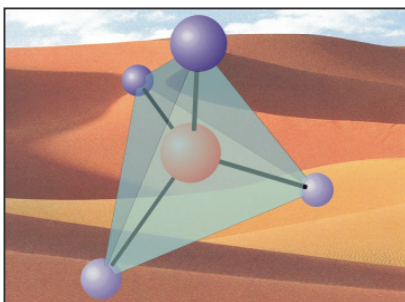


### Steinfestiger - Die Steuerung von Gelabscheidungsraten und Eindringtiefen

Zur Konservierung verwitterter mineralische 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 so weit wie möglich wieder herzustellen (s. Remmers-Info "Verfahren zur Ermittlung von Festigkeitsprofilen"). Hierfür werden seit Jahrzehnten Produkte auf der Basis von Kieselsäureester („KSE“; auch: „Kieselsäure-Ethylester“) eingesetzt.

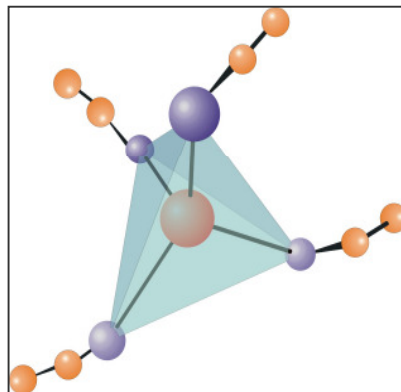
Wichtigster Rohstoff zur Herstellung des Kieselsäureesters ist reiner Quarzsand (Abb. 1).



Quarzsand =  $\text{SiO}_2$ :  
Vierfach von Sauerstoffatomen (blau)  
umgebenes Siliciumatom (rot).

Dieser wird in einem chemischen Prozess durch das „Andocken“ von Alkoholgruppen zu flüssigem „Kieselsäureester“ umgewandelt.

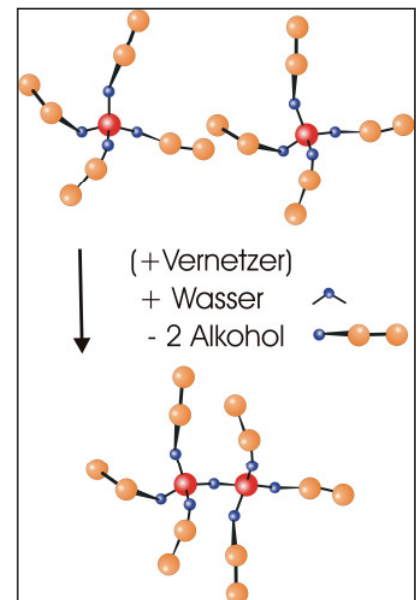
Allerdings fällt der Kieselsäureester bei diesem Prozess nicht nur in Form der kleinst möglichen Baueinheit (als „Monomer“; Abb. 2), sondern auch in Form der davon abgeleiteten größeren Moleküleinheiten (z. B. als „Dimer“, „Trimer“ usw.; s. u.) an.



Monomerer Kieselsäureester =  
Tetraethoxysilan ( $\text{Si}(\text{OEt})_4$ ):  
Vierfach von Ethoxygruppen  
(= „OEt“; Alkoholgruppen; blau  
und orange)  
umgebenes Siliciumatom (rot).

Die größeren Moleküle entstehen 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.

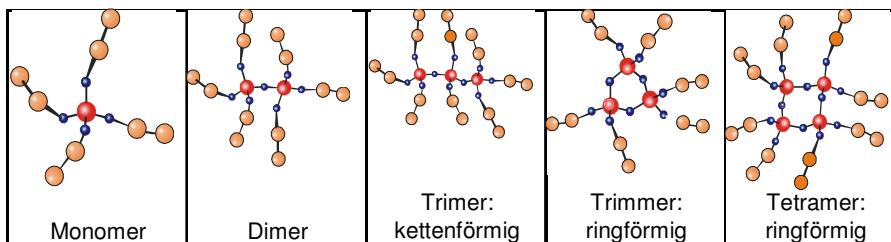
So entsteht z. B. aus 2 monomeren Kieselsäureester-Molekülen mit einer Gesamtmasse von  $2 \times 208 \text{ g/mol} = 416 \text{ g}$  das Dimer mit einer Masse von nur noch  $342 \text{ g/mol}$ .



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

Reagieren die Kieselsäureester-Moleküle zum Kieselgel ( $\text{SiO}_2$ ), so werden formal alle Alkoholgruppen abgespalten. Je kleiner dabei das Ausgangsmolekül ist, umso größer ist der Gewichtsverlust pro Siliciumatom:

Größe des Kieselsäureester-Moleküls	Zahl der zugehörigen Siliciumatome	Zahl der abspaltbaren Alkoholgruppen	Zahl der pro Siliciumatom abspaltbaren Alkoholgruppen	theoretischer SiO <sub>2</sub> -Gehalt (= "Gel-Abscheidungsrate")
Monomer	1	4	4	ca. 29 [M-%]
Dimer (2er-Kette)	2	6	3	ca. 35 [M-%]
Trimer (3erKette)	3	9	2,66	ca. 38 [M-%]
10er Kette (hypothetisch; s. u.)	10	12	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 einen direkten Einfluss auf die Fließfähigkeit der Moleküle: Je größer und je komplexer sie gebaut sind, um so höher 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 Remmers Steinfestiger KSE 300 (lösemittelfrei) und KSE 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 von ca. 70 % aus dem Abdampfen des Lösemittels, dass zu einem Anteil von ca. 30 % im Steinfestiger enthalten ist. Folglich ist nur der Rest des Gewichtsverlustes (ca. 40 %) auf das Abspalten von Ethanol beim Gel-Bildungsprozess 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).

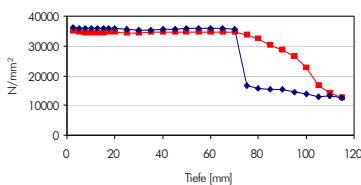
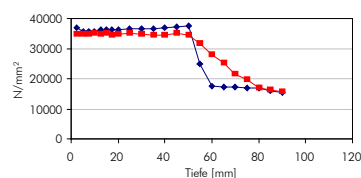


Abb. 4:  
Dokumentation des unterschiedlichen Eindringvermögens der Remmers KSE 300 (-■-) und OH (-◆-). Das vom 300er erzeugte Festigkeitsprofil ist deutlich günstiger.



Dokumentation des unterschiedlichen Eindringvermögens der Remmers KSE 300 (-■-) und 510 (-◆-).

Darüber hinaus zeigt der KSE 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).

Ein weiteres Beispiel für den Einfluss unterschiedlicher Molekülgrößen ist die Tatsache, dass der Remmers KSE 300 (lösemittelfrei, Gelabscheidungsrate ca. 30 %) größere Eindringtiefen erreicht als der Remmers KSE 510 (ebenfalls lösemittelfrei, Gelabscheidungsrate ca. 42 %). Ursache ist hier ebenfalls, dass der „510“er zum Erreichen der höheren Gelabscheidungsrate größere KSE-Moleküle enthält (s. o.).

Der Einfluss von Größe bzw. Struktur der KSE-Moleküle auf die Eigenschaften des jeweiligen Steinfestiger-Produktes ist im Zusammenhang mit dem bauseitigen Einstellen von Gelabscheidungsrate von besonderer Bedeutung: Gelegentlich werden keine vorkonfektionierten Produkte eingesetzt, sondern ein Steinfestiger höherer Gelabscheidungsrate durch Verdünnen mit einem Lösemittel auf eine niedrigere Gelabscheidungsrate eingestellt. Da aber das bauseits 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 Eindringtiefe meist 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 leichtflüchtigen 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 an die Oberfläche 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 ausreichenden Maße zu beschleunigen. Wird dieser Grenzwert durch das Verdünnen mit einem – naturgemäß nicht



katalysatorhaltigen - Lösemittel 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.