



# Hydrophobierung von Sichtbeton

Richtlinie

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeberin:**

Stadt Zürich,  
Amt für Hochbauten,  
Fachstelle Ingenieurwesen,  
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21  
8021 Zürich

### **Bearbeitung:**

Susanne Mühlhaus  
Pöyry Schweiz AG, Zürich  
susanne.muehlhaus@poyry.com

### **Projektleitung:**

Priska Rast  
Fachstelle Graffiti  
Immobilien Stadt Zürich,  
Armin Grieder  
Fachstelle Ingenieurwesen  
Amt für Hochbauten

### **Projektteam:**

Susanne Mühlhaus, Pöyry Schweiz AG, Zürich  
Armin Grieder, Fachstelle Ingenieurwesen, Amt für Hochbauten  
Philipp Hubler, Fachstelle Ingenieurwesen, Amt für Hochbauten  
Anna Joss, Denkmalpflege, Amt für Städtebau  
Michael Pöll, Fachstelle Nachhaltiges Bauen, Amt für Hochbauten  
Priska Rast, Fachstelle Graffiti, Immobilien Stadt Zürich  
Christiane Thomas, Denkmalpflege, Amt für Städtebau

Download als pdf von

[www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen](http://www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen)  
> 2000-Watt-Gesellschaft > Technik

Zürich, Mai 2018



# Richtlinie

## Hydrophobierung von Sichtbeton



Verfasser	Dipl. Ing. Susanne Mühlhaus Dr. Ing. Florian V. Müller Pöyry Schweiz AG Herostrasse 12, Postfach 8048 Zürich
Koreferat	Prof. Dr. Ing. Sylvia Stürmer
Herausgeber	Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
Version	1B
Erstelldatum	28. März 2018, Rev. 29. Mai 2018
Druckdatum	12. Juni 2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Grundlagen und Hintergründe .....</b>	<b>4</b>
1.1. Dauerhaftigkeit von Sichtbeton .....	4
1.2. Grundlagen der Hydrophobierungen von Sichtbeton.....	5
1.3. Produktgruppen.....	7
<b>2. Einflüsse auf die Wirksamkeit .....</b>	<b>9</b>
2.1. Vorteile der Hydrophobierung .....	9
2.2. Dauerhaftigkeit und potentiell nachteilige Wirkungen der Hydrophobierung .....	9
<b>3. Planung der Hydrophobierung .....</b>	<b>11</b>
3.1. Projektphasen – Strategie des Vorgehens .....	11
3.2. Arbeitsblatt – Entscheidungsmatrix Hydrophobierung .....	12
3.2.1. Entscheidung Machbarkeit Hydrophobierung .....	12
3.2.2. Spezielle Überprüfung für Hydrophobierung.....	13
3.3. Projektierung der Massnahme „Hydrophobierung“ .....	14
3.3.1. Festlegung des Verwendungszwecks der Produkte .....	14
3.3.2. Festlegungen der Anforderungen an den Untergrund und Auswahl der Produkte.....	14
3.3.3. Musterflächen .....	15
3.4. Fachberatung .....	17
<b>4. Referenzen .....</b>	<b>18</b>
<b>5. Tabellenverzeichnis: .....</b>	<b>19</b>
<b>6. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>19</b>



## Einleitung

Beton ist der moderne Baustoff, welcher unsere Gegenwartsarchitektur und Infrastrukturbauten grundlegend geprägt hat. Doch die Erfahrungen der letzten 100 Jahre zeigen auch, dass Betonbauten vielfältige Schädigungen aufweisen können, die stark an die Präsenz und Wirkung von Feuchte gebunden sind. Erste Versuche der Hydrophobierungen von Beton datieren somit schon mehr als 60 Jahre zurück. Rückblickend auf die Entwicklung der Massnahme Hydrophobierung wird deutlich, dass trotz aller Produktentwicklungen, Forschungen und Anpassungen die Hydrophobierung von Beton weiterhin kontrovers diskutiert wird.

**„Es gibt kein Universal-Hydrophobierungsmittel was auf allen Betonuntergründen gleichermaßen eine gute Wirksamkeit aufzeigt.“** Dieses Zitat aus der Masterarbeit von Oliver Schweizer bestätigt die Meinung vieler Experten, dass es wichtig ist, Hydrophobierungsmassnahmen bewusst zu planen und objektspezifisch zu hinterfragen.

Zur Erarbeitung dieser Richtlinie erfolgten einerseits weitreichende Vergleiche und zusätzliche Abklärungen, andererseits wurden vor der Erstellung der Richtlinie im Rahmen von Masterarbeiten die Thematik der Hydrophobierungen und ihrer Erkenntnisse aktuell nochmals reflektiert. Besonderer Dank geht somit an:

- Prof. Dr. S. Stürmer / Betreuung der Masterarbeiten/ Koreferat
- Oliver Schweizer / Masterarbeit: Wirksamkeit unterschiedlicher Hydrophobierungsmittel bei vorbelasteten und nicht vorbelasteten Betonen von Infrastrukturbauwerken, FH Konstanz, 2017
- Michael Hackenberger/ Masterarbeit: Hydrophobierungen von Sichtbetonflächen – Beschreibungen, Bewertungen-, FH Konstanz, 2017

Ziel der Masterarbeiten war es, praktische Fragen zur Hydrophobierung von Beton zu beleuchten, die in anderen Forschungen und Publikationen bisher wenig berücksichtigt oder unter anderen Randbedingungen geprüft wurden. Auf Anfrage können die Masterarbeiten eingesehen werden.

Normen und Richtlinien bedürfen regelmässiger Revisionen, dies wird auch für diese Richtlinie gelten. Da es kein „bestes“ Hydrophobierungsmittel für alle Betonuntergründe gibt, kann das Ziel der Richtlinie nur sein, den Planern Grundlagen für die konkrete Objektbewertung, für die Auswahlkriterien des Hydrophobierungsmittels und für die Qualitätssicherung bei der Ausführung zu geben.



## **1. Grundlagen und Hintergründe**

### **1.1. Dauerhaftigkeit von Sichtbeton**

Die Oberfläche der Betonfassade ist integraler Bestandteil des Bauwerks und prägt die grundlegenden Anforderungen der Funktionstüchtigkeit, Aussehen, Dauerhaftigkeit und Unterhaltsfähigkeit.

Lange Zeit ging man davon aus, dass Beton an sich eine sehr hohe Dauerhaftigkeit besitzt. Moderne langjährige Erfahrungen in der Werterhaltung bei Stahlbeton- und bei Sichtbetonbauten zeichnen heute ein komplexes Bild. Viele Schadensursachen stehen im Zusammenhang mit der Wasseraufnahme des porösen Betongefüges. Wasser ist die Grundlage bzw. Ursache für eine Vielzahl von potentiell schädigenden (chemisch-physikalischen Prozessen wie Lösungsprozessen, Umwandlungsprozessen oder Kristallisationen von Salzen) oder optisch störenden Prozessen (Schmutzanlagerungen, Wasserfahnen, biologische Besiedlung, etc.). Für die Instandsetzung und Instandhaltung des Betons stützen wir uns auf Normen und Regelwerke, welche die begründeten und anerkannten Richtlinien darlegen (vgl.[6], [[1][2][4]).

Die Forschung weist auf die hohe Bedeutung der Qualität der Schalhaut hin, welche die Formgebung hervorhebt und mit ihrem Einfluss auf die Betonrandzone die Dauerhaftigkeit des Bauelementes massgeblich beeinflusst. Die Ästhetik dieser Schalhaut prägt heute wesentlich unsere gebaute Umwelt. Als Planungsgrundlage für die Ausschreibung und Qualitätskontrolle von Sichtbeton dient in der Schweiz das Merkblatt der Cemsuisse „Merkblatt für Sichtbetonbauten MB02“ [28]. Die Erkenntnisse in der Richtlinie sind neu und stützen sich auf die Forschungsarbeiten zum Sichtbeton der letzten 10 Jahre (vgl. [5], [8], [25], [26]). Es ist ohne Zweifel vermehrt der Bedarf entstanden, das optisch gewünschte Erscheinungsbild von Sichtbetonflächen zu perfektionieren, zu optimieren und diese Optik langfristig zu erhalten.

Die Oberfläche des Sichtbetons ist mit all ihren Merkmalen letztendlich ein Unikat. Der behutsame Umgang mit Betonfassaden wird teilweise mit dem Begriff Betonkosmetik in Verbindung gebracht. Wenn eine neuwertige Betonoberfläche geschützt oder kosmetisch nachbehandelt werden muss, so wendet man gesonderte Methoden an, wie: z.B. Waschen (nass, trocken), Reinigen (nass, trocken, mechanisch, chemisch), Schleifen (nass, trocken), Färben mit Kalkmilch, Spachteln / Reprofilieren, Retuschen, Lasuren und Schutzbeschichtungen / Hydrophobierungen. Die Arbeiten der Betonkosmetik umfassen demnach eine breite Palette verschiedener Techniken bis hin zu grossflächigen Farbkorrekturen, Angleichungen und Betonimitationen (Illusionsmalerei, Nachstellen der Betonschalhaut, etc.). Viele dieser Massnahmen sind in den Normen und Regelwerken der Betoninstandsetzung nicht explizit abgehandelt.

Bei denkmalpflegerisch wertvollen Betonbauten steht bei betonkosmetischen Massnahmen [19] der Erhalt der Bausubstanz und damit die Authentizität des Objektes im Zentrum. Es gilt der Grundsatz, dass alle konservatorischen und restauratorischen Eingriffe auf ein Höchstmass an Reversibilität auszurichten sind (vgl. 4.2. Leitsätze zur Denkmalpflege in der Schweiz). Dieser Grundsatz steht im Widerspruch zur Hydrophobierung. Die Hydrophobierungen verändern das Benetzungsverhalten der Sichtbetonoberfläche irreversibel. Sie sind nach korrekter Applikation in der Oberfläche des Betons chemisch gebunden und mechanisch nicht mehr vom Beton trennbar. Deshalb braucht es stets ein besonders sorgfältiges Abwägen der Vor- und Nachteile von Hydrophobierungen bei denkmalpflegerischen wertvollen Betonbauten. Die Massnahmen sind in Absprache mit der Denkmalpflege festzulegen.

Beton ist und bleibt ein künstlich hergestelltes Material und ist kein Naturstein. Seine Baustoffchemie, Herstellung und Leistungsfähigkeit hat sich in den letzten 100 Jahren verändert und bleibt in stetiger Veränderung. Der angemessene Umgang mit unserem modernen baulichen Erbe ist ein spannendes Umfeld, welches zu anspruchsvollen Diskussionen unter unterschiedlichen Betrachtungswinkeln einlädt.

## 1.2. Grundlagen der Hydrophobierungen von Sichtbeton

Die allgemeinen Leistungskriterien an die Hydrophobierung und die Anforderungen an die Untergrundvorbereitungen, sowie die Kriterien zur Ausführung der Methode wurden in Normen und Richtlinien spezifiziert (siehe Kapitel Referenzen auf Seite 18, Referenzen 1 bis 6).

Darüber hinaus wurde eine umfangreiche Anzahl von Richtlinien, Forschungen und Publikationen erarbeitet (ebenfalls in Kapitel Referenzen). Die Hydrophobierung von Beton stellt sich als vielversprechende Schutzmassnahme der Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme dar. Hydrophobierungen sind dabei:

- ein vorbeugender Schutz der porösen Oberflächenstruktur bei mineralischen Baustoffen gegen eindringende Feuchtigkeit (im Neubau oder bei der Betonfertigteilen die im Werk hydrophobiert werden)
- ein nachträglicher bzw. zusätzlicher Schutz bei Bauten aus Beton im Bestand
- sie werden im Rahmen von Sanierungsmassnahmen / z.B. Oberflächenschutzsystemen als integrativer Bestandteil der Untergrundvorbereitung eingesetzt.

Die Produktpalette hat sich über die Jahre stark verändert und es wurden unterschiedliche Wirkstoffsysteme entwickelt. Zur Hydrophobierung wurden ursprünglich in Lösungsmitteln gelöste Silicone oder dem Siliconharz verwandte Produkte eingesetzt (siehe Tabelle 1). Probleme mit dem Eindringverhalten und der mangelnden Alkalibeständigkeit auf Beton waren die Folge [16].

Beide Probleme wurden gelöst. Dazu werden heute mehrheitlich Ausgangsstoffe auf Basis von Alkylsilanen (niedermolekular) und / oder oligomeren Siloxanen in Form von Gemischen als wässrige Lösungen, Mikroemulsionen, Emulsionen oder Cremes verwendet (siehe auch Tabelle 1, 2 und Tabelle 5). Endprodukt dieser Stoffe nach Aushärtung ist immer ein porenauskleidender Silikonharzfilm.

Siliziumorganische Verbindung	Wirkstoff (Beispiele)	Lösungsmittel / Verdünnungsmittel		Untergrund
Silikonat	Kaliummethylsilikonat	Wasser		Kalksandstein
Silikonharz	Methylpolysiloxane	aliphatische Lösungsmittel		Sandstein, Kalkstein, Ziegel
	Höher alkyliertes Polysiloxan	aliphatische Lösungsmittel		Naturstein, Beton, Putz, Ziegel
Silan	anhydrolisiertes Silan	Wasserfreier Alkohol		Beton, Putz, Kalksandstein
	Octyltriethoxysilan	Emulsion in Wasser		Beton, Putz, Kalksandstein
Siloxan	Oligomeres Alkylalkoxysiloxan	aliphatische Lösungsmittel		Beton, Putz, Kalksandstein
Silan-Siloxan-Gemisch	Silan und soligomere Alkoxysiloxane	aliphatische Lösungsmittel	Emulsion in Wasser	Beton, Putz, Ziegel, Naturstein, Kalksandstein
	Methylsiliconharz + Octyltriethoxysilan oder Alkylalkoxysiloxan und -siloxan	pastöse Emulsion/ Cremes in Wasser		

Tabelle 1: Liste Hydrophobierungswirkstoffe (<http://www.baustoffchemie.de/hydrophobierung/>).

Art Alkylkette	n-Oktyl-	iso-Oktyl-	n-Pentyl-	n-Butyl-	iso-Butyl-	Propyl-
Eigenschaft	Triethoxysilan					
Reaktionsgeschwindigkeit						
Eindringvermögen						
Griffigkeitsentwicklung						
Alkalibeständigkeit						

Tabelle 2: Eigenschaften der Silane in Abhängigkeit der Art der Alkylkette [27]

Zentrale Eigenschaften dieser modernen Hydrophobierungsmittel sind: einerseits durch das Silicium-Sauerstoffgerüst eine hohe Affinität / Anbindung zum mineralischen Baustoff, andererseits durch ihre organischen Endgruppen eine wasserabweisende Wirkung, chemisch relativ inert, biologisch weitgehend beständig, optisch farblos d.h. an sich nicht sichtbar. Somit sind heutige Hydrophobierungsmittel auf Silanbasis prinzipiell als dauerhafter Schutz des Bauwerks vor Feuchte tauglich. In Studien wurde nachgewiesen, dass die molekulare Struktur der eingesetzten Silane ebenso die Wirksamkeit der Hydrophobierung beeinflusst [9]. Die chemischen Reaktionen des Silans beeinflussen den Transport der löslichen Reaktionsprodukte auch unabhängig vom kapillaren Saugen. (vgl. [16], S.188). Die Struktur der Silane wurde in bisherigen Arbeiten zwar als Einflussfaktor genannt, die Mechanismen der Einflussnahme konnten jedoch noch nicht genauer benannt werden ([9], [10]), dies erfolgte dann 2008 mit der Dissertation von Oehmichen [21].

Betrachtet man die Mehrheit der Forschungsarbeiten so zielten sie in den letzten 30 Jahren auf den Ablauf der chemisch-physikalischen Reaktionen während der Hydrophobierung ab. Dabei wurden die Eindringtiefe, Reaktionsprozesse und die Verteilung der Wirkstoffkonzentration in der Betonrandzone des behandelten Betons betrachtet. Das Saugprofil und den Wirkstoffgehalt für die Charakterisierung einer Hydrophobierung für Stahlbetonbauwerke wurde 2005 publiziert [13]. Studien diskutieren die Faktoren, die die Wirksamkeit einer Hydrophobierung beeinflussen ([12], [16], [20], [21]).

Es fehlten Angaben, inwiefern die wirksame Eindringtiefe eines Produktes von den betontechnologischen Eigenschaften des Betons abhängt ([7], [22]). Die Ausbildung des Porengefüges des Betons ist sehr unterschiedlich und z.B. abhängig von folgenden Faktoren:

Porenart		Grösseneinteilung	Herkunft / Ursache
<b>Verdichtungsporen</b>	Grobporen	> 2 mm	Verdichten
<b>Luftporen</b>	Makrokapillaren	50 µm – 2 mm	Luftporenbildner
<b>Kapillarporen</b>	Kapillaren	2 µm – 50 µm	w/z – Wert
	Mikrokapillaren	50 nm – 2 µm	
<b>Gelporen</b>	Mesoporen	2 nm – 50 nm	Hydratation und Zementart
	Mikroporen	< 2 nm	

Tabelle 3: Herkunft der unterschiedlichen Poren im Beton und deren Grösseneinteilung [27]

Bisher gibt es nur wenige Studien über das Verhalten der Hydrophobierungsmittel bei Verwendung auf vorbelasteten Bestandsbeton, der z.B. durch Chloride, Karbonatisierung und durch Risse in Mitleidenschaft gezogen wurde [23]. Hier haben die Masterarbeiten der Hochschule Konstanz Tendenzen beim Einsatz verschiedener Hydrophobierungsmittel aufgezeigt ([15], [27]).

Die Praxis zeigt, dass insbesondere die Applikationstechnik, die Vor- und Nachbehandlung, die klimatischen Bedingungen vor und während der Applikation sowie die Struktur des Porensystems des zementgebundenen Werkstoffes und seine Feuchtigkeitsverteilung betrachtet werden müssen ([14], [15], [18], [27]). Dabei werden Baustoffe nach ihrem Saugverhalten durch die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (EN ISO 15148) wie folgt unterschieden (siehe Tabelle 4). All diese Angaben beweisen – eine Hydrophobierung bedarf zielgerichteter Erwägungen in der Auswahl des Produktes und der Methode, denn:

„Trotz jahrelangen Einsatzes dieser Methode in der Praxis und einer Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen in den letzten Jahren sind noch immer viele Aspekte der Silanreaktion im zementgebundenen Werkstoff ungeklärt.“ ([17], S. 69).

Einteilung der Baustoffe nach Ihrer Saugeigenschaft	Wasseraufnahmekoeffizient $w \left[ \frac{kg}{m^2 * \sqrt{h}} \right]$
wassersaugend	$\geq 2$
wasserhemmend	$0.5 \leq w < 2$
wasserabweisend	$w \leq 0.5$
wasserdicht	$w \leq 0.001$

Tabelle 4: Klassifizierung der Baustoffe nach deren Wasseraufnahmekoeffizienten

### 1.3. Produktgruppen

Die Produkte werden wie folgt eingeteilt: wässrige und nichtwässrige Systeme, mit unterschiedlichen Wirkstoffen, Wirkstoffmischungen, Wirkstoffgehalten und Viskositäten (niedrig- bis hochviskose Emulsionen, Gele, Cremes oder Pasten). Erst wenn eine Hydrophobierung mit einem wässrigen System den erforderlichen Wirkstoffgehalt der Massnahme im Untergrund nicht erreicht hat, werden Nachüberarbeitungen mit wasserfreien (lösungsmittelhaltigen) Systemen erwogen.

Die Auswahl und Applikation des Wirkstoffsystems (Produktes) erfolgt je nach Objekt, System und Verarbeitungsbedingungen. Entsprechend der Viskosität des Produktes erfolgt der Auftrag durch: Streichen, Rollen oder airless-Spritzen in mehreren Arbeitsgängen (nass in Nass). Die Verteilung und Aufnahme des hydrophobierenden Wirkstoffs sind abhängig von der Art und den Eigenschaften des Wirkstoffs (Gemisches) selbst, dem Adsorptionsvermögen des Betons (Anlagerung von Stoffen auf die Oberfläche) und der Art und Dauer der Applikation.

Vergleiche unterschiedlicher Produkttypen haben folgende Tendenzen gezeigt [22]:

Die cremeförmigen Hydrophobierungsmittel wiesen überwiegend tiefere Eindringtiefen auf als die flüssigen Emulsionen; schnitten in der Reduktion der Wasser- und Chloridaufnahme besser ab als die flüssige Emulsion und waren anwenderfreundlicher zu applizieren als flüssige Emulsionen.

Folgende Übersicht (siehe Tabelle 5) zeigt eine Zusammenstellung und Vergleich der prinzipiellen Systeme heute.



<b>Systemgruppen Silan / Siloxan Hydrophobierungsmittel</b>			
	<b>lösemittelhaltige Produkte</b>	<b>wasserverdünnbare Konzentrationen, Microemulsionen (SMK) oder wässrige Emulsionen</b>	<b>Pastöse Emulsionen / Cremes</b>
<b>Vorteile</b>	Können zur Nachbehandlung einer hydrophobierten Oberfläche benutzt werden.	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine organischen Lösungsmittel,</li> <li>unterschiedliche Wirkstoffgehalte</li> </ul> <p>Achtung: Produkte mit einem Wirkstoffgehalt &lt; 20% sind kritisch für die geforderte neu-Hydrophobierung. Empfohlen werden Wirkstoffgehalte von &gt; 70%.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Wirkstoff-konzentration,</li> <li>genaue Applikation,</li> <li>einfaches über Kopf arbeiten,</li> <li>lange Kontaktzeit</li> <li>definierte Auftragsmenge</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	Lösungsmittelhaltige Systeme sollen flutend aufgebracht werden. Die Applikation dieser Systeme muss zeitlich versetzt, mehrfach erfolgen, damit die notwendigen Wirkstoffgehalte erreicht werden.	Wässrige Silanemulsionen und Mikroemulsionen in Anwendungen haben auf Betonuntergründen teilweise Probleme aufgezeigt. Kontrolluntersuchungen haben immer wieder bestätigt, dass es unabhängig von den Applikationsbedingungen (Methode, Untergrund, Umgebungseinflüsse) zu einer Trennung der Emulsion in Silan und Wasser kommen kann und sich der Wirkstoff an der Oberfläche „konzentriert“.	
<p><u>Schlussfolgerung</u></p> <p><b>Auf Betonuntergründen wird die Verwendung von Hydrophobierungscremes empfohlen. Sollen andere Systeme verwendet werden, sind Vorversuche zur Eindringtiefe und Verteilung des Wirkstoffs durchzuführen. Lösemittelhaltige Systeme dienen vorrangig zur Nachbehandlung von hydrophobierten Flächen bzw. zur Erhöhung des Wirkstoffgehaltes.</b></p>			

Tabelle 5: Vergleich prinzipieller Hydrophobierungsmittel

## 2. Einflüsse auf die Wirksamkeit

### 2.1. Vorteile der Hydrophobierung

Unter Oberflächenschutzmassnahmen versteht man das Aufbringen von Materialien an der Oberfläche, welche das Eindringen von Schadstoffen in die Konstruktion verhindern oder zumindest erschweren. Generell wird bei der Hydrophobierung (Oberflächenschutzsystem OS 1 lt. SN EN 1504- 2; [2]) das Produkt vom Untergrund aufgesaugt und bildet durch Polymerisation eine Siliconbeschichtung (wasserabweisende Beschichtung = Vergrösserung des Benetzungswinkels zw. Wasser und Werkstoff) auf den kapillaren Oberflächen des Untergrundes (Beton), die jedoch die Poren nicht verstopft / verschliesst.

Hydrophobierungen gehören zu den Oberflächenschutzmassnahmen und gewährleisten allgemein:

- Schutz vor Feuchtigkeit (kapillares Saugen an der Oberfläche), ohne die Oberfläche optisch zu verändern, d.h. Struktur der Oberfläche und Farbe bleiben unverändert
- Kapillare Wasseraufnahme wird verringert
- Wasserdampfdiffusion bleibt weitgehend erhalten
- Frostbeständigkeit wird somit erhöht
- Im Wasser gelöste Salze können somit nicht so tief in das Betongefüge transportiert werden
- Eine Verminderung der Verschmutzungsneigung bzw. verbesserte Reinigungsmöglichkeit
- Das Silan zur Hydrophobierung ist chemisch relativ inert, biologisch weitgehend beständig, optisch farblos. D.h. bei richtiger Ausführung ist sie nicht glänzend oder milchig sichtbar.

### 2.2. Dauerhaftigkeit und potentiell nachteilige Wirkungen der Hydrophobierung

**Hydrophobierungen sind immer irreversible Massnahmen, denn ein Entfernen des Silikonharzfilmes aus dem Porengefüge ist zu einem späteren Zeitpunkt ohne Abtrag nicht mehr möglich.**

**Jedoch steht ebenso fest: die Wirkung einer Hydrophobierung verändert sich.** Die Dauerhaftigkeit der Wirkung wird widersprüchlich diskutiert. Dabei spielen die Wirkstoffe im Produkt, deren Verteilung im Gefüge und die Exposition an der Fassade / Bewitterung eine entscheidende Rolle.

Das bedeutet auch, dass durch Hydrophobierungen folgende Einschränkungen entstehen:

- Spätere Massnahmen können beeinträchtigt / behindert werden (z.B. Applikation wässriger Beschichtungen).
- Die Dauerhaftigkeit einer Fassade ist gekennzeichnet durch hydrothermische Beanspruchungen infolge witterungsbedingter Temperatur- und Feuchtewechsel, das Trocknungsverhalten ändert sich durch die Hydrophobierung ([7], [22]).
- Das Verschmutzungsverhalten kann sich langfristig zwischen behandelten und unbehandelten Bereichen unterscheiden [14].
- Optische Veränderungen der Oberfläche im Vergleich zu unbehandeltem Betonflächen sind möglich (Sättigungsgrad) [14].
- In Tests mit unterschiedlichen Hydrophobierungsmitteln auf mit Chloriden vorbelasteten Beton wurde deutlich, dass die Massnahme nicht in der Lage ist, den Eintrag von Wasser zu unterbinden wodurch darin gelöste, bereits vorhandene Chloride weiter nach innen transportiert werden können [27]
- Es wurde ein Rückgang der Wasseraufnahme festgestellt, diese lag allerdings weit unter den erzielten Werten der „neuen“ Betone. Es fand eine Aufkonzentrierung des Salzhorizontes (Umverteilung bestehender Salze hinter die Neuhydrophobierung) statt. Das lässt den Rückschluss zu, dass Betone mit Rissbildungen, erhöhter Chloridbelastung, Kiesnester, Lunker usw. nur bedingt durch eine nachträgliche Hydrophobierungsmassnahme wirkungsvoll geschützt werden können. [14], [27]



- Drückendes Wasser, „aufsteigende Feuchte“, Absorption von Luftfeuchtigkeit oder durch hygroskopische Salze werden durch die hydrophobierende Imprägnierung weder verhindert noch verlangsamt. Steigt der Feuchtegehalt hinter der Hydrophobierung können verstärkte Abwitterungen entstehen ([16], S. 53; [17]).

Zur Dauerhaftigkeit der Hydrophobierung weist die Fachliteratur folgende Erkenntnisse auf:

- Zur Lebensdauer von Hydrophobierungen finden sich nur lückenhafte Angaben, in Studien finden sich Angaben von 3 Jahren bis hin zu 10 – 20 Jahren (vgl. [20], [16]S. 50, [14]; [18]).
- UV-Licht kann den Silikonharzfilm im oberflächennahen Bereich zerstören, nicht aber in der Tiefe [30] [20][29] [21].
- Eindringende Fremdstoffe können den Silikonharzfilm überlagern und somit vermindern [29][30].
- Angaben bzw. Meinungen zur Beeinflussung der Carbonatisierung des Betons (neu) durch eine Hydrophobierung sind nicht abschliessend (vgl. [21], S. 68).
- Eine mikrobielle Besiedlung von Fassaden (v.a. Schimmelpilze, Algen) kann durch eine Hydrophobierung begünstigt werden, insbesondere in schattigen Bereichen, auf Nordseiten und nahe Bepflanzungen [15] und wenn sich Schmutzbestandteile und andere Atmosphären u.a. Biostäube darauf ablagern
- Umwelt-Faktoren welche die Lebensdauer beeinflussen sind:
  - UV-Licht
  - Abrasion und Verschleiss
  - Chemische Abbaureaktionen
  - Staubablagerungen
  - Hohe Chloridkonzentration im Beton

Materialhersteller weisen auf das breite Einsatzgebiet ihrer Hydrophobierungsprodukte hin. Für den weit gestreuten Bereich der Betonqualitäten – wie sie bei den bestehenden Bauwerken z.B. im Infrastrukturbereich vorliegen zeigt sich jedoch: „Es gibt kein Universal-Hydrophobierungsmittel was auf allen Betonuntergründen des Infrastrukturbaus gleichermassen eine gute Wirksamkeit aufzeigt.“ [27]. „Um also Risiken einer Hydrophobierung zuverlässig ausschliessen zu können, muss in der Praxis die komplexe Wechselwirkung des Bauteils mit der Feuchtigkeit für jeden gegebenen Fall abgeschätzt werden.“ ([16], S. 52)

Nachfolgend werden hier die Fakten zusammen getragen die als unabhängige Vergleichsparameter für die generelle Bewertung einer Hydrophobierung planerisch herangezogen werden sollten.

### 3. Planung der Hydrophobierung

Der Erfolg jeder Hydrophobierung am Bauwerk ist abhängig von der sachkundigen Planung der Massnahme auf der Basis von Voruntersuchungen und der Berücksichtigung des Zusammenwirkens aller wesentlichen Einflussfaktoren. Das Ziel ist, gute Wirksamkeit über lange Zeit und ohne negative Nebeneffekte zu erhalten. Steuergrössen sind:

- Charakterisierung des Betons Entscheid über die Erhaltungsmassnahme
- Angepasste Vorbehandlung des Untergrundes
- Überwachung der objektspezifischen Randbedingungen des Objektes (Feuchte des Untergrundes, Risse, Alter, Eintrag Salze, Porengefüge etc.)
- Wahl des Produktes zur Hydrophobierung
- Anpassung der Applikationstechnik
- Kontrolle der Umgebungsbedingungen vor-, während und nach der Applikation

Die Prüfung der Qualität der Ausführung der Massnahme zeigt sich durch:

- die erreichte Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels
- die erzielte Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme
- Wirkstoffgehalt der Hydrophobierung im Tiefenprofil
- Gleichmässigkeit der Verteilung des Hydrophobierungsmittels

#### 3.1. Projektphasen – Strategie des Vorgehens

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Projektschritte aufgeführt. Die Projektphasen 1 und 2 dienen dazu, die Grundlagen zu schaffen, damit ein Entscheid geführt werden kann, ob eine Hydrophobierung als Erhaltungsmassnahme zielführend ist. Die Projektphasen 3 und 4 dienen der planerischen Auswahl und Anpassung der Methode Hydrophobierung. Die Phasen 5 und 6 zeigen die Kontrolle und Prüfung der Massnahme während der Ausführung auf. In Projektphase 3 wird festgelegt, ob eine Hydrophobierung möglich ist. Diese Entscheidungsfindung beruht auf der Bestätigung, dass das Objekt maximal Zustandsklasse 2 gem. SIA D 0144/ SIA 269 [1] entspricht (siehe Arbeitsblatt – Entscheidungsmatrix Hydrophobierung).

Grundlagen für Entscheid	1	Studium der Grundlagen SN EN 1504-9 (Ziffer 4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauwerksdokumentation, Bemessungsgrundlagen,</li> <li>• erfolgte Inspektionen, Unterhalts- und Instandsetzungsarbeiten</li> </ul>
	2	Zustandserfassung und -beurteilung SN EN 1504-9 (Ziffer 4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visueller Zustand, Schadensursachen</li> <li>• materialtechn. und ingenieurmässige Zustandsbeschreibung</li> <li>• Abschätzung der Entwicklung des Bauwerks</li> </ul>
Entscheid und Auswahl Methode	3	Variantenstudium / Erhaltungs-Strategie SN EN 1504-9 (Ziffer 5 & 6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wahl der Prinzipien und Verfahren</li> <li>• Beurteilung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit während der Ausführung</li> </ul>
	4	Projektierung der Massnahmen SN EN 1504-2 bis 7 SN EN 1504-9 Ziffern 6, 7 und 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung des Verwendungszwecks der Produkte</li> <li>• Festlegung der Anforderungen an den Untergrund,</li> <li>• Produkte und Ausführung</li> <li>• Voruntersuchungen an Musterflächen/ Prüfverfahren und Abnahmekriterien</li> <li>• Spezifikationen, Beurteilung der Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit nach der Ausführung</li> </ul>
Kontrolle der Umsetzung	5	Ausführung der Massnahmen SN EN 1504-9 Ziffern 6,7,9, 10 SN EN 1504-10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle der Wahl der Produkte,</li> <li>• Methoden und Geräte</li> </ul>
	6	Abnahme der Ausführung SN EN 1504-9 Ziffer 8 SN EN 1504-10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abnahmeprüfungen</li> <li>• Anfällige Nachbesserungen</li> <li>• Aktualisierung der Bauwerksdokumentation</li> <li>• Erstellen des Überwachungsplans und Unterhaltsplans</li> </ul>

Tabelle 6: Übersicht aller Projektschritte in der Erhaltungsplanung.

### 3.2. Arbeitsblatt – Entscheidungsmatrix Hydrophobierung

Die vorgängigen Informationen haben die Kontraindikationen zu Hydrophobierungen von Beton erläutert. Die Charakterisierung des Betons und die Einflussfaktoren aus der Umgebung sind entscheidend für die Bewertung, ob eine Hydrophobierung erfolgen kann. Die Ablaufdiagramme zur Entscheidungsfindung sind in Abbildung 1 und 2 dargestellt.

#### 3.2.1. Entscheidung Machbarkeit Hydrophobierung

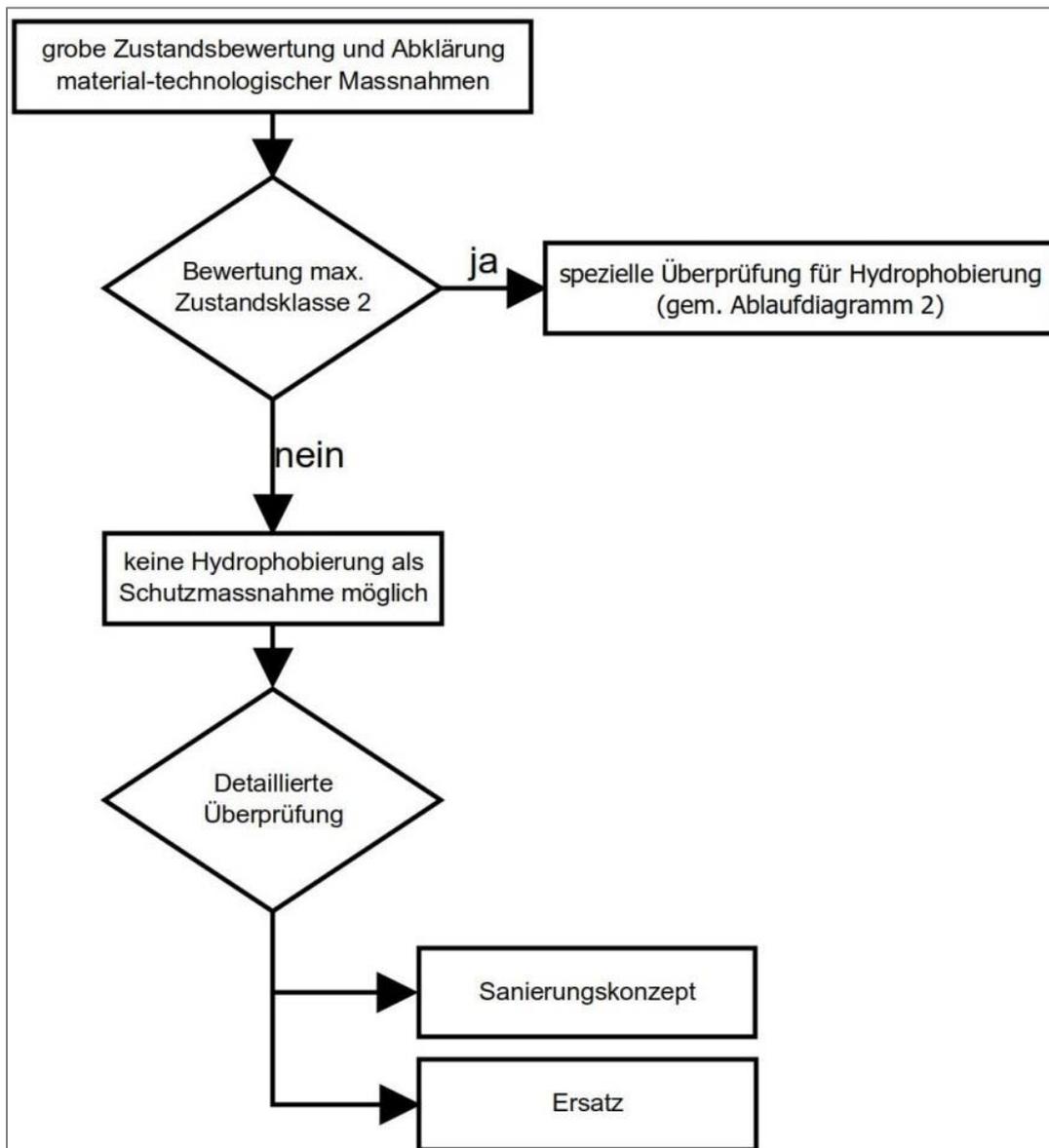


Abbildung 1: Ablaufdiagramm Entscheidung Machbarkeit Hydrophobierung

### 3.2.2. Spezielle Überprüfung für Hydrophobierung

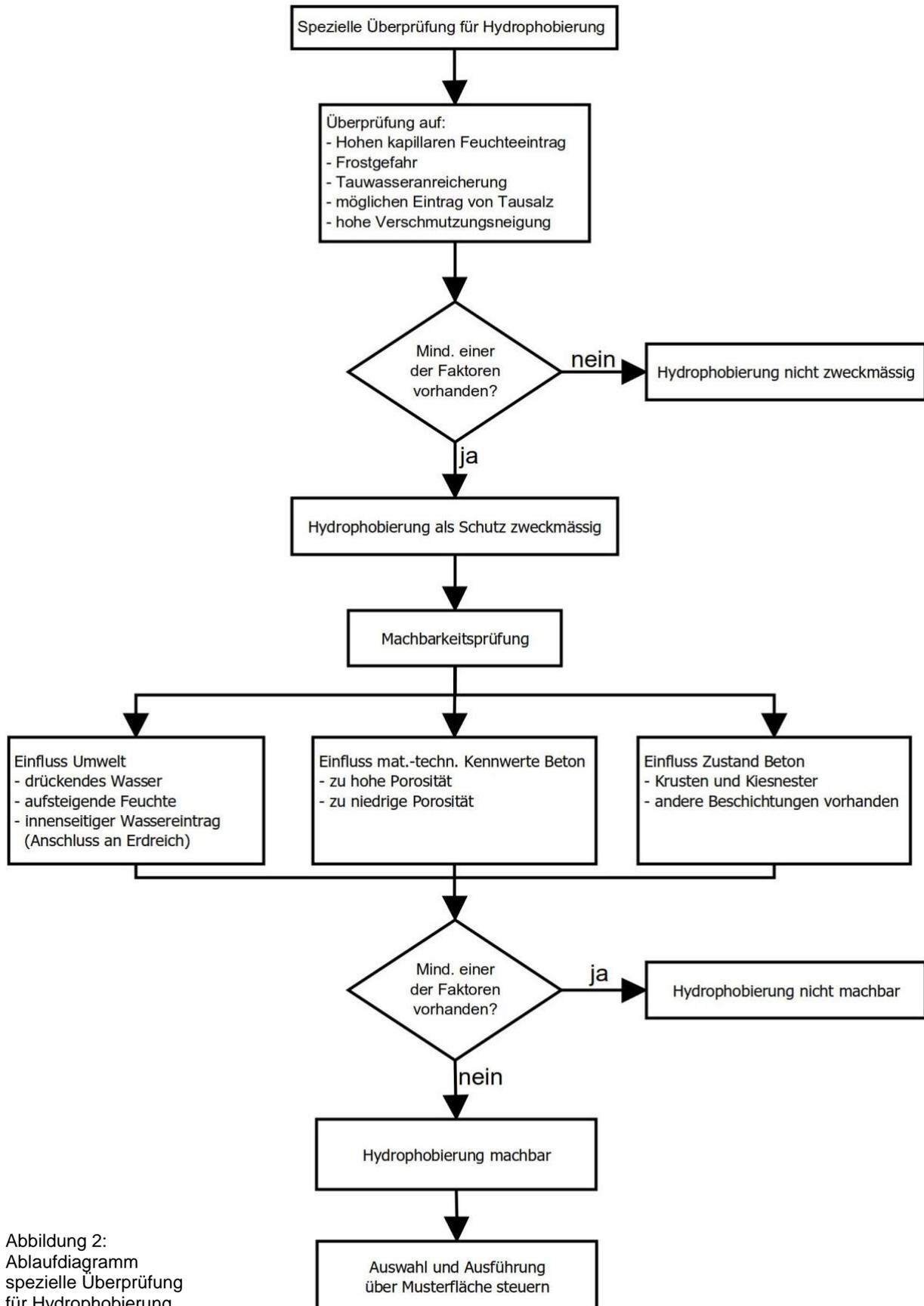


Abbildung 2:  
Ablaufdiagramm  
spezielle Überprüfung  
für Hydrophobierung

### 3.3. Projektierung der Massnahme „Hydrophobierung“

#### 3.3.1. Festlegung des Verwendungszwecks der Produkte

Mit dem Verfahren Hydrophobierung (Oberflächenschutzsystem OS 1) sind die einzelnen Leistungsanforderungen für das Verfahren bzw. Produkt entsprechend SN EN 1504- 2 [2] zu erfüllen. Die Leistungskriterien lt. Norm sind wie folgt festgelegt:

Hydrophobierung für bedingten Feuchteschutz; Verfahren 1.1 oder 2.1. lt. EN 1504-2:2004

- Techn. Eigenschaften und Produkthanforderungen, EN 1504-2 NA 1
- Eindringtiefe muss nachgewiesen werden (AK 4 = minimal 7 mm)
- Wasseraufnahme und Alkalibeständigkeit lt. NA1

Für Hydrophobierungen werden unterschiedliche Anforderungsklassen (AK) bezeichnet:

AK 1 = Oberflächen- und Grenzflächenbehandlung (minimale Eindringtiefe = 3 mm)

AK 2 = Erhöhung der Frostbeständigkeit (minimale Eindringtiefe = 4 mm)

AK 3 = Reduktion der Schadwasseraufnahme (minimale Eindringtiefe = 6 mm)

AK 4 = Chloridbarriere (minimale Eindringtiefe = 7 mm)

#### 3.3.2. Festlegungen der Anforderungen an den Untergrund und Auswahl der Produkte

**Die empfohlenen Untersuchungen vor der Durchführung der Hydrophobierung des Betons sind in der folgenden Tabelle 7 zusammengefasst.** Die abschliessende Auswahl des Produktes, projektspezifische Anpassung der Durchführung der Massnahme und die abschliessende Qualitätskontrolle der Hydrophobierungsmassnahme sollte immer durch das Anlegen einer Musterfläche abgesichert werden.

Prüfparameter	Qualitäts-Anforderung, Toleranzen	Prüfungsart / Norm	Umfang
Maximal Zustandsklasse 2 gem. SIA D 0144/ SIA 269	Abplatzungen, Hohlstellen, oberfl. Betonzerstörungen	örtlich begrenzt, nach Möglichkeit nicht in Musterfläche	visuell auf der Länge der MF
	Flecken infolge Feuchtigkeitsdifferenzen		visuell
	Risse	< 0.2 mm	visuell
	Bewehrung	KG 0 - 2	visuell
Salzgehalt / Anteil löslicher Salze / Verteilung im Tiefenprofil	Salzgehalt < 0.4 M% Voraussetzung auf Bewehrungshöhe, im Oberflächenbereich Salzgehalt < 1M%	SIA 162/ 1 oder SN EN 14629:2007	Bohrkern oder Bohrmehl
Karbonatisierung / Alkalinität		SIA 162/3; SN EN 14630	Bohrkern oder Sondierung
Wasseraufnahmekoeffizient pro Tiefenstufe	$w > 1 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ = Voraussetzung für Massnahme und Vergleichswert zur Qualitätskontrolle	SN EN 1062-3 SIA 262/ 1	Bohrkern
Wasserdampf-diffusionswiderstand	Vergleichswert zur Qualitätskontrolle	SIA 262/1 Anhang E / SN EN ISO 7783-2	Bohrkern
Widerstand Frost/ Tau Wechselbeanspruchung	Vergleichswert zur Qualitätskontrolle	SIA 162/ 5	Bohrkern

Tabelle 7: Empfohlene Untersuchungen vor Durchführung Hydrophobierung

### 3.3.3. Musterflächen

#### **Vorgehen zur Auswahl der Musterflächen**

Der Nachweis der objektspezifischen Eignung erfolgt mittels der Ausführung von Musterflächen. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Bewertung der Musterflächen, werden die Bedingungen der Untergrundvorbereitung, Machbarkeit / Wirksamkeit, Produktauswahl / -anpassung und Applikationsmethode / -bedingungen und die Kriterien zur Qualitätssicherung bestimmt.

Auswahl der Musterfläche

- Der Zugang sollte langfristig gewährleistet sein
- Ein angemessenes Verhältnis zwischen Musterfläche und Objektgrösse sollte bestehen
- Eine unbehandelte Vergleichsfläche in unmittelbarer Nachbarschaft ist Bestandteil der Musterfläche

#### **Eignungsnachweis**

Der Leistungsnachweis anhand eines Prüfzeugnisses der möglichen Produkte ist zu verlangen.

Eignungsnachweise dienen dem Nachweis der Wirkung entsprechend Leistungskriterien lt. Normen und der grundsätzlichen Eignung für die vorgesehenen Anwendungen. Prüfberichte dürfen nicht älter als 5 Jahre sein und müssen durch ein zertifiziertes Labor erstellt werden. Alle Eignungsprüfungen werden im Submissionsverfahren der Systemwahl geprüft und müssen erfüllt werden.

#### **Untergrundvorbereitung und Prüfkriterien**

Die Zweckmässigkeit der ausgewählten Vorbereitungsverfahren ist zu Beginn der Ausführung an geeigneten Stellen nachzuweisen. Unterschiedliche Verfahren können für die Untergrundvorbereitung verwendet werden ([31], Abschnitt 4, 2.4.).

Die Vorbehandlung des Untergrundes erfolgt gemäss dem Zustand des Objektes und den Vorgaben des Produktherstellers, sowie den Richtlinien und der SN EN 1504-10 [2] durch Reinigen. Der Untergrund darf keine trennend wirkenden Stoffe enthalten und muss frei von Staub, Verunreinigungen und Stoffen sein, die die Saugfähigkeit beeinträchtigen. Die Eigenschaften des Untergrundes der Musterflächen werden vor der Applikation geprüft und protokolliert.

Für das Reinigen der Flächen von z.B. Gummiabrieb, Russ, Öl, Trennmittel, Ausblühungen, Bewuchs, etc., um die ursprüngliche Betonoberfläche zu erhalten, ist das Hochdruckwasserstrahlen möglich (insbesondere für Russ, Öle und Fette mittels Hochdruckheisswassergeräten bei ca. 500 bar mit 30-50 l/min).

Nach Reinigung des Betonuntergrundes ist dieser im Hinblick auf Risse zu untersuchen. Einzelne oberflächennahe Risse bis ca. 0,2 mm sind in den meisten Fällen unbedenklich und brauchen nicht behandelt zu werden ([31], Teil 3, Abschnitt 4, 2.4.6).

Über die Regelwerke ggf. hinausgehende Anforderungen der Produkthersteller sind zu berücksichtigen. Der gereinigte Untergrund muss gegen Verunreinigungen geschützt sein, bis die Behandlung erfolgt ist. ([2] SN EN 1504-10/ 7.2.2.)

#### **Applikationsbedingungen und Ausführung**

Die Anwendung umfasst alle Vorarbeiten am Beton, die eigentliche Applikation und ggf. notwendige Nacharbeiten. Hydrophobierungen werden entsprechend den Angaben des Herstellers appliziert. Dabei spielen die Untergrund- und Umgebungsbedingungen eine entscheidende Rolle. Es ist entsprechender Schutz vorzusehen, sodass die Bedingungen für das Vorbehandeln, Aufbringen, Einwirkzeit und Nachkontrolle gegeben sind ([2] SN EN 1504-10/ 8.1).

- Die Ausführung erfolgt entsprechend den Angaben des Produktherstellers

- Der optimale Temperaturbereich liegt zwischen 8-25°C
- Zwischen Reinigung und Ausführung der Hydrophobierung muss genügend Zeit eingeplant werden, die ein Austrocknen des Randbetons bis zu einer Tiefe von 7- 8 mm gewährleistet.
- Die Kontaktzeit zwischen Wirkstoff und Werkstoff muss optimal eingestellt werden.

Dokumentation aller applikationsspezifischen Parameter:

- Produkte, Techn. Merkblätter, ggf. Prüfzeugnis
- Anwendungstechniken
- Anwendungszeitpunkt/ Klimadaten
- ggf. Feuchtemessung des Untergrundes
- Typ des Hydrophobierungsmittels
- Flächenbezogene Verbrauchsmengen (Kontrolle Materialverbrauch)

**Prüfung bzw. Nachkontrolle**

Die Erfolgskontrolle einer Hydrophobierung kann erst nach einer produktspezifischen Zeitspanne erfolgen. Die nachfolgenden Angaben geben die Richtwerte der Wartezeiten – abhängig vom System – an:

<u>Produktgruppe</u>	<u>erforderliche Mindestwartezeit</u>
Lösemittelhaltige Systeme	mindestens 2 Wochen
wässrige, flüssige Systeme	mindestens 3 Wochen
cremeförmige Produkte	mindestens 4 Wochen

Die wichtigsten Prüfparameter der Nachkontrolle sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

	Empfohlene Prüfungen	Vorgehen	Kontrollkriterium
1	Optische Bewertung	Visuelle Vergleiche	Farbveränderungen und Glanz dürfen nicht partiell auftreten da dies auf ungleichmässige Behandlung hindeutet
2	Flächendeckende Wirkung	Benetzungstests mit der Sprühflasche	Gleichmässiges Abperlen des Wassers an den Oberflächen optisch nachweisen
3	kapillare Wasseraufnahme und Wasseraufnahmekoeffizient	Prüfung der erreichten Eindringtiefe am Bohrkern der Hydrophobierung und der kapillaren Wasseraufnahme (z.B. nichtzerstörende Prüfung am Objekt mittels Karstentröhrchen am Bauwerk)	A. Erreichte Eindringtiefe: durch kapillare Wasseraufnahme von innen nach aussen, oder durch Wasseraufnahme an Seitenflächen (min. Eindringtiefe lt. Graphik 2) B: Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme: $W = 0.02 - 0.1 \text{ kg/m}^2 \sqrt{h}$
4	Wasserdampfdiffusionswiderstand	Prüfung am Bohrkern	Veränderung des Diffusionswiderstandes, Reduktion < 40% des Ausgangswertes
5	Bestimmung des Wirkstoffgehaltes	Prüfung am Bohrkern FTIR Messung am Tiefenprofil	Es gibt 2 Methoden, die in der Literatur beschrieben werden (über das kapillare Saugen (langwierig) oder über Messung des organischen Anteils mittels FTIR- diese Prüfungen werden von LPM und TFB angeboten

Tabelle 8: Wichtige Prüfparameter.



**Die hydrophobierten Flächen sollten in Abständen von 5 Jahren begutachtet werden.** Nach dem Stand des Wissens erfolgt ein langsamer Abbau der Wirksamkeit, was an jedem Objektuntergrund- und expositionsbedingt unterschiedlich verläuft.

Die Inspektion könnte durch ein Monitoring an einer festgelegten, gut zugängigen Referenzfläche ergänzt werden (Festlegen identischer Messpunkte, damit vergleichend eine Veränderung beobachtet werden kann). Im Fall des Nachlassens der Hydrophobierung müssen Möglichkeiten der Nachbearbeitung, Unterhalt, Reinigung, etc. kritisch geprüft werden.

### **Prüfbericht**

Der Verbrauch an angeliefertem Konzentrat und an applikationsfertigem Gemisch wird laufend durch den Unternehmer erfasst und die hydrophobierte Fläche ausgemessen. Aus den Messwerten wird der mittlere Materialverbrauch des Konzentrats [ $\text{kg/m}^2$ ] und des applikationsfertigen Produkts [ $\text{l/m}^2$ ] bestimmt. Eine Dokumentation der angelegten Musterfläche muss folgende Angaben enthalten:

- Lage und Grösse (Plan, Skizze, Foto, Bemassung)
- Untergrund (Material, Zustand, Vorbehandlung)
- Produkte, Technische Merkblätter
- Anwendungstechniken
- Anwendungszeitpunkt
- Klimadaten (Temperatur, relative Feuchte)
- Flächenbezogene Verbrauchsmengen ( $\text{l/m}^2$ )

### **3.4. Fachberatung**

Auch für Baufachpersonen ist der Themenkomplex nicht immer einfach zu fassen. Deshalb lohnt es sich, bei Fragen eine Fachberatung zu suchen.

In der Stadt Zürich sind dies zum Beispiel diese – an der Erarbeitung dieser Richtlinie mit beteiligten – Fachstellen:

Fachstelle Ingenieurwesen	Amt für Hochbauten
Fachstelle Nachhaltiges Bauen	Amt für Hochbauten
Fachstelle Graffiti	Immobilien
Denkmalpflege	Amt für Städtebau
Telefonzentrale Stadt Zürich	044 412 11 11

#### 4. Referenzen

- [1] SIA 269/2 „Erhaltung von Tragwerken – Betonbau“; gültig ab 01.01.2011; Ersatz für: SIA 162/5:1997 und SIA 2018:2004 (Anhang A)
- [2] SN EN 1504 1-9 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität“.
- [3] SN EN 206-1:2000 „Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [4] ASTRA, Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke, ASTRA, Nov. 2008, Forschungsbericht 2002/014, Nov. 2008.
- [5] BetonSuisse: Literatur, <http://www.betonsuisse.ch/sichtbeton/serviceteil/literatur/index.html?lang=de>; 30.09.2013.
- [6] DAfStb – Richtlinie: „Schutz und Instandsetzung von Betonbauwerken“, Teile 1-4, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Ausgabe 2001.
- [7] Depke F.: Hydrophobierter Beton; Betonwerk und Fertigteil-Technik, Nr. 3, 1972.
- [8] Deutscher Beton- und Bautechnikverein e.V., Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.: Merkblatt „Sichtbeton“; korrigierter Nachdruck 2008.
- [9] Erfurth J.: Leitsätze zur Denkmalpflege in der Schweiz; Hrsg.: Eidg. Kommission für Denkmalpflege; 1. Auflage 2007, Moderne Methoden der Materialuntersuchung zur praktischen Beurteilung der Oberflächenhydrophobierung ausgewählter poröser mineralischer Fassadenbaustoffe; Master Thesis, Hochschule Wismar, 2013.
- [10] Gerdes A., Oehmichen D., Preindl B., Nüesch R.: Chemical Reactivity of Silanes in Cement-Based Materials; Hydrophobe IV, 4th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Stockholm, Aedificatio Publishers, 2005, 69-78.
- [11] Gerdes A.: Hydrophobieren Grundlagen und Anwendung, Artikel, Nachweis der Wirksamkeit einer Hydrophobierung, WTA Schriftenreihe, AEDIFICATIO Verlag 2000.
- [12] Gerdes A.: Silane gegen Korrosion; Farbe und Lack, 112. Jahrgang, 2006, 45–50.
- [13] Gerdes A.: Transport und chemische Reaktion siliziumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone; Building Materials Reports No.15., Aedificatio Verlag Freiburg, 2002.
- [14] Giudici I., Gerdes A., Wittmann F.H.: Einfluss einer Hydrophobierung auf das Eindringverhalten von Chloridlösungen in Beton; Beton, 4. Int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Band I, Aedificatio Publishers, Freiburg, 1996, 317-333.
- [15] Hackenberger M.: Hydrophobierung von Sichtbetonflächen – Beschreibungen, Bewertungen-, Master Thesis, FH Konstanz, 2017.
- [16] Meier S. J., Wittmann F. H.: Influence of Quality of Concrete, Moisture Content and Age on Penetration Depth of Water Repellent Agents; Proceedings of Hydrophobe III - Third Int. Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, Hannover, K.Littmann und A.E. Charola (eds.), Aedificatio Publishers, Freiburg, 2001, 123-132.
- [17] Meier S. J., Wittmann F. H.: Influence of Quality of Concrete, Moisture Content and Age on Penetration Depth of Water Repellent Agents; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 8, 2002.
- [18] Meier S. J., Wittmann F. H.: Notwendige Kriterien für eine Tiefenhydrophobierung; 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bausinstandsetzen „MRS 99“, Aedificatio Publishers, Freiburg, 1999, 751-762.
- [19] Mühlhaus, S.: Sichtweisen zur Betonkosmetik, Zeitschrift Bausubstanz 4/ 2013.
- [20] Müller T., Gerdes A., Wittmann F.H.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit einer Hydrophobierung von Beton; Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 1, Expert Verlag, 1993, 476-493.
- [21] Oehmichen D. S.: Mechanismen der Hydrophobierung zementgebundener Werkstoffe mit siliziumorganischen Verbindungen, Dissertation, TH Karlsruhe, 2008.
- [22] Rödler K.M. (1): Betonschutz durch Hydrophobierung; Instandsetzen und Erhalten von Bauten aus Beton und Stahlbeton, Berichtsband der internationalen Fachtagung, Innsbruck, 1988, 143-148.
- [23] Rödler K.M. (2): Grundlagen der Hydrophobierung mineralischer Bindemittel; Fassadenschutz und Bausanierung, 4. Auflage, Expert Verlag, 1988, 351-367.
- [24] Roth M.: Möglichkeiten einer Erhöhung der Eindringtiefe von Imprägniermitteln; Bautenschutz und Bausanierung 10, 1987, 9-13.



- [25] Schlussbericht der Leibnitz Universität Hannover, Institut für Baustoffkunde, der Hochschule Karlsruhe für Technik und Wirtschaft , Institut für Angewandte Forschung der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Baubetrieb zum AIF – Forschungsvorhaben: „Neue Sichtbetontechnik – Integration der Erkenntnisse zu Wechselwirkungen zw. Schalungshaut, Trennmittel und Betonoberfläche in die Prozesskette bei Sichtbeton“, AIF Forschungsvorhaben 15873N, 2008-2011.
- [26] Schlussbericht des Forschungsinstitutes der Zementindustrie, Düsseldorf und des Lehrstuhls Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München zum AIF-Forschungsvorhaben: „Vermeidung von Farbunterschieden in Sichtbetonoberflächen: Mischungsstabilität und Transportvorgänge“ AIF Forschungsvorhaben 15876 N, 2008-2011.
- [27] Schweizer, O.: Wirksamkeit unterschiedlicher Hydrophobierungsmittel bei vorbelasteten und nicht vorbelasteten Betonen von Infrastrukturbauwerken, Master Thesis, FH Konstanz, 2017.
- [28] Verband der Schweizerischen Cementindustrie „Cemsuisse“: „Merkblatt für Sichtbetonbauten MB02“, Herausgeber: ww.betonsuisse.ch; April 2012.
- [29] Wendler E., Sattler L.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Steinkonservierungen mit Siliciumorganischen Stoffen; Bautenschutz und Bausanierung 12, 1989, 70-75.
- [30] Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft Für Denkmalpflege und Bauwerkserhaltung WTA, Merkblatt Hydrophobierungen.
- [31] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, ZTV – Ing.; Teil 3 Massivbau; Abschnitt 4 Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen

## **5. Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1: Liste Hydrophobierungswirkstoffe ( <a href="http://www.baustoffchemie.de/hydrophobierung/">http://www.baustoffchemie.de/hydrophobierung/</a> ). .....	5
Tabelle 2: Eigenschaften der Silane in Abhängigkeit der Art der Alkylkette [27] .....	6
Tabelle 3: Herkunft der unterschiedlichen Poren im Beton und deren Grösseneinteilung [27] .....	6
Tabelle 4: Klassifizierung der Baustoffe nach deren Wasseraufnahmekoeffizienten .....	7
Tabelle 5: Vergleich prinzipieller Hydrophobierungsmittel[28] .....	8
Tabelle 6: Übersicht aller Projektschritte in der Erhaltungsplanung.....	11
Tabelle 7: Empfohlene Untersuchungen vor Durchführung Hydrophobierung .....	14
Tabelle 8: Wichtige Prüfparameter.....	16

## **6. Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Ablaufdiagramm Entscheidung Machbarkeit Hydrophobierung .....	12
Abbildung 2: Ablaufdiagramm spezielle Überprüfung für Hydrophobierung .....	13