

FORSCHUNGSPROJEKT FEUCHTFLECKEN AUF NATURSTEIN-BODENBELÄGEN IM AUSSENBEREICH - KURZBERICHT

Auftraggeber: Natursteinverband Schweiz, Bern

Verfasser: Materialtechnik am Bau AG

Objekt: Terrassenanlage Hunzenschwil

Baustoffe: Gneis-, Kalkstein-, und Granitplatten auf diversen
Bettungen

20.11.2019

Inhaltsverzeichnis

Auftragsbeschreibung	1
Problemstellung	1
Ziel der Untersuchung	1
Durchgeführte Untersuchungen	2
Bemerkung	2
Aufbau der Versuchsanlage	3
Beobachtete Feuchtflecken und Verfärbungen	5
Feuchtflecken und Verfärbungen ohne externe Einflüsse	5
Einfluss von exogenen Salzen	6
Einfluss der Beschattung (Algen, Biofilme)	6
Systeme zur Verhinderung von Feuchtflecken	8
Vor der Behandlung mit Salzen	8
Nach der Behandlung mit Salzen	8
Sensormessungen	10
Zusammenhang zwischen Feuchtflecken und Klima (Sensormessungen)	11
Reinigungsversuche	14
Laboruntersuchungen	16
Feuchtfleckenpotential	19
Ursache der beobachteten Flecken	21
Wassertransport in Naturstein-Bodenbelägen im Aussenbereich	23
Fazit	25
Ausblick	25

Auftragsbeschreibung

Problemstellung

Der Einsatz von Natursteinplattenbelägen im Aussenbereich, auf Terrassen und Sitzplätzen, hat in den letzten 25 Jahren stetig zugenommen. Neben der technischen Funktion als robuste, wetterfeste Nutzfläche, steht Naturstein insbesondere für einen gehobenen Ausbaustandard. Entsprechend hoch sind die Erwartungen bezüglich des Erscheinungsbildes der Oberflächen. Die Erfahrung zeigt, dass Natursteinbeläge im Aussenbereich, je nach Belagsaufbau und Steinsorte, zur Bildung von Feuchtflecken und von Ausblühungen tendieren, vor allem auf Terrassen mit Voll- oder Teilüberdachung. Im konkreten Fall existieren viele Erklärungsversuche, aber eine sichere Identifikation der Ursachen ist oftmals schwierig. Viele Unternehmer mussten schon feststellen, dass auch wenn alles nach Norm und Merkblatt ausgeführt wurde, Flecken und Verfärbungen auftreten können. Die hier zusammengefasste Forschungsarbeit hatte zum Ziel, dieser Problematik systematisch auf den Grund zu gehen und Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. zur Reduktion permanenter Feuchtfleckenbildung und damit gekoppelter Erscheinungen aufzuzeigen. Das Projekt wurde vom Naturstein-Verband Schweiz (NVS) lanciert und über einen Zeitraum von fünf Jahren (2014 - 2019) angelegt. Mitträger des Forschungsprojektes sind der Schweizerische Plattenverband (SPV), Jardinsuisse und der Deutsche Naturwerkstein-Verband (DNV).

Ziel der Untersuchung

Der NVS will mit diesem Forschungsprojekt die Ursache der Feuchtflecken bestimmen und die Effizienz von existierenden Verlegetechniken bezüglich Feuchtfleckenvermeidung prüfen. Aufgrund der gewonnenen Daten sollen zusätzlich neue Lösungen vorgeschlagen werden. Konkrete Ziele des Forschungsprojektes Naturstein-Bodenbeläge sind:

- Formulierung verbindlicher, auf den Markt ausgerichteter Angaben zur sicheren Verlegung von Naturstein im Aussenbereich (für lose und gebundene Beläge)
- Erarbeitung von Kenngrössen zur Einschätzung des Risikos bei der Steinwahl (sicher / unsicher)
- Formulierung technischer Vorgaben für Hilfsmittel (Beschichtungen, Drainagematten, Splittbehandlungen, Bindemittel)
- Erarbeitung eines neuen NVS-Merkblattes *Aussenbeläge auf Dachterrassen, Balkonen und Gartensitzplätzen* für den Ordner *Bauen mit Naturstein*

Durchgeführte Untersuchungen

Zur Untersuchung der Fleckenbildung und Fleckendynamik, wurde eine Terrassenanlage mit den zurzeit üblichen Verlegetechniken in Hunzenschwil (Aargau) gebaut. Die Analysen erfolgten vor Ort sowie im Labor der Firma Materialtechnik am Bau AG und wurden grundsätzlich in drei Phasen geteilt.

In der ersten Phase (Juni 2014 bis Juni 2016) wurde die Tendenz zur Fleckenentwicklung an typischen, normgerechten Verlegearten untersucht. Die relevanten materialtechnischen Eigenschaften der verlegten Platten und der Bettungen wurden zusätzlich im Labor bestimmt. Die Ursache der entstandenen Flecken wurde diagnostiziert und diente zur Erarbeitung von vier weiteren Verlegearten, welche effizient Feuchtflecken verhindern sollen. Während der zweiten Phase (September 2016 bis September 2018) wurde deren Wirksamkeit untersucht. Gleichzeitig wurde der Einfluss von Salzen und von Beschattung auf die Entstehung von Feuchtflecken untersucht. In der dritten Phase (September 2018 bis September 2019) wurde dann der Einfluss der externen Faktoren (Salze) auf die optimierten Verlegearten geprüft. Des Weiteren wurden Reinigungsversuche mit Hochdruckwasser und besonderen Produkten ausgeführt.

Die Empfindlichkeit von weiteren Natursteinsorten bezüglich Feuchtfleckenbildung wurde im Labor geprüft. Dafür wurden zwei Tests entwickelt: der Farbwechselfersuch und die Bestimmung der Durchsichtigkeitstiefe.

Bemerkung

Im Allgemeinen werden an Natursteinbelägen weiterhin hohe Erwartungen gestellt. Farbveränderungen und Fleckenbildungen werden, auch wenn sie bis zu einem gewissen Grad im Aussenbereich unvermeidlich sind, oft als Beeinträchtigung wahrgenommen. Im konkreten Fall haben Farbveränderungen und Fleckenbildungen neben der hier untersuchten Faktoren häufig noch andere, nicht selten kombinierte Ursachen. Die Ursachen können in den Baustoffen liegen (Rostbildungen), von aussen kommen (Laubflecken, Humusflecken) oder mit der örtlichen Nutzung und Reinigung zusammenhängen (div. Verschmutzungen). Das ein Gestein im beregneten und im überdachten Bereich mit der Zeit unterschiedlich erscheint, liegt in der Natur der Sache. Was als natürliche Erscheinung bzw. Patina akzeptiert wird hängt nicht zuletzt mit dem Verständnis der Käuferschaft zusammen. Neben der Einhaltung der technischen Regeln bleibt die richtige Beratung der Kundschaft die Voraussetzung zur Vermeidung von Reklamationen.

Aufbau der Versuchsanlage

Zur Nachbildung realer Verhältnisse wurde eine Unterkonstruktion aus dichtem Beton mit optimalem Gefälle von 1.5% gebaut. Die mögliche Entstehung von Wasserlachen aufgrund der Überlappung von Abdichtungsbahnen wurde auf dem Feld 1 mit Bauplastik und 2 Gipserratten simuliert. Als typische Bettungstypen wurden Splitt, Splitt mit Drainagematte (vlieskaschiert, 8 mm Stärke) und Sickerlösrtel gewählt (Abbildung 1). Auf jeder Bettung wurden Natursteinplatten mit 1.5% Gefälle verlegt. Drei Natursteinsorten, welche häufig als Bodenbelag im Aussenbereich verwendet werden kamen zum Einsatz. Ein weiteres Kriterium zur Untersuchung des Zusammenhangs mit der Plattentemperatur war die Plattenfarbe. So wurden ein heller Gneis, ein beiger Kalkstein und ein dunkler Granit ausgewählt. In der ersten Phase wurde somit ein heller Iragna-Gneis, ein beiger Dietfurter-Kalkstein und ein dunkler Padang-Granit verwendet. Zur Bestimmung der Fleckendynamik mit und ohne Einfluss der Niederschläge, wurde die hintere Hälfte der Terrasse überdacht und auf drei Seiten abgeschottet.

In 2016 wurden die im Sickerlösrtel verlegten Platten rückgebaut (Feld 3, Abbildung 2), stattdessen wurden vier Verlegearten zur Minimierung von Feuchtflecken eingerichtet. Beim Umbau wurde auf Feld 3 als heller Gneis ein Cresciano, als Kalkstein wieder ein Dietfurter und als dunkler Granit ein Padang Light Grey genommen. Bei diesen Verlegearten wurde eine Kapillarsperre zwischen den Platten und der Bettung eingebaut. Der Aufbau ist auf Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die anderen zwei Felder wurden so belassen und zur Bestimmung des Einflusses von Salzen und Beschattung verwendet.

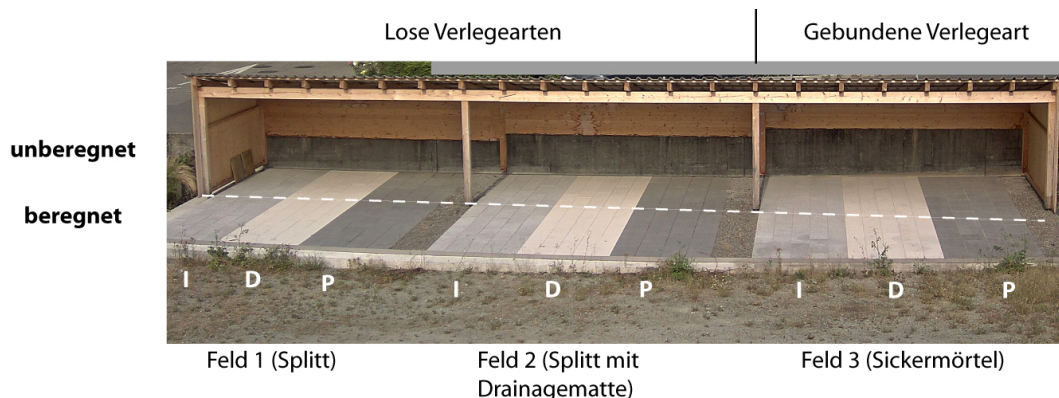


Abbildung 1: Aufbau der Terrassenanlage zwischen 2014 und 2016 (Phase 1). Auf die drei Bettungen (Splitt, Splitt mit Drainagematte, und Sickerlösrtel) wurden 3 verschiedene Natursteinsorten (Iragna-Gneis, I; Dietfurter-Kalkstein, D; und Padang-Granit, P) verlegt. Eine Hälfte der Anlage ist frei beregnet und die andere liegt unter Dach.

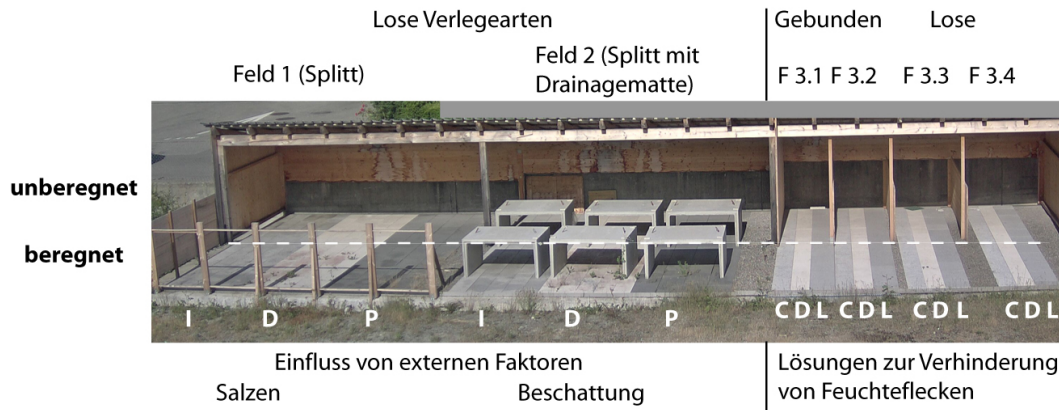


Abbildung 2: Photo der Terrassenanlage zwischen 2014 und 2019 (Phasen 2 und 3). Die ersten 2 Felder (Splitt, Splitt mit Drainagematte) wurden belassen und während der 2. Phase zur Untersuchung von externen Faktoren (Salze, Beschattung) verwendet. In der dritten Phase wurden dann Reinigungsversuche gemacht. Feld 3 wurde in 4 Subfelder (3.1 bis 3.4, Aufbau auf Figur 3 dargestellt) unterteilt. Es handelt sich hier um Aufbauten zur Verhinderung der Feuchtflecken. In der Phase 2 wurde auf diesem Feld die Wirksamkeit der Aufbauten untersucht, und in Phase 3 der Einfluss von Salzen. Als Natursteinsorten wurden ein Cresciano-Gneis (C), ein Dietfurter Kalkstein (D) und ein Padang Light Gray-Granit (L) verwendet.

3.1	3.2	3.3	3.4
Naturstein	Naturstein	Naturstein	Naturstein - Hydrophobierung durch Kapillarität
Haftschlämme	Plattenkleber mit Latexmilch	Drainagematte (hart, stabil)	
Trasszement / Rundkies	Sickermörtel	Splitt	Splitt-hydrophobierung mit wasserlöslicher Mikroemulsion
Drainagematte (Stärke 16 mm, Netz)			

Abbildung 3: Aufbauten zur Vermeidung von Feuchtflecken. Dunkelgrau: Natursteinplatte. Rot: Kapillarbrechende Schicht. Hellgrau: Bettung

Die Temperatur und die relative Feuchtigkeit im Stein und in der Bettung wurden alle 10 Minuten mit Sensoren SHT 75 der Firma Sensirion aufgenommen. Während Phase 1 wurden die Sensoren regelmässig verteilt. Beim Umbau wurden die Sensoren auf Feld 3 tendenziell im berechneten Bereich eingebaut. Zusätzlich wurden alle 10 Minuten die Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit, der Luftdruck, die Sonneneinstrahlung und die Niederschlagsmenge durch eine Wetterstation aufgenommen. Alle Messdaten wurden in einer Datenbank gespeichert.

Beobachtete Feuchtflecken und Verfärbungen

Feuchtflecken und Verfärbungen ohne externe Einflüsse

Im Allgemeinen kommen während der ersten Phase wenige bis keine Verfärbungen vor. Feuchtflecken treten nur im berechneten Bereich auf. Als typische Erscheinung entstehen bei den losen Verlegungen (Splitt mit und ohne Drainagematte) Feuchtflecken mit täglichem Zyklus, d.h. ihre Grösse schwankt täglich je nach rel. Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Feuchtigkeit der Bettung (Abbildung 4). Man beachte, dass auch bei optimalem Gefälle der Entwässerungsebene, die Bettung aufgrund der regelmässigen Niederschläge lange nass bleibt (Abbildung 5).

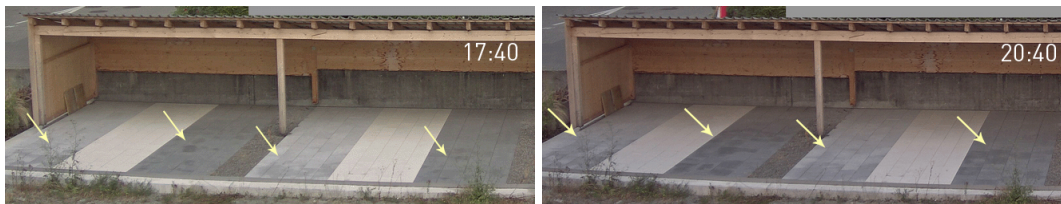


Abbildung 4: 23. Juli 2015 – 17.40 (oben) und 20.40 (unten). Auf den losen Verlegungen (Links: Splitt, Rechts: Splitt mit Drainagematte) sind Feuchtflecken mit täglichem Zyklus entstanden (gelbe Pfeile). Am warmen Nachmittag (links) ist das Ausmass an Feuchtflecken klein. Gegen Abend, sobald die Temperatur abnimmt, wachsen die Feuchtflecken wieder (rechts). Die Flecken sind insbesondere auf den Gneis- und auf den Granitplatten sichtbar. Man beachte, dass unter Dach keine Feuchtflecken auftreten.

Abbildung 5: Gneis, berechneter Bereich, Feld 2 (Splitt mit vlieskaschierter Drainagematte).

Aufnahme: 13. August 2015

Letzter Niederschlag am 11. August.

Die Abtrocknung der Bettung ist nicht homogen. Auf dem Photo sind trockene und feuchte Bereiche zu vermerken, welche zur Bildung von pulsierenden Flecken mit täglichem Zyklus an der Plattenoberfläche führen.



Dauerhafte Feuchtflecken sind nach etwa einem Jahr auf den gebundenen Verlegearten bei den Gneis- und den Granitplatten aufgetreten (Figur 6). Die Ausbreitung dieser Flecken ist konstant und variiert je nach klimatischen Bedingungen nur leicht.

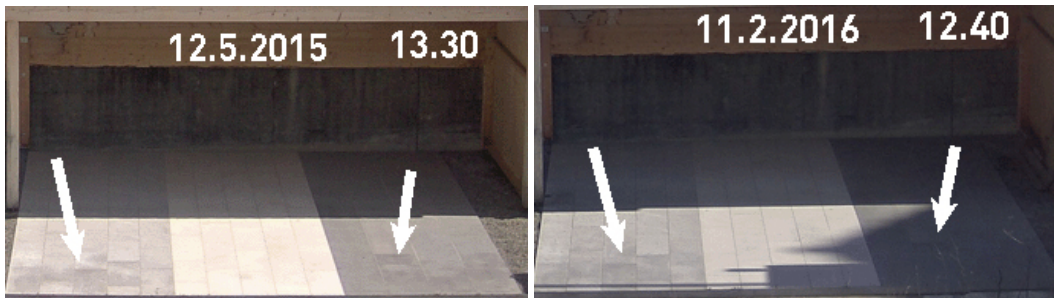


Abbildung 6: Das Feld 3 mit gebundenem Aufbau am 12. Mai 2015 um 13.30 (links) und etwa 9 Monate später am 11. Februar 2016 um 12.40 (rechts). Die Feuchtflecken (weisse Pfeile) haben immer ein konstantes Ausmass.

Einfluss von exogenen Salzen

Die Figur 7 zeigt das Aussehen vom Feld 1 vor (a), während (b) und nach (c-f) der Behandlung mit Salzen (ca. 1 g Salz pro Quadratmeter Belag; Hauptbestandteile: Kalium, Natrium, Kalzium, Magnesium, Chlorid, Sulfat). Dauerhafte Feuchtflecken sind nach etwa zwei Monaten ersichtlich (Figur 7c, weisse Pfeile). Im Allgemeinen verschwinden diese Flecken nur bei langen Trockenperioden (z.B. Sommer 2018, Figur 7e), kommen aber danach wieder vor (Figur 7f). Im berechneten Bereich weisen die Feuchtflecken, wie vor der Behandlung, ein pulsierendes Verhalten mit täglichem Zyklus auf.

Einfluss der Beschattung (Algen, Biofilme)

Biofilme und Algenverfärbungen sind lediglich im berechneten Bereich der beiden Felder 1 (Salzbehandlung) und 2 (Beschattung) entstanden. Die Beschattung kann somit nicht der einzige Faktor für das Wachstum von Mikroorganismen sein. Zu vermerken sind schwarze Biofilme auf dem Gneis und rote Algen auf dem Kalkstein. Auf dem dunklen Granit sind keine solche Verfärbungen entstanden. Das Wachstum von roten Algen auf dem Kalkstein begann kurz nach dem Umbau im Herbst 2016 und verstärkte sich nach der Schneeschmelze in Februar 2017. Auf den Gneisplatten entstanden ab Juli 2017 etliche schwarze Biofilme (Abbildung 8).



Abbildung 7: Entwicklung der Feuchtflecken nach der Besprühung mit einer Salzlösung (ca. 1 g Salz pro Quadratmeter Belag; Hauptbestandteile: Kalium, Natrium, Kalzium, Magnesium, Chlorid, Sulfat) auf Feld 1. Das Photo am 17. September 2016 (a) wurde vor der Besprühung gemacht. Die Bereiche unter Dach sind im Allgemeinen trocken und ohne Flecken. Das Photo vom 21. September 2016 (b) zeigt die Anlage kurz nach der Besprühung. c) Die ersten Feuchtflecken unter Dach (weisse Pfeile) erscheinen etwa 2 Monate nach der Besprühung. Seither sind etliche Feuchtflecken auf den Gneis- und auf den Granitplatten unter Dach immer sichtbar (d). e,f) Die Feuchtflecken sind bei der Wärme in Sommer 2018 nicht mehr zu beobachten, erscheinen aber wieder Ende August.

Bezüglich Biofilme sind ab 2017 rote Algen auf den Dietfurterplatten gewachsen.

Abbildung 8: Dietfurter und Iragna Feld 2, beregneter Bereich.

Auffallende Biofilme (rote Algen auf dem Kalkstein und schwarzer Belag auf dem Gneis).

Aufnahme: 21.07.2017



Systeme zur Verhinderung von Feuchtflecken

Vor der Behandlung mit Salzen

Die Systeme zur Verhinderung von Feuchtflecken zeigen, dass der Einbau einer Kapillarsperre zwischen der Natursteinplatte und der Bettung in der Regel wirksam ist. Unter Dach sind keine Feuchtflecken zu vermerken. Im berechneten Bereich sind ab Januar 2018 lokal auf einigen Gneisplatten beim Aufbau 3.2 (Gebundene Verlegung mit Drainmörtel) dauerhafte Feuchtflecken zu erkennen. Diese verschwinden im Sommer 2018 und treten ab etwa Mitte August 2018 wieder auf. Auf den anderen Verlegearten im berechneten Bereich sind keine Feuchtflecken entstanden.

Die Platten trocknen je nach Niederschlagsmenge bzw. Temperatur unterschiedlich ab. Im Durchschnitt trocknen die mit dem Hydrophobierungsmittel behandelten Beläge (Feld 3.4) und die mit Haftschlämme geklebten Platten (Feld 3.1) mit etwa 4 Stunden am schnellsten. Die Platten mit unterseitiger Drainagematte (Feld 3.3) trocknen im Durchschnitt in etwa 5 Stunden ab. Bei der gebundenen Verlegung mit Drainmörtel und Plattenkleber (Feld 3.2) beträgt die Trocknungszeit etwa 6 Stunden. Die Abbildung 9 zeigt die Austrocknung der Platten bei günstigen Klimabedingungen (Temperatur zwischen 15 und 20°C; Niederschlagsdauer: 20 Minuten, Menge: 0.2 l/m²). Alle Aufbauten sind nach ca. 1.5 Stunden wieder trocken.



Abbildung 9: Austrocknung der vier Aufbauten zur Verhinderung von Feuchtflecken nach einem Niederschlag im Sommer. Der Niederschlag endet um 17.00 Uhr. In diesem Fall sind die Beläge nach etwa 1.5 Stunden wieder trocken.

Nach der Behandlung mit Salzen

Die Beläge zur Verhinderung von Feuchtflecken auf Feld 3 wurden am 07. September 2018 mit Salzen (ca. 1 g Salz pro Quadratmeter Belag; Hauptbestandteile: Kalium, Natrium, Kalzium, Magnesium, Chlorid, Sulfat) behandelt. Im Laufe von September und Oktober 2018 war das Wetter eher trocken, sodass an den Belägen zuerst keine Veränderungen zu vermerken sind. (Figur 10b).

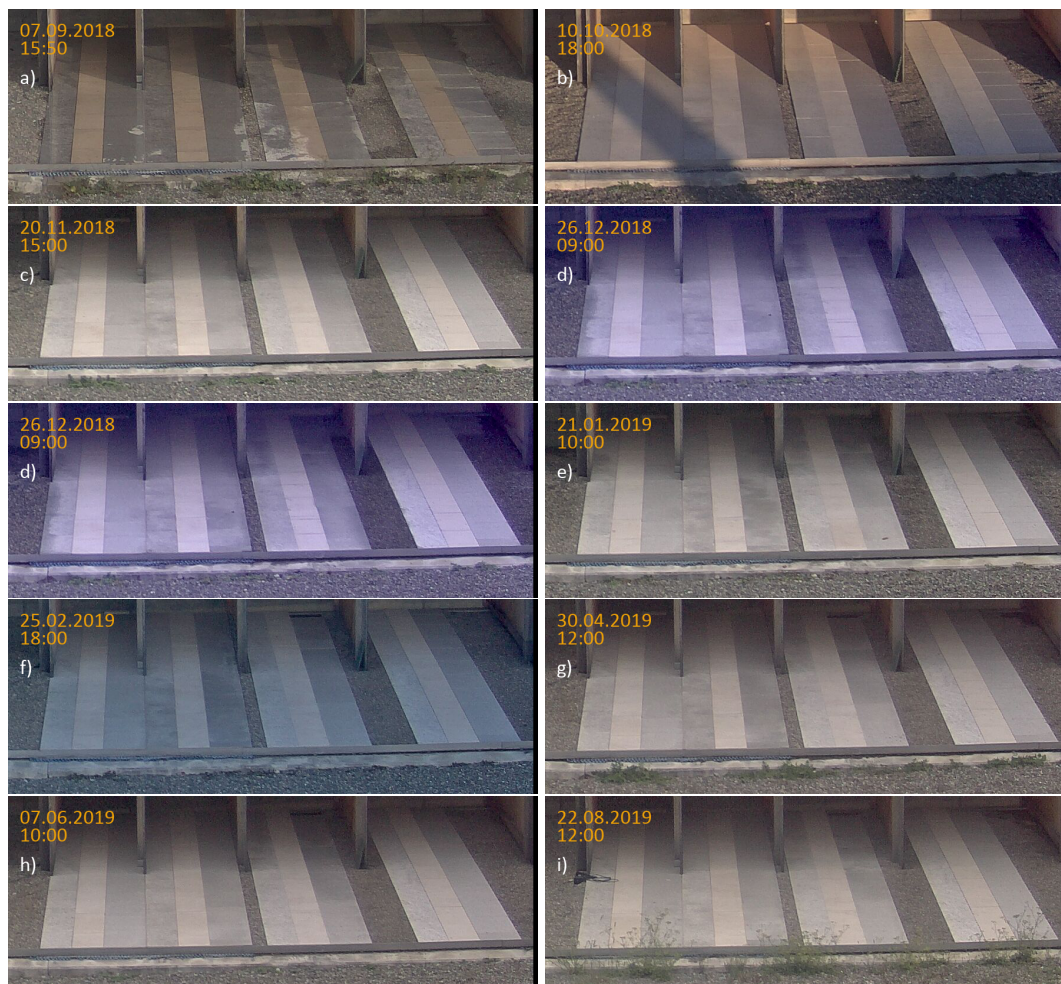


Abbildung 10: Entwicklung der Feuchtflecken auf den 4 Aufbauten zur Verminderung von Feuchtflecken nach der Besprühung mit der Salzlösung. a) Beläge kurz nach der Besprühung am 07. September 2018. b) Nach einem Monat sind keine Feuchtflecken entstanden. Das Wetter war in September-Oktober 2018 mild und trocken. c) In November 2018 entstehen sehr leichte Feuchtflecken auf den Feldern 3.1 bis 3.3. d, e) In den Wintermonaten sind auf den Granit- und auf den Gneisplatten Feuchtflecken zu erkennen. Ab Ende Februar sind die Flecken tendenziell nur noch auf dem Feld 3.2 zu vermerken (f, g). h,i) Keines der Felder weist in den Sommermonaten Feuchtflecken auf.

Als einzige Ausnahme treten hygroskopische Flecken auf den Gneis- und auf den Granitplatten beim Feld 3.2 auf. Ab Mitte November 2018 wird das Wetter kühler und die Niederschläge nehmen zu. Damit verbunden sind leichte Flecken auf den Feldern 3.1 bis 3.3 (Figur 10c). Das Ausmass der Flecken hat ein Maximum im Dezember 2018 - Januar 2019, danach nimmt es stetig ab (Figur 10d,e). Ab Ende Februar sind nur noch die leicht hygroskopischen Flecken auf den Gneis- und auf den Granitplatten auf Feld 3.2 zu erkennen (Figur 10f,g). Diese verschwinden dann komplett in den Sommermonaten (Figur 10h,i).

Sensormessungen

Die jährlichen Temperaturtrends aller Natursteinsorten und Bettungen sind ähnlich und folgen der saisonalen Temperaturschwankung. Die absoluten Temperaturwerte stehen wie erwartet in klarem Zusammenhang mit der Plattenfarbe, d.h. die hellen Natursteinsorten sind im Sommer mit etwa 50°C kühler als die dunkleren (Spitzwert: 65°C). Die relative Feuchtigkeit der Platten liegt unabhängig vom Aufbau (d.h. auch bei den Systemen zur Verminderung von Feuchtflecken) im Allgemeinen zwischen 80 und 100% und deutet auf feuchte Baustoffe hin. Selten nimmt sie bis zu etwa 40-60% ab und entspricht dann dem Wert der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit. In solchen Fällen wird der Aufbau als trocken betrachtet. Eine deutliche Abnahme der gemessenen Feuchtigkeit fand während der Hitzewelle in Juni-Juli 2015 statt (Abbildung 11). Während dieser Periode (etwa 3 Wochen lang) gab es Niederschläge und die durchschnittliche Temperatur ist bis zu 35°C gestiegen. Unter Dach wurden diese Feuchtwerte nach etwa einer Woche erreicht, im berechneten Bereich nach etwa zwei Wochen. Die Trocknungszeit des Aufbaus dauerte somit bei diesen extremen Bedingungen eine bzw. zwei Wochen .

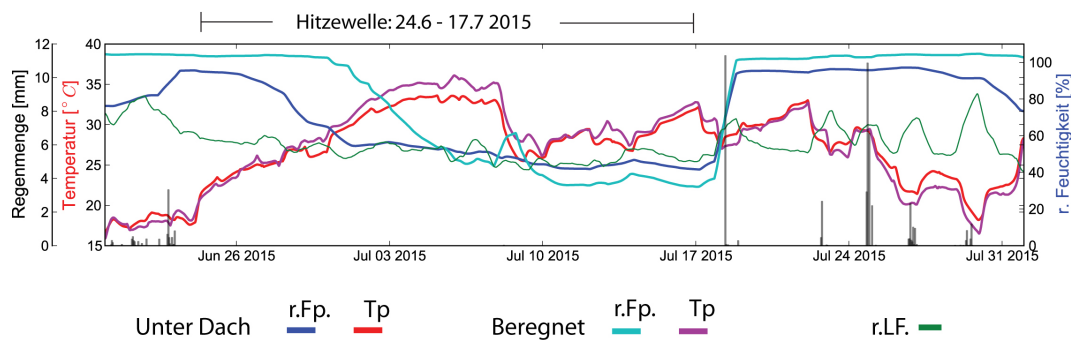


Abbildung 11: Verhalten der Temperatur (Tp) und der rel. Feuchtigkeit (r.Fp.) der Gneisplatten auf Splitt verlegt. Die Temperatur des bedeckten Bereichs wird als rote Linie , im beregneten Bereich als rosa Linie angegeben. Die rel. Feuchtigkeit der Platte im bedeckten Bereich ist als blaue Linie und diejenige im beregneten Bereich als Hellblaue dargestellt. Die rel. Luftfeuchtigkeit (r.LF.) wird ebenfalls als grüne Linie dargestellt. Die Abnahme der rel. Feuchtigkeit der Platten (r.Fp.) fängt kurz nach Beginn der Hitzewelle an.

Zusammenhang zwischen Feuchtflecken und Klima (Sensormessungen)

Der Zusammenhang zwischen der Ausbreitung von Feuchtflecken im berechneten Bereich und den gemessenen Parametern (Lufttemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit) wurde anhand von Kameraaufnahmen und von Sensormessungen im Laufe von 12 Monaten jeweils um 9.00 und 15.00 Uhr untersucht. Die Auswertungen wurden für die verschiedenen Aufbauten im berechneten Bereich oder unter Dach, nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Einflussfaktoren (Salze, Beschattung) gemacht. Die Analyse berücksichtigt 3 mögliche Plattenzustände:

- trocken: kein Vorkommen von Feuchtflecken im betrachteten Sektor
- feucht: Vorkommen von Feuchtflecken im betrachteten Sektor
- Anderes: Die Platten sind aufgrund von Niederschlägen nass oder mit Schnee bedeckt

Auf der Figur 12 wird als Beispiel das Vorkommen von Feuchtflecken im berechneten Bereich ohne Einfluss von Salzen und Beschattung um 09.00 Uhr je nach rel. Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur eingestuft. Dafür wurden nur zwei Kategorien verwendet (trocken und feucht). Die Figur zeigt neun Diagramme auf, welche die unterschiedlichen Naturstein- Bettungskombinationen darstellen. Die Konturlinien jedes Diagramms stellen den Medianwert, den 25% und den 75% Quantil beim Vorkommen von Feuchtflecken (blaue Farbe) bzw. beim Fehlen von Feuchtflecken (rote Farbe) dar. Die Messungen liegen in zwei, z.T. überlappenden Gruppen.

Im Allgemeinen sind am Morgen auf den Gneis- und den Granitplatten im Splitt oder im Splitt mit Drainagematte keine Feuchtflecken zu vermerken, wenn die rel. Luftfeuchtigkeit niedrig ist ($\leq 50\%$) und die Lufttemperatur hoch ist ($\geq 20^\circ\text{C}$). Bei Lufttemperaturen zwischen 0 und 25°C bzw. bei rel. Luftfeuchtigkeiten zwischen 70 und 100% sind Feuchtflecken fast immer zu erwarten. Im dazwischenliegenden Bereich überlappen sich die Konturlinien und zeigen, dass je nach klimatischen Faktoren (z.B. Niederschäge, Wind) Feuchtflecken möglich sind. Bei den gebundenen Verlegearten (Sickermörtel) sind beim Gneis und beim Granit dauerhafte Flecken entstanden. Aus diesem Grund treten auf den beiden Diagrammen nur blaue Konturen auf. Beim Kalkstein überlappen sich die zwei Gruppen sowohl bei den losen als auch bei den gebundenen Verlegearten nur leicht. Im Allgemeinen kommen bei diesem Kalkstein keine Feuchtflecken vor, wenn die relative Luftfeuchtigkeit $\leq 70\%$ liegt. Die Feuchtflecken wurden dann ab einer relativen Luftfeuchtigkeit $\geq 85\%$ immer beobachtet. Liegt die rel. Luftfeuchtigkeit zwischen 70% und 85%, dann sind Feuchtflecken auf den Kalksteinplatten je nach klimatischen Bedingungen (Niederschläge, Wind) möglich.

Der Prozentwert an Trocken Tagen (PTT) zeigt die Anzahl an Tagen ohne Feuchtflecken bezogen

auf einer Beobachtungsperiode von rund 370 Tagen. Die PTT von Feld 1 vor und nach der Besprühung mit Salzen sowie diejenigen von Feld 2 ohne und mit Beschattung sind auf Tabelle 1 aufgelistet .

Im Allgemeinen sind die PTT nach der Besprühung mit Salzen oder bei der Beschattung schlechter, somit ist der Einfluss dieser Faktoren auf die Entstehung von Feuchtflecken von Bedeutung.

Naturstein	Zeit	Prozentwert Trockene Tage (PTT)	
		vor Besprühung	nach Besprühung
Gneis	09.00	14%	0%
Kalkstein	09.00	69%	46%
Granit	09.00	8%	3%
Gneis	15.00	31%	5%
Kalkstein	15.00	80%	91%
Granit	15.00	30%	4%
		ohne Beschattung	mit Beschattung
Gneis	09.00	16%	4%
Kalkstein	09.00	66%	45%
Granit	09.00	11%	1%
Gneis	15.00	38%	8%
Kalkstein	15.00	75%	89%
Granit	15.00	37%	6%

Tabelle 1: PTT der berechneten Bereiche vor und nach der Besprühung mit Salzen (Feld 1) bzw. der Beschattung (Feld 2) im Vergleich. Tendenziell liegen die PTT beim Vorkommen von Salzen oder bei Beschattung viel tiefer und zeigen, dass häufiger Feuchtflecken zu erwarten sind.

Die Tabellen 2 und 3 zeigen die PTT der losen bzw. der gebundenen Verlegenarten ohne Kapillarsperre der Phase 1 zusammen mit denjenigen mit Kapillarsperre der Phase 2. Die Gneise und die Granite weisen eine deutliche Verbesserung der PTT nach dem Einbau einer Kapillarsperre auf. Beim Kalkstein waren die Werte aufgrund seiner geringen Durchsichtigkeit auch ohne Kapillarsperre hoch (i.A. waren die Kalksteinplatten in 70% der Fälle am Morgen und in 80% der Fälle am Nachmittag trocken). Die Verwendung einer Kapillarsperre bringt somit nur eine leichte Verbesserung des PTTs (90%) am Nachmittag.

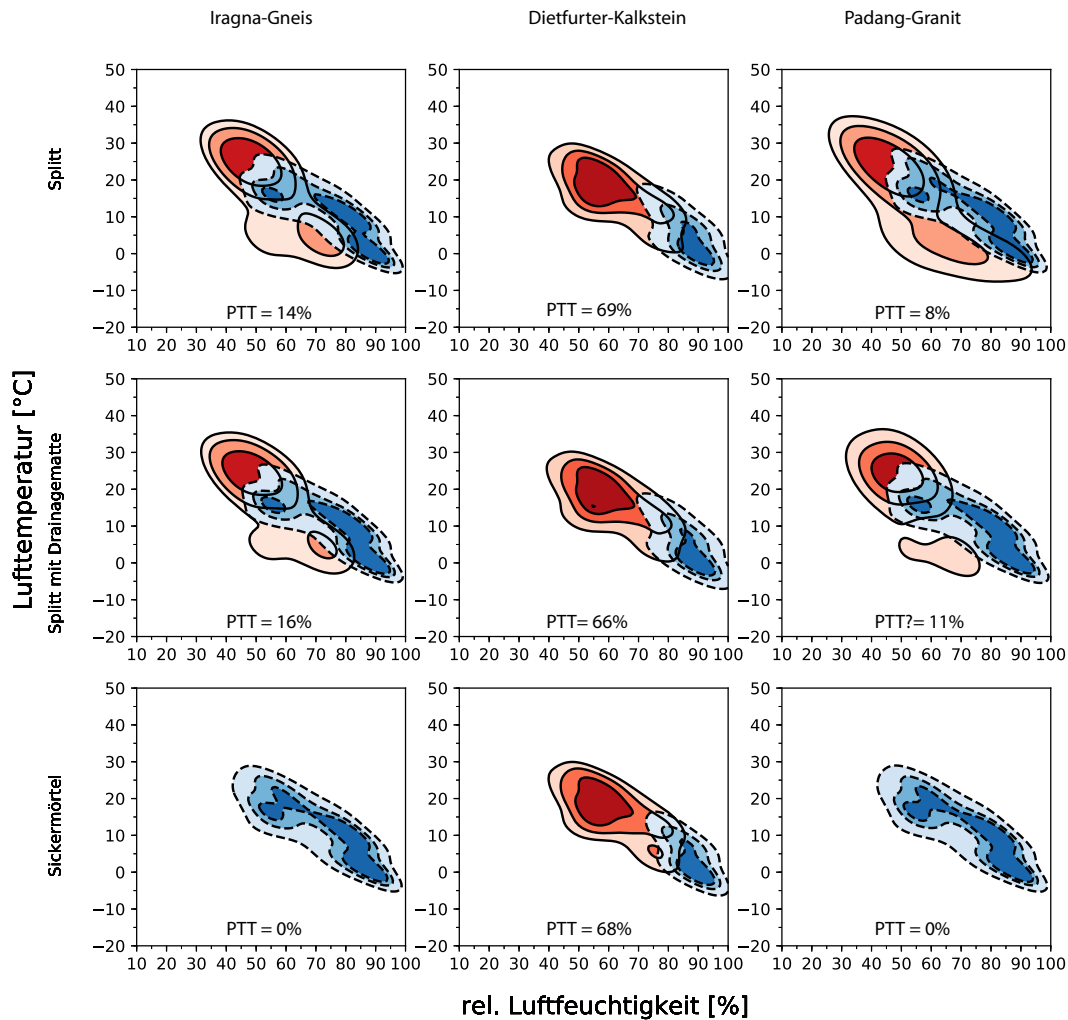


Abbildung 12: Vorkommen von Feuchtflecken bzw. trockenen Zuständen nach Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte jeweils um 9:00 Uhr morgens zwischen dem 13. Dez. 2014 und dem 31. Dez. 2015, an insgesamt 368 Beobachtungstagen. Die neun Diagramme zeigen die verschiedenen Platten- / Bettungskombinationen auf. Die Konturlinien entsprechen den Zuständen bei 25% der Beobachtungen (keine Feuchtflecken: dunkelrot bzw. fleckig: dunkelblau), 50% der Beobachtungen (keine Feuchtflecken: rot bzw. fleckig: blau) und 75% der Beobachtungen (keine Feuchtflecken: hellrot bzw. fleckig: hellblau). Beobachtungen während Regen/Schnee wurden nicht berücksichtigt. Der PTT ist ebenfalls angegeben und zeigt, wie häufig der jeweiligen Belag keine Feuchtflecken aufweist.

Naturstein	Zeit	Prozentwert Trockene Tage (PTT)		
		Keine Kapillarsperre	Unterseitige Drainagematte	Hydrophobierung
Gneis	09.00	14%	56%	73%
Kalkstein	09.00	69%	64%	69%
Granit	09.00	8%	51%	74%
Gneis	15.00	31%	85%	88%
Kalkstein	15.00	80%	86%	85%
Granit	15.00	30%	84%	88%

Tabelle 2: Vergleich der PTT der losen Verlegungen mit (Phase 2, Felder 3.3 und 3.4) und ohne (Phase 1, Feld 1) Kapillarsperre zwischen Naturstein und Bettung.

Naturstein	Zeit	Prozentwert Trockene Tage (PTT)		
		Keine Kapillarsperre	Haftschlämme	Sicker Mörtel mit Drainagematte
Gneis	09.00	0%	52%	48%
Kalkstein	09.00	68%	65%	63%
Granit	09.00	0%	70%	55%
Gneis	15.00	0%	75%	57%
Kalkstein	15.00	80%	88%	86%
Granit	15.00	0%	87%	65%

Tabelle 3: Vergleich der PTT der gebundenen Verlegungen mit (Phase 2, Felder 3.1 und 3.2) und ohne (Phase 1, Feld 3) Kapillarsperre zwischen Naturstein und Bettung.

Reinigungsversuche

Die Situation bezüglich Reinigung der Biofilme und der Salze wurde auf den Feldern 1 und 2 getestet. Die Abbildungen 13 bis 15 zeigen das Aussehen der Gneis- (schwarze Biofilme) und der Kalksteinplatten (rote Algen) vor, während und nach der Reinigung. Alle Biofilme konnten problemlos entfernt werden. Bei der Verwendung von Reinigungsprodukten werden die Biofilme und die Algen aufgelöst, so dass die Reinigung leicht fällt. Nach einem Jahr sind auf den behandelten Platten keine Biofilme bzw. rote Algen entstanden. Auf den Kalksteinplatten, welche nur mit Hochdruckwasser gereinigt wurden, kommen die roten Algen ab Februar 2019 erneut vor (Abbildung 16). Die hygroskopischen Flecken unter Dach auf Feld 1 sind nach der Reinigung mit Hochdruckwasser nicht mehr sichtbar, kehren aber nach ca. einem Monat wieder zurück. Das Verhalten der Flecken ist ähnlich zu demjenigen während der 2. Phase, d.h. die Flecken sind gut sichtbar während den kalten und feuchten Monaten (Abbildung 17) und weniger während den heissen und trockenen Sommermonaten.

Abbildung 13: Gneis und Kalkstein, Feld 1, beregneter Bereich.

Kurz vor der Reinigung sind auffallende Biofilme sichtbar. Es handelt sich um rote Algen auf dem Kalkstein und um einen schwarzen Belag auf dem Gneis.

Aufnahme: 05.10.2018



Abbildung 14: Gneis und Kalkstein, Feld 1, beregneter Bereich.

Während der Reinigung. Die ersten 2 Streifen auf der linken Seite aller Felder wurden mit natursteinverträglichen Reinigungsprodukten behandelt. Die Biofilme lösen sich auf und die Reinigung ist einfacher.

Aufnahme: 05.10.2018



Abbildung 15: Gneis und Kalkstein, Feld 1, beregneter Bereich.

Mit der Reinigung wurden sämtliche Biofilme entfernt.

Aufnahme: 05.10.2018





Abbildung 16: Kalkstein, Feld 2, beregneter Bereich.

Ab Februar 2019 sind rote Algen beim nicht behandelten Belag wieder gewachsen.

Aufnahme: 22.02.2019



Abbildung 17: Feld 1, unter Dach.

Detail der hygroskopischen Flecken unter Dach im Winter. Die Platten wurden im September 2018 gereinigt.

Aufnahme: 13.02.2019

Laboruntersuchungen

Zur Bestimmung des Wassertransports im System *Terrasse* wurde die absolute Feuchte der Bettung (Splitt), die Saugfähigkeit vom Splitt und die Wasseraufnahme der auf einer Splittbettung verlegten Natursteine gemessen. Dafür werden die Ergebnisse entweder als Liter Wasser pro Einheitsfläche (m^2) oder als Liter Wasser pro Einheitsfläche (m^2) und Einheitszeit (1 Tag) angegeben. Bei der Saugfähigkeit auf Splitt wird bestimmt, wieviele Liter Wasser pro Einheitsfläche am Tag durch eine auf einer Splittbettung verlegten Natursteinplatte absorbiert werden können. Dafür wurden zylindrische Natursteinproben mit Durchmesser 5 cm und Stärke 3 cm vorbereitet. Diese wurden 24 Stunden im Ofen bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet, danach wurde das Trockengewicht bestimmt. Die getrockneten Proben wurden dann je auf einen mit nassem Splitt gefüllten Becher verlegt und das Gewicht in Intervallen bestimmt (Figur 18).



Abbildung 18: Aufbau zur Bestimmung der Saugfähigkeit am Splitt. Die getrocknete Natursteinprobe (von Links nach Rechts der Cresciano, der Dietfurter und der Padang) wird gewogen und danach auf einem mit nassem Splitt gefüllten Becher verlegt. Die Saugfähigkeit wird als Differenz zwischen Feuchtgewicht und Trockengewicht bestimmt.

Für die absolute Feuchte der Bettung wurden Proben vor Ort in Plastikbeutel gesammelt. Das Gewicht wurde im Labor vor und nach der Trocknung im Ofen bei 105 °C bestimmt und ergab das Wasservolumen als Prozent der Probenvolumen. Zur Berechnung des Wasservolumens pro Einheitsfläche (in Liter pro m²) wird das Volumen der Einheitsfläche nach Berücksichtigung der Schichtstärke bestimmt. Vor Ort wurde der Splitt bzw. der Sicker Mörtel mit einer Stärke von 5 cm und der Plattenkleber mit einer von 1 cm verlegt. So wurde bei der Berechnung ein Volumen der Einheitsfläche aus Splitt und aus Sicker Mörtel von 50 Liter, und ein Volumen der Einheitsfläche aus Plattenkleber von 10 Liter berücksichtigt.

Bei der Bestimmung der Wassersteighöhe des Splitts wurde vorerst ein Messzylinder mit 2 cm Wasser gefüllt. Danach wurde der Zylinder mit dem verwendeten Splitt bis auf 15 cm Höhe verfüllt. Das Niveau des Kapillarwassers im Zylinder wurde in regelmässigen Intervallen gemessen.

Die Mittelwerte der Prüfungen an den Gesteinsplatten und an den Bettungen werden in der Tabelle 4 zusammengefasst. Die Stärke der Saugfähigkeit am Splitt korreliert mit der Kapillarporosität, somit kann der mittelporöse Dietfurter etwa 4 dl Wasser am Tag aufnehmen, der Cresciano etwa 2.5 dl und der Padang, welcher die niedrigste Porosität aufweist, knapp 5 cl Wasser. Die Wasserdampfdiffusion wurde ebenfalls gemessen und als Durchflussrate des Dampfes in Liter pro Einheitsfläche pro Tag angegeben. Dieser Wert korreliert auch gut mit der gemessenen Kapillarporosität. Gesteine mit niedriger Porosität wie der Iragna und der Padang sind dicht, somit liegt die Wasserdampfdiffusion tief (0.006 l Wasserdampf am Tag). Der Dietfurter im Gegenteil weist eine höhere Porosität auf, und so diffundiert der Wasserdampf etwas schneller (0.018 l Wasserdampf am Tag). Im Allgemeinen liegen die Werte der Dampfdiffusion eine Grössenordnung tiefer als die Werte der Wasserabsorption am Splitt.

Probe	Wdd	Sf	Probe	Abs. Fb.	Abs. Fu.	h_{H_2O}
	l/m ² /Tag	l/m ² /Tag		l/m ²	l/m ²	cm/Tag
Iragna-Gneis	0.006	0.26	Kleber mit Latexmilch	2.6	1.7	
Dietfurter-Kalkstein	0.018	0.41	Sickermörtel	5.3	4.8	
Padang-Granit	0.006	0.05	Splitt	0.5-3.0	0.1	11

Tabelle 4: Gemessene Parameter zur Bestimmung des Wassertransports. Bei den Natursteinen wurde die Wasserdampfdiffusion (Wdd) und die Saugfähigkeit (Sf) am Splitt gemessen. Bei den Bettungen wurden die Absolute Feuchte im berechneten Bereich (Abs. Fb.), die absolute Feuchte unter Dach (Abs. Fu.) und die Wassersteighöhe (h_{H_2O}) beim Splitt gemessen.

Die absolute Feuchte vom Splitt wurde während 5 Monaten einmal pro Monat gemessen. Dafür wurden 6 Proben im berechneten Bereich und 6 unter Dach gesammelt. Die Abbildung 19 zeigt der in l/m² umgerechnete Wassergehalt an den 12 Sammelstellen. Unter Dach wurden konstante Wassergehalte von ca. 0.1 l/m² gemessen, im berechneten Bereich sind die Werte höher und variieren je nach Wetter zwischen ca. 0.5 und 3 l/m². Der Einbau einer vlieskaschierten Drainagematte reduziert den Wassergehalt in diesem Fall nicht. Des Weiteren wurde die absolute Feuchte des Sickermörtels und des verwendeten Plattenklebers am Ende der ersten Phase (September 2016) gemessen. Die Werte sind sehr hoch und liegen zwischen 2.6 und 5.3 Liter pro m² im berechneten Bereich bzw. 1.7 und 4.8 Liter pro m² im überdachten Bereich.

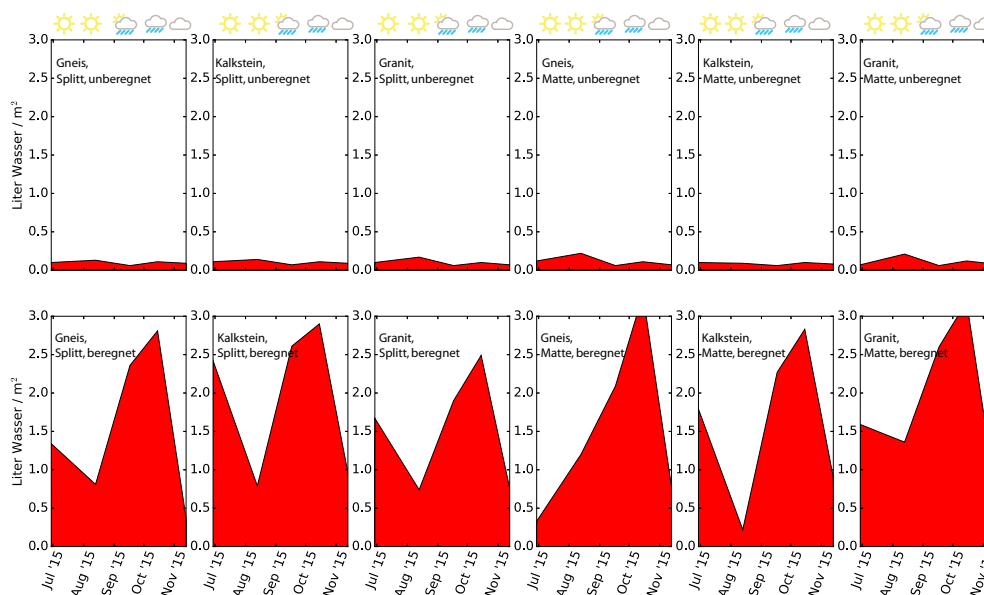
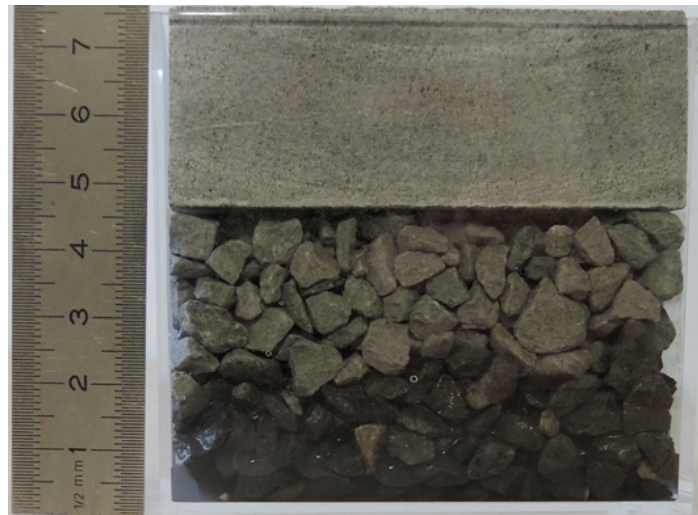


Abbildung 19: Gemessene absolute Splittfeuchte zwischen Juli und November 2015. Die Werte zeigen deutliche Unterschiede zwischen berechneten und unregneten Bereichen, jedoch nicht zwischen den unterschiedlichen Aufbauten.

Feuchtfleckenpotential

Die Dynamik der Fleckenbildungen konnte an den Versuchsbelägen gründlich studiert werden. Aus Aufwandgründen musste man sich aber auf drei verschiedene Gesteinsorten beschränken. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zwei Versuche zur Beurteilung des Feuchtfleckenpotentials von Natursteinen entwickelt, welche im Labor durchgeführt werden können. Diese sind die Prüfung der Farbveränderung und die Prüfung der Durchsichtigkeitstiefe. Bei der Farbveränderung wird die Änderung der Helligkeit der Platten im Trocken- und im Nasszustand messtechnisch wie folgt bestimmt. Die Natursteinprobe (Stärke: 3 cm) wird unmittelbar nach der Vorabtrocknung im Ofen bei 70°C eingescannt. Das Photo des Trockenzustandes dient als Referenz für die Bestimmung des Farbwechsels. Danach wird die Probe in einem Behälter mit Splitt und 60 ml Wasser verlegt und während einem Monat in einer Klimakammer bei 80% rel. Feuchte bzw. 20°C gelegt (Abbildung 20). Am Ende des Versuchs wird die Probe wieder eingescannt und mit dem Referenzbild verglichen. Bei dieser Berechnung wird die mittlere Helligkeit jeder Aufnahme als Durchschnitt der Helligkeit jedes Pixels bestimmt. Die Farbveränderung (FV) wird dann als Verhältnis zwischen der Bildhelligkeit der trockenen Probe und diejenige der feuchten Probe in Prozent ausgedrückt.

Abbildung 20: Aufbau der Farbwechselprüfung vor Beginn der Klimakammerphase. Die Probe (3 cm. Stärke) wurde auf einem Splittbett mit 60 ml Wasser verlegt.



Bei der Prüfung der Durchsichtigkeitstiefe werden die Natursteine in Prismen (etwa 10 cm lang) geschnitten und nach 2 Tagen Lagerung in Wasser mit einer kalibrierten Lichtquelle untersucht. Die Stärke des Prismas an der Stelle, bei welcher das Licht nicht mehr sichtbar ist, entspricht der Tiefe der Durchsichtigkeit. Die Durchsichtigkeitstiefe (Transparenz) ist entscheidend bezüglich der Sichtbarkeit von Feuchtflecken. Bei wenig durchsichtigen Natursteinen sehen die Platten eher schnell wieder trocken aus. Bei stark durchsichtigen Natursteinen im Gegensatz dauert es lange, bis das Wasser aus den tieferen Poren abgetrocknet ist, d.h. Feuchtigkeit ist auch dann noch gut sichtbar, wenn die

Steinoberfläche bereits trocken ist.

Mit der Untersuchung von 29 Natursteinsorten konnten die empirischen Schwellenwerte für den Bedarf an einer Kapillarsperre hergeleitet werden. Diese werden auf der Figur 21 dargestellt. Das Aussehen der verlegten Natursteinsorten vor und nach dem Farbwechselfersuch ist in den Figuren 22, 23 und 24 dargestellt. Beim Dietfurter liegt der Farbwechsel bei 5%, so ist der Unterschied zwischen trockenen und nassen Proben kaum sichtbar. Beim Padang und beim Iragna liegt das Farbwechsel deutlich höher, so ist der Unterschied auffallend.

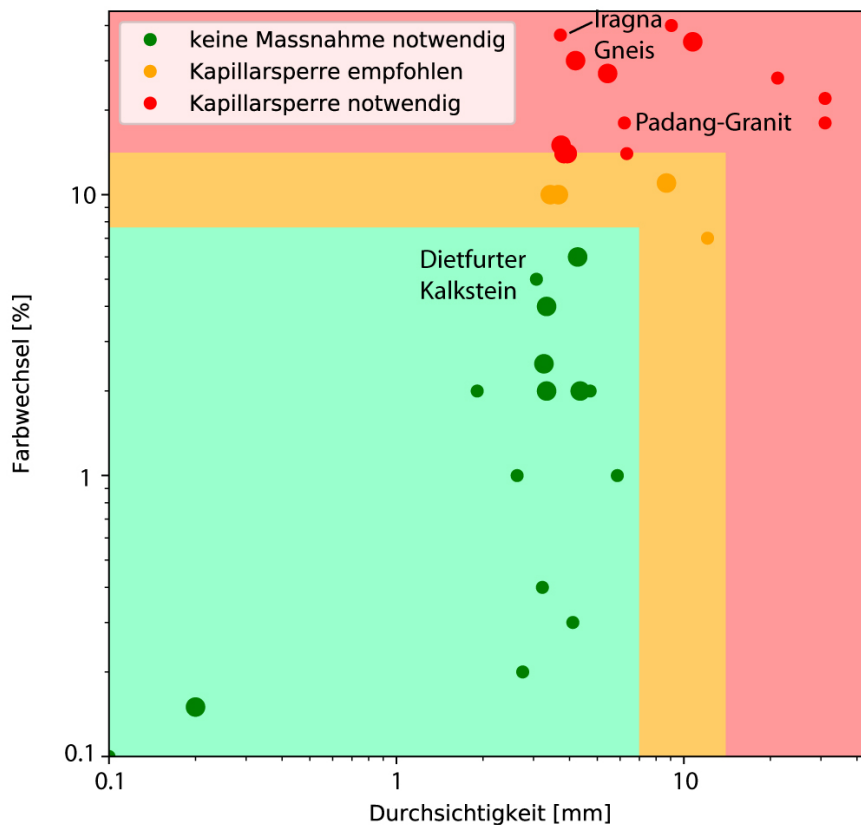


Abbildung 21: Ergebnisse der gemessenen Natursteinsorten (Punkte) auf dem Durchsichtigkeit-Farbwechselfeldiagramm. Die Schwellenwerte wurden anhand der Beurteilung der Proben hergeleitet. Bei einem Farbwechsel $\leq 7\%$ bzw. eine Durchsichtigkeitstiefe ≤ 7 mm (grüner Bereich) sind die Änderungen mit blossen Auge nicht sichtbar. Eine Massnahme ist somit nicht notwendig. Bei einem Farbwechsel $\geq 14\%$ bzw. eine Durchsichtigkeitstiefe ≥ 14 mm (roter Bereich) sind die Änderungen an den Natursteinen auffallend, somit ist eine Kapillarsperre zwischen Platte und Bettung notwendig, wenn sichtbare Feuchtflecken vermieden werden sollen. Im dazwischenliegenden orangen Bereich ist eine Kapillarsperre empfohlen.

Abbildung 22: Dietfurter-Kalkstein vor (links) und nach (rechts) dem Farbwechselfersuch. Farbwechsel: 5%. Das Bild der Platte auf der rechten Seite (nass) ist somit 5% dunkler als dasjenige auf der linken Seite (trocken).



Abbildung 23: Padang-Granit vor (links) und nach (rechts) dem Farbwechselfersuch. Farbwechsel: 18%

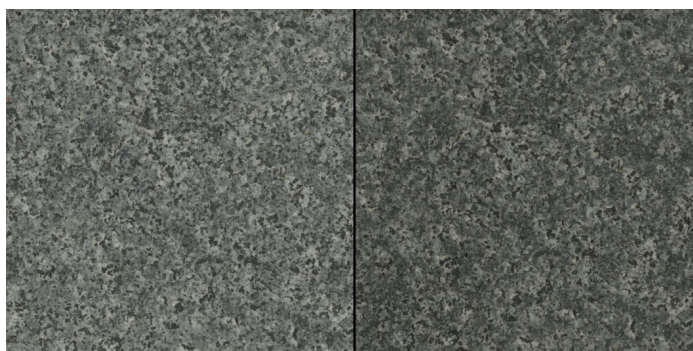


Abbildung 24: Iragna-Gneis vor (links) und nach (rechts) dem Farbwechselfersuch. Farbwechsel: 35%



Ursache der beobachteten Flecken

Feuchtflecken

Die Entstehung von sichtbaren Feuchtflecken auf fachgerecht verlegten Natursteinplatten im Aussenbereich steht mit den Natursteineigenschaften, mit der Bettungseigenschaften und mit externen Faktoren (z.B. das Vorkommen von Salzen oder Beschattung) in Zusammenhang (Tabelle 5). Bei optimalem Gefälle kann das Wasser nicht unter Dach fließen, sodass die Bettung und die Nutzflächen in diesem Bereich trocken bleiben. Im berechneten Bereich sammelt sich Wasser in der Bettung aufgrund von Retentionskräften. Das zurückgehaltene Wasser diffundiert in der Bettung auch in die nicht direkt bereg-

neten Bereiche und wird durch die Kapillarporen im Naturstein bis an die Plattenoberfläche transportiert. Es erscheinen mehr oder weniger dauerhafte Feuchtflecken. Das Erscheinen, die Dynamik und die Dauerhaftigkeit der Flecken ist stark abhängig von der Transparenz des Gesteinsgefüges der Natursteine, d.h. von der Art und der Gestalt der Gesteinskomponenten bzw. der vorhandenen Mineralien. Licht kann sich durch ein Gesteinsgefüge direkt bzw. diffus bis in eine bestimmte Tiefe ausbreiten. Wasser in den Gesteinsporen erhöht die Transparenz, sodass mehr Licht absorbiert wird und das Gestein im nassen Zustand dunkler erscheint. Die Oberfläche einer Steinplatte erscheint trocken, wenn die Feuchtigkeit (d.h. der Verdunstungshorizont) so tief hinter die Oberfläche zurückweicht, dass sie nicht mehr sichtbar ist. Sehr feinkörnige Gesteine (z.B. Schiefer, etliche Kalksteine) haben eine sehr geringe Transparenz, d.h. wenn die Sichtfläche trocken ist, erscheint der Stein trocken. Gesteine mit hoher Transparenz erscheinen auch dann noch feucht, wenn die Steinoberfläche trocken ist, da die Feuchtigkeit auch unter der Oberfläche noch gut sichtbar ist. Die Entstehung dauerhafter Flecken (also die Flecken die gar nicht oder nur selten verschwinden) steht mit der hygroskopischen Wirkung von Salzen in Zusammenhang. Bei den Salzen handelt es sich entweder um Salze aus einer Mörtelbettung (Zementsalze), oder um von aussen eingebrachte Salze. Unter Dach werden die Platten durch das Regenwasser nicht gespült, sodass die angesammelten Salze beliebig lang hygroskopisch wirken können. Man beachte, dass die Reinigung mit Leitungswasser keine bleibende Verbesserung gebracht hat. Die Salze werden bei normaler Reinigung lediglich in den Unterbau verfrachtet (vor allem bei loser Bettung) und wandern dann wieder an die Oberfläche. Zudem enthält Leitungswasser meist selbst nicht unerhebliche Salzmengen (im Gegensatz zu Regenwasser). Dauerhafte Flecken verschwinden nur selten bei langen heissen, trockenen Perioden. Anstelle solcher Flecken können dann Ausblühungen beobachtet werden.

Biofilme

Die Biofilme verursachen eine Verfärbung der Platte, dies hat jedoch keinen grossen Einfluss auf die Ausbreitung der Feuchtflecken. Tendenziell wachsen Biofilme auf hellen Platten, welche im Sommer nicht zu warm werden.

Ausführung	Ohne Salze		mit Salzen	
	Unter Dach	Beregnet	Unter Dach	Beregnet
Ohne KS, lose	keine Flecken	pulsierend	hygroskopisch	pulsierend
Ohne KS, gebunden	keine Flecken	hygroskopisch	k.A.	k.A.
mit KS, lose	keine Flecken	keine Flecken	keine Flecken	keine Flecken
mit KS, gebunden	keine Flecken	keine Flecken	keine Flecken	keine Flecken

Tabelle 5: Mögliche Feuchtfleckentypen auf unterschiedlichen Ausführungen mit und ohne den Einfluss von Salzen. KS: Kapillarsperre. K.A.: Keine Äusserung, das Feld wurde umgebaut.

Wassertransport in Naturstein-Bodenbelägen im Aussenbereich

Der Austausch des Wassers zwischen Terrassenbodenbelägen und ihrer Umgebung erfolgt prinzipiell über den Niederschlag (Durchschnitt Kanton Aargau ca. 2 Liter Wasser/m²/Tag) und das Entwässerungssystem. Je nach Bettungseigenschaften kann jedoch eine gewisse Wassermenge durch Retentionskräfte zurückgehalten werden. Diese Dynamik, zusammen mit den Messwerten, ist schematisch auf Figur 25 dargestellt. In Hunzenschwil zeigt sich, dass eine Splittbettung auf einer Unterkonstruktion mit Gefälle 1.5% eine Wassermenge von 0.5 bis 3 Liter Wasser pro m² Bettung enthält. Das Retentionswasser kann hauptsächlich durch Verdunstung weggebracht werden, der Austausch des Wasserdampfes mit der Atmosphäre ist jedoch durch die verlegten Platten behindert. So ist die Bettung lediglich nach einer heissen und trockenen Periode von ca. 2 Wochen komplett trocken. Besteht kein direkter Kontakt zwischen der Platte und die Bettung (z.B. durch eine starre Drainagematte), dann kann die Platte nur wenig Wasser absorbieren, daher entstehen keine Feuchtflecken. Besteht ein direkter Kontakt mit der Bettung, dann wird Wasser durch die Platte absorbiert. Bei den getesteten Natursteinplatten lag die Menge an absorbiertem Wasser zwischen 0.05 und 0.4 Liter/m²/Tag.

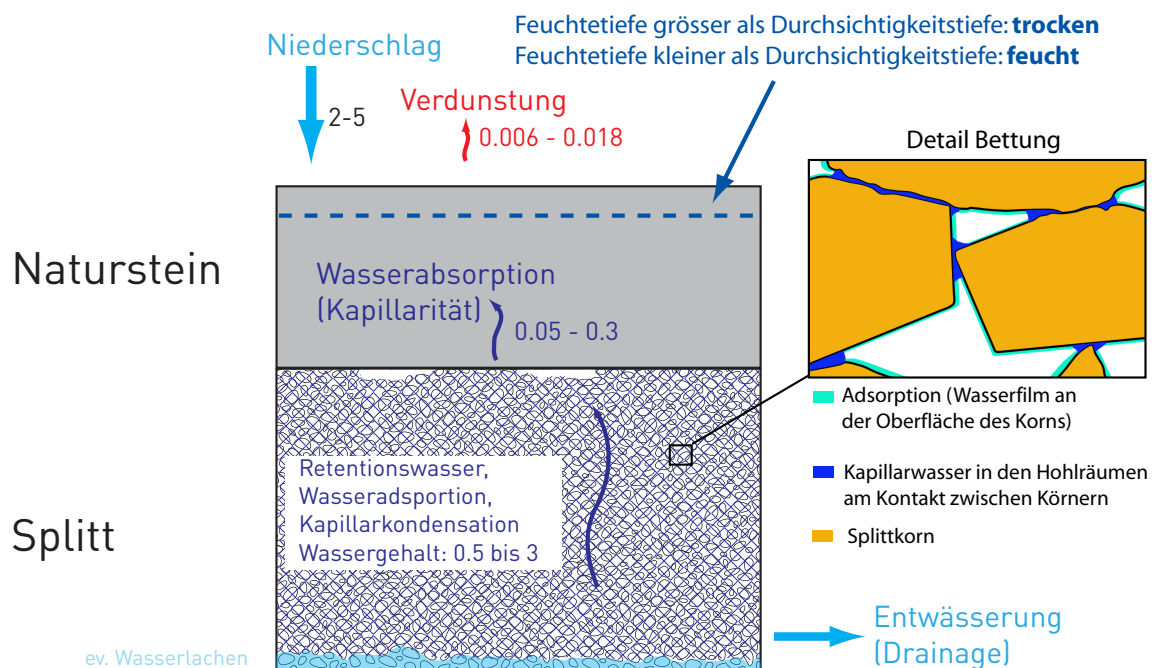


Abbildung 25: Schematischer Wassertransport in einem Aufbau ohne Kapillarsperre. Alle Werte in Liter Wasser pro Quadratmeter pro Tag, ausser Wassergehalt in Liter Wasser pro Quadratmeter.

Dieses Wasser kann je nach Sonneneinstrahlung an der Plattenoberfläche verdunsten. Bei den getesteten Natursteinplatten lagen die Werte bei 0.006 und 0.018 Liter/m²/Tag (Labormesswerte, ohne Sonnenstrahlung). Der Wasseraufstieg in einem körnigen Baustoff (z.B. in einer Splitt-, einer Rundkies-, oder einer Sicker Mörtelbettung) erfolgt laut Literatur über verschiedenen Mechanismen, welche sich je nach Wasser- und Wasserdampfmenge einschalten können. Der körnige Baustoff wirkt einerseits kapillar, da an den Kontaktzonen die Poren eng, d.h. kapillaraktiv sind. Des Weiteren ist die Rauheit der Kornoberfläche massgebend für die Ansammlung der Wassermolekülen. Je rauer die Oberfläche, desto mehr Vertiefungen das Wasser ansammeln (Adsorptionswasser) und desto grösser die spezifische Oberfläche (d.h. beim gleichen Volumen steht bei rauen Körner eine grössere Oberfläche zur Verfügung, welche mit Wassermolekülen besetzt werden kann). Die Verhinderung des Wasserdampfaustausches mit der Atmosphäre aufgrund der verlegten Platten verursacht eine Zunahme der Wasserdampfkonzentration in der Bettung so, dass die relative Luftfeuchtigkeit bei 100% liegt, und so dass Kondenswasser durch den Prozess der kapillaren Kondensation und der Wasseradsorption entsteht. Mit diesem Prozess werden die kleinen Poren (Kontaktzonen und Vertiefungen der Kornoberfläche) mit Wassermolekülen besetzt. Die entstandenen Tröpfchen werden als pendelndes Wasser (pendular water) bezeichnet. Nimmt die Wasserdampfkonzentration nicht ab, dann füllen sich durch Koaleszenz auch die grösseren Hohlstellen. Die Wasserdampfsättigung ist somit verantwortlich für die Durchfeuchtung der gesamten Bettung. Die Übertragung der Feuchte in der Natursteinplatte kann somit nur mit einer Kapillarsperre zwischen Bettung und Platte gebremst werden (z.B. in Hunzenschwil eine Haftschämme, eine starre Drainagematte auf der Bettung oder eine Mikroemulsion).

Fazit

Das Vorkommen von Feuchtflecken kann aufgrund des Retentionswassers in der Bettung erklärt und quantifiziert werden. Ihre Persistenz wird durch die Natursteineigenschaften (Kapillarporosität, Vorkommen von transparenten und transluzenten Mineralien) mitbestimmt. Kommen Salze (aus externen Quellen oder aus dem Mörtel) in geringen Mengen dazu noch vor, dann entstehen permanente Feuchtflecken, welche nur in seltenen Fällen, während langen trockenen Perioden, verschwinden können. Bei der Austrocknung können Ausblühungen an der Oberfläche entstehen.

Verfärbungen in Form von Biofilmen entstehen an den hellen Natursteinen, welche in den Sommermonaten nicht zu heiss werden. Die Verfärbungen können mit Hochdruckwasser oder speziellen Reinigungsprodukten einfach entfernt werden. Bei der Verwendung von Reinigungsprodukten ist die Entfernung der Biofilme einfacher und dauerhafter.

Zur Verhinderung von Feuchtflecken ist eine Beurteilung der Natursteineigenschaften von Bedeutung. Die Verwendung von Kapillarsperren zwischen Natursteinplatte und Bettung ist unerlässlich, wenn der Naturstein eine erhöhte Transparenz aufweist. Von den vier überprüften Aufbauten mit Kapillarsperre wurden die zwei vielversprechendsten ebenfalls im überarbeiteten Merkblatt Nr. 10 der NVS Reihe *Bauen mit Natursteinen* aufgenommen. Hat der betreffende Naturstein eine geringe Transparenz, dann ist eine Kapillarsperre immer noch empfohlen aber nicht unbedingt erforderlich.

Ausblick

Im Speziellen konnten mit der vorliegenden Untersuchung etliche Phänomene in Zusammenhang mit Feuchtflecken geklärt werden. Die technischen Lösungen müssen ihre langfristige Wirksamkeit noch unter Beweis stellen. Der Einfluss von Salzen auf die Bildung permanenter Feuchtflecken konnte aufgezeigt werden. Noch ungeklärt ist die die Herkunft von Salzen (insbesondere von Chloriden) in bestimmten, krassen Fällen von permanenten Feuchtflecken. Es besteht die Vermutung, dass salzkontaminierte Steinlieferungen der Grund dafür sind (Kontakt mit Meerwasser, salzhaltiges Sägewasser?). Um dies zu klären müsste im konkreten Fall entsprechend genau ermittelt werden.