



SYMPOSIUM  
SYMPOZIUM

„Kalk in Denkmalpflege und Neubau: Ein altes  
Material neu entdeckt“

„Vápno v památkové péči a nové výstavbě:  
Znovuobjevený starý materiál“

04.10.2023

---

Geschichtspark Bärnau-Tachov | *Historický park Bärnau-Tachov*

KOMPENDIUM ZU DEN VORTRÄGEN  
*SBORNÍK PREZENTACÍ*

Beiträge von | *Příspěvky od*

Dipl. Ing. Peter Kummermehr | Msc. ETH Arch. Delphine Schmid &  
Johannes Wetzel | Jan Válek Ph.D. | Dr. Wanja Wedekind

# INHALT | OBSAH

<b>Farberden &amp; Kalk – eine von vielen schönen Möglichkeiten   <i>Barevné pudy a vápno – jedna z mnoha pěkných možností</i></b> <i>Peter Kummermehr</i> Dipl. Ing., Steinmetz, Steinbildhauer und Architekt	1-24
<b>Kalkbrennen mit Dolomitgestein – Erfahrungsberichte zur Herstellung und Anwendung von lokalen Kalkprodukten im Engadin   <i>Pálení vápna s dolomitovou horninou – informace a zkušenosti s výrobou a použitím místních vápenných produktů v Engadinu</i></b> <i>Johannes Wetzel &amp; Delphine Schmid</i> Sgraffitokünstler, Kalkhandwerker & Architektin MSc. ETH Arch.	25-55
<b>Blick auf historische Kalktechniken und ein Beispiel für die Nutzung von Wissen zur Rekonstruktion des Sgraffito   <i>Pohled na historické vápenné technologie a příklad využití znalostí pro rekonstrukci sgrafita</i></b> <i>Jan Válek</i> Ing., Ph.D. am Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik an der Akademie der Wissenschaften der Tschechischen Republik, Abteilung für angewandte Wissenschaften, Fachbereich Kalktechnologien	56-115
<b>Heiß und basisch - Kulturleistung und Potential der Heißkalktechnologie zur Herstellung von hydraulischen Bau- und Werkstoffen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft   <i>Horké a zásadité - kulturní výkonnost a potenciál horké vápenné technologie k výrobě hydraulických stavebních hmot a materiálů v minulosti, současnosti a budoucnosti</i></b> <i>Wanja Wedekind</i> Dr., Stuckateur, Dipl. Restaurator und Lehmbauer	116-131

Herausgegeben im August 2024 in Bärnau i. d. Oberpfalz durch

Via Carolina – Goldene Straße e.V.  
Naaber Straße 5b  
95671 Bärnau



# Peter Kummermehr

**scape**

*natürlich schön bauen*

**Reallabor zur Weiterentwicklung, handwerklichen Herstellung  
und handwerklichen Verarbeitung von natürlichen und  
wiederverwendeten Baumaterialien.**

- **Sumpfkalk aus elektrisch gebranntem Kalkstein**
- **Farberden aus Ton**
- **Dämmung und Wandbaumaterial aus Hanf**
- **Dämmung und Leichtbau aus Schilf**
- **Dämmung und Putze aus Pflanzenkohle**
- **Putze und Mörtel aus Kalk und natürlichen und rezyklierten Zuschlägen**
- **Konstruktionen aus Schnittholz, Ästen, Ruten und Altholz**
- **Holzfarben aus Leinöl und Farberden**
- **Kalkfarben aus Sumpfkalk und Farberden**
- **Naturstein**
- **rein mineralische Konstruktionen**

# kummermehrarchitektur

**Konzepte zur Umnutzung, Weiternutzung, Ergänzung und neu Inwertsetzung bestehender Bauwerke und Ensembles.**

**Städtebau- und landschaftssensible Planungen als Mehrwert für Mensch in Natur.**

**Entwicklung von Gebäuden in Balance zwischen Lebensdauer, Materialität, Energie und Naturnutzen.**

# die Ziele

**Gesundheit und Wohlbefinden aller Hausbenutzer**

**lange Lebensdauer und reparierbare Konstruktionen**

**aber prinzipiell kompostierbar**

**Kohlenstoffbindung in Gebäuden**

**Schönheit auf der Grundlage von Natürlichkeit und genius loci**

**Reduzierung von technischer Komplexität**

**Vermeidung von negativen Folgen für den Lebensraum Erde**

**eisenberg**  
FARBERDEN



Tontagebau Grube Doris  
zwischen Eisenberg und  
Hettenleidelheim  
in der Pfalz



Tontagebau Grube Doris  
Aufschluss der Tonlager  
mit Eisenberger blaugrün

feingemahlener Ton



Eisenberger blaugrün  
aufgeschlämmt und gestrichen



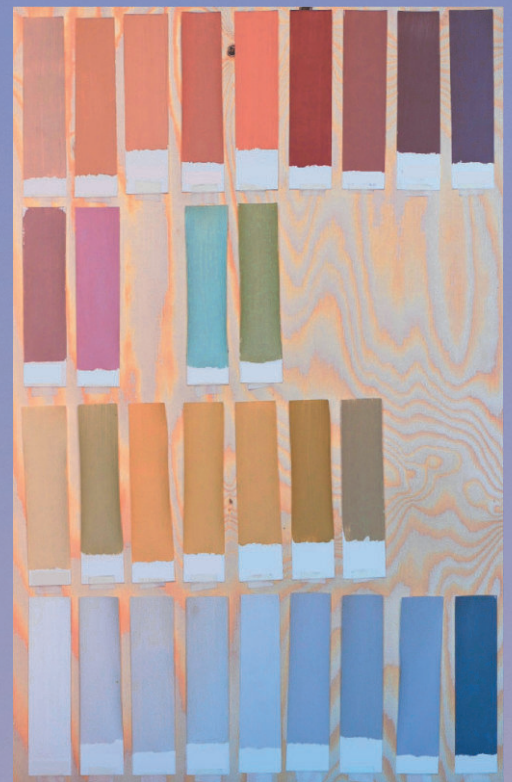


verschiedene Farberden  
auf Basalt gestrichen

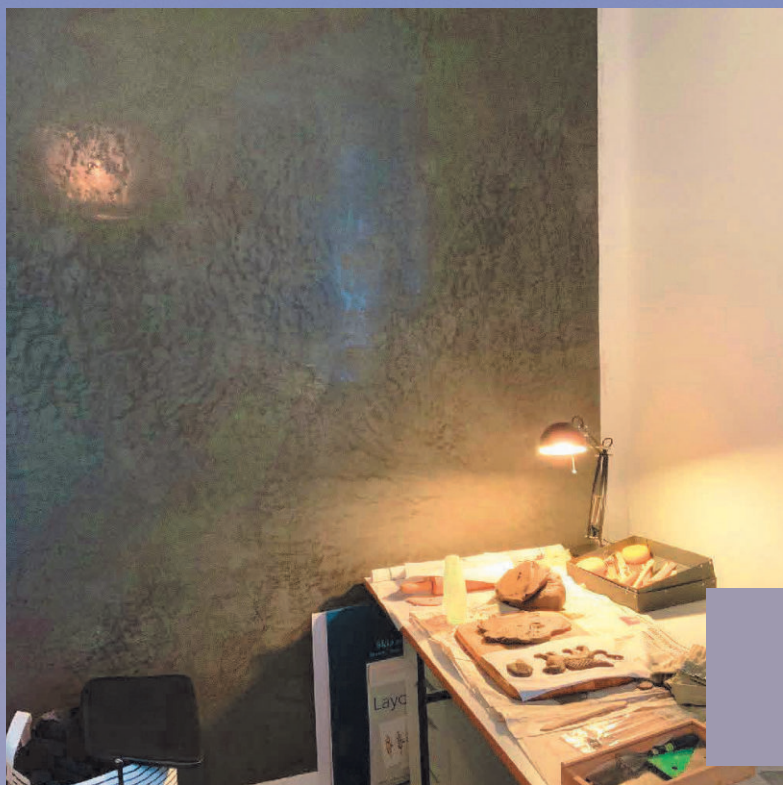


### 29 Farberden

Auf Grund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Metalloxiden, hat jede Farberde spezifische Eigenschaften bezüglich Wasseraufnahme, Trocknungsschwund, Härte etc.







Handwerkskunst  
bringt die besonderen Eigenschaften  
von Farberden erst zur Geltung:  
gerollt, gestrichen, geglättet, poliert



Farberden verführen durch einfach  
natürliche Schönheit, Lebendigkeit  
und tiefgründige Materialität.  
Wie bei allen natürlichen Materialien  
entsteht immer Harmonie.

# skape

natürlich schön haben



Farberde in anthrazit  
gerollt und anschließend mit der  
Venezianerkelle geglättet



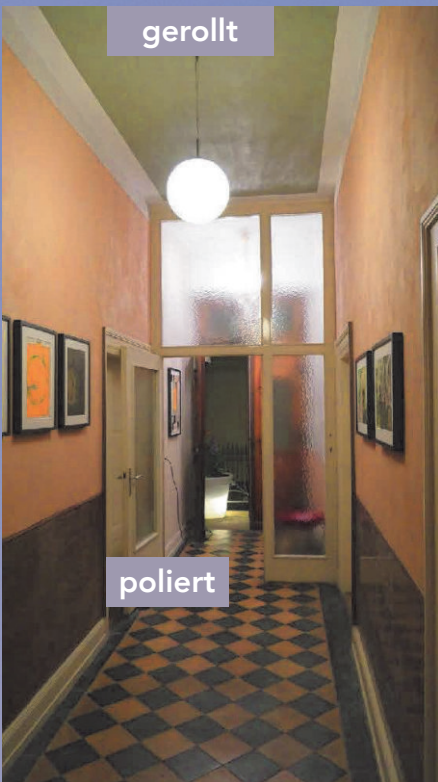
Farberde in eisenberger grün  
gerollt und anschließend mit der  
Venezianerkelle geglättet



Farberde in orange  
gerollt und anschließend mit der  
Venezianerkelle geglättet



Farberde in eisenberger grün  
gerollt und anschließend mit der  
Venezianerkelle geglättet



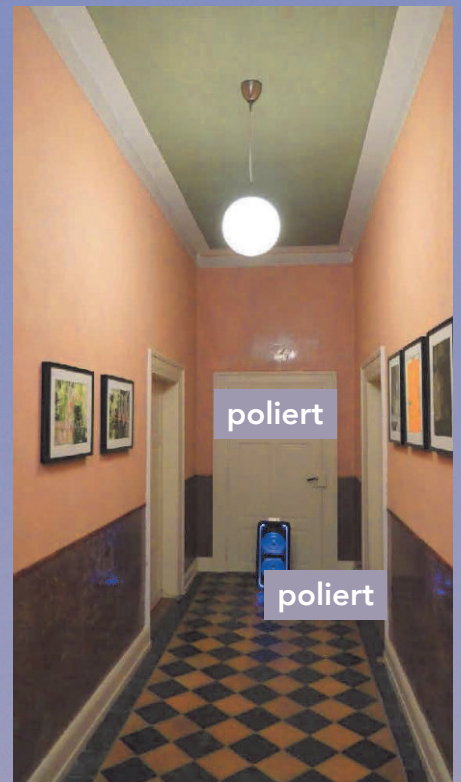
gerollt

poliert



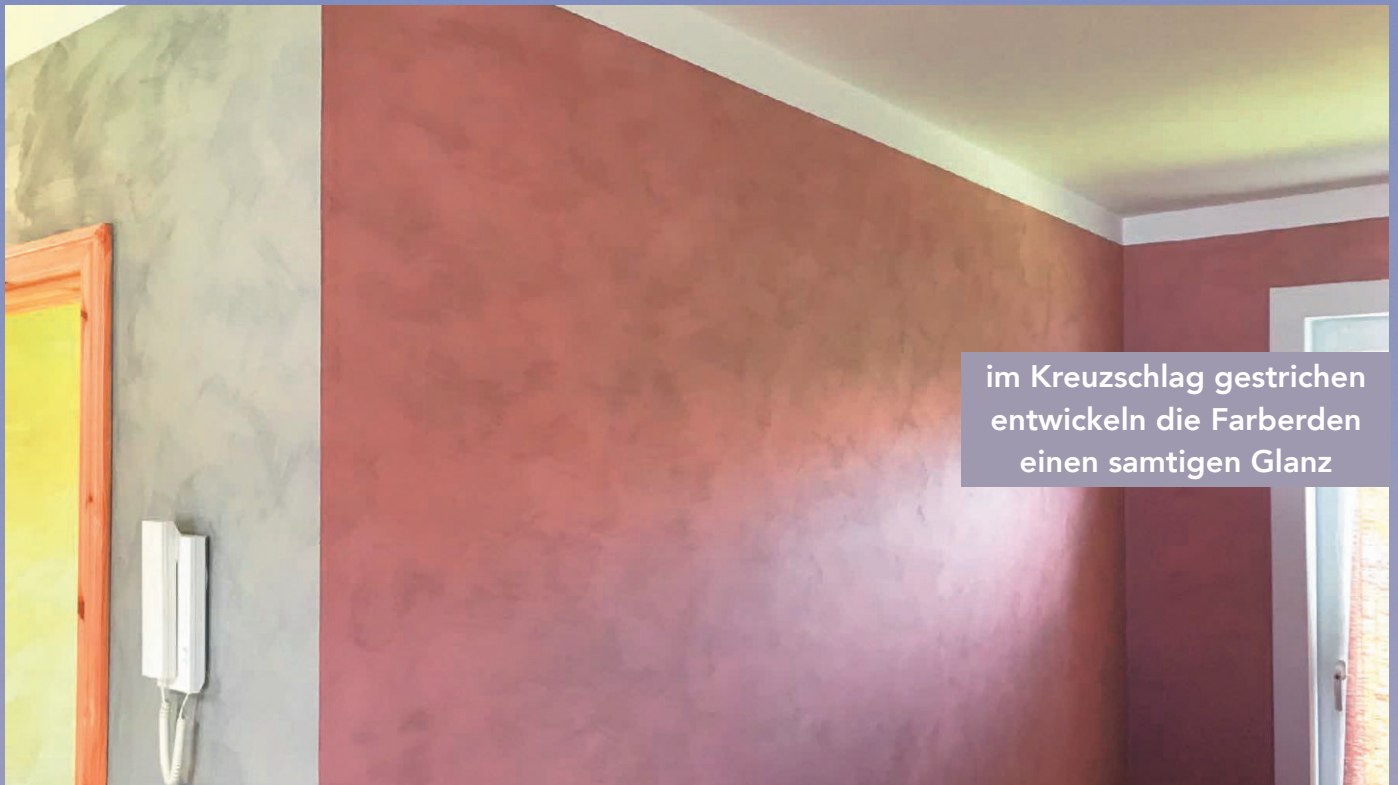
gerollt

poliert

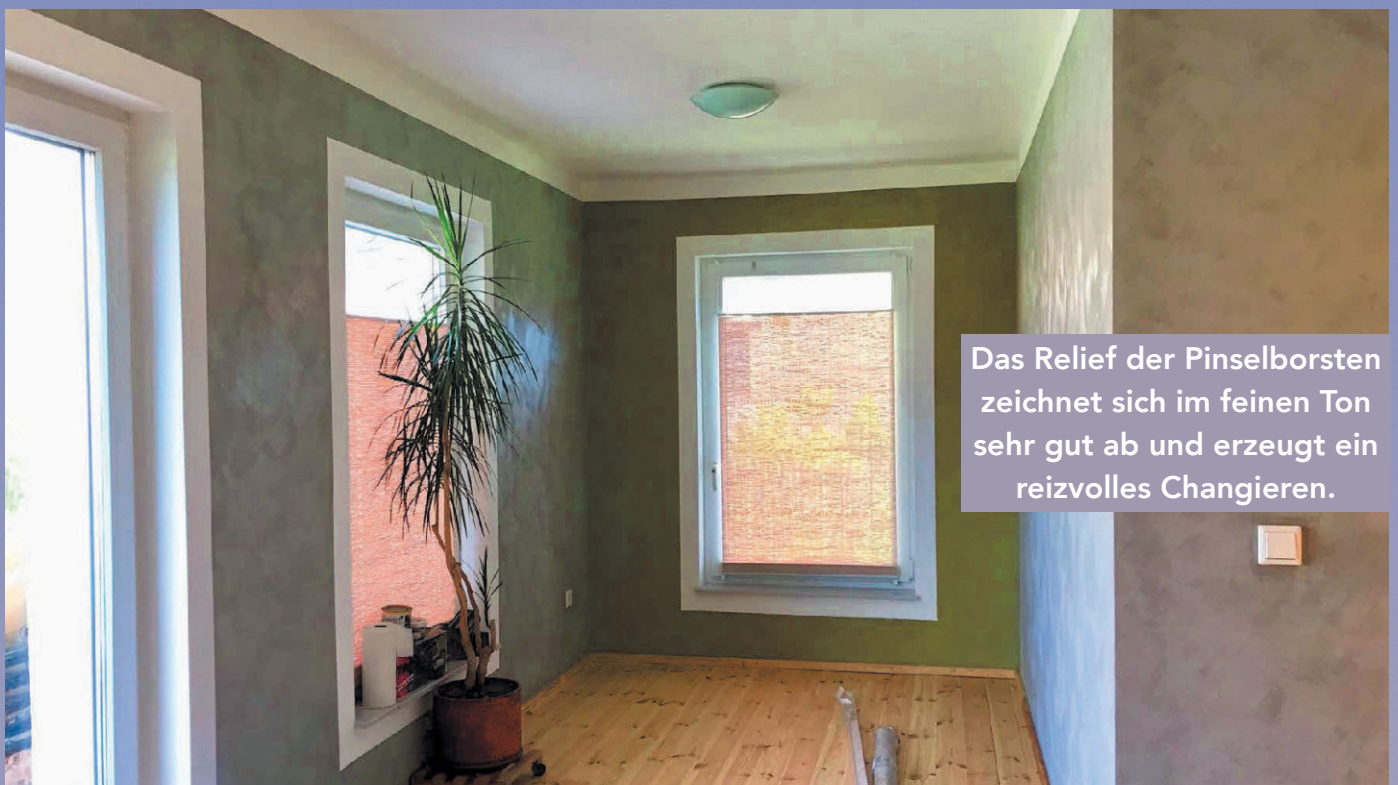


poliert

poliert



im Kreuzschlag gestrichen  
entwickeln die Farberden  
einen samtigen Glanz



Das Relief der Pinselborsten  
zeichnet sich im feinen Ton  
sehr gut ab und erzeugt ein  
reizvolles Changieren.

Farberden lassen sich auch mit reinem Leinöl binden und können damit auch für Anstriche im Außenbereich genutzt werden. Hier wurde mit einem dreilagigen Anstrich eine stark verwitterte Holzschalung aufgewertet und für einige weitere Jahre erhalten.



Solche Anstriche lassen sich mit reinem Leinöl immer wieder auffrischen.

Durch die Bindung mit Kalk lässt sich ein rein mineralischer Anstrich herstellen. Das klingt unspektakulär, ist aber für die Vermeidung von Bioziden in Baustoffen essenziell.



# dachsberg

## KALK



dachsberg KALK  
ist elektrisch gebrannter  
Kalk aus Ackerlessteinen.

Im Bereich des Urmeeres „Mainzer Becken“ das sich in etwa zwischen Mainz, Bad Kreuznach und Neustadt an der Weinstraße erstreckt, sind Kalk, Mergel, Tone und Sande, häufig auch an der Erdoberfläche erscheinende Sedimente.

Die Nutzung zu menschlichen Zwecken ist selbstverständlich schon recht alt und die Technik des Kalkbrennens vermutlich in römischer Zeit in das Mainzer Becken gelangt.



kleiner Kalkofen mit  
Holzbefuehrung zu  
Versuchs- und  
Demonstrations-  
zwecken



In der Regel wird der Branntkalk gelöscht und als Sumpfkalk bis zur Verarbeitung gelagert. Als solcher ist er zeitlich unbegrenzt lagerfähig und kann nach Bedarf entnommen werden.

Es ist aber auch möglich den Branntkalk unter Luftabschluss zu lagern und erst bei der Weiterverarbeitung zu Mörtel zu löschen. Damit sind auch sogenannte Heißkalkanwendungen möglich.





Lessteine können prinzipiell mit Wind- oder Solarstrom gebrannt werden. Diese Technik ist für den Bedarf eines Handwerksbetriebes realistisch anwendbar. Kombination mit Gebäudeheiztechnik, Kraft-Wärmekopplung und Produktion von Pflanzenkohle können zu weiteren Synergien führen und sind Gegenstand der Forschung von skape.



Vier Farbmuster mit 1:1 Mischungsverhältnis von Farberde und Sumpfkalk



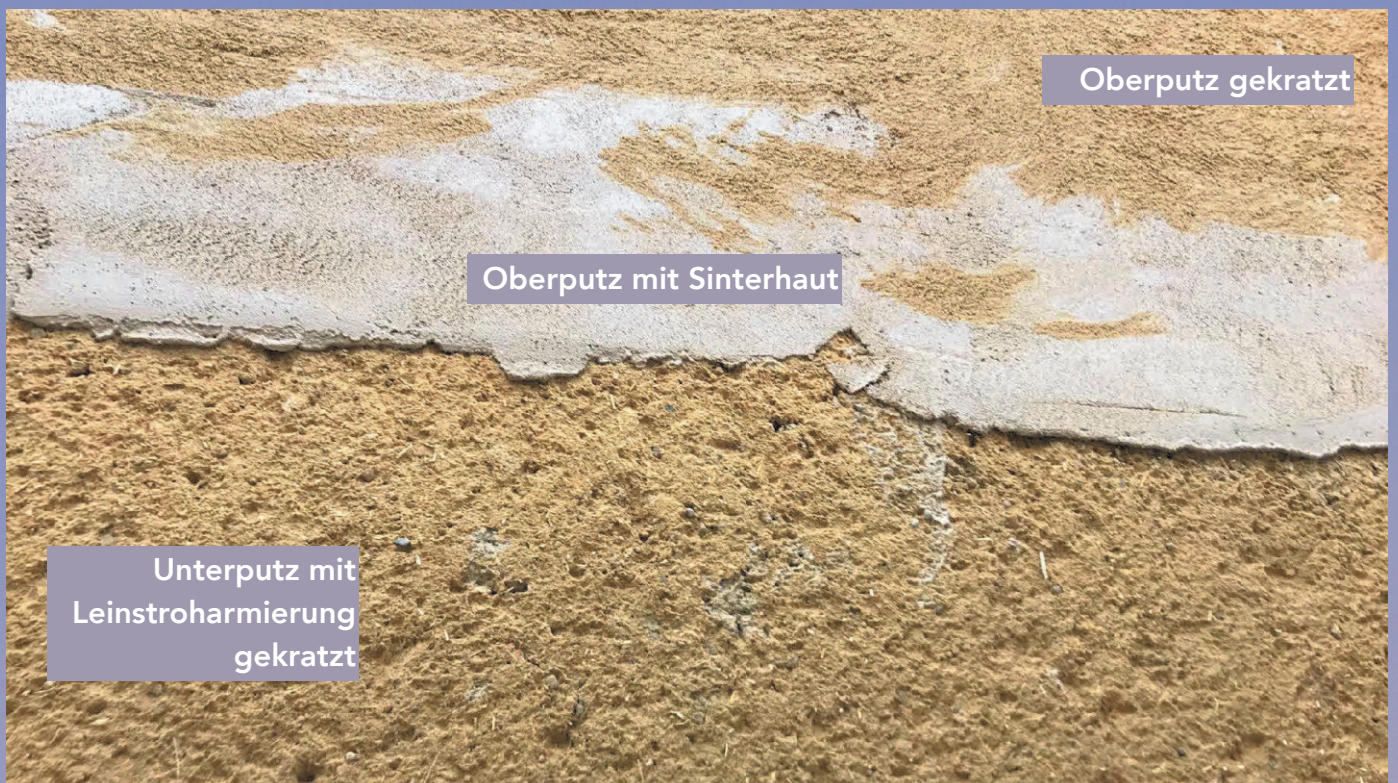
Seit 5 Jahren bewittertes  
Muster mit leichter  
Kaeinvergütung.



Musterflächen für  
Oberputze und Tünchen



Sumpfkalkputz mit  
Grubensand. Gekratzt



Oberputz gekratzt

Oberputz mit Sinterhaut

Unterputz mit  
Leinstrohartierung  
gekratzt



Oberputz gekratzt



Links wird bereits getüncht. Rechts schließt eine erhaltene Putzfläche an neuen Unterputz an. Anschließend wird der Oberputz über die gesamte Fläche gezogen und getüncht.

Der fertige Zustand.  
Es wurde vollständig auf eine  
Netzarmierung verzichtet.

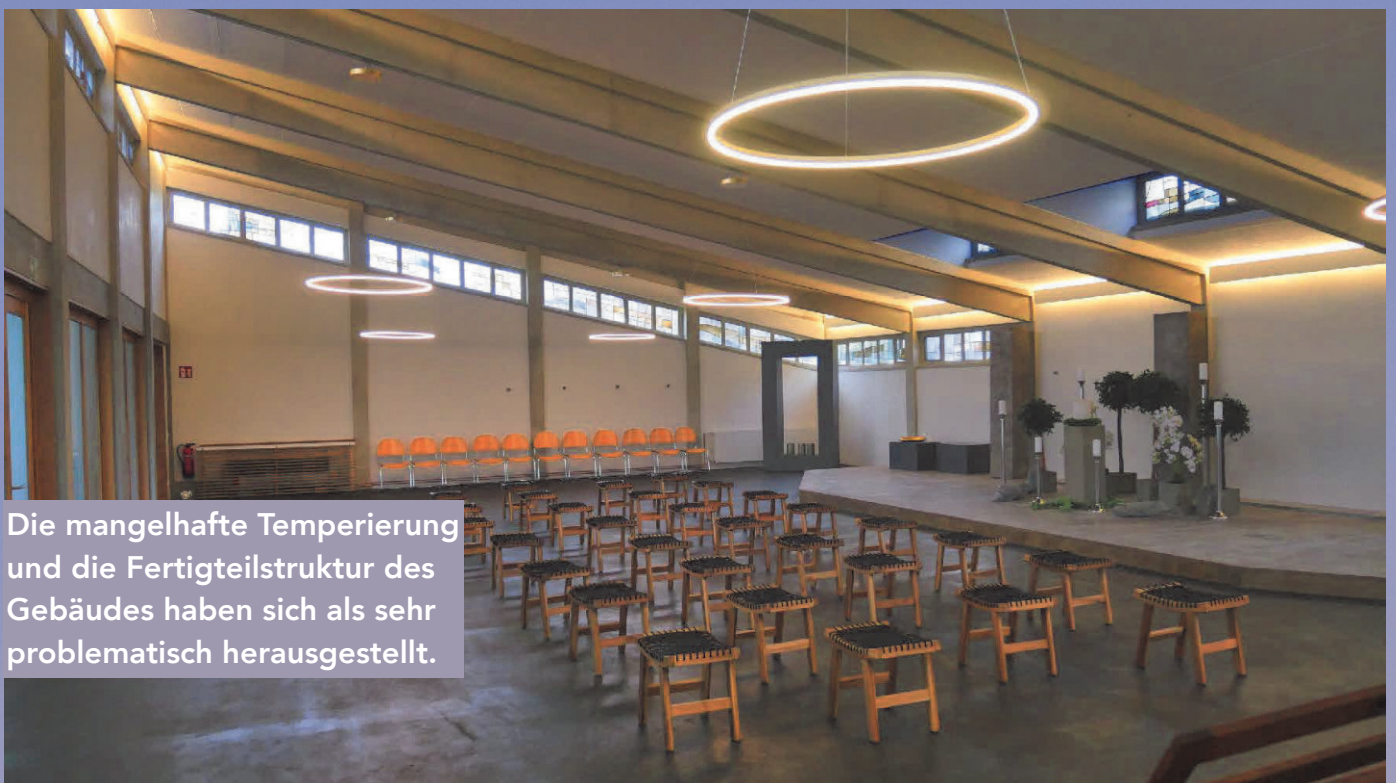


Die Fertigteilkirche aus den  
1960er Jahren besteht aus  
einem Stahlbetontragwerk und  
Ausfachungen aus Gasbeton-  
dielen.







Kalkglätte auf einem Unterputz mit Perlite und graue Sumpfkalkfarbe auf den Stahlbetonbauteilen



Die mangelhafte Temperierung und die Fertigteilstruktur des Gebäudes haben sich als sehr problematisch herausgestellt.

A close-up photograph of a wall with a pink, textured finish. A white wooden bookshelf is mounted on the wall, holding several children's books. The books have colorful covers, including one with a green cover and another with a blue cover. The wall shows signs of moisture damage, with some discoloration and small spots.

Sumpfkalkfarbe mit rosa Farberde als rein mineralische Beschichtung einer ungenügend gedämmten Außenwand. Trotz unvermeidlichen Auftretens von Kondensfeuchtigkeit kann Schimmel so verhindert werden.

A photograph of a room with a pink wall. A green bag is hanging from the ceiling. A window with dark green curtains is visible on the right. A wooden crib is partially visible in the foreground. The wall shows signs of moisture damage, with some discoloration and small spots.

Besonders die Raumecken waren in der Vergangenheit schimmelbelastet.



Dabei wäre allein die unübertroffene Ästhetik bereits Grund genug für diese natürliche Sumpfkalkfarberde und Diffusionsoffenheit, Sorptionsfähigkeit sowie Neutralisierung von Luftschadstoffen wären weitere.



Hier wurde eine, auf zu mürbem Gipsputz nicht haftende, Farberde mit Sumpfkalk zu einer spannungsfrei abbindenden Spachtelung transformiert. An der Decke hat die gerollte Farberde gehalten, an den Wänden ist der Farbton nun etwas heller geworden.





Das Mischungsverhältnis  
Farberde zu Sumpfkalk beträgt  
auch hier ca. 1:1  
Die zum Glanz neigende  
Farberde gibt auch in diesem  
Verhältnis den Ton an.





**Vielen Dank!**



**Fragen?!**

**kalkwerk**

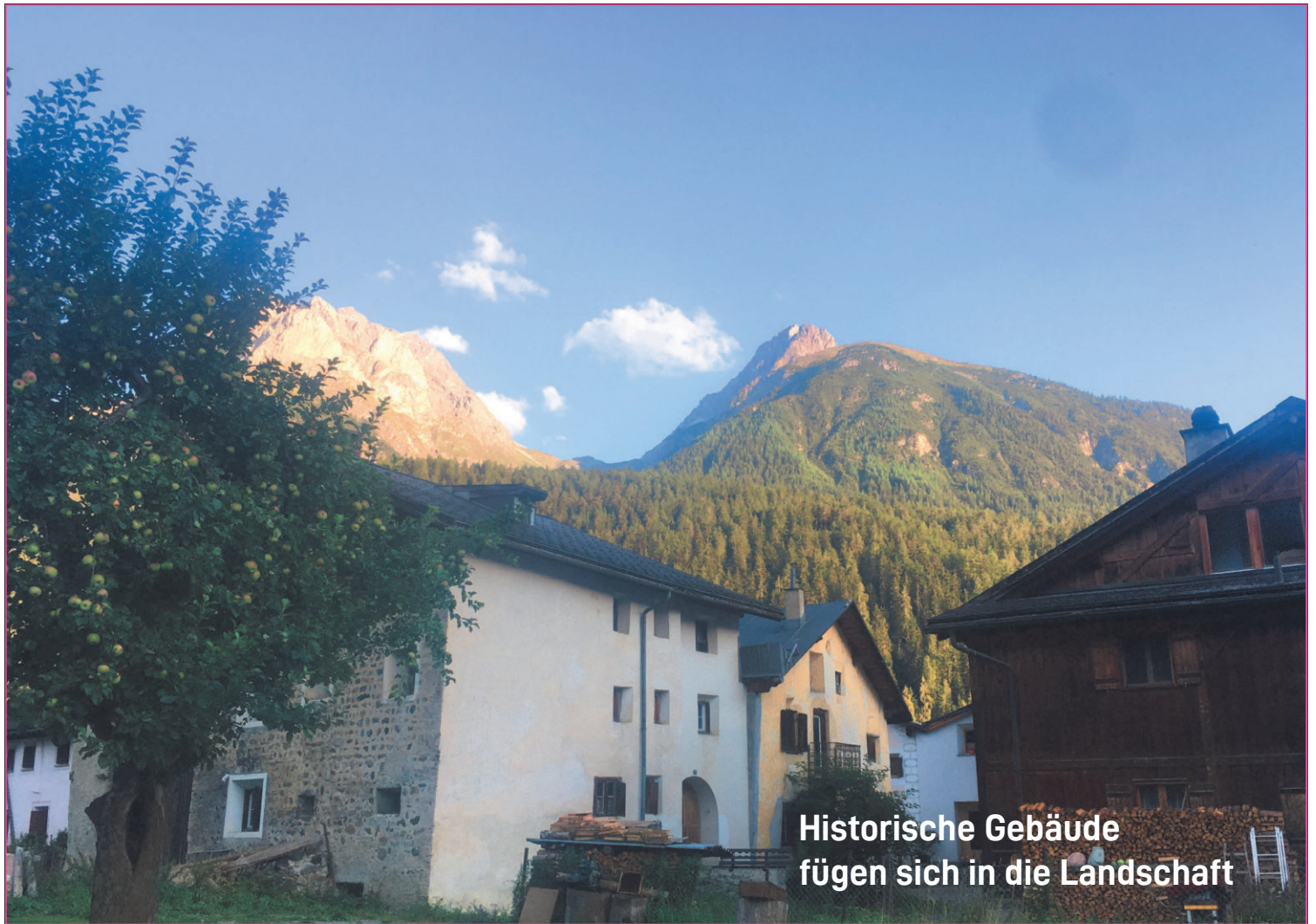
Referierende

Joannes Wetzel - Sgraffitokünstler und Kalkhandwerker

Delphine Schmid-Architektin Msc ETH Arch | SWB



**Dolomitkalk  
im Engadin**



Historische Gebäude  
fügen sich in die Landschaft



Holz, Stein und  
Kalk

## Zum Verein kalkwerk

**Wir vom Verein kalkwerk setzen uns für die Förderung und Vermittlung der traditionellen Herstellung von Kalk ein. In Zusammenarbeit mit anderen Vereinen, Institutionen und Fachleuten tragen wir aktiv zum Erhalt und Wiederbetrieb vom Verfall bedrohter Kalkgewinnungsstätten bei.**

Joannes Wetzel - Kalkist, Christof Rösch - Künstler/ Architekt, Philipp Kuntze - Innenarchitekt und Delphine Schmid - Architektin gründen den Verein kalkwerk im Februar 2020.



Foto Jörg Lang

## Ziele von kalkwerk

- Das Kulturerbe der Kalkbrennerei neu beleben, vermitteln und erlebbar machen
- Das Handwerk der Kalkherstellung und die Anwendung wieder ins Bewusstsein rücken
- traditionell produzierten Kalk für die Region verfügbar machen
- Eine Sensibilisierung für das natürliche, nachhaltige und bewährte Baumaterial Kalk erreichen
- Wissenszugang und -transfer sowohl unter Profis als auch Nicht-fachpersonen
- Die Förderung von weiteren Projekten mit Kalk
- Forschung und Erfahrungsaufbau



Foto Zora Schmid

## Kalkbrände von Joannes Wetzel

### im Unterengadin

2009 Tarasp  
2014 S-Charl  
2017 Sur En  
2020 Sur En  
2022 Sur En  
2024 Sur En  
2026 S-Charl



Kalkbrand 2020. Foto Jörg Lang





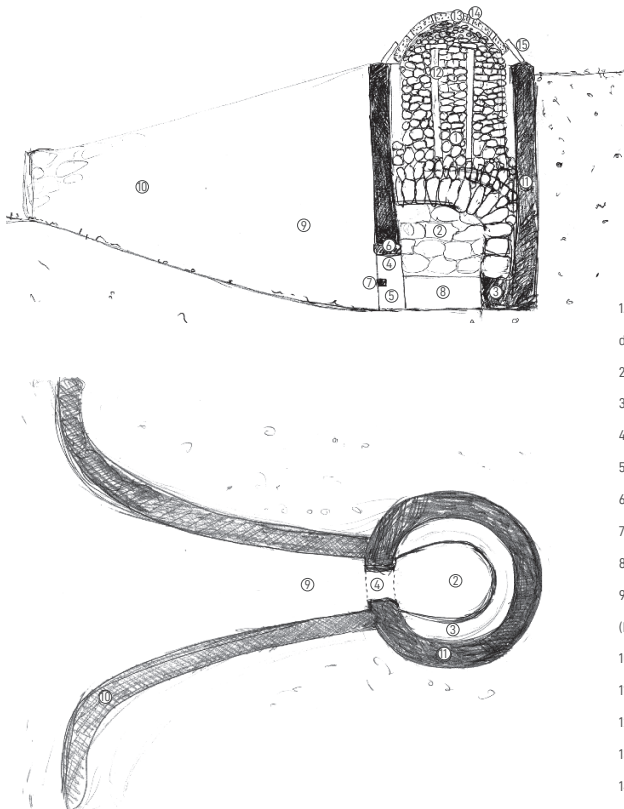
Foto Christoph Stahel

## Die Rohstoffe, Holz und Dolomitkalkstein

Das Brennholz muss beim Kalkbrennen schnell viel Flamme erzeugen, um die erforderlichen Temperaturen von 1'000°C zu erreichen. Nadelholz wie Fichte, Tanne oder Lärche, mindestens 2 Jahre getrocknet und möglichst fein gespalten, ist am besten geeignet. Für den Kalkbrand 2020 wurden 50 Ster Holz der umliegenden Gemeinden gebraucht.

Die Steine wurden am Fusse des Val Trigls im Tal Richtung S-Charl gesammelt. Dolomit besteht je zur Hälfte aus Calcium- und Magnesiumcarbonat. Zahlreiche freiwillige Helfer\*innen sammelten in 1.5 Tagen unglaubliche 20 Tonnen Steine. Fürs Einmauern werden die Dolomitkalksteine vor dem Kalkofen nach Grösse ausgelegt. Zuerst werden die grössten Blöcke von ca. 60 x 40 cm benötigt. Für das Gewölbe werden möglichst grosse, flache, längliche und keilförmige Steine gebraucht. Mit steigendem Fortschritt des Steineinbaus werden die Steine kleiner, bis sie zum Schluss Faustgrösse erreichen.

## Aufbau eines Feldofens



1. Kalkkammer (Raum für Kalkstein des zu brennenden Ofenbesatzes)
2. Feuerkammer (Hölle)
3. Bankette/ Hufeisenbank
4. Feueröffnung (Schnauze)
5. Zugöffnung
6. Sturz der Schnauze
7. Eisenstab
8. Aschenraum
9. Arbeitsraum des Kalkbrenners (Küche)
10. Flügelmauern
11. Umfassungsmauern
12. Rundhölzer als Luftkamine
13. Lehmdeckel
14. Luftlöcher im Lehmdeckel
15. Schamott Steine

Illustration Delphine Schmid

Feldöfen sind in den Hang hinein gebaut und mit einer Dachkonstruktion vor Regen geschützt. Dies hat mehrere Vorteile: Erstens ist das Feuer sicher in der Erde vergraben, zweitens wirkt der Hang als Stützmauer, welche den enormen Kräften während des Brandes standhalten und zum Schluss wirkt die Erde isolierend, die Hitze wird besser im Ofen gespeichert.

Für die Umfassungsmauern der Kalköfen werden Steine mit einem höheren Schmelzpunkt als Kalkstein verwendet, wie zum Beispiel Gneis, Serpentin oder Granit. Der zylinderförmige Kalkofen ist oben offen und hat seitlich einen Zugang, welcher zur unten liegenden Feuerungsöffnung, der Schnauze, führt. Dieser Zugang wird gebildet durch zwei Stützmauern, den Flügelmauern. Die Schnauze hat eine horizontale Unterteilung, auf welche beim Einfeuern die Hölzer gelegt werden. So bleibt im unteren Segment eine Zugöffnung. Das Volumenverhältnis von Feuerraum (Hölle) zur eingefüllter Steinmasse sollte ca. 1 zu 3 betragen.



Foto Christoph Stahel

## Tockenmauer auf Hufeisenbank

Auf dem Grund des Kalkofens gibt es eine hufeisenförmige Steinbank von 30 cm Höhe, die Bankette. Darauf werden die ersten grossen Blöcke des Dolomitkalksteins gehieft und bis ca. einen Meter Höhe gemauert.

Jeder Stein wird passend gesetzt und bei Bedarf mit kleineren Steinen stabilisiert.

Anders als bei einer typische Trockenmauerarbeit, werden hier für eine optimale Luftzirkulation absichtlich regelmässige Luftspalte miteingebaut. Während des Brandes ruht das gesamte Gewicht der Steine und des Lehmdeckkels auf diesem Fundament. Dieses muss hohen Temperaturen standhalten können. Die Bankette schützt die Mauer aus Dolomitkalksteinen während des Brandes vor Stössen beim Nachfüllen mit Holzscheiten, da die Steine mit fortschreitendem Brand brüchiger werden.

11



Foto Christoph Stahel

## Gewölbebau der Hölle

Es braucht handwerkliches Geschick für das Aufsichten des Gewölbes, welches während des Brandes den Feuerraum (Hölle) bildet.

Mithilfe eines Leengerüstes wird das Gewölbe fächerartig aufgebaut.

Die grossen, länglichen Keilsteine ermöglichen dabei eine grössere Stabilität und eine gute Luftzirkulation zwischen Feuerraum und Steinmasse. Nachdem mit dem Schlussstein die Kuppel vollendet ist, kommt eine weitere Schicht auf den Bogenrücken hinzu. Sobald das Gewölbe mit einer seitlichen Hinterfüllung stabilisiert ist, wird das Leengerüst entfernt, damit sich die Konstruktion setzen kann.

Die Dolomitkalksteine verlieren beim Brand ca. 20% ihres Volumens und 40% ihres Gewichtes. Sie müssen kompakt genug geschichtet werden, um dem Brand standzuhalten und locker genug verlegt sein, um eine gute Luftzirkulation in der ganzen Steinmasse zu gewährleisten.

12



## Einmauern der Kamine



Foto Christoph Stahel

Sobald das Gewölbe steht, erfolgt das weitere Auffüllen des Kalkofens mit den gesammelten Steinen von oben. Dabei wird wiederum jeder Stein sorgfältig in der passende Grösse ausgewählt und gesetzt. Ein 10cm dicker Luftspalt zur Ofenaussenwand wird beim Aufmauern frei gelassen. Für eine optimale Luftzirkulation in der ganzen Steinmasse werden Holzstämme für die 5 Kamine vorbereitet und miteingebaut. Beim Kalkbrand brennen diese schnell aus. Die entstandenen Kamine sorgen dafür, dass die Hitze aus dem Feuerraum auch im oberen Teil der Steinmasse verteilt wird. Die Kamine enden 30cm unter der Oberfläche, damit die Hitze nicht direkt entweicht, sondern die oberste Schicht Steine aufheizt. Auf jedes Ende eines Kamins wird ein grösserer flacher Stein als Abschluss gelegt.

13

## Kuppelbau aus kleineren Steinen



Foto Christoph Stahel

Mit immer kleiner werdenden Steinen bis Faustgrösse wird ein Hügel von etwa 1.5m angehäuft. Auch hier wird darauf geachtet, dass jeder Steine verzahnt gesetzt wird. Bei diesem Brand wollte man die Höhe des Steinhauens noch ein wenig ausreiten. Schlussendlich wurden ca. an die 15 Tonnen Dolomittalksteine für das Füllen der Chalchera Stella verwendet. Als letzte Vorbereitung für den Brand werden genügend Schamottsteine bereitgelegt. Diese dienen dazu, während des Brandes die Temperaturen durch gezieltes Abdecken der Luftlöcher und des umlaufenden Luftrings zu regulieren, um eine möglichst gleichmässige Verteilung der Hitze zu erreichen.

14

## 1.Tag | Feuer



Foto Randolph Listmann

Am Samstag 1. August um 17:20 wird das Feuer mittels Baumwolle, Feuerstein und Metallring angezündet. Die Projektinitianten Joannes Wetzels, Delphine Schmid und Christoph Rösch eröffneten das Fest mit einer Rede. Zahlreiche Besucherinnen und Besucher liessen sich den zeremoniellen Start des grossen Feuers und das folgende Festessen nicht entgehen. An die 60 Personen nahmen teil und erfreuten sich am Wiederaufleben einer jahrtausendealten Tradition.

Im Kalkofen wird langsam eingefeuert, damit die Dolomittalksteine keine grossen Temperaturveränderungen erfahren und zerspringen. In dieser ersten Phase wird ein Grossteil an Feuchtigkeit aus der Steinmasse getrieben. In der ersten Nacht lässt sich noch gemütlich bei der Schnauze vor dem Feuer sitzen.

15

## 2.Tag | Lehmdeckel



Foto Christoph Stahel

Am Sonntag, 24 Stunden nach der Zündung wird der Lehmdeckel erstellt. Dazu werden zuerst als Trennschicht Tannenzweige oben auf den Steinhügel gelegt. Danach wird der feuerfeste, mit Wasser angemachte Lehmörtel mit Schaufeln darauf verstrichen. Bei den letzten Bränden hat sich der Erzlehm der Lohner Ziegelei bewährt. Performantartig wird das ganze zügig abgewickelt. Diejenigen die in früheren Jahren dabei waren, zeigen den „Neulingen“, wie es geht. Es ist Eile angesagt: weil die Steine schon ziemlich heiss sind, läuft man Gefahr, dass sich die Tannenzweige entzünden und der Lehm bereits austrocknet, bevor die Luftlöcher von ca. 10cm Größe hineingedrückt werden können. Ca. 25 Luftlöcher werden bei diesem Lehmdeckel freigemacht. Der Luffring am Rande des Zylinders wird mit Schamottsteinen abgedeckt. Mit einem Pyrometer kontrollieren wir durch ein Luftloch laufend die Temperatur der Steine, welche zuoberst im Ofen liegen.

Temperaturmessung abends: 230-270°C (vorne 300°C)

16



Foto Christoph Stahel

### 3.Tag | Glühende Steine

Am Montagabend ist beim Deckel durch die Luftlöcher ein erstes rotes Glühen der Steine erkennbar. Die Kamine und die Tannenzweige sind ausgebrannt und der Lehmdeckel ist bald eine hart gebrannte Tonschale. Aus den geschmolzenen Mineralien im Lehm (Sand) bilden sich durch die enorme Hitze grüne Verglasungen auf der Unterseite des Lehmdeckels.

Es regnet und ist kalt, um den Kalkofen herrscht jedoch ein angenehmes Klima und er wird zum Wohnzimmer für die Leute im Wald.

Temperaturmessung Morgens: 300-420°C

Temperaturmessung Abends: 480°C

17



Foto Christoph Stahel

### 4.Tag | Strahlender Kalkofen

Am Dienstag wird schon gespannt nach den Flämmchen Ausschau gehalten, welche aus den Luttlöchern des Deckels kommen sollen. Vor allem beim Eindunkeln wird die Stimmung um den Ofen immer andächtiger. Die trockene Wärme und die Faszination von einer 15 Tonnen schweren glühenden Steinmasse zieht immer mehr Leute an. Es ist angenehm ruhig. Alle warten und schauen dem Feuer zu, bereits mit beträchtlich grösserem Abstand als zu Beginn.

Solange das Feuer konstant genügend Sauerstoff bei der Verbrennung zur Verfügung hat, gibt es praktisch keine Rauchentwicklung. In der Hitze der Feuerkammer ist die Temperatur so hoch, dass die eingelegten Hölzer sofort Feuer fangen und schnell mit einer hellen Flamme verbrennen.

Temperaturmessung Morgens: 550-600°C

Temperaturmessung Abends: 650°C

18

## 5.Tag | Züngelnde Flammen



Foto Christoph Stahel

Am Mittwoch ist es soweit, es züngeln die ersten Flämmchen aus den Luftlöchern des Lehmdeckels heraus. Ein Zeichen dafür, dass die erforderliche Temperatur von 1'000 Grad bald erreicht ist. Rund um die Uhr sind Leute da, die das Feuer mit Holz füttern und schauen, dass sich nicht zuviel Glut und Asche im Feuerungsraum ansammelt. Ungefähr alle Viertelstunde werden ein paar Hölzer nachgelegt. Mit einem speziell dafür angefertigten Eisenstab, der vorne eine keilförmigen Aufsatz hat, wird die überschüssige Glut und Asche unter den brennenden Hölzern herausgezogen, damit genügend Sauerstoff zum Feuer gelangt. Erstaunlicherweise ist die gesamte Menge an herausgeholtem Material sehr geringfügig, wenn man bedenkt, wieviel Holz während 7 Tagen verbrannt werden. Die Steine haben eine hellgelbe Glühtemperatur erreicht, sodass der ganze Kalkofen wie eine kleine Sonne strahlt.

Temperaturmessung Morgens: 830-870°C  
Temperaturmessung Abends: 890-950°C

19

## 6.Tag | Maximale Hitze



Foto Christoph Stahel

Am Freitagmorgen ist die erforderliche Temperatur von 1'000 °C erreicht und wird nun für 24 Stunden gehalten, um sicher zu gehen, dass die Transformation aller Steine bis in den Kern erfolgt ist. Vermutlich ist es gar nicht möglich, in einem Feldofen mit Holzbefuerung viel höhere Temperaturen als 1'000 °C zu erreichen. Am Abend wird ein hellorange glühender Stein für eine Probe- löschung entnommen. Nachdem der Stein ein wenig abgekühlt ist, sieht man, dass das Material nicht mehr grau, sondern schneeweiss geworden ist. Vor unseren Augen liegt Stückkalk. In einer Metallwanne wird Wasser über den frisch gebrannten Stein gegossen und die exotherme Reaktion des Kalklöschens geht ab wie eine Rakete. Es knackt und spritzt und dampft und der weisse Stein löst sich vollständig in eine brodelnde weisse Masse auf.

Ein eindeutiges Zeichen, dass der Kalkbrand ein Erfolg war!

Temperaturmessung Morgens: 1030-1070°C  
Temperaturmessung Abends: 1080°C

20



Foto Christoph Stahel

## 7.Tag | Fulminantes Finale

Der Kalkofen lodert in voller Kraft bei einer Temperatur von ca. 1'000 °C. Ein Aufhalten in Feuerlochnähe ist schier unmöglich. Für das Einlegen von Holz werden die Kalkbrenner\*innen durch eine grosse Lederschürze geschützt.

Schweren Herzens wird am Samstagmorgen um 4Uhr früh das letzte Holzscheit in den Ofen gelegt. Das Feuer, welches mit einer unheimlichen Energie eine Woche ein ständiger Begleiter war, erlischt.

Dadurch, dass die Steine an Gewicht und Volumen verloren haben, setzt sich die ganze Steinmasse. Die eingemauerten Luftspalten werden immer kleiner, bis das Feuer erstickt.

Die Schotten werden dichtgemacht, die Luftlöcher beim Lehmdeckel zugedeckt, die Feuerungsöffnung geschlossen. Beim Abkühlen des Ofens sollte so wenig Luftfeuchtigkeit wie möglich zum Stückkalk gelangen, weil sich dieser sonst bereits aufzulösen beginnt.

21



Foto Randolf Listmann

## Kalkgewinnung

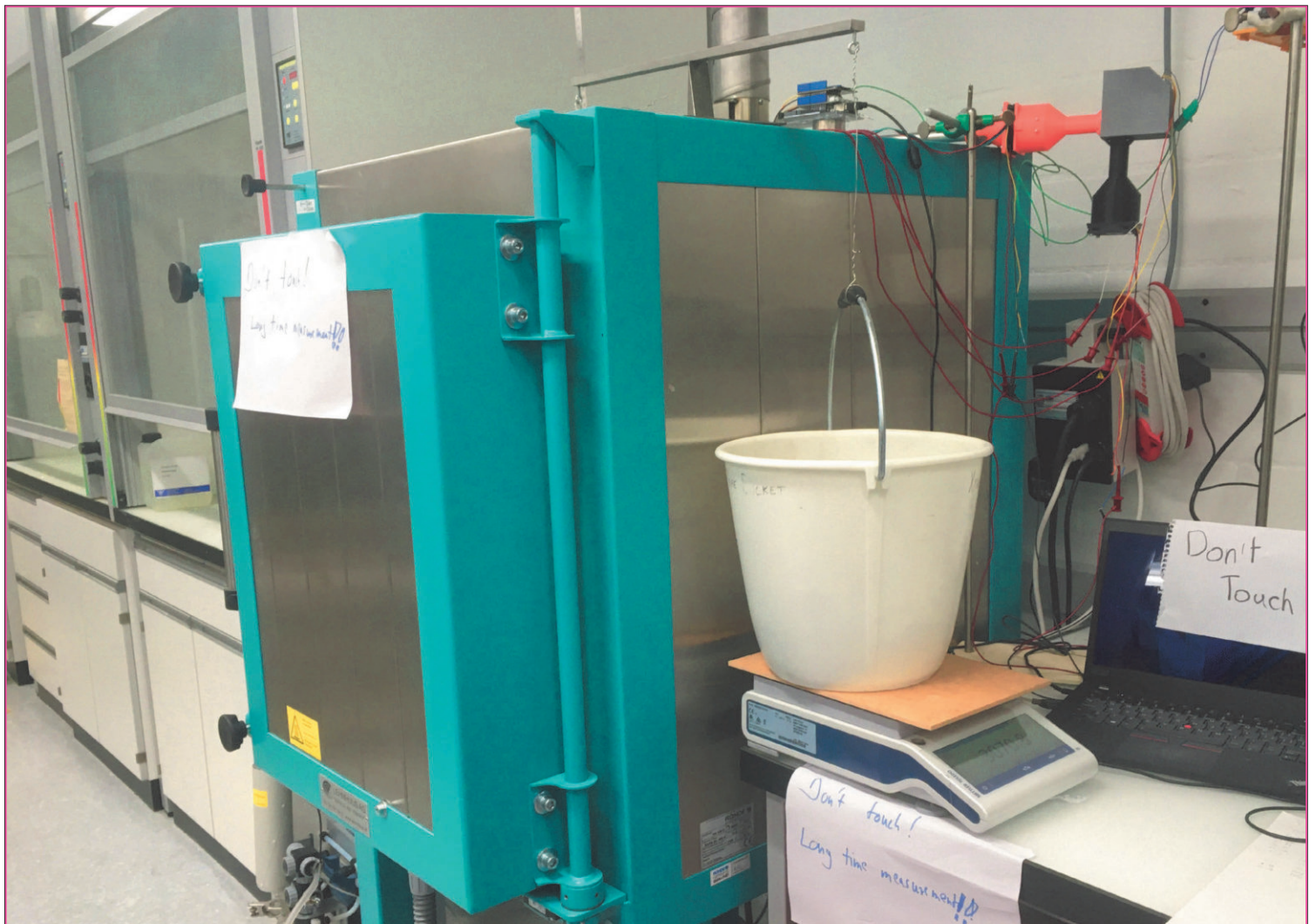
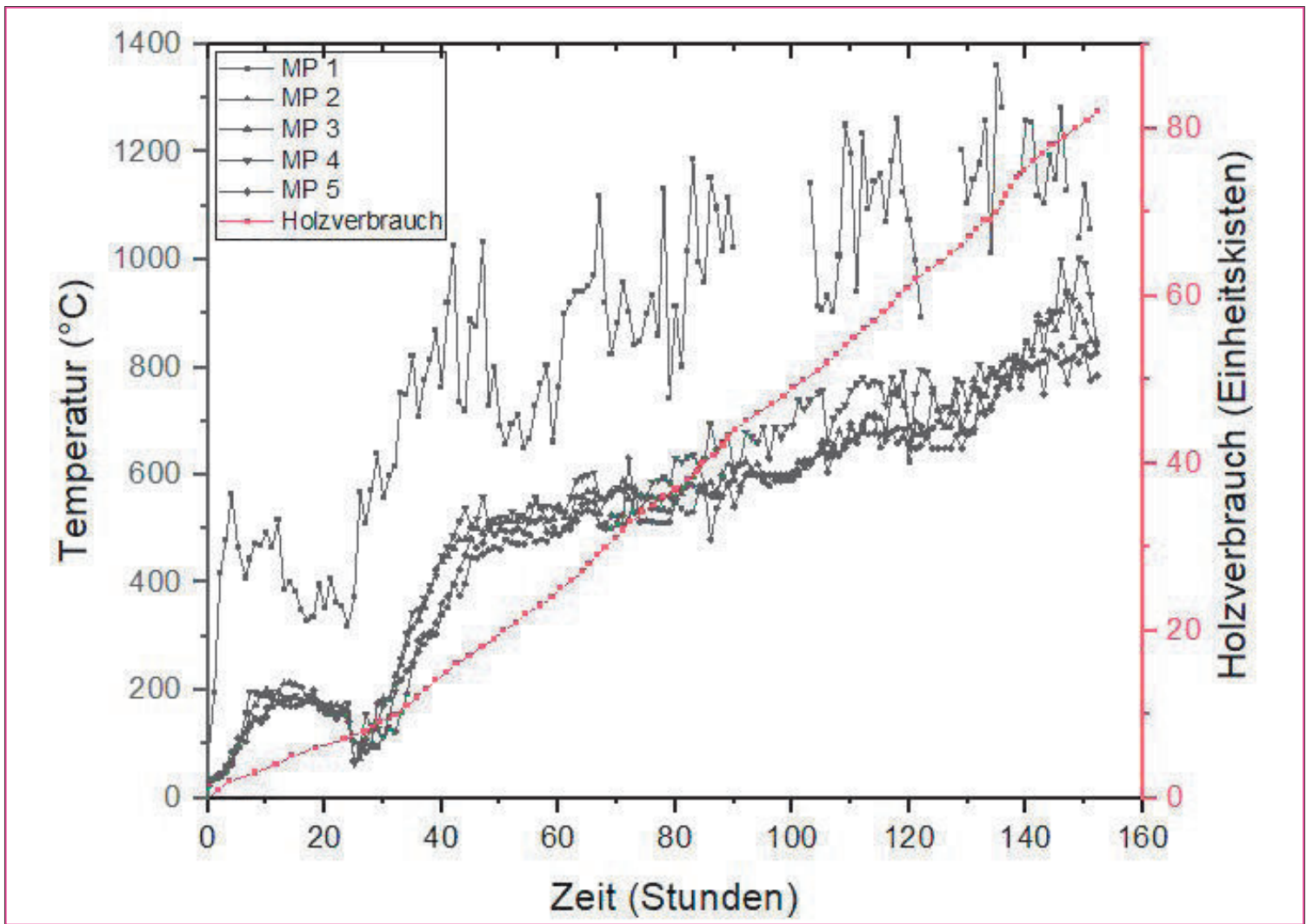
Nach einer Woche ist die Temperatur soweit heruntergekommen, dass man mit dem Ausräumen beginnen kann. Im Inneren sind die Steine teilweise immer noch empfindlich heiss. Der Stückkalk wird in luftdichte Fässer geschaufelt. Das stark alkalische, noch warme Material zu entnehmen, ist die anspruchsvollste Arbeit des ganzen Kalkbrandes und bedarf einer guten Schutzausrüstung. An die ca. 7 Tonnen Stückkalk konnten gewonnen werden.

Im Unterengadin besteht nun die Möglichkeit, regional und traditionell produzierter Kalk zu beziehen. Dieser ist für umweltbewusste Bauherrschaften und den Erhalt historischer Bausubstanz von unschätzbarem Wert.

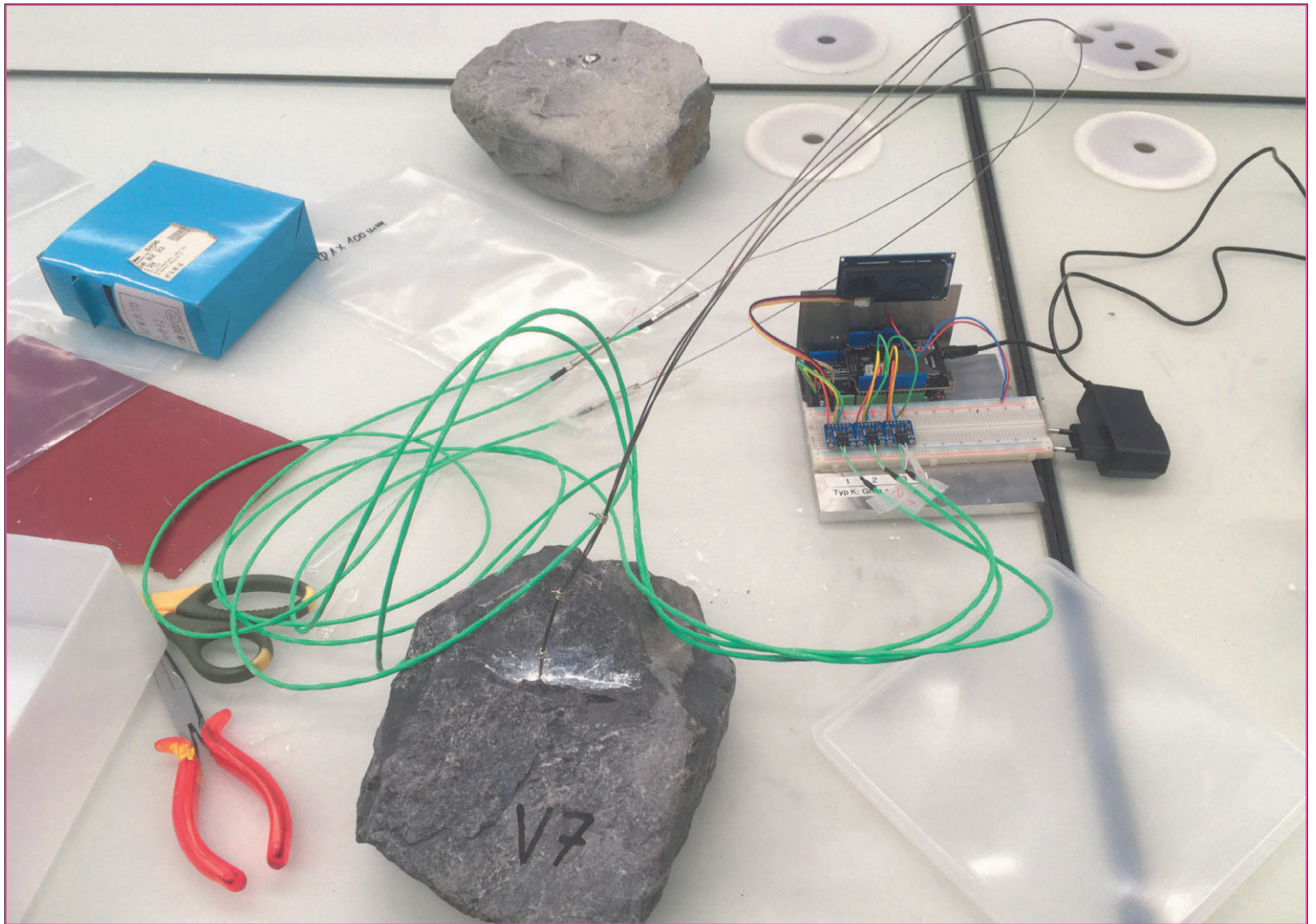
22

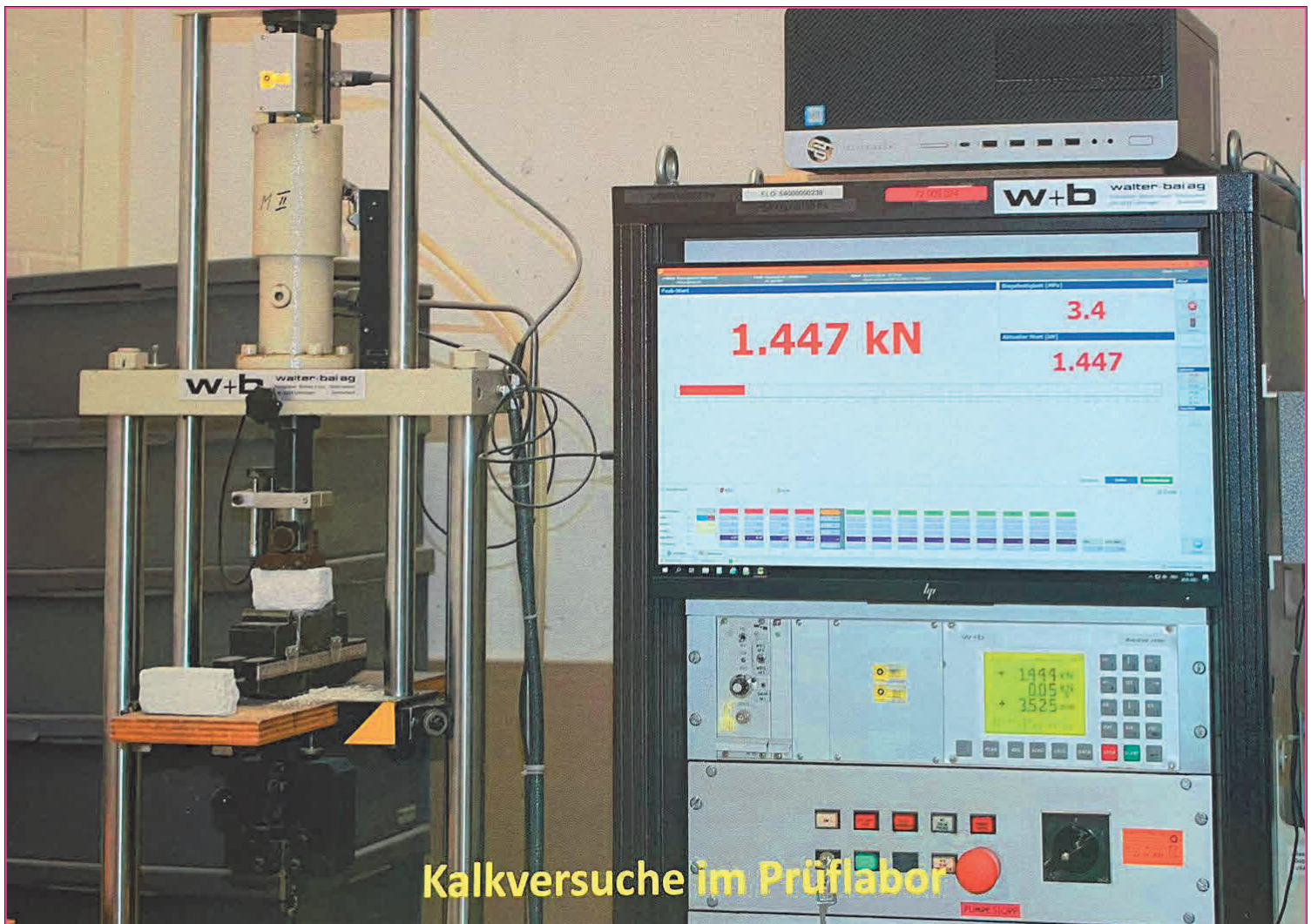








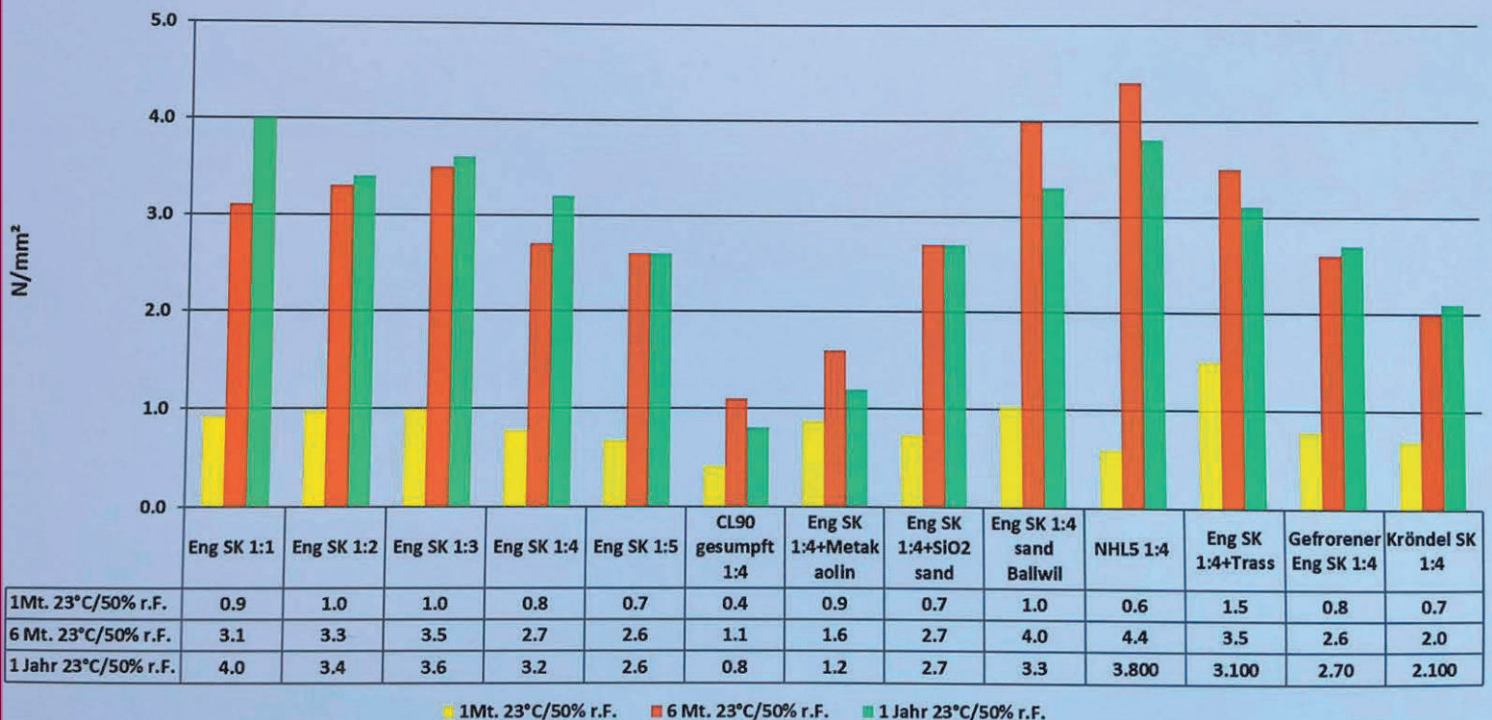




Kalkversuche im Prüflabor

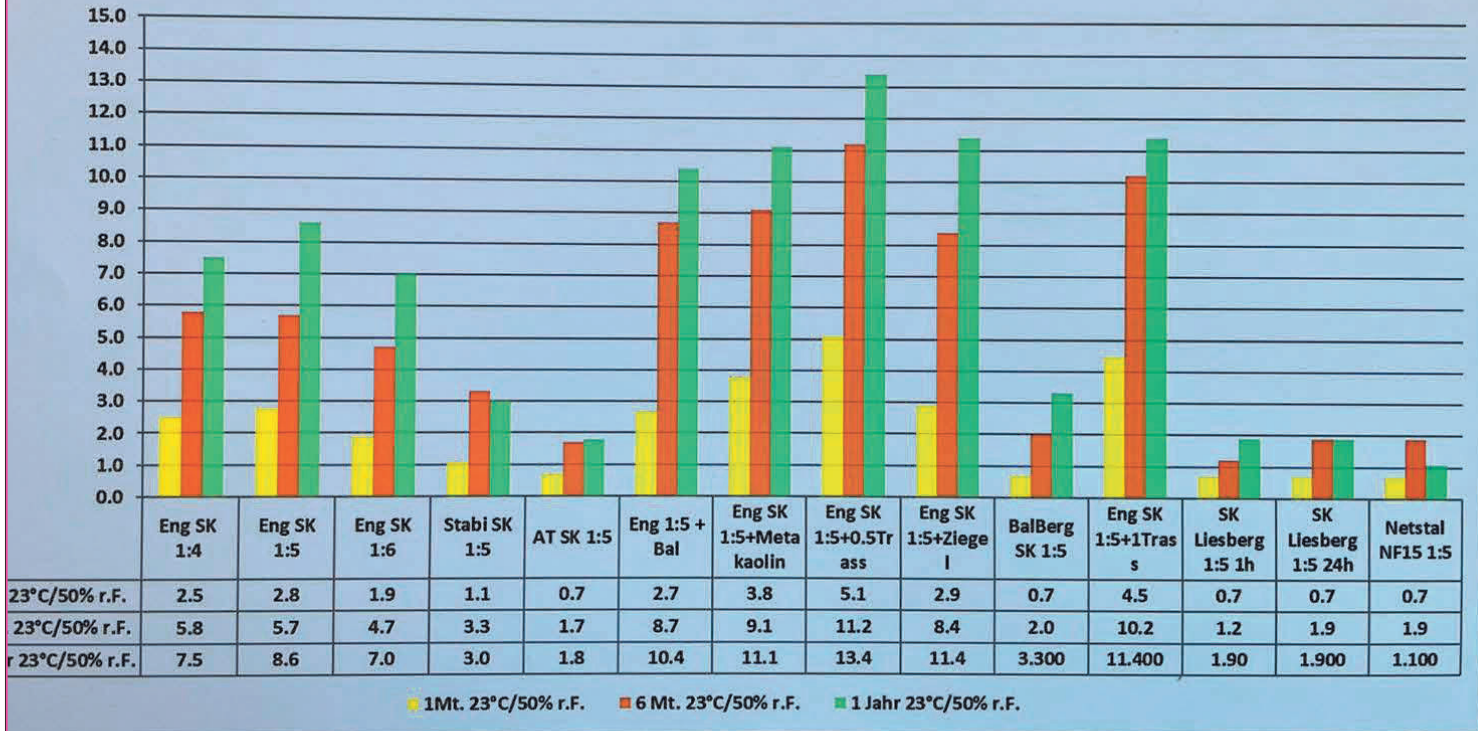
## Kalkwerk Versuchsreihe / Formulierungen, Sumpfkalk, 2020/21

### VR1 / Druckfestigkeit EN/1015-11, Sumpfkalk



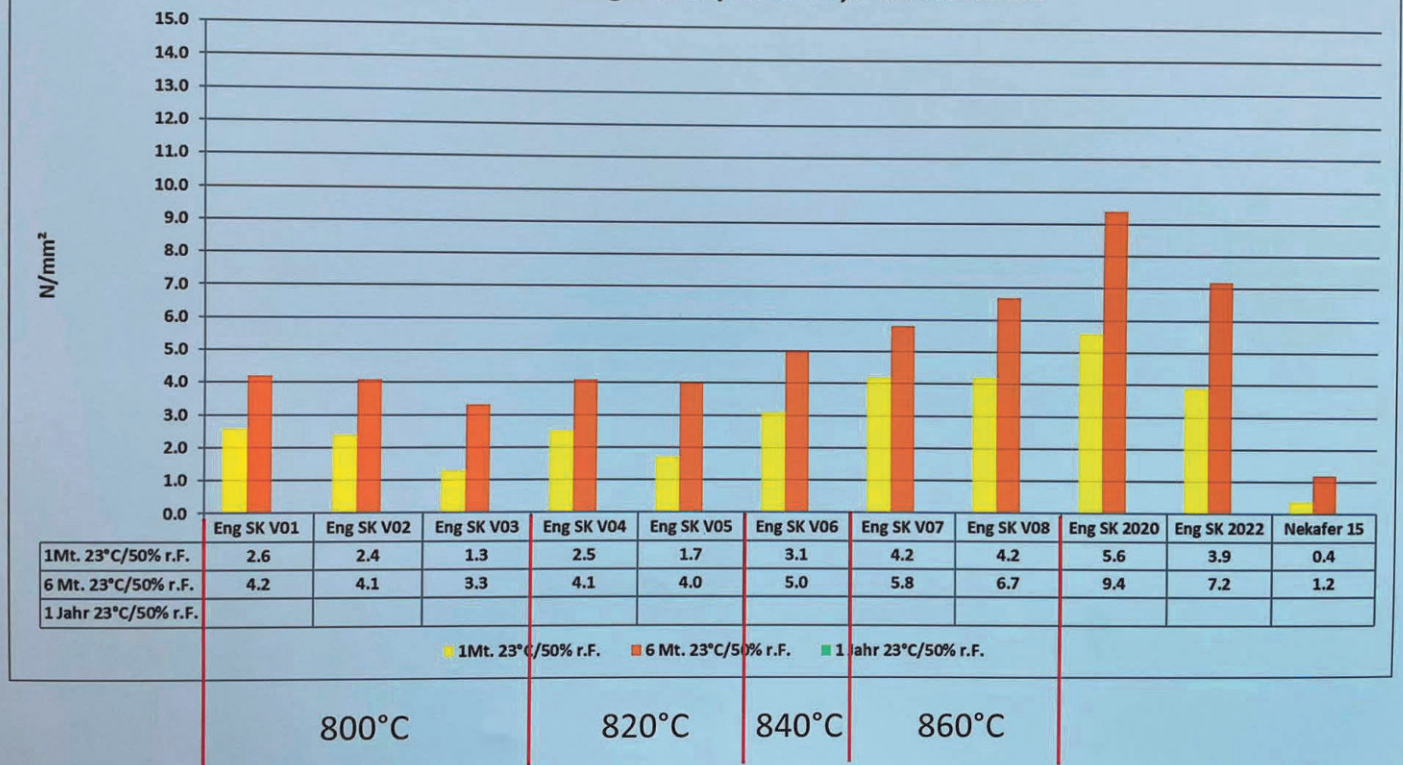
# Kalkwerk Versuchsreihe / Formulierungen, Stückkalk, 2021/22

## VR1 / Druckfestigkeit EN/1015-11, Stückkalk



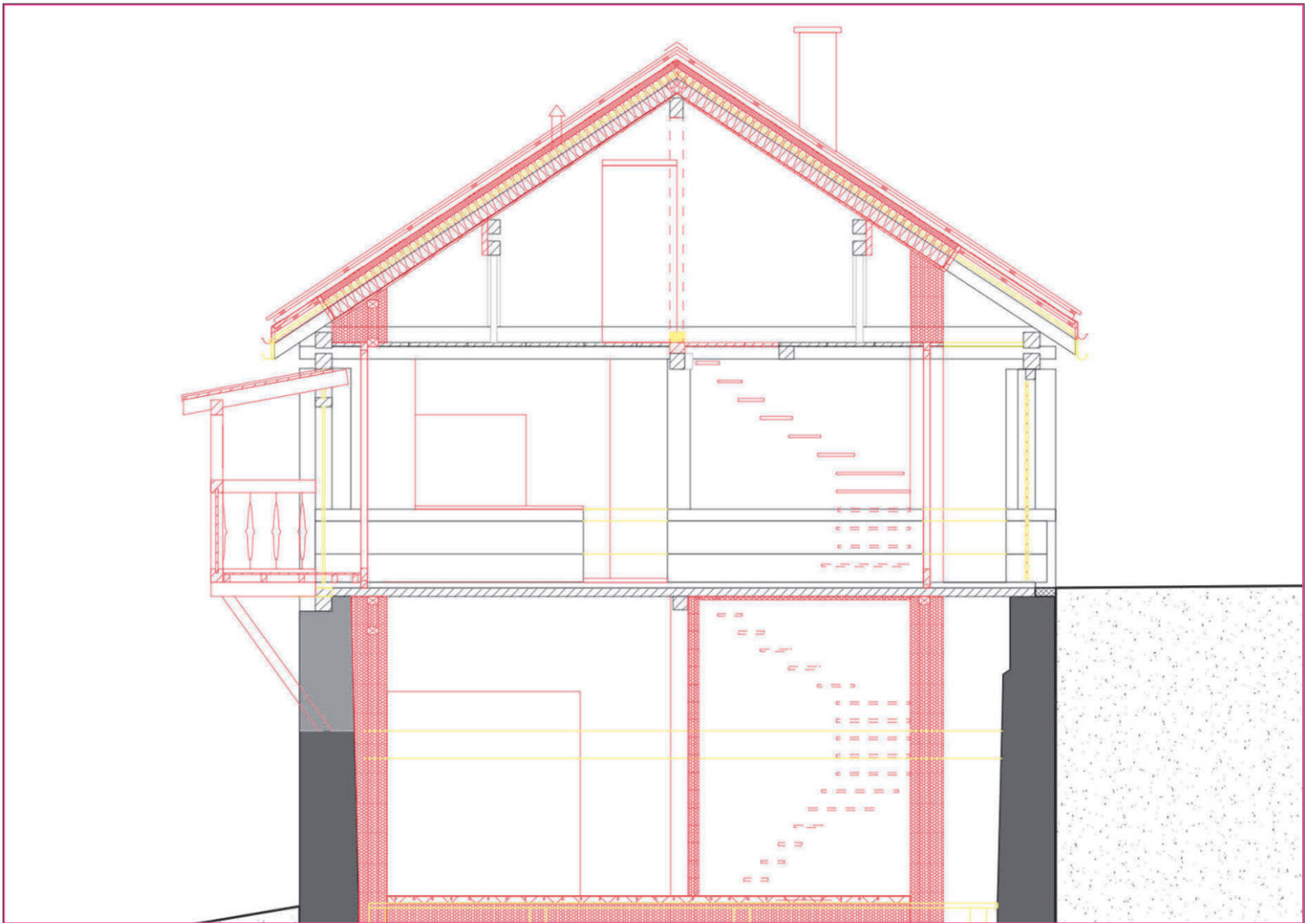
# ETH Kalkwerk Versuchsreihe / Formulierungen, Stückkalk, 2023

## VR3 / Druckfestigkeit EN/1015-11, ETH Stückkalk









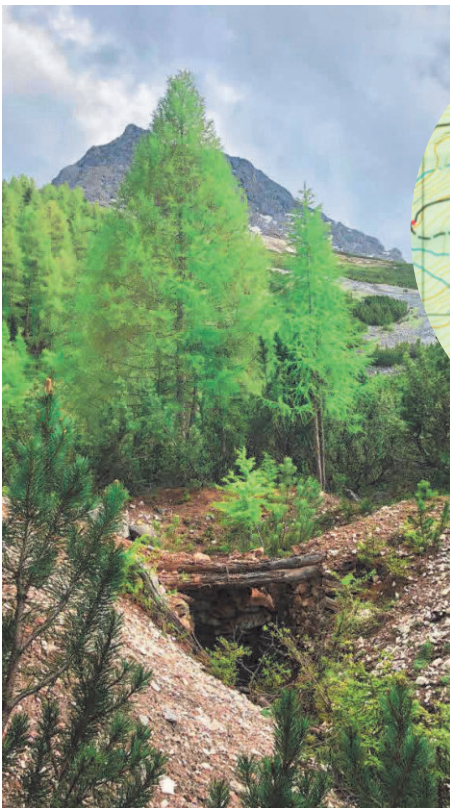












Chilchera Tudais-cha. Foto Delphine Schmid



## Kalköfen Ortsnamen

Zeitzeugen der früheren Wichtigkeit von Kalk für das Bauen sind nicht nur ein Grossteil der erhaltenen historischen Bauten, sondern auch zahlreiche dem Verfall ausgesetzte Kalkbrennöfen. Flurnamen wie Chalchofen, Kalkbreite oder Ofenpass weisen auf eine ehemalige Alltäglichkeit hin.



Überreste Kalkofen im Val d'Uina



Überreste Kalkofen bei Il Fuorn



Chalchera Plan dal Chomps. Fotos Delphine Schmid

## Kalkofenruinen

Im Unterengading gibt es diverse Überreste von Kalkbrennöfen. Im Val d'Uina, wo auch die Chalchera Stella steht, gab es früher 13 Kalkbrennöfen.

Beim Ofenpass sind ebenfalls mehrere

Kalkofenruinen zu finden.

Nach dem Dorfbrand in Ramosch um 1880 musste das gesamte Dorf praktisch neu aufgebaut werden.

Dazu dienten mehrere nebeneinanderliegende Kalkofen im Talboden.

Da der Boden durch den Kalk entsäuert ist, wachsen die Bäume besonders gerne um diese Ruinen herum und beschleunigen dadurch den Zerfallprozess.

















## Pohled na historické vápenné technologie a příklad využití znalostí pro rekonstrukci sgrafita

---

Jan Válek a kol.  
*Ústav teoretické a aplikované mechaniky*  
Akademie věd ČR v. v. i.  
[valek@itam.cas.cz](mailto:valek@itam.cas.cz)

---

Bärnau, 4. října 2023

1

## **Ein Blick auf historische Kalktechnologien und ein Beispiel für die Nutzung von Wissen zur Rekonstruktion des Sgraffito**

**Jan Válek und Koll.**

Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik  
Akademie der Wissenschaften der Tschechischen  
Republik v. v. i.

## Vápenec a vápno v České republice

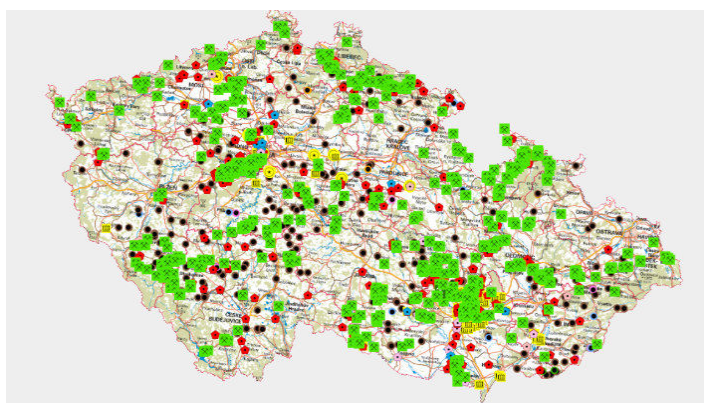
---



2

Kalkstein und Kalk in der Tschechischen Republik

## GIS – mapa lomů, pecí a technologií



Archeologická data

Vojenská mapování od r. 1763

Stabilní katastr

Archivní prameny

Soupis lomů z 1. ½ 20. stol.

Geo reference

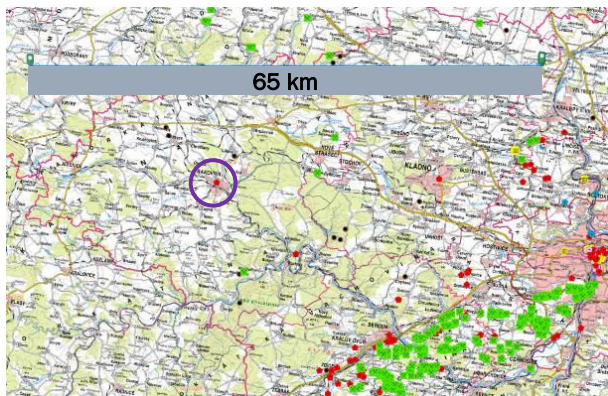
<https://calcarius-calcarius.hub.arcgis.com/>

3

## GIS - Karte der Steinbrüche, Öfen und Technologien

- Archäologische Daten
- Militärische Kartierung seit 1763
- Stabiles Kataster
- Archivalische Quellen
- Inventar der Steinbrüche aus den 1 ½ Jahren des 20. Jhs
- Georeferenzen

## GIS Calcarius – podklad pro výzkum



### Příklad 1 Rakovník -

#### město bez vápence

pálení vápna na stavbu hradeb od roku 1515-1529/1530 (údaje z knih počtů)

- dovoz vápna z Prahy
- hledání lokálních zdrojů – místní cihelna/vápenka

4

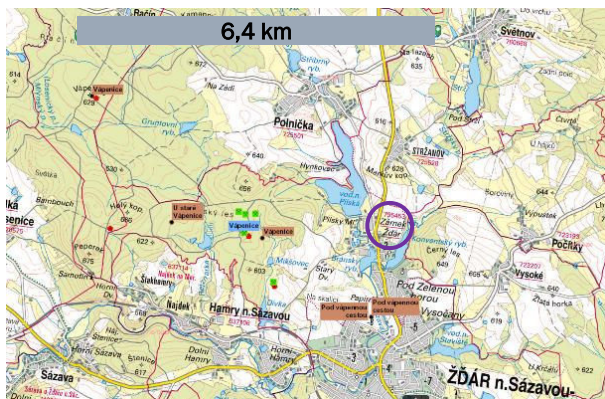
## GIS Calcarius - Grundlage für die Forschung

### Beispiel 1: Rakovník (dt. Rakonitz) - Stadt ohne Kalkstein

Kalkbrennen für den Bau von Mauern von 1515-1529/1530 (Daten aus den Zählbüchern)

- Import von Kalk aus Prag
- Suche nach lokalen Quellen - lokale Ziegeleien/Kalkwerke

## GIS Calcarius – podklad pro výzkum



### Příklad 2 Žďár na Sázavou – cisterciácký kolonizační klášter – 1252

- surovina dostupná v místě
- dodávky kamene do okolních panství
- po odtěžení části pro vápno byl mramor využit i pro kamenické prvky

## GIS Calcarius - Grundlage für die Forschung

### Beispiel 2: Žďár na Sázavou (dt. Saar) – Zisterzienser Kolonisationskloster – 1252

- lokal verfügbares Rohmaterial
- Lieferung von Stein an die umliegenden Ländereien
- nachdem der Kalkanteil entfernt wurde, wurde der Marmor auch für Steinelemente verwendet

## GIS Calcarius – podklad pro výzkum



### Příklad 3 zámek Červená Lhota

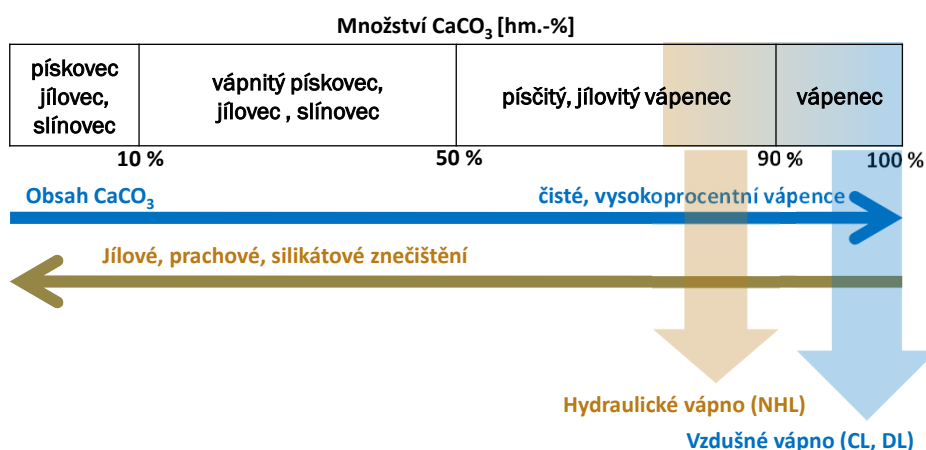
- zdroj vápence pro vápno na štuky 1680
- analýzy – velmi čisté kalcitické vápno (CaO)
- archivní zdroje – suroviny z Chýnova
- analýzy chýnovských vápenců - určení možných poloh

## GIS Calcarius - Grundlage für die Forschung

### Beispiel 3: Schloss Červená Lhota (dt. Rothlhotta)

- Quelle für Kalkstein zur Herstellung von Stuckkalk 1680
- Analysen - sehr reiner kalzitischer Kalk (CaO)
- Archivquellen - Rohmaterial aus Chýnov
- Analysen von Chýnov-Kalksteinen - Identifizierung möglicher Standorte

## Rozmanitost přírodních surovin



## Vielfalt der natürlichen Rohstoffe

- *Množství = Menge*
- *pískovec, jílovec, slínovec = Sandstein, Tonstein, Mergel*
- *vápnitý pískovec = kalkhaltiger Sandstein*
- *písčitý, jílovitý vápenec = sandiger, toniger Kalkstein*
- *vápenec = Kalkstein*
- *obsah = Inhalt  $\text{CaCO}_3$*
- *čisté, vysokoprocenní vápence = reine, hochprozentige Kalksteine*
- *jílové, prachové, silikátové znečištění = Ton-, Staub- und Silikatverschmutzung*
- *Hydraulické vápno = Hydraulischer Kalk*
- *Vzdušné vápno = Luftkalk*



## Rozmanitost přírodních surovin

---



*Radotínský vápenec*



*Řeporyjský vápenec*



*Nedvědicový mramor*



*Kotýnský vápenec*



*Kopanínský vápenec*

8

## Vielfalt der natürlichen Rohstoffe

Kalkstein aus:

Radotín

Řeporyje

Nedvědice

Kotýnský

Kopanina

## Archeologické nálezy pecí

---



9

## Archäologische Funde von Öfen

## Pece – Mokrý, 13./14. století

---



*Kos, P., Válek J. Experimentální výpal vápna v šestikanálové vápenné peci z období vrcholného středověku v Mokrý. Archeologia technica: 27 (2016), s. 32-50.*

10

## Experimentelle Öfen – Mokrý, 13./14. Jh.

Kalkbrennen in einem sechskanaligen Kalkbrennofen aus dem Hochmittelalter in Mokrý

## Pece – Žďár nad Sázavou

---

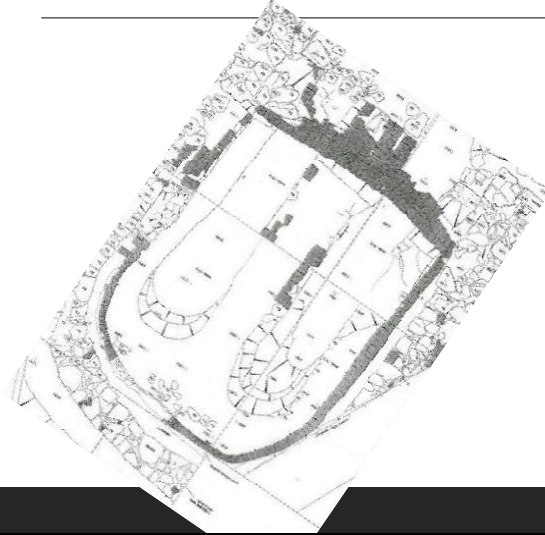


11

## Öfen – Žďár nad Sázavou

## Pece – Kutná Hora druhá pol. 17. stol.

---

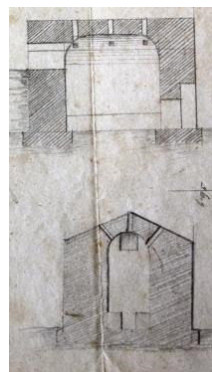


12

## Öfen – Kutná Hora, 2. Hälfte des 17. Jhs

## Pece – Přečín, pol. 19. stol

---

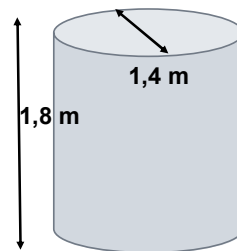


13

## Öfen – Přečín, Hälfte des 19. Jhs

## Pece – Skýcov, poč. 20. stol.

---



14

Öfen – Přečín, Skýcov, Anfang des 20. Jhs

## Základy výpalu vápna



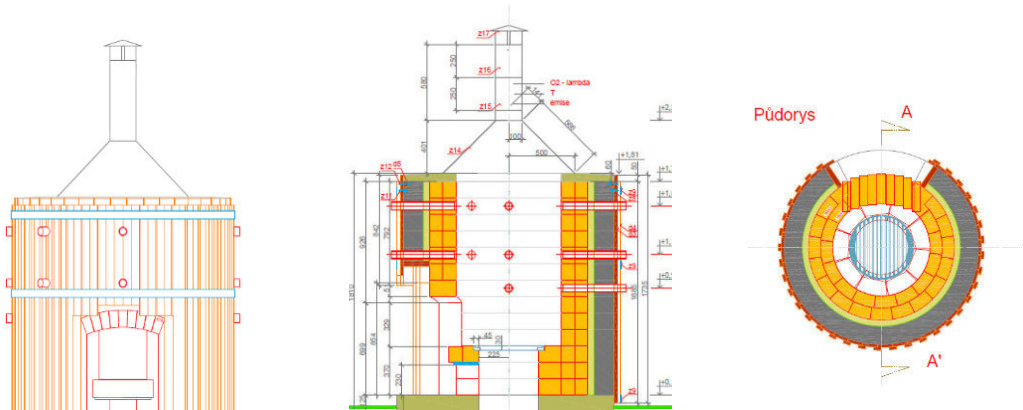
teplota výpalu (kamene)	nad <b>900 °C</b> , pod 1200 °C, teplota plamene v peci je vyšší
doba výpalu	1-5 dní
suroviny	čistý vápenec, bílý v. zahliněný, křemičitý vápenec
palivo	dřevo, rákos ... dlouhý plamen dřevěné uhlí, rašelina, uhlí... krátký plamen
vápno	ruční výběr, vytřídění kvality, zpracování probíhá mimo pece
provoz	údržba, změna lokality, skládka odpadu, hliník (jíl)
produkce	sdužování do baterií, více tahových kanálů

## Öfen – Grundlagen des Kalkbrennens

- Brenntemperatur (Stein) über **900 °C**, unter 1200 °C ist die Flammentemperatur im Ofen höher
- Brenndauer 1-5 Tage
- Rohstoffe reiner Kalkstein, weißer kalkhaltiger, kieselhaltiger Kalkstein
- Brennstoff Holz, Schilf ... lange Flamme  
Holzkohle, Torf, Kohle ... kurze Flamme
- Kalk Handselektion, Qualitätssortierung, Verarbeitung erfolgt außerhalb des Ofens
- Betrieb Wartung, Standortwechsel, Deponierung, Aluminium (Ton)
- Produktion Batteriebündelung, mehrere Zugkanäle



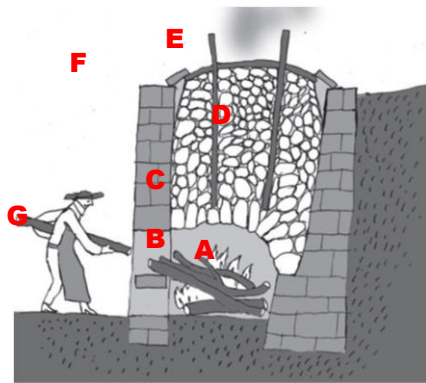
## Experimentální pec



16

## Experimenteller Ofen

## Tradiční výpal vápna dřevem



- A – zaklenutí
- B – objemný prostor topeniště
- C – vsázka kamene podle rozložení tepla
- D – tahové kanály rovnáním kamene/dřevěné kůly
- E – jílová čepice po „roztopení“ pece
- F – korekce tahu během výpalu
- G – sledování průběhu výpalu

## Traditioneller Kalkbrand mit Holz

A – Wölbung

B – großer Raum des Feuerraums

C – Steinladung entsprechend der Wärmeverteilung

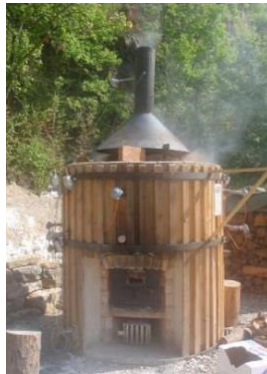
D – Spannungskanäle durch Richten von Stein-/Holzpfählen

E – Tondeckel nach dem „Schmelzen“ des Ofens. F – Zugkorrektur während des Brennens

G – Verfolgung des Schussfortschritts

## Experimentální pec v Solvayových lomech

---



18

Experimenteller Ofen in den Steinbrüchen von Solvay

## Vápenné pece v NTM - CSD Plasy



19

## Kalköfen – Plasy

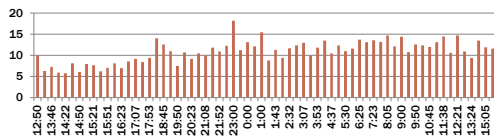
## Experimentální vápenná pec

---



## Experimenteller Kalkofen

## Výpal vápna



příkladání po 0,5 h – směs měkkého a tvrdého dřeva

vápenec 1000 kg, dřevo 700 kg → vápno 560 kg

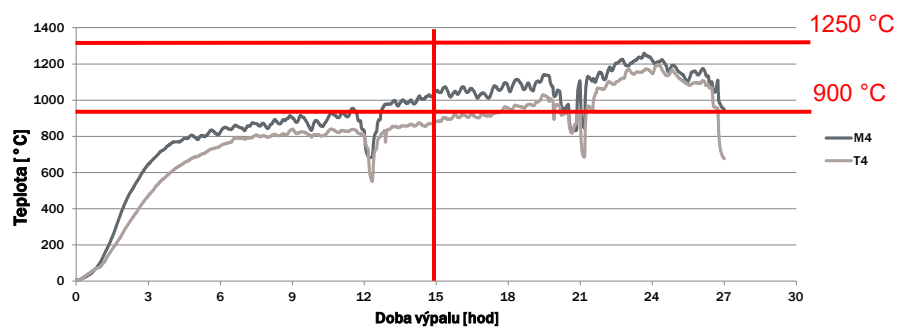


## Kalkbrand

Einlegen nach 0,5 h – eine Mischung aus Weich- und Hartholz

Kalkstein 1000 kg, Holz 700 kg → Kalk 560 kg

## Průběh teplot – výpal IV/2012



## Temperaturverlauf – Brand

## Palivo

---

- ❖ Na výpal je potřeba přibližně stejné váhové množství paliva jako vápence.
- ❖ Přeprava materiálu má vliv na umístění pecí.
- ❖ Suché dřevo – dostatečná teplota, mokré – vyšší spotřeba/delší čas, max. T?
- ❖ Odlesnění v blízkosti vápenek a sídel.
- ❖ Nedostatek dřeva - velké plochy sběru dřevin, alternativní paliva – výpal krátkým plamenem – změna typu pecí.

## Brennstoff

- Zum Brand wird ungefähr das gleiche Gewicht an Brennstoff wie Kalkstein benötigt.
- Der Transport des Materials beeinflusst den Standort der Öfen.
- Trockenes Holz - ausreichende Temperatur, nasses Holz - höherer Verbrauch/längere Zeit, max. T?
- Abholzung der Wälder in der Nähe von Kalköfen und Siedlungen.
- Holzmangel - große Holzammelgebiete, alternative Brennstoffe - Kurzflammenfeuerung - Änderung des Ofentyps.



## Zpracování páleného vápna

---



Verarbeitung von Branntkalk

## Způsoby hašení vápna

---

Hašení - reakce páleného vápna s vodou

Rozpad kusového vápna na malé částice

Mokrý hašení v nadbytku vody

Suché hašení na prach

Hašení vápna s pískem



25

## Methoden zum Löschen von Kalk

Löschung - Reaktion von Branntkalk mit Wasser

Zersetzung von stückigem Kalk in kleine Partikel

- Nasslöschen mit Wasserüberschuss
- Trockenlöschen zu Staub
- Kalklöschung mit Sand

## Hašení vápna v hasnici

---



26

Kalklöschen

## Hašení na prach (AL, NHL)



- ❖ Vhodné pro hydraulické vápna = nižší množství volného vápna (CaO)
- ❖ Vhodné pro dávkování vápna v suchém stavu – např. podlahy



27

## Löschen auf Asche (AL, NHL)

- Geeignet für hydraulischen Kalk = geringerer Anteil an freien Kalk (CaO)
- Geeignet zur Dosierung von Kalk im trockenen Zustand – z. B. Böden

## Hašení vápna na prach potopením do vody

---



Löschen auf Asche durch Eintauchen ins Wasser

## Hašení s pískem - všechny druhy vápen

---



Löschen mit Sand – alle Arten von Kalk

## Horká malta

---



## Heißer Mörtel

## Umění pálit vápno

---

### Cíl

- ❖ rovnoměrné vypálení celé vsázky
- ❖ u klenby získat měkce/středně pálené vápno
- ❖ nahoře vsázky mít dopáleno na 98+ %
- ❖ vyváženost nákladů a výsledku
- ❖ jít spát 😊

### Znalost

- ❖ specifika pece a jejího umístění
- ❖ stavba prostoru topeniště
- ❖ stavba průdušné klenby / celé vsázky
- ❖ dostatek vhodného a suchého paliva
- ❖ vyhnout se bouřkám / nepříznivým podmínkám
- ❖ trpělivost ke konci výpalu

## Die Kunst, Kalk zu brennen

### Ziel:

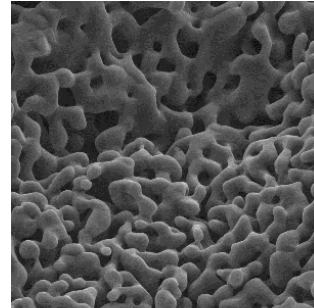
- gleichmäßiges Brennen der gesamten Charge
- weich-/mittelgebrannten Kalk am Gewölbe erhalten
- 98+ %
- Gleichgewicht zwischen Kosten und Ergebnissen
- schlafen gehen 😊

### Kenntnis:

- Besonderheiten des Ofens und seines Standorts
- Bau des Ofenbereichs
- Bau eines atmungsaktiven Gewölbes / Gesamtladung
- ausreichend geeigneter und trockener Kraftstoff
- Vermeiden Sie Stürme/widrige Bedingungen
- Geduld gegen Ende des Schusses



# Kvalita vápna ?



	TA		MIP	BET	GP		Reaktivita	
	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	CaCO <sub>3</sub> [%]			specifický povrch [m <sup>2</sup> /g]	měrná hm. [kg/m <sup>3</sup> ]	objem. hm. [kg/m <sup>3</sup> ]	t <sub>60 °C</sub> [min]
CCS 1	3,0	1,0	54,5	2,08	3300	1500	0,4	79,1
TCS I-1	5,9	0,9	49,2	1,55	3230	1640	2,4	79,5
TCS II-1	5,8	1,1	52,2	1,41	3200	1530	3,0	78,7

SEI 15.0 kV X1000.0 10.0um Det:SE  
View field: 6521.0um  
8830 10.0um 01/23/13  
MIRA3-PPROCAN  
ITAV

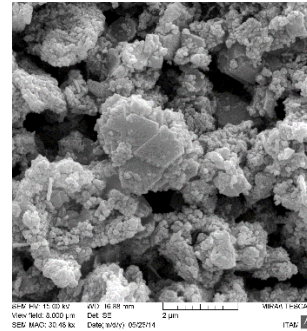
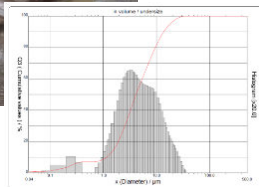
Kalkqualität?

# Uložení vápenné kaše



Vápenné jámy

- ❖ 40-46 % sušiny / 60-56 % vody
- ❖ 1250 – 1300 kg/m<sup>3</sup>



## Nachreifen der Kalkschlämme

vápenné jámy = Kalkgruben

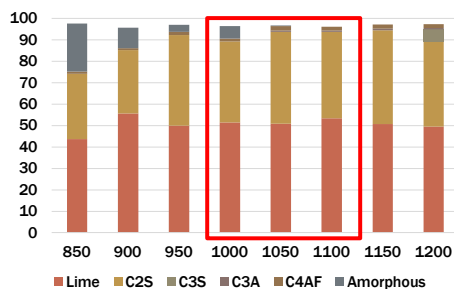
sušina = Trockenmasse

voda = Wasser

# Hydraulické vápno



Vliv teploty výpalu na vlastnosti NHL z dvorecko-prokopských vápenců



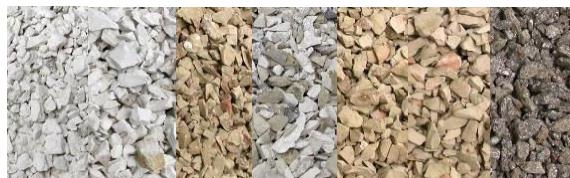
Válek, J., van Halem, E., Viani, A., Pérez-Estébanez, M., Ševčík, R., Šašek, P. Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes. *Construction and Building Materials*. 2014, 66(September), 771-780. ISSN 0950-0618. E-ISSN 1879-0526. Dostupné z: [doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.015](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.015).

## Hydraulischer Kalk

Einfluss der Brandtemperatur auf die NHL-Eigenschaften von Dvorecky-Prokop-Kalkstein

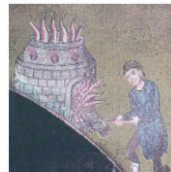
## Horká malta

	koněpruské v.	vitošovské v.	řeporyjské v.	zlíchov. v.	dvorecko-prokopské v.	kutnohorské vápence
<b>Cement. Index</b>	0,00	0,04	0,3	0,5	0,5	0,8
<b>Zbytek za 24h po vyhašení [%]</b>	<b>6,00</b>	<b>9</b>	<b>15,0</b>	<b>17,0</b>	<b>25,0</b>	<b>36,0</b>
Quartz			0,5	6,8	0,5	0,8
<b>C2S beta</b>	<b>0,2</b>		<b>2,2</b>	<b>1,4</b>	<b>6,6</b>	<b>12,5</b>
Wollastonite	0,1		0,8	0,4	2,3	2,6
Akermanite	0,1	0,1	2,4	0,1	3,4	3,4
Portlandite	<b>4,0</b>	5,9	0,8	2,1	1,0	1,8
Calcite	0,2	0,4	0,3	0,1		0,5
Amorphous	1,4	2,5	7,2	5,9	9,5	12,7



## Heißer Mörtel

## Je vápno vyrobené tradičním způsobem jiné?



- ❖ vysoce čisté zdroje
- ❖ vyráběno pro většinové odběratele
- ❖ výroba je optimalizována podle parametrů
- ❖ dodržení normativních požadavků

- ❖ široká škála vápencových surovin
- ❖ lokální využívání surovin
- ❖ výroba a zpracování je řemeslné umění
- ❖ tradiční postupy a technologie

zpracování vápna přímo z CaO umožňovalo dosáhnout specifických zpracovatelských vlastností  
slabě hydraulická vápna / velikost a heterogenita pojiva / dávkování

## Unterscheidet sich der auf traditionelle Weise hergestellte Kalk von den anderen?

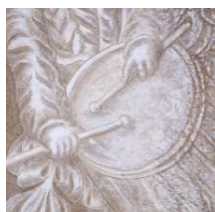
- hochreine Ressourcen
- hergestellt für Großkunden
- die Produktion wird entsprechend den Parametern optimiert
- Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen
- breite Palette von Kalkstein-Rohstoffen
- lokale Verwendung von Rohstoffen
- die Herstellung und Verarbeitung ist eine handwerkliche Kunst
- traditionelle Verfahren und Technologien

Durch die Verarbeitung von Kalk direkt aus CaO konnten spezifische Verarbeitungseigenschaften erzielt werden  
schwach hydraulischer Kalk / Bindemittelgröße und Heterogenität / Dosierung

## Klíčové studie

---

renesanční  
sgrafitové  
omítky  
*Slavonice*



středověké  
podlahové  
souvrství  
*rotunda sv.  
Víta, Pražský  
hrad*



barokní  
štuková  
výzdoba  
*Červená  
Lhota*



malta  
románského  
zdiva  
*kostel zv. sv.  
Bartoloměje,  
Pražský hrad*



# Schlüsselstudien

Sgraffitoputz der Renaissance  
*Slavonice*

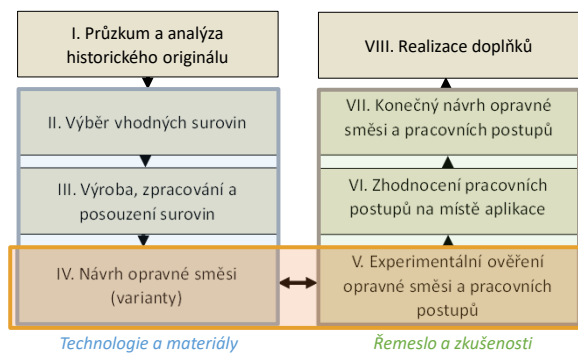
mittelalterliche Bodenschicht  
*St. Veits Rotunde, Prager Burg*

Barocke Stuckverzierung  
*Červená Lhota*

Mörtel des romanischen Mauerwerks  
*St.-Bartholomäus-Kirche, Prager Burg*



## Malta pro výrobu technologické kopie



# Mörtel zur Herstellung einer technischen Kopie

- I. Recherche und Analyse des historischen Originals
- II. Auswahl geeigneter Rohstoffe
- III. Herstellung, Verarbeitung und Bewertung von Rohstoffen
- IV. Vorschlag der Reparaturmischung (Varianten)

## *Technologie und Materialien*

- VIII. Realisierung von Zubehör
- VII. Dier endgültige Vorschlag der Reparaturmischungen und Arbeitsabläufe
- VI. Bewertung der Arbeitsabläufe am Einsatzort
- V. Experimentelle Überprüfung von Reparaturmischungen und Arbeitsabläufen

## *Handwerk und Erfahrung*

## Slavonice, dům čp. 545



Sgraffito: jádrová omítka, barevná (písková) vrstva (5-10 mm) a vápenný nátěr (0,2-0,6mm)

Stopy:

- Stínování pomocí prokletu a šrafováním
- Horizontální stopy štětce - vápenný nátěr
- V barevné vrstvě - bílé „vápenné kousky“

## Slavonice, Haus Nr. 545

Sgraffito: Kernputz, farbige (Sand-)Schicht (5-10 mm) und Kalkanstrich (0,2-0,6 mm)

Spuren:

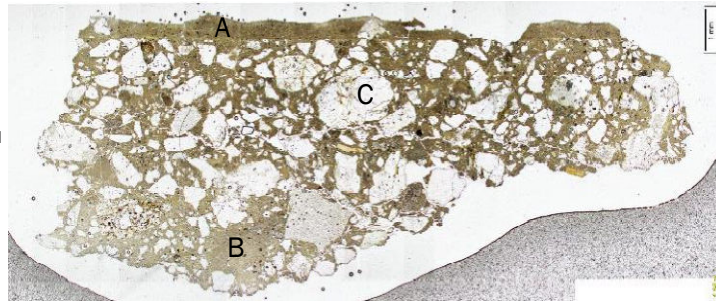
- Schattierung durch Interlace und Schraffur
- Horizontale Pinselstriche - Kalkfarbe
- In der Farbschicht - weiße "Kalkstücke"

## Mikroskopický popis

---

- A - nátěr
- B - pojivo barevné vrstvy
- C - plnivo barevné vrstvy

Odhad poměru pojiva ku plnivu  
1,5:1 obj.% z plochy



## Mikroskopische Beschreibung

A - Beschichtung

B - Bindemittel der Farbschicht

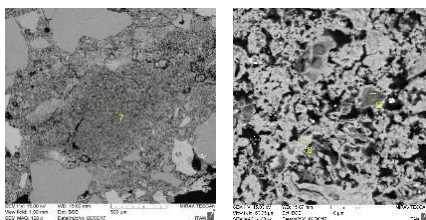
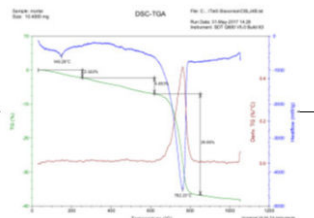
C - Füllstoff der Farbschicht

Schätzung des Verhältnisses von Bindemittel zu Füllstoff von 1,5:1 Vol.-% der Fläche

## Charakterizace barevné vrstvy

Kalcit  $58,2 \pm 0,1$       Křemen  $4,7 \pm 0,1$       Živce  $4,8 \pm 0,2$   
 Slídy  $2,7 \pm 0,1$       Lepidokrokit  $0,6 \pm 0,1$       Amorfní  $28,5 \pm 0,8$

- Kalcitické vzdušné vápno, nedolomitické
- Cementační index  $< 0,3$
- TA – 68%  $\text{CaCO}_3$ , XRD – 60%  $\text{CaCO}_3$
- Kalcium-silikátové částice

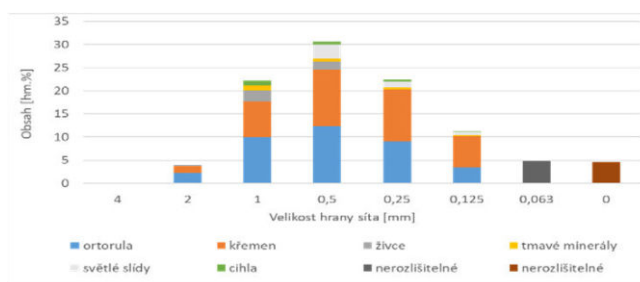
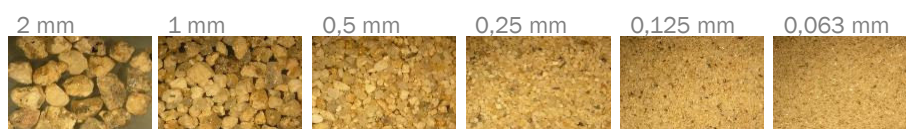


	Barevná vrstva		
	7 - pojivový shluk	8 - pojivo	9 - silikátová částice, bohatá na Mg
CaO	97,0	96,0	15,0
SiO <sub>2</sub>	1,6	1,6	50,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,4	2,1
MgO	1,4	1,7	30,1
Na <sub>2</sub> O			
K <sub>2</sub> O			0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			0,5
SO <sub>3</sub>		0,4	1,0
Cl			
TiO <sub>2</sub>			
FeO			0,4
total	100,0	100,0	100,0
Cl	0,04	0,05	-

## Charakterisierung der Farbschicht

Calcit  $58,2 \pm 0,1$       Quarz  $4,7 \pm 0,1$       Feldspäte  $4,8 \pm 0,2$   
 Glimmer  $2,7 \pm 0,1$       Lepidokrokit  $0,6 \pm 0,1$       Amorphes  $28,5 \pm 0,8$

## Charakterizace barevné vrstvy - plnivo



## Charakterisierung der Farbschicht – Füllstoff

## Charakterizace barevné vrstvy – poměr složek

---

- Kontrola nerozpustnosti plniva
- Pojivo obsahuje: pojivové shluky, nedopálenou surovinu

	Rozpouštění [hm.%]	Hm. poměr Vápenná kaše	Hm. poměr Vápenný hydrát	Hm. poměr Horká malta
Pojivo	37,3	1,0	1,0	1,0
Plnivo	62,7	0,9	2,3	3,0

## Charakterisierung der Farbschicht - Verhältnis der Komponenten

- Prüfung der Unlöslichkeit des Füllstoffs
- Bindemittel enthält: Bindemittelklumpen, unverbranntes Rohmaterial

*rozpouštění = Auflösung*

*hm. poměr = Gewichtsverhältnis*

*vápenná kaše = Kalkschlamm*

*vápenný hydrát = Kalkhydrat*

*horká malta = Heißmörtel*



## Hledání, výběr a zpracování surovin - vápno

### Obecní lom v Nedvědicích

- Zhruba 100 km od Slavonic
- Kalcitické vápno  
(cementační index  $< 0,3$ ,  $\text{CaCO}_3 > 95\%$ )
- Kalcium-silikátové částice
- Nízký stupeň dolomitizace
- Dobrá dostupnost a kvalita



### Výpal suroviny

- Experimentální centrum v Solvayových lomech



## Suche, Auswahl und Verarbeitung von Rohstoffen – Kalk

### Städtischer Steinbruch in Nedvědice

- etwa 100 km von Slavonice entfernt (im Südwesten [Mährens](#) in [Tschechien](#))
- Calcitkalk (Zementierungsindex  $< 0,3$ ,  $\text{CaCO}_3 > 95\%$ )
- Calciumsilikatpartikel
- Geringer Dolomitisierungsgrad
- Gute Verfügbarkeit und Qualität

### Brand von Rohstoffen

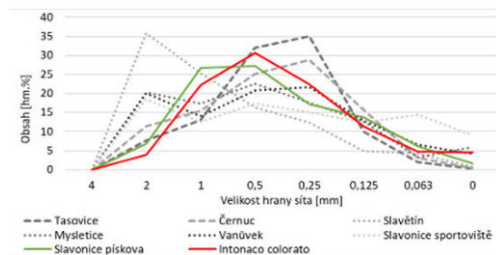
- experimentelles Zentrum in den Solvay-Steinbrüchen

## Hašení vápna – optimální zpracovatelnost



Kalklöschen - optimale Verarbeitbarkeit

## Hledání a výběr vhodných surovin - písek



### Písek v okolí Slavonic

- Eluviální ložiska, zvětralé nadloží ortorulového masivu
- Ostrohranné křemenné klasty, relikty ortoruly, živce, světlé a tmavé slídy
- Maximální velikost částic 4 mm
- Barevnost



## Suche, Auswahl und Verarbeitung von Rohstoffen – Sand

### Sand um Slavonice

- Eluviale Ablagerungen, verwittertes Deckgebirge des orthorhombischen Massivs
- Östrogene Quarzklasten, Überreste von Ortorula, Feldspäte, helle und dunkle Glimmer
- Maximale Korngröße 4 mm

- Farbe

## Pracovní postup - aplikace

- Zhodnocení aplikačního procesu na základě zkušebních panelů
- Optimalizace obsahu vody
- Optimalizace aplikačních technik
  - nahazování vs. natahování
  - počet aplikačních vrstev
  - časování a posloupnost jednotlivých kroků



## Arbeitsablauf – Anwendung

- Bewertung des Anwendungsverfahrens anhand von Testplatten
- Optimierung des Wassergehalts
- Optimierung der Anwendungstechniken
  - Anwerfen vs. Streckung
  - Anzahl der Anwendungsschichten

- Zeitpunkt und Reihenfolge der Schritte

## Rekonstrukce

Technologická kopie vyžaduje použití stejných materiálů a technik jako při výrobě originálu.



Erhard Schön, Landsknechts. Colour woodcut, 1532–1542. Printed by Hans Guldenmund in Norimberk. Herzog Anton Ulrich Museum, Braunschweig, sign. ESchon WB 3.11 a ESchon WB 3.10.



48

## Rekonstruktion

Eine technologische Kopie erfordert die Verwendung der gleichen Materialien und Techniken wie das Original.



## Rekonstrukce výjevu Landsknechtů

---



Rekonstruktion der Szene der Landsknechte

## Rekonstrukce sgrafita

---



## Rekonstruktion des Sgraffitos

#### Vápenné technologie

- ❖ Kvalita vápna byla zajištěna řemeslnou znalostí.
- ❖ V minulosti byla používána vzdušná i přirozeně hydraulická vápna.
- ❖ Vlastní zpracování vápna umožňovalo jeho univerzální využití.
- ❖ Replikace technologií umožňuje zpětné poznání historických materiálů a technik.

#### Sgrafito

- ❖ Byla navržena maltová směs barevné vrstvy a vápenného nátěru.
- ❖ Materiálová kompatibilita byla splněna na základě fyzikální a chemické podobnosti materiálů.
- ❖ Vybrané suroviny byly zpracovány na základě znalostí historických stavebních technologií.
- ❖ Správný výběr surovin a jejich zpracování se ukázaly jako klíčové při replikaci studovaného sgrafita.
- ❖ Experimenty provedené na zkušebních panelech umožnily následný návrh aplikačního postupu.

VÁLEK, J., SKRUŽNÁ, O., WAISSEROVÁ, J., WICHTERLOVÁ, Z., MAŘÍKOVÁ-KUBKOVÁ, J., KOZLOVCEV, P. *PODLE STARÉHO VZORU: REKONSTRUKCE MALT, SGRAFIT A ŠTUKŮ. PRAHA: ÚSTAV TEORETICKÉ A APLIKOVANÉ MECHANIKY AV ČR, V. V. I., 2021. ISBN 978-80-86246-95-6.*  
[HTTPS://WWW.ITAM.CAS.CZ/MIRANDA2/EXPORT/SITESAVCR/UTAM/PUBLICATIONS/10.21495/98-7/PODLE-STAREHO-VZORU.PDF](https://www.itam.cas.cz/miranda2/export/sites/avcr/utam/publications/10.21495/98-7/podle-stareho-vzoru.pdf)

51

## Kalktechnologie

- Die Qualität des Kalkes wurde durch handwerkliches Können sichergestellt.
- In der Vergangenheit wurden sowohl Luftkalk als auch natürlich hydraulischer Kalk verwendet.
- Die eigentliche Verarbeitung des Kalks ermöglichte seine universelle Verwendung.
- Die Nachbildung der Technologien ermöglicht ein rückblickendes Verständnis der historischen Materialien und Techniken.

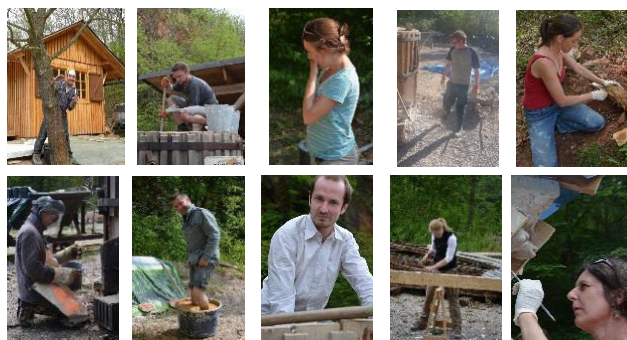
## Sgrafito

- Es wurde eine Mörtelmischung aus Farbschicht und Kalkfarbe vorgeschlagen.
- Die Materialkompatibilität wurde auf der Grundlage der physikalischen und chemischen Ähnlichkeit der Materialien hergestellt.
- Die ausgewählten Rohstoffe wurden auf der Grundlage des Wissens über historische Bautechnologien verarbeitet.
- Die richtige Auswahl der Rohstoffe und deren Verarbeitung erwiesen sich als entscheidend für die Reproduktion des untersuchten Sgraffitos.
- Anhand von Versuchen mit Testplatten konnte das Anwendungsverfahren

entwickelt werden.

**Děkuji za pozornost**

---



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

„Kalk in Denkmalpflege und Neubau: Ein altes  
Material neu entdeckt“ Symposium 04.10.2023  
*Wanja Wedekind*

Heiß- und basisch - Kulturleistung und  
Potential der Heißkalktechnologie zur  
Herstellung von hydraulischen Bau-  
und Werkstoffen in Vergangenheit,  
Gegenwart und Zukunft

[www.acs-online.eu](http://www.acs-online.eu)



## Hydraulisch

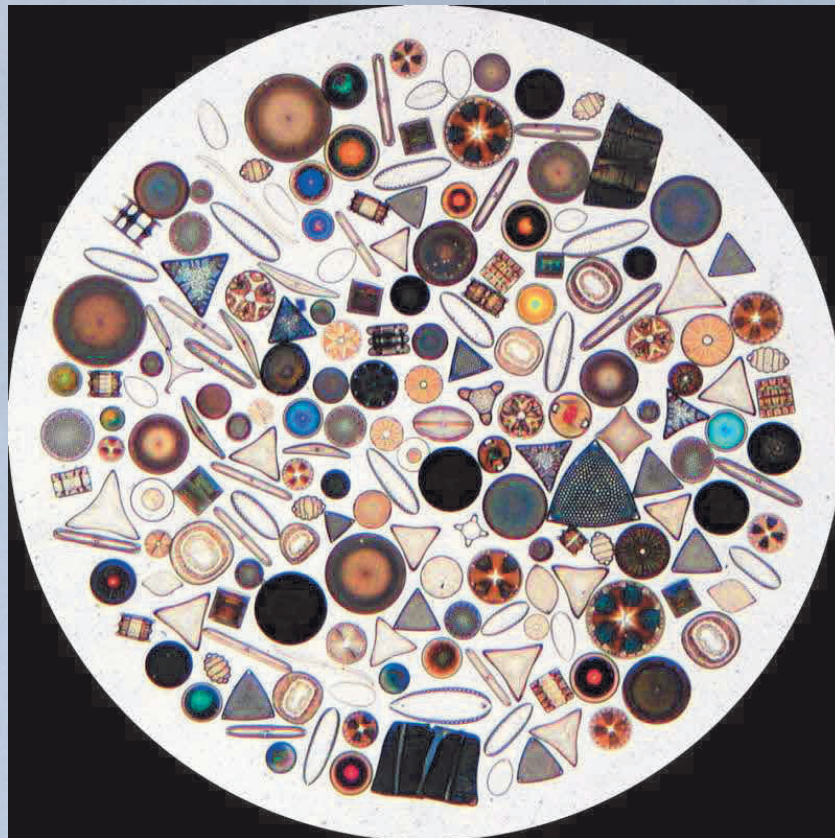
...die Fähigkeit von Baustoffen, sowohl  
an der Luft als auch unter Wasser zu  
härten

...die Fähigkeit von Baustoffen  
wasserfeste Verbindungen aufzubauen

# Die wichtigsten Lebewesen des Planeten

- Diatomeen-Algen liefern ca. 30% der weltweiten Sauerstoffproduktion.

- Sie bestehen aus mikroskopisch kleinen Zellen aus glasartigem Silikat.



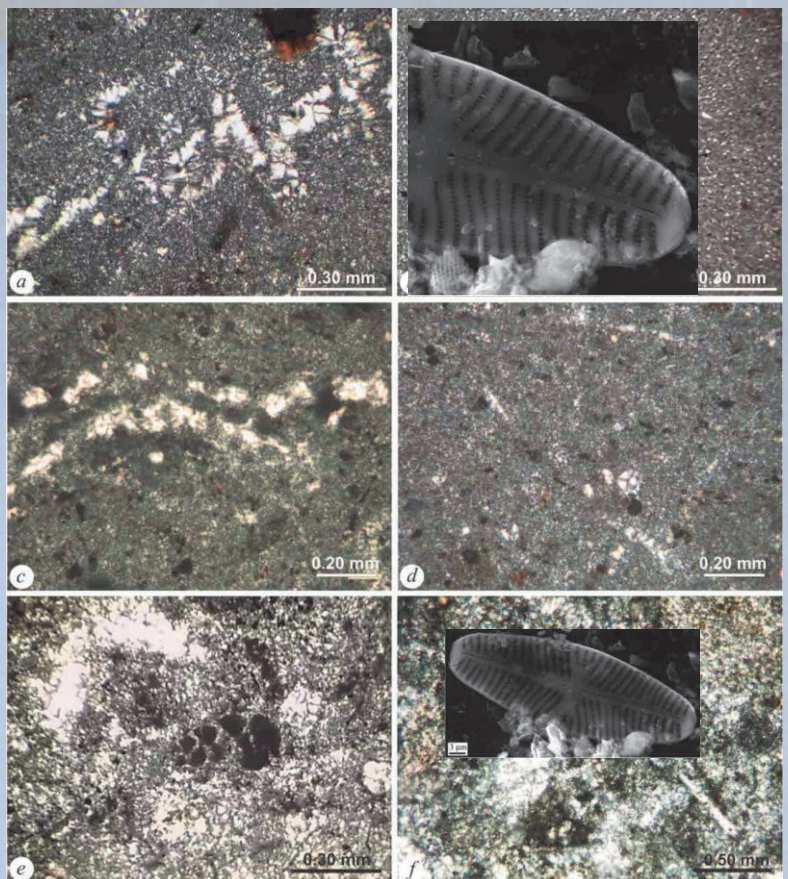
Abgestorbene Diatomeen-Algen bilden einen Bestandteil amorph strukturierter Flinesteine.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kieselalgen#/media/Datei:Diatom2.jpg>

# Flintstein - Das Material der Entwicklung



Flint in Dover-Kreidestein



**Maria Gurova, Polina Andreeva, Aleksandar Nikolov, Borislav Barbov, Maria Kostadinova-Avramova (2020)**  
Heat alterations of flint artefacts: archaeological evidence, experiments and analyses:  
Microphotographs of Balkan Flint and Kriva reka flint type: a) and b) Sample 1 (Balkan Flint) heated to 300°C; c) Artefact from the Ali Koch Baba Teke, Nikopol (Balkan Flint); d) Raw material, Pordim village (Balkan Flint); e) Sample 2 (Kriva Reka type) heated to 600°C; f) Artefact from Tell Nedoklan (Kriva Reka type). Note: all microphotographs are in cross-polarized light (photos by P. Andreeva)

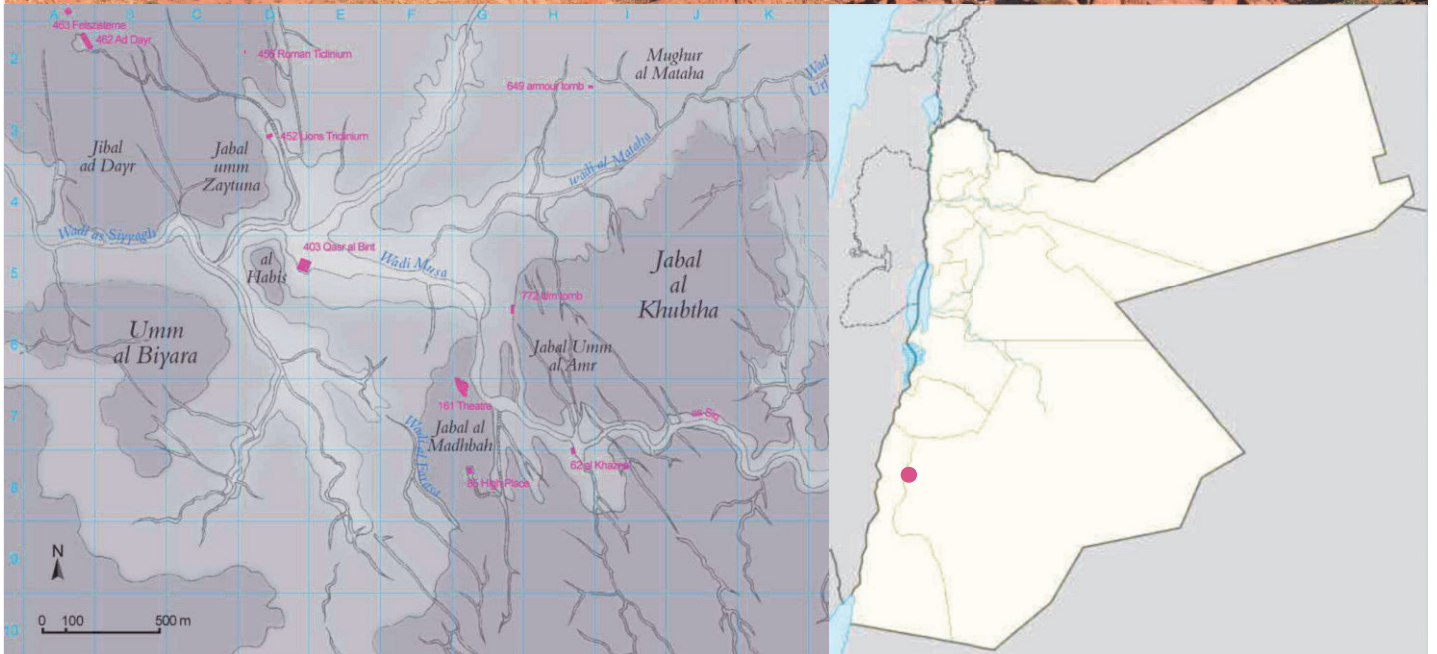
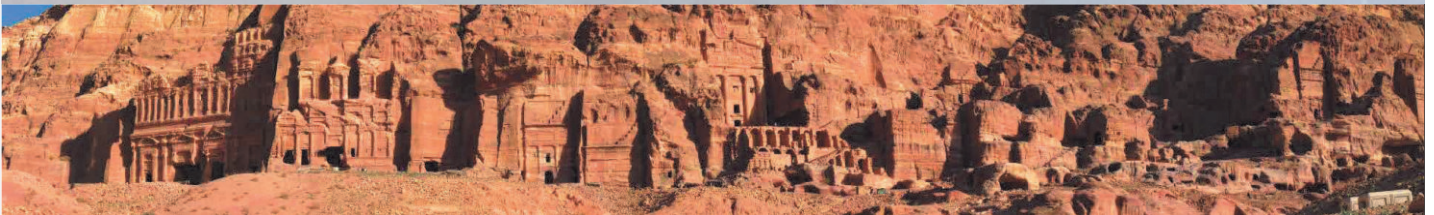
# Flintstein - Das Material der Entwicklung

- Flinstein war ein wichtiger Werkstoff für Klingen und Messer

- Flinstein kann jedoch auch ein Bestandteil von wasserfesten Mörteln sein.

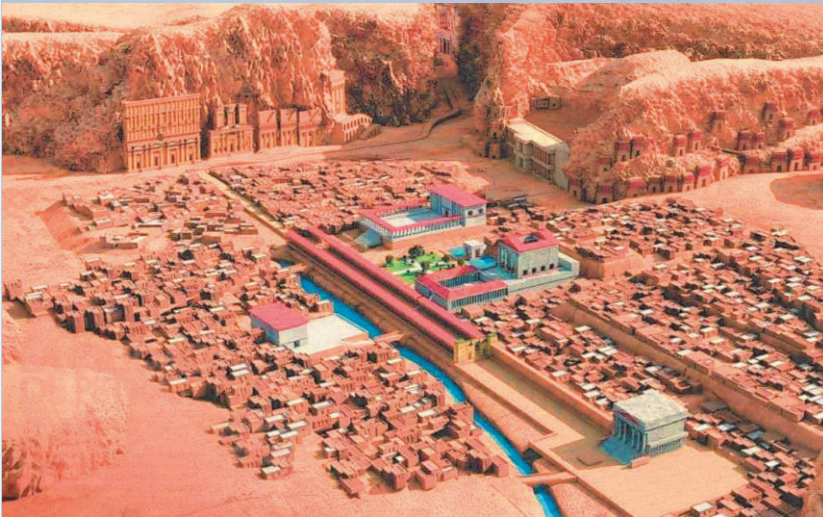


# Petra, Jordanien





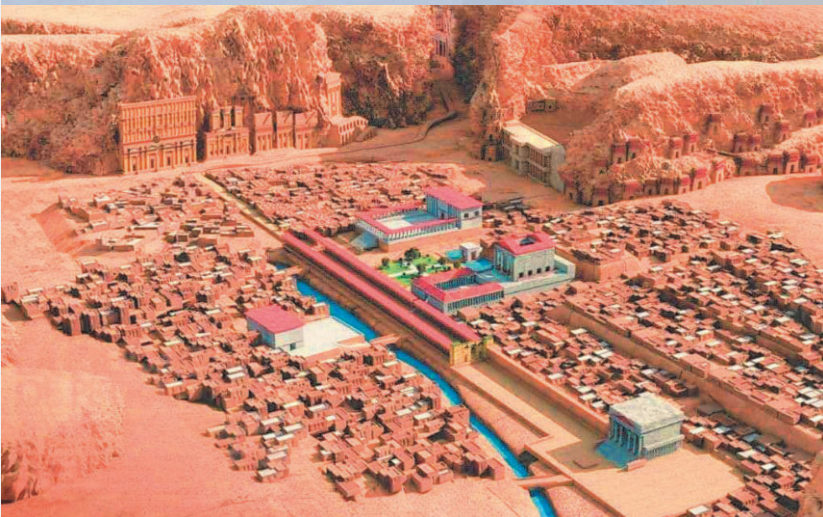
# Petra, Jordanien



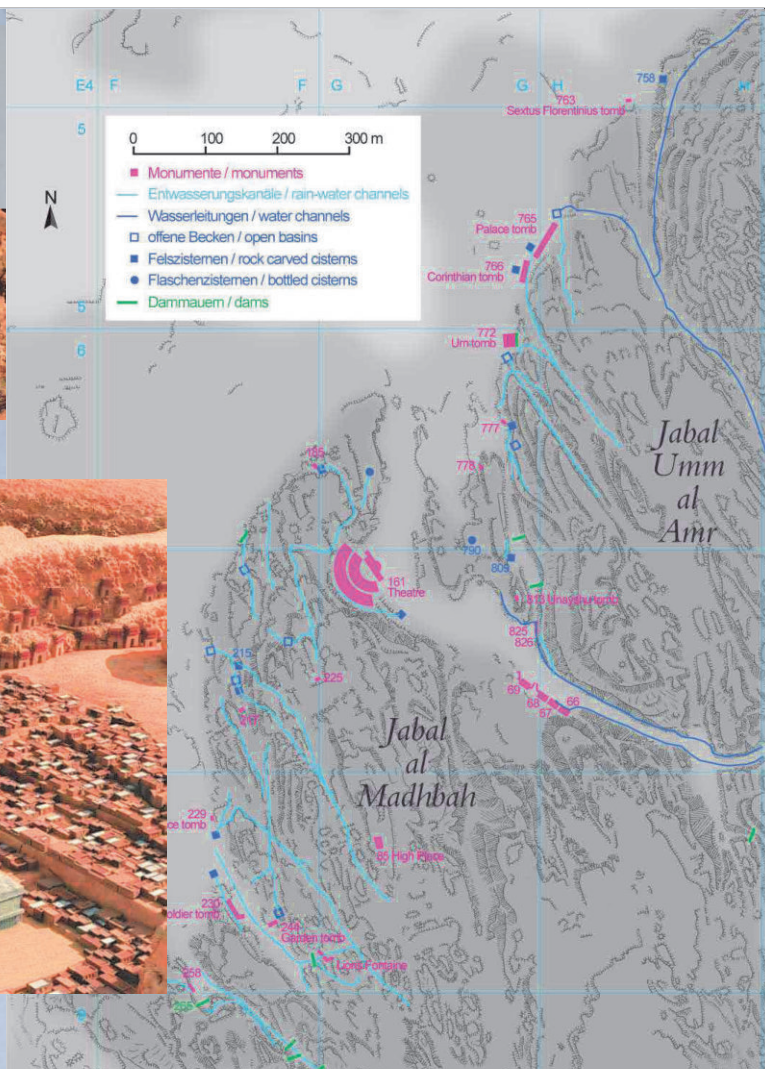
Dr. M.F. Kahn A Digital Reconstruction of Ancient Petra



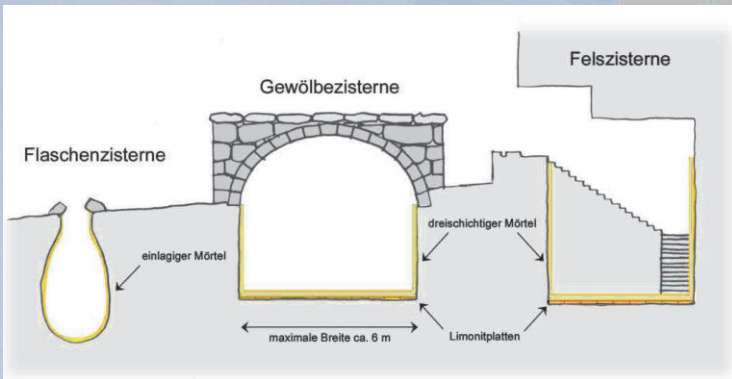
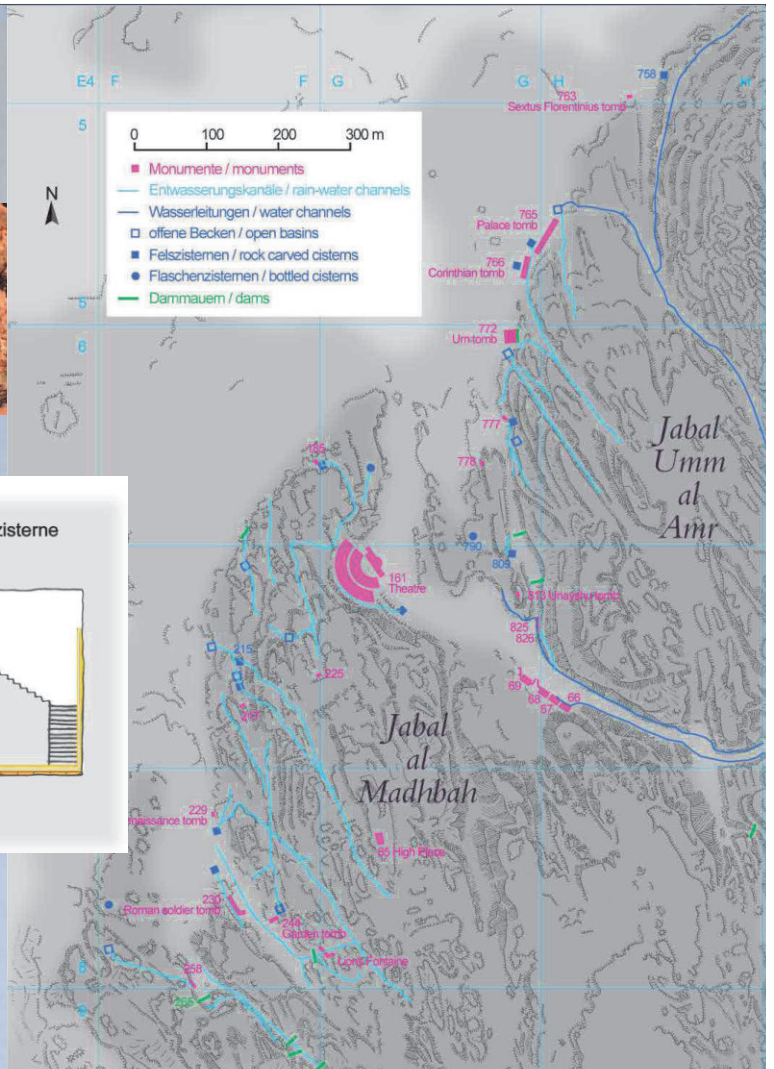
# Petra, Jordanien



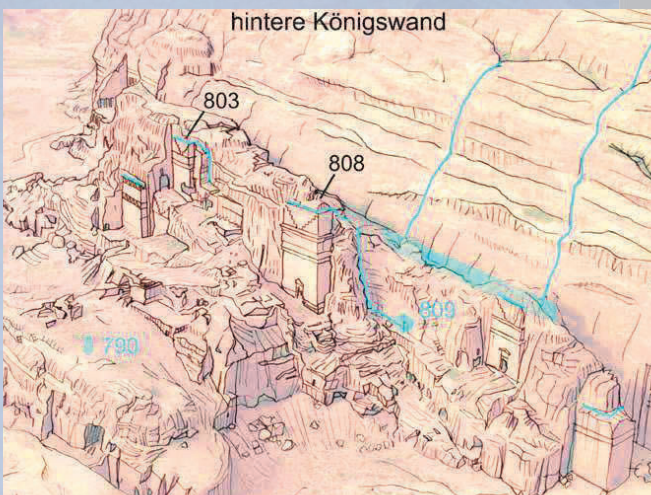
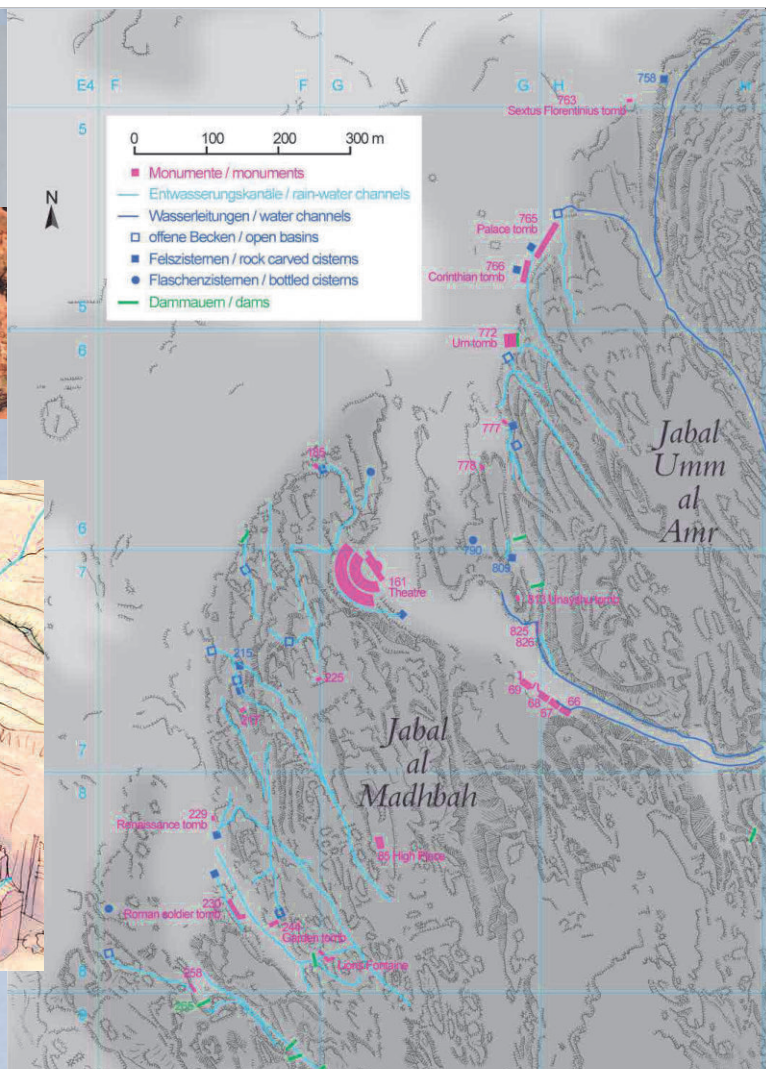
Dr. M.F. Kahn A Digital Reconstruction



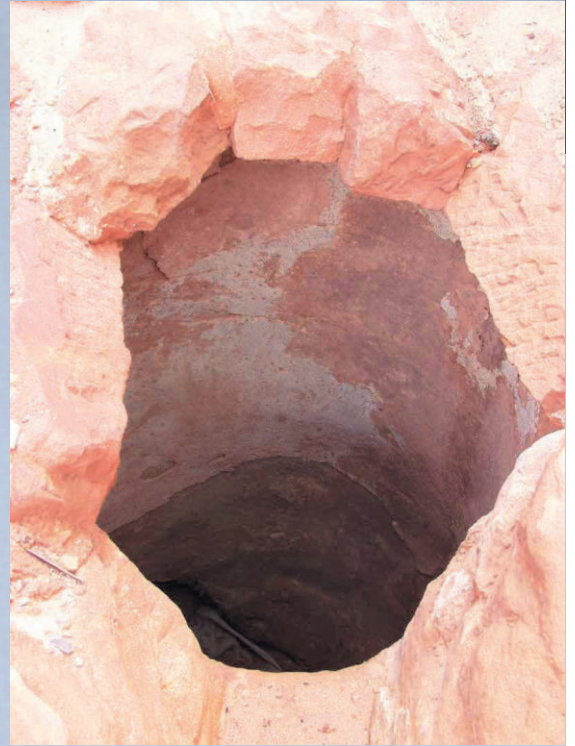
# Petra, Jordanien



# Petra, Jordanien



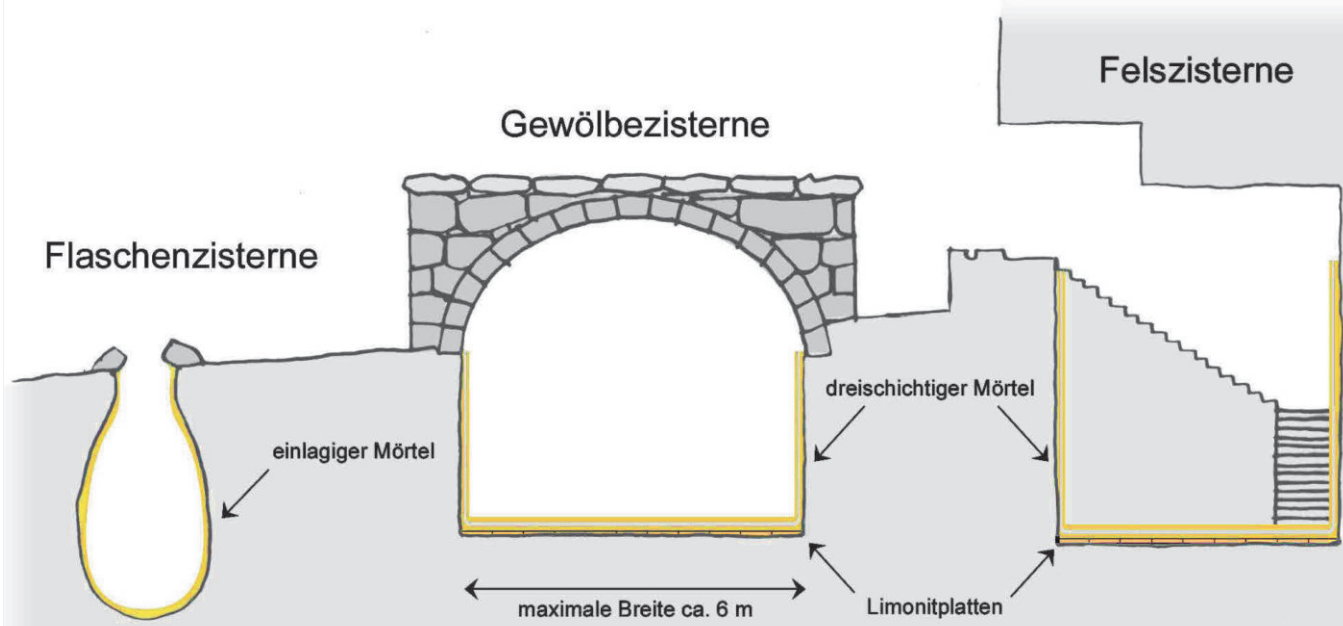
# Petra, Jordanien



# Petra, Jordanien

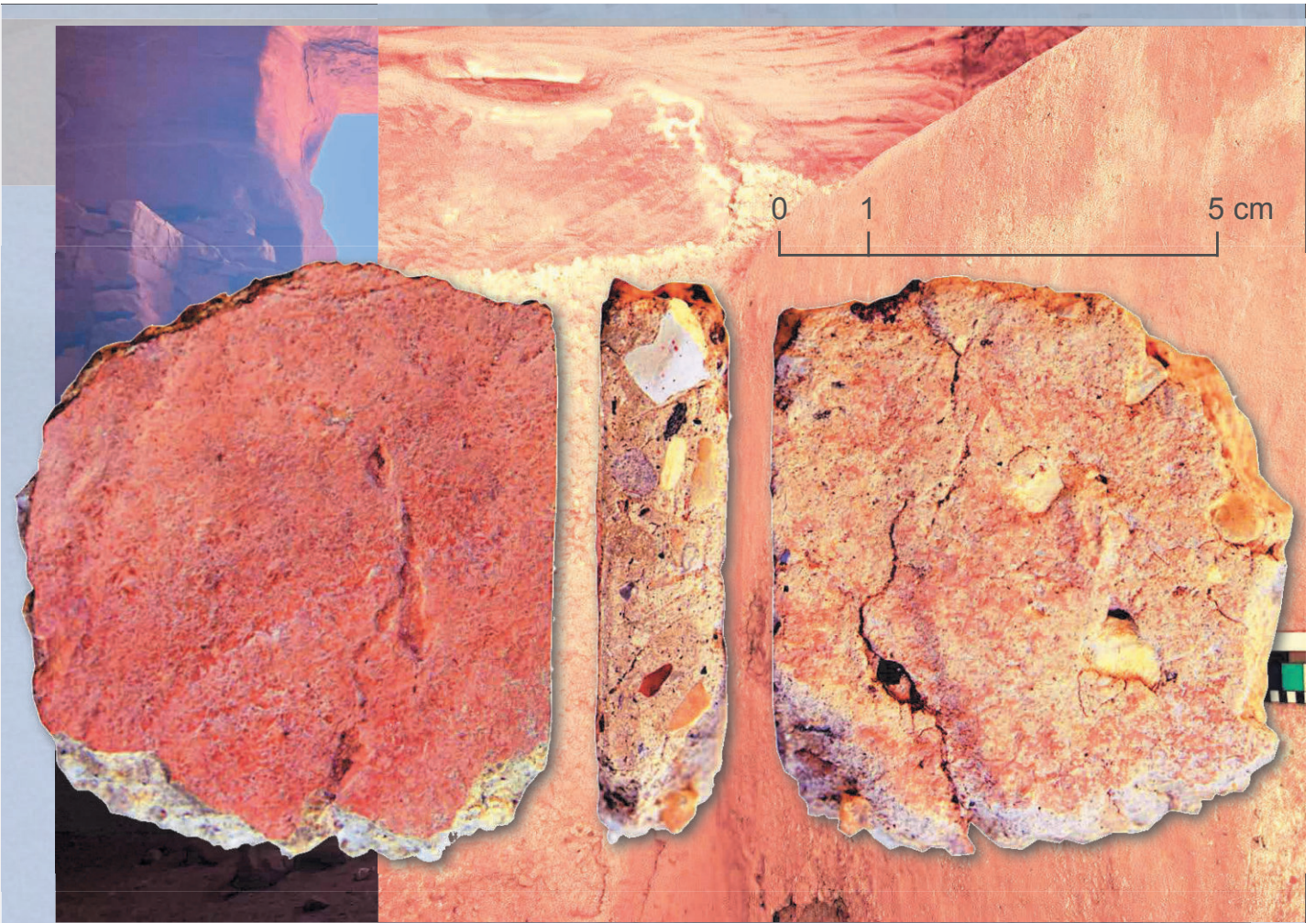


# Petra, Jordanien

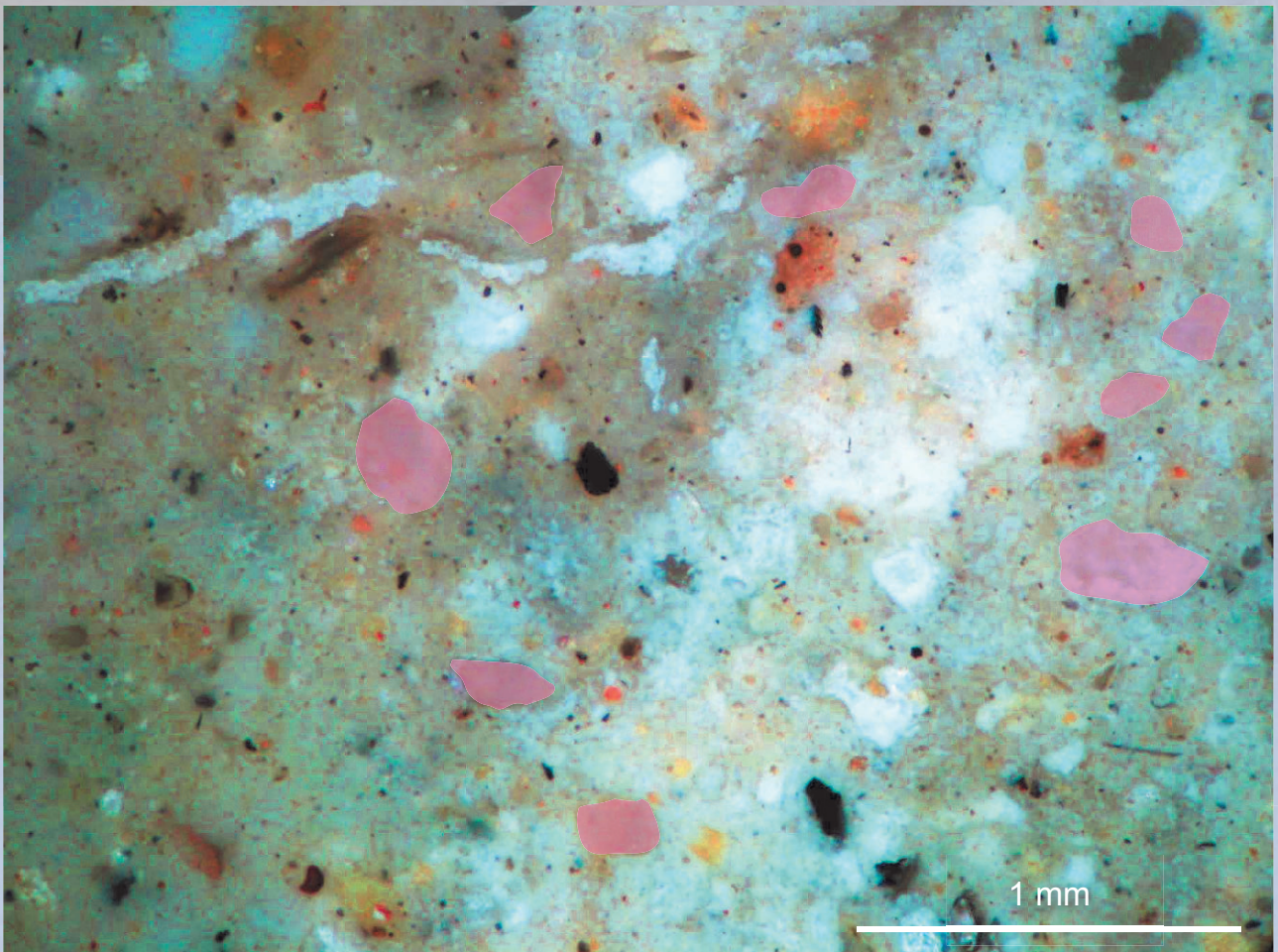


# Petra, Jordanien

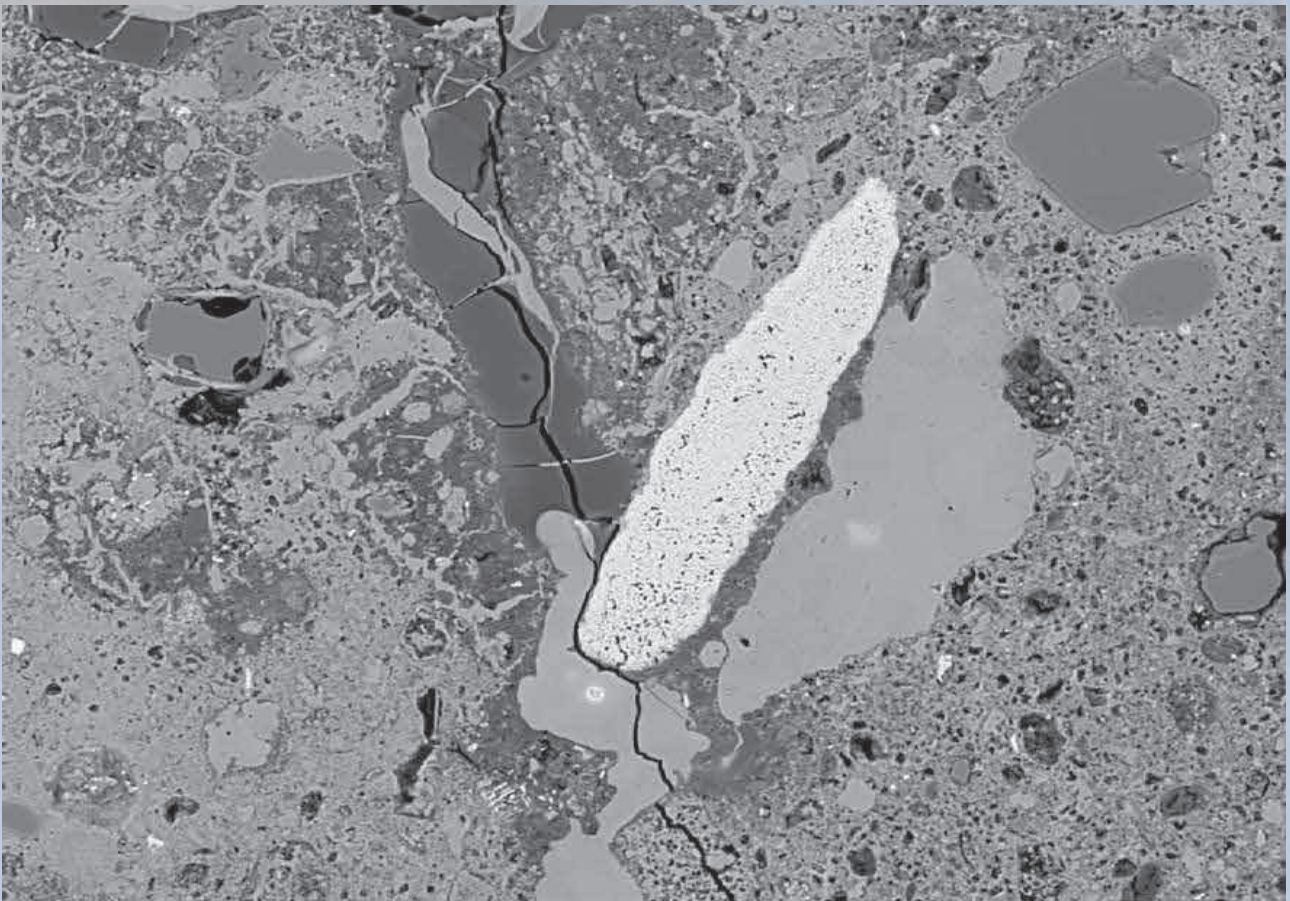




wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)



wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)



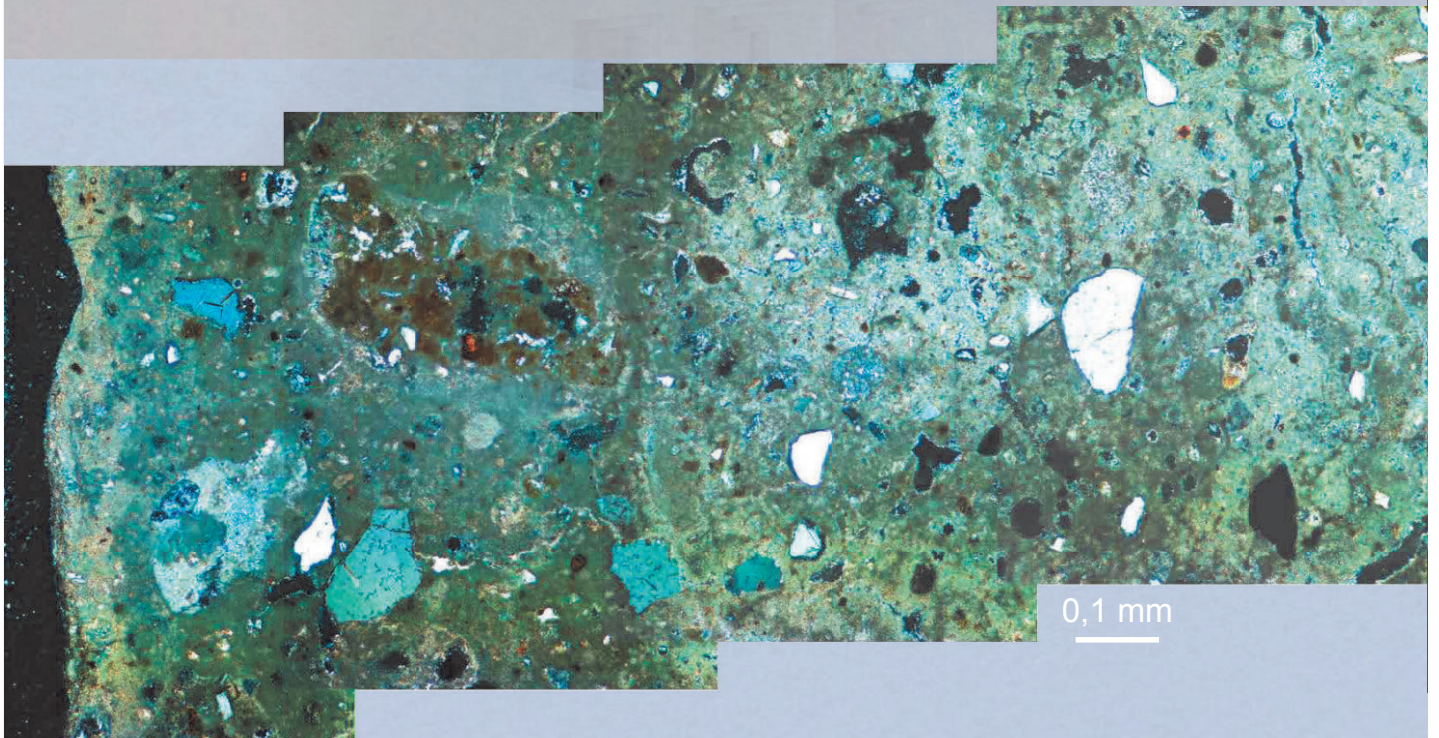
00011649

50  $\mu\text{m}$

Geochemie  
Göttingen

wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)

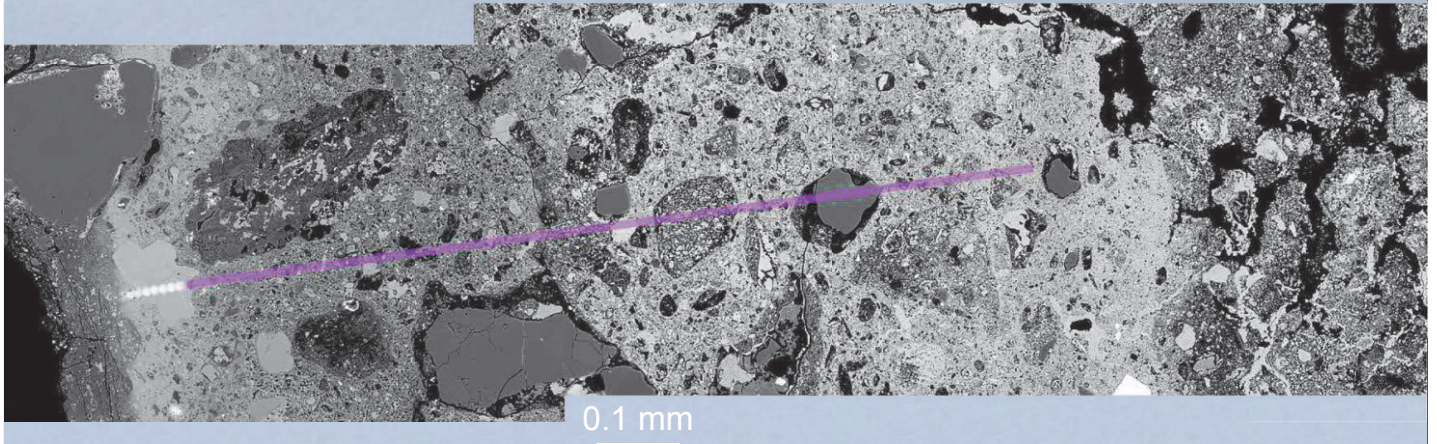
## Dünnschliff im polarisiertem Licht



0,1 mm

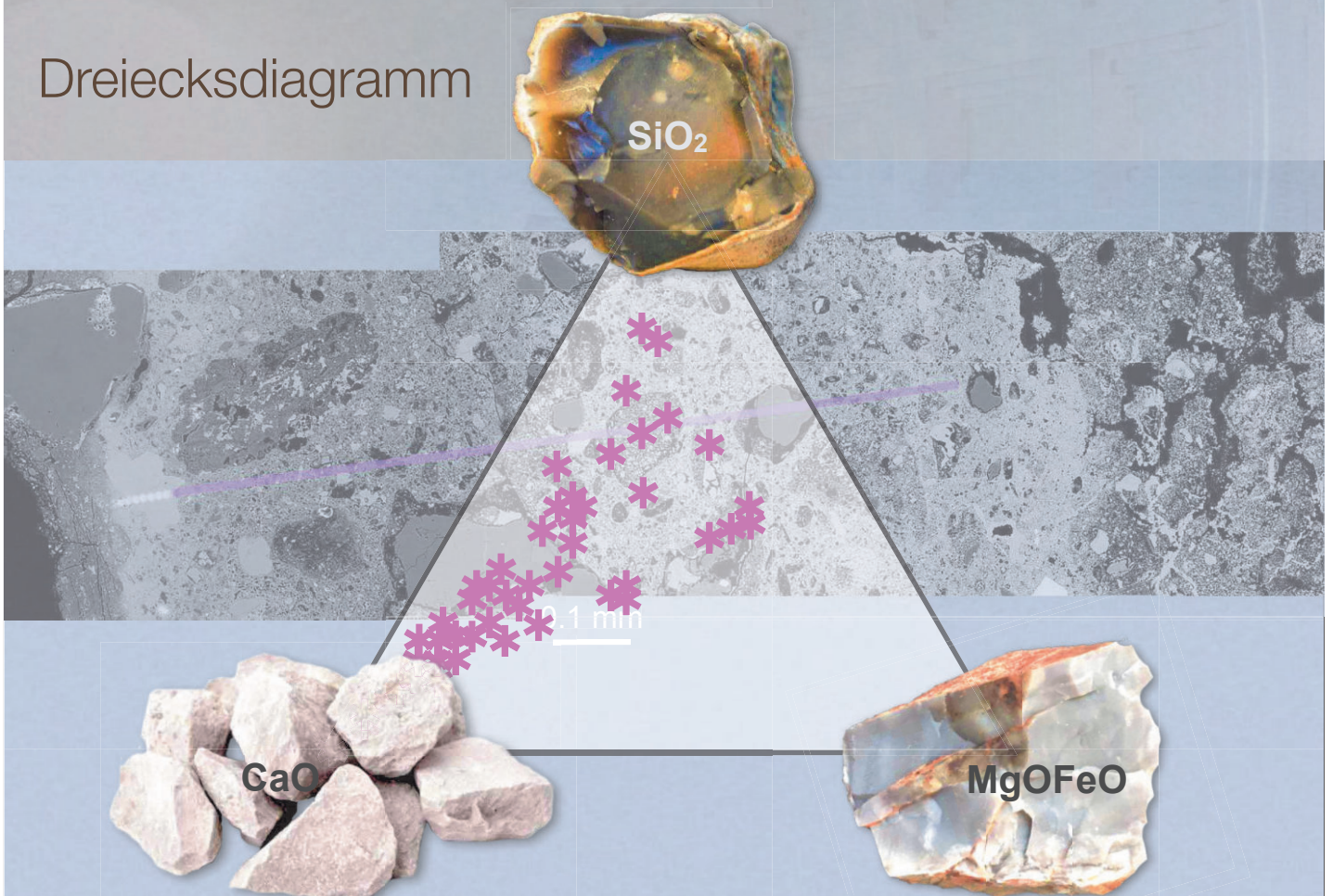
wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)

# Elektronenstrahl Mikrosonde

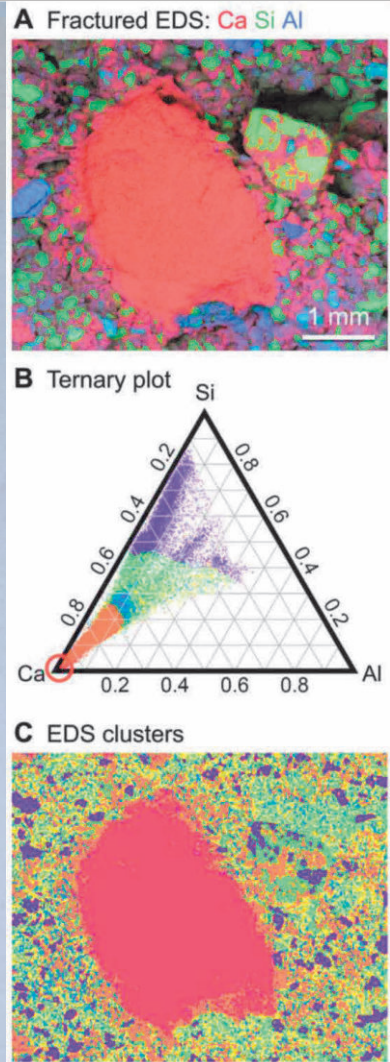
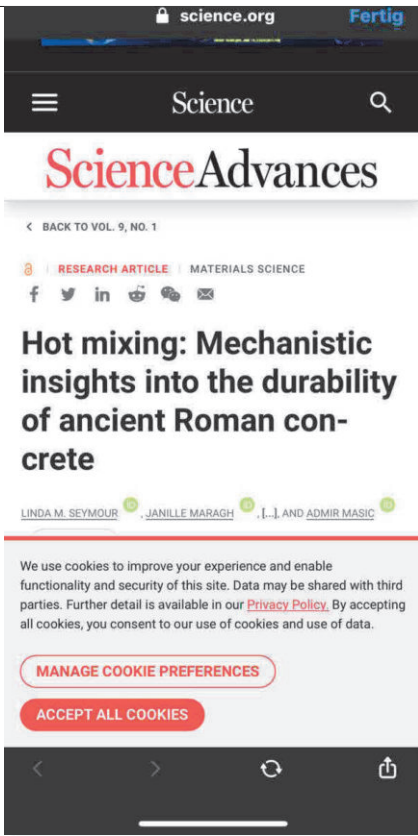


wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)

# Dreiecksdiagramm



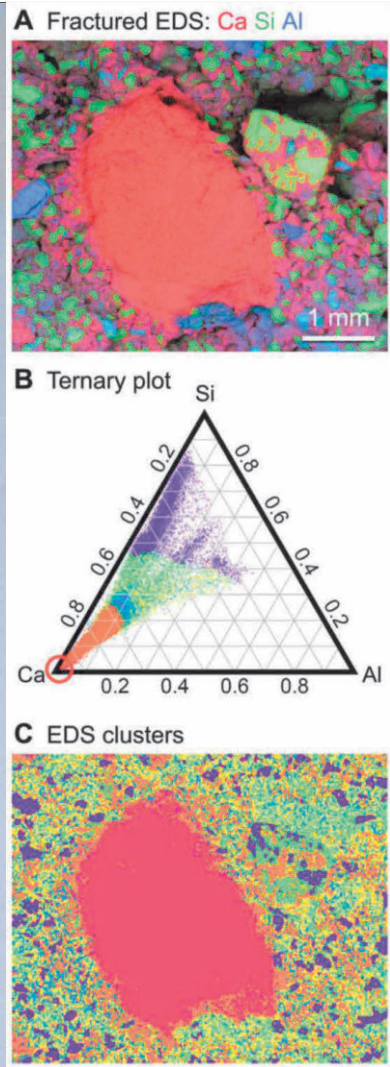
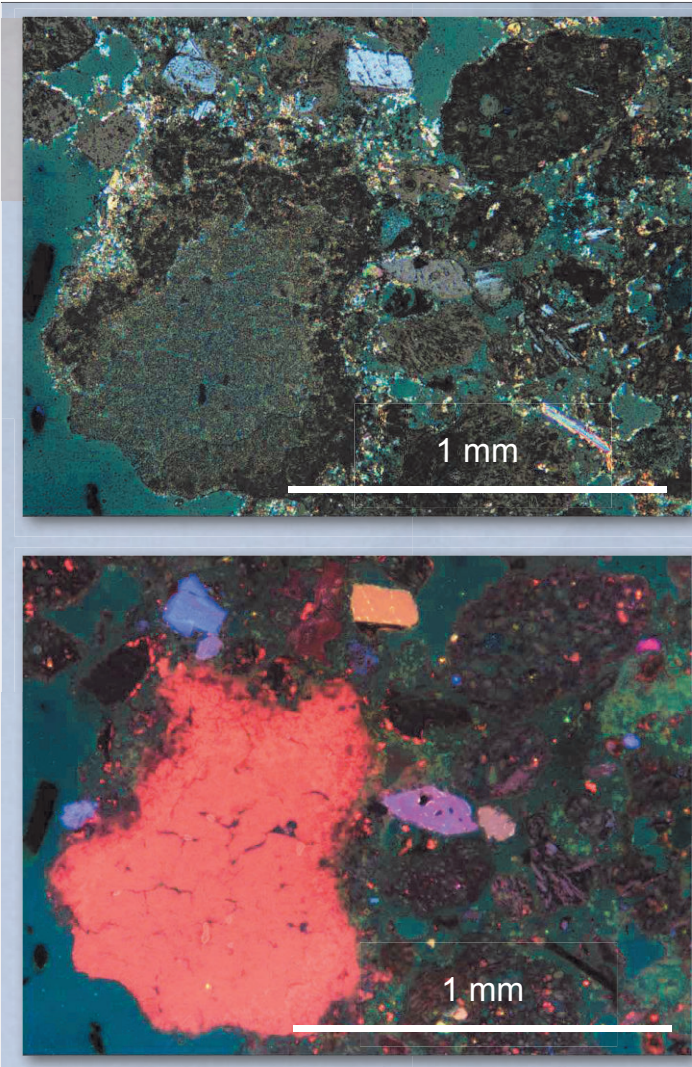
wasserunlöslicher (hydraulischer) Zisternenmörtel aus Zisterne Nr. 463, Petra (Jordanien)



Linda M. Seymour, Janille Maragh, Paolo Sabatini, Michel Di Tommaso, James C. Weaver, Admir Masic (2023) Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Sci. Adv.* 9, eadd1602 (2023).

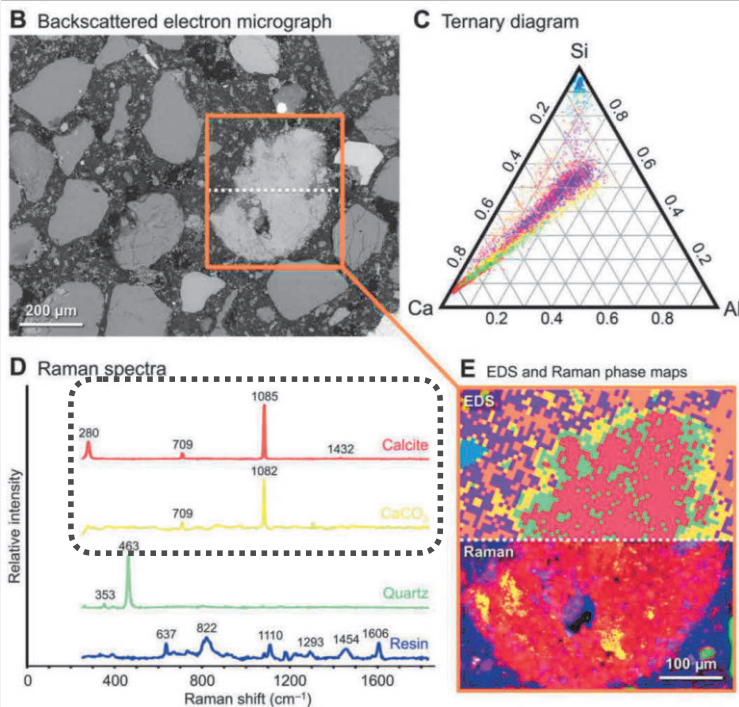
**Abbildung:** Multimodal compositional analysis of ancient Roman concrete. EDS maps of a freshly fractured surface (A), each pixel is replotted as a relative ratio of calcium, silicon, and aluminum on a ternary diagram (B). Pixels in the ternary diagrams and phase maps were colored on the basis of the cluster of EDS data to which they belong (C).



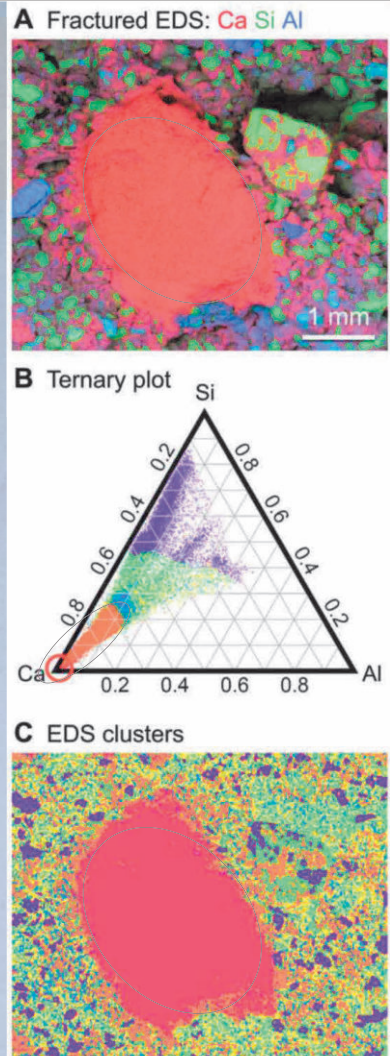


Linda M. Seymour, Janille Maragh, Paolo Sabatini, Michel Di Tommaso, James C. Weaver, Admir Masic (2023) Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Sci. Adv.* 9, eadd1602 (2023).

**Abbildung:** Multimodal compositional analysis of ancient Roman concrete. EDS maps of a freshly fractured surface (A), each pixel is replotted as a relative ratio of calcium, silicon, and aluminum on a ternary diagram (B). Pixels in the ternary diagrams and phase maps were colored on the basis of the cluster of EDS data to which they belong (C).

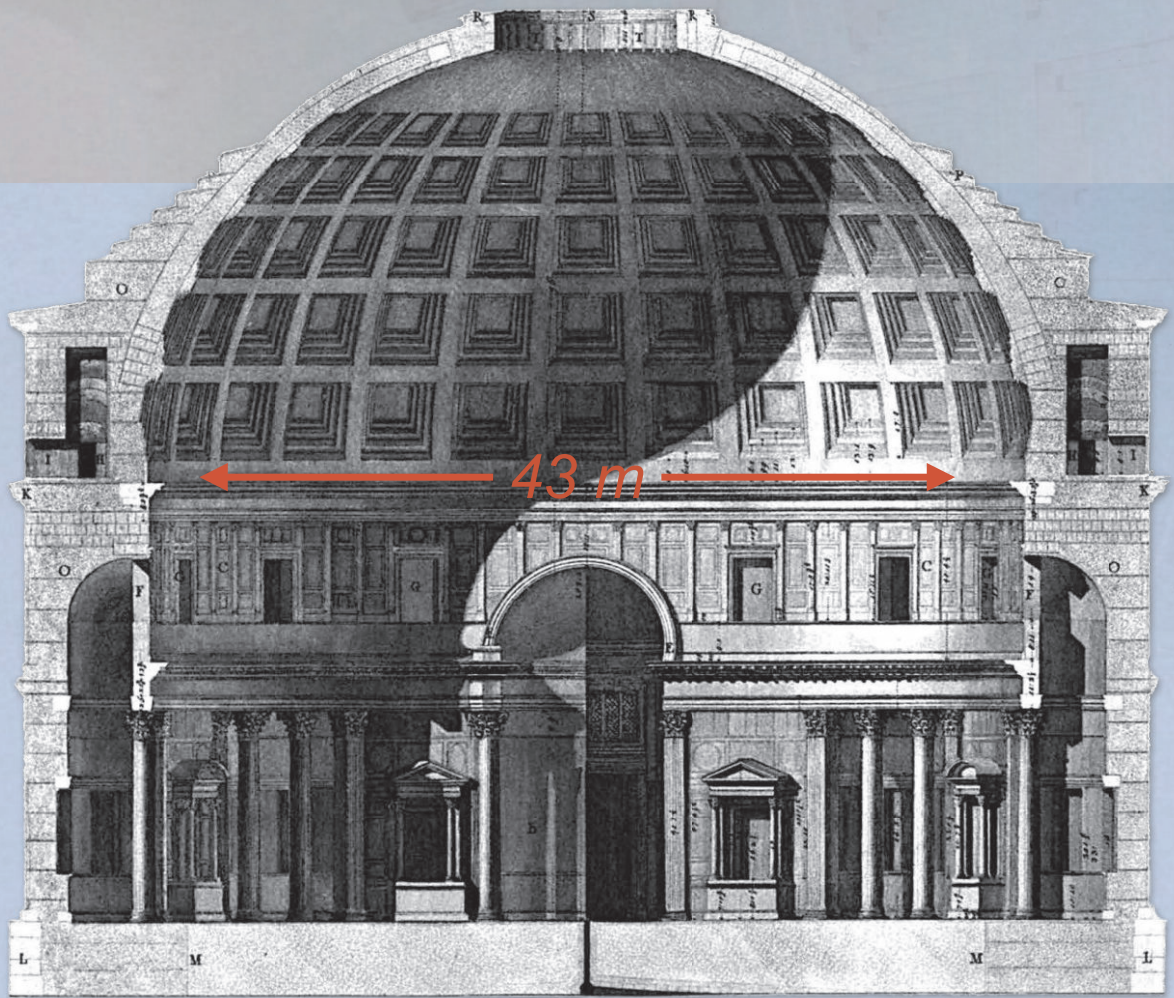


**Abbildung:** The chemical composition of a representative lime clast (denoted with an orange box) is explored in detail (B). Elemental composition from quantified EDS shows six clusters, presented on a ternary diagram of calcium, silicon, and aluminum (C), which are colored on the basis of the cluster of EDS data to which they belong. Raman spectroscopy (D) reveals calcite (red), additional calcium carbonate phases (yellow), quartz (green), and resin (blue), with the characteristic peaks indicated. The distribution maps of the identified phases (E) are shown on the basis of their corresponding EDS and Raman scan data: quartz aggregates (blue), resin-rich regions (orange), the cementitious matrix (purple), two clusters within the lime clast (green and red), and a clast reaction rim (yellow).



Linda M. Seymour, Janille Maragh, Paolo Sabatini, Michel Di Tommaso, James C. Weaver, Admir Masic (2023) Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Sci. Adv.* 9, eadd1602 (2023).

**Abbildung:** Multimodal compositional analysis of ancient Roman concrete. EDS maps of a freshly fractured surface (A), each pixel is replotted as a relative ratio of calcium, silicon, and aluminum on a ternary diagram (B). Pixels in the ternary diagrams and phase maps were colored on the basis of the cluster of EDS data to which they belong (C).



Pantheon, Rom/Italien, 126 AD

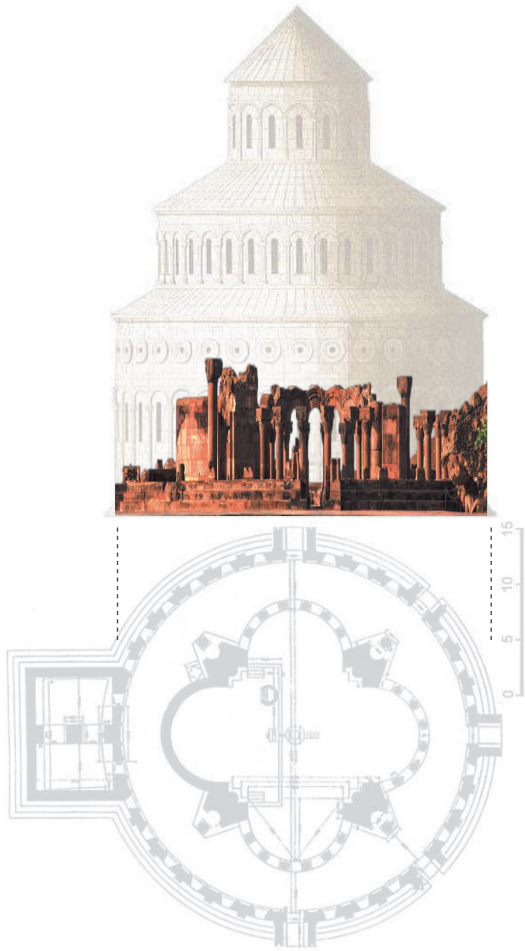
Stichwerk: Piranesi



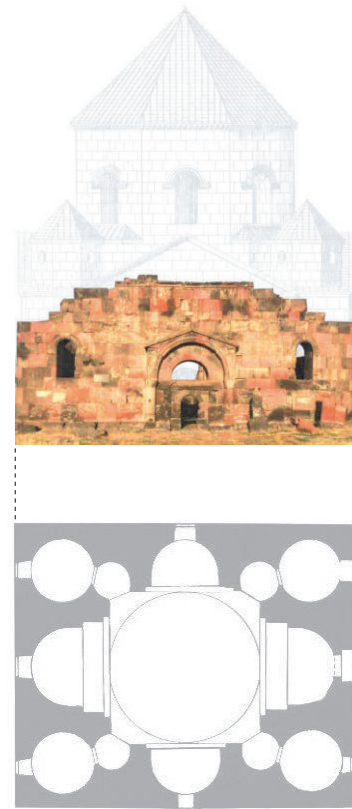
Atskuri Kathedrale, 1885 (heute Georgien)

Photo: Dimitri Ermakov

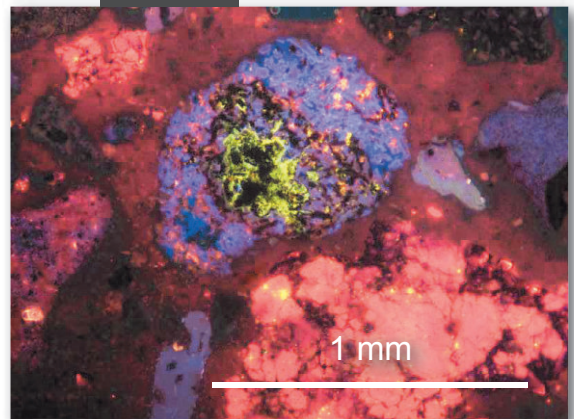
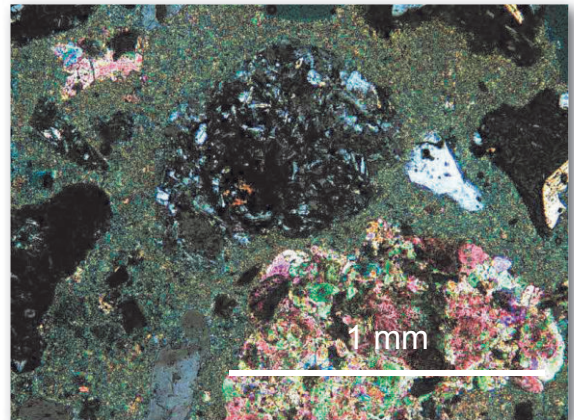
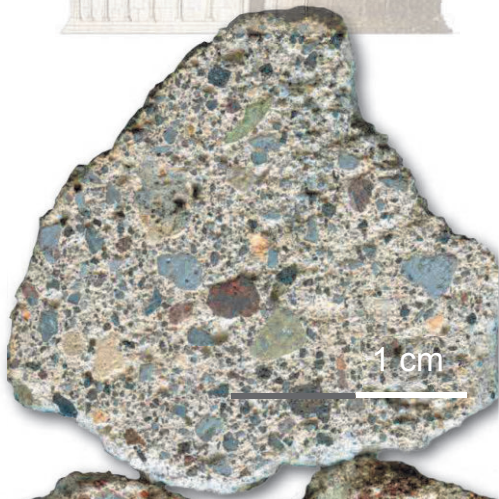
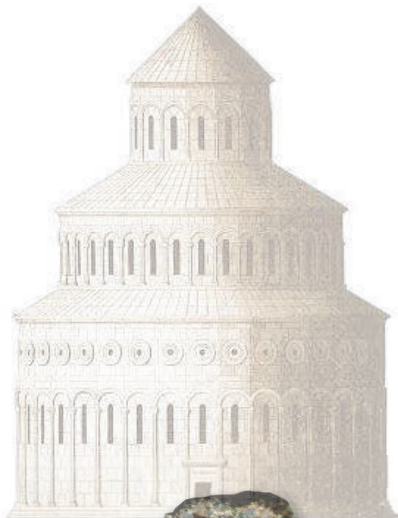
Zvartnots Kathedrale, 652 n. Chr. (Armenien)

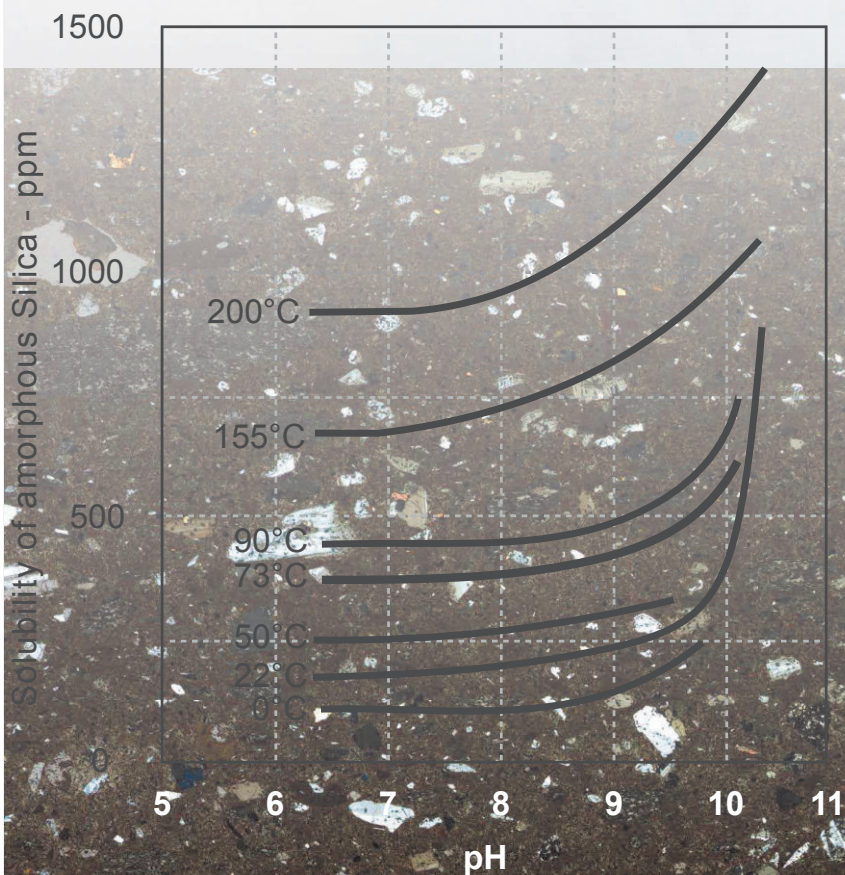
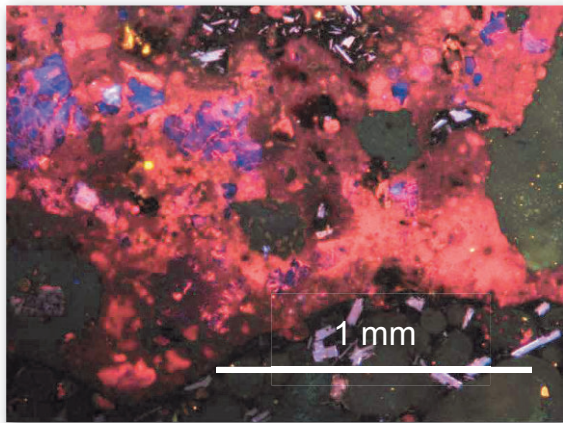
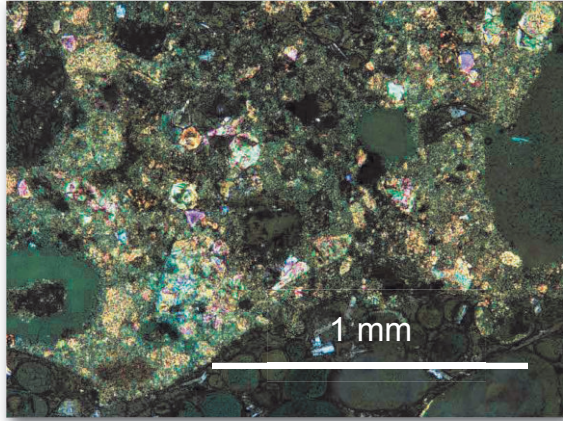


Avan Kathedrale, 591 n. Chr. (Armenien)



Zvartnots Kathedrale, 652 n. Chr. (Armenien)





ILLER, R.K. The Chemistry of Silica, Wiley, Interscience, New York, 1979.

1 mm

# Referenzen

**W. Wedekind.** Kalk kann mehr! Auf dem richtigen Weg. Aber auch auf dem richtigen Pfad? Neue Studie zu römischen Mörteln. *RESTAURO*, 3/2023, S. 28-31.

**W. Wedekind, E. Harutyunyan, S. Siegesmund.** The cathedral-ruins of Zvartnots and Avan (Armenia) – A comparative study on decay and restoration. In: Siegesmund, S. & Middendorf, B. (Eds.), *Monument future: Decay and Conservation of Stone. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone – Volume 1*, Mitteldeutscher Verlag 2020. S. 137 - 144.

**W. Wedekind, H. Fischer, A. Kronz.** Protection of the Sandstone Facades in Petra by new Conservation Techniques and the Reactivation of Ancient Drainage Systems and Mortars. Beitrag für die *VI International Conference: Science and Technology in Archaeology and Conservation*, 09. - 13. Dezember 2008, Rom, Italien.