

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41 (0)58 765 11 11
Fax +41 (0)58 765 11 22
www.empa.ch

Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen
Bundesgasse 20
CH-3001 **Bern**

Studienbericht Nr. 5214014552

Auftrag: **Umfassende Literaturstudie über die Abnahme der Hagelwiderstandsfähigkeit von Kunststoffprodukten – Zusammenfassung, Vergleich und Kommentar der Literatur und der Erfahrungen**
Studienobjekt: Gebäudehüllen / Fassaden / Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)
Kundenreferenz: Bestell-Nr.:
Ihr Auftrag vom: 13.12.2016
Ausführung der Studie: Januar – April 2017
Anzahl Seiten: 62
Beilagen: Keine
Versand: 3 Exemplare an Auftraggeber

Zusammenfassung

Der Einfluss der Alterung von Elementen der Gebäudehülle im Allgemeinen und von Wärmedämmverbundsystemen im Speziellen auf deren Hagelwiderstandsfestigkeit wird in Fachkreisen für Hagelschlagprüfung und Prävention von Hagelschäden vermehrt diskutiert. Dieser Zusammenhang wurde bis heute nur ansatzweise untersucht. Zum Einfluss der Alterung auf den Hagelwiderstand von Wärmedämmverbundsystemen konnten keine wissenschaftlichen Publikationen gefunden werden. Im Rahmen einer Literaturstudie, ergänzt durch Befragungen von Fachexperten, wurde das publizierte Wissen und die Erfahrung zu diesem Thema hiermit zusammengetragen. Während die Wirkung von Hagelschlag, ein hochdynamischer Belastungsfall, auf diverse Bauprodukte im Neuzustand gut untersucht ist, wissen wir über das Langzeitverhalten resp. über die Alterung bei Verputzen und Wärmedämmverputzsystemen noch relativ wenig und dieses Wissen ist mit viel Unsicherheit behaftet.

Dübendorf, 03. Juli 2017

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Abt. Mechanical Systems Engineering

Projektleiter

Abteilungsleiter

Dipl. Ing. S. Michel

Prof. Dr. G. Terrasi

|

INHALTSVERZEICHNIS

1	Auftrag	5
1.1	Motivation	5
1.2	Problemstellung	6
1.3	Ziel.....	6
1.4	Vorgehen	6
2	Hagelschlag und Gebäudeschäden	8
2.1	Der Hagel.....	8
2.2	Gebäudeschäden durch Hagelschlag	10
3	Literaturrecherche	13
3.1	Allgemeine Recherche.....	13
3.1.1	Eigenschaften von Wärmedämmverbundsystemen und verputzten Fassaden	13
3.1.2	Technische Normen, Richtlinien und Prüfvorschriften.....	16
3.1.3	Allgemeine Publikationen und Beschreibung von kommerziellen Produkten	19
3.2	Wissenschaftliche Literaturrecherche	21
3.2.1	Suchkriterien und Schlüsselbegriffe der Literaturrecherche	21
3.2.2	Literaturrecherche zu Alterung von Gebäudehüllen	22
3.2.3	Literaturrecherche zu Mechanismen der Alterung von Kunststoffen und Verbundsystemen	26
3.2.4	Literaturrecherche zum Impactverhalten von Kunststoffen und Verbundsystemen	33
3.2.5	Literaturrecherche zum Hagelwiderstand von Gebäudehüllen.....	35
4	Erfahrungen zu Alterung und Hagelwiderstand von Elementen der Gebäudehülle	36
4.1	Früherer Erfahrungen der Empa.....	36
4.2	Erfahrungen der VKF-Expertengruppe und -Geschäftsstelle.....	37
4.3	Erfahrungen der kantonalen Gebäudeversicherungen.....	39
4.4	Erfahrungen von Experten für Gebäudehüllen.....	39
4.5	Erfahrungen von Hagelschlagprüfstellen	40
4.5.1	Erfahrungen des IBS Linz	40
4.5.2	Erfahrungen von FPC.....	40
4.6	Erfahrungen der Universität Bern	41
4.7	Feedback von anderen Prüfstellen und Firmen	42
4.8	Eigene Beobachtungen von Schäden an Fassaden	42
5	Bewertung des Stand des Wissens und Erfahrung	48
5.1	State-of-the-Art betreffend Alterung und Hagelwiderstand.....	48
5.2	Hauptkenntnisse aus Literaturrecherche	49
5.3	Offene Fragen	50
5.4	Weiteres Vorgehen	52
6	Schlussfolgerungen	53
	Referenzverzeichnis	55

ABKÜRZUNGEN

- ABS : Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere
ASA : Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copolymere
ANSI : American National Standard Institution
ASTM : American Standards for Testing of Materials
DIN : Deutsche Industrienorm, s. www.din.de
EIFS : External Insulation Finishing Systems; nordamerikanische Bezeichnung für WDVS, s. https://en.wikipedia.org/wiki/Exterior_insulation_finishing_system
EN : Europäische Norm, s. http://europa.eu/youreurope/business/product/standardisation-in-europe/index_de.htm
EOTA : European Organisation for Technical Assessment, s. www.eota.eu
EPS : expandiertes Polystyrol
ESLC : Estimated Service Life of a Component nach Moser [3]
ETAG : European Technical Assessment Guidline, s. www.eota.eu/en-GB/content/etags-used-as-ead/26/
ETICS : External Thermal Insulation Composite Systems; wissenschaftliche Bezeichnung für WDVS
EWIS : External Wall Insulation System, europäisch-englische Bezeichnung für WDVS, s. https://en.wikipedia.org/wiki/External_wall_insulation
FPC : Flüeler Polymer Consulting GmbH, s. www.fluelerpolymer.ch
IBS : Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH, Linz A, s. www.ibs-austria.at
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration der USA
PC : Polycarbonat
PMMA : Polymethylmethacrylat
PU : Polyurethan
PVC : Polyvinylchlorid
SIA : Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein, s. www.sia.ch
SMGV : Schweizerischer Maler- und Gipserunternehmer-Verband, s. www.smgv.ch
SRF : Schweizer Radio und Fernsehen, s. www.srf.ch
USA : United States of America
VAWD : Verputzte Aussenwärmedämmungen; Schweizerische Bezeichnung für WDVS
VKF : Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (der Schweiz), s. www.vkf.ch
WDVS : Wärmedämmverbundsysteme; deutsche Bezeichnung, s. auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Wärmedämmverbundsystem>
XPS : extrudiertes Polystyrol

Symbolliste

- HW* : Hagelwiderstand

1 AUFTRAG

1.1 Motivation

Die Richtlinien der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen sehen vor, dass die Widerstandsfestigkeit von Bauprodukten gegen Hagelschlag, der sogenannte Hagelwiderstand, grundsätzlich im Neuzustand bestimmt wird, s. Hinweis „Diese Klassifikation gilt für neue Materialien. Der Hagelwiderstand kann sich innerhalb weniger Jahre infolge natürlicher Bewitterung vermindern“ in www.hagelregister.ch/hagelsicher-bauen/bauteile-finden.html. Ein Produkt sollte jedoch nicht nur zu Beginn, sondern während der gesamten vorgesehenen Einsatzdauer seine Funktionstüchtigkeit aufrechterhalten können. Dies soll auch für den Hagelwiderstand gelten. Eine durchschnittliche Lebensdauer für verputzte Fassaden wird in [1], mit 30 bis 40 Jahren angegeben. Gemäss einer Studie aus England wird eine typische Lebensdauer für Aussenwände von 20 bis 60 Jahren erwartet [2]. Moser hat ein statistisches Modell vorgestellt um eine Lebensdauervorhersage für Gebäudeteile zu erstellen [3]. Sein Modell geht von einer graduellen Abnahme der Sicherheit, der Funktionalität und der Erscheinung aus, s. Bild 1. Die als Estimated Service Life of a Component (ESLC) bezeichnete Lebensdauer hängt nach ihm von folgenden Parametern ab: Qualität des Bauproduktes, Konstruktion (Design), Ausführung, Umgebungsbedingungen, Gebrauchsbelastung und Umfang des Unterhaltes.

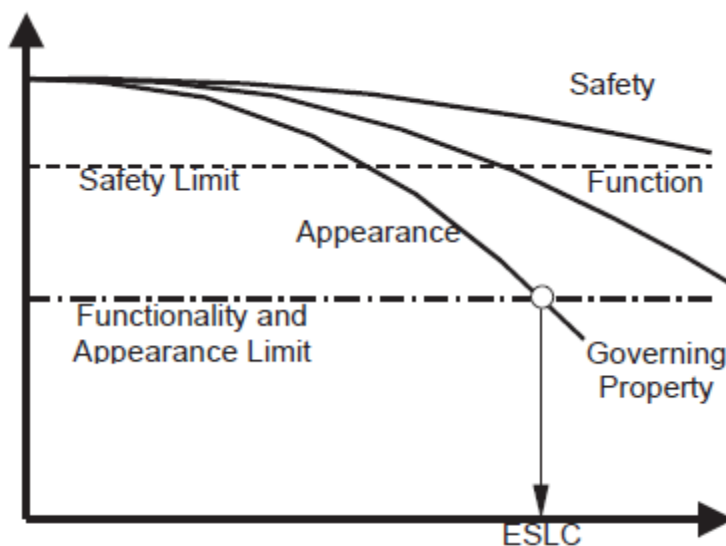


Bild 1: Schematische Darstellung des Abfalles von Eigenschaften der Gebäudehülle mit dem Alter, nach [3].

Das wirtschaftliche und technologische Umfeld hat in den letzten Jahren eine Vielzahl von synthetischen Baumaterialien auf den Markt gebracht. Dabei haben Kunststoffe nicht nur bei Storen, Fensterläden, Schwimmbadabdeckungen und Oberlichtern Einzug genommen, sondern werden zunehmend auch in Verputzsystemen und Anstrichen an Fassaden, vor allem als Klebsysteme und Bindemittel, verwendet. Aussenwände weisen heutzutage mehrlagige Schichtaufbauten auf, welche in der Regel mit einem Armierungsnetz aus Glasfasern verstärkt wird. Polymer-Fasern werden wegen schlechter Kompatibilität mit dem Zement nur in speziellen Fällen eingesetzt [4]. Bei einer Aussendämmung ist eine Schicht dieses Aufbaus, die Wärmedämmschicht, deutlich dicker und leichter als die übrigen Schichten. Diese Schichtbauweise stellt im Vergleich zu traditionellen Mörtel- oder Zement-Verputzen auf Backstein- oder Natursteinmauern ein komplexes Composite-Werkstoffsystem dar.

Für reine Kunststoffprodukte wie z.B. Polycarbonat-, Polymethylmetacrylat- oder Polyolefin-Werkstoffe ist seit den 1980er Jahren das Verständnis der Alterungseffekte und deren Verhinderung, oder mindestens Verzögerung durch Zugabe von diversen Additiven oder Beschichtungen bis zu einem Grad gereift, dass die Auswirkung auf die Funktionalität der Produkte über die Lebensdauer als bekannt angenommen werden kann. Dadurch wurden diese Produkte wesentlich verbessert, auch was deren Hagelwiderstand betrifft [5, 6].

Alterungseffekte an Fassaden können durch aufwändige Grosslaborversuche an ganzen Fassadensegmenten durch künstliche Bewitterung provoziert und wissenschaftlich untersucht werden. Dabei wurden bis jetzt fast ausschliesslich primäre Funktionen wie Strukturintegrität, Wärmedämmung und mechanische Festigkeit als Eigenschaften beobachtet und gemessen, s. z. B. [7]. Die Auswirkung von solchen Alterungsphänomenen auf den Hagelwiderstand ist noch kaum untersucht.

1.2 Problemstellung

Die Alterung von modernen Komponenten der Gebäudehülle, insbesondere von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS), und deren Einfluss auf den Hagelwiderstand sind offene Fragen, welche von Fachleuten für Hagelschlagprüfung und Gebäudeschäden in den letzten Jahren vermehrt diskutiert wurden. Im Sinn einer Optimierung der Präventionsbemühungen gilt es diesbezüglich die etablierte Hagelschlagprüfung nach VKF-Richtlinien, weiterzuentwickeln. Im Auftrag der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen soll in der vorliegenden Arbeit als erster Schritt zu einer fundierten Klärung dieses Fragenkomplexes einerseits versucht werden, den Stand des Wissens in der Literatur und andererseits die gemachten praktischen Erfahrungen im Sinn eines Reviews aufzuarbeiten.

1.3 Ziel

Aufarbeitung des Stand des Wissens und der Erfahrungen in einer Literaturstudie ergänzt durch Interviews mit Fachexperten betreffend der Alterung von Gebäudehüllen, insbesondere von Verputzen und Wärmedämmverbundsystemen, und deren Auswirkung auf den Hagelwiderstand.

1.4 Vorgehen

Die Auftraggeberin hat die Fachkommission Elementarschutzregister (FER) als Begleitgruppe definiert. Diese wird geleitet und koordiniert durch den Geschäftsbereichsleiter Elementarschaden-Prävention M. Jordi. Anlässlich der FER-Sitzung vom 19. August 2016 wurde das Projektziel von M. Jordi und den Vorschlag wie wir dieses Ziel erreichen wollen durch S. Michel von der Empa vorgestellt und anschliessend im Gremium diskutiert. Dabei wurde von M. Jordi erläutert, dass diese Literaturstudie parallel, aber mit gegenseitigem Austausch, zu den am IBS in Linz laufenden experimentellen Untersuchungen an Wärmedämmverbundsystemen durchgeführt werden soll. M. Jordi betonte gegenüber der Empa bereits im Vorfeld (Besprechungen vom 1. März 2016 und 8. April 2016) eine Fokussierung auf Verputzsysteme, insb. Wärmedämmverbundsysteme (s. Email vom 9 Juni 2016 an die Vertreter des Empa Lab 304). Diese Fokussierung wurde durch die FER bestätigt. Demnach liegt der Fokus der Literaturstudie auf der Alterung von Verputzsystemen, insb. Wärmedämmverbundsystemen, und deren Auswirkung auf den Hagelwiderstand.

Das publizierte Wissen und die Erfahrungen von Experten werden in folgenden Arbeitsschritten zusammengetragen, verglichen und bewertet:

- Wissenschaftliche Literaturrecherche zum Themenkomplex, s. Kapitel 3.
- Interviews mit Fachexperten der Hagelwiderstandsprüfung zu praktischen Erfahrungen zum Thema Alterung/Bewitterung von Bauprodukten der Gebäudehülle und der Auswirkung auf den Hagelwiderstand, s. Kapitel 4.1 und 4.4.
- Interviews mit Fachexperten von Gebäudehüllen zur Frage der Alterung von Fassaden und Dämmungen, s. Kapitel 4.2 und 4.3.
- Zusammenfassung und Beurteilung der Erkenntnisse (dieser Bericht).

In einer späteren Phase (z.B. in einem Folgeprojekt) sollten dann darauf aufbauend eine physikalisch-analytische Bearbeitung oder mit numerischen Simulationen der Fragestellung folgen. Dies erstens durch die Beschreibung des Hagelschlages als dynamischen Lastfall (Impact) für die Gebäudehüllen mit der Bestimmung der dabei involvierten Material- und Systemeigenschaften seitens der Gebäudehülle. Zweitens durch die Beschreibung von möglichen Alterungsprozessen, inkl. deren Überlagerung und Abschätzung der Auswirkung auf den Hagelwiderstand.

Basierend auf diesen Erkenntnissen sollten Testmethoden an kleineren Proben entwickelt und mit Hagelversuche an natürlich und künstlich gealterten WDVS verglichen werden.

2 HAGELSCHLAG UND GEBÄUDESCHÄDEN

2.1 Der Hagel

Die Definition von „Hagel“ gemäss Wikipedia (<https://de.wikipedia.org/wiki/Hagel>) ist eine Form von Niederschlag, der aus Eisklumpen besteht und überwiegend in warmen Jahreszeiten und in den Mittleren Breiten auftritt. Zur Abgrenzung spricht man erst bei einem Durchmesser von über 0,5 cm von Hagel bzw. Eishagel. Hagelkörner entstehen in den niedrigeren Schichten von Gewitterwolken bzw. innerhalb einer Gewitterzelle durch unterkühltes Wasser, das an Kristallisationskernen zu Eis gefriert. Eine Internetseite des SRF beschreibt den Hagel wie folgt [8]:

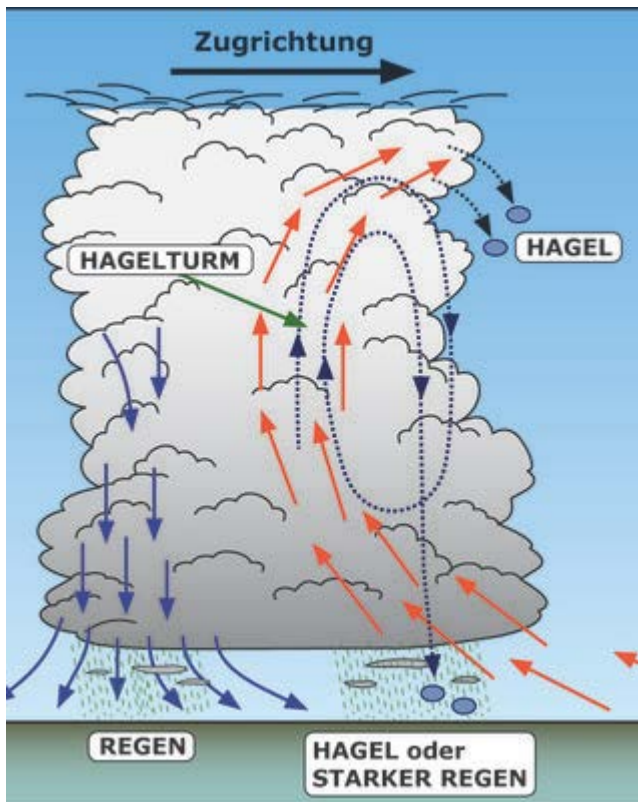


Bild 2: Gewitterwolke mit Hagelbildung (aus www.srf.ch, nach Karl Heinz Hack)



Bild 3: Ein 6 cm großes Hagelkorn, das durch das Zusammenkleben kleinerer Hagelkörner entstanden ist (aus Wikipedia, Quelle: NOAA)



Bild 4: Deutlich erkennbare Anlagerungsschichten im Kern eines großen Hagelkornes (aus Wikipedia)

Eine Gewitterwolke kann bis über 10km weit in den Himmel hinauf reichen; in diesen Höhen ist die Luft sehr kalt (gemäss Standardatmosphäre $< -50^{\circ}\text{C}$). Auch wenn im Sommer die Nullgradgrenze 4000 Meter übersteigt, darüber hat die Luft Minustemperaturen. Ein beträchtlicher Teil der Gewitterwolke liegt damit im Bereich der negativen Temperaturen. Im Gewitter herrschen starke Auf- und Abwinde. Wassertröpfchen können mit diesen Aufwinden in grosse Höhe verfrachtet und unterkühlt werden. Wasser unter 0°C muss nicht sofort gefrieren, denn zum Gefrieren braucht es noch sogenannte Kondensationskerne. Sie sind die Basis, an ihnen frieren die Wassertropfen fest. Kleine Eispartikel eignen sich besonders gut als Kondensationskerne. Je länger ein Eisteilchen in der Gewitterwolke herumgeschleudert wird, desto grösser wird es: Ein Hagelkorn, s. Bild 3 entsteht.

Hagel ist aber nicht überall in der Gewitterwolke vorhanden. Er bildet sich bevorzugt im sogenannten Hagelturm, s. Bild 2: Eine Zone mit sehr starken Auf- und Abwinden. Oft macht ein Hagelkorn mehrere Durchgänge in den Auf- und Abwindzonen, wird grösser und grösser, bis es schliesslich zur Erde fällt. Im Querschnitt sind die verschiedenen Wachstumsschichten deutlich sichtbar, analog Baumringen, s. Bild 4.

Nicht alle Regionen der Schweiz bergen das gleiche Risiko für Hagelschäden. Hagelschlag ist auf starke Gewitter begrenzt. Diese bilden sich einerseits entlang des Juras, bevorzugt in der Nordwestschweiz, s. Bild 5. Andererseits sind der Alpennordhang und vor allem die Region Berner Oberland bis Napf und Zentralschweiz bekannt für heftige Gewitter. Südlich der Alpen trifft Hagelschlag sehr häufig das Mittel- und Südtesin.



Bild 5: Hagelgefährdung in der Schweiz (aus www.schutz-vor-naturgefahren.ch/naturgefahren/hagel)

Meteo Schweiz hat eine Webseite erstellt in der man die Statistik über extreme Niederschlagsereignisse nach geografischer Lage in der Schweiz abrufen kann [9].

In den späten 1950er und frühen 1960er Jahren wurde noch versucht das Problem durch die direkte Bekämpfung des Hagels zu lösen. Mittels Raketenbeschuss sollte dabei eine Gewitterwolke frühzeitig zum Ausregen veranlasst werden [10]. Dieser Ansatz wurde jedoch mangels Erfolg wieder fallen gelassen.

Ein anderer Ansatz ist die Entwicklung von hagelfesten Produkten für die Gebäudehülle. Die dazu notwendige standardisierte Prüfung von Produkten wurde durch die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) vorangetrieben. Die Prüfverfahren nach VKF erlauben eine objektive Klassierung diverser Bauprodukte in 5 Hagelwiderstandsklassen. Entsprechende Bauprodukte werden dann mit der an Ihr festgestellten Hagelwiderstandsklasse ins VKF-Hagelregister aufgenommen [11].

Jüngste Entwicklungen gehen dahin, dass mittels eines Frühwarnsystems, empfindliche Gebäudehüllenteile wie Sonnenstoren oder Lamellenstoren vor einem Gewitter mit möglichem Hagelschlag in Sicherheit, gebracht, sprich eingefahren werden. Die heutigen elektronischen Verbindungen erlauben eine automatische Ansteuerung der Haustechnik via moderne Kommunikationsnetzwerke, initialisiert durch aktuelle Meteor-Daten aus einer Wetterzentrale, s. Hagelvorwarnung in [12].

2.2 Gebäudeschäden durch Hagelschlag

In einem Risk Communiqué einer amerikanischen Versicherungsgesellschaft wird die Hagelverteilungskarte für die USA gezeigt [13]. Gemäss einer Auswertung für die USA sind Forderungen aus Hagelschäden in Milliardenhöhe zu verzeichnen [14].

Auch in Europa und insbesondere in der Schweiz sind ökonomische Schäden durch Hagel bekannt und dokumentiert. Das Hagelereignis vom 12./13. Juli 2011 hat alleine im Kanton Aargau 151 resp. 145 Millionen Franken Schaden angerichtet. Es wurden insgesamt 20'500 anerkannte Hagelschäden verzeichnet. Dieses Ereignis wurde als eines alle 50 bis 100 Jahre einmal vorkommendes Hagelunwetter eingestuft [15]. Im gleichen Bericht wird auch eine Auswertung von historischen Hagelereignissen dargestellt, s. Bild 6.

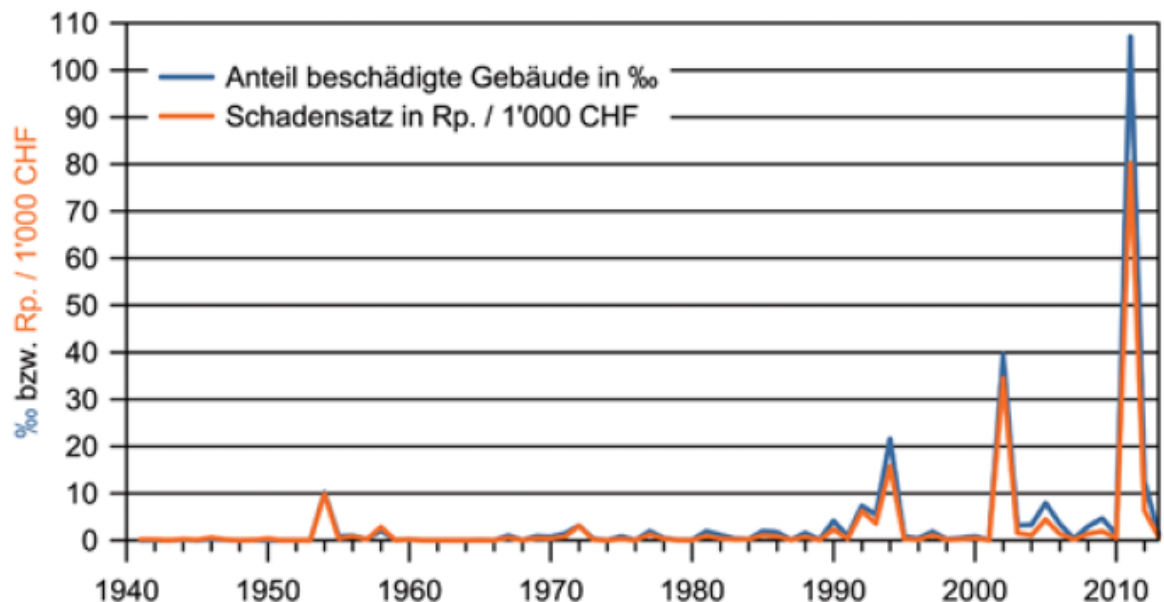


Bild 6: Gebäudeschäden seit 1941 im Kanton Aargau aus [15].

Die Verteilung der gemeldeten Schadenfälle auf die verschiedenen Gebäudeelemente ist in der folgenden Darstellung gezeigt. Wände und Fassaden sind demnach die zweithäufigste Kategorie, welche von Hagel betroffen wurde. Der Anteil der Wand- und Fassadenschadenssumme an der gesamten Schadenssumme ist

ebenfalls sehr hoch. Typische Wand- und Fassadenschäden sind Risse und Abplatzungen des Verputzes, s. Bild 9. In den Schlussfolgerungen des Berichtes wird die statistisch festgestellte höhere Empfindlichkeit von neueren Wohngebäuden erwähnt: Die Auswertung der Schadensvergütungen zeigt empirisch, dass jüngere Wohngebäude deutlich häufiger als ältere von Hagelschäden betroffen sind. Sie werden auch stärker betroffen (höherer Schadensgrad). Dieses Resultat ist gemäss den Autoren jedoch nicht auf einen technischen Alterseinfluss zurückzuführen.

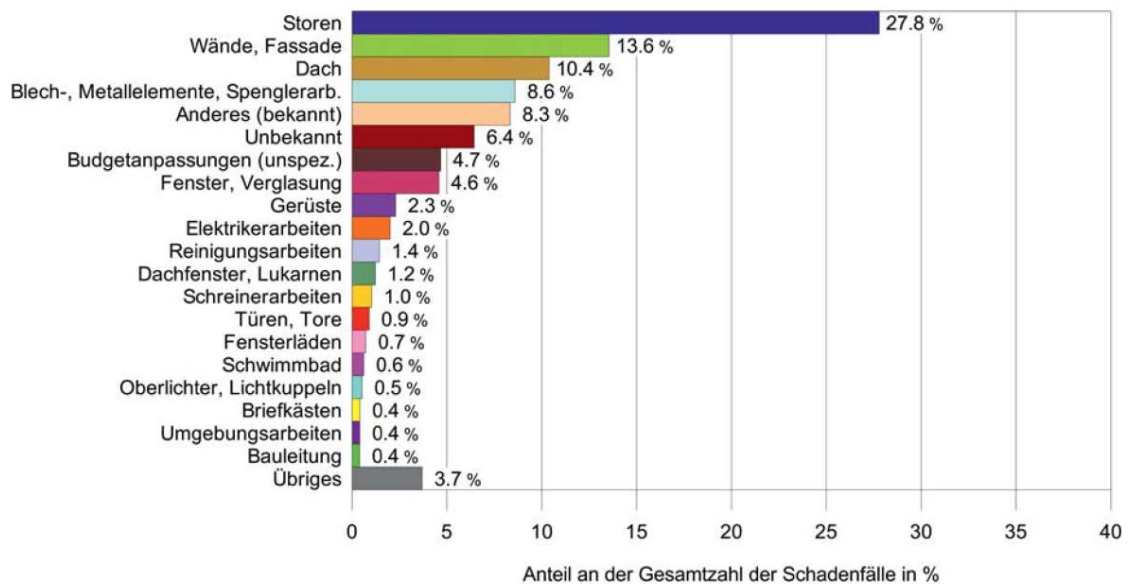


Bild 7: Schadenverteilung des Hagelereignisses 12./13. Juli 2011 im Kanton Aargau [15].

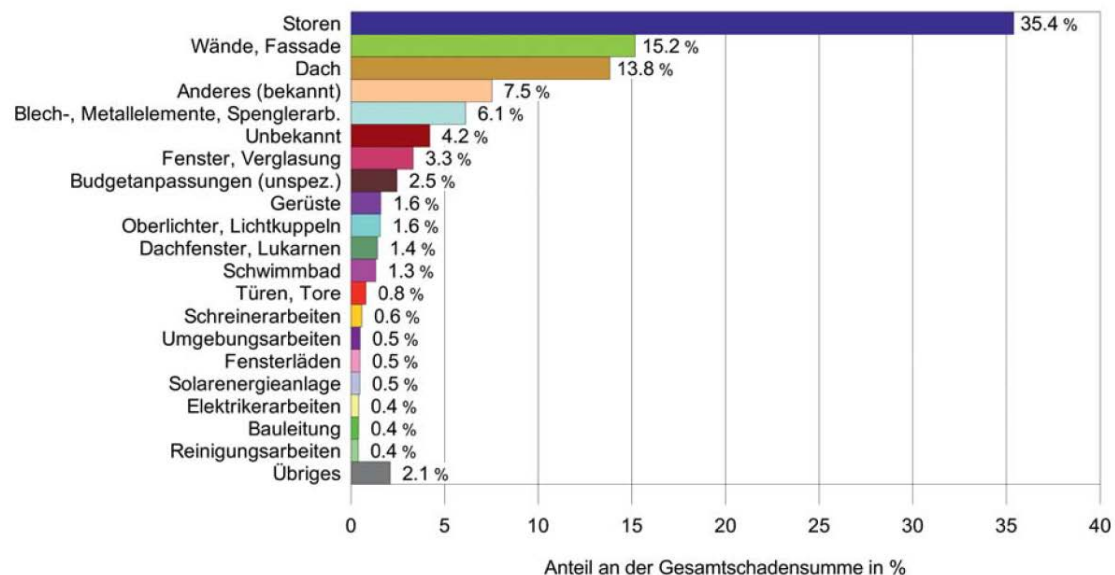


Bild 8: Schadenssummenverteilung des Hagelereignisses 12./13. Juli 2011 im Kanton Aargau [15].

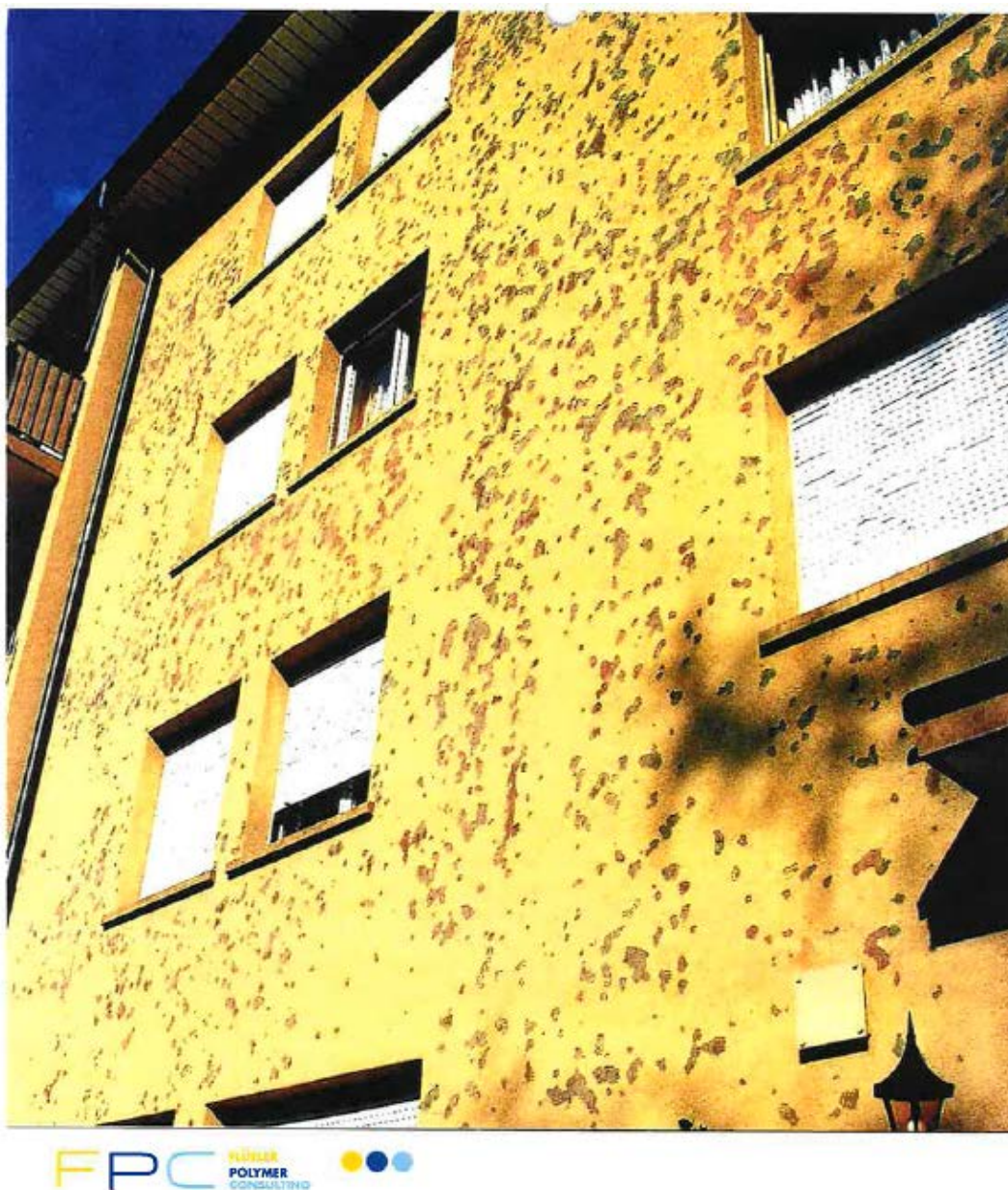


Bild 9: Starker Hagelschlag-Schaden an einer Fassade [16].

3 LITERATURRECHERCHE

3.1 Allgemeine Recherche

3.1.1 Eigenschaften von Wärmedämmverbundsystemen und verputzten Fassaden

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) sind in der Schweiz als sogenannte Verputzte Aussenwärmedämmungen (VAWD) seit den 1960er Jahren im Einsatz [17]. Diese werden auch häufig bei anstehenden Renovationen oder Sanierungen angewendet, wenn es darum geht den Energieverbrauch zu reduzieren. Dies ist bei historisch wertvollen Gebäuden aus denkmalpflegerischen Gründen oft nicht möglich. In solchen Fällen kann nur eine Innenwärmedämmung angewendet werden, s. z. B. [18]. Im Jahre 1970 wurden Empfehlungen für den Wärmeschutz im Hochbau von der SIA herausgegeben (s. SIA-180), welche zur Anwendung von WDVS motivierte. Spätestens seit den Ölkrisen 1973 und 1979 werden WDVS als ökonomische und ökologische Gebäudehüllen-Dämmungen angewendet. Im übrigen Europa war eine ähnliche Entwicklung wie in der Schweiz zu beobachten. Aussenwärmedämmsysteme werden mit dem englischen Begriff External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) seltener als External Wall Insulation System (EWIS) bezeichnet. Auch in Nordamerika sind WDVS im Einsatz, werden dort jedoch als External Insulation Finishing Systems (EFIS) bezeichnet. In einer Studie von Pasztory et al. wurden typische Repräsentanten des europäischen und des amerikanischen Systems miteinander verglichen [19]. Dabei sind die europäischen WDVS im Allgemeinen wirksamer, da sie eine dickere Wärmedämmschicht aufweisen. Die Funktion der Wärmedämmung wird durch eine typischerweise 15cm bis 30cm dicke Platte aus einem Dämmstoff wahrgenommen. Dabei wird nicht nur die Wärmespeicherung im Winter (bei tiefen Aussentemperaturen) positiv beeinflusst, sondern auch der Wärmehaushalt im Sommer, wenn die Umgebungstemperatur tagsüber höher ist als eine gewünschte Gebäudeinnentemperatur [20]. Die technischen Anforderungen an ein WDVS sind nebst mechanischer Strukturintegrität die hygro-thermischen Eigenschaften. Das System muss innere Strukturen der Wand vor unzulässig hoher Feuchtigkeit schützen und dies bei moderaten Temperaturschwankungen im Innern. Hohe Anforderungen werden insbesondere im Holzbau gestellt. Einen guten Überblick über die experimentellen und rechnerischen Nachweismöglichkeiten werden in [21] beschrieben. Darin wird als Referenzklima für die künstliche Bewitterung die ETAG-004 verglichen mit typischen Klimas in Deutschland (Hamburg, Mannheim und Schwarzwald). Die heutigen rechnerischen Simulationsmöglichkeiten können die unter ETAG-Bewitterungszyklen generierten Temperatur- und Feuchte-Zeitverläufe sehr gut nachbilden. Voraussetzung dafür ist aber, dass für alle beteiligten Materialkomponenten die entsprechenden hygro-thermischen Materialkennwerte bekannt sind.

Das am häufigsten verwendete Dämmmaterial ist Polystyrol-Hartschaum. Dieses Material gibt es in zwei Ausführungen: Extrudiert „XPS“ oder expandiert „EPS“. Heute werden ca. 88% der Anwendungen mit Polystyrol-Hartschaum realisiert, gefolgt von Mineralwolle mit ca. 8%, Polyurethan-Schaum (PU) mit <5% und biologischen Materialien wie Hanf, Holzwolle u. a. [22]. Diese Hartschaumplatten werden mittels eines Klebstoffs auf den Untergrund geklebt, und teilweise mit Dübeln mechanisch gesichert. Die Aussenseite besteht häufig aus einer in einer Armierungsmasse eingebetteten Armierung (Bewehrung), meist ein Glasfaser-Netz. Diese Armierung dient der mechanischen Stabilisierung. Die äusserste Lage bildet dann eine Deckschicht (Deckputz und Anstrich), welche den Witterungsschutz sicherstellen soll und das optische Aussehen (Textur und Farbe) der Fassade definiert. Bild 10 zeigt schematisch einen solchen Aufbau mit den deutschen Bezeichnungen und Bild 11 das analoge Schema mit den englischen Bezeichnungen.



Bild 10: Innerer Aufbau eines typischen Wärmedämmverbundsystems [23]

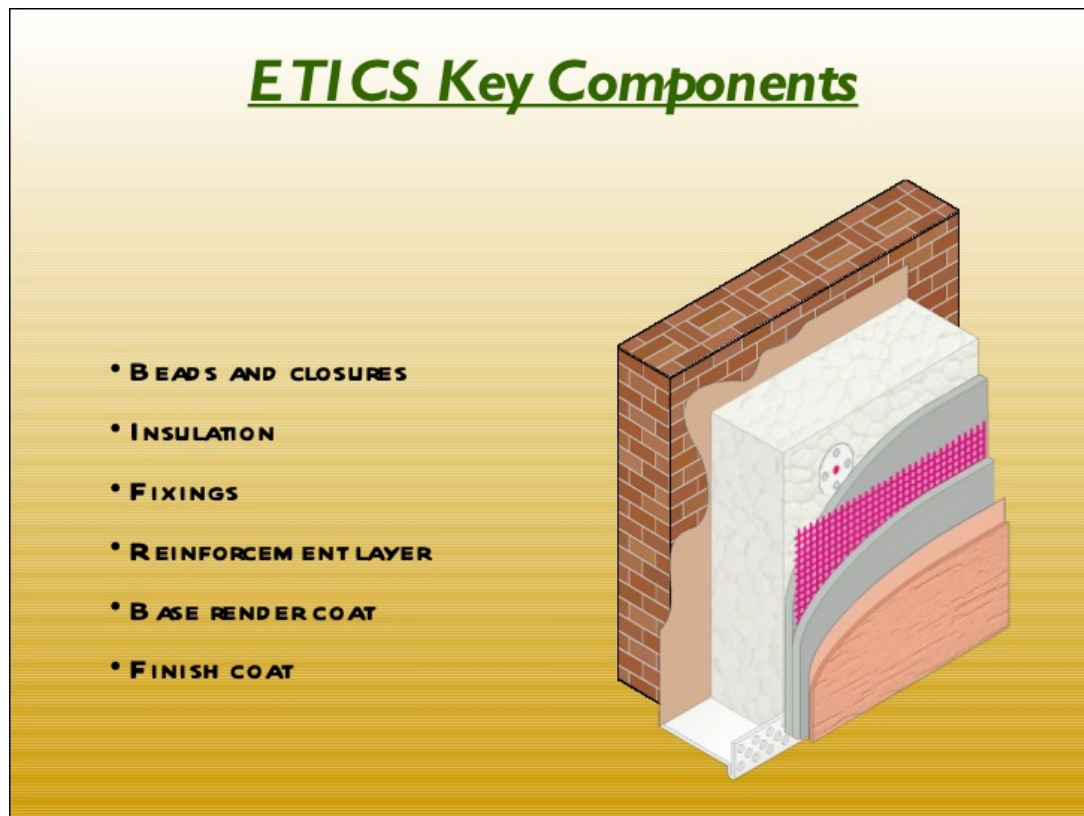


Bild 11: Innerer Aufbau eines typischen Wärmedämmverbundsystems, aus

www.slideshare.net/MichalHarcej/smartercrew4you

Bei den Putzsystemen sind mineralische und organische Systeme zu unterscheiden [24]. Auf diese Klassierung haben auch Büchli und Flüeler im Interview hingewiesen, s. Kapitel 4.3 und 4.4. Die Grenze zwischen den beiden Klassen an Putzen wird bei 5% Festkörperanteil des Dispersionsbindemittels festgelegt. In beiden Fällen werden Partikel zuerst in einer wässrigen Dispersion aufgemischt, welche dann durch den Trocknungsvorgang in eine feste Matrix gebunden werden. Als Partikel werden traditionell Sandkörner verwendet. Füllstoff-Partikel gibt es in unterschiedlicher Grösse, typischerweise zwischen 1mm und 6mm. Als Matrix-

Systeme kommen bei den anorganischen Putzsystemen Zement-basierte Mischungen zum Einsatz (Mischung aus Kalkstein und Ton). Bei den organischen Putzsystemen wird die Matrix einerseits auf Acryl-Basis, andererseits auf Silikon-Basis aufgebaut [24]. Es gibt auch Mischformen. Weitere Inhaltsstoffe sind Additive zur Beeinflussung der UV-Beständigkeit (z.B. Titan-Dioxid-Nanopartikel), zur Vorbeugung von Algen- und Pilzbefall (Algizide, Fungizide) sowie Farbpigmente für die Farbgebung. Je nach Bauprodukt und Einbausituation sind zwischen diesen Hauptlagen noch Zwischenlagen einzubringen. Für die Montage sind vom Systemlieferanten meist detaillierte Anweisungen vorhanden, die eine fehlerhafte Installation vermeiden sollen. Dazu gehören typischerweise Anforderungen an die klimatischen Randbedingungen (Temperaturbereich, Feuchtigkeit, Sonneneinstrahlung, Wind und Staub) und Verarbeitungszeiten bei der Zubereitung des Klebers/Putzes und Trocknungspausen bei der Anbringung der verschiedenen Lagen. Auch die Dispergierung von Pigmenten (TiO_2 und andere) muss durch ein sorgfältiges Mischen vor der Applikation vorgenommen werden, da sonst die geforderten mechanischen und optischen Eigenschaften des polymerisierten Films nicht gewährleistet werden können [25]. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass ein Styrene-Acryl-Bindemittel eine bessere Abbindung von Farbanstrichen erreicht als ein Acryl-Bindemittel (mit oder ohne Pigmentkapsel-Technologie) und dass die reinen Acryl-Bindemittel bei einer natürlichen Bewitterung von 19 Monaten in Südfrankreich weniger ausbleichen. Dabei helfen weitere Zusatzstoffe wie opake Polymere (OP) an Stelle von Pigmenten und die Pigment-Encapsulation-Technologie (PET) [25, 26]. Auch Mischungen von Polystyren-Acryl- und Polysiloxan-basierten Anstriche wurden auf deren Dauerhaftigkeit untersucht. Dabei ist die Durchmischung dieser beiden Anteile an der Dispersion jedoch schwierig. In [27] werden die chemischen und physikalischen Eigenschaften solcher Anstrichsystemen präsentiert: Die Festkörperanteile wurden bestimmt, wie auch die Übergangstemperatur, und die dynamisch-mechanischen Eigenschaften. Die Morphologie solcher komplexen Anstriche wurde analysiert. Auch bei Holzanstrichen wurden Acryl-basierte Dispersionen in den letzten Jahren weiterentwickelt [28]. An Hand von diesen Studien wird ersichtlich, dass moderne Anstriche einen komplexen Aufbau haben.

Die Endqualität der mit WDVS ausgerüsteten Fassaden hängt ganz wesentlich von der Qualität der Arbeit bei der Montage ab. Viele ästhetische Baumängel sind auf eine unsachgemässe Installation zurückzuführen [22]. Technische Baumängel, wie z. B. Rissbildung können ebenfalls durch fehlerhafte Anwendung (z. B. falsche Mischungsverhältnisse bei der Zubereitung, zu starke Sonneneinstrahlung bei der Trocknung, Nichteinhalten der Trocknungszeiten, etc.) resultieren [22]. Fallbeispiele von Problemen mit verputzten Aussenwärmedämmungen werden in [17] diskutiert. Eine Systematik für die Erfassung von vermuteten Schadensursachen beschreibt Sulakatko in [29, 30].

Die Funktionsweise von Aussenputzen und deren Behandlung in den DIN-Normen beschreibt Künzel in einem Artikel [31]. Vom gleichen Autor erschien 2015 ein Artikel über die Beurteilung des Feuchteschutzes nach DIN 4108-3 [32]. In beiden Artikeln wird die rechnerische Behandlung des Temperatur- und Feuchtehaushaltes von Gebäudehüllen besprochen. Darin kommt zum Ausdruck, dass die neueren Dämmsysteme die Problematik des Feuchtehaushaltes eher verschärfen und besonders bei nicht perfekter Ausführung der Gebäudehülle Schäden durch eingeschlossene Restfeuchtigkeit, fehlende Luftkonvektion und/oder Schlagregen auftreten können.

Eine wissenschaftliche Studie vergleicht das Konzept der äusseren mit der inneren Wärmedämmung für Gebäude im mediterranen Klima [33]. Darin wurden transiente Temperatur- und Feuchtigkeitszeitverläufe simuliert. Eine ökonomische und ökologische Lebensdauer-Bilanz von WDVS wird in [34] für Anwendungen in Polen gemacht. Die dort angewendete Methodik des Life Cycle Impact Assessment wurde nach ISO 14040 gemacht. Für verschiedene Fälle konnten sie eine optimale Wärmedämmschichtdicke ermitteln um einen möglichst geringen ökonomischen und ökologischen Impact über 30 Jahre zu erreichen. Hinweise, dass bei WDVS mit Alterung des Materials zu rechnen ist, gibt es darin keine.

3.1.2 Technische Normen, Richtlinien und Prüfvorschriften

In der Schweiz sind die Richtlinien des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) von Bedeutung. Für Verputz- und Trockenbauarbeiten gibt es die SIA 242, für Wärmedämmverbundsysteme die SIA 243, [35, 36]. Die SIA 243 ist neu auch als Schweizer Norm SN 567 243 gültig.

- SIA 242 Verputz- und Trockenbauarbeiten [35]
- SIA 243 Verputzte Aussenwärmedämmung [36]
- SIA 261 Einwirkungen auf Tragwerke
- SIA 280 Kunststoff-Dichtungsbahnen (Polymer-Dichtungsbahnen) Anforderungswerte und Materialprüfung

In diesen Normen werden Anforderungen an die Konstruktion, die Verarbeitung und Anwendung, aber auch an zu erreichende Materialfestigkeiten gestellt. So werden in der SIA 242 der maximale E-Modul, die Kapillare Wasseraufnahme, die Druckfestigkeit, die Trockenrohddichte, sowie die Haftzugfestigkeit für den Aussenputz vorgegeben. Entsprechende Prüfanweisungen, wie diese Werte zu bestimmen sind, werden referenziert. Für die Wärmedämmplatten werden ebenfalls Zugfestigkeiten, Haftzugfestigkeiten und minimale Dichten gefordert. Für die mechanische Festigkeit und Steifigkeit sehr relevant sind die Schichtdicken und deren Toleranzen, welche ebenfalls vorgegeben werden. Sowohl die SIA 261 als auch die SIA 280 enthalten einen Abschnitt zum Thema Hagelschlag, welche dieses Phänomen als zu berücksichtigenden Lastfall in der Projektierung aufführt.

Bevor die VKF Ihre Richtlinien für die Bestimmung des Hagelwiderstandes mit Eiskugeln entwickelt hatte, wurde die Ermittlung des Hagelwiderstands mit PA Kugeln in der SIA Norm 271 „Abdichtungen von Hochbauten“ definiert. Diese Norm wurde letztmals 1986 herausgegeben. Die VKF-Richtlinien haben die Prüfung des Hagelwiderstandes von Dichtungsbahnen dann übernommen. Für Verputzsysteme auf festem Untergrund und WDVS sind folgende Prüfbestimmungen relevant:

- VKF Richtlinie Nr. 00A Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes - Allgemeiner Teil A [37]
- VKF Richtlinie Nr. 00B Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes - Allgemeiner Teil B [38]
- VKF Richtlinie Nr. 08 Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes – Putz auf Aussen-dämmung [39]
- VKF Richtlinie Nr. 21 Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes – Putz auf festem Untergrund [40]

Für diverse weitere Bauprodukte, wie Ziegel, Schwimmbadabdeckungen, Rollläden, etc. gibt es weitere spezifische Prüfbestimmungen in dieser Reihen.

Für Putzmörtel, resp. Innen- und Aussenputze gibt es folgende DIN- resp. EN-Normen:

- DIN EN 998-1 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel [41]
- DIN EN 13914-1 Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen – Teil 1: Aussenputze [42]
- DIN EN 13914-2 Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen – Teil 2: Innenputze [43]
- DIN 18550-1 Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Aussenputze [44]
- DIN 18550-2 Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze [45]

Für die Wärmedämmstoffe ist es die folgende DIN-Norm:

- DIN 4108-10 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe [46]
- DIN EN 13499 Wärmedämmstoffe für Gebäude - Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) aus expandiertem Polystyrol - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13499 [47]

Franzoni referenziert in ihrer Publikation [48] eine EN-Norm für die Spezifikation von ETICS, sowie weitere für die Bestimmung diverser Kennwerte von Dämmstoffen, wie der Zugfestigkeit, Wegreissfestigkeit, mechanischen Eigenschaften des Glasfasernetzes, Impact-Verhaltens, Penetrationsfestigkeit und Wärmedämmeigenschaften. Diese EN-Normen sind auch als DIN-Normen übernommen worden:

- EN 13499 Thermal insulation products for buildings - External thermal insulation composite systems (ETICS) based on expanded polystyrene – Specification [49]
- EN 13494 Thermal insulation products for building applications - Determination of the tensile bond strength of the adhesive and of the base coat to the thermal insulation material [50]
- EN 13495 Thermal insulation products for building applications - Determination of the pull-off resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS) (foam block test) [51]
- EN 13496 Thermal insulation products for building applications - Determination of the mechanical properties of glass fibre meshes as reinforcement for External Thermal Insulation Composite Systems with renders (ETICS) [52]
- EN 13497 Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to impact of external thermal insulation composite systems (ETICS) [53]
- EN 13498 Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to penetration of external thermal insulation composite systems (ETICS) [54]
- EN 12583 Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of hail resistance [55]
- EN 12667 Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance [56]

In den USA gibt es ebenfalls Prüfbestimmungen, von welchen hier folgende erwähnt werden sollen:

- ASTM D 3746 – 05 Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems
- ASTM F 320 – 05 Standard Test Method for Hail Impact Resistance of Aerospace Transport Enclosure [57]
- ASTM E 822 Standard Practice for Determining Resistance of Solar Collector Covers to Hail by Impact With Propelled Ice Balls [58]
- ASTM E 1038 Standard Test Method for Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls [59]
- ANSI FM 4470 Test Susceptibility to Hail Damage, Test Standard for Class 1 Roof Covers.
- ANSI FM 4473 Test Standard for Impact Resistance Testing of Rigid Roofing Materials by Impacting with Freezer Ice Balls [60].
- UL 2218 Impact Resistance of Prepared Roof Coverings
- ANSI FM Approval Standard 4881 Class 1 Exterior Wall Systems [61]

In zwei Papers diskutieren Crenshaw und Koontz, welche Prüfvorschriften für Dachabdeckungen geeignet sind um den Hagelwiderstand zu bestimmen, [62, 63]. Darin kommen Sie zum Schluss, die FM 4473 sowie die NBS Series 23 die realistischsten Prüfverfahren sind.

Kirschner hat z. B. diverse Varianten von Aussenputzen nach der Norm EN 13494 auf Haftversagen untersucht [64].

Die European Organisation for Technical Assessment (EOTA) hat einerseits Technical Reports veröffentlicht, welche Prüfverfahren zur Ermittlung von Anforderungen an Bauprodukte, wie Wasserdichtheit, Impact Resistance, Resistance to Delamination, Resistance to Wind Loads, Resistance to Static and Dynamic Indentation, etc. definiert. Im Zusammenhang mit unserer Fragestellung sind folgende Berichte hilfreich:

- TR001 Determination of Impact Resistance of Panels and Panels Assemblies [65]
- TR004 Determination of Resistance to Delamination [66]
- TR006 Determination of the Resistance to Dynamic Indentation [67]
- TR010 Exposure Procedure for Artificial Weathering [68]
- TR011 Exposure Procedure for Accelerated Ageing by Heat [69]
- TR014 Exposure Procedure for Accelerated Ageing of Glass Reinforced Unsaturated Polyester Resins by Two-Hour Water Boil [70]
- TR037 Test Method for Elastomeric Insulating Elements – Determination of Creep [71]
- TR046 Test Methods for Foam Adhesives for ETICS [72]

In TR001 werden zwei Lastfälle für die Bestimmung der Impact resistance beschrieben: Den Soft Impact und den Hard Impact. Beim Soft Impact wird ein Sandsack von 50 kg auf den Probekörper fallen gelassen, so dass eine kinetische Energie zwischen 60J und 1200J eingebracht wird. Die Geschwindigkeit des Aufpralles bleibt dabei unter 7m/s. Da die eingebrachte Energie, die Weichheit des Impactors und die Geschwindigkeit mit den entsprechenden Werten bei einem typischen Hagelschlag mit Eiskugeln in keiner Weise übereinstimmt, ist der Soft Impact Test mit einem Hagelschlag (Masse <100g, Geschwindigkeit >10 m/s, kinetische Energie zwischen 0.04J und 27J) nicht vergleichbar. Beim Hard Impact wird eine Stahlkugel der Masse 0.5kg oder 1kg mit einer kinetischen Energie zwischen 1.3J und 10J verwendet. Auch dieser Test ist mit einem Hagelschlag nicht vergleichbar, da zwar die eingebrachte Energie vergleichbar ist, jedoch die Aufprallgeschwindigkeit zu tief und die Masse und Härte des Impactors zu hoch sind.

Andererseits gibt es von der gleichen Europäischen Organisation die European Technical Approval Guidelines (ETAG), welche für spezifische Bauprodukte Richtlinien für die Europäische Zulassung beschreiben. Für Wärmedämmverbundsysteme ist es die ETAG-004 [73]. In diesem Regelwerk wird die Bewitterung mit 80 Wärme-Regen-Zyklen und 5 Wärme-Kälte-Zyklen simuliert, s. Bild 12. Inwiefern diese Sequenz eine gute Simulation der natürlichen Bewitterung darstellt wurde einerseits von Liisma für das baltische Klima und andererseits von Daniotti für das Klima in Norditalien in Frage gestellt [7, 74].

Anforderungen an die WDVS sind Grenzwerte an zulässiger Feuchtigkeit im Innern, um Pilz- oder Schimmelbefall oder sogar Kondenswasser mit dem Potential zu Frostschäden durch Eisbildung zu verhindern. Dies wird durch ein gutes Gleichgewicht zwischen Wassereintrag während Regenphasen und Entfeuchtung bei Warmphasen erreicht. Eine Prüfung nach ETAG-004 ist jedoch aufwändig. Sie dauert rund einen Monat und muss in einem Grosslabor mit entsprechender Ausrüstung durchgeführt werden.

Tabelle 3. Ablauf der Bewitterung mit hygrothermischen Zyklen nach ETAG 004
 Table 3. Procedure of hygrothermal cycles according to ETAG 004

80 Wärme-Regen-Zyklen (jeweils 6 h)		20 Tage
1 h – Erwärmung auf 70 °C bei (10 – 30) % rel. LF 2 h – Halten von (70 ± 5) °C bei (10 – 30) % rel. LF 1 h – Besprühen mit Wasser – 1 l/(m ² ·min), (15 ± 5) °C 2 h – Ruhepause		
Konditionierung bei 10 – 25 °C und mind. 50 % rel. Feuchte		3 Tage
5 Wärme-Kälte-Zyklen (jeweils 24 h)		5 Tage
1 h – Erwärmung auf (50 ± 5) °C bei max. 30 % rel. LF 7 h – Halten von (50 ± 5) °C bei max. 30 % rel. LF 2 h – Absenkung auf (-20 ± 5) °C 14 h – Halten von (-20 ± 5) °C		
Gesamtprüfdauer		28 Tage

Bild 12: Künstliche Bewitterung nach ETAG-004 [21].

Internationale Standard sind u.a. die ISO 7361 welche allgemeine Anforderungen an Fassaden von Gebäuden stellt [75], sowie die ISO 7897 [76] und die ISO 7892 [77], welche zusammen Impact Resistance Tests definieren.

3.1.3 Allgemeine Publikationen und Beschreibung von kommerziellen Produkten

Der Schweizerische Maler- und Gipserunternehmer-Verband (SMGV) hat ein Merkblatt „Renovation und Aufdoppelung von verputzten Aussenwärmendämmungen herausgegeben [78]. Darin werden Empfehlungen zur Ausführung für verschiedene Szenarien von Renovationen gemacht. Untersuchungen werden beschrieben, welche bei einer Zustandsprüfung eines zur Renovation anstehenden Gebäudes vorzunehmen sind: Abklärung einer möglichen Durchfeuchtung des Unterputzes, Bestimmung der Wegreissfestigkeit (Tragfähigkeit des Untergrundes), Feststellung von (wassersaugenden) Rissen, Bewuchsbildung, Insektenbefall, etc.

Für Verputze gibt es von der Firma Cemex mortars ein „Educational Guide to Properties of Rendering Mortar“ [79]. Darin werden nebst Hinweisen zur Ausführung auch anzustrebende Festigkeitswerte für diese Systeme angegeben. In Prospekten der Firma sto AG findet man für die diversen Verputzsysteme rudimentäre Beschreibungen der Zusammensetzung und spezifische Eigenschaften [23, 24]. Das Produkt stoElasto wird für extreme Anforderungen angepriesen und soll höchsten Ansprüchen auch an den Hagelwiderstand genügen.

In einem Artikel von Oliver Berg im technischen Forum 01/2013 wird ein Dämmsystem der Firma Caparol diskutiert, welches mit Nano-Quarz-Gitter-Technologie in der Farbschicht und mit Karbonfasern in der Spachtelmasse hergestellt wurde [80]. Darin wird der Kugelfallversuch als Labortest für die Bestimmung der Schlagfestigkeit besprochen. Das Produkt hat eine mit Karbonfasern versetzte Matrix (Spachtelmasse),

welche dem Dämmsystem eine ausserordentlich hohe Festigkeit gegen Schlageinwirkung und Rissbildung vermittelt. Die Nano-Partikel in der Farbschicht ergeben eine optimale Farbtonbeständigkeit und Brillanz. Im zweiten Artikel von Dieter Stauder wird der Vorteil des Dämmmaterials PU an Stelle von EPS angesprochen [80]. Eigenschaften wie gute UV-Beständigkeit, tiefe Wärmeleitzahl (U-Wert) und geringe Sprödigkeit werden als vorteilhafte Eigenschaften beschrieben. Weitere Eigenschaften die gewünscht werden sind: gute Formstabilität/Masshaltigkeit, also kein Schwinden oder Quellen, keine Wasseraufnahme, keine Feuchtigkeitsempfindlichkeit. Thomas Brenner gibt im dritten Artikel einen Einblick in die Funktionsweise von modernen Dispersions-Farbschichten auf Acryl- und Silikonbasis, welche mit Nano-Partikeln (Pigmenten) versetzt werden um bessere Eigenschaften (z. B. UV-Beständigkeit, weniger hydrophobe Oberflächen und damit gute Schmutzunempfindlichkeit) aufweise [80]. Die als Nano-Quarz-Gitter bezeichnete Technologie ist im Wesentlichen eine mit fest verbundenen anorganischen Silica-Nanopartikeln (25nm) versetztes organisches Acrylpolymer in die das Titandioxid (250nm) und die Farb-Pigmente (300nm) eingebunden werden. Als Schlüsselkomponente für die Beständigkeit wird klar das Bindemittel, hier das Acrylpolymer bezeichnet. Ein zu hoher Bindemittelanteil ist nicht erwünscht, da ein solcher die Wasserdampfdurchlässigkeit herabsetzen würde. Weitere Zusatzstoffe wie Emulgatoren, die beim Anrühren der Dispersion für eine gute Verteilung der Partikel sorgen, werden ebenfalls diskutiert. Auch kommen harte mineralische Partikel zum Einsatz um z. B. die Kratzfestigkeit von Beschichtungen zu verbessern [81]. Auch Frostschutzmittel werden teilweise in nordischen Ländern, wie Russland verwendet, die bei falscher Dosierung zu unerwünschten Veränderungen der Porosität des Zementes führen können [82]. Insbesondere wird die allenfalls zu ästhetisch ungünstigen Verfärbungen durch Auswaschung führende Wirkung angedeutet. In einem weiteren Artikel wird auf die einschränkenden Bedingungen unter welchen solche komplexen Farb- und Spachtelmasssysteme überhaupt angewendet werden können hingewiesen: Zu tiefe aber auch zu hohe Temperaturen führen zu ungenügender Funktionalität. Daher sind Herstellerangaben zu Temperaturen, Wind und Sonneneinstrahlung beim Anrühren und Auftragen stets zu beachten. Im Artikel von Künzel werden weitere praktische Regeln zur Anwendung von weichen oder harten Schichten bei zweilagigen Aussenputzen besprochen [31]. Eine gute Haftung des Verputzes auf dem Untergrund ist eine wichtige mechanische Eigenschaft, die experimentell durch den Wegreiss-Versuch (pull-off test) und mittels numerischer Simulation theoretisch untersucht wurde [83].

3.2 Wissenschaftliche Literaturrecherche

3.2.1 Suchkriterien und Schlüsselbegriffe der Literaturrecherche

Die Hauptfragestellung der Studie wurde wie folgt der Literatur-Abfrage zu Grunde gelegt.

„Gibt es Effekte der Alterung, der Bewitterung, des Frostes, der Feuchtigkeit oder der Korrosion welche sich auf nachteilig auf den Hagelwiderstand, resp. auf den Impactwiderstand von Wärmedämmverbundsystemen, resp. von Verputzsystemen auswirken können?“

Dabei wurden die deutschen Begriffen wie folgt durch englische Begriffe ersetzt:

- 1) Alterung → aging, weathering, frost, humidity damp damage, corrosion
- 2) Wärmedämmverbundsysteme → thermal insulation composite systems, rendering, render
- 3) Hagelwiderstand → hail impact resistance, hail resistance, impact resistance

Die Literatur-Recherche wurde mit der on-line Datenbank Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>) zwischen Mitte Januar und Mitte März 2017 durchgeführt. Die dabei verwendeten Suchbegriffe waren:

- 1) „weathering“ oder „aging“ oder „frost“ oder „humidity damp damage“ oder „corrosion“
- 2) “thermal insulation composite systems with rendering” oder “rendering” oder “external thermal insulation composite systems” (ETICS)
- 3) “impact resistance” oder “hail impact resistance” oder “hail resistance”

Die ersten Suchabfragen haben schnell gezeigt, dass die gleichzeitige Erfüllung aller drei Suchkriterien keine Publikationen zum Vorschein bringt. Daher mussten weniger einschränkende Suchabfragen angewendet werden. Während die Anzahl Treffer für die Ursachen „frost“, „corrosion“ oder „humidity damp damage“ alleine knapp 300'000 erreichte, waren es bei der Wirkung „impact resistance“ oder „hail impact resistance“ oder „hail resistance“ alleine über 9'500. Die diversen Kombinationen von Suchbegriffen ergaben jeweils Anzahl Treffer zwischen einigen Dutzend und ein paar Hundert. Für das Objekt „thermal insulation composite systems with rendering“ oder „rendering“ alleine wurden 65'000 Publikationen identifiziert.

Eine überschaubare Menge von 77 Treffern wurde mit dem Suchbegriff “external thermal insulation composite systems” erreicht. Da dieser englische technische Begriff genau dem technischen Begriff „Wärmedämmverbundsysteme“ (WDVS) entspricht, wurde die Hauptsuche auf diese Auswahl abgestützt. Dies bildete eine noch überschaubare Menge an Publikationen. Diese Listen wurden dann manuell weiter aussortiert, indem der Titel und teilweise das Abstract geprüft wurde.

Im Verlauf der Sichtung dieser Publikationen wurden dann darin zitierte Publikationen ebenfalls näher angeschaut, falls sie auf relevante Informationen hindeuteten. Auch über Autorennamen, welche interessante Publikationen veröffentlichten, wurden weitere Publikationen in die Recherche aufgenommen.

3.2.2 Literaturrecherche zu Alterung von Gebäudehüllen

Es gibt die Konferenzreihe „Durability of Building Materials and Components“, welche seit 1978 alle drei Jahre stattfindet. Die letzte (die Dreizehnte) fand 2014 statt. Punktuell wurde ein Conference Proceeding, diejenige der achten Konferenz [84] von 1999 näher recherchiert.

Die Auswirkungen der Alterung von Materialien der Gebäudehüllen können zu Altersschäden führen [85]. Diese Baumängel werden von den Anfangsschäden und den Zufallsschäden unterschieden. Anfangsschäden kommen in den ersten ca. 7 Jahren nach der Erstellung zum Vorschein. Nach einer Inkubationszeit von ca. 20 – 30 Jahren, in welcher allenfalls Zufallsschäden auftreten, zeigen sich dann mit zunehmender Häufigkeit die Altersschäden. Die Häufigkeitsverteilung von beobachteten Schäden folgt einer sogenannten „Badewannen-Kurve“, s. Bild 13.

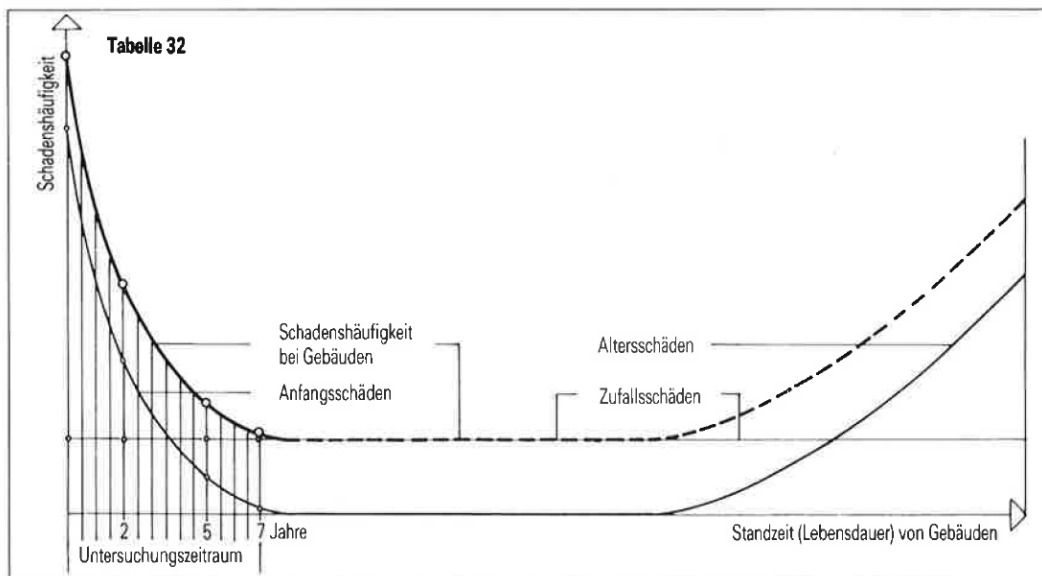


Bild 13: Schematische Darstellung der Verteilung der Schadenshäufigkeit über die Lebensdauer von Gebäuden, aus [85].

Dabei ist die normale (Material)-Alterung nur in einem rel. bescheidenen Mass verantwortlich für die Anzahl an Bauschäden. Eine Umfrage der Schweizerischen Baudokumentation 1979 hat ergeben, dass es weniger als 5% sind, s. Bild 14. Fehlerhafte Materialien sind dabei für ca. 10% der Fälle verantwortlich. Der Hauptteil geht auf fehlerhafte Planung (ca. 55%) oder Ausführung (ca. 35%) zurück. Der Grossteil der dabei verursachten Kosten (ca. 45%) fallen auf die Wände [85].

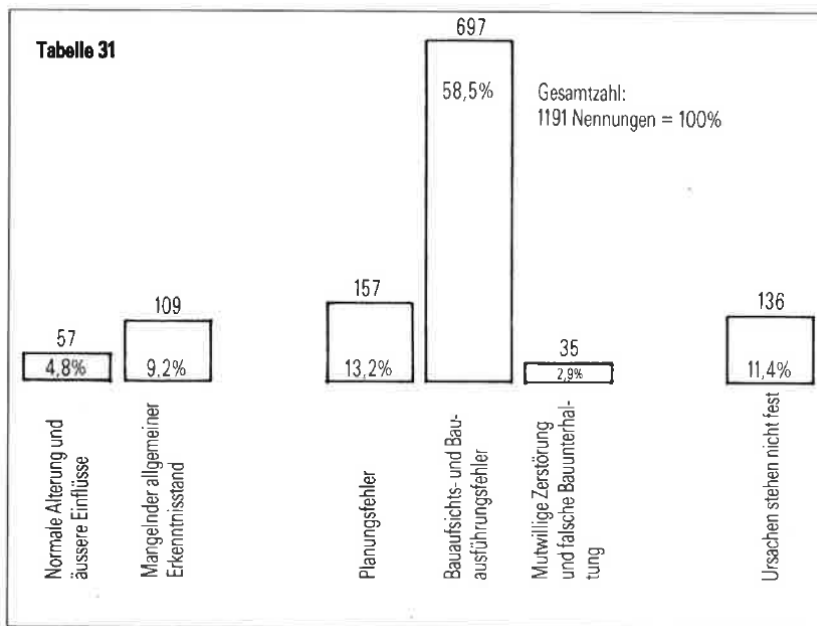


Bild 14: Bauschadenursachen gemäss einer Umfrage [85].

Eine neuere Studie bezeichnet hohe Feuchtigkeit als die Hauptursache von Bauschäden an WDVS [48]. In dieser Arbeit werden Massnahmen zur Verhinderung von Feuchteschäden, wie Lüftungszwischenräume vorgeschlagen. Hauptschadensbild ist der biologische Bewuchs. Die ETAG-004 wird zitiert, welche eine Grenze von 1kg/m^2 für die Wasserabsorption angibt. Die Dauerhaftigkeit von WDVS wird im Einleitungskapitel diskutiert und Quellen zum Thema referenziert: Generell werden den WDVS eine gute Langzeitbeständigkeit verliehen. Es werden sowohl die Feldstudien von Sulakatko et al. [29] als auch die Labortest von Norvaisiene et al. [86] referenziert. Eine volle Funktionsfähigkeit wurde auch noch nach 20 Jahren gefunden und eine mögliche Lebensdauer von bis zu 60 Jahren vorausgesagt [87]. Auch in dieser Studie wird eine zu hohe Feuchtigkeit als Hauptgrund für Bauschäden angegeben. Eine hohe Feuchtigkeit kann auch durch ein ungünstiges Trocknungsverhalten des darunterliegenden Betons nach der Applikation von WDVS resultieren [88]. Weitere Einflüsse auf die Lebensdauer sind Schrumpfung der Deckschicht während dem Trocknungsvorgang und mangelhafte Verarbeitung, wie z. B. mangelhafte Schichtdicke [89]. Durch Wind eingebrachtes Regenwasser wurde in einer andern Studie als Ursache für einen Haftungsverlust von Steinwollplatten und für Probleme bei Holzfassaden oder Gips-basierten Verputzen gefunden [90, 91]. Auf einen synergetischen Einfluss von Regenwasser mit den Temperaturzyklen wird ebenfalls hingewiesen. Im Weiteren sind schadensverursachende Einflüsse von UV-Strahlung und Luftverschmutzung speziell auf organische Verputzsysteme erwähnt.

Feuchtigkeit infolge Wetterbeanspruchung oder Wasserdampfdiffusion spielte in den 1970er Jahren oft eine Rolle bei Schäden z. B. an Holzfenstern mit Doppelverglasung oder bei ungenügender Wärmedämmung [92].

Feuchtigkeit kann auch Probleme im Sockelbereich von Fassaden auslösen. Dies kann durch Spritzwasser oder durch Wasserinfiltration aus dem Erdreich verursacht sein [93]. Während Letztere durch eine sorgfältig ausgeführte Abdichtung weitgehend vermieden werden kann, ist eine Spritzwasser-Belastung nicht in jedem Fall zu vermeiden [22]. Folgen von zu hoher Feuchtigkeit an Fassaden sind dann Algen- und/oder Pilzbefall [94]. In einer detaillierten Studie zum Algenbefall wurde die Fluorometrie und die numerische Simulation als Methoden verwendet um diesen Effekt an WDVS zu untersuchen [95]. Eine Studie untersuchte den pH-Wert im Deckverputz und dessen Einfluss auf die Algenbildung [96]. Während der pH in mineralischen Putzen Werte im Bereich zwischen 10.5 und 11.6 aufwies lag der pH-Wert bei organischen Putzen im Bereich von 6 bis 7. Damit ist das tiefere Schadenspotenzial gegenüber Spannungskorrosion an Glasfaser-Armierungen bei den organischen gegenüber den anorganischen Putzen erklärt.

Die mit dem Alter am ehesten auftretenden sichtbaren Veränderungen an Fassaden sind Flecken und Ansammlungen von Schmutz. Diese können unter Umständen als Frühindikatoren einer beginnenden Beschädigung durch Alterungseffekte angesehen werden. Eine Diagnosemethodik für Fassadenflecken wurde von Flores-Colen vorgeschlagen [97].

Typische Schäden an Fassaden sind Risse und Verputzabplatzungen, welche auf zu starke Durchfeuchtung oder Eindringen von Wasser in Rissen und Poren zurückzuführen sind [98]. In einer Fallstudie aus Portugal wurden die thermo-mechanischen Eigenschaften des Grundputzes und der übrigen Elemente des WDVS analysiert und mittels numerischer Simulation gezeigt, dass die unterschiedlichen Ausdehnungen bei Temperaturzyklen Risse in der Deckschicht verursachen können. Insbesondere, wenn die Wärmedämmplatten nur punktuell auf dem Untergrund aufgeklebt werden [99]. Dabei spielt der Frost-Tau-Zyklus eine wichtige Rolle, s. Fallbeispiele in [100] oder die Studie zu speziellen armierten Beton-Baustoffen [101]. Durchfeuchtung kann auch zum Auswaschen von Bindemittelpartikeln aus dem Verputz führen. Dies bewirkt zwangsläufig eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Verputzes und gesamten WDVS. Weitere Beispiele von Schäden an verputzten Fassaden werden in [17, 102, 103] diskutiert. Eine ähnliche Methodik zu obiger Fragestellung hat Amaro et al. publiziert [104]. Auch diese Studie wurde in Portugal an bestehenden Gebäuden durchgeführt. In dieser Feldstudie wurden Risse relativ häufig als Schadensbefund dokumentiert (39.7% der Fälle), wiesen aber in den meisten Fällen eine Spaltöffnung von weniger als 1mm auf, was als nicht systemrelevant taxiert wurde. Auch Abdichtungsschäden und Ablösungen kamen nur sehr selten vor (3.4% resp. 4.1%). In der Studie werden viele Schäden auf Fehler im Design d. h. der Konstruktion zurückgeführt. Eine zu dünne Deckschicht wird auch hier als ein Mangel bei der Ausführung als Ursache für spätere Schäden genannt. Inspektionsmethoden und Reparatur- resp. Renovationsszenarien werden diskutiert. In einer andern Studie von Barreira und de Freitas wurden weitere Einflussfaktoren, wie die geografische Orientierung (Nord-, Süd-, West- oder Ostausrichtung) einer Fassade auf das Feuchtigkeitsmilieu in der Deckschicht untersucht [105]. Das Trocknungsverhalten hat sich als sehr unterschiedlich gezeigt, was zu einem unterschiedlichen Algenbefall führen kann. Oberflächenkondensation war im vorliegenden Fall (ein Gebäude in Porto, Portugal) erheblich. Dies mag in anderen klimatischen Bedingungen anders ausfallen. Gaspar und de Brio haben analoge Studien an Zement-basierten Fassaden in Portugal durchgeführt [106].

Feldstudien mit der gleichen Fragestellung wurden ebenfalls im Baltikum durchgeführt [74]. In dieser Studie wurde im Unterschied zur Studie in Portugal in mehr als 50% der Fälle Materialdefekte gefunden. Zudem sind Schäden früher aufgetreten als in Portugal: Nach 1 bis 6 Jahren statt 10 bis 20 Jahren. Die meisten Materialdefekte waren Risse im Deckverputz. Vermutete Ursachen dieser Risse waren die hohe Feuchtigkeitsbelastung vom Boden her und die unsachgemässe Verarbeitung an den Gebäudekanten (93% der Fälle mit Rissen). Auch eine Bauzeit während der die Aussentemperatur unter 5°C lag wird als Ursache der vermehrten Schäden in dieser Gegend vermutet.

In einer Fallstudie wurde an einem Mehrfamilienhaus in Italien die Effektivität einer Wärmedämmung nach 20 Jahren untersucht [107]. Dabei konnte für diesen Fall gezeigt werden, dass die thermische Dämmwirkung und die mechanische Integrität (Haftung des WDVS an der Mauer) auch noch nach 20 Jahren vollständig erhalten war. Es gab keine Anzeichen einer chemischen Materialzersetzung. Es wurden jedoch oberflächliche Risse und Ablösungen beobachtet. Auch der Algenbefall wurde unter Berücksichtigung der Wasserabsorption untersucht [108]. Dabei zeigt sich auch ein Effekt der Oberflächenrauigkeit auf die Wasserabsorption und die Ansammlung von Algen.

Natürliche und künstliche Alterung wurde von Maggi et al. auf Backstein-Mauerwerk mit Mörtel-Verputz und Acryl-Farbanstrich angewendet, um mittels Gewichtszunahme, resp. -abnahme die Wasserabsorption zu untersuchen [109]. Dabei konnten sie eine leichte Zunahme der Haftfestigkeit, der Biege- und Druckfestigkeit, als auch des E-Moduls des Verputzes mit der Alterung feststellen. Ob dies zu einer erhöhten Sprödigkeit und Empfindlichkeit gegenüber Impact-Belastungen führt wird in der Studie nicht behandelt, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Der Frage wieweit sich künstliche, d.h. beschleunigte Alterung mit der natürlichen Alterung gleichsetzen lässt sind Wonneberger und Bortz für Steingut-Werkstoffe nachgegangen [110]. Sie haben dabei den E-Modul und die Festigkeit als charakteristische Werkstoff-Kenngrössen unter unterschiedlichen Bewitterungen gemessen. Dabei kommen sie zum Schluss, dass künstliche und natürliche Alterung gut korrelieren: 12 bis 16 Frost-Tau-Zyklen entsprechen dabei etwa 12 Jahren natürlicher Bewitterung in

nördlichem Klima. Diese Aussage ist insofern interessant, als dass mit den in der ETAG-004 angegebenen 5 Zyklen, mind. für das nördliche Klima, lediglich etwa 3 Jahre natürliche Bewitterung abgebildet wird.

In der Studie von Bollmann et al. [111] wurde der Einfluss einer natürlichen Bewitterung über 19 Monate auf das Auswaschverhalten von bioziden Substanzen aus organischen Verputzsystemen untersucht. Dabei wurden sowohl Silikon-basierte als auch Acryl-basierte Systeme untersucht. Die Versuche fanden in Dänemark, also unter eher maritimem Klima statt. Mittels Massenbilanz konnte eine durch die UV-Strahlung verursachte Zersetzung einzelner biozider Stoffe identifiziert werden.

Für die künstliche Alterung wird auf die ETAG-004 verwiesen, wobei auch härtere Simulationssequenzen Erwähnung finden, welche in andern Studien verwendet wurden [7]. Franzoni wählte in Ihrer Studie [48] die Frost-Tau-Zyklen und die Temperaturzyklen (jedoch nur bis 60° statt 70°) gemäss EN 1348, welche für Klebverbindungen entwickelt wurde. Die Sonneneinstrahlung, so wird berichtet, kann die Oberflächentemperatur je nach Material bis auf 80°C aufheizen. Der Einfluss von Temperatur mit Überlagerung von Feuchtigkeitsschwankungen untersuchten Liisma et al. für das baltische Klima [112]. Solche Zyklen können zu Eigenspannungen und Frostschäden im WDVS führen. Schadensbilder nach künstlicher Bewitterung im Labor waren Rissbildung und Delamination. Eine Studie aus Litauen untersuchte die Wasseraufnahme und das Trocknungsverhalten von WDVS indem das Haftungsverhalten nach künstlicher Bewitterung im Labor experimentell bestimmt wurde [86]. Die Experimente zeigen, dass die Wasserabsorption von der Art des Verputzes und von den Bewitterungszyklen abhängig ist. Die Wegreissfestigkeit wird ebenfalls durch die künstliche Bewitterung negativ beeinflusst. Der Autor hat dabei die in den ETAG-004 festgehaltenen künstlichen Bewitterungszyklen als für das baltische Klima zu wenig repräsentativ kritisiert. Das Wasserabsorptions- und Trocknungsverhalten weicht deutlich ab, falls für das eher kühle nasse Wetter im Baltikum angepasste Bewitterungszyklen simuliert werden. Die Lebensdauer wird in dieser Studie unabhängig vom Schädigungsbild als von der Feuchtigkeitsaufnahme in der Deckschicht abhängig beurteilt. Daher wurde das Wasserabsorptions- und Trocknungsverhalten als wichtigste Einflussgrösse auf die Lebensdauer von WDVS bezeichnet. Auch Vallee und Rubaud haben an Polymer-Zement-Mischsystemen eine Abnahme der Flexibilität nach künstlicher Bewitterung (Heiss-Nass-Zyklen) festgestellt [113]. Auch eine markante Verringerung der Bruchdehnung wurde festgestellt. Sie konnten diese makroskopischen Veränderungen auf Veränderung der Zement-Morphologie zurückführen: Es kommt zu einer starren anorganischen Vernetzung innerhalb des Composites. Als Folge davon ist tendenziell eine Zunahme der Impact-Empfindlichkeit zu erwarten. Spezifische Hinweise auf den Hagelwiderstand von WDVS wurden allerdings in den erwähnten Studien nicht gefunden.

3.2.3 Literaturrecherche zu Mechanismen der Alterung von Kunststoffen und Verbundsystemen

Einflussfaktoren, welche die Alterung von Gebäudehüllen (hier am Beispiel von Holzfassaden) wirken können sind [84]:

Class of aging agents	Agent
Chemical agents	<i>CO_x</i> <i>NO_x</i> <i>SO_x</i> Sulfuric acid Carbonic acid Salts Cleaning products
Weathering agents	<i>Moisture</i> <i>Rain</i> Snow Ice Hail <i>Water vapor</i> <i>Wind</i> <i>Air pollutants</i> High temperature Low temperature Temperature cycle <i>Solar radiation</i> Thermal radiation
External artificial agents	Electromagnetic radiation Discontinuous mechanical stresses
Artificial agent due to use	Cleaning water Continuous mechanical stresses
Biological agents	Animals Vegetable

Bild 15: Einflussfaktoren auf die Alterung von Gebäudehüllen [84].

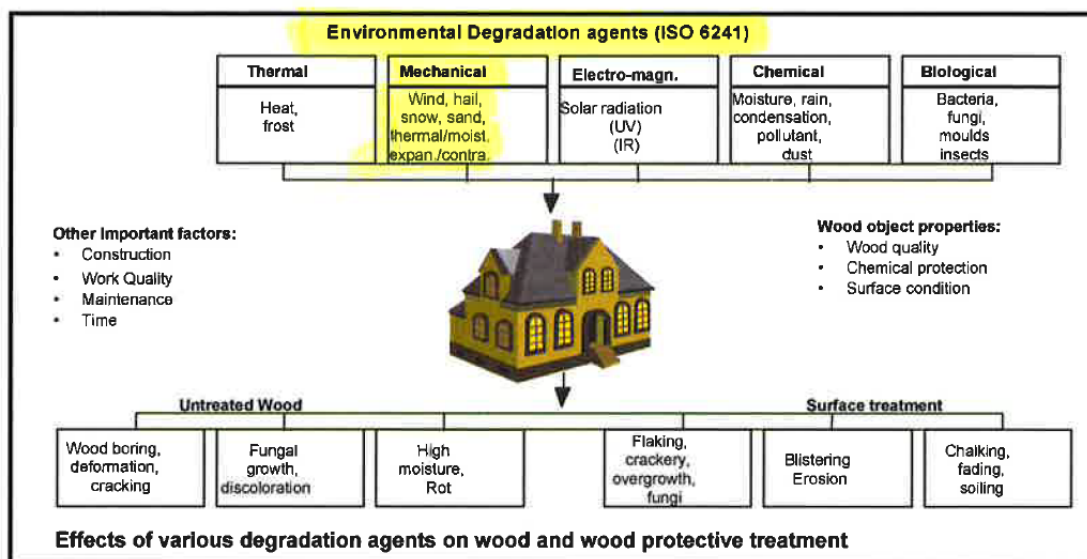


Bild 16: Einflussfaktoren auf die Alterung von Gebäudehüllen [84].

Die ISO-Norm 6241 gibt weitere Auskunft über diese Agens [114].

An der Tagung der TEA AG in Neuhausen am 08.06.2016 wurde das Thema der Umweltsimulation besprochen. Es ging dabei zwar eher um die Prüfung von Apparaten des allg. Maschinenbaus und weniger um Gebäude. Trotzdem können die dort besprochenen methodischen Ansätze hier hilfreich sein: Die Umweltsimulation wird in der DIN ISO-Norm 17025 umschrieben. Schädliche Wirkungen aus der Umwelt können sein: Erhöhte Temperatur, Temperaturwechsel, Klimawechsel, Witterung (Regen, Wind mit Sand und Staub) und Strahlung. Dabei können thermische, chemische oder auch biologische Prozesse in Gang kommen, welche auf das Material über die Lebensdauer schädigend einwirken. Im Apparatebau ist die Bestimmung einer Ausfallrate über die Lebensdauer von Interesse. Die in Bild 13 gezeigte „Badewannen“-Funktion ist auch bei Apparaten zu finden. Interessant sind die methodischen Ansätze zur künstlichen Beschleunigung von Alterungsprozessen:

Bei chemischen Prozessen kann über das Gesetz von Arrhenius (Arrhenius-Modell) mittels einer Master Curve durch Temperaturerhöhung eine Verkürzung der Zeit erreicht werden. Dabei ist jedoch die Aktivierungsenergie zu beachten, welche unterschiedlich sein kann und so das Simulationsergebnis nicht auf die Realität übertragbar macht. Bei Klima- und Feuchteinfluss gilt das analoge Gesetz von Lawson (Lawson-Modell) womit ebenfalls eine Übertragung aus dem Labor in die Praxis vorgenommen werden kann. Auch da muss eine Annahme über die Aktivierungsenergie getroffen werden. Bei Temperaturwechsel kann das Coffin-Manson-Modell herangezogen werden. Leider wurden keine wissenschaftlichen Quellen, welche diese Modelle näher umschreiben würden, angegeben.

Inwieweit nun auch eine Beschleunigung bei Kombinationen von thermischen, chemischen und feuchtigkeitsgesteuerten Prozessen möglich ist bleibt im Einzelfall zu klären. Hier wird es wichtig sein, den Schädigungsmechanismus genau zu kennen, um die notwendige Priorisierung der Effekte richtig vornehmen zu können. In jedem Fall ist es bei beschleunigter Alterung immer sehr wichtig dafür zu sorgen, dass die „Beschleunigungsfaktoren“ keine Schädigungsmechanismen auslösen, welche unter realen Bedingungen nicht vorkommen.

Eine Studie aus dem Jahre 2004 von der Firma Carbotech AG und der Empa St. Gallen befasste sich mit der Alterungsbeständigkeit von EPS mit Langzeitnachweis [115]. Darin wurden EPS-Platten, welche bereits 25 Jahre im Einsatz standen zusätzlich künstlich gealtert. Dabei wurde eine Alterung bei 70°C während 14 Tagen als eine einer realen Alterung über 1 bis 10 Jahre (bei Temperaturen um 15°C) äquivalenten Prozessdauer interpretiert. Das EPS-Material behielt seine Leistungsfähigkeit unverändert über diese Zeit. Als thermische resp. mechanische Kennzahlen wurden die Wärmeleitfähigkeit nach DIN 526 16, resp. ISO DIS 830, die Druckfestigkeit nach SIA 279.066 resp. EN 826, die Durchstichfestigkeit nach EN 388, resp. ISO 12236 und die Biegefestigkeit nach EN 12089 als Kriterien gewählt. EPS kann aus Sicht der Autoren also ein dauerhafter Baustoff angesehen werden.

Glasfaser-Armierungen können, falls sie nicht richtig behandelt wurden, in gewissen Fällen Alterungserscheinungen zeigen. So kann es zu alkalischem Angriff durch das stark basische Milieu in der Zement-Matrix kommen und Spannungsrisskorrosion auslösen. Dieser Schädigung wird mit einer Beschichtung der Glasfaser mit PVC-Plastisol entgegnet [116].

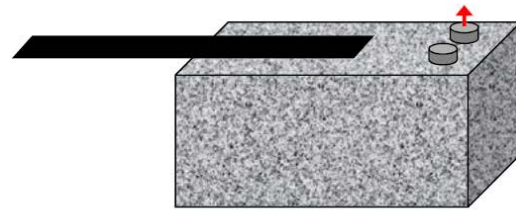
Flexible Bindemittel in Mörtelsystemen wurde von Knotek et al. untersucht [117]. Dabei zeigte sich, dass reine Silikon-Bindemittel solchen Systemen bei welchen Silikon mit Polyurethan oder Polyester vermischt wurden in der künstlichen Bewitterung besser abschneiden. Reine Silikon-Bindemittel verändern während der künstlichen Bewitterung ihr Verhalten von hydrophob zu hydrophil, was zu spätere direkte und indirekte Probleme mit Feuchtegehalt führen kann, behalten aber eine gute UV-Resistenz. Nachteilig ist jedoch eine gegenüber den Mischsystemen höhere Feuchtigkeitsempfindlichkeit.

Die Erfahrungen aus anderen Anwendungen, z.B. beim Brückenbau zeigen ein sehr gutes Langzeitverhalten wenn das richtige Klebsystem angewendet wird: So hat die mit Epoxy-Kleber „geklebte“ Autobahnbrücke von Chillon 45 Jahre Bewitterung ohne Anzeichen von Alterung überstanden [118]. Laborversuche an auf Beton geklebten CFK-Lamellen haben ebenfalls ein sehr gutmütiges Langzeitverhalten unter ständiger Last (Kriechversuche) über Jahrzehnte ergeben. Unter beschleunigter Alterung (höhere Temperatur und Feuchtigkeit) nehmen die Festigkeitswerte der Verklebung sogar in der Tendenz etwas zu [118], s Bild 17.

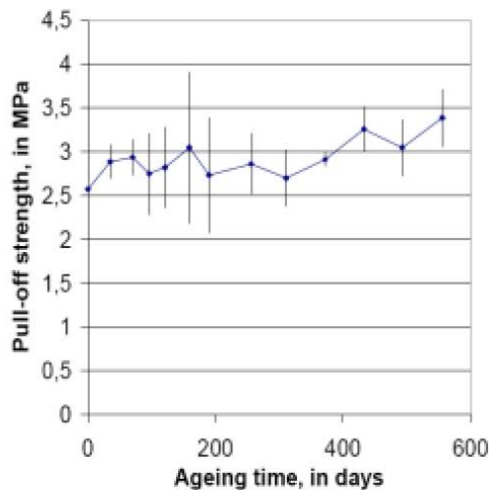
LANGZEITVERHALTEN: KÜNSTLICHE ALTERUNG

ERHÖHTE TEMPERATUR UND FEUCHTIGKEIT

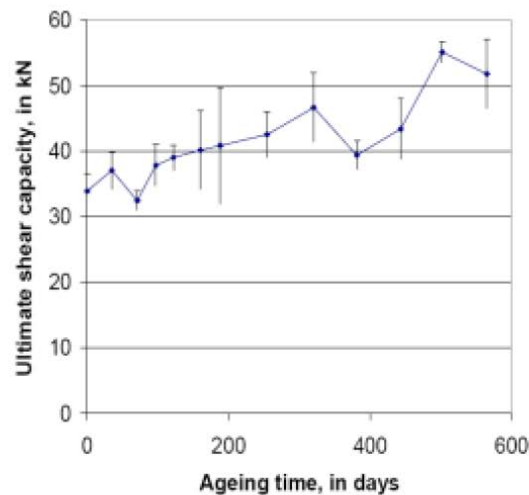
T = 40°C / RH = 95%



Pull-off strength



Lap shear strength



19



Bild 17: Statische Festigkeitswerte in Funktion der künstlichen Alterung von CFK-Lamellen aufgeklebt auf Beton, aus [118].

Studien von Reyer und Fouad beschreiben experimentelle und numerische Untersuchungen zu WDVS, welche auch künstlicher Bewitterung ausgesetzt wurden, [119, 120], [121]. Die Versuche wurden in der Bochumer Grossversuchsanlage durchgeführt. Dabei wurden ganze Wände künstlichen klimatischen Wechselwirkungen wie Regen, Wärme und Frost ausgesetzt und die Starrkörperverformungen, wie auch Fugenrissöffnungen beobachtet und ausgewertet. Dauerfrost belastet ein WDVS erheblich, auch wird erwähnt, dass die Erhöhung des organischen Anteils eines mineralischen Verputzes auf 2 bis 2.5%, die Verringerung der Maschenweite des Armierungsgewebes oder die Verbesserung der Haftung zwischen Gewebe und Matrix zu besseren mechanischen Eigenschaften des Systems führt. Ähnliche Laborversuche wurden auch in China durchgeführt [122, 123]. Kirschner und Harmuth haben das Rissinitiierungs- und Rissausbreitungsverhalten an Innenverputzen aufgebracht auf Verschalungspanelen analysiert [124]. Bei genügend guter Haftung zwischen den Partnern kann zwar die Rissbildung, kaum jedoch die makroskopische Rissöffnung vermieden werden. Auf die Wahl der richtigen Materialien (mit geringer Sprödigkeit) und eine genügend hohe Verputzstärke ist zu achten. Nilicia und Harmuth haben zudem für die FEM-Simulation die nötigen bruchmechanischen Materialkenndaten für ein typisches WDVS nach Konditionierung unter erhöhter Feuchtigkeit und Temperatur bestimmt [125]. Die Bruchenergie ist für Polymer-basierte Verputzsysteme deutlich höher als für Zement-basierte Mörtel. Die Bruchenergie des Verbundes nimmt dabei mit zunehmender Befeuchtung ab. Dies ausgeprägt nach einer Konditionierung in Wasser während 25 Tagen bei 20°C. Eine Erhöhung der Bruchenergie konnte festgestellt werden, wenn die Probe während 7 Tagen bei 70°C entfeuchtet wurde. Diese Studie enthält keine Hinweise auf das Impact-Verhalten der WDVS.

Eine sehr wertvolle Studie wurde von Daniotti et al. durchgeführt [7]. Darin werden Laborversuche an künstlich gealterten WDVS behandelt. Im ersten Teil wurde die Sequenz von Belastungszyklen für ein repräsentatives Klima im Raum Mailand (Norditalien) aus Meteo-Daten abgeleitet. Dieses wurde nach eingehenden Literaturstudien einschliesslich Normen und Empfehlungen (z. B. ETAG-004) auf die folgenden Zyklen reduziert: Sommer- und Winter-Thermoschock-Zyklus, Frost-Tau-Zyklen, Beregnung, UV-Bestrahlung, zyklische Variation von Temperatur und rel. Feuchtigkeit. In der folgenden Tabelle werden diese Zyklen definiert:

Table 1 Ageing cycles. During freeze cycles relative humidity was not controlled. Rain was sprayed with 45° angle of incidence (1 Lt m⁻²)

Cycle	Times	Phase	T _{air,chamber} (°C)	RH _{chamber} (%)	T _{air,lab} (°C)	RH _{lab} (%)	Duration (min)
UV	25	UV	35	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
Winter	10	Rain	15 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60
		Freeze	-20 ± 2	-	20 ± 2	50 ± 5	180
		Winter heat	30 ± 2	50 ± 5	20 ± 2	50 ± 5	60
Summer	25	Dry heat	70 ± 2	15 ± 2	20 ± 2	50 ± 5	60
		Rain	20 ± 2	100	20 ± 2	50 ± 5	60

Bild 18: Alterungszyklen aufgeteilt für Labortest an WDVS basierend auf Meteo-Daten von Mailand [7].

Die WDVS-Probekörper wurden mit diversen Temperatur-, Feuchtigkeits- und Wärmefluss-Sensoren ausgestattet, um während den Versuchen die hygro-thermischen Eigenschaften beobachten zu können. Ein wichtiger Aspekt war die Erfassung von Veränderungen der Wärmedämmeigenschaften mit zunehmender künstlicher Alterung. Mit begleitenden kleineren Proben wurden parallel Materialeigenschaften (Wasserabsorption, Wasserdampfdurchlässigkeit, Wegreissfestigkeit, sowie die Zugfestigkeit des Untergrundes) und deren Veränderungen mit der Alterung untersucht. Die Studie kommt zum Schluss, dass die Wasserabsorption im Wärmedämmmaterial messbare Änderungen in der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit bewirkt. Das Wasser dringt hauptsächlich über die Verbindungsstellen in die unteren Lagen ein. Der dynamische Feuchtigkeitshaushalt spielt dabei eine zentrale Rolle. Dieser ist sehr stark von den gewählten Bewitterungszyklen abhängig. Die künstliche Bewitterung hat als Alterungseffekt eine signifikante Blasenbildung (blistering) zum Vorschein gebracht, s. Bild 19. Blasen entstanden verteilt über die ganze Oberfläche und erreichten Durchmesser von bis zu 9cm. Die Blasenbildung wurde nach den Sommer-Wärmeschock-Zyklen beobachtet. Es gab auch leichte Farbveränderungen und Veränderungen der Porosität an der äusseren Oberfläche. Eigentliche Abplatzungen wurden jedoch nicht beobachtet und auf eine gute Elastizität der organischen Deckschicht zurückgeführt. In den Schlussfolgerungen wird eine Hypothese zum Schadensmechanismus formuliert: Zuerst findet unter UV-Bestrahlung eine Zersetzung des Bindemittels in der Deckschicht statt, was zu Kapillarrissen führt. Dies ist durch eine Farbveränderung erkennbar. Während den Winterzyklen wird die Grundputz- und Deckschicht unter Zugspannungen gesetzt, wodurch sich die Kapillarrisse weiter öffnen. Dies ermöglicht nun das Eindringen von Regenwasser während den Beregnungszyklen. Dies wiederum führt während den Frost-Tau-Zyklen zur Degradation der Zement-Matrix.

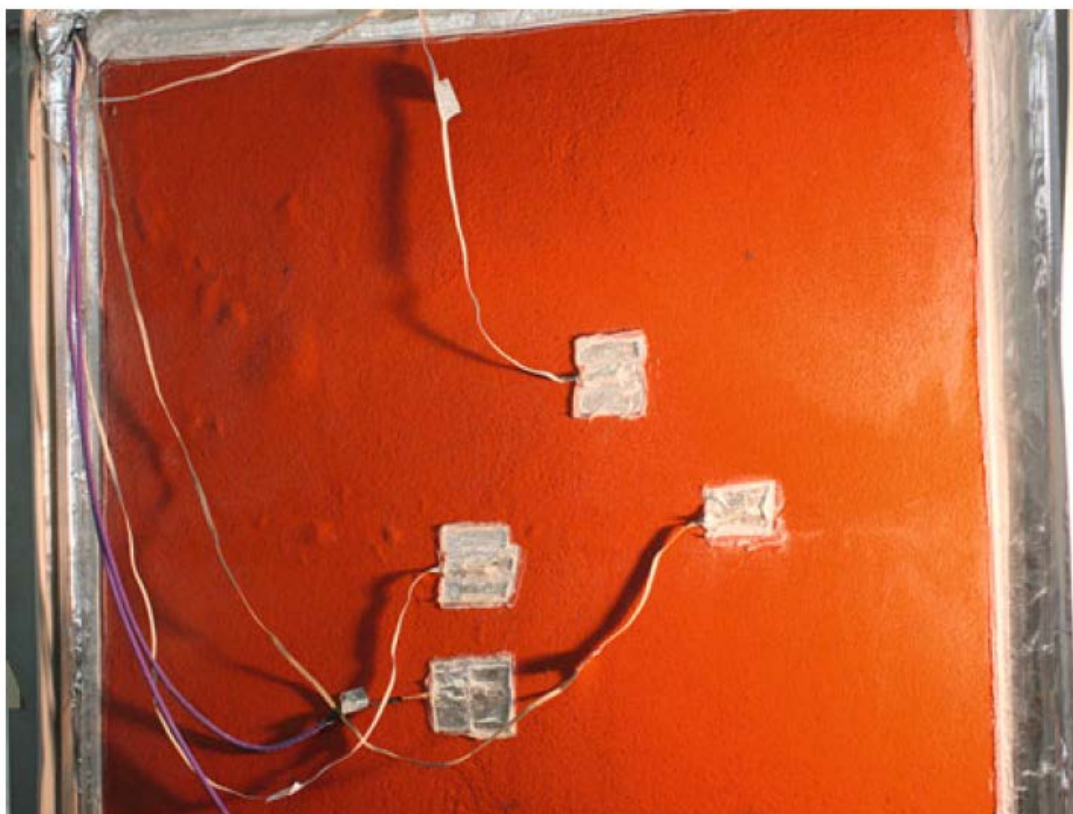


Bild 19: Blasenbildung in der Deckschicht nach künstlicher Alterung [7].

Während den Sommer-Wärmeschock-Zyklen werden die Grundputz- und Deckschicht unter Druckspannungen versetzt. Dies führt zu einer Schwächung der Haftung dieser Schichten. Es kommt zur Blasenbildung. Im Hohlraum dieser Blasen kann sich nun Wasserdampf ansammeln, der während heissen Phasen einen erhöhten Dampfdruck auf die Deckschicht bringen kann. Dadurch kann dieser Effekt zu Delaminationen führen, welche wiederum eine erhöhte Empfindlichkeit gegen Impact aufweisen. Über Blasenbildung als Alterungserscheinung wurde auch in einer schwedischen Studie mit mineralisch oder organisch beschichteten Gasbeton-Mauern berichtet [126]. Die Autoren beschreiben nebst Rissbildung und der verminderten Haftung der Deckschicht durch Feuchteinfluss von einer „abnehmenden Elastizität und plastischer Deformationskapazität“ bei organischen Verputzen mit Acryl-basierten Bindemittel („...they lose elasticity and plastic deformation capacity“). Es werden aber keine quantitativen Ergebnisse gezeigt, welche diesen Befund aus der Feldstudie stützen würden. Eine Studie zu Fliesenbelägen auf Terrassen hat ebenfalls die Thermoschock-Zyklen im Sommer bei plötzlicher Abkühlung durch Regenfälle als meistschädigend identifiziert [127]. Diese schnellen Abkühlungen bewirken thermische Spannungen, welche zu Rissen führen können. Diese Studien beinhalten jedoch keine Angaben im Bezug auf Impact Verhalten.

Ein theoretisches Modell der Mechanismen die während den Frost-Tau-Zyklen in Beton ablaufen wird in [128] diskutiert. Risse in der Fassade können durch unterschiedliches Kriech-, Schwell- oder Quellverhalten von Baumaterialien entstehen, insbesondere bei Hochbauten in Mischbauweisen [129]. Bei ungünstigen Materialkombinationen oder Konstruktionsdetails können auch Risse durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung hervorgerufen werden [100]. Eine andere Studie fand Unterschiede der Haftfestigkeit bei EPS-Wärmedämmplatten unter künstlicher Bewitterung im Vergleich zu Polyurethan-Schaum oder Polystyrene-Granulatplatten insbesondere bei Frost-Tau-Zyklen [130]. Die Haftung bei EPS-Platten ist zu Beginn und während den Heiss-Beregnungs-Zyklen noch 50% höher als die der Vergleichsgruppe, nimmt dann aber unter den Frost-Tau-Zyklus stark ab und liegt am Schluss ca. 10% unter der der Vergleichsgruppe.

Das Wasseraufnahme- und Trocknungsverhalten haben Barreira et al. in einem analytischen Modell theoretisch erfassen können [131]. Das theoretische Modell kann die experimentellen Befunde an WDVS aus dem Labor gut abbilden. Die Methode wurde auch auf Fallstudien an realen Gebäuden angewendet und damit deren Anwendbarkeit verifiziert. Ein wichtiges Phänomen wird als „undercooling phenomenon“ das heisst Kondenswasserbildung an der Aussenwand identifiziert [105, 131-134].

Der Einbezug von Luftverschmutzung (Verschmutzung und saurem Regen) bei der künstlichen Bewitterung hat Norvaisiene für mit Farbanstrichen versehene Verputze vorgeschlagen, [86, 135, 136]. Entsprechende Vergleichsversuche mit Beobachtungen an natürlich bewitterten Fassaden sind dokumentiert.

Die gleichzeitige Einwirkung von UV-Strahlung auf Kunststoffe und beispielsweise saurem Regen führt zu beschleunigter Alterung. Schulz hat dies an Poly-methyl-methacrylate (PMMA) untersucht und eine reduzierte Bruchdehnung nach einer solchen künstlichen Bewitterung festgestellt [137]. In der Studie [138] wurde die Wirkung von UV-Strahlung auf Polycarbonat untersucht. UV-Strahlung bewirkt Veränderungen in der Mikrostruktur des Materials, was sich makroskopisch als Versprödung, Erosion an der Oberfläche, Farbveränderung (Vergilbung) und Verringerung der Lichtdurchlässigkeit bemerkbar macht. Es gibt auch verstärkende Wirkung wenn zusätzlich hohe Feuchtigkeit im Spiel ist. Alterung macht sich auch bei andern Polymerwerkstoffen als Versprödung bemerkbar: So fällt die Impactenergie parallel mit der Bruchdehnung bei Acrylonitril-Butadien-Styrene (ABS) nach wenigen Stunden unter erhöhter Temperatur (90°C und 120°C) ab. Diese Versprödung ist auf eine thermo-oxidative Degradation an der Oberfläche zurückzuführen, die zwar die Festigkeit und Steifigkeit des Materials im Innern nicht beeinträchtigt, jedoch durch Veränderungen an der Oberfläche die Bruchgefahr (Kerbwirkung von Mikrorissen in der Aussenschicht) erhöht [139]. Acryl-Emulsionen mit Farbpigmenten werden auch in der Textilindustrie eingesetzt [140, 141]. Dort führt die Einwirkung der UV-Strahlung zur Oxidation von Doppelbindungen der Quervernetzungen, welche äusserlich zu einer Verfärbung und zum Verlust von Flexibilität führt. Damit muss mit einer Versprödung gerechnet werden. Licht und Wärme reduzieren also auch hier die Dauerhaftigkeit solcher Produkte. Auch in der Automobilindustrie kommen Acryl-basierte Bindemittel für Composite-Bauteile zum Einsatz. Ein Artikel von der Firma BASF gibt Einblick in die Chemie solcher Bindemittel [142].

Ein Artikel von Sperry untersuchte die Dauerhaftigkeit von Acryllacken auf Aluminiumblechen [143]. Obschon dies nicht direkt das gleiche ist wie die Deckschichten eines WDVS können die Mechanismen welche in organischen Schichten mit Titanoxid-Pigmenten unter natürlicher Bewitterung ablaufen übertragen werden: Die pigmentfreie äusserste Schicht wird zuerst abgetragen, was relativ langsam erfolgt. In einer zweiten Phase tritt dann ein beschleunigtes Abtragen von Material auf, welches durch einen komplexen photoreaktiven Zersetzungsprozess (UV-Absorption der TiO₂-Partikel und Wassereinwirkung) verursacht wird.

In einer andern Studie wird der Einfluss der UV-Strahlung an Verputzsystemen mit organischen Bindemitteln unter künstlicher und natürlicher Bewitterung untersucht [144]. Die Studie kommt zum Schluss, dass UV-Strahlen zwar den kontinuierlichen Polymerfilm der Deckschicht zerstören können, jedoch keinen Einfluss auf die Wasserabsorption durch das WDVS haben. Saurer Regen hingegen erhöht die Wasserabsorption, was sich negativ auf die Funktionalität des WDVS auswirkt.

Prüfverfahren zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit von WDVS werden z. B. in der Studie von Franzoni [48] beschrieben. Die Auswahl von möglichen Klebsystemen erfolgt nach EN 12004. In der Richtlinie [145] werden die Normen und Standard für Impact-Festigkeiten (für Grossbritannien) zusammengestellt. Hagel-schlag kommt darin nicht vor, sondern nur der Soft Impact, der Hard Impact und die Penetration. In einem Prüfbericht des Prüfinstitutes Intertek in Middleton WI, USA wird für den Hard Impact die Prüfanweisung UL 2218 (Impact Resistance of Prepared Roof Covering Materials) erwähnt [146]. Bei der Untersuchung von Mörtel wurde eine sogenannter Scotch Tape Test angewendet um festzustellen, wieviel loses Material als Partikel abgetragen werden, wenn man die Oberfläche mit einem Scotch-Band beklebt und dieses dann wieder abreissst. Damit konnte man die Qualität verschiedener Mörtel nach diversen Behandlungen unterscheiden [147].

In einer experimentellen Studie aus Portugal wurde ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Impact Resistance an Verputzsystemen sowohl im Labor als auch an realen Gebäuden angewendet [148]. Das als Martinet-Baronnie-Gerät bezeichnete Instrument wird dabei verwendet um leichte Schläge mit einer Stahlkugel (3J resp. 6J) auf den Verputz zu bringen. Die Auswertung der lokalen Delle (Grösse, Ausbreitung der Zone mit

Mikrorissen) kann zur Bestimmung einer Kenngrösse herangezogen werden. Das Verfahren wurde in oben genannter Studie auf Fassaden verschiedener Ausführung und verschiedenen Alters angewendet. Das Experiment mit dem Martinet-Baronnie-Gerät ist eine brauchbare Methode um die Fassade zu charakterisieren; dies zeigen die Vergleiche mit den Labortests. Mit den Resultaten der Studie kann jedoch keine Aussage über den Alterungseffekt gemacht werden, da zwar Verputzsysteme verschiedenen Alters geprüft wurde, es jedoch dabei nicht um die gleichen Systeme gehandelt hat. Interessant ist die Studie insofern, dass die verwendeten Impactenergien von 3J bis 6J zwar mit einer zu harten Kugel erzeugt wurde aber immerhin im Bereich eines Hagelschlagers der Klasse 3 bis 4 liegen.

Andere zerstörungsfreie Prüfverfahren, welche zur Untersuchung von WDVS angewendet werden sind u. a. die Thermografie [149]. Mit dieser Methode können die mechanischen Fixationen (falls vorhanden) und die Stösse zwischen den Wärmedämmplatten gut lokalisiert werden.

Die Modellierung der Alterung und der Lebensdauer von Fassaden wurde durch Ximenes et al. studiert [150]. An Hand einer Bestandsaufnahme von Gebäuden in Portugal wurde ein Schadensbildklassifizierungssystem entwickelt und angewendet. 170 Fassaden wurden mit dieser Methode klassiert und bewertet. Mittels statistischer Methoden wurden dann verschiedene Einflussfaktoren (Distanz zum Meer, zusätzliche Feuchtigkeitsbelastung, Art des Deckverputzes) untersucht, wieweit diese die degradation master curve beeinflussen, s. Bild 20. Die generierten degradation curves machen den Eindruck als käme es zu einem allmählichen Abfall der Funktionsfähigkeit der Fassade mit der Zeit. Da jedoch die Beurteilungskriterien hauptsächlich auf ästhetischen Aspekten beruhen, kann nicht auf eine entsprechende Abnahme der technischen Funktionsfähigkeit geschlossen werden. Im Gegenteil: für die technischen Kriterien ist die Abhängigkeit vom Alter nicht eindeutig nachweisbar, s. Bild 21. Mit einer Abminderung der Haftung des WDVS auf dem Substrat muss allenfalls mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit erst nach ca. 22 Jahren Gebrauch gerechnet werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass die effektive Lebensdauer ca. 17 Jahre beträgt und weniger durch das technische Versagen bestimmt wird als durch ästhetische Anforderungen, wie ungewollte Verfärbungen.

Antosova entwickelte eine Risikobewertungsmethode für den Algenbewuchs auf ETICS [151]. Auch Lair hat eine solche Risikobewertung für Gebäude entwickelt kombiniert mit einer FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) [152]. Eine statistische Methode für die Risikobeurteilung gegen Algenbefall hat Delgados, Ramos et al. entwickelt [134].

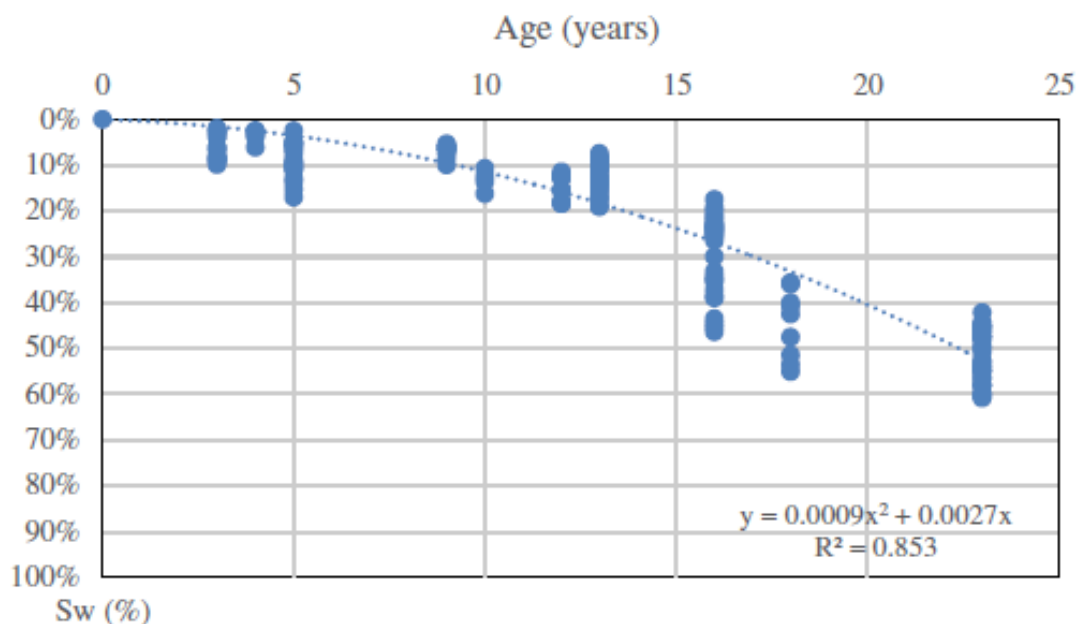


Bild 20: Generelle Alterungskurve von 170 Fassaden [150].

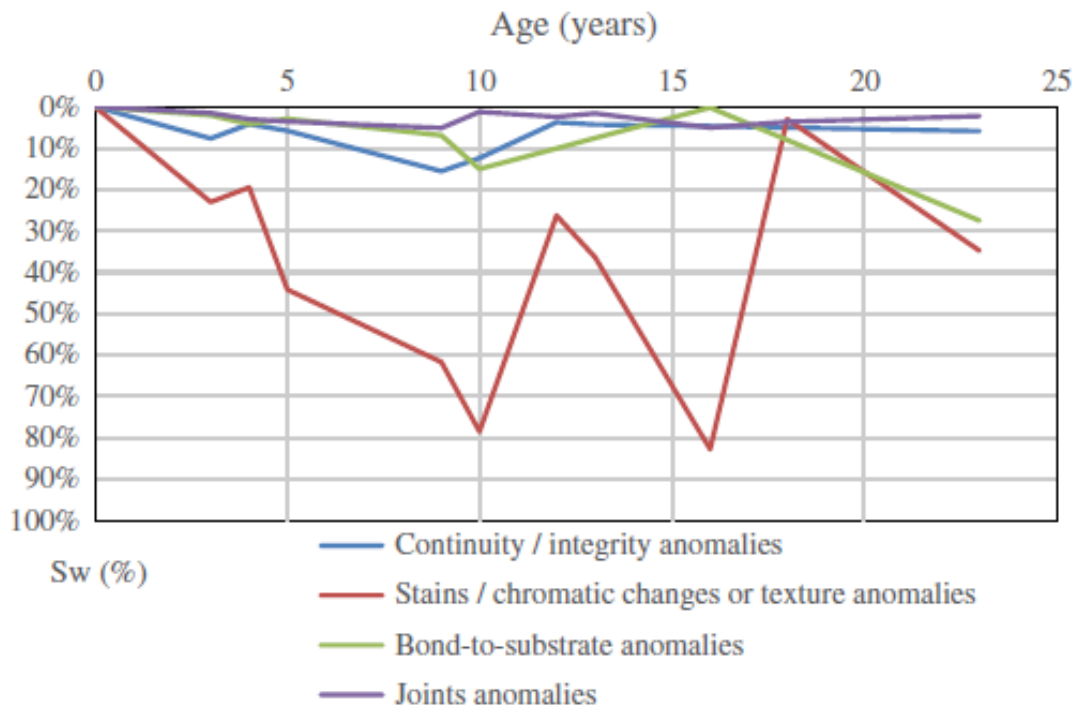


Bild 21: Alterungskurve aufgeteilt nach Schadenskriterien [150].

3.2.4 Literaturrecherche zum Impactverhalten von Kunststoffen und Verbundsystemen

Schon bei relativ langsamer Belastung zeigen Gewebe-Composite diverser Faser- und Matrixtypen ein unterschiedliches Spannungs-Dehnungsverhalten [153]. Das Energieabsorptionspotential nimmt dabei durch eine Dehnraten-abhängige Versprödung des Materials in der Regel ab. Daher ist bei noch höheren dynamischen Prozessen wie dem Hagelschlag zu vermuten, dass im Vergleich mit quasi-statischer Belastung weniger Energie absorbiert werden kann. Einen Überblick über die Schlagfestigkeit von Composites ist z. B. in [154] zu finden. Die unter dynamischer Belastung auftretenden Delaminationen zwischen den einzelnen Lagen von faserverstärkten Composites, wie sie in Hagelschlagtests auftreten [155], können auch mit FEM-Simulationen vorausgesagt werden [156]. Eine solche Vorhersage bedingt jedoch die korrekte Modellierung des Schädigungsmechanismus, der je nach Art des Laminataufbaus und der verwendeten Materialien sehr unterschiedlich sein kann.

Im Artikel von Keiller wird das Impactwiderstandsverhalten von WDVS nach einem damaligen britischen Standard beschrieben [157]. Als Impact wird darin einerseits ein Schlag mit einem harten Gegenstand (Vandalismus, Fahrradlenker, etc.) mittels einer 0.5kg schweren Stahlkugel aus 0.4m bis 3m Höhe fallend simuliert; den weichen Schlag (menschlicher Körper) mit einem Sandsack. 34 verschiedene Wärmedämmsysteme werden untersucht und auf deren Schlagfestigkeit hin untersucht. Typische Schadensbilder wie kreisförmige Risse werden beschrieben. Zwei primäre Einflussfaktoren welche das Impactverhalten beeinflussen werden identifiziert: Die Dicke der Deckschicht und die Impact-Energie. Das Impact-Ergebnis (Risse) ist sekundär auch von der Festigkeit des Verputzes abhängig.

Franzoni et al. beschreiben in Ihrer Studie das Schadensbild von WDVS nach Impact gemäss EN-Norm 13497 und die Penetrations-Festigkeit nach EN 13498 für verschiedene geklebte Verbundsysteme [48]. Das Impact-Verhalten wurde nebst anderen mechanischen Eigenschaften untersucht. Mit Glasfasernetz versehene Proben zeigten eine bessere Impact-Festigkeit als solche die nicht verstärkt waren. Die Zugfestigkeit

der Verklebung wurde auch nach künstlicher Alterung bestimmt. Das Versagen trat jeweils in der Wärmedämmplatte selbst auf. Die Haftzugfestigkeit, welche nach EN13499 gefordert wird (80 kPa) wird gut erreicht. Daher wurde für die untersuchten Verklebungssysteme geschlossen, dass die Klebschicht nicht das schwächste Glied darstellt. Der Einfluss der künstlichen Alterung war unterschiedlich je nach gewähltem Kleber. Es wurden Festigkeitsabminderungen von bis zu 55% bei ungünstigen Klebern festgestellt, im Gegensatz zu gleichbleibenden Festigkeitswerten bei guten Klebern.

In der Studie von Naji und Albury wurden Faser-verstärkte Zement-Träger verschiedener Spannweiten auf deren Impact-Verhalten untersucht [158]. Der Impact wurde in dieser Versuchsanordnung jedoch mit einem 30kg-Sandsack aus 20cm bis 50cm Höhe erzeugt. Dies entspricht einem eher langsamen und weichen Impact und ist mit einem Hagelschlag nicht zu vergleichen.

Eine kanadische Studie untersuchte den Einfluss von natürlicher Bewitterung auf die Schlagfestigkeit von acht kommerziell erhältlichen Kunststoffen wie sie typischerweise für Oberlichter verwendet werden [159]. Die untersuchten Materialien waren unmodifiziertes und modifiziertes PMMA, beschichtetes und unbeschichtetes Polycarbonat (PC), ASA und ABS, sowie zwei PVC. Die Schlagfestigkeit dieser Materialien ist schon im Neuzustand sehr unterschiedlich. Nach 1 bis 5 Jahren Bewitterung nimmt diese je nach Material schneller oder eher kontinuierliche ab. Alle diese Materialien erleiden demnach eine Versprödung über die Jahre. Eine relative neue Studie hat den Einfluss der natürlichen Bewitterung über 10 bis 15 Jahre auf den Hagelwiderstand von Schindeln aus Holzfaserplatten untersucht [160]. Dabei wurden durch Hagelschlag induzierte Delaminationen gefunden.

Eine sehr interessante Studie geht der Frage nach wie die Impact-Festigkeit von Verputzsystemen mit unterschiedlichen organischen Bindemitteln in Bezug gesetzt werden kann zu anderen mechanischen Kennwerten [161]. Eine Reihe von acht verschiedenen typischen Verputzsystemen wie sie bei der Anbringung von WDVS verwendet werden wurden im Labor untersucht. Die mechanische Charakterisierung erfolgte einerseits im Zugversuch und unter 3-Punkt-Biegung als auch unter einem Hard Drop Test nach ETAG-004. Eigenschaften wie die Spannungs-Dehnungs-Kurve resp. Last-Verformungs-Kurve wurden hinsichtlich ihrer Aussagekraft für die Prognose des Impact-Verhaltens untersucht. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen der im Biegeversuch bis zum Bruch und der im Zugversuch bis zum Bruch dissipierten Energie und der Festigkeit gegen Impact gefunden werden. Eine physikalische Erklärung für eine hohe Festigkeit gegen Impact wird wie folgt beschrieben: Entweder ist das Material hoch verformbar bei geringer Festigkeit oder es ist weniger verformbar hat aber eine hohe Festigkeit. Diese beiden Werkstoffeigenschaften werden unter anderem durch die Glasübergangstemperatur bestimmt.

Impact als Lastfall wird auch im Flugzeug-Strukturbau thematisiert. Eine Arbeit hat den Aufschlag einer Stahlkugel auf eine Composite-Platte untersucht [162]. Die dabei angenommenen Parameter des Stahlkugel sind: Masse=1.835g, kinetischen Energie = 40J. Diese Arbeit zeigt auf, wie es durch dynamische Schläge bei Composite-Platten zu Delaminationen kommen kann.

3.2.5 Literaturrecherche zum Hagelwiderstand von Gebäudehüllen

Die Entwicklung des Hagelregisters wird im Vortrag [16] vorgestellt. Publikationen von P. Flüeler zum Thema sind [5, 6, 16, 163-165].

In den Jahren 1991 bis 1993 wurde eine Hagelschlag-Testanlage an der Empa aufgebaut. Diese beruhte auf den Erfahrungen mit einer Vorgängerversion, mit welcher bereits in den 1980er Jahren Erfahrungen mit dem Beschuss von Ziegeln, Dichtungsbahnen, Kunststoffmembranen, Lichtkuppeln, Fensterprofilen, Blechen, Glas gesammelt wurden, [166]. Bereits damals hat man Versuche an WDVS durchgeführt. Diese Anlage war jedoch nur in der Lage PA-Kugeln mit Durchmesser 40cm zu verschiessen. Dabei wurden Kunststoffelemente aus PVC und chlorsulfoiertem Polyethylen (CSM) im Neuzustand und nach natürlicher Bewitterung über mehrere Jahre untersucht. Dabei wurde für beide Materialien eine deutliche Abnahme der Bruchdehnung festgestellt. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden dann erste Vorschläge für das Prüfverfahren zur Ermittlung des Hagelwiderstandes erarbeitet, [167].

Mit der modifizierten Empa-Anlage wurde dann in den 1990er die Hagelschlag-Simulation auf Eiskugeln ausgedehnt. In der Veröffentlichung [165] werden die methodischen Aspekte der Prüfung mit PA-Kugeln und mit Eiskugeln besprochen, wie auch eine Zusammenfassung der Hagelschlag-Untersuchungen an Bauelementen aus andern Kunststoffen gegeben.

Einige Arbeiten wurden durchgeführt welche den Hagelwiderstand von Abdichtungen von Gebäuden mit Flachdächern, sogenannten Abdichtungsbahnen behandeln. Dazu gehört z. B. die Arbeit von Crenshaw und Koontz [62, 168]. Die Arbeit von Koontz ist im Speziellen interessant, da in diesem Testprogramm auch Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), welches zwischen 5 und 20 Jahren der natürlichen Bewitterung ausgesetzt war auf Hagelwiderstand geprüft. In dieser Studie konnte kein Alterungs-Effekt auf den Hagelwiderstand gefunden werden. Auch an der Empa wurden bituminöse und Kautschuk-basierte Dichtungsbahnen auf deren Hagelfestigkeit geprüft, [166].

Herzog et al haben Hagelschlagversuche an Wandverschalung durchgeführt, [169]. Dabei wurde festgestellt, dass eine Vinyl-Verkleidung anfälliger auf Hagelschlag ist, als eine metallische Verkleidung aus Aluminium oder Stahl.

Kashiwagi et al. haben eine Feldstudie an einer Flachdachabdeckung aus Polyurethan-Schaum, welche 15 Jahre im Gebrauch war durchgeführt. Dabei wurde auch der Hagelwiderstand bestimmt und festgestellt, dass die Anforderungen auch nach 15 Jahren noch erfüllt werden und somit das Dach noch hätte weiter verwendet werden können, [170].

Koontz diskutiert in den Effekt von Hagelschlag auf Schindeln und Ziegel aus verschiedenen Materialien, wie Asphalt, Holz, und Zement, [171].

4 ERFAHRUNGEN ZU ALTERUNG UND HAGELWIDERSTAND VON ELEMENTEN DER GEBÄUDEHÜLLE

4.1 Früherer Erfahrungen der Empa

In den 1980er Jahren hat die Empa umfangreiche Untersuchungen zu Kunststoff-Bauelementen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Kunststoffe der natürlichen Bewitterung ausgesetzt und Materialeigenschaften im Neuzustand und nach natürlicher Alterung gemessen. Dabei wurde auch der Hagelwiderstand untersucht, [166, 167, 172]. So konnte man feststellen, dass PVC und chloresulfoniertes Polyethylen (CSM) mit dem Alter sowohl eine Abnahme der Bruchdehnung erfährt als auch eine Abnahme des Hagelwiderstandes beobachtet wird, s. Bild 22. Weitere Werkstoffe welche zu dieser Zeit auf den Hagelwiderstand untersucht wurden waren Polymethylmetacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC) und glasfaserverstärktes Polyester (GF-UP), s. Bild 23.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer Abnahme des Hagelwiderstandes nach natürlicher Bewitterung bei solchen Materialien gerechnet werden muss.

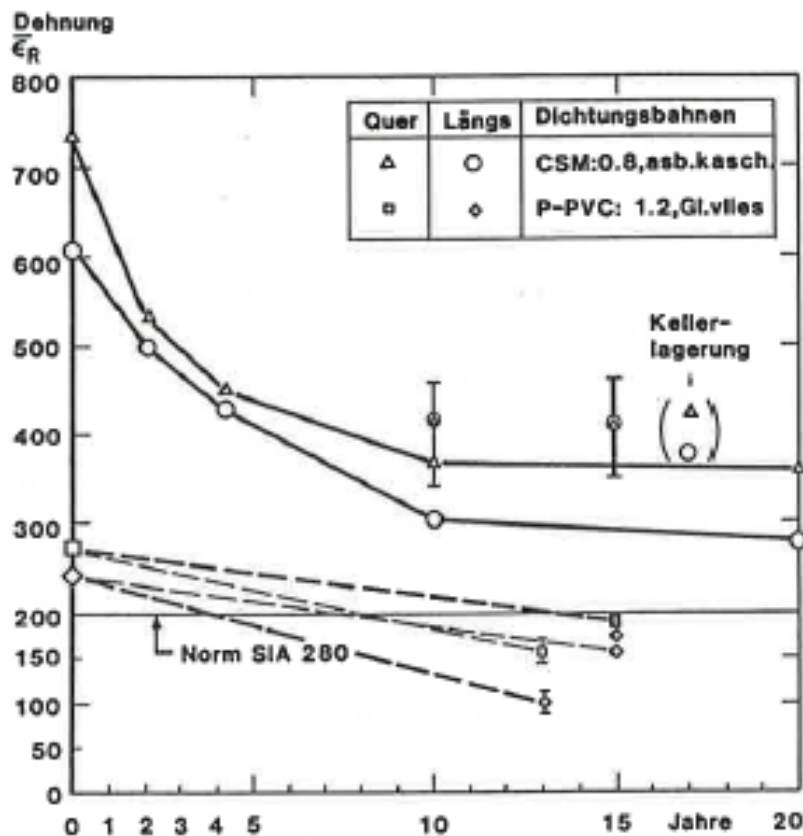


Bild 22: Kunststoff-Dichtungsbahnen aus weich-PVC und CSM. Bruchdehnung und Hagelwiderstand nach SIA 280 in Abhängigkeit der natürlichen Bewitterung an unterschiedlichen Expositionen in der Schweiz [166].

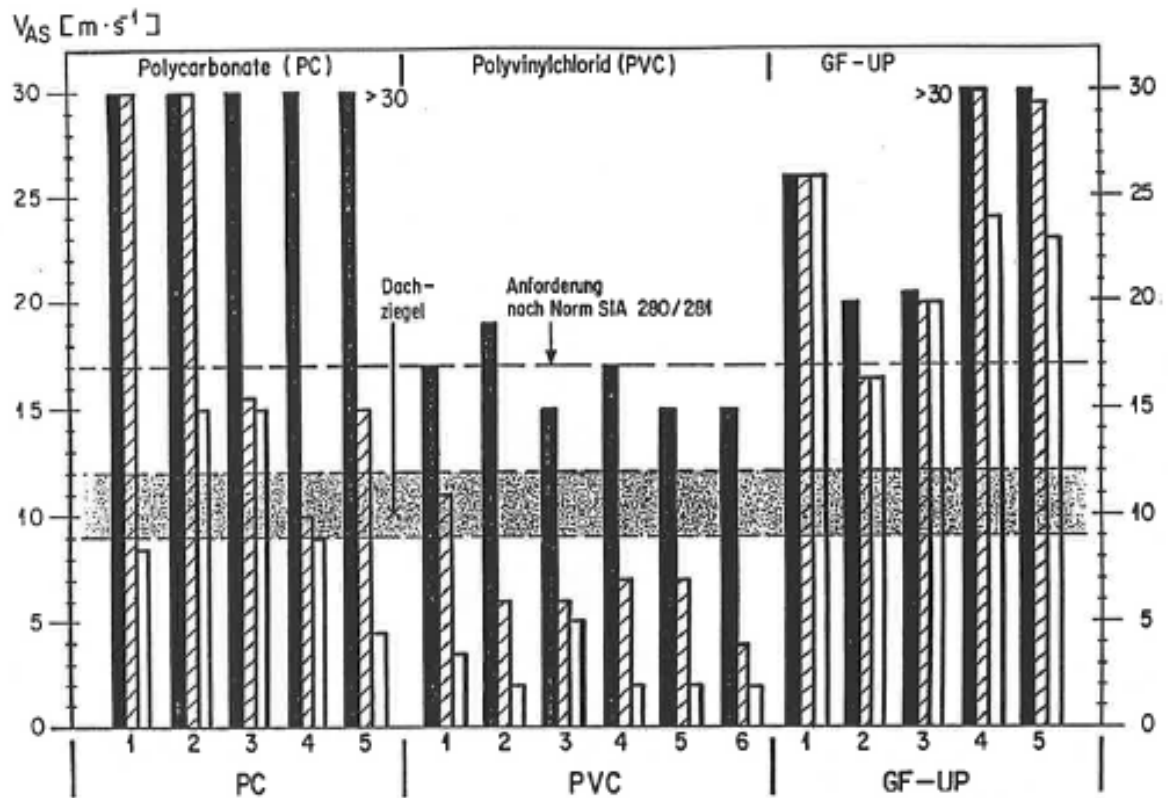


Bild 23: Ergebnisse an Doppelstegplatten und Wellplatten (PVC), Polycarbonat (PC) und glasfaserverstärktem Polyester (GF-PE): Aufprallgeschwindigkeit bei der eine Schädigung beobachtet wird in Abhängigkeit vom Alter (neu, nach 2 und nach 5 Jahren natürlicher Exposition) [166].

Eine interessante Aussage findet sich im Bericht [166] zur Alterung bei Verputzsystemen:

Das Langzeitverhalten der mechanischen Eigenschaften infolge natürlicher Bewitterung ist jedenfalls schwer abzuschätzen. In diesem Sinne wäre eine Untersuchung über den Einfluss des Anteils an organischen Bestandteilen im "Kunststoff"-Putz und der Putzdicke aufschlussreich.

4.2 Erfahrungen der VKF-Expertengruppe und -Geschäftsstelle

Im Rahmen des Projektes „Einfluss der Alterung von Baumaterialien auf die Hagelfestigkeit“ der VKF-Geschäftsstelle wurden Hagelschlag-Experimente mit künstlich gealterten Polycarbonat-Doppelstegplatten und WDVS-Probekörpern durchgeführt. Anlässlich der 45. FER-Sitzung am 19. August 2016 und am Erfahrungsaustausch der Hagelprüfstellen am 10./11. November 2016 in Sursee wurden erste Resultate präsentiert. Im ersten Experiment wurden PC-Doppelstegplatten entsprechend 2½, 5 und 7½ Jahre künstlich gealtert und einem Hagelschlagversuch unterzogen. Beim Beschuss zeigt sich eine markante Abnahme der Beschussenergie, die notwendig ist um Schäden (Risse) am Probekörper zu erzeugen. Die Energie nimmt von 8.8J bei 2½ auf 5.2J bei 5 Jahren bis auf 4.0J bei 7½ ab, s. Protokollbeilage 11 in [173]:

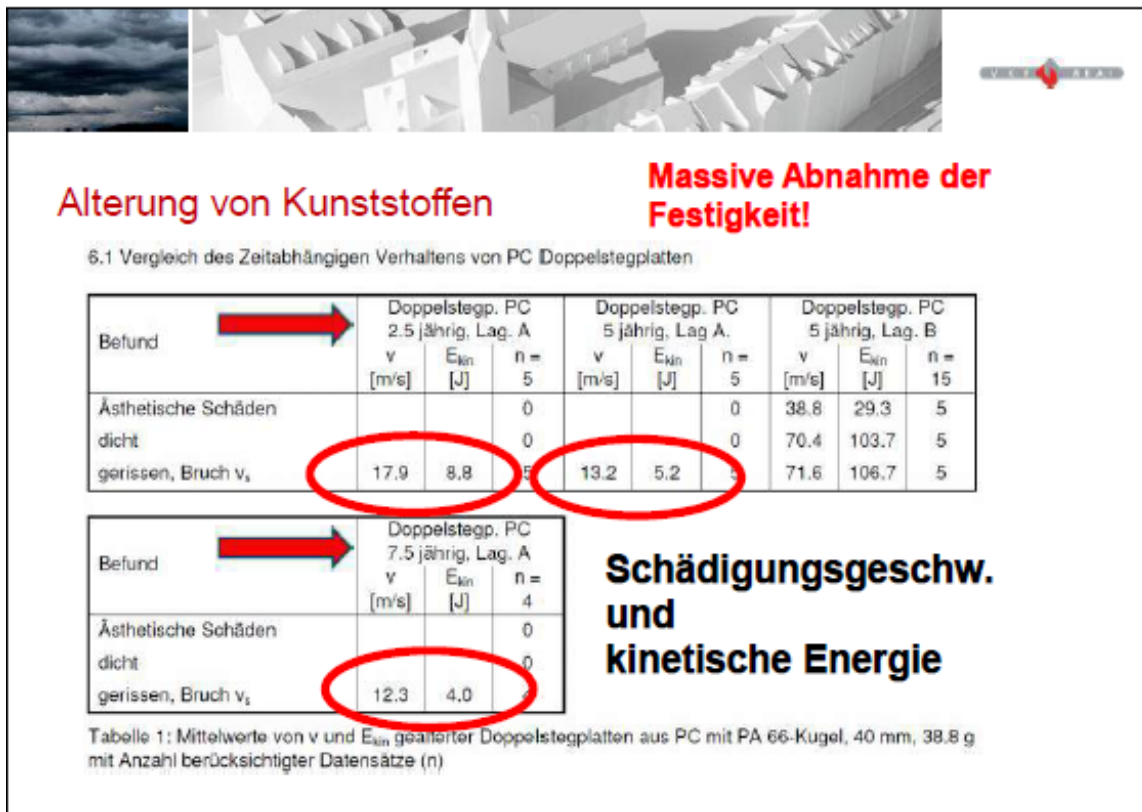


Bild 24: Ergebnisse von Hagelschlag-Versuchen an gealterten Polycarbonat-Doppelstegplatten [173].

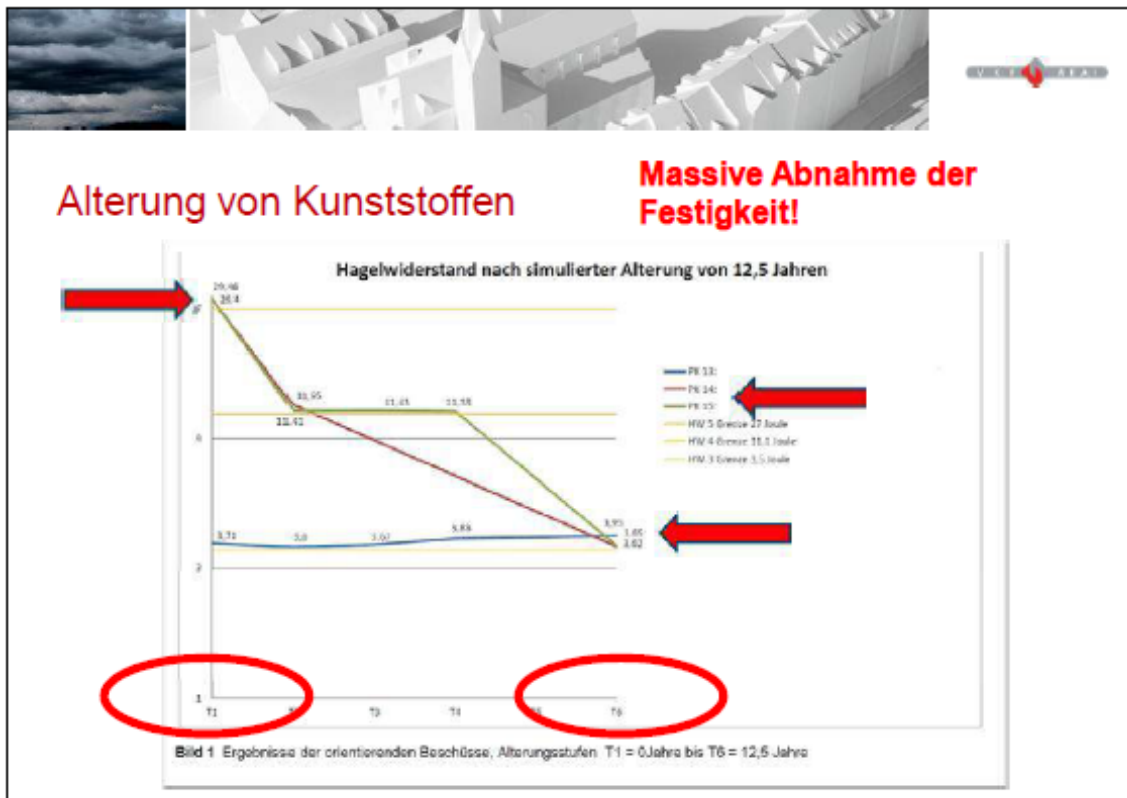


Bild 25: Ergebnisse von Hagelschlag-Versuchen an gealterten WDVS [173].

Im zweiten Experiment wurden WDVS künstlich gealtert zwischen einem Zeithorizont von 0 bis 12½ Jahren. Bei einem Probekörper blieb der Hagelwiderstand unverändert bei Hagelwiderstandsklasse 3. Bei zwei andern Probekörpern nahm der Hagelwiderstand von *HW 5* im nicht gealterten Zustand über *HW 4* nach ca. 6 Jahren auf *HW 3* nach 12½ ab. Diese Experimente wurden im Januar/Februar 2017 am IBS in Linz weitergeführt, s. Protokollbeilage 11 in [173] und sind ein Hinweis darauf, dass die Alterung negative Auswirkung auf dem Hagelwiderstand haben kann. Eine methodische Schwierigkeit bei diesen Test-Verfahren ist immer die händische Fertigung der Prüfkörper. Die Abmessungen der einzelnen Schichten variieren dabei unweigerlich und führen zu relativ grossen Streuungen der Prüfergebnisse. Daher wäre eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Prüfkörperherstellung eine wichtige Voraussetzung um wissenschaftlich erhärtete Resultate erzielen zu können.

4.3 Erfahrungen der kantonalen Gebäudeversicherungen

Im Synthesebericht zum Elementarschutzregister Hagel findet man viele wertvolle Informationen zum Thema Hagelgefahr und Widerstand von Gebäudehüllen aus der Sicht der Gebäudeversicherungen [174]. Die Hagelgefährdung der Schweiz, die Entwicklung der Gebäudehüllen, sowie die Hagelereignisse 2002 und 2004 werden diskutiert. Technische Informationen findet man zu den Themen Schadensbilder von Hageleinwirkung, Entwicklung der Hagelschlagsimulation im Labor, sowie Entwicklung des Hagelregisters der VKF. Im selben Bericht werden Archivdaten der Empa der Jahre 1970 bis 2005 erwähnt, welche unter der Projektleitung von Peter Flüeler entstanden sind. Ebenfalls aufgeführt wird der Teilbericht „Hagelwiderstand der Gebäudehülle, experimentelle Ermittlung des Hagelwiderstandes (2007)“ unter der gleichen Projektleitung.

Ein weiterer Bericht befasst sich vertieft mit den Hagelereignissen vom 26. Mai und 23. Juni 2009 in der Schweiz [175]. Darin wird in einem Abschnitt die Frage der Alterung von Faserzement-Dächern angesprochen, ohne jedoch konkrete Aussagen dazu machen zu können (s. S. 23 linke Spalte letzter Abschnitt). Im Kapitel 4 wird auf einen möglichen Einfluss des Alters (nebst dem Unterhalt) auf die Verletzlichkeit der Gebäudehüllen hingewiesen. Auch die Problematik von Folgeschäden durch später eindringendes Wasser (z. B. Abplatzungen infolge Frost) wird angesprochen. Dass dabei auch feine Haarrisse welche während dem Hagelereignis allenfalls entstehen zu Spätschäden führen können wird diskutiert. Dazu gibt es jedoch keine Hinweise auf nähere Untersuchungen.

Im Kapitel 6 werden dann Abschätzungen zu den ökonomischen Kosten solcher Hagelereignisse Angaben gemacht, wie auch das Schadenminderungspotential von hagelschlaggeprüften Bauprodukten (*HW 3*). Im Schlusskapitel wird dann nochmals auf den Alterungseffekt hingewiesen und folgende Aussage gemacht
„...Alterungseffekte vermindern bei vielen Materialien (insbesondere Faserzement, Ziegel, Kunststoff) den Hagelwiderstand.“

Hinweise auf weiterführende Literatur, welche diese Aussage stützen könnten fehlen jedoch. Weitere Erkenntnisse zum Hagelschlag sind in der Arbeit von F. Barmet zu finden [176]. In der Richtlinie zur Regulierung von Hagelschäden an Gebäuden wird bei Fassaden vermerkt dass, falls mehr als 1/3 der Fassadenfläche beschädigt ist, dies als Totalschaden behandelt wird [177]. Bei verputzten Fassaden gelten kleinere Schäden als reparierbar. Bei grösseren Schäden geht man davon aus, dass der ganze Verputz entfernt werden muss, unter Umständen eine neue Bewehrung aufgebracht und einen neuen Verputz aufgetragen werden muss. Die Aargauer Gebäudeversicherung führt eine Schadenfall-Datenbank.

4.4 Erfahrungen von Experten für Gebäudehüllen

Im Rahmen dieser Studie wurde Herr R. Büchli von der Firma „QCexpert AG“ (www.qc-expert.ch) am 19. 01.2017 interviewt. Er war lange Jahre auf dem Gebiet der Gebäudeschäden tätig. Gemäss seiner Erfahrung sind Fassadenverputze klar in zwei Gruppen zu teilen: Die nicht-organischen Verputze und die organischen Verputze. Erstere können zudem noch in die Silikat-basierten Systeme und die mineralischen Systeme aufgeteilt werden. Von Kunststoff-basierten Verputzsystemen wird gesprochen, wenn der Anteil an organischen Komponenten 4% übersteigt. Altersbedingte Schäden an Bauhüllen werden gemäss seiner Aussage primär durch die Temperatur- und Feuchtigkeitszyklen verursacht. Entscheidend für das Risiko von Gebäudeschäden

den ist in erster Linie die Dicke des verarbeiteten Verputzes. Für kunststoffbasierte Systeme ist eine Mindestdicke von 2mm, für mineralische eine solche von 6 – 10mm erforderlich. Bauschäden sind in den häufigsten Fällen auf eine Unterschreitung der Minimaldicke zurückzuführen. Meistens treten diese Schäden bereits nach wenigen Jahren zum Vorschein. Feuchtigkeitseindringen kann zum Quellen oder Schwinden der Kunststoff-Komponenten führen. Das häufigste Schadensbild an Fassaden ist jedoch Algen- und/oder Pilzwachstum was als unästhetische Verfärbung sichtbar wird. Dieses Phänomen ist gut untersucht, s. z. B. [94]. Alterungsbedingte Hagelschäden sind ihm nicht bekannt.

4.5 Erfahrungen von Hagelschlagprüfstellen

4.5.1 Erfahrungen des IBS Linz

Am 09.02.2017 fanden am IBS in Linz Hagelschlagversuche an künstlich gealterten WDVS statt. Im Rahmen dieses Besuches wurden auch Fragen zum Alterungseinfluss auf die Gebäudehülle diskutiert.

Künstliche Alterung wird in der ETAG-Vorschrift beschrieben [73]. Die Herleitung der in diesen Vorschriften festgehaltenen Alterungsprozedur ist nicht näher bekannt. Bei der ETAG handelt es sich nicht um eine Norm, sondern um europaweit in der Branche akzeptierte Standardprüfungen und -anforderungen. Die künstliche Alterung besteht aus einer Sequenz von Temperaturzyklen und Beregnung. Es sind sehr aufwändige Versuche, welche nur an einigen wenigen Instituten (z.B. Wacker Chemie AG Burghausen D) durchgeführt werden können.

Gemäss Aussage von Hans Starl, langjähriger Hagelprüfer am IBS, haben die durchgeführten Versuche bei den gealterten Proben eine grössere Streuung der Resultate gezeigt als bei den neuwertigen Produkten. In Einzelfällen sind als Schäden auch Delaminationen der verschiedenen Schichten festgestellt worden.

Da der Anteil an organischen Komponenten von Produkt zu Produkt stark variiert, sind die auf dem Markt erhältlichen WDVS in deren Eigenschaften als sehr unterschiedlich zu betrachten.

Rückmeldungen aus der Praxis, welche auf einen Effekt der Alterung auf den Hagelwiderstand hinweisen würden, sind nicht bekannt. Die Bedeutung der Dicke des Verputzes wurde ebenfalls betont. Es hat sich über die Jahre eine Tendenz zu wieder dickeren Schichten gezeigt, nachdem vermehrt Schäden an zu dünn aufgetragenen Verputzen aufgetreten sind. Ein Rückschluss auf einen Alterungseffekt wäre daher nicht zulässig.

Die Vermutung, dass eine altersbedingte Versprödung der Kunststoff-basierten Systeme eintreten könnte wurde nie wissenschaftlich untersucht. Bekannt ist, dass auf Epoxy-basierte Klebstoffe in den ersten Monaten nach der Applikation noch an Härte und Festigkeit gewinnen [118]. Einen möglichen Alterungseffekt könnte durch die UV-Bestrahlung eintreten. Wissenschaftliche Untersuchungen sind ihm aber nicht bekannt.

4.5.2 Erfahrungen von FPC

Am 16. 02. 2017 fand eine Sitzung mit Peter Flüeler und Michel Barbezat an der Empa statt. Dabei wurden die Aspekte Aufbau, Alterungs-Mechanismen, Prüfmethoden und Literaturquellen besprochen.

Die Thematik wurde in den 1970er bis 1990er Jahren an der Empa bearbeitet. Empa-Jahresberichte aus dieser Zeit sollten auf entsprechende Forschungs-Berichte hinweisen. Zwei der wichtigsten Forschungsberichte sind [166, 167]. Darin wird die an der Empa entwickelte Hagelschlag-Prüfmethode beschrieben. Schlüsselpersonen waren nebst Peter Flüeler, Fritz Rupp, die Herren Sagelsdorf, Hartmann, und Pfefferkorn. Die involvierten Abteilungen waren nebst der Abteilung Kunststoffe und Composites (ehemals Abt. 114), die Chemieabteilungen sowie die Bauphysik (ehemals Abt. 176). Das Amt für Bundesbauten war ebenfalls involviert.

Heute an der Empa noch am ehesten mit solchen Themen vertraut sei Herr Josef Kaufmann Abt. Beton und Bauchemie (Abt. 308).

Ein wichtiger Alterungsmechanismus bei mineralischen Verputzsystemen ist die Hydrolyse (Spaltung einer (bio)chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser). Diese ist bei Kunststoff-basierten Systemen kein Problem. Hingegen dürfte die natürliche UV-Strahlung bei diesen Produkten eine Rolle spielen. Glasfaser-Netze können durch alkalische Korrosion angegriffen werden.

Als Informationsquelle wurde die DBMC-Konferenzreihe erwähnt. Die 14. Konferenz findet am 29. – 31. Mai 2017 in Gent/Belgien statt (www.ugent.be/ea/structural-engineering/en/dbmc2017).

Den Hagelwiderstand an Ethylen-Tetra-Fluor-Ethylen (ETFE) -Membranen hat P. Flüeler et al. anlässlich verschiedener Konferenzen zwischen 2007 und 2015 präsentiert, [5, 6, 163, 164, 178]. Darin wird diesem Material ein gutes physikalisch-chemisches Langzeitverhalten attestiert. Hingegen musste ein Gebäude welches mit diesen Bauelementen ausgerüstet war nach einem Hagelunwetter komplett neu ausgerüstet werden. Entscheiden für diesen Hagelschaden waren die unregelmässig geformten Hagelkörner, welche die Membranen durchschlagen konnten [163, 179].

Als Fallbeispiel eines Hagelfestigkeitsnachweises wird im Paper von P. Flüeler die Dachkonstruktion des neuen Elefantenhauses im Zürcher Zoo umschrieben [164]. Darin wird in einem Abschnitt über Alterung und Langzeitverhalten auf zwei andere Papers zu diesem Thema verwiesen. Darin sind die Ergebnisse von Hagelschlaguntersuchungen an 8 bis 22 Jahre alten ETFE-Membranen wie folgt dokumentiert [5, 6]:

5 Ageing and Long Term Expectations

In a previous study 3 existing buildings 8 - 22 years old and covered by ETFE-cushions were investigated to explore the long-term behaviour [9]. Therefore extracted samples were examined in tension and for tear resistance for possible damage and changes in appearance. All samples showed a superior behaviour with only minor reductions of the mechanical-physical properties. Despite of the good long-term behaviour, all three buildings suffered from hail impact damages and as consequently most of the ETFE-cushions had to be replaced [10]. Wind driven debris from surrounding forests with pointed forms perforated very often the membranes in such a manner that replacements were necessary. Also severe snow conditions, its accumulation and clearing from it, have damaged the ETFE-constructions if not specially designed or reinforced.

Diese präventiven Untersuchungen wurden veranlasst, nachdem in einem Hagelsturm 2002 eine andere Konstruktion desselben Zoos (Masoala-Halle) stark in Mitleidenschaft gezogen wurde [163].

Die Entwicklung des Hagelregisters wird im Vortrag [16] vorgestellt. Publikationen von P. Flüeler zum Thema sind, [5, 6, 16, 163-165].

4.6 Erfahrungen der Universität Bern

2015 wurde eine Studie an der Universität Bern unter der Leitung von Prof. Herrweg unter Mitwirkung von Herrn Roger Zurbriggen beendet [180]. Darin wurden WDVS-Proben, welche zwischen 2000 und 2015, also 15 Jahre der natürlichen Bewitterung ausgesetzt waren, auf Schlagfestigkeit gemäss ETAG-004 (0.5kg Stahlkugel, 3J & 10 J in 90°-Orientierung) und je eine Probe auch im Hagelwiderstandstest geprüft. Als Referenzgruppe wurden Proben des gleichen Typs unter kontrollierten Bedingungen (23°C / 50% r.F.) gelagert. Die Proben bestanden im Wesentlichen aus einer Eternit-Platte als Unterbau, einer EPS-Dammplatte welche beidseitig mit einem Mörtel verputzt, sowie einseitig mit einem Glasfasernetz verstärkt waren. Nach 15 Jahren Aussenbewitterung war der Aussenputz praktisch vollständig weggewittert. Das Resultat des Hageltest wird wie folgt zusammengefasst: „Die aussenbewitterte Probe ist im Hageltest ungefähr doppelt so stark wie die Probe die normgelagert wurde. Entlang der Arbeitsfuge ist die aussenbewitterte Probe schwächer. Dasselbe gilt für die Stossfuge. Jedoch muss hier beachtet werden, dass in der Mitte der Probe, genau entlang dieser Fuge schon ein Riss vorhanden war.“ Diese Schlussfolgerungen sind statistisch nicht abgesichert. Die erste Schlussfolgerung basiert vermutlich auf der Einzelbeobachtung bei einem Hagelschlag mit 12 J bei dem in der bewitterten Probe eine halb so tiefe und ca. halb so grosse (Durchmesser) Delle entstanden ist; dies im Vergleich zur Referenzprobe. Eine allgemeine Aussage über einen Alterungseffekt aus dieser Versuchsserie ist damit schwierig zu gewinnen.

Von Lieferantenseite solcher Produkte habe die damalige Firma HAGA (<http://www.haganatur.ch>) mitgewirkt.

4.7 Feedback von anderen Prüfstellen und Firmen

Folgende Prüfstellen wurden gebeten Informationen über den Einfluss der Alterung auf den Hagelwiderstand abzugeben: Egli Engineering AG und TÜV Deutschland. Es gab jedoch keine nennenswerten Hinweise von diesen Stellen.

Die Firma TEA AG (www.tea-ag.ch) ist spezialisiert auf die Umweltprüfung von elektrischen und elektronischen Apparaten im Rahmen der CE-Zertifizierung. Anlässlich eines Seminars zum Thema „Umweltprüfung“ (Neuhausen am Rheinfall, 2016) wurden verschiedene Alterungsmechanismen vorgestellt, welche die Festigkeit und Funktionsfähigkeit von technischen Produkten herabsetzen können. Auch auf entsprechende beschleunigte Prüfverfahren und Nachweismethoden wurde im Kapitel 3.2.3 eingegangen.

Die Firma sto AG (www.stoag.ch/) ist ein grosser Lieferant von Verputzsystemen. Diese Firma führt auch Weiterbildungsseminare für Praktiker durch. In einem Seminar wurden die Fragen rund um die Prävention von Bauschäden an Fassaden thematisiert [181]. Ein Seminar befasste sich mit dem Thema Bauschäden und deren Verhinderung (Niederglatt, 01. 03. 2017). s.

<http://www.stoag.ch/de/service/weiterbildung/weiterbildung.html>. Die Bedeutung einer sachgerechten Installation von WDVS war der Schwerpunkt dieser Weiterbildung. Alterungseffekte auf die Beständigkeit resp. auf die Hagelwiderstandsfestigkeit von Verputzsystemen waren dem Seminarleiter nicht bekannt.

4.8 Eigene Beobachtungen von Schäden an Fassaden

Im folgenden werden Bilder von Schäden an Fassaden gezeigt, um das typische Erscheinungsbild einer nicht mehr ganz neuen, in dem Sinn „gealterten“ Fassade an Gebäuden zu illustrieren.



Bild 26: Blasen- und Rissbildung, Beispiel an einem Gebäude in Zürich.



Bild 27: Rissbildung und Abplatzung der Deckschicht an einer verputzten Steinmauer durch zu hohe Feuchtigkeit und Frost-Tau-Zyklen, Beispiel an einem Gebäude in Küsnacht.



Bild 28: Detail von Bild 29: Ablättern des Farbanstriches und Abplatzung des Deckverputzes im Bereich eines ausgedehnten Risses.



Bild 29: Verfärbung des Anstriches durch Algenbefall, Beispiel an einem Gebäude in Zürich.



Bild 30: Abplatzung der Deckschichten an einer mit einem WDVS sanierten Fassade durch mechanische Beschädigung (Container-Stösse), Beispiel an einem Gebäude in Zürich.



Bild 31: Abplatzung der Deckschicht durch mechanische Beschädigung (vermutlich durch Schläge von Schneeschuhen oder einer Schneeschaufel) kombiniert mit Frost-Tau-Zyklen, Beispiel an einem Gebäude in Grindelwald.



Bild 32: Abplatzung der Deckschicht durch mechanische Beschädigung (vermutlich durch Schläge von Schneeschuhen oder einer Schneeschaufel) kombiniert mit Frost-Tau-Zyklen, Beispiel an einem Gebäude in Grindelwald.



Bild 33: Massive Abplatzung der Deckschicht auf einem Verputz; vermutlich durch falsche Materialkombination (Acrylfarbe auf organischem Verputz?) bei aggressivem mediterranem Klima (Salzwasser und Wind), Beispiel an einem Gebäude in Stromboli (Insel in Süditalien).

Die vermutete Ursache der Schäden, wie sie in den Bildern 26 bis 33 gezeigt werden, ist die natürliche Bewitterung (Bild 26, 29 und 33) resp. eine zu hohe Feuchtigkeit (Bild 27 und 28). Abplatzungen, wie sie in den Bildern 30 bis 32 gezeigt werden können natürlich auch durch direkte mechanische Beschädigungen etwa durch Schläge mit harten Gegenständen wie Werkzeugen oder Fahrzeugen, etc. mitverursacht werden. Solche zusätzlichen Einwirkungen sind jedoch nicht eigentlich Alterungsphänomene des Materials, sondern sind als unsachgemäss Behandlung (z. B. Vandalismus) zu bezeichnen.

5 BEWERTUNG DES STAND DES WISSENS UND ERFAHRUNG

5.1 State-of-the-Art betreffend Alterung und Hagelwiderstand

Als Basiswissen von Architekten resp. Stand der Technik wird hier, stellvertretend das Wissen welches im Rahmen des ETH-Architekturstudiums vermittelt wird, kurz dargestellt. Es geht hier um die Frage, wieweit Alterungsprozesse zum Standardwissen in der Branche gehören. Da uns hier insbesondere die auf Kunststoffen basierten Baustoffe interessieren, wurden die Vorlesungsunterlagen zur Vorlesung „Baustoffe II – Polymere Baustoffe“ näher recherchiert [182]. In Kapitel 1.4.1 wird die Alterung von Polymeren im Sinn der chemischen Stabilität in Kürze besprochen. Das Kapitel 7 behandelt die Dämmstoffe und Dichtungsbahnen, das Kapitel 9 die Beschichtungen und das Kapitel 10 die Klebstoffe.

Im Jahre 2002 hat die Empa ein Anwenderseminar zum Thema „Wie lange hält ein Kunststoffbauteil?“ durchgeführt. Themen des Langzeitverhaltens wurden aus werkstofftechnischer Sicht sowohl theoretisch als auch an praktischen Beispielen diskutiert. Dabei wurde zeitabhängiges mechanisches Materialverhalten, Dimensionierung von Kunststoffteilen für den Langzeiteinsatz, der Fall der Abdichtungsbahnen im NEAT-Tunnel, aber auch Umwelteinflüsse auf Baustoffe besprochen [183].

Die neulich (2016!) erschienene Studie von Franzoni et al. gibt einen sehr guten Einblick in das Wissen über die Auswirkung der (künstlichen) Alterung auf das Verhalten von WDVS [48]. Es ist eine der wenigen Studien, welche sehr nahe an unsere Fragestellung herankommt. In der Einleitung wird das vorhandene Wissen aus der Sicht der Autoren wie folgt zusammengefasst: Die Feuchtigkeitsproblematik als Nachteil von WDVS wird in verschiedenen Studien diskutiert. Diese Problematik sei bei biologischen Wärmedämmstoffen, wie Holzwolle oder Hanf noch akzentuierter als bei den gängigen Werkstoffen wie Polystyrol, Polyurethan oder Steinwolle. Die Autoren erwähnen auch das sehr beschränkte Wissen über das Langzeitverhalten solcher Systeme („...their effectiveness and long-term behaviour in operational environments is still barely known, to the authors' best knowledge.“). Für die Funktionalität entscheidend sei die Kompatibilität der einzelnen Materialien, die in einem WDVS zusammen gebracht werden. Relevante Prüfverfahren mit welchen Teile der Funktionalität solcher Systeme geprüft werden können seien in der EN-Norm 13499 zu finden. In Bezug auf die Langlebigkeit können die Autoren nur drei Papers referenzieren: Die Arbeit von Ximenes et al. [150], eine Arbeit von Sulakatko [184], sowie die Studie von Norvaisiene [86]. Letztgenannter Autor beklage ebenfalls das fehlende Wissen auf diesem Gebiet. Der generelle Eindruck („general impression“) sei gemäss Künzel und Zirkelbach in [87], dass ETICS sich sehr gutmütig verhalten, was die Applikation auf Betonwänden oder gemauerte Fassaden betrifft. Künzel und Zirkelbach hätten die Effektivität von ETICS nach 20 Jahren im Betrieb untersucht und erwarten darauf abgestützt eine Lebensdauer von bis zu 60 Jahren [87].

Auch Franzoni et al. begründen die häufigsten Bauschäden mit fehlerhafter Ausführung, seltener durch Schrumpfung des Mörtels während dem Trocknungsprozesses, dies gemäss [125]. Die Bedeutung der Schichtdicke habe Stastnik in [89] betont. Eine mögliche Fehlerhypothese sei nach Zirkelbach [90] der Verlust der Haftfestigkeit (pull-off strength) in Folge eindringendem Wasser (durch Wind und Regen) in ein ETICS.

Feuchtigkeit aus Kondensation oder Regen könne zusammen mit der Temperatur, UV-Strahlung und Verschmutzung einen synergetischen Alterungseffekt spezielle in Deckschichten mit organischen Komponenten hervorrufen, dies gemäss Daniotti [7]. Gemäss Daniotti sei eine Lebensdauerprognose basierend auf den ETAG-004 Bewitterungstests für harsche klimatische Bedingungen nicht zwingend möglich.

Leider wurde in der Studie selbst jedoch das Impact-Verhalten nur im nicht-gealterten Zustand untersucht. Die Fragestellung war auf die Verklebung fokussiert, wodurch der Alterungseffekt nur bezüglich der Zugfestigkeit der Verklebung untersucht wurde. Für die Verklebung konnte eine sehr gute Langlebigkeit resp. eine hohe Unempfindlichkeit gegen (künstliche) Bewitterung nachgewiesen werden. Das Versagen der Proben erfolgte immer im Wärmedämmmaterial und nicht in der Verklebung! Die gemessenen Werte für die Impactfestigkeit, Penetrationsfestigkeit, und Wegreissfestigkeit waren generell viel höher als die geforderten Werte gemäss EN 13499.

Table 8 Tensile bond strength (kPa) of the composite boards subjected to accelerated ageing, compared with unaltered ones (means of at least three samples)

Boards	Unaltered	After freeze–thaw cycles	After thermal ageing	After differential thermal deformation test at 70 °C
XPS-RS	357 ± 31	285 ± 25	339 ± 66	253 ± 25
SPT-S	497 ± 23	377 ± 51	453 ± 96	514 ± 11

Breaking always occurred inside the thermal insulating material

Bild 34: Auszug aus der Studie Franzoni et al. [48]: Resultate der Wegreissfestigkeits-Tests von gealterten im Vergleich zu nicht gealterten Proben.

Die Studie diskutiert neue methodische Ansätze zur thermo-mechanischen Prüfung von WDVS. Im Weiteren wurden vorgefertigte WDVS mit einer keramischen Deckschicht (Porzellansteingut) untersucht.

5.2 Haupteckkenntnisse aus Literaturrecherche

Die Literaturrecherche hat keine Publikation hervorgebracht, welche Untersuchungen eines möglichen Alterungseffektes auf den Hagelwiderstand bei Verputzsystemen oder Wärmedämmverbundsystemen dokumentieren.

Damit bleibt das Resultat der noch nicht publizierten Ergebnisse der Versuche am IBS in Linz, welche im Rahmen des Erfahrungsaustausches unter den Hagelprüfstellen vorgestellt wurden, s. Protokollbeilage 11 zu [173] die einzigen Hinweise auf einen solche Effekt. Einen Alterungseinfluss auf den Hagelwiderstand wurde im gleichen Protokoll auch für Polycarbonat-Doppelstegplatten gezeigt.

Franzoni hat die Wegreissfestigkeiten von verklebten WDVS nach künstlicher Bewitterung verglichen mit nicht bewitterten Proben [48]. In beiden Gruppen versagte der Dämmwerkstoff und nicht die Klebung. Eine Aussage über einen Effekt der Bewitterung auf die Klebung kann daher nicht gemacht werden. Die beobachteten Wegreiss-Festigkeitwerte (sowohl im gealterten als auch im nicht-gealterten Zustand) bleiben viel höher als die nach Norm geforderten Soll-Werte.

Der generelle Eindruck („general impression“) sei gemäss Künzel und Zirkelbach in [87], dass ETICS sich sehr gutmütig verhalten, was die Applikation auf Betonwänden oder gemauerte Fassaden betrifft. Künzel und Zirkelbach haben die Effektivität von ETICS nach 20 Jahren im Betrieb untersucht und erwarten darauf abgestützt eine Lebensdauer von bis zu 60 Jahren [87].

Die Untersuchung von Ximenes [150] hat zwar vermehrte Schäden an Fassaden mit zunehmendem Alter an einer Gebäudegruppe in Portugal gefunden. Die Kriterien, welche diese „Schäden“ beschreiben sind aber weitgehend nur ästhetische Mängel. Funktionale Mängel kommen darin nur als Einzelfälle vor. Hinweise auf einen Effekt des Alters auf den Hagelwiderstand finden sich keine in dieser Studie.

Daniotti hat mittels künstlicher Bewitterung Schäden an verputzten Wänden im Labor untersucht. Das Schadensbild sind Blasen (blistering) welche durch den Feuchtigkeitshaushalt mit Dampfdruck-Bildung hervorgerufen werden [7]. Würden solche Blasen durch einen Hagelschlag getroffen ist mit grosser Wahrscheinlichkeit mit einem Schadenszuwachs durch den Hagel zu rechnen. In diesem Sinn könnte der Hagelwiderstand durch diesen Alterungseffekt herunter gesetzt werden. Wissenschaftlich untersucht wurde jedoch dies in der oben erwähnten Studie nicht.

5.3 Offene Fragen

Als mögliche Hypothesen für die weitere Bearbeitung des Themas könnten folgende Ansätze sein:

Ein Abfall des Hagelwiderstandes mit dem Alter ist auf physikalischen-chemische Prozesse welche das Werkstoffverhalten verändern zurückzuführen. In Frage kommen

- A) Entwässerung/Wasseraufnahme
- B) Zersetzung/Degradation durch physikalischen-chemischen Angriff
- C) Nachvernetzung und dadurch Zunahme der Steifigkeit und eventuell der Versprödung

Eine andere Hypothese ist eine thermohydrmechanische Ermüdung durch Wärme-Kälte-, resp. Tau/Frost-Zyklen. Es kommt zu

- a) Porenbildung
- b) Mikrorisse/Delamination der Schichten
- c) Schwund/Aufquellen und daraus Eigenspannungen
- d) Eindringen von Wasser/Ansammlung von Kondenswasser gefolgt von Frostschäden (Abplatzungen)

Der Wirkzusammenhang zwischen solchen Alterungseffekten und dem Hagelwiderstand muss jedoch physikalisch begründbar sein: Kommt es zu einer Veränderung der Elastizität/Nachgiebigkeit des Materials und damit des Bauproduktes? Verändert sich die Duktilität, resp. kommt es zu einer Versprödung? Vermindert sich dadurch eine allenfalls im Neuzustand noch vorhandene Duktilität?

Der Hagelwiderstand, wie er in der Hagelsimulation ermittelt wird, ist eine Bauteileigenschaft, welche vom Material aber auch stark vom Aufbau (Struktur, Geometrie, Randbedingungen) des Bauproduktes abhängt. Es müssen also diejenigen Kennwerte des Materials und der Struktur identifiziert werden, welche im hochdynamischen Vorgang eines Hagelbeschusses relevant sind. Es können dies die Materialelastizität, die Materialdämpfung, die Materialdichte (Wasseraufnahme?) sowie Schädigungsmechanismen und Schädigungskriterien (Bruchgrenze des Materials) sein. Ein entsprechendes physikalisches Modell sollte erstellt werden, in welchem die relevanten Materialkenndaten einfließen.

Analog zum Impactverhalten von Laminaten wo unterschiedliche Schädigungen mit steigender Impactenergie auftreten (Matrix-Risse, Faserablösung, Delamination im Inneren, Fortpflanzung der Delamination im Inneren und auf der Impact-Rückseite, Faserbrüche, Durchstossen) sind unterschiedliche Schädigungen auch in Verputz-Systemen mit steigender Impact-Energie zu erwarten.

Es ist zu erwarten, dass folgende Materialeigenschaften der einzelnen Schichten des WDVS deren Systemverhalten beeinflussen und sich durch die Alterung verändern können:

- Verputzschicht: E-Modul, Bruchdehnung, Festigkeit (Scherung/Biegung), Haftung zu den Verstärkungsfasern, Abriebwiderstand
- Verstärkungsgitter: Haftung zum Verputz und zum Untergrund (Kleber?), evtl. Spannungsrissskorrosionsempfindlichkeit
- Klebschicht (zwischen Verputz und Isoliermaterial): Haftung zueinander, E-Modul, Festigkeit (Querkzug, Scherung)
- Isolationsmaterial (z.B. Schaum): E-Modul, Wasseraufnahme

Als Systemverhalten unter Impact-Belastung sind vor allem das lokale Eindrückverhalten und das Biegeverhalten des Verbundes auf dem nachgiebigen Schaumuntergrund von Bedeutung und können durch die Alterung verändert werden und somit den Hagelwiderstand des WDVS beeinflussen. Die Literaturstudie zeigte aber vor allem, dass nur ganz wenige Informationen diesbezüglich vorliegen. Einzelne Studien zeigen auf, dass eine Alterung des WDVS beobachtet werden kann und zu erwarten ist. Der Zusammenhang mit dem Hagelwiderstand ist mit Ausnahme von PC-Doppelstegeplatten [173] und bis auf einzelne Messdaten des IBS [173] nicht ausreichend untersucht.

Weitere Aspekte wie Aufprallwinkel und Oberflächenrauigkeit sowie Hagelkorngometrie und deren Einfluss auf dem Hagelwiderstand sind ebenfalls zur Zeit kaum untersucht. Vor allem nicht bekannt ist, wie dieser Einfluss durch die Alterung der WDVS verändert wird.

Die wenigen Untersuchungen, welche einen Alterungseffekt bei WDVS untersucht haben, beschränkten sich auf die Beobachtung von sichtbaren Veränderungen, wie Blasenbildung, Risse, Abplatzungen und dergleichen. Für eine quantitative Bewertung von Impact-Schäden haben lediglich Flores-Colen et al. [148] eine Methode angewendet. Die zur Qualitätssicherung verwendete Prüfmethode der Wegreissfestigkeit (eine makroskopische Zugfestigkeit) ist ein Extremfall von möglichen Zug/Schub-Belastungskombinationen, wie sie in der Realität am Gebäude auftreten. Da beim Hagelschlag nicht nur eine reine Zugbeanspruchung auf das WDVS auftritt, sondern eine Kombination von Zug-, Druck- und Schub-Belastung ist es fraglich ob der Wegreiss-Test die einzig richtige Prüfmethode ist. Die Wirkung des Hagelschlages ist ja viel eher eine Delle, mit allenfalls Delamination der Schichten, begleitet von Mikrorissen im Bereich der Aufprallzone. Daher sollten, ergänzend zum Wegreiss-Test, weitere Testverfahren für die Qualitätssicherung entwickelt werden. Eine interessante Methode ist sicherlich der Schlagtest mit dem Martinet-Baronnie-Gerät welches bereits im Labor als auch an realen Gebäuden angewendet wurde [148]. Weiter sind Testverfahren gefragt, welche zerstörungsfrei eine innere Delamination feststellen kann. Um den Widerstand gegen eine weitere Ausdehnung einer runden Delamination (Vorstufe einer Blase) messen zu können wäre ein dem Peel Test-ähnliches Verfahren interessant. Die Belastungskraft einer Verklebung ist nämlich im Wegreiss-Versuch viel höher als in einem Peel Test, s. Bild 31. Mikroskopisch sind im ersten Fall viele Moleküle der Verklebung gleichzeitig belastet, wogegen beim Peel Test nur einige wenige Moleküle, diese jedoch hoch belastet werden. Wie bei der Bruchmechanik, wo die Belastbarkeit eines Werkstoffes an einem scharfen Riss untersucht wird, und der konventionellen statischen Festigkeit von metallischen Werkstoffen sind für beide Belastungsarten je eigene Materialkennwerte relevant, welche nicht a priori ineinander übergeführt werden können. So ist die Bruchzähigkeit (Kennwert der Bruchmechanik) nicht mit der Fließgrenze oder der Bruchgrenze vergleichbar (Kennwert des normalen Zugversuches). Diese Unterschiede sind noch ausgeprägter wenn korrosive Einflüsse im Spiel sind. Diesbezügliche Untersuchungen der Spannungsrissskorrosion haben dies gezeigt, s. z. B. [185].

Adhäsives Versagen im makroskopischen Modell

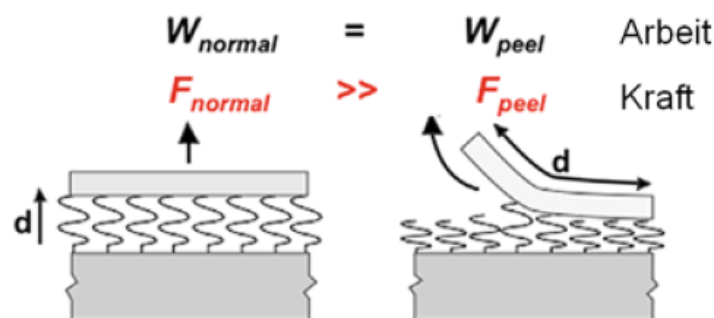


Bild 35: Statische Festigkeitswerte in Funktion der künstlichen Alterung von CFK-Lamellen aufgeklebt auf Beton [186]

5.4 Weiteres Vorgehen

Basierend auf den vorhandenen Informationen und Ergebnissen der Literaturrecherche schlagen wir vor, das weitere Vorgehen in folgende Schritte zu unterteilen:

Analytische Bearbeitung der Fragestellungen (A+B):

- A) Beschreibung des Hagelschlages als dynamischen Lastfall (Impact) für die Gebäudehüllen mit der Bestimmung der dabei involvierten Material- und Systemeigenschaften seitens der Gebäudehülle. Der mehrlagige Aufbau mit den entsprechenden Materialien und typischen Abmessungen ist zu definieren, inklusiv der relevanten dynamischen Materialkennwerte, wie E-Modul, G-Modul, Dichte, Schallgeschwindigkeit, akustische Impedanz, Festigkeiten auf Hertz'sche Pressung, Schubfestigkeiten, Rissinitiations- und Weiterreissfestigkeit einer Delamination. Nebst einer analytischen Modellierung wäre es besonders hilfreich mittels einer Simulation des Impactverhaltens mit der Finite-Element-Methode eine Sensitivitätsstudie durchzuführen um Veränderungen von Materialeigenschaften auf das Impact-Verhalten abschätzen zu können.
- B) Beschreibung von möglichen Alterungsmechanismen und -prozessen, inkl. deren Überlagerung und Abschätzung deren Auswirkung auf die für den Hagelwiderstand relevanten Material- und Systemeigenschaften. Mögliche physikalisch-chemische Prozesse, die untersucht werden müssen sind: chemische Zersetzung, UV-induzierte photochemische Zersetzung, Oxidation, Hydratation, Nachvernetzung, gefolgt von Versteifung und Versprödung, sowie alkalischer Angriff. Wichtige physikalische Effekte welche genauso auf die mechanischen Kennwerte der Materialien Einfluss haben können sind das Wasserabsorptions- und Trocknungsverhalten: Dieser Aspekt gilt als die wichtigste Einflussgrösse auf die Lebensdauer von WDVS.
- C) (Weiter)-Entwicklung von Materialtests, um den Zustand der Systemkomponenten zu beurteilen und den Aufwand für Untersuchung der künstlichen Alterung auf WDVS auf die Untersuchung an kleinen Proben zu begrenzen. Die künstliche Alterung muss spezifisch im Hinblick auf die erwarteten Effekte neu definiert werden, da die gebräuchlichen Standardtestverfahren (ETAG-004) möglicherweise zu wenig repräsentativ sind.
- D) Vergleichende Versuche an bestehenden Bauten unterschiedlicher Alterungszustände (inkl. geografischen Orientierungen)
 - a. Hagelversuche
 - b. Materialversuche (Charakterisierung der Systemkomponenten) gemäss C)
- E) Evtl. künstliche Alterung von WDVS (Grossversuche) für die Validierung des Ansatzes mit kleinen Proben

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die in Kapitel 1.3 formulierte Zielsetzung dieser Arbeit war den Stand des Wissens und der Erfahrungen in einer Literaturstudie ergänzt durch Interviews mit Fachexperten betreffend der Alterung von Gebäudehüllen, insbesondere von Wärmedämmverbundsystemen, und deren Auswirkung auf den Hagelwiderstand zusammenzufassen, zu vergleichen und zu bewerten. Die Literaturstudie und die Befragung von Fachexperten deuten darauf hin, dass eine Alterung von Komponenten der WDVS nicht ausgeschlossen werden kann. Die spärlichen Hinweise auf ein möglicher Alterungseffekt führen jedoch nicht auf wissenschaftlich verifizierte Fakten, welche in wissenschaftlichen Publikationen dokumentiert sind. Daher kann auch nach dieser Studie keine schlüssige Antwort gegeben werden, auf welche Art und wie weit diese lediglich vermutete Alterung einen negativen Einfluss auf den Hagelwiderstand haben könnte. Im Gegensatz zu den Kunststoffelementen für Oberlichter und Doppelstegplatten aus z. B. PC oder ETFE, wo die Alterung und deren Auswirkung auf den Hagelschlag untersucht wurde, kommen wir zum Schluss, dass diese Fragestellung für Verputze und Wärmedämmverbundsysteme in der Literatur noch nicht behandelt wurde. Dass nur sehr wenig bekannt ist über das Alterungsverhalten von Verputzsystemen hat auch eine kürzlich erschienene Publikation von Franzoni et al. [48] ergeben.

In der Literaturstudie wurden einige wertvolle Publikationen zur Alterung von Aussenwänden unter natürlicher und künstlicher Bewitterung gefunden. Typische Langzeitschäden an Fassaden, wurden in mehreren Feldstudien dokumentiert, klassiert und ausgewertet. Auch einige Veröffentlichungen von Studien zum Hagelschlagwiderstand von Gebäudehüllen sind zu finden. Wissenschaftlich gesicherte Hinweise auf Alterungsmechanismen struktureller oder materialtechnischer Art, welche unbemerkt im Innern der Aussenschichten einer verputzten Wand ablaufen könnten, gibt es jedoch nur sehr wenige. Hingegen bekannt und gut untersucht sind Alterungseffekte durch UV-Strahlung bei diversen Kunststoffprodukten: Es kommt zur Versprödung und Veränderungen der optischen Eigenschaften.

Erfahrungen von Schadenfall-Experten zu Langzeitschäden an verputzten Aussenwänden zeigen ein relativ klares Bild: Während der Einsatzdauer kann es durch Feuchteinfluss insbesondere durch den Frost-Tau- und den Wärmeschock-Zyklus zu ungewünschter Blasenbildung, Rissen und Abplatzungen der Deckschichten kommen. Eine ständige zu hohe Feuchtigkeitsbelastung kann insbesondere bei Wärmedämmverputzsystemen zu ungewünschtem Algen- und Pilzbefall führen. Diese gut sichtbaren Alterungssymptome gelten primär als ästhetische Mängel und haben auch ohne Hagelereignis früher oder später Unterhalts-, Reparatur- oder sogar Sanierungsarbeiten zur Folge. Es gibt keine gesicherten praktischen Hinweise die andere Alterungsphänomene in Fassaden vermuten liessen. Es ist hingegen anzunehmen, dass kleinere noch unsichtbare Hagelschäden (Matrix-Risse, Ablösung von Füllstoff und/oder Faser) zu späteren Schäden führen können.

Veränderungen der Struktur der Aussenschichten einer Fassade, wie Risse, Blasen, Abblätterungen bis zu Abplatzungen ganzer Stücke sind nicht selten. Sie sind meist auf die natürliche Bewitterung oder zu hohe Feuchtigkeit aus dem Untergrund zurückzuführen. Solche beschädigte Stellen sind vorerst mal nur ein ästhetisches Problem. Kommt es dann zu einem Hagelereignis bilden sie aber auch exponierte Schwachstellen, welche dann durch den Hagelschlag noch verstärkt werden können. Es ist denkbar, dass diese Zusatzbelastung zu einer funktionellen Störung der Fassade führt, welche eine unmittelbare Reparatur erfordert, um weitere Folgeschäden zu vermeiden.

Es bleibt die Frage, wieweit sich die in einem Impact wie dem Hagelschlag relevanten Materialeigenschaften, wie Elastizität, Duktilität, Dichte und Festigkeit der diversen Materialschichten im Verbund über die Jahre verändern. So müssen zuerst solche Veränderungen untersucht, respektive nachgewiesen werden und danach beurteilt werden, ob diese einen signifikanten Einfluss auf den Hagelwiderstand haben und somit relevant sind. Hinweise gibt es, dass es bei Epoxy-Klebschichten und bei anorganischen Verputzen zu einer Nachvernetzung kommt. Inwieweit dies gepaart ist mit einer Versprödung/Reduktion der Duktilität oder/und einer Reduktion der Nachgiebigkeit/Versteifung bleibt noch zu klären. Quantitative Resultate zu einer alterungsbedingten Versprödung gibt es zwar für gängige Polymerwerkstoffe, jedoch nicht für Materialien, welche in verputzten Aussenwänden eingesetzt werden und vor allem nicht für ihre spezifische Kombination.

Deswegen sollten die weiteren materialwissenschaftlichen Forschungsanstrengungen in diese Richtung gehen, um eine definitive Beantwortung der Frage zu ermöglichen, ob es eine alterungsbedingte Abminderung des Hagelwiderstandes bei WDVS gibt. Ein mögliches Vorgehen in Form von Forschungsprojekt wurde in Kapitel 5.4 skizziert.

REFERENZVERZEICHNIS

1. Beobachter-Ratgeber, *Lebensdauer und Pflege einzelner Bauteile*. 2016.
2. Kempton, J., a. Chap, K., and A. Alani, *Surveyor Element Lifetime Predictions and the Anchoring and Adjustment Heuristic* in *AR2002*. 2002. p. 145 - 154.
3. Moser, K., *Towards the Practical Evaluation of Service Life - Illustrative Application of the Probabilistic Approach*, in *DBMC-8th*. 1999.
4. Rottstegge, J., C. Han, and W. Hergeth, *Compatibility Investigations on Polymer-Fiber-Reinforced Cements Modified with Polymer Latexes*. *Macromolecular materials and engineering*, 2006. **291**(4): p. 345-356.
5. Flüeler, P.H., *Long-term performance of ETFE-buildings and hail impact resistance*, in *SKZ-Tagung*. 2010: Dessau.
6. Flüeler, P.H. and D. Aller, *Long-term expectations and experiences of ETFE-membrane constructions* in *DBMX 12th*. 2011: Porto, Portugal. p. 1029 - 1037.
7. Daniotti, B., R. Paolini, and F. Re Cecconi, *Effects of Ageing and Moisture on Thermal Performance of ETICS cladding*. *Durability of building materials and components*, ed. V. De Freitas and D. JMPQ. Vol. 3. 2013: Springer.
8. Schmuki, D. *Sonntagsstory: Mit Raketen gegen Hagel*. 2016 [cited 2016 26.01.2017]; Available from: <http://m.srf.ch/meteo/meteo-news/sonntagsstory-mit-raketen-gegen-hagel>
9. MeteoSchweiz. *Extremwertanalyse (Version 2016)*. 2016; Available from: www.meteoschweiz.ch/klima-extreme.
10. Thams, J.C., *Die Ergebnisse des Grossversuches III zur Bekämpfung des Hagels im Tessin in den Jahren 1957-1963 : Schlussbericht*. *Wissenschaftliche Mitteilungen / Eidgenössische Kommission zum Studium der Hagelbildung und der Hagelabwehr*, ed. A. Aufdermaur and H. Schweiz. Eidgenössische Kommission zum Studium der Hagelbildung und der. Vol. Nr. 53. 1966: Zürich : ETH. 32 S.
11. VKF, *Schweizerisches Hagelschutzregister*. 2017, VKF: <http://vkf.ch/kgvonline/media/VKF/Downloads/Hagelschutzregister.pdf>. p. 2.
12. Kant. Gebäudeversicherungen, P., *Geschäftsbericht 2015*. 2015.
13. Glatfelder, *Risk communiqué Hail Damage Prevention Guide*. 2013, Public Practice.
14. Fennig, D., *Forecast Report on United States Hail Loss Claims*. 2016.
15. Kant-Gebäudeversicherungen, *Ereignisanalyse Hagel 2011*. 2015.
16. Flüeler, P.H., *Switzerland: Public Register for Hail Impact Resistant Building Materials Created*. 2009.
17. Kunz, H., *Probleme mit verputzter Aussenwärmedämmung = Problèmes liés à l'isolation thermique extérieure enduite*. *Baumängel, Behebung und Vorbeugung*. Vol. 12. 1984: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 82 S.
18. Walker, R. and S. Pavía, *Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings*. *Building and environment*, 2015. **94**(P1): p. 155-165.
19. Pasztory, Z., et al., *Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls*. *Energy and buildings*, 2012. **49**: p. 142-147.
20. Handler, S., A. Korjenic, and T. Bednar, *Einfluss von Wärmedämmverbundsystemen auf das Sommerverhalten von Gebäuden*. *Bauphysik*, 2011. **33**(4): p. 225-233.
21. Fülle, C. and N. Leopold, *WDVS im Holzbau - Optimierter Nachweis des dauerhaften Witterungsschutzes durch Kombination von Messungen im Wandprüfstand und hygrothermischen Simulationen*. *Bauphysik*, 2016. **38**(3): p. 135-146.
22. Bannwitz, R., *Schadensprävention Fassade*. 2017.
23. Sto_AG, *Produktprospekt für StoElasto*. 2017.
24. Sto_AG, *stoRend Render Systems*. 2016.
25. Bleuzen, M., *Much adhesion with low amounts: Combining technologies for good cost performance balance*. *European Coatings Journal*, 2009(12): p. 98 - 101.
26. Bleuzen, M., *A longer life for masonry paints*. *European Coatings Journal*, 2011(11): p. 34 - 37.

27. Christopher, K., et al., *Synthesis and characterization of polystyrene-acrylate/polysiloxane (PSA/PSi) core shell polymers and evaluation of their properties for high durable exterior coatings*. Progress in organic coatings, 2014. **77**(6): p. 1063-1068.
28. Overbeek, A., *Studies for a new generation of acrylic binders for exterior wood coatings*. Macromolecular symposia, 2002. **187**: p. 177-186.
29. Sulakatko, V., I. Lill, and E. Liisma, *Analysis of On-site Construction Processes for Effective External Thermal Insulation Composite System (ETICS) Installation*. Procedia Econ. Financ., 2015. **21**: p. 297-305.
30. Sulakatko, V., I. Lill, and E. Witt, *Methodological Framework to Assess the Significance of External Thermal Insulation Composite System (ETICS) on-site Activities*. Energy Procedia, 2016. **96**: p. 446-454.
31. Künzel, H., *Funktionsweise und normative Behandlung von zweilagigen Aussenputzen*. Bauphysik, 2009. **31**(5): p. 326-331.
32. Künzel, H.S., K.P., *Neufassung von DIN 4108-3 zur rechnerischen Feuchteschutzbeurteilung*. 2015.
33. Kolaitis, D.I., et al., *Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings*. Energy and Buildings, 2013. **64**: p. 123-131.
34. Dylewski, R. and J. Adamczyk, *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*. Building and Environment, 2011. **46**(12): p. 2615-2623.
35. SIA, *Verputz- und Trockenbauarbeiten = Plâtrerie, crépissage, construction à sec = Opere da gessatore - Intonaci e costruzione a secco*. Norm / SIA Bauwesen, ed. A.-V. Schweizerischer Ingenieur- und. Vol. SIA 242:2012. 2012: Zürich : SIA. 28 S.
36. SIA, *Verputzte Aussenwärmedämmung : Leistung und Ausmass : verlängerte Vernehmlassung*. Ausg. 1998 ed. Empfehlung / SIA, ed. A.-V. Schweizerischer Ingenieur- und. Vol. V 243/2, Ed. 1998. 1998: Zürich : SIA. 12 S.
37. VKF, *Prüfbestimmungen zur Ermittlung des Hagelwiderstandes - Allgemeiner Teil A*. 2014.
38. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 00b - Allgemeiner Teil B*. 2010.
39. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 08 - Putz auf Aussendämmung*. 2014.
40. VKF, *VKF Prüfbestimmung Nr. 21 - Putz auf festem Untergrund*. 2014.
41. Deutsche_Norm, *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel*. 2010.
42. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Aussen- und Innenputzen - Teil 1: Aussenputze*. 2016.
43. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil2: Innenputze*, in EN 13814-2(2016). 2016.
44. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Aussenputze*. 2014.
45. Deutsche_Norm, *Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Aussenputzen - Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze*. 2015.
46. Deutsche_Norm, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe*. 2015, DIN.
47. Deutsche_Norm, *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) aus expandiertem Polystyrol - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13499:2003*. 2003.
48. Franzoni, E., et al., *A new prefabricated external thermal insulation composite board with ceramic finishing for buildings retrofitting*. Materials and Structures, 2016. **49**(4): p. 1527-1542.
49. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for buildings - External thermal insulation composite systems (ETICS) based on expanded polystyrene - Specification; German version EN 13499:2003*. 2003.
50. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the tensile bond strength of the adhesive and of the base coat to the thermal insulation material; German version EN 13494:2002*. 2002.
51. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the pull-off resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS) (foam block test); German version EN 13495:2002*. 2002.

52. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the mechanical properties of glass fibre meshes as reinforcement for External Thermal Insulation Composite Systems with renders (ETICS); German version EN 13496:2013*. 2013.
53. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to impact of external thermal insulation composite systems (ETICS); German version EN 13497:2002*. 2002.
54. Deutsche_Norm, *Thermal insulation products for building applications - Determination of the resistance to penetration of external thermal insulation composite systems (ETICS); German version EN 13498:2002*. 2002.
55. EN, *Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for roof waterproofing – Determination of hail resistance*. 2011.
56. Deutsche_Norm, *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - Products of high and medium thermal resistance, German version EN 12667:2001* 2001.
57. ASTM, *Standard Test Method for Hail Impact resistance of Aerospace Transport Enclosure*. 2005.
58. ASTM, *Standard Practice for Determining Resistance of Solar Collector Covers to Hail by Impact With Propelled Ice Balls* 2015.
59. ASTM, *Standard Test Method for Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls*. 2015.
60. ANSI, *Test Standard for Impact Resistance Testing of Rigid Roofing Materials by Impacting with Freezer Ice Balls*. 2011.
61. Approvals, F., *Approval Standard for Class 1 Exterior Wall Systems*. 2005.
62. Crenshaw, V. and J.D. Koontz, *Simulated Hail Damage and Impact Resistance Test Procedures for Roof Coverings and Membranes*. 2000.
63. Crenshaw, V., *Major Building Code Requirements for Impact Resistance of Low-Slope-Roofing Systems - A Review and Comparison of Test Procedures*. 2008.
64. Kirschner, A.V. and H. Harmuth, *Untersuchung des Haftversagens von Außenputzen*.
65. EOTA, *Determination of impact resistance of panels and panel assemblies*. 2003, European Organisation for Technical Assessment.
66. EOTA, *Determination of the resistance to delamination*. 2004.
67. EOTA, *Determination of the resistance to dynamic indentation*. 1999.
68. EOTA, *Exposure procedure for artificial weathering*. 2004.
69. EOTA, *Exposure procedure for accelerated ageing by heat*. 2004.
70. EOTA, *Exposure procedure for accelerated ageing of glass reinforced unsaturated polyester resins by two-hour water boil*. 2004.
71. EOTA, *Test method for elastomeric insulating elements – Determination of creep*. 2011.
72. EOTA, *Test methods for foam adhesives for External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*. 2014.
73. ETAG, *Leitlinie für die europäische technische Zulassung - Aussenseitige Wärmedämmverbundsysteme mit Putzschicht (External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering)*. 2013.
74. Liisma, E., *Defect analysis of renovated facade walls with etics solutions in cold climate conditions - CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future*. 2016. 174-181.
75. ISO, *Performance standards in building – presentation of performance levels of façades made of same-source components*. 1986.
76. ISO, *Facades - Impact Resistance Tests*.
77. ISO, *ES ISO 7892 (2012): Vertical building elements - impact resistance tests - impact bodies and general test procedures*. 2012.
78. SMGV, *Merkblatt Renovation und Aufdopplung von verputzten Aussenwärmedämmungen*, G.T.K. Gipsergewerbe, Editor. 2016.
79. Cemex_Mortars, *Properties of Rendering Mortar*. 2016.
80. Neuer, F.X., *Nachhaltige Fassadensanierung*. Technikforum / Farben, Lacke, Bauschutz, 2013.
81. Bussell, S., *Green minerals solution*. Polymers paint colour journal, 2009. **199**(4543): p. 22-25.

82. Pashkevich, S., et al., *Pore Structure Formation of Modified Cement Systems Hardening over the Temperature Range from +22°C to -10°C Architecture, Building Materials and Engineering Management IV*. Vol. 584-586. 2014. 1659-1664.
83. Silva, C.M., I. Flores-Colen, and S. Gaspar, *Numerical analysis of renders' adhesion using an interface model*. Construction and Building Materials, 2013. **38**: p. 292-305.
84. DBMC_8th. *Durability of Building Materials and Components 8th*. in *Durability of Building Materials and Components 8th*. 1999. Vancouver, Canada: National Research Council Canada.
85. Kunz, H., *Problematik und Bedeutung der Mängel im Bauwesen*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung, 1981. **1**.
86. Norvaišiene, R., et al., *The Changes of Moisture Absorption Properties during the Service Life of External Thermal Insulation Composite System*. Medžiagotyra, 2013. **19**(1): p. 103-107.
87. Künzel, H. and D. Zirkelbach, *Influence of rain water leakage on the hygrothermal performance of exterior insulation systems*, in *8th Nordic Building Physics Symposium*. 2008: Copenhagen.
88. Vašková, A., et al., *Fallstudie zum Trocknungsverhalten von Außenwandkonstruktionen aus Porenbeton mit Wärmedämmverbundsystem*. Bauphysik, 2016. **38**(6): p. 378-388.
89. Stastnik, S., et al. *Computational Evaluation of the Effect of the Outer Layer Thickness on Moisture Saturation in the ETICS Insulations*. in *ICNAAM 2011: International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics*. 2011.
90. Zirkelbach, D., A. Holm, and H. Künzel, *Influence of temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS*, in *10th DMBC int. conf.* 2012: Lyon.
91. Künzel, H. and R. Wieleba, *Specific building-physical properties of ETICS on mineral-wool basis*, in *4th congresso portugues de le argamassas e ETICS*. 2012: Coimbra.
92. Sell, J. and B. Haller, *Wetterbeanspruchung und Wasserdampfdiffusion = Sollicitation aux intempéries et diffusion de la vapeur d'eau*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. Band 3. 1981: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 73 S.
93. Preisig, H., G. Lanfranconi, and B. Haller, *Wasserinfiltration im Hochbau = Infiltration d'eau dans le bâtiment*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung, 1982. **6**: p. 73 S.
94. Büchli, R. and P. Raschle, *Algen und Pilze an Fassaden : Ursachen und Vermeidung*. 3., durchgesehene Aufl. ed, ed. R. Büchli. 2015: Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag. 109 S.
95. von Werder, J., H. Venzmer, and R. Černý, *Application of fluorometric and numerical analysis for assessing the algal resistance of external thermal insulation composite systems*. Journal of building physics, 2015. **38**(4): p. 290-316.
96. Kučeriková, V., et al., *Analysis of the Degradation of External Plasters in the Buildings with ETICS - EnviBUILD 2014*. Vol. 1041. 2014. 15-18.
97. Flores Colen, I., J. de Brito, and V. de Freitas, *Stains in facades' rendering – Diagnosis and maintenance techniques' classification*. Construction & building materials, 2008. **22**(3): p. 211-221.
98. Gaspar, P. and J. de Brito, *Mapping defect sensitivity in external mortar renders*. Construction & building materials, 2005. **19**(8): p. 571-578.
99. Freitas, S.S.D., S. de Freitas, and V. de Freitas, *Cracks on ETICS along thermal insulation joints: case study and a pathology catalogue*. Structural Survey, 2016. **34**(1): p. 57-72.
100. Porubsky, R., F. Theiler, and H. Kunz, *Schäden an Fassaden = Désordres dans les façades*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. Behebung und Vorbeugung, Band 2. 1981: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 71 S.
101. Liu, Y., et al., *Bond performance of thermal insulation concrete under freeze-thaw cycles*. Construction & building materials, 2016. **104**: p. 116-125.
102. Kunz, H., *Verputzschäden = Dégâts aux crépis*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 14. 1985: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 73 S.
103. Kunz, H., *Risse im Mauerwerk und ihre Auswirkungen = Fissures dans la maçonnerie et leurs effets*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 15. 1985: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 65 S.
104. Amaro, B., et al., *Statistical survey of the pathology, diagnosis and rehabilitation of ETICS in walls*. Journal of civil engineering and management, 2014. **20**(4): p. 511-526.
105. Barreira, E. and V. de Freitas, *Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*. Building and environment, 2013. **63**: p. 31-39.

106. Gaspar, P. and J. de Brito, *Quantifying environmental effects on cement-rendered facades: A comparison between different degradation indicators*. Building and environment, 2008. **43**(11): p. 1818-1828.
107. Stazi, F., C. Di Perna, and P. Munafò, *Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations*. Energy and buildings, 2009. **41**(7): p. 721-731.
108. D'Orazio, M., et al., *Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks*. Building and environment, 2014. **77**: p. 20-28.
109. Maggi, P.N. and e. al, *Experimental Program to Evaluate Building Elements Service Life: First Results on Brickwork*, in *DBMC-8th*. 1999.
110. Wonneberger, B. and S.A. Bortz, *Comparing Laboratory and Field Durability Testing of Stone*, in *DBMC-8th*. 1999.
111. Bollmann, U., et al., *Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions*. Environmental science & technology, 2016. **50**(8): p. 4289-4295.
112. Liisma, E., G. Löhmus, and L.-M. Raado, *The Effect of Temperature and Humidity on the Permanence of External Thermal Insulation Composite Systems*. Procedia Engineering, 2015. **108**: p. 340-348.
113. Vallee, F., M. Rubaud, and e. al, *Investigation on the Behaviour of Polymer-cement Composites in ETICS Renderings*, in *DBMC-8th*. 1999.
114. ISO, *ISO-6241: Environmental Degradation Agents*.
115. Carbotech_AG, *Langzeitverhalten von EPS-Dämmstoffen*. 2004.
116. Venta, G.J., J.F. Porter, and M. Pierson, *Composite Scrim Reinforced-Cementious Boards: Accelerated Aging and Performance Prediction*, in *DBMC-8th*. 1999.
117. Knotek, V., *Flexible binders, their degradation and impact on cement substrate | Pružné tmely, jejich degradace a vliv na cementový podklad*. Korozie a ochrana materiálu, 2015. **59**(1): p. 24-29.
118. Baier, A. *Verstärken von Gebäuden und Infrastruktur mit Klebetechnologie*. in *SVMT Tag der Werkstoffe*. 2017. Zürich: SVMT.
119. Reyer, E., *Expansion joints in external thermal insulation composite systems with finishing cover made out of clinker-furring bricks - Arrangement at building coigns and plains | Dehnungsfugen in WDVS mit Klinker-Riemchen zum Erfordernis im Bereich der Gebäude-Ecken und in den Feldern*. Bautechnik, 2003. **80**(11): p. 796-814.
120. Reyer, E., *New results on the capability of External Thermal Insulation Composite Systems to rehabilitate Large-Panel-Structures | Neue Ergebnisse zur Eignung von Wärmedämm-Verbundsystemen bei der Sanierung von Großtafelbauten*. Bautechnik, 1997. **74**(1): p. 33-41.
121. Fouad, H.A., *New numerical modelling of external thermal insulation composite systems to judge their capability to rehabilitate Large-Panel-Structures | Numerisches Modell für Wärmedämm-Verbundsysteme Beurteilung ihrer Fugenüberbrückungsfähigkeit bei der Sanierung von Großtafelbauten*. Bautechnik, 1997. **74**(8): p. 505-516.
122. Xiong, H., *Analysis on temperature field of external thermal insulation composite systems with colorful steel plate*. 建筑材料学报, 2016. **19**(4): p. 688-693.
123. Xiong, H., et al., *Experimental Study on Hygrothermal Deformation of External Thermal Insulation Cladding Systems with Glazed Hollow Bead*. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. **2016**: p. 1-14.
124. Kirschner, A.V. and H. Harmuth, *Mechanisms to reduce cracking in interior plasters attached to cement bonded permanent shuttering panels*. Construction and Building Materials, 2008. **22**(2): p. 99-105.
125. Nilica, R. and H. Harmuth, *Mechanical and fracture mechanical characterization of building materials used for external thermal insulation composite systems*. Cement and concrete research, 2005. **35**(8): p. 1641-1645.
126. Bohner, E. and K. Ödeen, *Durability of autoclaved aerated concrete*, in *DBMC-8th*. 1999.
127. Zurbriggen, R. and M. Herwegh, *Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling*. Materials and Structures, 2016. **49**(5): p. 1917-1933.
128. Djuric, Z., et al., *Modelling of the saturation behaviour of hardened*

cement paste during freezing and thawing action, in *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems – Strauss, Frangopol & Bergmeister (Eds)*

© 2013 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62126-7. 2013.

129. Blaich, J., *Kriechen, Schwinden, Quellen im Hochbau = Fluage, retrait, gonflement dans le bâtiment*. Baumängel, Behebung und Vorbeugung. Vol. 5. 1982: Dietikon : Baufachverlag Zürich. 83 S.
130. Yin, X., et al., *Weatherability studies on external insulation thermal system of expanded polystyrene board, polystyrene granule and polyurethane foam*. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2010. **25**(6): p. 1027-1032.
131. Barreira, E., et al., *Drying Kinetics of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) - Diffusion in Solids and Liquids VII*. Vol. 326-328. 2012. 662-667.
132. Barreira, E. and V. de Freitas, *External Thermal Insulation Composite Systems: Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. **2014**: p. 1-16.
133. Barreira, E., et al., *Exterior condensations on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon*. Journal of building performance simulation, 2013. **6**(5): p. 337-345.
134. Delgado, J.M.P.Q., et al., *Probabilistic Risk Assessment Methodology of Exterior Surfaces Defacement Caused by Algae Growth*. Journal of construction engineering and management, 2014. **140**(12): p. 05014012.
135. Norvaišiene, R., *Durability tests on painted facade rendering by accelerated ageing*. Medžiagotyra, 2010. **16**(1): p. 80-85.
136. Norvaišiene, R., et al., *Impact of acidic precipitation to ageing of painted facades' rendering*. Building and environment, 2007. **42**(1): p. 254-262.
137. Schulz, U. and e. al, *Service Life Prediction of Polymeric Building Materials Using the "Acid Dew and Fog Test"*, in *DBMC-8th*. 1999.
138. Tjandraatmadja, G.F. and e. al, *The effects of Ultraviolet Radiation on Polycarbonate Glazing*, in *DBMC-8th*. 1999.
139. Tiganis, B.E. and L.S. Burn, *The Effect of Heat Aging on Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Blends*, in *DBMC-8th*. 1999.
140. Sivaramakrishnan, C.N., *Binders for pigment printing*. Colourage, 2006. **53**(11): p. 84-86.
141. Drevelle, C., et al., *Influence of ammonium polyphosphate on the mechanism of thermal degradation of an acrylic binder resin*. Journal of applied polymer science, 2004. **94**(2): p. 717-729.
142. Gerst, M., *Zero-emission acrylic thermoset technology - 9th Annual Automotive Composites Conference and Exhibition, ACCE 2009*. 2009. 522-530.
143. Sperry, P.R. and A. Mercurio, *Exterior Durability of TiO2 Pigmented Acrylic Coatings*. American-Chemical-Society, 1970. **30**(1): p. 400 - 417.
144. Gričiūtė, G., G. Gričiute, and R. Bliudzius, *Study on the microstructure and water absorption changes of exterior thin-layer polymer renders during natural and artificial ageing*. Medžiagotyra, 2015. **21**(1): p. 149-154.
145. Association, I.R.a.C., *Impact Resistance of EWI Systems*. 2011.
146. Burt, R., *Test report Elastikote 1000 according to impact resistance of prepared roof covering materials (UL 2218)*. 2010.
147. Drdáčký, M., et al., *Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces*. Materials and Structures, 2015. **48**(6): p. 1947-1963.
148. Flores-Colen, I., J.d. Brito, and V.d. Freitas, *Expected render performance assessment based on impact resistance in situ determination*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(9): p. 2997-3004.
149. Simões, N., et al., *Thermographic inspection of external thermal insulation systems with mechanical fixing - Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVII*. Vol. 9485. 2015. 94851A.
150. Ximenes, S., et al., *Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls*. Materials and Structures, 2015. **48**(7): p. 2235-2249.
151. Antošová, N., K. Minarovičová, and D. Kubečková, *Risk Assessment of Biocorrosion Recurrence of ETICS - Contemporary Problems in Architecture and Construction*. Vol. 1020. 2014. 631-636.
152. Lair, J. and J.F. Le Teno, *Durability Assessment of Building Systems*, in *DBMC-8th*. 1999.

153. Bergmann, T., S. Heimbs, and M. Maier, *Mechanical properties and energy absorption capability of woven fabric composites under $\pm 45^\circ$ off-axis tension*. Composite Structures, 2015. **125**(2015): p. 362-373.
154. Cantwell, W.J. and J. Morton, *The impact resistance of composite materials - a review*. Composites, 1991. **22**(5): p. 347-362.
155. Dolati, S., A. Fereidoon, and A.R. Sabet, *Experimental investigation into glass fiber/epoxy composite laminates subjected to single and repeated high-velocity impacts of ice*. Iranian Polymer Journal (English Edition), 2014. **23**(6): p. 477-486.
156. Elder, D.J., et al., *Review of delamination predictive methods for low speed impact of composite laminates*. Composite Structures, 2004. **66**(1-4): p. 677-683.
157. Keiller, A.P., *Impact Resistance of External Thermal Insulation Systems*. 1980.
158. Naji, B. and D. Albury, *Characterization of Impact in Fibre-Reinforced Cement Corrugates*, in *DBMC-8th*. 1999.
159. Yamasaki, R.S., *Effect of Weathering at Different Exposure Angles on the Tensile Impact Resistance of Thermoplastics*. Journal of testing and evaluation, 1982. **10**(4): p. 156-161.
160. Bennett, B.J., J. Staebler, and S.C. Stoll, *Hail impact testing of Masonite Shingles*. Forensic Eng. , 2015. **2015**: p. 242 - 253.
161. Petit, J.-Y. and E. Wirquin, *Characterising impact resistance of latex-cement mortars for external insulation systems*. Advances in Cement Research, 2014. **26**(1): p. 21-28.
162. Heimbs, S., S. Heller, and P. Middendorf, *Simulation of Low Velocity Impact on Composite Plates with Compressive Preload*. Material II - Composites, 2008: p. D-II-11 - 24.
163. Flüeler, P.H., *ETFE-membrane structures - and what's about hail impact resistance?*, in *Intl. Convention & Trade show, RCI-Symposium 2007*: Orlando, FL, USA. p. 31 - 37.
164. Flüeler, P.H., W. Kübler, and A. Hohl, *Hail Impact Resistant ETFE Roof Lights for the New Elephant Park of Zoo Zurich*, in *ICBEST 2014*. 2014: Aachen, Germany.
165. Flüeler, P.H., et al., *Hail Impact resistance of Building Materials Testing, Evaluation and Classification*, in *11th CDBM*. 2008: Istanbul.
166. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *Zum Hagelschlagverhalten von Elementen der Gebäudehülle, insbesondere von solchen aus Kunststoffen*. 1987, Empa Abt. 114.
167. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *Hagelschlagversuche an Baumaterialien an der Empa*. 1988.
168. Koontz, J.D. *Hail Impact Testing of EPDM Roofs Assemblies*. in *RCI*. 2009. dallas, Texas, USA.
169. Herzog, R.F., et al. *Ice Ball Impact Testing of Siding*. in *RCI*. 2012.
170. Kashiwagi, D., et al., *Hail Study on a 15 Year Old Sprayed Polyurethane Foam Roofing System*. CIBW117.com, 2016: p. 106 - 116.
171. Koontz, J.D. *What are the Effects of Hail on Residential Roofing Products?* 1991.
172. Flüeler, P.H. and F. Rupp, *The hail resistance of plastic components of the building shell*. International Journal of Roofing Technology, 1990. **2**: p. 88 - 95.
173. Jordi, M., *Protokoll des Erfahrungsaustausches unter den Prüstellen*, in *VKF-Erfahrungsaustausch*. 2016, VKF.
174. Präver, *Synthesebericht Elementarschutzregister Hagel*. 2007, Präventionsstiftung der Kant. Gebäudeversicherungen.
175. Kant-Gebäudeversicherungen, *Ereignisanalyse Hagel 2009*. 2012.
176. Barmet, F., *CAS Gebäudeschutz gegen Naturgefahren*, in *Architektur, Holz und Bau*. 2015, Berner Fachhochschule.
177. Schweiz.-Versicherungsverband, *Richtlinien zur Regulierung von Hagelschäden an Gebäuden*. 2015.
178. Flüeler, P.H., W. Kübler, and A. Hohl. *Hail Protected ETFE-Roof Lights for the new Elephant Park Building of Zoo Zurich*. in *XIII DBMC*. 2014.
179. Flüeler, P.H. and D. Aller, *Long-Term Expectations and Experiences of ETFE-Membrane Constructions*. DBMC, 2011. **12**.
180. Eberhard, L., *S13: Langzeitbewitterte EDVS*. 2015, University of Bern: Bern.
181. Bannwitz, R., *Schadensprävention Fassade*, Weiterbildungsseminar, Editor. 2017, sto AG: Niederglatt.
182. Richner, P., *Baustoffkunde II - Polymere Baustoffe*, S. Architektur, Editor. 2011, ETH Zürich

183. Merz, H. and H. Kramer, *Wie lange hält ein Kunststoffbauteil?*, in *Seminar für Anwender*. 2002, Empa: Dübendorf.
184. Sulakatko, V., et al. *Towards nearly zero-energy buildings through analyzing reasons foer degradation of facades*. in *Procedia Econ Finance* 2014.
185. Michel, S., *Environmental and frequency effects on fatigue crack growth rate and paths in aluminium alloys*. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 2005. **28**: p. 205-219.
186. Brändli, C. *Trends und aktuelle Themen in der Klebstoffforschung*. in *SVMT Tag der Werkstoffe*. 2017. Zürich: SVMT.