verursachte Schäden zu erarbeiten,
- Massnahmen zur Reduktion des Unterhalts aufzuzeigen.

Im Vordergrund stehen damit die im Projekt und in der Bauausführung zu treffenden Massnahmen zur Bekämpfung der Ursachen der Versinterung. Chemisch-technische Massnahmen, d.h. der Einsatz chemisch-technischer Hilfsmittel wie die Beigabe von Chemikalien, sind nicht Gegenstand dieses Forschungsauftrags. Hingegen interessieren Lösungsvorschläge, wie die Versinterung in schwer oder nicht zugänglichen Leitungssystemen mit möglichst einfachen baulichen bzw. konzeptionellen Veränderungen verhindert oder mindestens reduziert werden kann, sodass das Calciumcarbonat schliesslich erst dort auskristallisiert, wo es keinen "Schaden" mehr anrichtet, bzw. mit geringem Aufwand beseitigt werden kann. Primär wird nach Lösungen für Neubauten und erst sekundär nach Lösungen für Sanierungen bestehender Anlagen gesucht.

4. **Forschungskonzept** (Methodik und Vorgehen)

Das folgende Schema illustriert den Verlauf der Forschungsarbeit.

5. Unterlagen

VSS-Forschungsarbeiten mit Anmerkungen zur Versinterung bzw. Hinweisen zur Ausbildung von Drainagesystemen:

Nr.	Datum	Titel
52/ 85	Nov. 1988	Strassentunnel mit geringem Verkehr
06/ 89	30.9.92	Grundlagen zur Schaffung einer neuen Norm für Stützbauwerke

Literaturverzeichnis:

Nr.	Autor. Jahr:	Titel. Verlag. Ort
1	Hill,C.A. & Forti, P. 1986:	Cave Minerals of the World. Nat. Speleological Society. Huntsville. USA
2	Fischer, H. 1987	Untersuchung an der Mondmilch aus dem Mondmilchloch (Pilatus) und Modell der Mondmilch-Genese. Stalactite 1/87. St. Gallen
3	Liesche, H. & Paschke, K.H. 1969:	Beton in aggressiven Wässern. VEB Verlag für Bauwesen. Berlin
4	NAGRA 1994:	Bericht zur Langzeitsicherung des Endlagers SMA am Wellenberg. Zum Verhalten von Beton im Gebirge (Abschn. 2.3.2.1). NAGRA NTB 94-06 (Juni 94)
5	Eichler, K. Febr. 1994:	Umweltfreundlicher Spritzbeton. Tunnel 1/94, S. 33 - 37.
6	Hilmer, K. 1994:	Dränung zum Schutz baulicher Anlagen. Planung, Bemessung und Ausführung. Kommentar zur DIN 4095 (Ausgabe Juni 1990) Tunnel Heft 1/94
7	Preisig AG, F. 1966:	Bericht vom 8.8.66: Versuche mit verschiedenen Sickerleitungen. Ingenieurbüro F. Preisig AG, Zürich
8	Geiger, I. & Grisoni, F. 1994:	Die Wirksamkeit von elektromagnetischen Kraftfeldern zur Reduktion von Kalksteinablagerungen bei hartem Wasser. Wasser-Boden-Luft-Umweltschutz/Heft 4, S. 16 - 17
9	Firmeninformation HYDRION. 1984:	Chemische Rundschau 37. Nr. 31/32 (8. Aug. 1984, S. 3)
10	Theiler, F. 1988:	Physikalische Wasserbehandlungsgeräte und Stellungnahme der EMPA, "Gas-Wasser-Abwasser" Jg.68, 1988/11, S. 623 - 632. Dübendorf

6. Ursachen und Wirkung der Versinterung

6.1 Beschaffenheit von Sickerwasser

Im Zusammenhang mit der Abklärung bezüglich der Versinterungsrisiken für Neubauten und bei "Versinterungen" in bestehenden Leitungssystemen interessiert - neben den baulichen Gegebenheiten - vor allem die chemische Zusammensetzung des anfallenden Sickerwassers aus Lockergesteinen oder Fels.

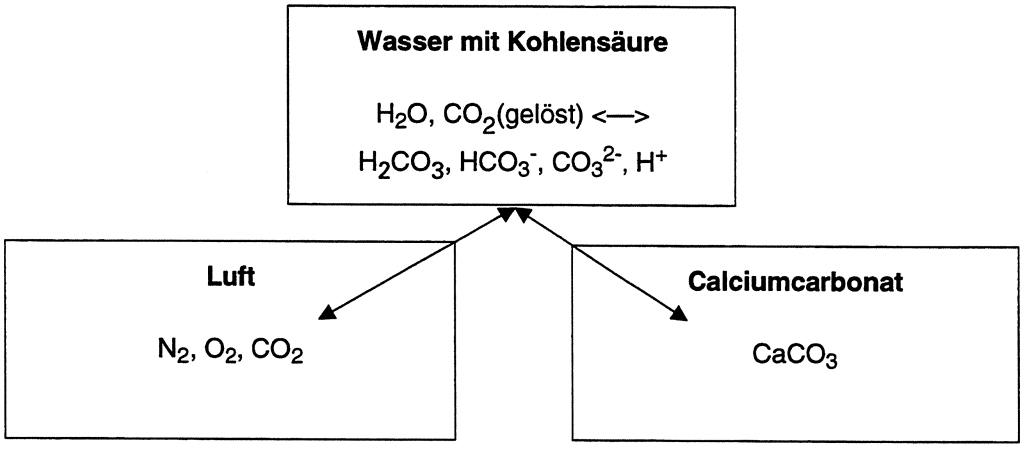
Das Regenwasser nimmt bereits vor der Versickerung Stoffe aus der Luft und der Erdoberfläche auf (z.B. O_2, CO_2, Stickoxide, Schwefeldioxid; NaCl usw.). Beim Durchsickern von humosen Lockergesteinen wird das Wasser mit weiterem Kohlendioxid und zusätzlich mit organischen Säuren (z.B. Huminsäuren) angereichert. Durchströmt dieses Wasser Lockergesteine oder Fels, so kann

eine grosse Zahl verschiedener Stoffe (vor allem Mineralsalze) - so auch Calciumcarbonat oder Gips - aus dem Untergrund herausgelöst werden. Grund- oder Bergwasser kann auch erhöhte Gehalte an gelöstem Eisen und Mangan aufweisen, die dann später ebenfalls zu Versinterungen oder Verockerungen beitragen. Eisen und Mangan findet man im Grund- oder Bergwasser immer dann, wenn der Sauerstoffgehalt des Wassers tief ist. Der aus der Luft stammende Sauerstoff des Grund- oder Bergwassers wird durch eine grosse Anzahl von Oxidationsprozessen verbraucht. Je länger das Wasser im Untergrund verbleibt und dabei nie in Kontakt mit Systemen mit "Luftzirkulation" gerät, d.h. je "älter" es ist, um so weniger Sauerstoff und um so mehr gelöstes Eisen und Mangan ist darin zu erwarten. In Ausnahmefällen enthält Grund- oder Bergwasser auch tote oder lebendige Organismen (Bakterien oder Pflanzen wie z.B. Algen, Pilze oder Reste davon), die später, nach dem Austritt des Wassers aus dem Erdreich oder dem Fels, den Sintervorgang beeinflussen können.

6.2 Chemisch-physikalische Zusammenhänge der Versinterung

6.2.1 Lösungsprozess von Calciumcarbonat im Wasser

Im System "Luft" - "Wasser mit Kohlensäure" - "Calciumcarbonat" existieren mehrere chemische Gleichgewichte, welche sich gegenseitig beeinflussen:



Im Regenwasser lösen sich - wie bereits erwähnt - beim Durchsickern von Lockergesteinen und Fels Mineralsalze. Sie spalten sich dabei in Kationen und Anionen auf:

Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}; Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$/ HPO_4^{2-}, HCO_3^- usw.

Im Hinblick auf die Versinterung interessiert vor allem das Lösen von Calciumcarbonat, welches in der Regel durch Säuren erfolgt:

- Calciumcarbonat ($CaCO_3$) ist **schwer wasserlöslich**: 0.015 g/l bei 15 ÷ 20° C.
- Das Kohlendioxid wird bis zu einem gewissen Grad vom Regenwasser aus der Luft aufgenommen. Grösstenteils gelangt es jedoch durch mikrobiologische Gärprozesse im Boden ins Grundwasser. Seine Löslichkeit ist temperaturabhängig:

Temperatur	Löslichkeit von CO_2 [g/l]
0 °C	3.24
10 °C	2.18
15 °C	2.05
20 °C	1.59
25 °C	1.39

Weniger als 1 % des gelösten CO_2 bindet sich chemisch an ein Wassermolekül:

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3 \qquad (1)$$

Das H_2CO_3-Molekül ist das Kohlensäuremolekül, indem es eines oder im Extremfall beide Wasserstoffionen H^+ abspaltet:

$$H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

$$\text{zum Teil:} \quad HCO_3^- \longleftrightarrow H^+ + CO_3^{2-} \qquad (2)$$

- Das Verhältnis zwischen der Konzentration des im Wasser gelösten CO_2 und dem Partialdruck, d.h. der Konzentration von CO_2 in der Umgebungsluft, ist bei einer bestimmten Temperatur konstant. Der CO_2-Partialdruck in der Porenluft des belebten Bodenkörpers ist höher als in der Atmosphärenluft. Das durchsickernde Meteorwasser nimmt deshalb auf seinem Weg in den Untergrund weiteres Kohlendioxid (CO_2) auf, oft bis zur Sättigung. Das mit Kohlensäure angereicherte Wasser löst in der Folge aus dem Kalkgestein des Grundwasserkörpers soviel Calciumcarbonat, bis sich ein Gleichgewicht gemäss nachstehender Gleichung (3) eingestellt hat. Die Menge des aufgelösten Kalkgesteins ist dabei wesentlich abhängig von der Menge der zur Verfügung stehenden Kohlensäure.

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longleftrightarrow Ca(HCO_3)_{2(\text{gelöst})} = Ca^{2+} + 2\,HCO_3^- \qquad (3)$$

In Worten ausgedrückt:

Ist genügend Kohlendioxid in der Lösung, so bildet sich aus Calciumcarbonat Calciumhydrogencarbonat; dieses ist nun rund 10'000 mal besser wasserlöslich als Calciumcarbonat (165 g/l gegenüber 0.015 g/l bei Calciumcarbonat). Das vorher praktisch unlösliche Calciumcarbonat hat sich in eine gut wasserlösliche Form umgewandelt.

- Die Wasserlöslichkeit von Calciumcarbonat ($CaCO_3$) wird bei Anwesenheit weiterer Säuren erhöht, z.B. durch Salz-, Salpeter-, Ameisen-, Humin- oder Schwefelsäure. Bei Verbrennungen entstehen z.B. Salzsäuregas (Verbrennung von PVC) sowie Stickstoff- und Schwefeloxide, welche ebenfalls durch den Regen aus der Luft ausgewaschen werden und nach weiterer Oxidation den Salpetersäure- und Schwefelsäuregehalt des Meteorwassers ausmachen. Dieser saure Regen löst zusätzlich Kalkgestein auf.

6.2.2 Ausfällen von Calciumcarbonat

Das Ausfällen des Calciumcarbonats, welches nachträglich zur Versinterung von Leitungen führt, läuft i.a. wie folgt ab:
Tritt das Porenwasser in Kontakt mit der atmosphärischen Luft, entweicht wegen ihres geringeren CO_2-Gehaltes ein Teil des im Wasser gelösten CO_2.
Es stellt sich wieder ein neues Gleichgewicht, d.h. die bei der vorherrschenden Temperatur konstante Konzentrationsverteilung

$$\frac{pCO_2}{[CO_2]_{gelöst}}$$

zwischen atmosphärischer Luft und Wasser ein. Dies wiederum führt dazu, dass auch das Gleichgewicht (3) gestört wird; die Reaktion der Gleichung läuft nun in der Gegenrichtung ab, d.h. es wird wieder CO_2 aus dem Hydrogencarbonat abgespalten und entweicht als Gas in die Luft. Es entsteht dabei wieder das schlecht lösliche **Calciumcarbonat $CaCO_3$**.

$$Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- \longleftrightarrow CaCO_{3\,(fest)} + CO_2 + H_2O \qquad (3)$$

Die Folge ist, dass das schlecht lösliche Calciumcarbonat ($CaCO_3$) aus der Lösung ausfällt und sich schliesslich als Sinter in der Leitung absetzt.

Neben dieser in der Natur vermutlich dominierenden Ursache können auch folgende Faktoren die Versinterung, d.h. das Ausfällen des Calciumcarbonats bewirken:

- Temperaturerhöhung, d.h. geringere Löslichkeit von CO_2 in wärmerem Wasser

- Verdunstung von Wasser bei Kontakt mit trockener Luft, was zu neuen Lösungsgleichgewichten führt (weniger Calciumcarbonat ist löslich bzw. $CaCO_3$ fällt aus)
- Weitere Veränderung des Säure-Base-Gleichgewichtes, z.B. infolge Zufuhr einer Base (pH-Wert-Verschiebung in den basischen Bereich, d.h. Erhöhung des pH-Wertes und Verringerung der Anzahl H^+-Ionen)

6.3 Physikalische Aspekte der Versinterung

6.3.1 Kristallstrukturen

Calciumcarbonat ($CaCO_3$) tritt in der Natur in drei Kristallstrukturen auf:

- Calcit: (Rhomboeder-Struktur), thermodynamisch stabile Phase; Vorkommen: z.B. Kesselstein, Höhlen, Sinter usw.
- Aragonit: meist nadelförmige Kristalle (orthorhombische Struktur) Vorkommen: z.B. in Höhlen, Perlmutter, Perlen usw. Aragonit bildet sich langfristig in Calcit um, wobei die Kristallstruktur meist erhalten bleibt.
- Vaterit: wird bei höheren Temperaturen (≥ 35° C) gebildet und ist damit im Zusammenhang mit der Versinterung nicht von Bedeutung.

Aragonit kommt in Höhlen nach Calcit am häufigsten vor. Das spezifische Gewicht von Aragonit ist mit 29.5 kN/m^3 höher als dasjenige von Calcit (27.5 kN/m^3). Bezüglich der physikalischen und chemischen Eigenschaften gibt es nur minimale Unterschiede zwischen den beiden Kristallformen.

6.3.2 Formen des Sinters

Mehrheitlich wird offenbar der an rauhen Oberflächen gut haftende **harte Sinter** angetroffen. Der **zuckerförmige Sinter** mit einer zerbrechlichen Struktur, welche bei geringer Krafteinwirkung bereits zusammenbricht und der **milchartige Sinter**, welcher bereits bei relativ bescheidener Strömung in der Leitung mit dem Berg- oder Grundwasser abtransportiert wird, sind offenbar weniger verbreitet. Alle drei Formen von Calciumcarbonatausfällungen werden offensichtlich auch in Höhlen beobachtet [1].

[1] : vgl. Literaturverzeichnis auf Seite 8

6.3.3 Mechanische Haftung von $CaCO_3$

Die Rauhigkeit und Porosität der Oberfläche von Leitungen spielt für die Haftung des Sinters eine wesentliche Rolle. Zum Beispiel wirken sich die Poren des Zementsteins in Sickerleitungen aus Beton insofern negativ aus, als die Kristalle in die Poren hineinwachsen und sich darin verankern können. Wegen dieser "Verankerung" ist ein Sinterbelag in Leitungen mit rauher und poröser Oberfläche mechanisch nur schwer zu entfernen. Theoretisch könnte der Sinter durch Zugabe von Säuren wieder gelöst werden. Säuren können jedoch das Rohrmaterial oder die Schächte (z.B. bei Betonrohren und -schächten) angreifen und sind hinsichtlich der Umweltbelastung nicht unbedenklich.

Bei glatten Kunststoffrohren ist eine solche "Verankerung" höchstens bei Rohrstössen oder Schadstellen möglich, so dass sich der Sinter im allgemeinen wesentlich weniger gut festsetzt und mit schonenden Kanalreinigungsverfahren (z.B. Druckwasserspülung) leichter gelöst werden kann.

6.4 Der Einfluss von Beton

Beim Beton und bei anderen zementgebundenen Baustoffen wie Anker- oder Stabilisierungs-Injektionen, Mörtel sind zwei wichtige Einflussfaktoren von Bedeutung: Einerseits verändert Beton den pH-Wert durch seinen basischen Charakter (vorhandenes, leicht lösliches $Ca(OH)_2$ = Calciumhydroxid). Andererseits beinhaltet der Zement Calcium vor allem in Form von hoch reaktionsfähigem CaO = Branntkalk (dessen Anteil liegt beim Zement zwischen 35 und 65 % und beim Portlandzement ≥ 60 %), welcher beim Abbindeprozess eine Vielzahl unterschiedlicher Verbindungen eingeht. Vor allem überhydratisierter und junger Beton oder Beton mit hohem W/Z-Wert und damit nicht optimaler Abbindung weist einen hohen Anteil an relativ leicht löslichem $Ca(OH)_2$ = Calciumhydroxyd auf, welches - wie bereits erwähnt - einerseits den pH-Wert verändert und andererseits auch den Basisstoff für das ausfallende $CaCO_3$ liefert. Mit zunehmendem Alter und dem sogenannten Carbonatisierungseffekt bildet der Beton Calciumcarbonat und wird damit - auch bei fehlenden kalksteinhaltigen Zuschlagstoffen - zum Lieferant von allerdings relativ schwer löslichem Calciumcarbonat.

Die im Zusammenhang mit der Versinterung interessierenden chemischen Prozesse gemäss [3] und [4] laufen wie folgt ab:

Aus Branntkalk des Zements: $CaO + CO_2 \longrightarrow CaCO_3$ (4)

und $CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$

Als reaktionsfähigste Verbindung im Beton gilt Calciumhydroxyd:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (5)$$

Aus Calciumcarbonat:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_{2(gelöst)} \quad (6)$$

$$Ca(HCO_3)_{2(gelöst)} = Ca^{2+} + 2 \cdot HCO_3^-$$

Aus Calciumhydrogencarbonat und Wasserzirkulation nach innen:

$$Ca(HCO_3)_{2(gelöst)} + Ca(OH)_2 \longrightarrow$$
$$2 \cdot CaCO_3 + 2 \cdot H_2O \quad (7)$$

Aus Calciumhydrogencarbonat und Austritt an der Oberfläche:

$$Ca(HCO_3)_{2(gelöst)} \longrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O \quad (8)$$

Wieweit, wie rasch und in welcher Richtung diese Prozesse bzw. Prozessketten ablaufen, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Zementzusammensetzung (Branntkalkanteil) und Zementkorngrösse (Mahlfeinheit)
- Zusammensetzung des Anmachwassers
- Spezifische Oberfläche des Betons (Sickerbeton, Magerbeton, oder vibrierter, qualitativ hochstehender Beton usw.)
- Härte des "Grund-" oder Sickerwassers (weich, mittel, hart)
- Durchflussgeschwindigkeit bzw. Verweildauer des Wassers im Bereich des Betons
- Wasserzementwert (W/Z-Wert)
- Verwendung von Abbindebeschleunigern wegen der entstehenden, gröberen Zementsteinstruktur (höhere Durchlässigkeit) sowie dem basischen Charakter der Abbindebeschleuniger

Die durch Sicker- oder Spritzbeton und Abbindebeschleuniger sowie Recycling-Betongranulat als Schüttgut oder Kalk- sowie Zementstabilisierung verursachten Probleme sind bereits mehrfach erkannt worden. So wird beispielsweise im Artikel von Klaus Eichler [5] im Heft "Tunnel 1/94" auf die beiden Faktoren, d.h. die Auswaschung von stark reaktionsfähigem Calciumhydroxyd und die dadurch verursachte Versinterung von Drainageleitungen sowie die Einflüsse auf das Grundwasser hingewiesen. Es wird versucht, die Auslaugfähigkeit von Spritzbeton ohne wesentliche Einbusse der Betonfrühfestigkeit zu verringern.

Im Kommentar von Klaus Hilmer [6] zur Norm DIN 4095 über Drainagen bzw. in vorgenannter Norm wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass im Hinblick auf Drainagen

- die Beschaffenheit des Wassers und insbesondere auch die Betonaggressivität abzuklären sind,
- bei stark kalksteinangreifenden Wässern kein Kalksteinschotter verwendet werden sollte,
- bei Carbonathärten > 10° dH (≈17.9° fH) ein Versinterungsrisiko gegeben ist (° dH bzw. ° fH = deutsche bzw. französische Härtegrade).

6.5 Erscheinungsformen

Das Phänomen des aus der Lösung auskristallisierenden Calciumcarbonats ist nicht neu. Es ist als Ursache für die Entstehung von

- **Stalaktiten und Stalagmiten in Höhlen** (vgl. Anhang A3.1, Abb. 1)
- **Kalktuff** sowie **Wiesenkalk** an der Oberfläche (z.B. die Tüfels-Chilen im Bäntal bei Kollbrunn)
- und zusammen mit Organismen auch **Seekreide** unter Wasser
- **Calciumcarbonatablagerungen im Boiler oder Kochtopf** infolge Temperaturanstiegs

zu nennen.

In der **Baupraxis** hat die **Versinterung sowohl positive als auch negative Aspekte. Positiv** wirkt sich die Versinterung dort aus, wo Bauten im Grundwasser stehen und Risse aufweisen. Anfänglich tritt Wasser durch die Risse ein. Bleiben die Rissweiten konstant, so **"wachsen" diese Risse meist nach relativ kurzer Zeit durch Versinterung zu.** Nur dort, wo periodisch Deformationen z.B. infolge saisonaler Temperaturschwankungen auftreten, werden die Risse immer wieder geöffnet, d.h. der Prozess kommt auch langfristig nicht zur Ruhe (vgl. Anhang A3.1, Abb. 2). Solche "Rissheilungen" können in der Natur in Form von Kluftfüllungen oft beobachtet werden.

Als **negative Auswirkung** ist vor allem die **Versinterung von Entwässerungsleitungen** (vgl. Anhang A3.1, Abb. 3) zu nennen. Diese verursacht hohe Kosten durch den Unterhalt, die Sanierung oder sogar die Erneuerung der Leitung sowie z.T. auch durch sekundär verursachte Schäden, indem wegen mangelhafter Entwässerung der Hangwasserspiegel steigt und z.B. einen Hang ins Rutschen bringt oder grössere Deformationen einer Stützkonstruktion auslöst.

7. Umfrage

Im Rahmen dieses Forschungsauftrags wurde eine Umfrage mit dem Ziel durchgeführt, abzuklären, wo und bei welchen Bauwerkstypen das Problem der Versinterung gehäuft auftritt. Zudem war von Interesse, wieweit bereits Ansatzpunkte für Abklärungen wie Wasseranalysen und/oder geologisch-hydrologische Untersuchungen vorliegen.

Es wurde deshalb ein Fragebogen erarbeitet (vgl. Anhang A1) und mit einem Begleitbrief folgenden Behörden und Ämtern zugestellt:

- 8 kantonale Tiefbauämter: AG, GR, LU, SH, TG, ZH und ZG
- 5 städtische Tiefbauämter: Luzern, Schaffhausen, Schlieren, Winterthur und Zürich
- SBB: GD und 5 Fachstellen der Kreise II + III

Von den insgesamt 19 angeschreibenen Stellen reagierten deren 13 mit insgesamt 20 gemeldeten Objekten. Die Rücklaufquote von knapp 70 % zeugt von einem beachtlichen Interesse. Die Ergebnisse der Umfrage sind in der Tabelle im Anhang A2 zusammengestellt. Gemäss den 13 Rückmeldungen sind lediglich im Kanton Zug keine Versinterungsprobleme zu verzeichnen, während im Kanton Thurgau wenig Probleme gemeldet werden. Die Stadt Winterthur kämpft zwar oft mit Versinterungsproblemen, es sind jedoch keine geeigneten Objekte zur Untersuchung gemeldet worden.

8. Objektauswahl

Die gemeldeten Objekte können in folgende Baukategorien eingeteilt werden:

- 9 Tunnelentwässerungen
- 8 Hangentwässerungen
- 2 Meteorwasser-Leitungen
- 1 Meliorations-Leitung

Im Bewusstsein, dass die Suche nach den jeweiligen Ursachen und Zusammenhängen der Versinterung von Entwässerungssystemen bei den unterschiedlich konzipierten Bauten komplex sein wird, wurden Objekte ausgewählt, welche **einerseits relativ einfach angelegt** sind, also hinsichtlich des Bauvorganges sowie im Endzustand keine komplizierten Bauten darstellen, und **andererseits auch bezüglich der anfallenden Wässer vergleichbare Verhältnisse, eine möglichst geringe oder gut bekannte Beeinflussung durch bauliche Eingriffe** und zudem ein **gewisses Alter aufweisen** (langjährige Erfahrung). Zudem mussten geeignete Probenahmestellen vor-

handen sein, die eine unverfälschte und wiederholbare Probenahme ermöglichten. Im weiteren sollten auch entstandene Versinterungen kontrollierbar und beprobbar sein.

Es wurden schliesslich die folgenden Untersuchungsobjekte ausgewählt:

- Objekt 1: Oberflächen- und Tiefenentwässerung im Bereich des N1-Anschlusses "Neuenhof/ Baden" im Kanton Aargau
- Objekt 2: Entwässerungsleitung entlang der Kantonsstrasse K 341 Leutwil - Boniswil im Kanton Aargau
- Objekt 3: N8 Umfahrungstunnel Sachseln

Während die ersten beiden Objekte relativ einfach angelegt und auch bereits längerfristig in Betrieb sind, handelt es sich beim N8 Umfahrungstunnel Sachseln um ein "junges" noch im Bau befindliches Objekt. Letzteres wurde erst später als aktuelles Beispiel in die Untersuchung einbezogen, da während der Bauarbeiten ebenfalls Versinterungserscheinungen im Entwässerungssystem festgestellt wurden und diese zudem spezielle Sinterstrukturen aufzeigten.

9. Kurzer Objektbeschrieb und durchgeführte Untersuchungen

Mit den im folgenden dargestellten Untersuchungen sollten Hinweise auf mögliche Ursachen von Calciumcarbonatablagerungen gefunden, oder eine Bestätigung von vermuteten Ursachen in den jeweiligen Entwässerungssystemen und deren Umgebung ermittelt werden. Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Analysen von Wasser aus den Drainagesystemen
- Feststoffanalysen von Calciumcarbonatablagerungen (Sinter)
- Aufbau der Leitungen und Einbettung im Bauwerk oder im Untergrund
- Kanalfernsehaufnahmen
- Spülversuche

9.1 N1 Anschluss Neuenhof (Objekt 1)

Im Bereich des Anschlusses Neuenhof sind zur Sicherung der Hanganschnitte mehrere verankerte Pfahlwände erstellt worden. Um die Belastungen derselben zu reduzieren, sind umfassende Entwässerungsmassnahmen an der Oberfläche sowie in grösserer Tiefe getroffen worden. Bergseits der Pfahlwände wird, mit Hilfe eines Netzes von Sickerleitungen, Oberflächenwasser gefasst und abgeleitet. Weiter wurden 4 zwischen 12 und 18 m tiefe Schächte ("Senkbrunnen") mit einem Durch-

messer von rund 5 m ausgehoben ($Ø_i$ = 4 m), und wenig über der Schachtsohle sowie ungefähr auf halber Höhe wurde ein Kranz von leicht nach abwärts geneigten Drainagebohrungen ausgeführt und mit gelochten Stahlrohren ausgerüstet (vgl. Beilage).

Die geologische Situation im Bereich des Anschlusses der N1 in Neuenhof lässt sich kurz wiefolgt umschreiben:

- In der Tiefe liegt Fels der Unteren Süsswassermolasse mit Wechsellagerungen von Sand-, Siltstein und Mergel sowie deren Mischformen.
- Die Schichtorientierung variiert relativ stark.
- Es sind mehrere Störungszonen vorhanden, welche den Wasserhaushalt wesentlich beeinflussen dürften.
- Über dem Fels folgt teils versackter Fels, teils eine Rutschmasse aus Felsmaterial und Hangschutt/ Gehängelehm.
- Bergwasser aus der Molasse ist als hart einzustufen, d.h. es enthält in der Regel viel gelöstes $CaCO_3$.

Schon im Jahre 1968 wurde die Problematik der Verkalkung von Entwässerungsleitungen diskutiert. Aufgrund von Versuchen beim Bau der N3 nahe der Kantonsgrenze zu Schwyz sind im Jahre 1969 vom Ingenieurbüro F. Preisig [7] im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Zürich Versuche mit folgenden Rohrtypen durchgeführt und folgendes festgestellt worden:

Rohrmaterial	Calciumcarbonatbelag	Wassermenge	Haftung	Beurteilung
Beton	Calciumcarbonatbelag	relativ gross	gut	ungünstig
	mit Feinmaterial			
Filterbeton	wenig Calciumcarbonatbelag	gering	sehr gut	langfristig schlecht
	im Rohr; ausserhalb des			
	Rohres Poren durch			
	Calciumcarbonat geschlossen			
PVC (geschlitzt)	starker Calciumcarbonatbelag	sehr gross	bescheiden	günstig

Vor allem wegen der offenbar besseren Möglichkeit zur Reinigung (infolge bescheidenerer Haftung des Calciumcarbonatbelags an der Rohrwandung) und wegen der geschlossenen Sohle (möglichst kein Verlust von bereits gefasstem Wasser) wurde die Variante der oben und seitlich geschlitzten PVC-Rohre mit geschlossener Sohle den gelochten Beton- und den Filterbetonrohren vorgezogen. Die Problematik der Versinterung wurde zu diesem Zeitpunkt nicht näher untersucht. Die damals vorliegenden Erkenntnisse wurden beim Bau des Anschlusses der N1 in Neuenhof jedoch berücksichtigt und für die Oberflächenentwässerung sowie für die Verbindungsleitungen der Tiefenentwässerung wurden weitgehend solche PVC-Rohre eingesetzt.

Im Rahmen des Ausbaus von Forststrassen bergseits der N1 wurden im gleichen Gebiet offenbar auch Betonrohre und Sickerrohre aus Beton verlegt und an das übrige System angeschlossen.

Das gesamte Rohrsystem wurde während der rund 25-jährigen Betriebsdauer konsequent gewartet, d.h. es wurde in der Vergangenheit und wird auch heute noch zweimal jährlich gespült. In verschiedenen Schächten wird zudem einmal jährlich die Abflussmenge verschiedener Leitungsabschnitte gemessen mit dem Ziel, die langfristige Funktionstüchtigkeit zu überwachen und allenfalls mögliche "Verstopfungen" von Leitungssystemen feststellen zu können.

Im Zusammenhang mit den vorliegenden Untersuchungen zur Versinterung wurde dem Kanton Aargau vorgeschlagen, erstmals das Kanalfernsehen einzusetzen, um ausgewählte Leitungsabschnitte zu kontrollieren. Im Jahre 1993 konnten Abschnitte mit Anzeichen von stärkeren Calciumcarbonatablagerungen (Hinweise aus der Erfahrung beim Spülen) erstmals vor und nach dem Spülen mit dem Kanalfernsehen aufgenommen werden, um den allgemeinen Zustand der Leitungen sowie die Wirkung der Spülarbeiten zu erfassen. Gleichzeitig wurden Wasserproben und Proben von Calciumcarbonatablagerungen gewonnen. Die Fotos Nr. 12 und 28 des Kanalfernsehens (vgl. Anhang A3.2, Abb. 4 + 5) zeigen den Strang A zwischen Schacht A 1 und Schacht A 2 vor und nach dem Spülen. Analog zeigen die Vergleichsfotos Nr. 27 und 36 im Abschnitt mit Sickerrohren aus Beton (vgl. Anhang A3.2 + A3.3, Abb. 6 + 7) die Leitung vor und nach dem Spülen.

9.2 **Kantonsstrasse Leutwil - Boniswil** (Objekt 2)

Die Strasse Leutwil-Boniswil wurde Ende der 80-iger Jahren ins Kantonsstrassennetz aufgenommen. In dieser Strasse befindet sich eine aus den 60-iger Jahren stammende Kanalisationsleitung, welche zur Entwässerung des bergseitigen Hanges auf den ersten rund 285 m mit Sickerrohren (Ø 250 mm) aus Beton erstellt wurde. Das normalerweise zufliessende Drainagewasser stammt aus der Lockergesteinsdecke sowie z.T. vermutlich auch aus dem felsigen Untergrund (Süsswasser Molasse mit den bekannten Wechsellagerungen). Während Niederschlägen wird dieses Wasser mit Meteorwasser von der Strasse verdünnt.

Seitdem die Strasse in die Obhut des Kantons überging, wurden auch diese - wie alle übrigen Leitungen zur Strassenentwässerung des Kantons Aargau - periodisch gewartet, d.h. gespült. Bei dieser Gelegenheit sind die sowohl in

den Schächten als auch in den Leitungen vorhandenen, sehr harten und nur schwer entfernbaren Calciumcarbonatbeläge festgestellt worden (vgl. Anhang A3.1, Abb. 3 und A3.4, Abb. 12).

Die im Zusammenhang mit dem geplanten Ausbau der Seetalbahn durchgeführten Quellenerhebungen und die im Jahre 1991 durchgeführte Quellwasser-Analyse haben Carbonathärten um 30° fH, d.h. hartes bis ziemlich hartes Wasser, ergeben. Die jüngsten für diese Forschungsarbeit vorgenommenen Analysen von Quellwasser aus dem Laufbrunnen sowie Wasser aus der Sickerleitung haben diesen Befund bestätigt (vgl. Abschnitt 10.1.2).

9.3 **N8 Umfahrungstunnel Sachseln** (Objekt 3)

Für den Umfahrungstunnel Sachseln wurde der rund 850 m lange Lüftungsstollen Altbiel mit einem Querschnitt von rund 47 m^2 im Sprengvortrieb ausgebrochen. Die Sicherung erfolgte vorerst mit armiertem Spritzbeton und nachträglich mittels geschaltem, vorwiegend unarmiertem Beton. Im Bereich mit Bergwasser wurden Rohre in den Spritzbeton eingelegt, um damit die Entwässerung zu gewährleisten.

Kurzbeschrieb der geologischen Situation im Bereich des Lüftungsstollens:

- Wenige Meter Sandsteine und Kalke (Bürgenformation)
- Hauptstrecke aus siltig-sandigen oder tonigen Mergeln (Amdener Mergel und Stadschiefer)
- Abgesehen von der Portalzone und einem Bereich, wo der First innerhalb der Lockergesteine liegt, wurde sehr wenig Wasser angetroffen
- Im Bereich mit viel Wasser handelt es sich vorwiegend um Oberflächenwasser
- Im Bereich mit wenig Wasser ist dieses in der Regel hoch mineralisiert

Während der Tunnelbauarbeiten und der geotechnischen Begleitung durch die Dr. von Moos AG wurden im Entwässerungssystem des Lüftungsstollens Altbiel bzw. im freien Auslauf der Drainageleitung bald stärkere Versinterungen festgestellt. Auffällig war die im Vergleich zu den übrigen Objekten eher unübliche Struktur der Calciumcarbonatausfällungen. Solche wurden auch schon früher z.B. in einer Baugrube in Zürich-Oerlikon beobachtet und bei einem Standrohr am Fuss der Tiefenentwässerung in Neuenhof (vgl. Anhang A3.3, Abb. 8 + 9). Wegen dieser anderen Form der Calciumcarbonatausscheidung mit einer relativ weichen, zuckerförmigen Struktur wurde dieses Objekt 3 nachträglich noch mit in die Untersuchungen einbezogen. Die Fotos Nr. 10 + 11 im

Anhang A3.4 zeigen eindrücklich einerseits die z.T. fadenartige Struktur sowie den körnigen, porösen Aufbau und die terrassenförmige Ausbildung im Auslaufbereich (vgl. auch Anhang A3.5, Abb. 13). Hier tritt der Ort der Calciumcarbonatausfällung am Rohrende bzw. am Auslauf augenfällig in Erscheinung. Die Probe konnte mit dem Spachtel mühelos ausgebrochen werden. Die Proben waren sehr sorgfältig zu behandeln, denn sie drohten zuckerförmig zu zerfallen. Diese Sinterform weist eine andere Erscheinungsform auf, als diejenige in den Drainageleitungen entlang der Strasse von Boniswil nach Leutwil (vgl. Anhang A3.4, Abb. 12), mit dem schichtweisen, kompakten und harten Aufbau.

10. Untersuchungsergebnisse

10.1 Wasseranalysen

10.1.1 Probenahme

Es wurden an drei Objekten Wasseruntersuchungen durchgeführt, welche die oben genannten Kriterien in etwa erfüllten:

Objekt 1 Hangsicherungen N1 Neuenhof AG:
Hangentwässerungen
Beprobung am 30. Sept. 1993 und 4. Mai 1994

Objekt 2 Kantonsstrasse K341 Boniswil-Leutwil:
Hangentwässerung
Beprobung am 11. Nov. 1993 und 4. Mai 1994

Objekt 3 N8-Umfahrungstunnel Sachseln NW, Lüftungsstollen Altbiel:
Stollenentwässerung
Beprobung am 28. Okt. 1994

Die Entnahme und der Transport der Proben erfolgten jeweils durch R.Weber, Geotechnisches Büro Dr.von Moos AG, Zürich. Für die chemisch-analytischen Untersuchungen wurden Methoden, wie sie für Trinkwasser und Grundwasser angewendet werden, eingesetzt (Schweiz. Lebensmittelbuch, Kap.27). Im Vordergrund standen die Bestimmung der konventionellen anorganischen Wasserinhaltsstoffe, sodass insbesondere die Lage des Calciumcarbonat-Kohlensäure-Gleichgewichts beurteilt werden konnte (kalkaggressiv, im Gleichgewicht oder Neigung zur Calciumcarbonatausscheidung). Weiter sollte der Salzgehalt und der Summengehalt an gelösten organischen Inhaltsstoffen (DOC = dissolved organic compound) bestimmt werden. Die Messung der Eisen- und Mangangehalte zeigte, ob in allfälligen Versinterungen zusätzlich Deposite von Eisen- und

Manganhydroxiden zu erwarten waren. Beim Objekt 1 wurden zwei Proben von besonders auffälligen Versinterungstypen auch noch chemisch-analytisch auf ihre Zusammensetzung hin untersucht.

10.1.2 Resultate der Wasseruntersuchungen

Objekt 1: Hangsicherungen N1 Neuenhof AG: Entwässerungen

Es wurden im Abstand von einem halben Jahr (Herbst 93 und Frühjahr 94) Wasserproben gezogen und chemisch untersucht. Die Analysen charakterisieren die Wässer bezüglich der Lage des Calciumcarbonat-Kohlensäure-Gleichgewichts und darauf basierend ihrer Neigung zu Versinterungen in den ableitenden Gerinnen.

Es wurde einerseits Wasser aus der Tiefendrainage und andererseits Wasser aus der Oberflächenentwässerung untersucht.

Bei beiden Wässern fällt auf, dass es sich gemäss Härteskala SLMB [I)] um "ziemlich hartes" bis "hartes" Wasser handelt, also auch beim Oberflächenentwässerungswasser keineswegs nur um "weiches" Meteorwasser. Das Calciumcarbonat-Kohlensäure-Gleichgewicht ist meist deutlich auf die Calciumcarbonatseite hin verschoben, sodass sogar in geschlossenen Gerinnen, d.h. in Gerinnen/Sickerwegen ohne Druckausgleich zur Atmosphäre, eine Neigung zu Calciumcarbonatausfällungen besteht. Diese Neigung zur Calciumcarbonatausfällung wird durch eine leichte bis moderate Alkalisierung (pH-Wert-Erhöhung, SI-Werte [II)] >0.3) der Wässer verursacht. An einer Stelle (Schacht III, Standrohr bei Drain 7) konnte bei beiden Probenahmeterminen sogar Tiefenwasser mit einem pH-Wert von ca. 12.5 entnommen werden. Dieses Tiefenwasser wies alle Anzeichen einer vollständigen Alkalisierung durch Zement bzw. Beton auf.

Die Konzentrationen von Sulfat liegen in allen Proben verhältnismässig tief, zwischen 20 und 40 mg/l. In den zementbeeinflussten Proben der Entnahmestelle bei Drain 7 wurden sogar nur 12 bzw. 16 mg/l gemessen, was vermutlich auf Adsorption von Sulfat durch Zementstein zurückzuführen ist. Auch die Gehalte an Chloriden und Nitraten sowie der Gehalt an Kieselsäure sind gering oder liegen in einem für Grundwasser üblichen Bereich.

In einzelnen Proben liessen sich erhöhte Gehalte an organischen Inhaltsstoffen nachweisen (DOC>1 mg C/l). Diese könnten in der Tendenz auf Calcitausfällungen sogar hemmend wirken.

I) SLMB, Schweiz. Lebensmittelbuch, Kap. 27

II) SI, Calciumcarbonat-Sättigungsindex: positive Werte > 0.3 bezeichnen Wässer mit zunehmender Neigung zur Calciumcarbonatabscheidung; SLMB, Kap. 27

In der untersuchten Anlage sind es die moderaten bis massiven Verschiebungen des pH-Wertes, welche die Neigung zur Calciumcarbonatabscheidung dominant bestimmen. Keiner der anderen genannten Faktoren hat einen auch nur ähnlich stark ins Gewicht fallenden Einfluss. Alle primären bauseitigen Massnahmen, welche die Alkalisierung der abzuleitenden Wässer gering halten oder verhindern könnten, wären sehr effizient, Versinterungen in den ableitenden Gerinnen zu minimieren.

Objekt 2: Kantonsstrasse Boniswil-Leutwil AG: Hangentwässerung

Das aus der Entwässerungsleitung der Kantonsstrasse K341 in Leutwil stammende Wasser wurde ebenfalls innerhalb eines halben Jahres zweimal untersucht (Nov. 93 und Mai 94). Zusätzlich dienten Quellwasseruntersuchungen aus den Jahren 1990, 93 und 94 als Vergleichsbasis für unbeeinflusstes Wasser, wie es bei der Hangentwässerung von Objekt 2 anfallen dürfte.

Die Resultate der Quellwasseranalysen zeigen, dass im Untersuchungsgebiet mit grosser Wahrscheinlichkeit ein als "hart" einzustufendes Drainagewasser von 32° fH bis 36° fH Gesamthärte abgeführt werden muss. Dieses Wasser zeigt einen ungestörten pH-Wert von 7.3 bis 7.5 und befindet sich im wesentlichen im Calciumcarbonat-Kohlensäure-Gleichgewicht mit einer gewissen Neigung zur Calciumcarbonatabscheidung (Calciumcarbonat-Sättigungsindex SI = +0.2 bis +0.5).

Die Untersuchungen des Sickerwassers aus den stark versinterten ableitenden Gerinnen der Hangentwässerung ergaben, mit einer Ausnahme, Wasserhärten im erwarteten Bereich (30° fH bis 35° fH). Auffallend und für die Problematik auch charakteristisch waren jedoch die um rund 0.5 Einheiten erhöhten pH-Werte. Dies ergab bei der rechnerischen Abschätzung der Lage des Calciumcarbonat-Kohlensäure-Gleichgewichts in den diskutierten Proben deutlich positive Sättigungsindices von rund +0.9. Wässer dieser chemischen Zusammensetzung neigen sehr deutlich zur Calciumcarbonatabscheidung.

An einer Probenahmestelle (Schacht 9) wurde im November 1993 eine Probe geschöpft, die zwar deutlich weicheres Wasser zeigte, das aber immer noch einen Sättigungsindex von +0.3 aufwies. Im übrigen spricht der Chemismus dieser Sickerwasserprobe für eine Beimischung von weichem Oberflächenmeteorwasser zum harten Quellwasser, was immer noch ein "mittelhartes" Mischwasser ergab.

Auch wenn die analytischen Ergebnisse hier nicht so offensichtlich auf Beeinflussung durch Zementstein hinweisen wie bei der erwähnten Probe aus Objekt 1 (stark erhöhte Werte für Calcium, Natrium und Kalium, fehlendes Magnesium), so ist wegen der Anwendung von zementgebundenen Baustoffen (Betonrohre, Fugenmörtel, Rohrbett usw.) seine Ursächlichkeit für die festgestellten pH-Verschiebungen und die beobachteten Versinterungen zu vermuten.

Objekt 3: N8 Umfahrungstunnel, Lüftungsstollen Altbiel, Sachseln NW

Der Lüftungsstollen wurde im Sprengvortrieb ausgebrochen und vorerst mit Felsankern und z.T. armiertem Spritzbeton, nachträglich mit geschaltem Beton gesichert. Vor allem in der Portalzone wird Wasser hinter dem Spritzbeton gefasst und abdrainiert. Bereits im Jahre 1990 wurde beim Auslauf terrassenförmig ausgebildeter, weisser Sinter beobachtet (vgl. A3.5, Foto 13). Dessen Struktur war zuckerförmig und sehr brüchig. Schliesslich wurde im Oktober 1994 beim Auslauf der Entwässerungsleitung eine Wasserprobe entnommen.

Die chemischen Untersuchungsresultate zeigen auch hier eine leichte Übersättigung an Calciumcarbonat. Es ist zudem die einzige der untersuchten Wasserproben, welche einen gewissen Sulfatanteil (SO_4^{2-}) enthält (80 mg/l). Die Gehalte an weiteren Salzen (Chloride, Nitrate), an Kieselsäure und an organischen Inhaltsstoffen (DOC) sind vergleichsweise gering.

In den zugehörigen Versinterungen konnte kristallographisch jedoch kein Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) festgestellt werden. Dies ist bei einer Löslichkeit von 2g/l und dem geringen Vorkommen im Untersuchungsgebiet auch nicht zu erwarten. Der Sinter besteht aus Calciumcarbonat und wenig Quarz.

Folgerungen aus den wasserchemischen Untersuchungsresultaten

1. **Die alkalisierende Beeinflussung (pH-Erhöhung) des abfliessenden Wassers ist der dominante Einfluss, welcher über das Auftreten von Versinterung entscheidet. Liesse sich die Alkalisierung verhindern, so wären auch die Calciumcarbonatausfällungen im Sickerwasser weitgehend unterbunden. Das Augenmerk ist deshalb vor allem auf zementhaltige Baustrukturen mit ihrem hohen Basengehalt zu richten. Aber auch der Einfluss von Kalk- oder Zementstabilisierungen, die auf das Sickerwasser aufhärtend und pH-erhöhend wirken, ist zu beachten.**

2. **Konstruktive bauseitige Massnahmen, welche die Ausgasung von Kohlendioxid in den wasserführenden Anlageteilen verhindern, wirken pH-stabilisierend und sind deshalb ebenfalls effiziente, aber in den untersuchten Fällen meist nicht hinreichend genug wirksame Massnahmen.**

3. **Die in sauberem Entwässerungswasser auftretenden Konzentrationen an weiteren Salzen (Chloride, Sulfate, Nitrate), an Kieselsäure sowie an organischen Inhaltsstoffen waren in den untersuchten Fällen von untergeordneter Bedeutung und können vernachlässigt werden.**

4. **Im Falle von anaeroben (sauerstofffreien) und deshalb oft stark eisen- und/oder manganhaltigen Wässern müsste bei Atmosphärenkontakt verstärkt mit eisen- und manganhaltigen Ausfällungen, d.h. Verockerungen gerechnet werden.**

5. **Bei den Versinterungsfällen kann unterschieden werden zwischen**
   a) **hartem, gut anhaftendem und damit schlecht zu entfernendem Sinter und**
   b) **weichen, durch Fremdstoffe nicht oder nur wenig verfärbten Calcitkristall-Aggregationen, die sich gut von ihrer Unterlage entfernen lassen.**

   Dies könnte darauf hinweisen, dass lockere und relativ reine Calcitkristall-Aggregate dort bevorzugt entstehen, wo z.B. stark basische (pH > 10) **und calciumcarbonathaltige Sickerwässer bei wechselndem Wasserstand verdunsten können. Beispiel: Objekt 1, Sinterprobe aus Schacht III vom Standrohr bei Drain 7** (vgl. Anhang A3.3, Abb. 8 + 9).

   Beim Objekt 3 wurde zwar auch ein ähnlich lockerer Sinter gefunden (Sinterprobe vom Lüftungsstollen Altbiel, N8 Umfahrungstunnel Sachseln; vgl. Anhang A3.4, Abb. 10 + 11). **Die gleichzeitig erhobene Wasserprobe ergab aber ein Sickerwasser mit nur geringfügig erhöhtem pH-Wert von knapp 7.6 und moderat erhöhtem Sättigungsindex von +0.44. Es könnte davon ausgegangen werden, dass die hier noch andauernden Bauarbeiten zeitweise ein viel stärker alkalisiertes Sickerwasser verursachen als es zur Zeit der Probenahme der Fall war. Zudem dürften zeitweise auch Stagnationsphasen auftreten, sodass auch hier für die Kristallisation des Calcits ähnliche Bedingungen herrschen wie bei der oben erwähnten Stelle von Objekt 1.**

   Bei allen anderen Probenahmestellen wurden harte und kompakte Sinter gefunden (z.B. Objekt 2, Sinterprobe von Schacht 9, Entwässerungsleitung Boniswil-Leutwil; vgl. Anhang A3.4, Abb. 12). **Die entsprechenden Wasserproben zeigen durchwegs pH-Werte im Bereich von 7.3 bis 8.3. Dies bedeutet chemisch, dass das Puffergebiet Kohlensäure/Hydrogencarbonat praktisch nicht verlassen wird und deshalb nur eine sehr geringe Übersättigung an Carbonat vorliegt, was wiederum ein langsames Kristallwachstum** (Sinterwachstum) **erzwingt und aus diesem Grund zu dichterm**(hartem) **Sinter führt.**

10.2 Feststoffanalysen

Das Geologische Institut der Universität Bern fertigte von mehreren Sinterproben, welche zusammen mit den im Labor analysierten Sickerwässern gesammelt wurden, Dünnschliffe an und untersuchte sie unter dem Licht- und unter dem Fluoreszenzmikroskop. Bei Fluoreszenzlicht wird die Probe in einem bestimmten

Wellenlängenbereich des Lichtes angeregt, um Lichtemission von organischen Substanzen zu erzeugen. Im vorliegenden Fall geschah die Anregung im Wellenlängenbereich 395 ÷ 440 nm. Die im Sinterkalk eingeschlossenen Huminstoffe (makromolekulare Fulvo- und Huminsäuren, welche bei der Humusbildung entstehen und biologisch nur schwer abbaubar sind: = Naturstoffe) emittierten durch diese Anregung Fluoreszenzlicht. Daneben wurden auch Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht, wo die Strukturen der Calciumcarbonatkristalle sowie gewisse Fremdkristalle sehr gut zur Geltung kommen. Eine Zusatzanalyse zur Bestimmung der vorhandenen chemischen Elemente mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDS) erlaubte einen Einblick in den elementaren Aufbau der gefundenen Kristalle. Schliesslich wurden Röntgendiffraktogramme der Sinterproben angefertigt, welche die Bestimmung der Phasenzusammensetzung des Sintermaterials ermöglichten.

10.2.1 Dünnschliffaufnahmen

Objekt 1:

Fotos 14 und 15 (vgl. Anhang A3.6: Sinter von Schacht A1 in Neuenhof)
Die Sinterschichten sind auf einem carbonatischen Siltstein (Foto 14 oben, dunkler Bereich) auflaminiert. Foto 15 ist eine nochmals 20-fache Vergrösserung aus dem braunen Siltstein von Foto 14. Es handelt sich um Sinter mit einem Mineraliengemisch aus Dolomit (mit 1 bezeichnet), Quarz (2) und Glimmerplättchen (3).

Foto 16 (vgl. Anhang A3.6: 5-fache Vergrösserung des unteren Teils von Foto 14)
Es zeigt grosse Calcitkristalle in einer der äusseren Sinterschichten in Schacht A1, Neuenhof. Die Pfeile deuten auf eingeschlossene Huminstoffe, welche das Wachstum der Kristalle gestört haben.

Objekt 2:

Fotos 17 und 18 (vgl. Anhang A3.6)
Foto 17 zeigt laminierten Sinter aus Schacht 9 in Boniswil. Foto 18 zeigt dieselbe Aufnahme mit Fluoreszenzlicht; die hellen Schichten zeichnen sich dadurch aus, dass Huminstoffe in den Calciumcarbonat eingelagert sind. Deutlich sichtbar sind die Schichten, welche auf ein kontinuierliches Wachstum unter verschiedenen Voraussetzungen (verschieden starke Huminstoffvorkommen) hinweisen.

10.2.2 Röntgendiffraktogramme

Objekt 1: Fig. 1 (vgl. Anhang A4.2)
Röntgendiffraktogramm der Sinterunterlage aus Foto 15 . Der Peakvergleich mit Calcit, Dolomit und Quarz zeigt, dass alle drei Mineralien in dieser Probe, welche als carbonatischer Siltstein identifiziert wurde, vorkommen.

Objekt 2: Fig. 2 (vgl. Anhang A4.1)
Röntgendiffraktogramm zu den Fotos 17 und 18. Der Vergleich der gefundenen Peaks zeigt, dass einzig Calcit hier eindeutig identifizierbar ist (Calcit ist ab 1 ÷ 2 % gut identifizierbar).

10.2.3 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen

Objekt 1:
Foto 19 (vgl. Anhang A3.7)
Dieses weisse Pulver stammt aus dem Schacht SIII in Neuenhof (Vergrösserung: 1200x). Gut erkennbar sind hier die rhomboedrischen Calcitkristalle. Die Kanten des grössten Kristalls sind beschädigt, was dadurch zu erklären ist, dass Kanten "energiereicher" und deshalb weniger stabil sind.

Objekt 2:
Foto 20 (vgl. Anhang A3.7: Vergrösserung von Material der Fotos 17 und 18)
Der gezeigte Calciumcarbonatkristall ist 833x vergrössert.

Foto 21 (vgl. Anhang A3.7: Gleiches Material, hier 4666-fach vergrössert)
Die Oberfläche des Kristalls weist treppenförmige Wachstumszonen auf. Ursachen für diese Struktur sind wahrscheinlich Gitterdefekte.

10.2.4 Kommentar zu den Feststoffuntersuchungen

Die Identifizierung der Proben zeigt, dass das Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie durch die Röntgendiffraktometrie bestätigt wird. Bei der Probe aus Boniswil (Fotos 17, 18, 20, 21; Fig. 2) handelt es sich um reine Sinterablagerung aus Calcit, während in der Probe aus Neuenhof (Fotos 15, 16, 19; Fig. 1) schon die farbliche Differenzierung (Foto 15) mit einer innen gelb-grauen Schicht, welche von einer hellgelben Aussenschicht (Foto 15, unten) überdeckt ist, andeutet, dass hier unter der hellen Calcitschicht Fremdminerale vorkommen (Foto 16). Tatsächlich belegt Fig. 1 (vgl. Anhang A4) das Vorhandensein von detritischen Körnern aus Quarz, Dolomit und Glimmer.

10.3 Kanalfernsehaufnahmen und Spülversuche

10.3.1 Anschluss N1 Neuenhof

Die Drainage- und Ablaufleitungen im Bereich des Anschlusses Neuenhof werden jährlich zweimal gespült. Der Hauptteil der Leitungen besteht aus geschlitzten (in der Sohle geschlossenen) Drainagerohren und geschlossenen Rohren aus PVC. Untergeordnet sind auch Sickerrohre aus Beton verlegt worden. Im September 1993 wurden verschiedene Leitungsabschnitte, welche anlässlich früherer Spülarbeiten stärkere Verkalkungen aufwiesen, einer Überprüfung des Reinigungseffektes der Spülarbeiten mittels Kanalfernsehen unterzogen. Es können folgende Beobachtungen festgehalten werden:

- Die PVC-Rohre wiesen generell relativ wenig Calciumcarbonatablagerungen auf.
- Die Kanalfernsehaufnahmen nach dem Spülen zeigen, dass ein Grossteil der Calciumcarbonatablagerungen in den PVC-Rohren durch das Spülen entfernt wurde.
- Die Schlitze der Sickerrohre lassen sich mindestens z.T. wieder freispülen.
- Die Sickerrohre aus Beton weisen sehr starke Calciumcarbonatablagerungen auf.
- Die Spülarbeiten in den Sickerrohren aus Beton lassen eine sehr unterschiedliche (teils praktisch keine, teils mässig bis gute) Reinigungswirkung erkennen.

10.3.2 Entwässerung Kantonsstrasse K341: Boniswil — Leutwil

Die Drainage- und Ablaufleitungen im Bereich der Kantonsstrasse K341 im Bereich von m 530 bis m 770 wurden früher von der Gemeinde betreut. Heute werden sie durch den Kanton jährlich zweimal gespült. Die Leitung besteht aus teils geschlossenen, teils gelochten Betonrohren. Im März 1992 wurde dieser Leitungsabschnitt mittels Kanalfernsehen kontrolliert. Es können folgende Beobachtungen festgehalten werden:

- Die Sickerrohre aus Beton weisen sowohl in der Sohle als auch seitlich sehr starke und offensichtlich harte Calciumcarbonatablagerungen auf.
- Die Öffnungen der Sickerrohre aus Beton sind z.T. vollständig verkalkt.
- Die Sickerrohre aus Beton können mit dem normalen Spülverfahren nicht zufriedenstellend gereinigt werden, d.h. der Einsatz mechanischer Verfahren wie Fräsen usw. wird nötig.
- Die Rohre sind wegen den z.T. sehr starken Calciumcarbonatablagerungen für die Kamera teilweise nicht durchgehend passierbar.

10.3.3 N8 Umfahrungstunnel Sachseln

Bei diesem Leitungssystem wurden bis heute weder Spülversuche noch Kanalfernsehaufnahmen durchgeführt.

11. Schlussfolgerungen

11.1 Zusammenfassung

Die wichtigsten im Rahmen der Untersuchungen über "Versinterungen an Entwässerungssystemen" zusammengetragenen Erkenntnisse sind:

1. Versinterungen von Drainagen und ableitenden Gerinnen bestehen in Gebieten mit vorwiegend calciumcarbonathaltigen Gesteinen praktisch ausschliesslich aus Calciumcarbonat. Ausfällungen von Eisen- und Manganhydroxiden, d.h. sogenannte Verockerungen fallen in der Praxis weniger ins Gewicht sind.

2. Calciumcarbonat wird vom Sickerwasser aus dem Boden und allenfalls aus Baustrukturen aufgenommen und unter gewissen Bedingungen auch wieder abgeschieden.

3. Calciumcarbonat steht im Sickerwasser mit Kohlensäure in einem Lösungsgleichgewicht. Die Lage dieses chemischen Gleichgewichts entscheidet, ob das Sickerwasser weiteres Calciumcarbonat aufnimmt oder solches abscheidet. Dabei spielen Basen (Zement) und die verfügbare Kohlensäure (CO_2-Partialdruck) die entscheidenden Rollen.
   Von offenbar untergeordneter Bedeutung sind weitere Sickerwasserinhaltsstoffe wie Salze, Metalle, organische Stoffe und Lebewesen (Bakterien, Algen, Pilze). Ebenfalls wenig bedeutend sind die Temperaturdifferenzen zwischen Erdreich und ableitenden Gerinnen. Die tieferen Wintertemperaturen bewirken auch im Gerinne eine bessere Löslichkeit der stabilisierenden Kohlensäure im Sickerwasser.

4. Die baulichen Eingriffe (künstliche Einflussfaktoren wie Zement bzw. Beton, Kalk und gewählte Materialien für Gerinne) komplizieren das System "Entwässerung" zusätzlich und beeinflussen die Calciumcarbonatabscheidung und nachfolgende Versinterungen massgeblich.

5. Die Ausscheidung von Calciumcarbonat verursacht nicht nur im Zusammenhang mit Entwässerungsleitungen nahe der Oberfläche, sondern vor allem auch in grösserer Tiefe Probleme. Dies ist vor allem im Hinblick auf die aktuellen Tunnelprojekte von Bedeutung.

Im Zusammenhang mit Entwässerungsleitungen in der Umgebung von Bauten sind - neben dem Ausmass des Gehalts an gelöstem Calciumcarbonat im Sickerwasser und der Erniedrigung des CO_2-Partialdruckes beim Übertritt des Sickerwassers in die Leitung mit atmosphärischen Bedingungen - vor allem die **alkalisierenden Einflüsse von Beton und anderen zementgebundenen Baustoffen, von zement- oder kalkstabilisierten künstlichen Auffüllungen und von Auffüllungen mit Recycling-Betongranulat auf das Lösungsgleichgewicht von Calciumcarbonat im Sickerwasser** hervorzuheben. Auch poröse "Fertigprodukte" wie Beton-Verbundsteine können offenbar bereits zu stärkeren Calciumcarbonatausfällungen Anlass geben.

11.2 Anforderungen an das Entwässerungskonzept

Damit ergeben sich für die baulichen Konzepte von Drainage- und Leitungssystemen die folgenden grundsätzlichen Forderungen:

- Sickerwasser ist möglichst nicht in Kontakt mit Beton oder anderen basischen Stoffen zu bringen (aus dieser Sicht sind z.B. Sickerrohre aus Beton oder ein Zementmörtelbett für Sickerleitungen vor allem für dauerhafte Lösungen unerwünscht).
- Sickerwasser sollte erst dort mit der Atmosphäre (Luft) in Kontakt gelangen, wo das Calciumcarbonat, ohne Schaden anzurichten, ausfallen und einfach entfernt werden kann, d.h. die Entwässerungssysteme sollten möglichst dauerhaft eingestaut sein und nur für Spül- und Kontrollarbeiten (Kanalfernsehen) entleert werden.
- Das Leitungsmaterial sollte so beschaffen sein, dass das Calciumcarbonat schlecht haftet (glatte, wenig poröse Oberfläche). Betonrohre als Entwässerungsleitungen sind wegen der porösen Oberfläche und dem negativen Einfluss von Beton (alkalisch) zu meiden.

12. Offene Fragen

Im Rahmen der Untersuchung der Versinterungsproblematik sind vor allem im Hinblick auf mögliche weitere Einflussfaktoren, welche die Versinterung, d.h. das Ausfällen des Calciumcarbonates wesentlich beeinflussen oder beeinflussen könnten, noch Fragen offen. So z.B. steht der Einfluss von lebenden oder toten Organismen zur Diskussion.

Vor allem interessiert die Ursache, weshalb das Calciumcarbonat teils in "zuckerartiger" Aggregation ausfällt, meist jedoch den harten, nur schwer entfernbaren Belag auf der Leitungssohle bildet. Falls dies mit einfachen Mitteln von aussen beeinflussbar wäre, wäre auch ein wichtiger Ansatz zur einfachen Lösung für das Versinterungsproblem gefunden.

Die vorliegende Untersuchung beschränkte sich auf Abklärungen innerhalb von Leitungssystemen. Die Umgebung der Drainageleitungen (Sickerschicht) blieb unberücksichtigt. Fragen bezüglich möglicher Versinterungserscheinungen in Sickerpackungen interessieren ebenfalls sehr.

13. Anregungen

13.1 Für weitere Untersuchungen

Zur Beantwortung der noch offenen Fragen sind die folgenden weiteren Untersuchungen erforderlich:

- Gezieltes Freilegen bestehender Leitungen, d.h. sorgfältiges Ausgraben der Leitungen und Untersuchung des Sickerkoffers
- Kanalfernsehaufnahmen in Sachseln mit dem zuckerartigen Sinter (vor und nach dem Spülen)
- Feld- oder Laborversuche mit "kalkhaltigem" Wasser (mit und ohne Einfluss zementgebundener Baustoffe)
- Feld- oder Laborversuche mit auf einem Leitungsabschnitt eingesetzten unterschiedlichen Leitungsmaterialien sowie Entwässerungskonzepten (eingestaut und nicht eingestaut)
- Untersuchungen betreffend der unterschiedlichen Sinterformen (Mondmilch, harte Ablagerungen usw.)

13.2 Für eine Norm "Entwässerungen"

Im Hinblick auf die in den kommenden Jahren zur Ausführung gelangenden grossen Tunnelbauwerke sind speziell auf Tunnelentwässerungssysteme ausgerichtete Konzepte gefragt. Erste Schwerpunkte sind einerseits beim Erfassen der anfallenden Bergwässer (vorgängige Wasser- und Felsanalysen) zu legen. Andererseits sind die Tunnelbauweise und die notwendigen Bauhilfsmassnahmen wie Injektionen, Spritzbetoneinsatz, usw. mit in die Untersuchungen einzubeziehen.

Ziel dieser weiteren Forschungen ist es, die Grundlagen für die Ausarbeitung einer sog. Norm für "Entwässerungen" bereitzustellen. Es sollen Konzepte erarbeitet werden für die Projektierung, Ausführung und den Unterhalt von Entwässerungen

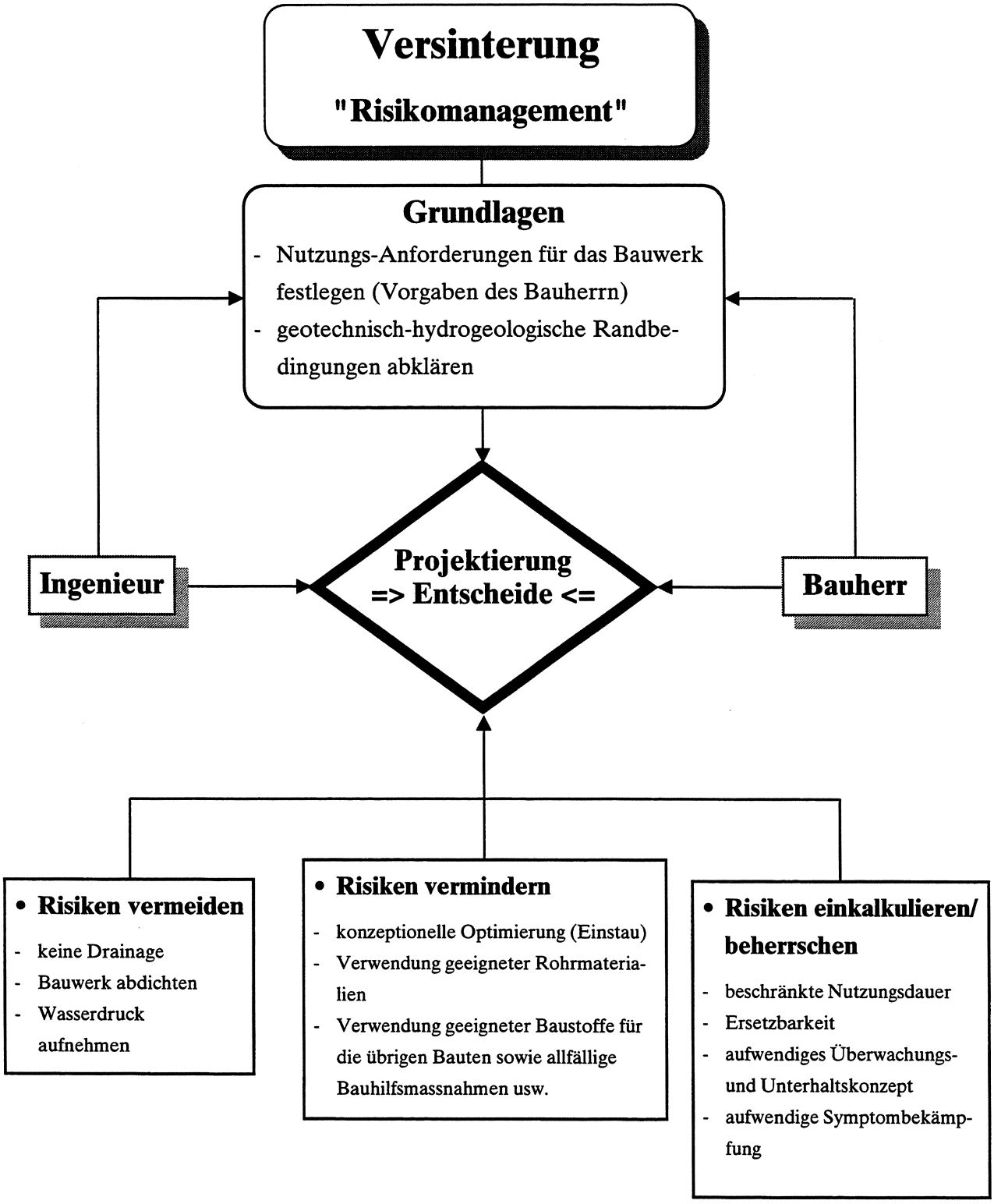
- bei Tunnelbauten (hoch- und tiefliegend)
- entlang von Verkehrswegen
- bei Hochbauten
- bei Hangsicherungen/ Rutschgebieten

14. Vorläufige Empfehlungen

Versinterungen von Drainage- und Sammelleitungen verursachen gesamtschweizerisch einen sehr hohen Aufwand für den Unterhalt. Zudem ist die Erneuerung solcher Entwässerungssysteme oft mit sehr hohen Kosten verbunden. In Tunnels sind Erneuerungen höchstens noch teilweise realisierbar (Tunnelentwässerungen ausserhalb des Konstruktionsbetons). Oft genügen bereits einfache konzeptionelle Änderungen des Entwässerungssystems, um das Risiko bzw. das Ausmass von Versinterungen wesentlich zu reduzieren.

Aus den heute vorliegenden Erkenntnissen sind nicht nur Grundsätze und Anforderungen an Entwässerungssysteme bzw. an deren bauliche Konzeption und das Leitungsmaterial zu formulieren. Es ist ebenso wichtig, den Baustoffen des Bauwerks (inkl. Bauhilfsmassnahmen) das notwendige Augenmerk zu schenken. Die formulierten Forderungen und Grundsätze sind teilweise widersprüchlich und werden in der Praxis oft nicht in ihrer Gesamtheit realisierbar sein. Es sind jeweils die bauwerksspezifischen Gegebenheiten im Bau- und Endzustand, die geologisch-hydrologischen Randbedingungen und die Risiken zu formulieren, zu gewichten und - zusammen mit der Bauherrschaft - Prioritäten zu setzen. Unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer sowie des Unterhalts sind die notwendigen Entscheide zu treffen und ist das Entwässerungssystem zu projektieren.

Das auf die Versinterungs-Problematik ausgerichtete "Risikomanagement" ist im folgenden Ablaufschema dargestellt.



Für die Projektierung und die Erarbeitung des **Leitungskonzeptes** können die folgenden Empfehlungen abgegeben werden:

- **Drainagen nur dort erstellen, wo dies unbedingt erforderlich ist.**
- **Leitungssystem bis zum Überlauf im Schacht einstauen** (ohne Kontakt mit atmosphärischer Luft).
- **Beim Rohr- und Bettungsmaterial hinsichtlich der Versinterung "chemisch neutrale" Materialien wählen.**
- **Widerstandsfähige Rohre mit glatter Oberfläche sind vorteilhaft** (bescheidenere Haftung von Calciumcarbonat und widerstandsfähig bei mechanischer Reinigung).
- **Das Leitungssystem ist unterhaltsfreundlich zu gestalten, d.h. gut zugänglich, grosse Rohr- und Schachtdurchmesser.**
- **Leitungssystem soll in kritischen Bereichen ersetzbar sein.**

Zürich, den 26. Januar 1996 Das Forschungsteam

Bericht Nr. 5060/ib-Hei
mit Anhang und 1 Beilage

Bearbeitet von:
M.A. Gautschi, dipl. Bauing. ETH/SIA
W. Heierli, dipl. Bauing. ETH/SIA, Dr. sc. tech.
J. Peter, Dr. sc. nat., Chemiker ETH
M. Schurter, Dr. sc. nat., Chemiker ETH/SIA
R. Weber, dipl. Bauing. ETH/SIA

Exkurse:

I. Beeinflussung der Kristallform durch Magnetfelder

Es wird behauptet, dass Aragonit sich weniger bereitwillig an rauhen Oberflächen festsetze, sondern eher als Kristallkeimsuspension auftrete [8]. Dies würde bedeuten, dass Aragonit weniger zum Versintern neigt als Calcit.

Angeblich soll durch starke Magnetfelder, welche während der Kristallisation auf die Carbonationen einwirken, Calciumcarbonat bevorzugt in der Aragonitstruktur auskristallisieren.

Andere Erklärungsversuche zur positiven Beeinflussung des Calciumcarbonatablagerungsverhaltens durch ein externes Magnetfeld postulieren, dass durch das Magnetfeld die Kleinkristalle, welche als Kolloide von einem dünnen Wasserfilm umgeben sind, polarisiert werden und sich deshalb gegenseitig abstossen, so dass sie nicht weiterwachsen [9].

Auf der letztgenannten Behauptung beruht eine Methode, welche angeblich bei Hauswasserversorgungen mittels Permanentmagneten eine Versinterungsprävention herbeiführen soll. Eine Untersuchung der EMPA [10] hat allerdings ergeben, dass kein signifikanter Unterschied in der Versinterungstendenz zwischen den beiden Calciumcarbonatstrukturen festgestellt werden konnte. Auch konnte nicht nachgewiesen werden, dass in einem Magnetfeld bevorzugt Aragonit gebildet wird.

II. Chemische Beeinflussung der Löslichkeit von Calciumcarbonat

Unter der Bezeichnung "Härtestabilisierung" wird ein Verfahren [I)] angeboten, welches durch Zugabe von Na-Polycarbonaten und Na-Phosphonocarbonaten [II)] in das Leitungssystem das Wachstum von Calciumcarbonatkristallen behindern soll; kleine Kristalle bleiben als Suspension im Wasser und werden fortgespült. Zusätzlich entfalten die genannten Chemikalien eine dispergierende Wirkung, d.h. es bilden sich Wasserschichten um die Calciumcarbonatkristalle, so dass sie nicht zusammenwachsen können. Das Verfahren ist schon seit einiger Zeit bekannt und wird zur Vermeidung von Calciumcarbonatablagerungen in den Kühltürmen von Kernkraftwerken eingesetzt. Es hat sich auch bei Versuchen in der Entwässerungsleitung des Isla Bella-Strassentunnels (N 13, San Bernardino-Strecke) im Winter 1993/94 als erfolgreich erwiesen.

Nach Angaben der Patentinhaber genügt ein Zusatz von 1 ppm dieses Härtestabilisators; dies führt zu folgender Zusatzbelastung des Sickerwassers:

Gesamtphosphat	0.045	ppm
Chemischer Sauerstoffbedarf [CSB][III)]	0.32	mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf [BSB][IV)]	< 0.1	mg/l

Es handelt es sich dabei um eine chemische Zusatzbelastung für das Sickerwasser, deren Ausmass in der Praxis stark von der langfristigen Dosierung abhängt.

Probleme dürften allenfalls die Umstände der Zugabe (Zudosierung, Verteilung) bieten, da das Stabilisierungsmittel schon im Wasser verteilt sein sollte, wenn dieses an die "Oberfläche" tritt, d.h. ins Leitungssystem gelangt. Eine nachträgliche Zugabe muss bei dem angegebenen Mechanismus wirkungslos bleiben.

[9] ff. vgl. Literaturverzeichnis auf Seite 8

I) entwickelt von Marcel Wegmüller, dipl. Ing. ETH, 4125 Riehen; Lizenznehmer: Ingenieurbüro W. Galli, 8152 Glattbrugg

II) Handelsname: NALCO 7311 PLUS (Deutsche NALCO-Chemie GmbH, 60486 Frankfurt)

III) Der CSB ist ein Mass für die Reaktionsfreudigkeit (Oxidierbarkeit) von (v.a. organischen) Wasserinhaltsstoffen; Qualitätsziel für Fliessgewässer: wird fallweise festgelegt (≈10 mg/l)

IV) Der BSB ist ein Mass für die biologische Abbaubarkeit von Wasserinhaltsstoffen; Qualitätsziel für Fliessgewässer: ≤4 mg/l

Fragebogen

Bitte ausfüllen und zurücksenden an: Dr.von Moos AG
Geotechnisches Büro
zHv.Herrn M.A.Gautschi
Bachofnerstr. 5
8037 Zürich

1. Wir haben Probleme mit Versinterungen in Leitungen

ja	nein
☐	☐

2. Wir haben zur Zeit ein geeignetes Objekt zur Verfügung

ja	nein
☐	☐

3. Wir nehmen in absehbarer Zeit einen Neubau in Angriff, der sich als geeignetes Beobachtungsobjekt anbieten würde.

ja	nein
☐	☐

P.S. zutreffendes bitte ankreuzen!

Wir haben folgende geeignete Beobachtungsobjekte (Entwässerungsleitungen) zur Verfügung:

Objekte	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Name des Objektes:			
Standort des Objektes:			
Baujahr ca.:			
Länge ca. (m):			
Durchmesser (mm):			
Material der Entwässerungsrohre:*			
Sind Schächte vorhanden? Ja / Nein			
Ist der Aufbau des Baugrundes bekannt? Ja / Nein			
Existieren chem. Wasseranalysen? Ja / Nein			
Ist der Wasseranfall bekannt? Ja / Nein gross klein schwankend			
Wird die Leitung periodisch unterhalten? Ja / Nein gross klein schwankend			

Amt und Adresse:

Sachbearbeiter:

Tel.:

* PVCL = gelochtes PVC-Rohr
PVCS = geschlitztes PVC-Rohr
HPEL = gelochtes HPE-Rohr
HPEs = geschlitztes HPE-Rohr
BR = Betonsickerrohr
FR = Filterrohr (Filterbetonrohr)

Objekt: VSS-Forschungsauftrag 16/90: "Versinterung"

Übersicht über die Umfrage-Rückmeldungen: Objektübersicht

Nr.	Objekt (Bauherr)	Kt.	Baujahr	Länge [m]	Rohrtyp	Ø [mm]	Schächte Ø [mm]	Baugrund	Chem. Analysen	Wasseranfall	Unterhalt	Beurteilung Reihenfolge des Interesse	Sachbearbeiter Tel.	Geol. Bericht
1	K 341; Leutwil-Boniswil	AG	1962	370	BR	300	ja	Duft ?	nein	schwankend	Spülen		S.Holliger	
	(Kanton)										Bohren		064/21'28'92	
2	K 249; Beinwil-Kt.Grenze	AG	1970	148	BR	300	ja	Lehm, Moräne	nein	schwankend	Spülen		S.Holliger	v.M. 2341
	(Kanton)							Süsswasser Molasse			Bohren		064/21'28'92	
3	Keines	ZG	heute keine Probleme mehr!										H.Sieber	
													042/41'10'451	
4	Milchbuck-Tunnel; Zürich	ZH	1985	1'800	PVCL ?	150 +	ja	bekannt	nein	rel. gross	3xjährlich Spülen	3	Chr.Krismer	F387
	(Kanton)					200					Fernsehen		01/830'67'90	
5	N1/N2:Felssicherung Born	SO	?	?	?	?	?	?	?	?	?		D.Fux	Geotest
	(Kanton)												065/21'25'32	
6	Oberer Hauenstein Tunnel	SO/BL	1857	2'495	SBR	300 +	ja	ja (geol. Profile)	ja	schwankend	Spülen +	1	K.Isler	
	SBB II		S. 1977			400					Mechanisch		041/21'38'76	
7	Hauenstein Basistunnel	SO/BL	1915	8'135	PVC +	?	ja	ja (geol. Profile)	ja	gross	Spülen +	1	K.Isler	
	SBB II		S. 1986	vorfabr. Elemente							Mechanisch		041/21'38'76	
8	Belchentunnel	BL	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2	C.Scholer	
	(Kanton)												061/925'54'84	
9	Arisdorftunnel	BL	?	?	?	?	?	?	?	?	?		C.Scholer	
	(Kanton)												061/925'54'84	
10	Tramtunnel Schwammendingen	ZH	1978	1'015	160	HPEL	ja	ja	?	schwankend	Spülen		H.Wespi	
	(Tiefbauamt: Stadt Zürich)												01/216'23'86	
11	RW-Kanal Emil-Klötistr. Zürich	ZH	1960	400	250	SBR	ja	ja	nein	schwankend	Spülen +		K.Bader	
	(Stadtentwässerung Zürich)										Fernsehen		01/435'52'80	
12	Bach- und RW-Kanal, Höngg	ZH	1989	500	200	Pe-h?	ja	ja	nein	schwankend	Spülen +		K.Bader	
	(Stadtentwässerung Zürich)										Fernsehen		01/435'52'80	
13	N1, Stephanshorn-Tunnel	SG	1983 ?	1'200	120 +	HPE	ja	ja	?	unbekannt	Spülen		E.Buchs	Ber.3373
	Sickerleitungen (Kanton)				150								071/21'30'46	
14	N1, Stephanshorn-Tunnel	SG	1980		4.5"	PVCS	ja	ja	nein		Spülen +		E.Buchs	Ber.3373
	Tiefenentwässerung (Kanton)										Fernsehen		071/21'30'46	

5060/Objektliste, 26.1.1996
Dr.von Moos AG, Zürich

Auftrag Nr. 5060
Anhang A2.1

Objekt: VSS-Forschungsauftrag 16/90: "Versinterung"

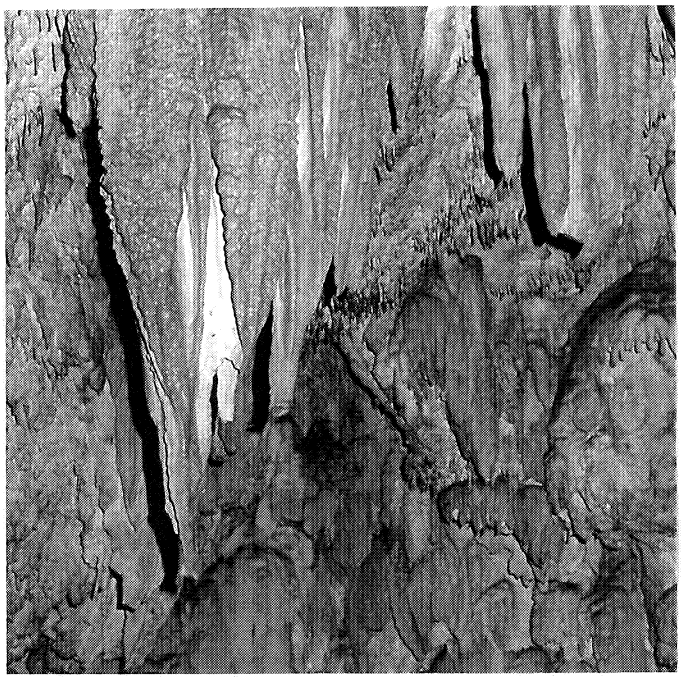
Übersicht über die Umfrage-Rückmeldungen: Objektübersicht

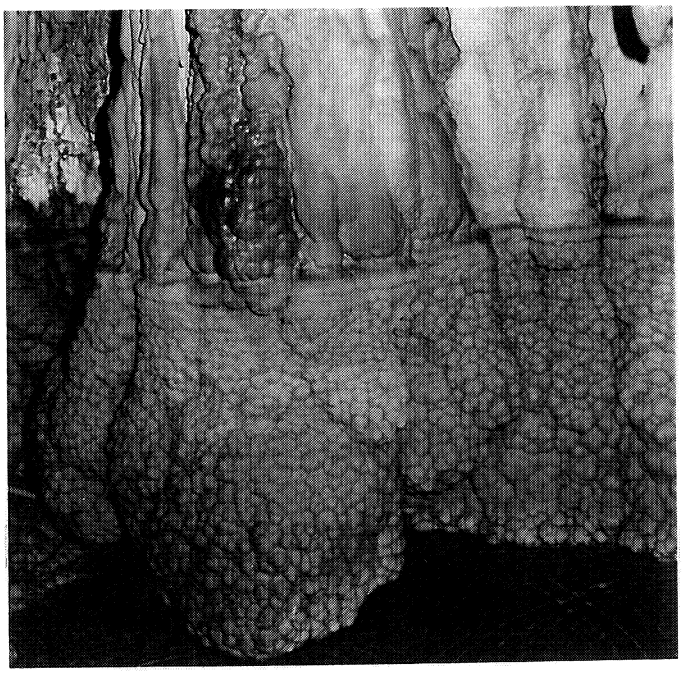
Nr.	Objekt (Bauherr)	Kt.	Baujahr	Länge [m]	Rohrtyp	Ø [mm]	Schächte Ø [mm]	Baugrund	Chem. Analysen	Wasseranfall	Unterhalt	Beurteilung Reihenfolge des Interesse	Sachbearbeiter Tel.	Geol. Bericht
15	N1, Pfahlwand Dietli Süd	SG	1981/84	280	150	HPE	ja	ja	nein?	ja/schwankend	Spülen		U.Kost	Ber.3981
	(Kanton)												071/21'30'39	
16	N1, Stützmauer Dietli Süd	SG	1977	240	80	PVCS?	nein	ja	nein?	nein	Spülen		U.Kost	Ber.3981
	(Kanton)												071/21'30'39	
17	kein geeignetes Objekt, aber Probleme													
	(Stadt Winterthur)	ZH												
18	kein geeignetes Objekt, wenig Probleme													
	(Kanton Thurgau)	TG												
19	Melioration/ Drainage	SH	1944-55	x km	Zement	> 200	ja	ja	nein	schwankend	nein		Hr.Matzinger	
	(Kanton/ Gde. Oberhallau)												053/82'73'90	
20	N13:Tunnel Isla Bella	GR	1976-83	2'449	PVCL +	7750	ja	Gehängeschutt, Fels	ja	10÷15 l/sec	2xjährlich	5	F.Isepponi	
	(Kanton/Gde. Rothenbrunnen)				Rigole	1150		Schotter u. Moräne					081/21'37'91	
21	SBB Zeihen (Brugg-Säckingen)	AG	1988	400	HPEL	250	ja	ja	nein	ja/schwankend	Spülen	4	F.Zobrist	
	(SBB, Kreis III,Sekt. Bahndienst 1)												056/41'98'88	
22	SBB Umiken bei Brugg	AG	?	200	?	250	ja	nein	nein	nein	Spülen	4	F.Zobrist	
	(SBB, Kreis III,Sekt. Bahndienst 1)												056/41'98'88	
23	SBB Zeihen-Hornussen	AG	1991	600	HPEL	200/250	ja	ja	nein	nein	projektiert	4	F.Zobrist	
	(SBB, Kreis III,Sekt. Bahndienst 1)												056/41'98'88	

Auftrag Nr. 5060
Anhang A2.2

5060/Objektliste, 26.1.1996
Dr.von Moos AG, Zürich

Abb. 1 Höllgrotte Baar Versinterungen vom 4.9. 94
typische Formen links über und rechts unter Wasser auskristallisiert





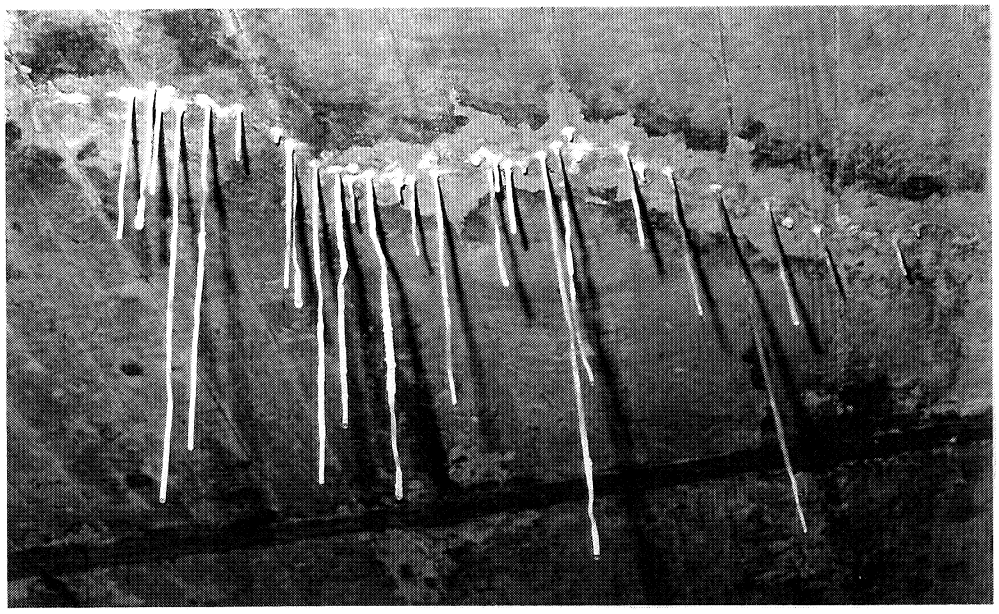


Abb. 2

Versinterungen mit Stalaktiten
an einer Betondecke (Flachdach)

Abb. 3 vom 11.11.93

Objekt 2:

Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 4

Sicht rohraufwärts mit Versinterungen in der Sohle

Abb. 4

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Leitung zwischen den Schächten A1 + A2

Kanalfernsehaufnahme vor dem Spülen

Abb. 5

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

PVC-Leitung (Rehau-Rohr) zwischen den Schächten A1 + A2

Kanalfernsehaufnahme nach dem Spülen

Abb. 6

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Sickerleitung (Betonrohr) zwischen den Schächten 411.57 + 414.76

Kanalfernsehaufnahme vor dem Spülen

Abb. 7

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Sickerleitung (Betonrohr) zwischen den Schächten 411.57 + 414.76

Kanalfernsehaufnahme nach dem Spülen

Abb. 8

N1 Anschluss Neuenhof: Tiefenentwässerung;

Standrohr aus Stahl mit Überlauf und zuckerförmigen Versinterungen

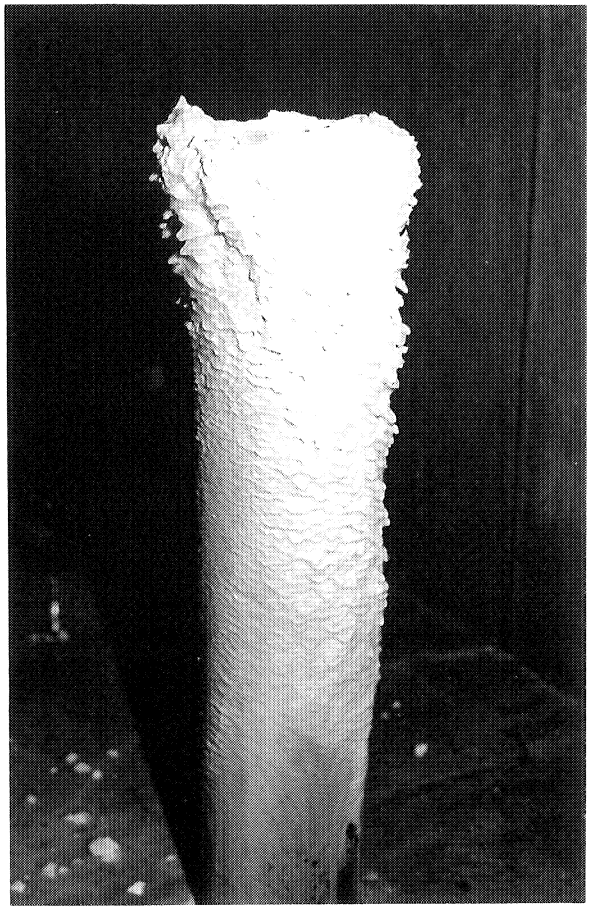
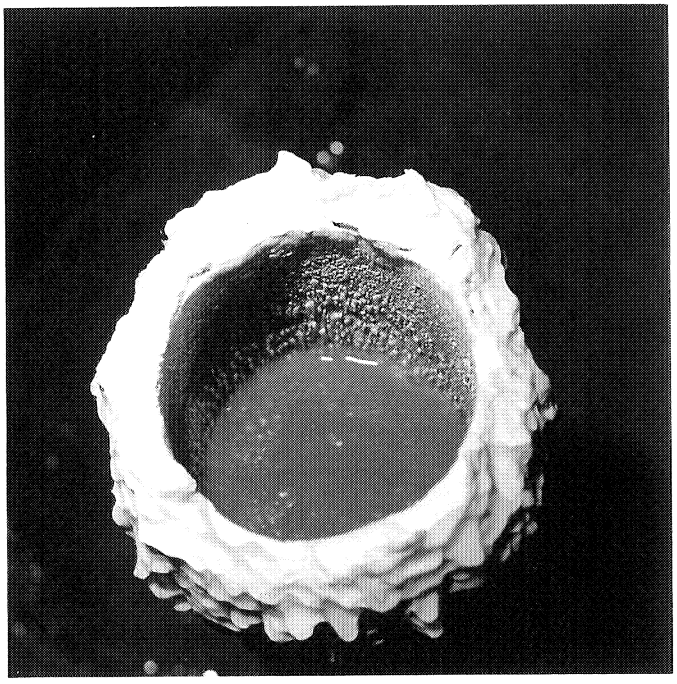


Abb. 9 Objekt 1: N1 Anschluss Neuenhof:

Tiefenentwässerung; Standrohrr aus Stahl mit Überlauf und zuckerförmigen Versinterungen

Sicht von oben ins Rohr nach der Probenahme



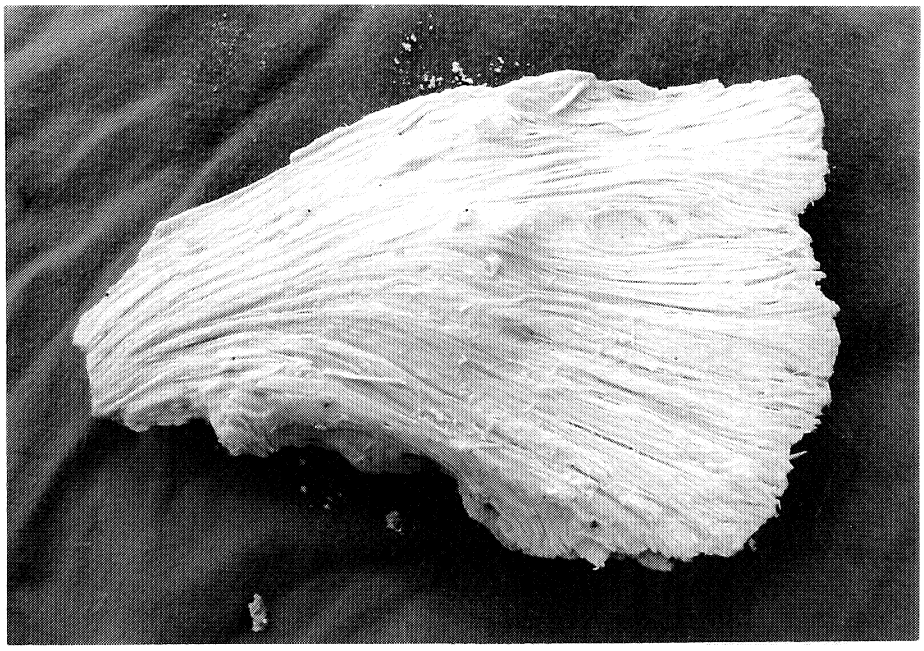


Abb. 10 vom 28.10.90

Objekt 3

N8 Umfahrung Sachseln

"Fadenförmige" Struktur an der überströmten Oberfläche der Versinterungen im Auslauf der Entwässerungsrinne (zuckartige, brüchige Struktur)

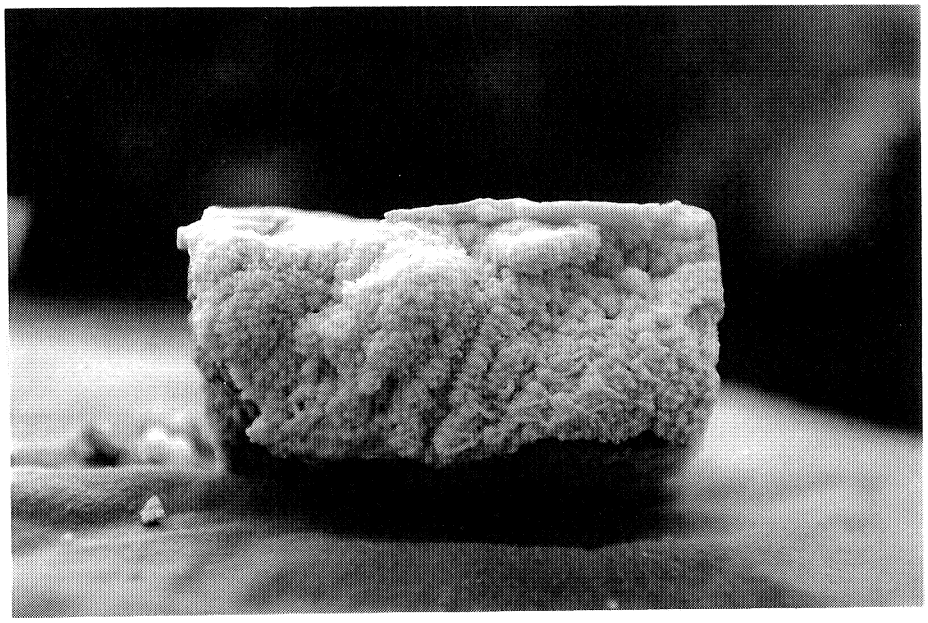


Abb. 11 vom 28.10.94

Objekt 3

N8 Umfahrung Sachseln

"Blumenkohlförmige" Struktur im senkrechten Bereich (an der Stirnseite des "Wasserfalls") der Versinterungen im Auslauf der Entwässerungsrinne (zuckartige, brüchige Struktur)

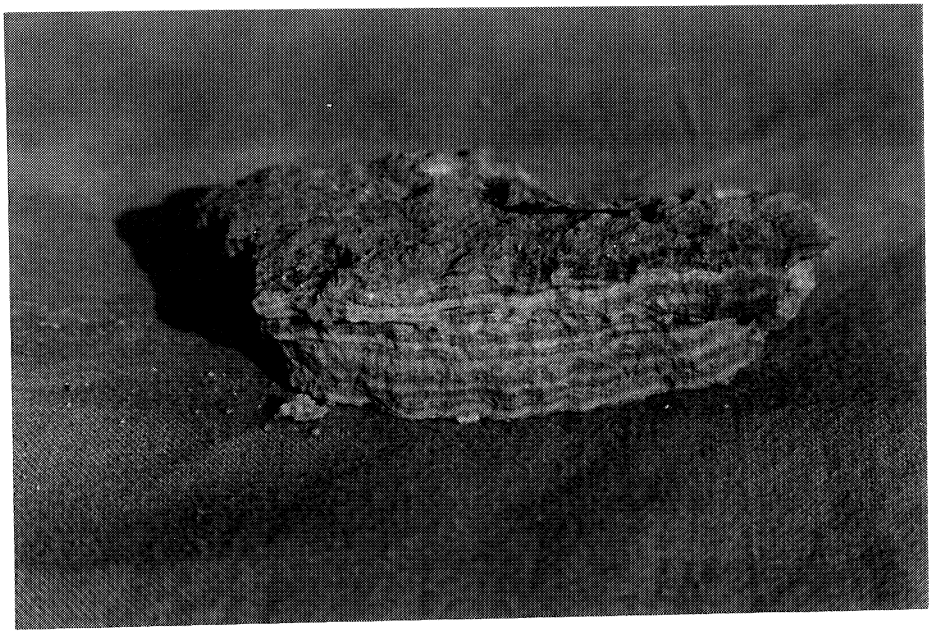


Abb. 12 vom 23.6.94

Objekt 2:
Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 9

Schichtweiser Aufbau von harten Versinterungen in der Rohrsohle

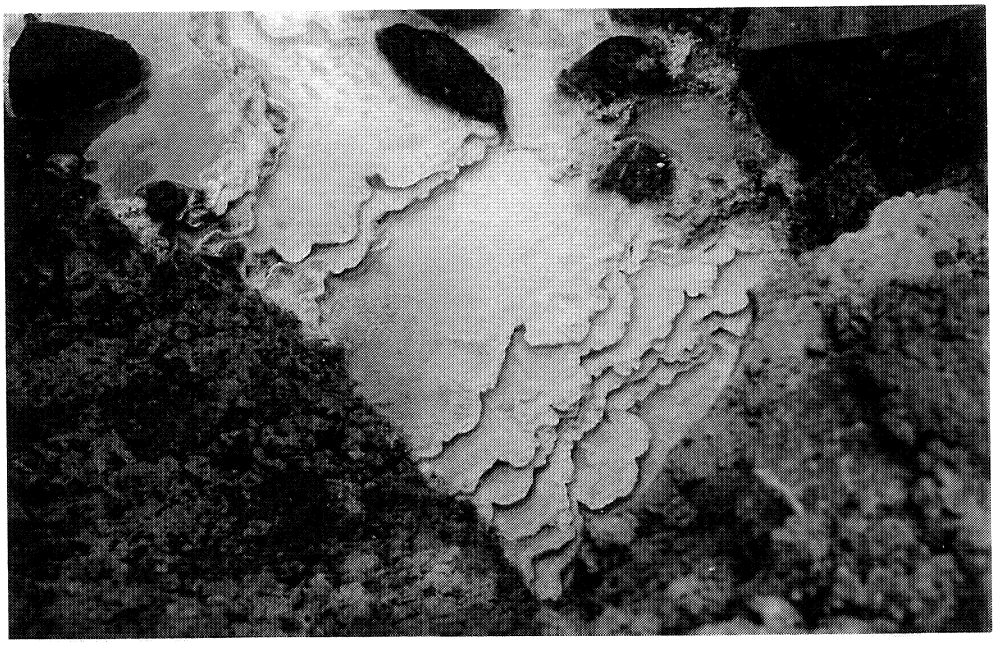


Abb. 13 vom 28.10.90

Objekt 3

N8 Umfahrung Sachseln

Terrassenförmige Versinterungen im Auslauf der Entwässerungsrinne (zuckartige, brüchige Struktur)

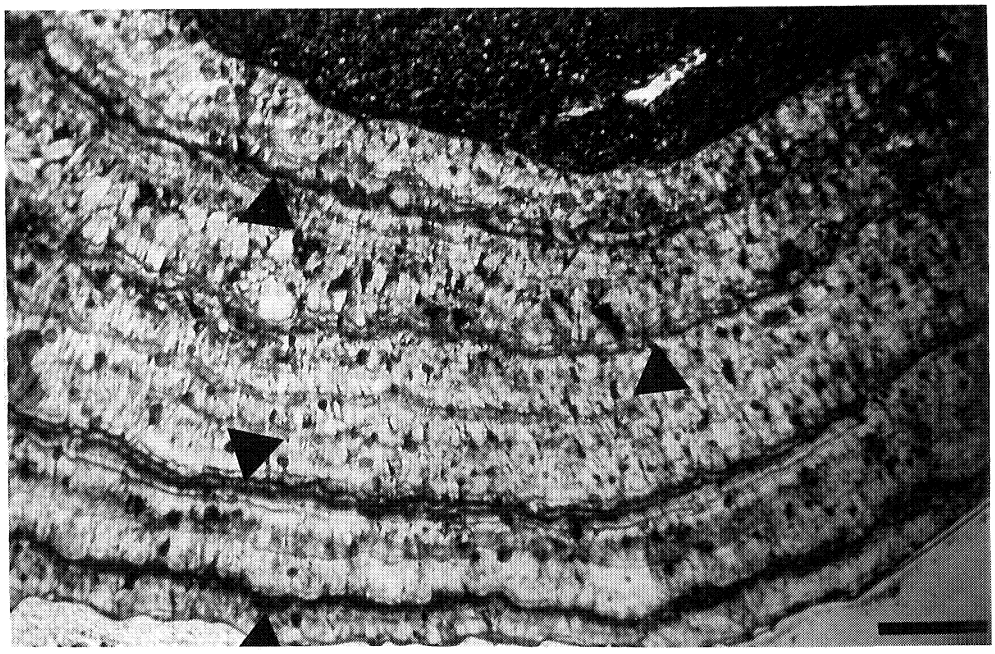


Abb. 14

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Schacht A1
(gleiche Probe wie Abb. 15)

Dünnschliffaufnahme mit einfach polarisiertem Licht
Massstab: ca.14 mm = 1'000 µm

Übergang zwischen karbonatischem Siltstein und laminiertem Sinter.
Bei den dünneren braunen Laminae handelt es sich um braunen Mikrit (Pfeile)

Abb. 15

Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Schacht A1

Dünnschliffaufnahme mit einfach polarisiertem Licht
Massstab: ca.14 mm = 50 µm

Detail aus karbonatischem Siltstein mit detritischen Komponenten:
1 = Dolomit
2 = Quarz
3 = Glimmer

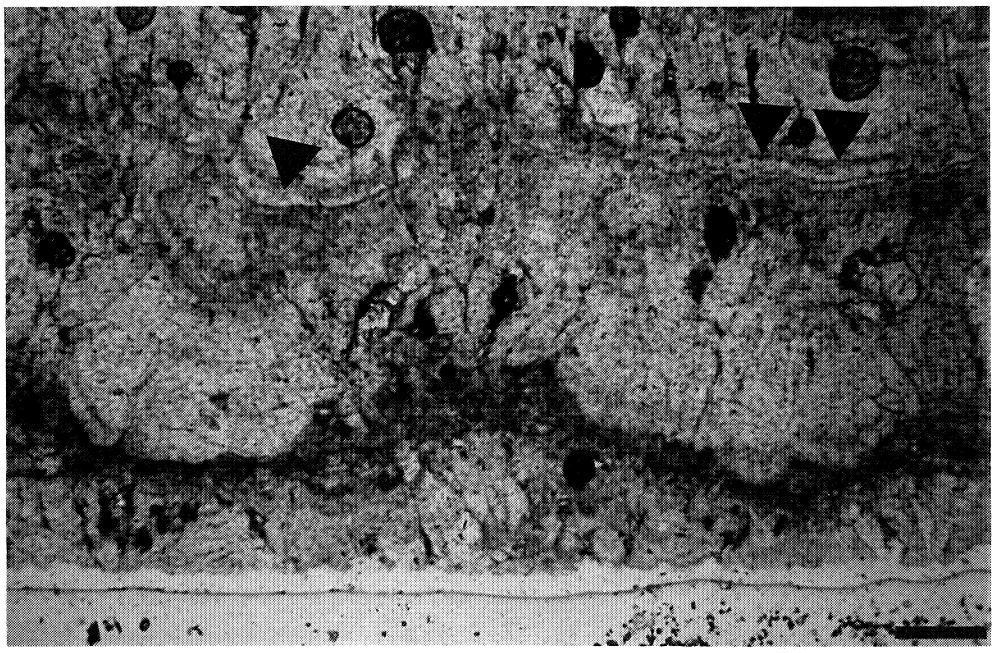


Abb. 16
Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Oberflächenentwässerung

Schacht A1
(vgl. Abb. 14 + 15)

Dünnschliffaufnahme mit einfach polarisiertem Licht
Massstab: ca.12 mm = 50 µm

Detail aus karbonatischem Siltstein mit braunen mikritischem Laminae und grossen glasklaren Calcitkristallen. Bei nur geringer Zunahme der Braunfärbung wurde das Wachstum zwar behindert, setzte jedoch nicht aus (Pfeile).

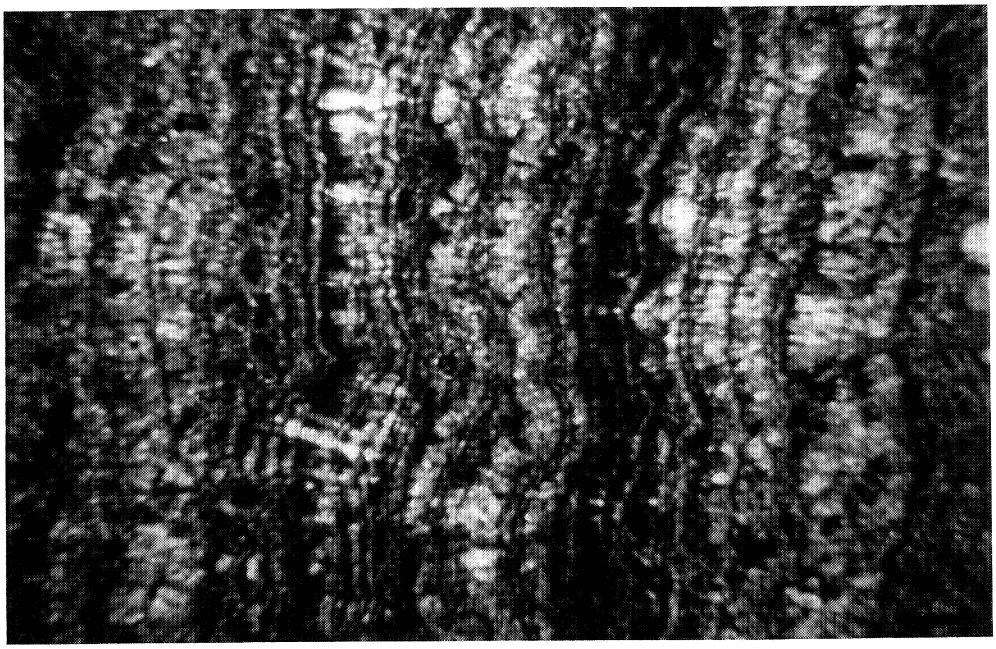


Abb. 17
Objekt 2:
Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 9
(gleiche Probe wie Abb. 18)

Dünnschliffaufnahme mit einfach polarisiertem Licht;
Wachstum horizontal von rechts nach links; deutlich sind die Schichten, welche auf ein kontinuierliches Wachstum unter verschiedenen Bedingungen hinweisen (z.B. unterschiedlich starke Einlagerung von Huminstoffen)

Massstab: 12 mm = 500 µm

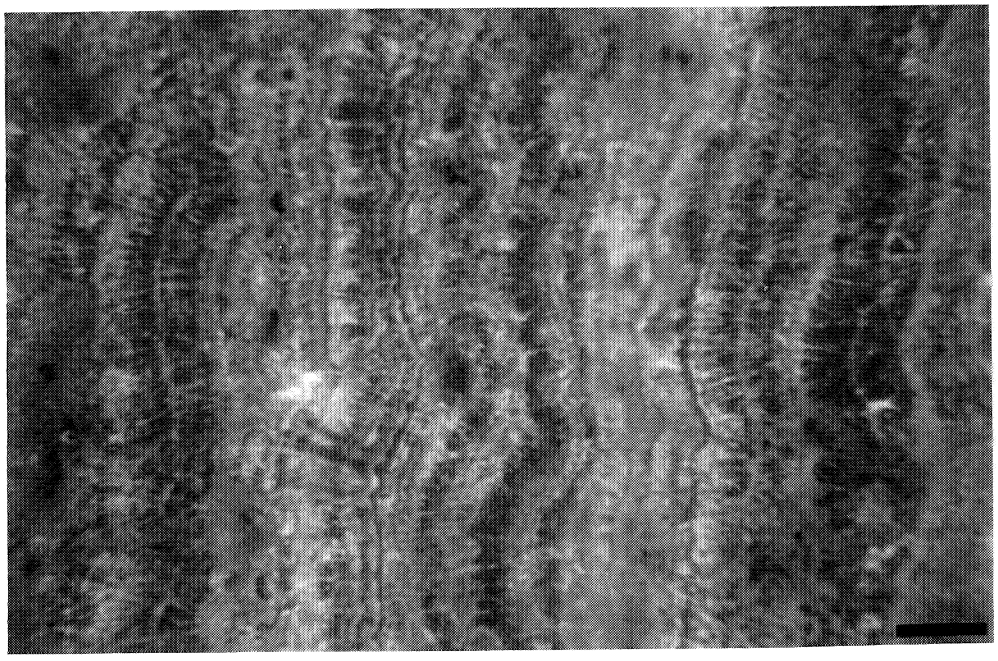


Abb. 18 Objekt 2:

Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 9 (vgl. Abb. 17)

Dünnschliffaufnahme mit Fluoreszenz
Wachstum Horizontal von rechts nach links

Massstab: 12 mm = 500 µm

Die erkennbaren gelbgrünen Schichten (Fluoreszenz) dürfte in Analogie zu Höhlenkarbonaten auf den Einschluss von Huminstoffen aus dem Boden während der Kristallisation von Calcit zurückzuführen sein.

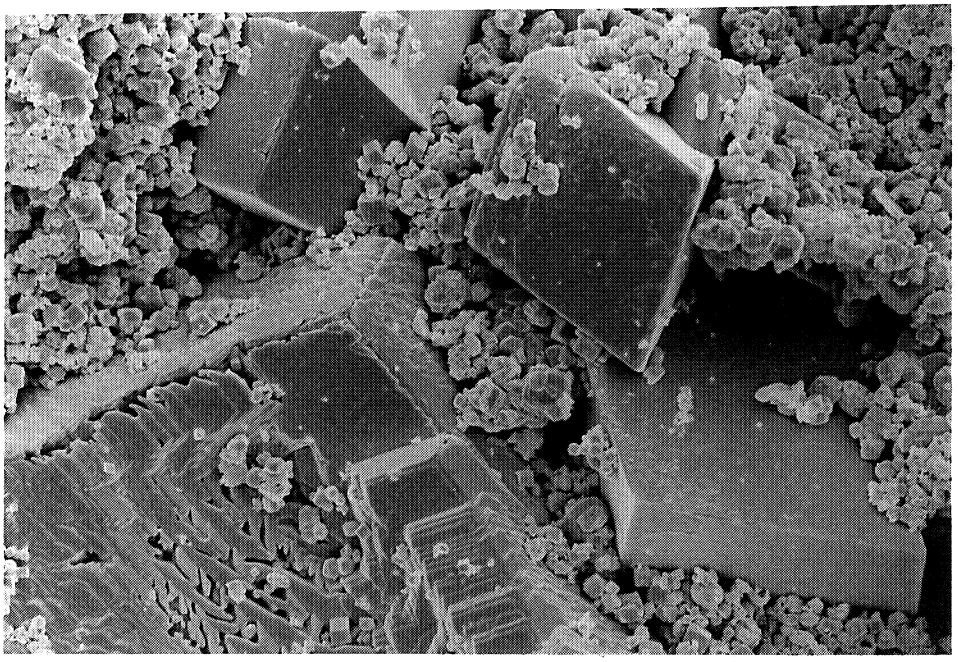


Abb. 19

Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop

Objekt Objekt 1:
N1 Anschluss Neuenhof
Tiefenentwässerung

Schacht III (Senkbrunnen)
(Probe von der zuckerförmigen Versinterung am Standrohr: vgl. Abb. 8 + 9)

Die ca. 1200-fache Vergrösserung zeigt neben feinem mikritischen Partien grosse, idiomorphe rhomboedrische Calcitkristalle. Der grösste, nicht vollständig abgebildete Calcitkristall weist an den Kanten Lösungserscheinungen auf.

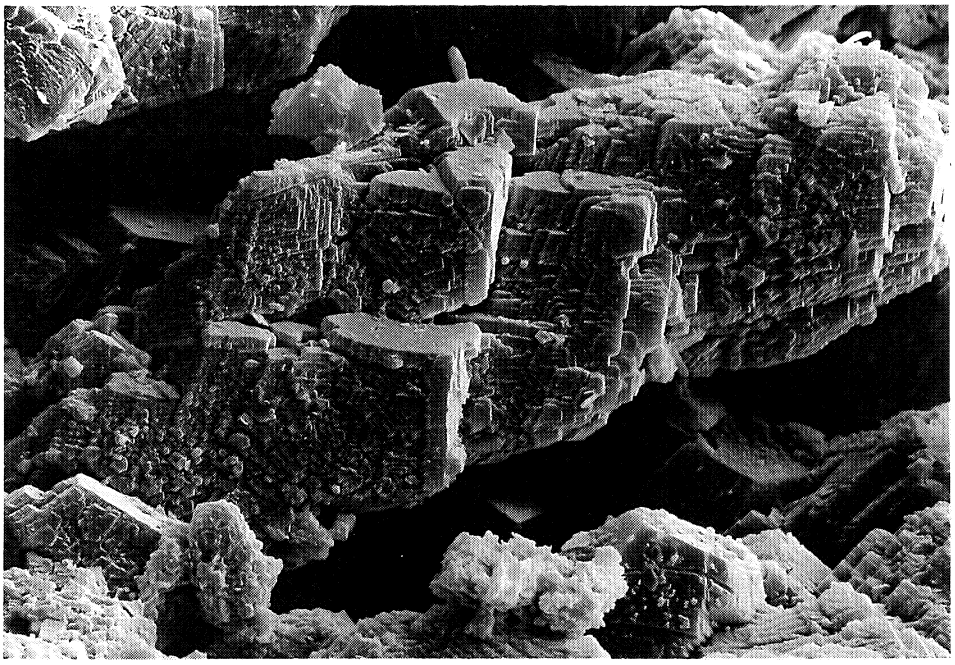


Abb. 20

Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop

Objekt 2:
Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 9
(gleiche Probe wie Abb. 17 + 18)

Der gezeigte Calcitkristall ist 833-fach vergrössert, glasklar und weist eine blockige Oberflächenstruktur auf.

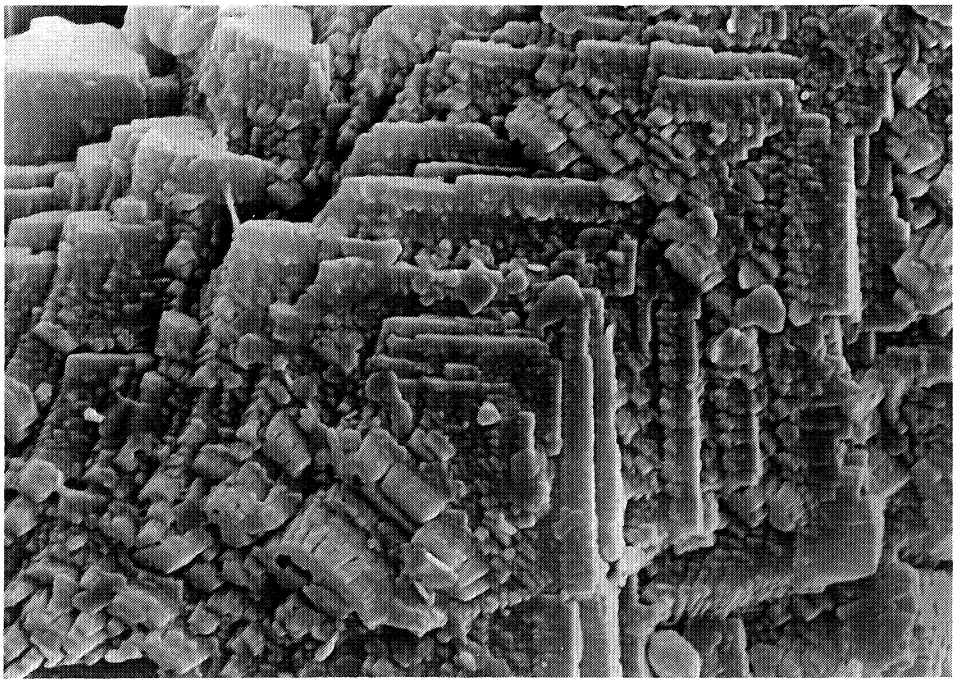


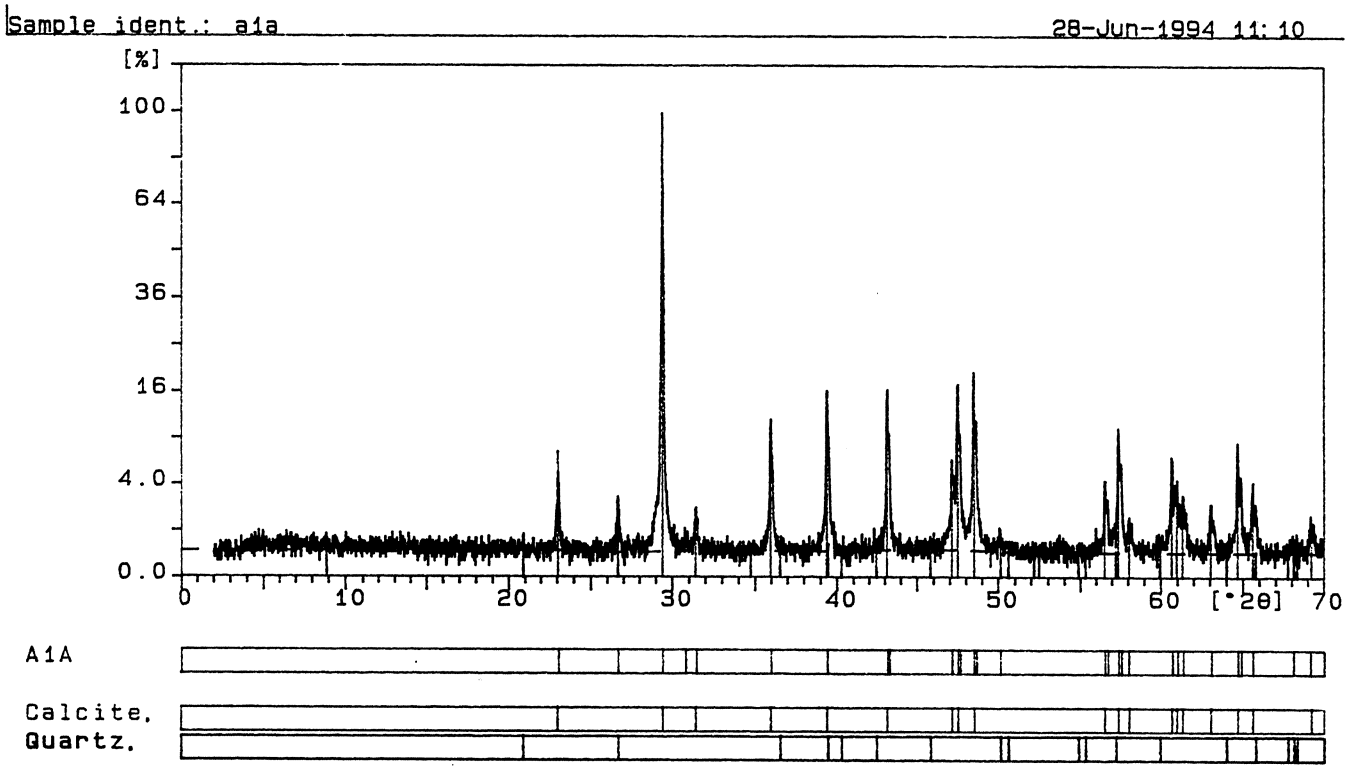
Abb. 21

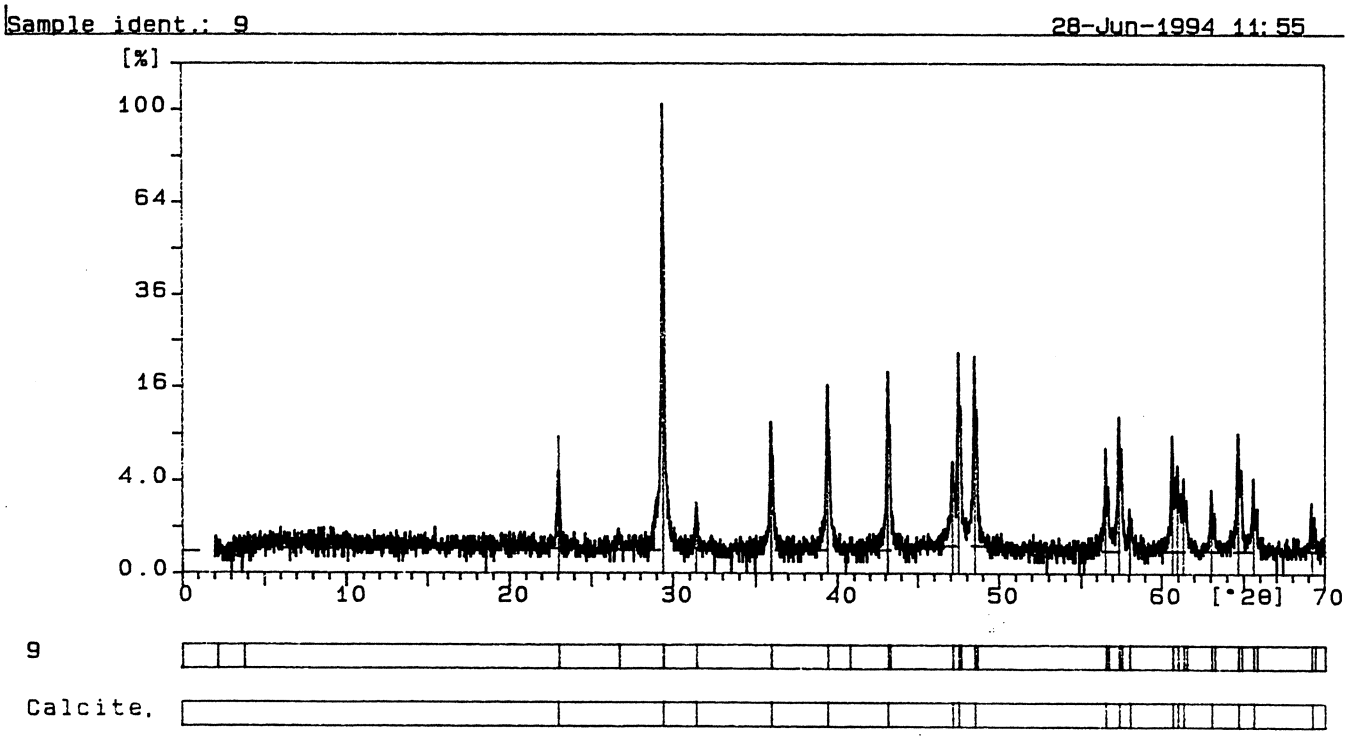
Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop

Objekt 2:
Entwässerungsleitung
Boniswil - Leutwil

Schacht 9
(gleiche Probe wie Abb. 17 + 18)

Gleiches Material wie Abb. 20: Der gezeigte Oberfläche des glasklaren Calcitkristalls ist ca. 4666-fach vergrössert. Es sind treppenartige Wachstumszonen zu erkennen.





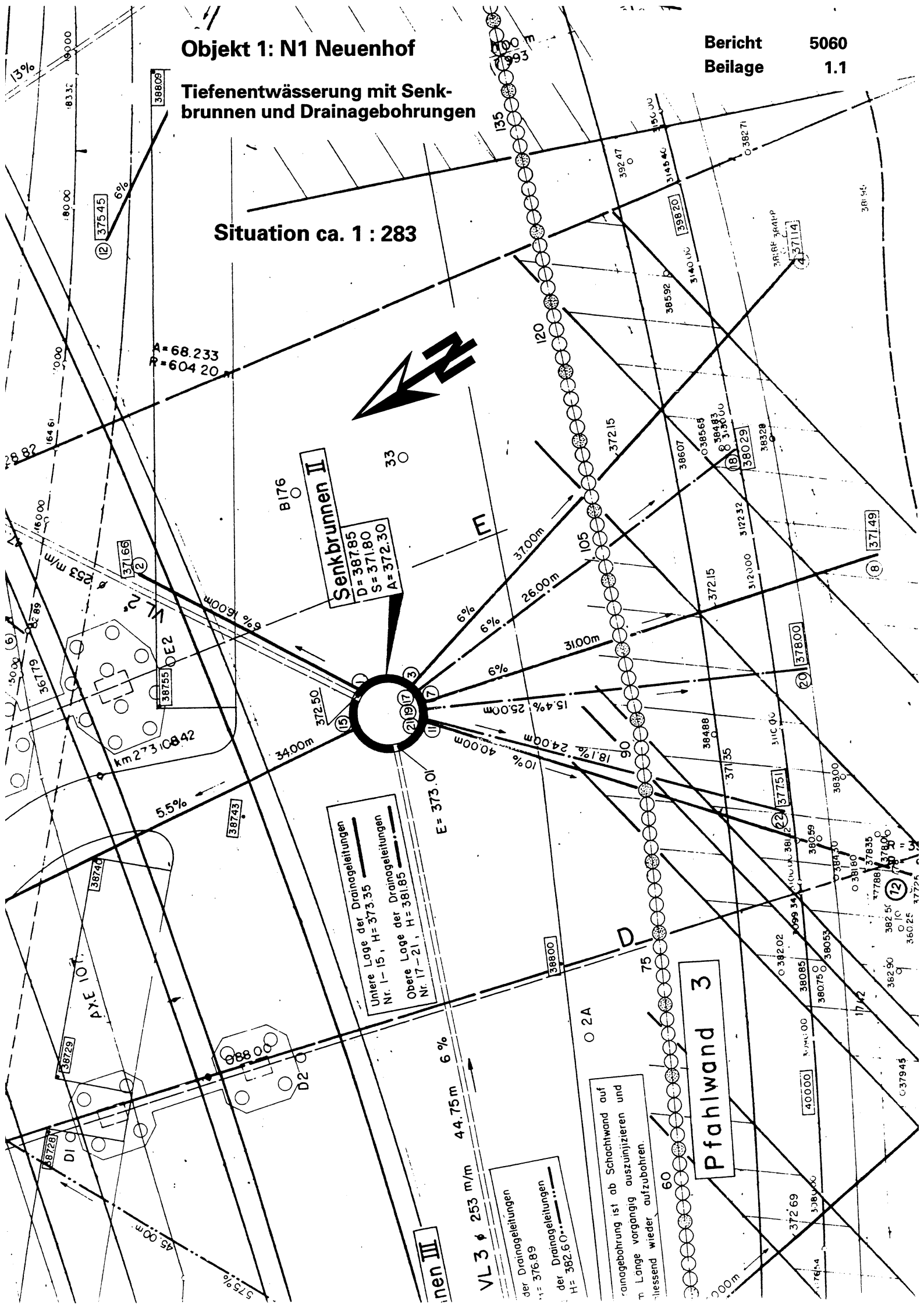
Figur 2: Röntgendiffraktogramm der Probe 9

Objekt 1: N1 Neuenhof

Bericht 5060
Beilage 1.1

Tiefenentwässerung mit Senkbrunnen und Drainagebohrungen

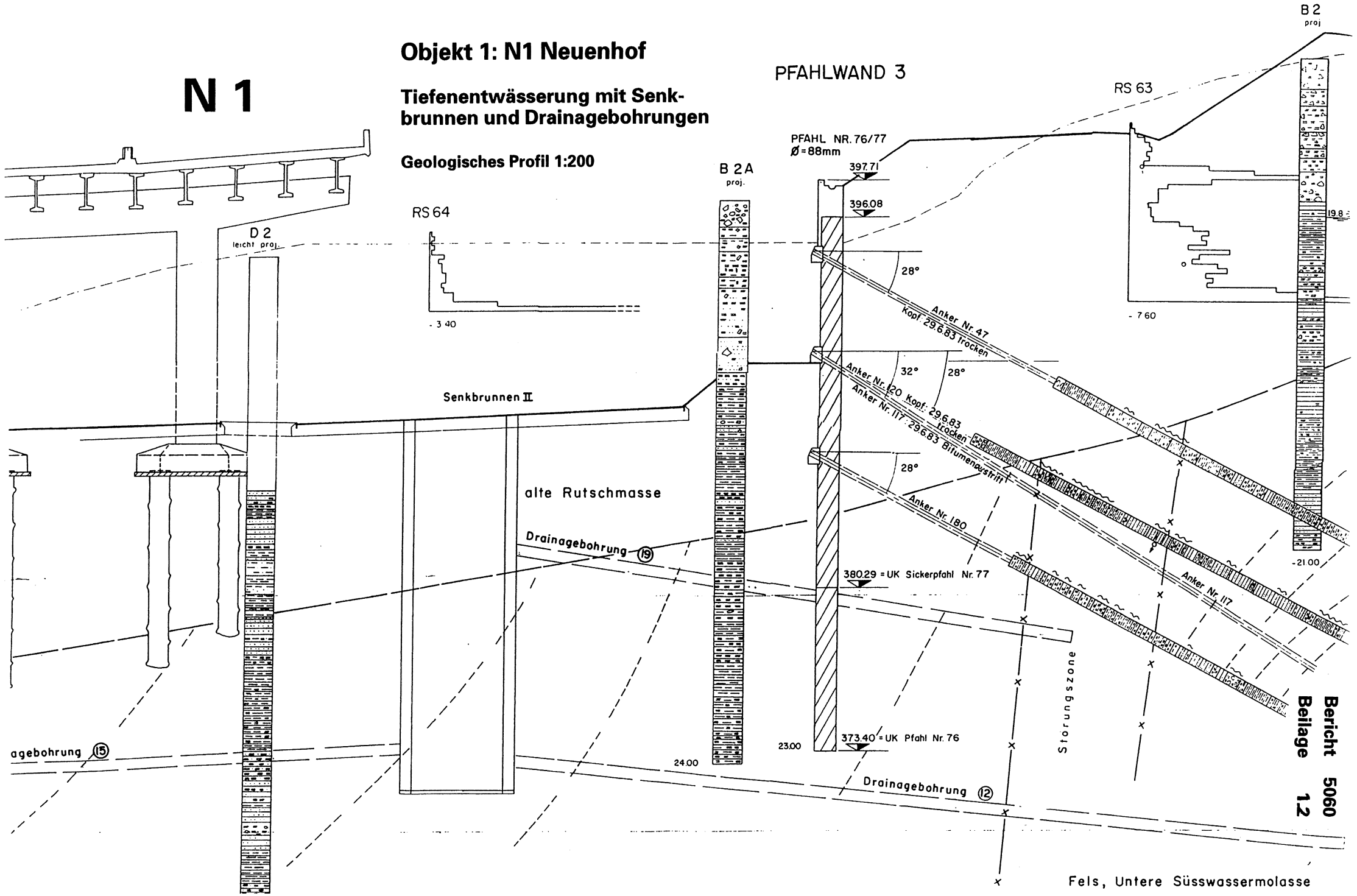
Situation ca. 1 : 283



Objekt 1: N1 Neuenhof

Tiefenentwässerung mit Senkbrunnen und Drainagebohrungen

Geologisches Profil 1:200



Bericht 5060
Beilage 1.2