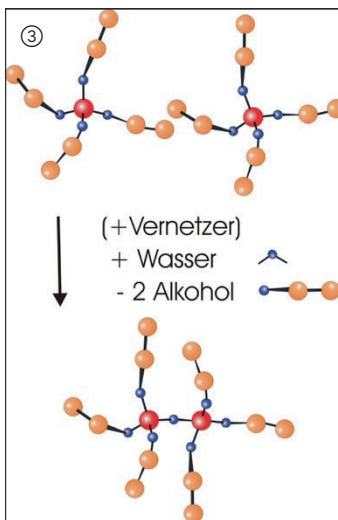
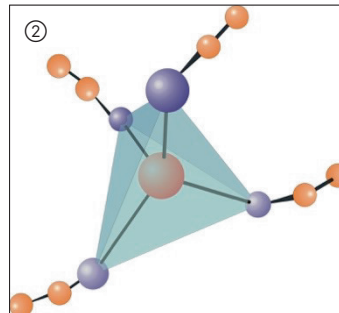
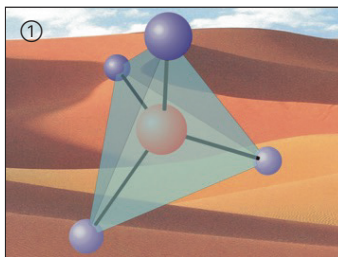


Steinfestiger: Die Steuerung von Gelabscheidungsraten und Eindringtiefen

Zur Konservierung verwitterter mineralischer Baustoffe ist neben der Bekämpfung bzw. Verminderung der Verwitterungsursachen (z.B. durch Quellminderung oder wasserabweisende Einstellung) häufig eine Konsolidierung des Gefüges erforderlich. Sie dient dazu, das ursprüngliche Festigkeitsniveau soweit wie möglich wieder herzustellen.



① Quarzsand = SiO_2 : Vierfach von Sauerstoffatomen (blau) umgebenes Siliciumatom (rot).

② Monomeres Kieselensäureester = Tetraethoxysilan ($\text{Si}(\text{OEt})_4$): Vierfach von Ethoxygruppen (= „OEt“; Alkoholgruppen; blau und orange) umgebenes Siliciumatom

③ Reaktion zweier monomerer Kieselensäureester-Moleküle (M: $2 \times 208 = 416$) zum Dimer (M: 342)

Hierfür werden seit Jahrzehnten Produkte auf der Basis von Kieselensäureester („KSE“; auch: „Kieselensäure-Ethylester“) eingesetzt.

Wichtigster Rohstoff zur Herstellung des Kieselensäureesters ist reiner Quarzsand (Abb. 1). Dieser wird in einem chemischen Prozeß durch das „Andocken“ von Alkoholgruppen zu flüssigem „Kieselensäureester“ umgewandelt. Allerdings fällt der Kieselensäureester bei diesem Prozeß nicht nur in Form der kleinst möglichen Baueinheit (als „Monomer“; Abb. 2) sondern auch in Form der davon abgeleiteten größeren Moleküleinheiten (z.B. als „Dimer“, „Trimer“ usw.; s. u.) an.

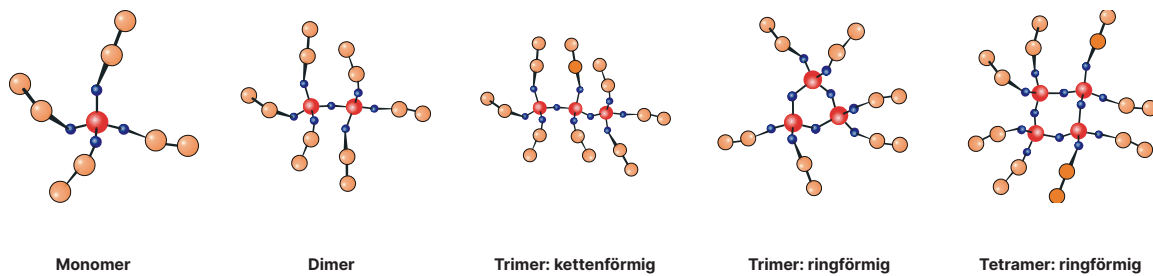
Formal entstehen die größeren Moleküle durch Reaktion kleinerer Baueinheiten, wobei jeweils ein Wassermolekül eingebaut und 2 Alkoholgruppen abgespalten werden (Abb. 3). Da dieser Alkohol verdampft, weist das größere Endmolekül eine geringere Masse als die Ursprungsmoleküle auf. So entsteht z.B. aus 2 monomeren Kieselensäureester-Molekülen mit einer Gesamtmasse von $2 \times 208 = 416$ g/mol das Dimer mit einer Masse von nur noch 342 g/mol.

Reagieren die Kieselensäureester-Moleküle zum Kieselgel (SiO_2), so werden formal alle Alkoholgruppen abgespalten. Je kleiner dabei das Ausgangsmolekül ist, umso größer ist der Gewichtsverlust pro Siliciumatom:

Größe des Kiesel-säureester-Moleküls	Zahl der zugehörigen Siliciumatome	Zahl der abspaltbaren Alkoholgruppen	Zahl der pro Siliciumatom abspaltbaren Alkoholgruppen	theoretischer SiO_2 -Gehalt (= „Gel-Abscheidungsrate“)
Monomer	1	4	4	ca. 29 [M-%]
Dimer (2er-Kette)	2	6	3	ca. 35 [M-%]
Trimer (3er Kette)	3	8	2,66	ca. 38 [M-%]
10er Kette (hypothetisch; s.u.)	10	22	2,2	ca. 45 [m-%]

Somit läßt sich die Gelabscheidungsrate KSE-basierender, lösemittelfreier Steinfestiger rein rechnerisch durch den Einsatz unterschiedlich großer Moleküle auf Werte zwischen ca. 29% und 50% einstellen. Es gilt: Je kleiner die im Steinfestiger enthaltenen KSE-Moleküle, desto geringer seine Gelabscheidungsrate.

Mit der Größe ändert sich auch die Struktur der Kieselsäureester-Moleküle: So kann das Monomer als „kugelig“ und das Dimer als „makaroniförmig“ beschrieben werden. Größere KSE-Moleküle bilden jedoch deutlich komplexere Strukturen (z.B. Ringe oder „echt“ dreidimensionale Strukturen) aus.



Größe und Struktur haben auch einen großen Einfluß auf die Fließfähigkeit der Moleküle: Je größer und je komplexer sie gebaut sind, um so größer ist die jeweilige Viskosität (=Zähigkeit), d.h. um so geringer ist ihre Fließfähigkeit. Dementsprechend zeigen KSE-basierende Steinfestiger um so höhere Eindringtiefen, je kleiner die zur Herstellung eingesetzten Kieselsäureester-Moleküle sind.

Ein Vergleich der Funcosil Steinfestiger 300 (lösemittelfrei) und OH (lösemittelhaltig) zeigt den Einfluß der Molekülgröße bzw. -struktur: Beide Produkte besitzen eine Gelabscheidungsrate von ca. 30%. Allerdings resultiert beim „OH“ ein Großteil des Gewichtsverlustes (ca. 70%) aus dem Abdampfen des Lösemittels (ca. 30%). Folglich ist nur der Rest des Gewichtsverlustes (ca. 40%) auf das Abspalten von Ethanol beim Gelbildungsprozeß und die immer geringfügig vorhandene Verdunstung des KSE selbst zurückzuführen.

Beim Steinfestiger 300 kann der Gewichtsverlust fast vollständig auf die Gel-Bildungsreaktion, d.h. auf das Abspalten von Ethanol zurückgeführt werden, da er lösemittelfrei ist. Aus diesen Tatsachen ist ableitbar, dass der „OH“ aus größeren KSE-Molekülen als der „300“er hergestellt wird. Dem entsprechend erreicht das lösemittelfreie Produkt deutlich größere Eindringtiefen als das lösemittelhaltige (Abb. 4). Darüber hinaus zeigt der Steinfestiger 300 einen vergleichsweise moderaten Abfall der Festigkeit im Übergangsbereich behandelt / unbehandelt; eine Konsequenz aus der gegenüber dem „OH“ günstiger gewählten Molekülgrößenverteilung (verhältnis kleiner und großer Moleküle).

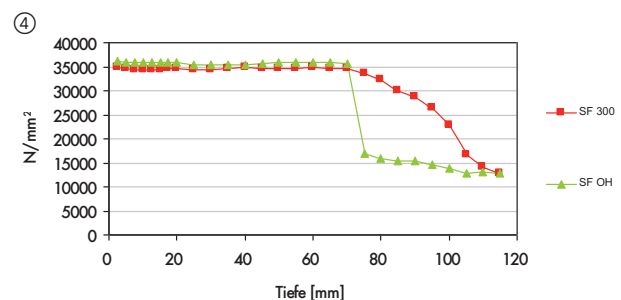
Der Einfluß von Größe bzw. Struktur der KSE-Moleküle auf die Eigenschaften des jeweiligen Steinfestiger-Produktes ist im Zusammenhang mit dem bauseitigen Einstellen von Gel-Abscheidungsrate von besonderer Bedeutung: Gelegentlich werden keine vorkonfektionierten Produkte eingesetzt. Stattdessen wird ein Steinfestiger höherer Gelabscheidungsrate

durch Verdünnen mit einem Lösemittel auf eine niedrigere Gelabscheidungsrate eingestellt. Da dann aber das bauseitig verdünnte Produkt größere, komplexere und somit weniger fließfähige Moleküle als das vergleichbare Fertigprodukt enthält, lassen sich mit dem verdünnten Produkt i.d.R. nicht die geforderten Eindringtiefe erreichen.

Auch durch den Einsatz sehr dünnflüssiger Lösemittel (z.B. Ethanol, Spiritus) läßt sich die erreichbare Eindringtiefe i.d.R. nicht verbessern. Diese Lösemittel wandern zwar schnell und tief in den Untergrund ein; die KSE-Moleküle können ihnen jedoch nicht in gleichem Maße folgen, bleiben also hinter

den Lösemitteln zurück („Chromatographie-Effekt“). Zudem wandern die Lösemittel nach dem „ersten“ tiefen Eindringen schnell wieder an die Baustoffoberfläche zurück und verdunsten dort. Dieser Rückwanderungsstrom behindert jetzt nicht nur das weitere Eindringen der langsameren Wirkstoff-Moleküle, sondern transportiert die bereits eingedrungenen KSE-Moleküle wieder mit zurück. Somit resultiert daraus eine noch niedrigere Eindringtiefe des verdünnten Steinfestigers. Das beschriebene Verdünnen beeinflusst zudem auch die Reaktionsgeschwindigkeit des Steinfestigers nachteilig. So muß bspw. der Katalysatorgehalt im Produkt über einem „Schwellenwert“ liegen, um die Gelbildungsreaktion im Untergrund in ausreichendem Maße zu beschleunigen. Wird dieser Grenzwert durch das Verdünnen mit einem – naturgemäß nicht katalysatorhaltigen – Verdünnern unterschritten, so resultieren deutlich ungünstigere Reaktionsgeschwindigkeiten.

Fazit: Handelsübliche Steinfestiger sind maßgeschneiderte Produkte, deren Eigenschaften aus der zielgerichteten Verwendung unterschiedlich großer KSE-Moleküle, verschiedener Katalysatoren und - ggf. - spezieller Lösemittel resultieren. Die bauseitige Veränderung der Produktzusammensetzung erzeugt immer eine Verschlechterung der Produkteigenschaften.



④ Dokumentation des unterschiedlichen Eindringvermögens der Funcosil Steinfestiger 300 (rot) und OH (blau). Das vom 300er erzeugte Festigkeitsprofil ist deutlich günstiger.