



CSC

Conservation Science Consulting Sàrl

La science au service des monuments et des sites
Wissenschaft im Dienst historischer Bauten und Anlagen
Science for monuments and sites

R.0014.01d

BS, BE, FR UND VD – MÜNSTER/KATHEDRALEN BASEL, BERN, FRIBOURG UND LAUSANNE

PROJEKT ZUR ÜBERWACHUNG UND NACHKONTROLLE VON FESTIGUNGSMASSNAHMEN – ERGEBNISSE DER LABORVERSUCHE

Auftraggeber

Berner Münster-Stiftung / Wasserwerkstrasse 7 / Postfach / CH-3000 Bern 13

Stiftung Basler Münsterbauhütte / St. Alban-Vorstadt 53A / CH-4052 Basel

Service des bâtiments / Grand-Rue 32 / Case Postale / CH-1701 Fribourg

Service Immeubles, Patrimoine et Logistique / Département des infrastructures / Place de la Riponne 10 / CH-1014 Lausanne



Date : Fribourg, den 23. Februar 2009

Verteiler: Siehe Liste am Schluss

Zusammenfassung: siehe folgende Seite

Französische Version: R_0014_01f.pdf

Sachbearbeiterinnen:

Dr. Bénédicte Rousset & Dr. Christine Bläuer

CSC Sàrl
Rue de l'industrie 10
CH-1700 Fribourg

Tél. : +41 26 422 12 44
e-mail: csc@conservation-science.ch
www.conservation-science.ch

Zusammenfassung:

Bis vor kurzem, war es üblich Steine, die solche strukturelle Verwitterungsformen aufwiesen, selbst dann auszutauschen, wenn sie keine statisch relevante Funktion zu erbringen hatten. Heute geht der Wille dagegen eher in die Richtung ein Maximum an historischer Substanz an Ort und Stelle zu erhalten, und entsprechend häufiger werden Konservierungsmethoden angewendet, welche darauf abzielen die Steine zu verstärken oder zu schützen. Zu den in den letzten dreissig Jahren zu diesem Zweck häufig angewandten Methoden gehören die Festigungen. Trotz dieser vergleichsweise langen Erfahrung bekunden sowohl PraktikerInnen als auch WissenschaftlerInnen etliche Mühe damit, die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit solcher Festigungsbehandlungen zu beurteilen. Im Bestreben hier Abhilfe zu schaffen wurde hier versucht, sollten den PraktikerInnen einfache, wenn möglich wenig kostspielige und zerstörungsfreie Methoden an die Hand zu geben, die es ihnen erlauben selber die benötigte Festigungsmittelmenge, die geeignete Applikationsmethode zu bestimmen und die Nachkontrolle der Massnahmen zu gewährleisten.

Zu diesem Zweck haben wir die folgenden Geräte ausgewählt: ein MOIST 200B®, zur Messung der Reflexion von Mikrowellen und ein COMBO 200®, zum Messen der elektrischen Leitfähigkeit.

wir hofften das MOIST 200B-Gerät könnte uns mittels einer zerstörungsfreien Messung auf der Oberfläche die Eindringtiefe und Menge (Wasser oder Festigungsmittel) der Flüssigkeit anzeigen, welche von der Messoberfläche her in einen Stein eingedrungen war. Unglücklicherweise zeigen die Ergebnisse, dass – zumindest für die hier untersuchten Materialien – die Werte, welche das Gerät liefert, weder zur Abschätzung der Flüssigkeitsmenge im Material, sie dies nun Wasser oder Festiger, noch zum bestimmen der Eindringtiefe gebraucht werden kann. Was das Leitfähigkeitsmessgerät COMBO 200 betrifft, welches wir dazu benutzen wollten die Ergebnisse des MOIST zu bestätigen oder zu präzisieren, so haben die im Verlaufe dieser Studie durchgeführten Versuche gezeigt, dass es in keiner Weise für zerstörungsfreie Oberflächenmessungen an Gesteinen geeignet ist.

Diese Studie hat es aber zumindest erlaubt die von den 4 Bauwerken zur Verfügung gestellten Materialien besser kennen zu lernen, d.h. die Main- und Wiesentalsandstein für das Münster Basel, den Gurtensandstein für das Münster Bern, die Molasse von Villarod für die Kathedrale Fribourg und schliesslich die Molasse Mercerie für die Kathedrale Lausanne.

Weiter erlauben es die Ergebnisse die Phänomene, welche das kapillare Eindringen von Flüssigkeiten in ein Gestein bestimmen, besser zu verstehen. Im Speziellen zeigte es sich, dass es keinerlei Laborversuch es erlauben würde die für eine optimale Festigung zu applizierende Festigungsmenge zu bestimmen. Praktisch bedeutet dies, dass die beste Art des Festigerauftrags eine Applikation bis zum „Ende des Saugens“ ist. Allerdings muss dieses „Ende des Saugens“ von Fall zu Fall genau definiert werden: wie unsere Ergebnisse zeigen, hängen die maximale pro Oberflächen- und Zeiteinheit aufnehmbare Menge an Flüssigkeit sowie ihre Eindringtiefe vom Zustand des Steins, der Applikationsmethode und der Art des Mittels ab (es ist zudem wahrscheinlich, dass die Anwesenheit von löslichen Salzen oder von früheren Konservierungsmitteln auf der Oberfläche und/oder in der Porosität, die absorbierbare Menge stark beeinflussen). Die Applikation muss deshalb immer von Fall zu Fall angepasst werden, Baustelle für Baustelle, Stein für Stein und sogar Steinteil für Steinteil bei Steinen die von ungleichmässigen oder graduellen Verwitterungen betroffen sind, d.h. in der Mehrheit der Fälle.

Deshalb kann die Applikation von Festigungsmitteln nicht „mechanisiert“ werden, das Auge und die Erfahrung des/der Applizierenden ist für diese Anpassungen absolut notwendig.

Nach dieser Studie zu schliessen, geben sämtliche Laborversuche Ergebnisse, welche allzu entfernt von der Realität sind und momentan scheint keinerlei zerstörungsfreie, kostengünstige Technik eine Kontrolle (und danach Nachkontrolle) einer Festigung *in situ* zu erlauben. Deshalb bleiben als einzige Möglichkeit genau zu wissen wie ein Festiger eindringt und sich in einem bestimmten Gestein, mit einer bestimmten Verwitterungsform verteilt, zerstörende Versuche *in situ*. Für die Sicherstellung einer intelligenten und nützlichen Nachkontrolle von Festigungsversuchen mit der Zeit, zeigen die Studien, dass es absolut wichtig ist, die Massnahmen zu dokumentieren und zwar sie treffend und brauchbar zu dokumentieren, so dass Personen die nicht mit den Massnahmen vertraut sind, sie auch nach einigen Jahren, respektive Jahrzehnten verstehen werden.

Diese Studie verleitet uns dazu, Fragen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit von Festigungsmittel auf Basis von Ethylsilikaten zu stellen. Welche Rolle spielt das Gel, welches sich nach dem Trocknen ausbildet, genau? Auf welche Weise gibt es den auseinander geratene Sandkörnern den Zusammenhalt wieder? Welches sind die „festigbaren“ Verwitterungsformen und welche können nicht gefestigt werden? Was sind die exakten Abhängigkeiten zwischen Umgebungsbedingungen und Festigungsmittel auf Basis von Ethylsilikaten? Welchen Einfluss haben die Festigeranteile, welche nach der Gelbildung hydrophob bleiben? Einige Beobachtungen scheinen zu zeigen, dass das Kieselgel, in manchen Fällen die Verwitterung von gefestigten Gesteinen beschleunigen kann, weshalb sich die Frage nach dem Einfluss des Kieselgels im Gestein selber stellt.

Diese Beobachtungen beweisen also, dass das entstandene, nicht inerte Kieselgel, in manchen Fällen, mittel- oder langfristig das Auftauchen von Schäden am gefestigten Stein beschleunigen kann, was in uns das Verlangen weckt, mehr über die unvermeidliche, zeitliche Weiterentwicklung dieses Kieselgels, seine Wechselbeziehungen mit dem Gestein und folglich der Beständigkeit der Festigungen, ob nun reell oder anscheinend, zu erfahren. Wie ist seine Wechselwirkung mit dem Stein und wie beeinflusst seine Alterung die Dauerhaftigkeit der Festigung?

Aufgrund all dieser offenen Fragen und den Ergebnissen unserer Untersuchung folgern wir, dass es nicht möglich ist die exakten Folgen einer Festigungsmassnahme mit Kieselsäureestern für die Dauerhaftigkeit der behandelten Steine vorauszusagen, und dass folglich eine solche Festigungsmassnahme nie als präventive Konservierungsmassnahme angewendet werden darf, sondern einzig und exklusive als korrektive Massnahme.

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Projektziel	6
1.2	Warum vier Münster	6
1.3	Geplantes Vorgehen	6
2	Einige Überlegungen zur Steinfestigung	7
2.1	Eindringens des Festigungsmittels in das Porennetzwerk	7
2.2	Chemische Vorgänge bei der Festigung der Sandsteine	9
3	Ausgewählte Sandsteine	10
3.1	Geologie der Materialien.....	10
3.1.1	Mainsandstein (Münster Basel, BSMA)	11
3.1.2	Wiesental Sandstein (Münster Basel, BSWi).....	11
3.1.3	Gurten (Molasse) Sandstein (Münster Bern, BEGu)	11
3.1.4	Molasse von Villarod (Kathedrale Fribourg, FRVi).....	11
3.1.5	Molasse der Mercerie (Kathedrale Lausanne, VD).....	14
3.2	Bereitgestellte Proben	14
3.3	An diesen Materialien getätigte, petrophysikalische Messungen	15
3.3.1	Gesamtporosität durch Tränkung mit Wasser unter Vakuum	15
3.3.2	Geschwindigkeit des kapillaren Saugens	16
3.3.2.1	Kapillares Saugen von Wasser (Würfel von 4 und 15 cm Kantenlänge) ...	17
3.3.2.2	Kapillares Saugen von Alkohol (Würfel mit 4 cm Kantenlänge)	19
3.3.2.3	Kapillares Saugen des Festigungsmittels (Würfel mit 4 und 15 cm Kantenlänge)	22
3.3.2.4	Rekapitulative und vergleichende Tabellen und Grafiken	25
3.3.3	Adsorptionsisotherme für Wasserdampf.....	29
3.3.4	Interpretationen, Vergleiche und Folgerungen für die Festigungen.....	32
3.3.4.1	Gesamtporosität und kapillare Eigenschaften	32
3.3.4.2	Adsorptionsisothermen	36
4	Ausgewählte Festigungsmittel	37
5	Funktionsprinzipien der verwendeten Apparate	39
5.1	Kurzes Funktionsprinzip des MOIST 200B	39
5.2	Kurzes Funktionsprinzip des COMBO 200	40
6	Messresultate	41
6.1	Mikrowellenreflexion	41
6.1.1	Messungen an den trockenen Proben	41
6.1.2	Messungen während der Wasserdampfadsorption	43
6.1.3	Messungen während des kapillaren Wassersaugens	48
6.1.4	Messungen während der Applikation der Festiger	51
6.2	Elektrische Leitfähigkeitsmessung.....	55
6.2.1	Messungen während der Wasserdampfadsorption	55
6.2.2	Messungen während des kapillaren Wassersaugens	56
7	Schlussfolgerungen und offene Fragen	57
8	Glossar	59
9	Bibliographie	60

ANNEXE 1 – EINIGE ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ZU DEN UNTERSUCHTEN SANDSTEINEN	62
A1.1 MAIN SANDSTEIN (MÜNSTER BASEL, BS).....	62
A1.2 WIESENTALSANDSTEIN (MÜNSTER BASEL, BS).....	62
A1.3 (MOLASSE-)SANDSTEIN VOM GURTEN (MÜNSTER BERN, BE).....	63
A1.4 MOLASSE VON VILLARLOD (KATHEDRALE FRIBOURG, FR).....	63
A1.5 MOLASSE DER MERCERIE (KATHEDRALE LAUSANNE, VD)	64
A1.6 BIBLIOGRAPHIE ZU ANNEX 1	65
ANNEXE 2 - LES MESURES PÉTROPHYSIQUES EFFECTUÉES	67
A2.1 MESURE DE LA POROSITE "TOTALE"	67
A2.2 IMBIBITION CAPILLAIRE	68
A2.3 ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU	71
A2.4 BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE 2	74
ANNEXE 3 - MODE OPERATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU MOIST 200B.....	75
A3.1 LIMITES D'UTILISATION.....	75
A3.2 GENERALITES CONCERNANT LES MESURES ET LES PRECAUTIONS PRISES.....	77
A3.3 MESURES EFFECTUEES SUR LES ECHANTILLONS SECS.....	78
A3.4 mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau	78
A3.5 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE A L'EAU	79
A3.6 MESURES EFFECTUEES PENDANT ET APRES APPLICATION DES CONSOLIDANTS	80
ANNEXE 4 - MODE OPERATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU COMBO 200	82
A4.1 LIMITES D'UTILISATION.....	82
A4.2 GENERALITES CONCERNANT LES MESURES ET LES PRECAUTIONS PRISES.....	82
A4.3 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU	83
A4.4 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE A L'EAU	84

1 Einleitung

1.1 Projektziel

Bausteine die an Bauwerken der ausgesetzt sind zeigen verschiedene Verwitterungsformen, wie Schalenbildung oder Absanden, welche durch einen mehr oder weniger grossen Verlust ihres inneren Zusammenhalts gekennzeichnet sind. Diese strukturellen Veränderungen führen mit der Zeit zu einem manchmal nicht unerheblichen Substanzverlust.

Bis vor kurzem, war es üblich Steine, die solche strukturelle Verwitterungsformen aufwiesen, selbst dann auszutauschen, wenn sie keine statisch relevante Funktion zu erbringen hatten. Heute geht der Wille dagegen eher in die Richtung ein Maximum an historischer Substanz an Ort und Stelle zu erhalten, und entsprechend häufiger werden Konservierungsmethoden angewendet, welche darauf abzielen die Steine zu verstärken oder zu schützen. Zu den in den letzten dreissig Jahren zu diesem Zweck häufig angewandten Methoden gehören die Festigungen (Amoroso & Fassina, 1983; Price, 2006).

Trotz der vergleichsweise langen Erfahrung, bekunden sowohl PraktikerInnen als auch WissenschaftlerInnen etliche Mühe damit, die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit solcher Festigungsbehandlungen zu beurteilen. Tatsächlich wurden frühere Festigungsmassnahmen meist kaum dokumentiert (Bläuer et al. 1988), so dass die Beobachtungen, welche an vor einigen Jahrzehnten behandelten Bauten gemacht werden können, unmöglich zu erklären sind.

Es erschien deshalb angebracht den Anwendern von Festigungsmitteln zu helfen, ihre Massnahmen so zu systematisieren und zu dokumentieren, dass eine Nachkontrolle der Behandlung in Zukunft dazu verhelfen kann die Technik besser zu beherrschen.

Zu diesem Zweck sollten den Praktikern einfache, wenn möglich wenig kostspielige und zerstörungsfreie Methoden an die Hand gegeben werden, die es ihnen erlauben selber die benötigte Festigungsmittelmenge, die geeignete Applikationsmethode zu bestimmen und die Nachkontrolle der Massnahmen zu gewährleisten. Parallel dazu wird es die Entwicklung einer ad hoc Dokumentation erlauben, in Zukunft die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der durchgeführten Behandlungen genauer zu beurteilen.

Das hier vorgestellte Projekt stellt die erste Etappe dieses Vorhabens dar.

1.2 Warum vier Münster

Die Münster von Basel, Bern, Fribourg und Lausanne sind Bauten aus Sandstein, detritischen Sedimentgesteinen die im Wesentlichen aus Silikaten (Quarz und Feldspat) bestehen und ähnliche Porengefüge aufweisen. Infolgedessen sind die Verwitterungsformen relativ ähnlich – obwohl leicht unterschiedlich – und folglich, sind auch die Konservierungsprobleme sehr ähnlich. So erschien es uns lohnenswert, dass sich die Verantwortlichen der vier Bauwerke zusammenfinden und ihr Wissen und ihre finanziellen Ressourcen zusammenlegen, um vergleichbare Probleme zu lösen.

1.3 Geplantes Vorgehen

Um das festgelegte Ziel zu erreichen haben wir Apparate ausgewählt die einfach in der Anwendung sowie vergleichsweise billig sind und es erlauben zerstörungsfreie Messungen zu machen: ein MOIST 200B®, zur Messung der Reflexion von Mikrowellen und ein COMBO 200®, zum Messen der elektrischen Leitfähigkeit.

Diese auf dem Markt zum Nachweis von feuchten Bereichen im Mauerwerk erhältlichen Apparate, wurden ausgewählt, weil ihr uns Funktionsprinzip nach einer Literaturstudie (CSC, 2007) dienlich erschien:

1. die am besten angepassten Applikationsmethode für das Festigungsmittel zu wählen und, vor der Massnahme, die für eine optimales Festigungsergebnis benötigte Festigermenge festzulegen;
2. die Eindringtiefe des Festigungsmittels während der Massnahme zu kontrollieren und anzupassen;
3. die Auswirkungen der Massnahme im Verlaufe der Zeit zu verfolgen.

2 Einige Überlegungen zur Steinfestigung

Zum besseren Verständnis der Steinfestigung, erschien es wichtig, einige theoretische Aspekte sowohl betreffend der Vorgänge beim Eindringen des Festigungsmittels ins Material als auch der danach im Porensystem ablaufenden chemischen Reaktionen zu kennen.

Tatsächlich erlaubt es die Kenntnis des Vorgangs des Eindringens des Festigers eine dem Stein und der zu behandelnden Verwitterungstiefe angepasste Applikationstechnik zu wählen, wohingegen die Kenntnis der chemischen Reaktionen es erlaubt zu wissen, welche Umgebungsbedingungen herrschen müssen, damit eine gute Festigungswirkung erzielt werden kann.

2.1 Eindringens des Festigungsmittels in das Porennetzwerk

Die Festigungsmittel, als Flüssigkeit mit Pinsel oder durch zerstäuben unter niedrigem Druck auf die zu behandelnde Gesteinsoberfläche gebracht, müssen mittels Kapillarität aufgenommen und durch das Porennetzwerk bis in die nötige Tiefe transportiert werden.

Der Vorgang der Kapillarität hängt von den Kapillarspannungen ab, welche ihrerseits von der Viskosität der Flüssigkeit, ihrer Affinität zu den Feststoffoberflächen denen sie begegnet, der Grösse und geometrischen Anordnung der Poren abhängen.

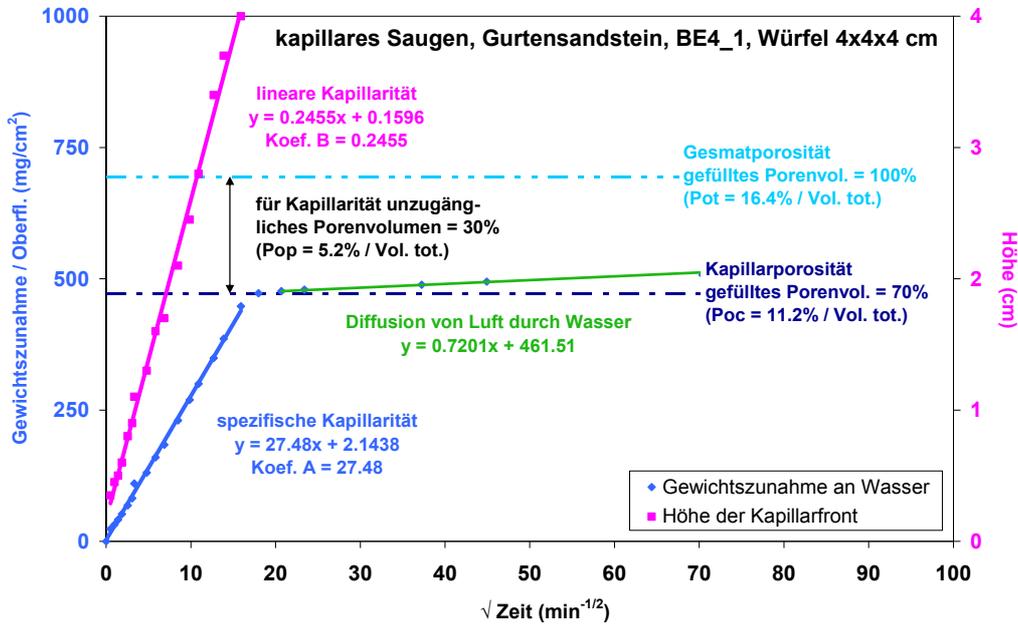
Was auch immer die betrachtete Flüssigkeit ist, kann das kapillare Eindringen unterteilt werden in die spezifische Kapillarität, welche die Masse an Flüssigkeit darstellt, die pro Zeiteinheit in das Porennetzwerk eindringen kann, und die lineare Kapillarität, welche die von der Kapillarfront der Flüssigkeit im porösen Material erreichte Eindringtiefe nach einer bestimmten Zeit definiert. Beide Phänomene verlaufen linear zur Quadratwurzel der Zeit (s. Figuren 1 und 2).

Für ein gegebenes Porennetzwerk, eine bestimmte Flüssigkeit und eine gegebene Applikationsoberfläche, kann die Menge an Flüssigkeit die durch Kapillarität während einem bestimmten Zeitintervall t aufgenommen werden kann, nicht grösser sein als ein begrenztes Volumen respektive Gewicht, welches der Kapillarporosität P_{0c} entspricht. Da die durch Kapillarität in das Porennetzwerk eines Materials aufgenommene Flüssigkeit unweigerlich Luftblasen in den Makroporen einschliesst, ist die Kapillarporosität systematisch kleiner als die Gesamtporosität P_{0t} (s. Figur 1).

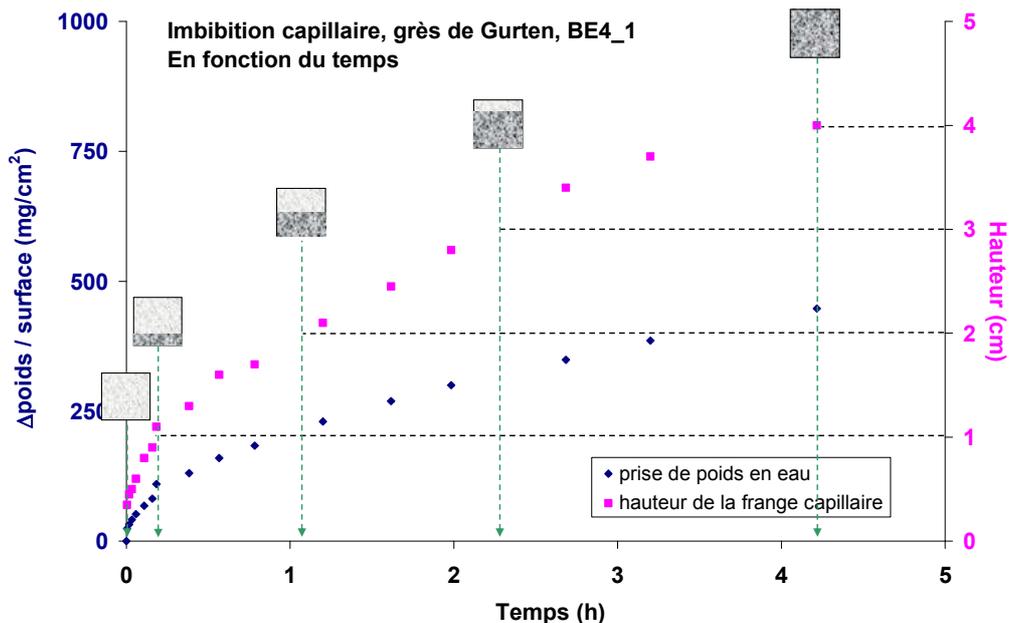
Für die Festigung bedeutet dies konkret:

- dass es nutzlos ist eine Menge an Festigungsmittel zu applizieren, welche grösser ist als was der Stein pro Zeit und Oberflächeneinheit im Stande ist aufzunehmen;

- dass es zum Erreichen einer bestimmten Eindringtiefe, theoretisch möglich ist, die Menge an Festigungsmittel zu berechnen die appliziert werden muss und wie diese Applikation erfolgen muss.



Figur 1. Typische Kapillaritätskurven für eine Gurtensandsteinprobe (Würfel von 4 cm Kantenlänge): die spezifische (blaue Kurve) und lineare (rosa Kurve) Kapillaritäten werden als Funktion der Quadratwurzel der Zeit dargestellt. Weiter werden die Gesamtporosität (P_{ot}), die Kapillarporosität (P_{oc}) sowie die, gefangene Porosität genannte Differenz ($P_{op} = P_{ot} - P_{oc}$). Zum Zeitpunkt wo die Kapillarfront zuoberst am Würfel anlangt, ist das gesamte Porenvolumen, welches durch diesen Vorgang gefüllt werden kann, durch die Flüssigkeit eingenommen, dies definiert die Kapillarporosität. Wenn die Flüssigkeitszufuhr nicht unterbrochen wird, kann die im Porenraum gefangene Luft langsam durch Diffusion mit der Flüssigkeit ausgetauscht werden (grüne Kurve).



Figur 2. Gleiche Kapillaritätskurve wie in Figur 1 aber als Funktion der Zeit dargestellt. Die Quadrate zeigen, nach welchem Zeitintervall die Kapillarfront, oder Eindringtiefe, 1, 2, 3 respektive 4 cm erreicht.

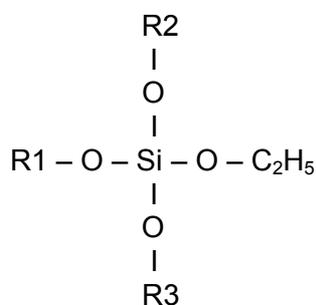
2.2 Chemische Vorgänge bei der Festigung der Sandsteine

Wir interessieren uns hier einzig für die Festigung von Sandsteinen und im Speziellen für die Festigung mit Hilfe von Ethylsilikaten oder Kieselsäureester, denn diese Produktfamilie von Festigungsmitteln wird an den vier hier studierten Bauwerken angewendet.¹

Die Ethylsilikate sind die zurzeit am häufigsten zur Festigung von absandenden Sandsteinen verwendeten Chemikalien, aufgrund der chemischen Struktur des sich im Porenraum bildenden Gels, welche Ähnlichkeit mit derjenigen von Quarz, dem in Sandsteinen vorherrschenden Mineral, hat, aber auch aufgrund ihres geringen Molekulargewichts, was es ihnen ermöglicht Eindringtiefen zu erreichen, welche im Allgemeinen genügen, um die Schäden zu behandeln.² Weiter werden diese Materialien durch ultraviolette Strahlung nicht verändert, wie dies für Harze und andere organische Produkte, welche für Festigungen verwendet werden, der Fall ist.

Es handelt sich um chemische Verbindungen der Familie der Silane, also von Molekülen, welche aus einem zentralen Siliziumatom (Si) das über eine Sauerstoff-Silizium-Verbindung Si-O verbunden ist mit einem oder mehreren Ethyl-Radikalen (-C₂H₅) und anderen mehr oder weniger komplexen Kohlenwasserstoffradikalen (s. Figur 3).

Diese Verbindungen, normalerweise zusätzlich mit einem Katalysator bestückt, werden als Flüssigkeit mit geringer Viskosität auf die zu behandelnde Gesteinsoberfläche aufgebracht, wo sie mittels Kapillarität eindringen. Die geringe, im Porennetzwerk vorhandene Menge an Wasser - adsorbiert an den Porenwänden - hydrolysiert die Ethylsilikatmoleküle (s. Figur 4), wodurch Ethanol freigesetzt wird, das sich verflüchtigt. Daraufhin kondensieren sich die hydrolysierten Moleküle und bilden das Polymer oder das Kieselsäure-Gel, welches die Porenwände bedeckt und dadurch eine neue Verbindung zwischen den Körnern bildet. Nach der Polymerisation des Festigungsmittels bleibt die Porosität weitgehend offen.



Figur 3. Grundformel der Monomere des Ethylsilikats. Im Fall der in dieser Studie verwendeten Festiger, sind die Radikale R1, R2 und R3 Ethyl-Radikale C₂H₅, es handelt sich also um Tetraethylsilikate oder Tetraethoxysilane (TEOS).

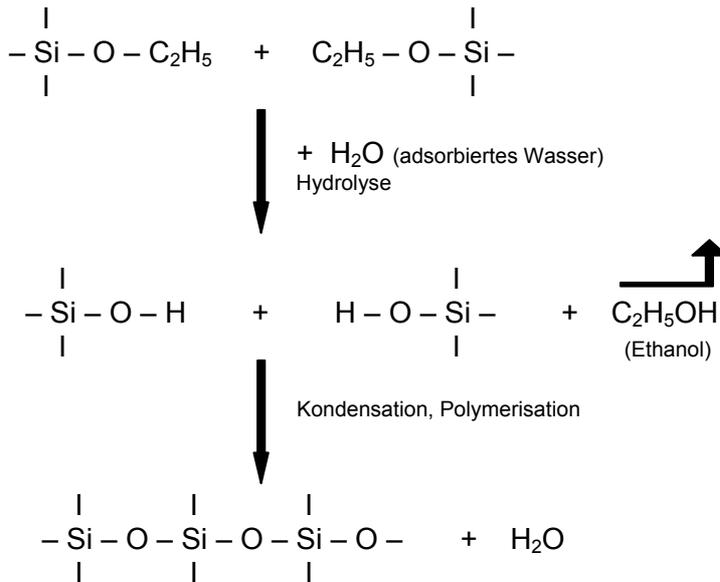
Diese chemischen Reaktionen sind ziemlich abhängig von den Temperaturbedingungen (je nach Produktlieferfirma in etwa zwischen 10 und 20°C) aber auch und vor allem von den Feuchteverhältnissen. Tatsächlich sind die Kohlenwasserstoffradikale der verwendeten Produkte hydrophob. Damit diese Hydrophobizität nur temporär ist, muss sichergestellt werden,

¹ Für eine Auflistung der verschiedenen Typen von Festigungsmitteln die zurzeit existieren, sei hier auf den Überblick von Price (2006) oder das Buch von Horie (1987) verwiesen.

² Die Kleinheit der Moleküle ist ein Vorteil bezüglich der Eindringtiefe die erreicht werden kann im Fall von wenig intensivem Absanden, aber sie wird zum „Nachteil“, wenn im Material grosse Unregelmässigkeiten auftauchen. In diesen Fällen sind diese Festigungsmittel alleine nicht mehr wirksam.

dass die Mehrheit dieser Radikale hydrolysiert werden kann. Dazu muss in den Porenräumen der Steine vor, während und nach der Behandlung eine genügende Menge an Wasserdampf (mehr oder weniger an den Porenwänden angelagert) vorhanden sein, Wasserdampf, der die Hydrolysereaktion der Kohlenwasserstoffradikale ermöglicht, und als Folge davon die Bildung von durchgehenden Polymerfilmen.

Hingegen dürfen die Porenräume des Gesteins vor, während und nach der Behandlung kein flüssiges Wasser enthalten, da flüssiges Wasser die Tendenz hat vielfach einzelne Fragmente des Polymers oder Oligomers zu isolieren, welche für immer hydrophob bleiben (Wendler, 2008 ; Wheeler, 2005).



Figur 4. Chemische Reaktionen die im Porennetzwerk der Gesteine nach der Applikation des Ethylsilikats ablaufen: Hydrolyse der Monomere in Anwesenheit von adsorbiertem Wasser mit Freisetzung von Ethanol und danach Kondensation oder Polymerisation der hydrolysierten Moleküle.

Praktisch bedeutet dies, dass:

- die Umgebungstemperatur während der Behandlung ungefähr zwischen 10 und 20°C liegen muss;
- der zu behandelnde Stein vor, während und nach der Applikation des Ethylsilikats „trocken“ sein muss (er darf kein Wasser in flüssiger Form enthalten);
- die relative Luftfeuchtigkeit vor, während und nach der Applikation in der Umgebung mehr oder weniger gleich 50% betragen muss, damit die im Porennetzwerk vorhandene Wassermenge genügend ist um die Hydrolyse zu erlauben;
- die Feuchtigkeit im Innern des Steins über den ganzen Bereich der Eindringtiefe des Festigungsmittels so gleichmässig wie möglich verteilt sein muss, damit die Bildung von Schichten mit unterschiedlicher Hydrophobizität vermieden wird.

3 Ausgewählte Sandsteine

3.1 Geologie der Materialien

Jedes Münster/jede Kathedrale hat uns Proben von einem einzigen Gesteinstyp anvertraut, welcher einem Steinmaterial entspricht, das am Bau regelmässig gefestigt wird und an wel-

chem in Zukunft die Möglichkeit bestehen wird, in situ Untersuchungen durchzuführen. Ausnahmsweise haben wir akzeptiert zwei Sandsteine für das Basler Münster zu testen. Im Annex 1 werden die wenigen Informationen zusammengefasst, welche in der Literatur zu den 5 ausgewählten Sandsteinen gefunden werden können. Diese Angaben werden nach den folgenden 3 Hauptthemen gruppiert: „Geologie, Mineralogie, Petrographie“, „Petrophysikalische und mechanische Eigenschaften“ und „Verwitterungsformen“.

3.1.1 Mainsandstein (Münster Basel, BSMA)

Dieser Sandstein entstand durch die Verkittung von Sanden die im kontinentalen Sedimentationsbecken der unteren Trias (Mesozoikum) abgelagert worden sind, oder genauer gesagt im Buntsandstein (vor etwa 250-245 Millionen Jahren), in der Region des Mains, Bundesland Hessen, Deutschland. Er ist im Wesentlichen aus Quarz, Feldspat sowie seltenen Sekundärmineralien wie Eisenoxiden, die ihm die rote Farbe geben, Tonmineralien und Glimmern zusammengesetzt (s. Figur 5).

3.1.2 Wiesental Sandstein (Münster Basel, BSWi)

Der Wiesental Sandstein ist ebenfalls ein roter Sandstein aus dem Buntsandstein (250-245 Mio. J.) aus Deutschland. Er stammt aus dem Bundesland Baden-Württemberg, im Süden des Schwarzwalds, etwa 50 km von Basel. Die mineralogische Zusammensetzung des Wiesental Sandsteins ist sehr ähnlich derjenigen des Mainsandsteins (s. Figur 6), aber Bezug nehmend auf die hier vorliegenden Proben, kann festgestellt werden, dass ersterer deutlich weniger homogen ist als letzterer.

3.1.3 Gurten (Molasse) Sandstein (Münster Bern, BEGu)

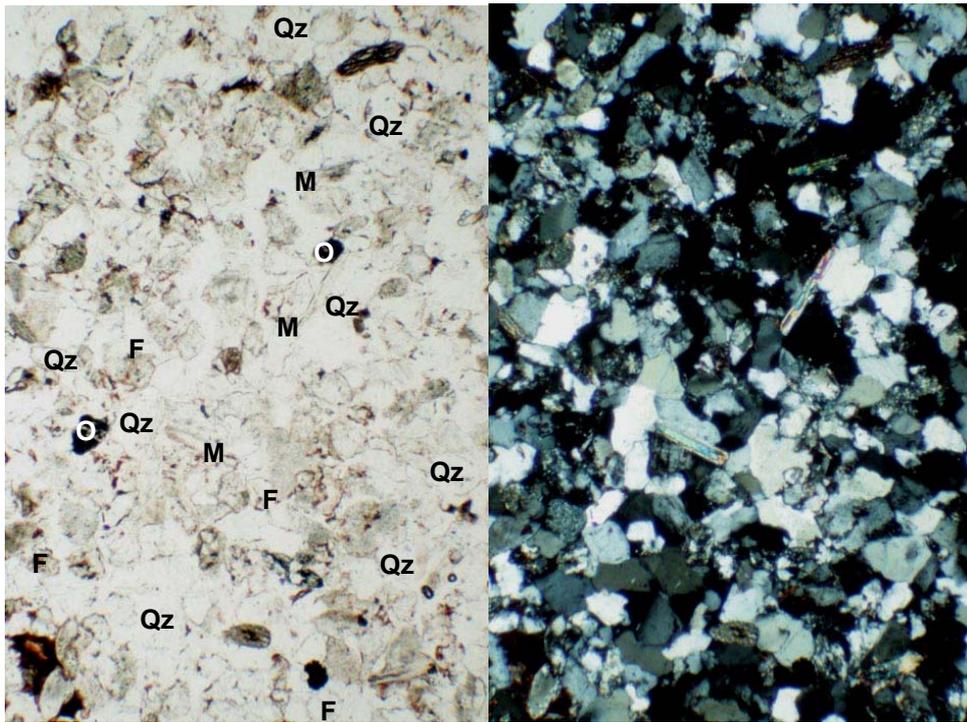
Der Gurten Sandstein – oder Berner Molassesandstein – ist eine Molasse des Burdigalien (16-20 Mio. J. ; Tertiär, Miozän), das heisst ein grau-blauer oder grün-gelber Sandstein mit kalzitischem Bindemittel, der entlang des Alpenrandes während ihrer Auffaltung durch Verkittung von mergeligen, in ein tropisches Meer abgelagerten Sanden entstanden ist. Er wurde am Berner Hausberg, dem Gurten abgebaut. Er ist hauptsächlich aus Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücken³, einigen Bioklasten⁴, Tonmineralien, Eisen-Oxy-Hydroxide und Glimmern aufgebaut und mit einer kalzitischen Phase zementiert (s. Figur 7). Die grünliche Färbung ist der Anwesenheit von Glaukonit, einem grünen, tonigen, für marine Ablagerungen typischen Mineral, zu verdanken. Während gelbliche Farbtöne sind auf die Oxidation der eisenhaltigen Mineralien zurückzuführen sind.

3.1.4 Molasse von Villarod (Kathedrale Fribourg, FRVi)

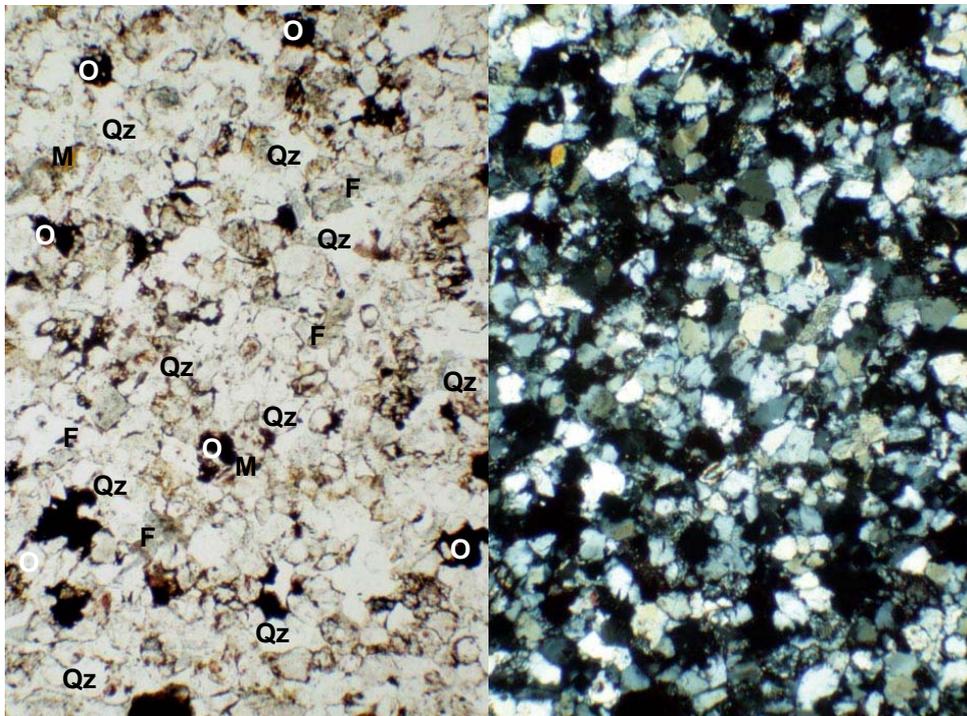
Die Molasse von Villarod – oder Freiburger Molasse -, ist ebenfalls eine Molasse des Burdigalien (16-20 Mio. J.). Sie hat folglich den gleichen geologischen Ursprung wie die Berner Molasse. Sie wird in der Gemeinde Villarsel-le-Gibloux im Kanton Freiburg abgebaut. Ihre mineralogische Zusammensetzung ist sehr ähnlich derjenigen des Gurtensandsteins, obwohl die Korngrössen ihrer Bestandteile, zumindest in den vorhandenen Proben, manchmal sehr verschieden und Bioklasten in der Molasse von Villarod sehr viel häufiger sind (s. Figur 8).

³ Gesteinsbruchstück = resedimentiertes Bruchstück eines Kristallin- oder Sedimentgesteins.

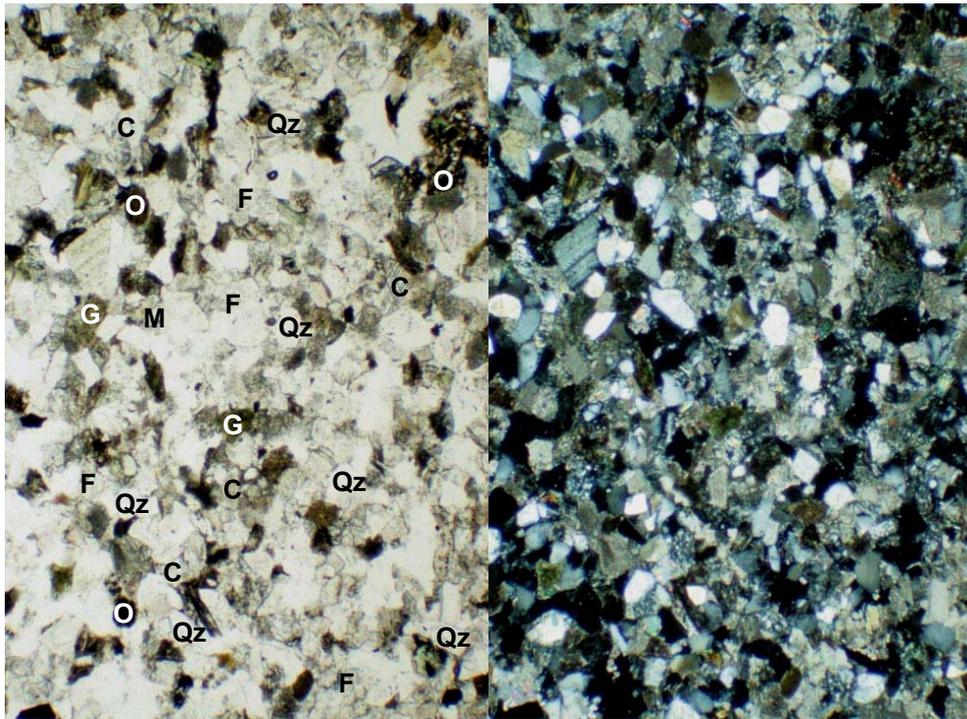
⁴ Bioklast = Fossil oder Fossilbruchstück, pflanzlichen oder tierischen Ursprungs.



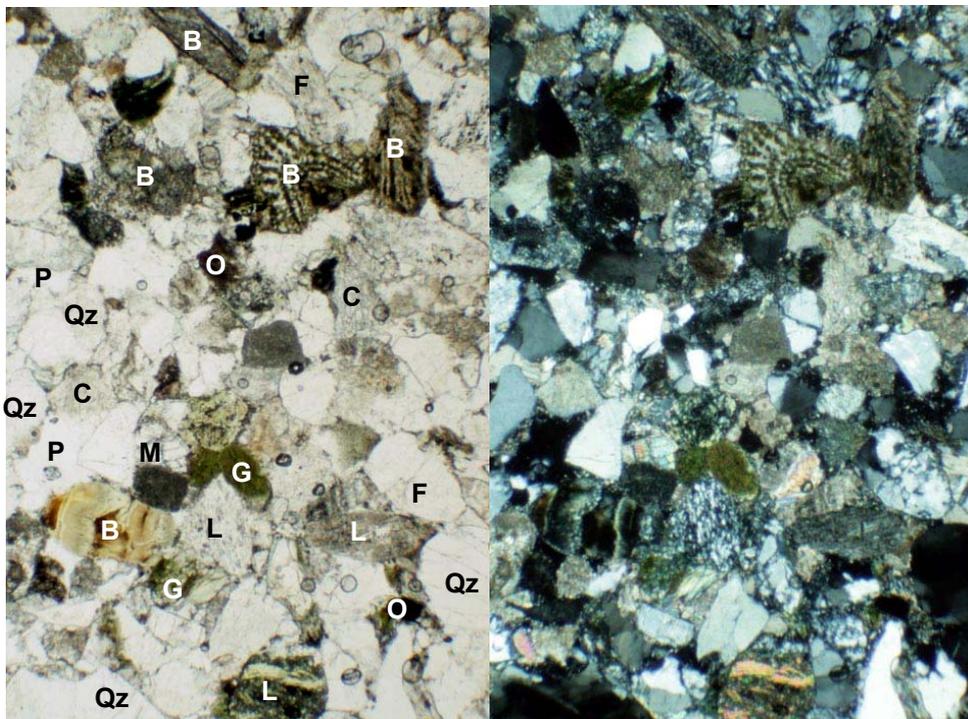
Figur 5. Mainsandstein beobachtet im Polarisationsmikroskop unter einfacher Polarisation (links: natürliche Farben) und unter gekreuzten Polarisatoren (rechts: Interferenzfarben). Bildhöhe: 2,7 mm. Qz = Quarz, F = Feldspat, M = Glimmer, O = Aggregate aus Ton und Oxy-Hydroxyden.



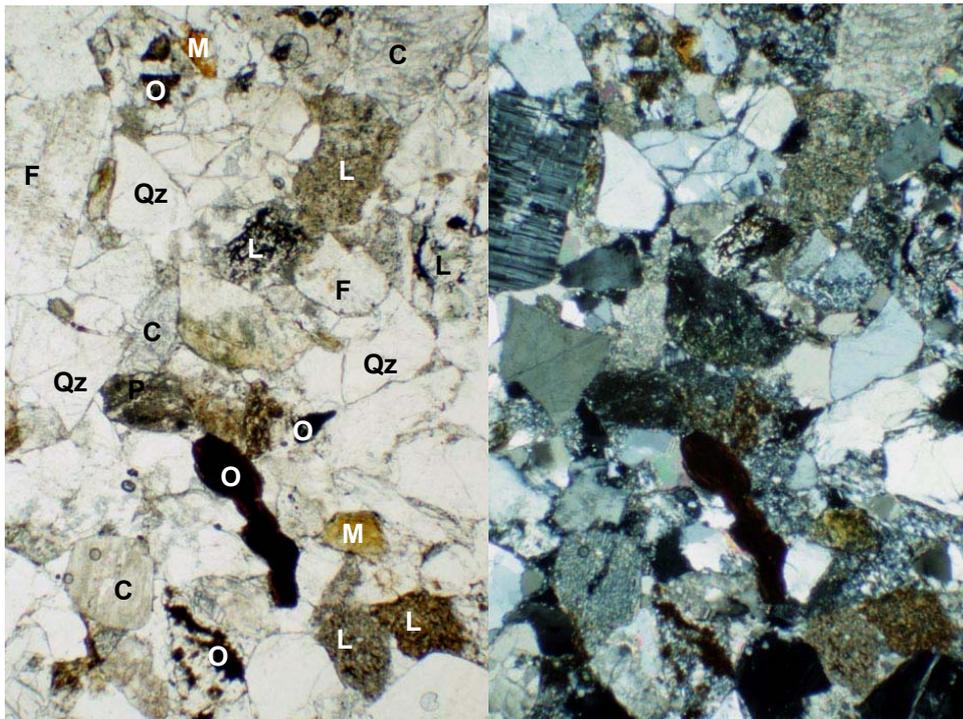
Figur 6. Wiesental Sandstein beobachtet im Polarisationsmikroskop unter einfacher Polarisation (links: natürliche Farben) und unter gekreuzten Polarisatoren (rechts: Interferenzfarben). Bildhöhe: 2,7 mm. Qz = Quarz, F = Feldspat, M = Glimmer, O = Aggregate aus Ton und Oxy-Hydroxyden



Figur 7. Gurtensandstein beobachtet im Polarisationsmikroskop unter einfacher Polarisation (links: natürliche Farben) und unter gekreuzten Polarisatoren (rechts: Interferenzfarben). Bildhöhe: 2,7 mm. Qz = Quarz, F = Feldspat, M = Glimmer, O = Aggregate aus Ton und Oxy-Hydroxyden, C = Kalzit, G = Glaukonit



Figur 8. Villarlod Sandstein beobachtet im Polarisationsmikroskop unter einfacher Polarisation (links: natürliche Farben) und unter gekreuzten Polarisatoren (rechts: Interferenzfarben). Bildhöhe: 2,7 mm. Qz = Quarz, F = Feldspat, M = Glimmer, O = Aggregate aus Ton und Oxy-Hydroxyden, C = Kalzit, G = Glaukonit, B = Bioklast, L = Gesteinsbruchstück, P = Pore



Figur 9. Molasse der Mercerie beobachtet im Polarisationsmikroskop unter einfacher Polarisation (links: natürliche Farben) und unter gekreuzten Polarisatoren (rechts: Interferenzfarben). Bildhöhe: 2,7 mm. Qz = Quarz, F = Feldspat, M = Glimmer, O = Aggregate aus Ton und Oxy-Hydroxyden, C = Kalzit, L = Gesteinsbruchstück, P = Pore

3.1.5 Molasse der Mercerie (Kathedrale Lausanne, VD)

Die Molasse der Mercerie – oder graue Molasse von Lausanne – ist eine Molasse aus dem Aquitanien (20-24 Mio.J., Teritär, Miozän). Es handelt sich um einen grau-blauen oder grau-gelblichen, feldspatreichen Sandstein mit kalzitischem Bindemittel, abgelagert in Form von Sand und Mergel in einem Stillgewässer (See), am Nordrand der Alpen während ihrer Faltung und nach dem Rückzug des Meeres in welches die Burdigalienmolassen sedimentiert worden waren. Diese Molasse ist in der Nähe der Lokalität „Mercerie“ in der Stadt Lausanne abgebaut worden. Sie ist im Wesentlichen aus Quarz, Feldspat, Gesteinsbruchstücken und Bioklasten, Tonen und Glimmern aufgebaut, und durch eine kalzitische Phase zementiert (s. Figur 9). Diese Molasse ist generell viel weniger homogen, als die Meeresmolassen des Burdigaliens. Diese Heterogenität, charakterisiert durch mehr oder weniger grobe Korngrössen, kann an den vorhandenen Proben sehr gut beobachtet werden.

3.2 Bereitgestellte Proben

Die Charakterisierung der Materialien wurde an Würfeln von 4 cm Kantenlänge vorgenommen, während die Messungen mit den Apparaten MOIST 200B® und COMBO 200® an Würfeln der Kantenlänge 15 cm durchgeführt wurden. Weiter wurden Prismen mit quadratischer Grundfläche von 15 cm Seitenlänge und unterschiedlichen Höhen sowie aus den gewählten Steinen hergestellter, grober Sand geliefert, um damit Schalenbildungen zu simulieren, welche durch oberflächenparallele, mehr oder weniger leere respektive mit verwittertem Steinmaterial gefüllte Risse in Tiefen von 1, 2.5, 4 und 6 cm gekennzeichnet sind. Anzahl und Art der pro Material gelieferten Proben werden in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bereitgestellte Proben	BS Maintal	BS Wiesental	BE Gurten	FR Villarlod	VD Mercerie
Prismen (cm)					
4x4x4	10	18	21	20	14
15x15x15	6	13	10	10	9
15x15x1	-	2	1	1	1
15x15x2.5	-	1	1	1	1
15x15x4	-	1	1	1	1
15x15x6	-	1	1	1	1
15x15x9	-	1	1	1	1
15x15x11	-	1	1	1	1
15x15x12.5	-	1	1	1	1
15x15x14	-	1	1	1	2
Grober Sand	-	≈ 1 kg	≈ 1 kg	≈ 1 kg	≈ 1 kg

Tabelle 1. Anzahl und Art der von den 4 Münster/Kathedralen gelieferten Proben.

3.3 An diesen Materialien getätigte, petrophysikalische Messungen

Mit dem Ziel die gewählten Materialien zu Charakterisieren, wurden die folgenden Messungen durchgeführt:

- Gesamtporosität durch Tränkung mit Wasser unter Vakuum;
- Kinetik der kapillaren Wasser-, Alkohol- und Festigungsmittelaufnahme;
- Adsorption von Wasserdampf.

Die verwendeten Methoden werden im Anhang 2 ausführlich erörtert. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargelegt.

3.3.1 Gesamtporosität durch Tränkung mit Wasser unter Vakuum

Die Messungen der Gesamtporosität wurden an sämtlichen gelieferten Würfeln von 4 cm Kantenlänge durchgeführt.

Die für die Gesamtheit der Würfel jeder Fazies erhaltenen Mittelwerte sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Da sowohl beim Wiesental Sandstein als auch bei der Molasse der Mercerie je zwei Unterfazies zu erkennen waren (Wiesental "homogen" und "heterogen" respektive Mercerie "grob" und "fein"), wurden die repräsentativen Werte dieser Unterfazies in den Tabellen 3 respektive 4 getrennt aufgeführt.

Gesamtporosität	Anz. Pr.	Mittelw. (%)	Std.Abw. (%)	Min. (%)	Max. (%)
BS / Maintal	10	15.8	0.2	15.4	16.0
BS / Wiesental	18	19.6	3.2	13.8	23.1
BE / Gurten	21	16.2	0.2	15.9	16.6
FR / Villarlod	20	15.8	0.2	15.6	16.0
VD / Mercerie	14	11.5	1.8	8.6	12.9

Tabelle 2. Mittelwerte der gemessenen Gesamtporositäten aller Würfel mit 4 cm Kantenlänge.

Gesamtporo.	Anz. Pr.	Mittelw. (%)	Std.Abw. (%)	Min. (%)	Max. (%)
BS / Wiesental "homogen"	7	22.7	0.3	22.4	23.1
BS / Wiesental "heterogen"	11	17.6	2.6	13.8	21.2

Tabelle 3. Mittelwerte der in den beiden Unterfazis des Wiesental Sandsteins (BS) gemessenen Gesamtporositäten. Messungen an den Würfeln von 4 cm Kantenlänge.

Gesamtporo.	Anz. Pr.	Mittelw. (%)	Std.Abw. (%)	Min. (%)	Max. (%)
VD / Mercerie "grob"	10	12.6	0.4	11.6	12.9
VD / Mercerie "fein"	4	8.9	0.5	8.6	9.6

Tabelle 4. Mittelwerte der in den beiden Unterfazis der Molasse on der Mercerie (VD) gemessenen Gesamtporositäten. Messungen an den Würfeln von 4 cm Kantenlänge.

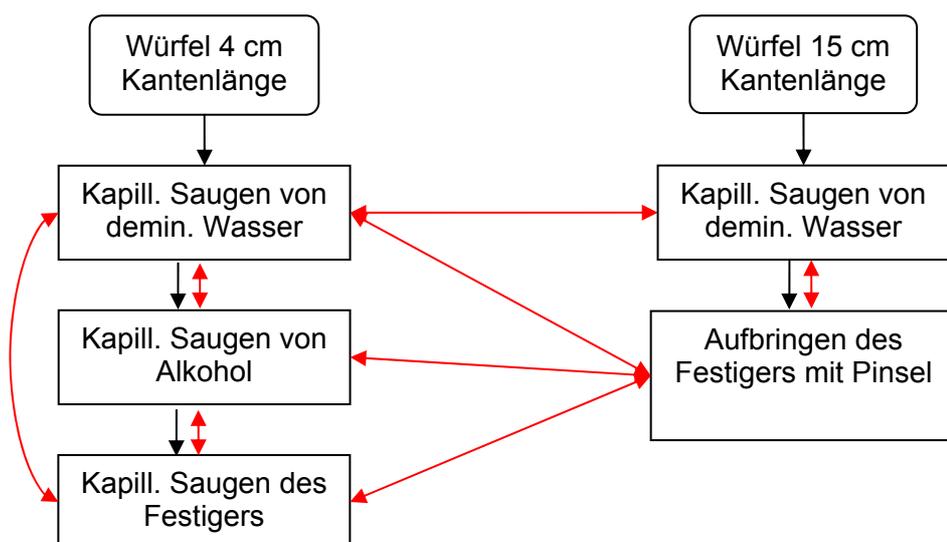
3.3.2 Geschwindigkeit des kapillaren Saugens

Zuerst wurden die kapillaren Eigenschaften der verschiedenen ausgewählten Gesteine mittels demineralisiertem Wasser auf Würfeln von 4 cm Kantenlänge gemessen.

Zum Vergleich der Affinität der Steine gegenüber Wasser, Alkohol und Festigungsmittel, wurden einige Würfel ausgewählt, um an ihnen die gleichen Messungen mit Alkohol und danach mit Festigungsmittel durchzuführen.

Danach wurden kapillare Saugversuche auch an einigen Würfeln mit 15 cm Kantenlänge durchgeführt um zu überprüfen ob die Messungen an den Würfeln von 4 cm Kantenlänge auch für grössere Proben repräsentativ seien. Anschliessend wurde eine Simulation der Festigung vorgenommen, bei welcher das Festigungsmittel mittels Pinsel auf die grossen Würfel aufgestrichen wurde. Dabei wurde die Kinetik der Gewichtszunahme verfolgt. Die Ergebnisse werden im § 3.3.2.3 dargestellt.

Sämtliche Messungen werden in Figur 10 zusammengefasst und in § 3.3.2.4 unter einander verglichen.



Figur 10. Schematische Darstellung der verschiedenen durchgeführten Messungen des kapillaren Saugens. Rote Pfeile = Vergleich entsprechender Messungen.

3.3.2.1 Kapillares Saugen von Wasser (Würfel von 4 und 15 cm Kantenlänge)

Kapillares Saugen von Wasser						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	10	10	10	10	3	3
Mittelw.	29.8	0.355	9.5	60.4	31.3	0.364
Std.Abw.	1.3	0.015	0.0	0.7	0.9	0.008
Minimum	27.5	0.333	9.5	59.3	30.8	0.356
Maximum	31.3	0.373	9.6	61.6	32.3	0.371

Tabelle 5. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 und 15 cm Kantenlänge, am Mainsandstein. A: spezifischer Kapillarkoeffizient; B: linearer Kapillarkoeffizient; P_{0c}: Kapillarporosität = am Ende des kapillaren Saugens mit Wasser gefülltes Porenvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen der Probe; S: Hirschwaldkoeffizient oder kapillarer Sättigungswert = P_{0c}/P_{0t} x100 wo P_{0t} = Gesamtporosität = Porenvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen der Probe.

Kapillares Saugen von Wasser						
BS Wiesental homogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	7	7	7	7	-	-
Mittelw.	102.2	0.781	14.5	64.0	-	-
Std.Abw.	9.6	0.062	0.2	0.4	-	-
Minimum	92.6	0.720	14.2	63.3	-	-
Maximum	120.4	0.892	14.9	64.4	-	-

Tabelle 6. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, an der homogenen Fazies des Wiesentalsandsteins.

Kapillares Saugen von Wasser						
BS Wiesental heterogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	11	11	11	11	5	5
Mittelw.	20.1	0.245	12.3	71.2	26.0	0.227
Std.Abw.	7.7	0.092	0.5	8.2	5.3	0.042
Minimum	12.6	0.123	11.4	61.2	20.9	0.178
Maximum	39.9	0.398	13.0	87.7	34.6	0.294

Tabelle 7. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 und 15 cm Kantenlänge, an der heterogenen Fazies des Wiesentalsandsteins. Die Heterogenität führt manchmal zu mehreren aufeinanderfolgenden Kinetiken des kapillaren Saugens, welche jede typisch ist für eine Gesteinsschicht mit von der Nachbarschicht verschiedenen Kapillareigenschaften. Für mehr Klarheit, wurden diese aufeinanderfolgenden Kinetiken gemittelt.

Kapillares Saugen von Wasser						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	15	15	15	15	4	4
Mittelw.	26.8	0.247	11.0	67.7	28.9	0.284
Std.Abw.	0.8	0.009	0.2	0.8	3.9	0.028
Minimum	25.6	0.234	10.7	65.7	26.6	0.261
Maximum	28.5	0.271	11.3	68.7	34.8	0.324

Tabelle 8. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 und 15 cm Kantenlänge, am Gurtensandstein.

Kapillares Saugen von Wasser						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	12	12	12	12	3	3
Mittelw.	34.7	0.298	11.1	70.6	31.1	0.291
Std.Abw.	1.5	0.012	0.2	1.0	4.3	0.035
Minimum	32.3	0.279	10.6	67.5	26.7	0.255
Maximum	37.3	0.323	11.3	71.3	35.3	0.325

Tabelle 9. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 und 15 cm Kantenlänge, an der Molasse von Villarlod.

Kapillares Saugen von Wasser						
VD Mercerie grob	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	10	10	10	10	-	-
Mittelw.	28.4	0.361	8.0	64.1	-	-
Std.Abw.	1.8	0.026	0.2	1.1	-	-
Minimum	24.0	0.314	7.7	62.9	-	-
Maximum	29.8	0.400	8.3	66.7	-	-

Tabelle 10. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, an der groben Fazies der Molasse der Mercerie.

Kapillares Saugen von Wasser						
VD Mercerie fein	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	4	4	4	4	-	-
Mittelw.	13.6	0.204	6.4	72.3	-	-
Std.Abw.	3.0	0.045	0.1	4.5	-	-
Minimum	11.4	0.171	6.3	65.6	-	-
Maximum	18.0	0.269	6.6	74.8	-	-

Tabelle 11. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, an der feinen Fazies der Molasse der Mercerie.

Kapillares Saugen von Wasser						
VD Mercerie fein und grob	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	-	-	-	-	3	3
Mittelw.	-	-	-	-	19.1	0.250
Std.Abw.	-	-	-	-	3.4	0.060
Minimum	-	-	-	-	15.2	0.182
Maximum	-	-	-	-	21.4	0.296

Tabelle 12. Ergebnisse des kapillaren Wassersaugens, durchgeführt an Würfeln von 15 cm Kantenlänge an der groben Fazies der Molasse der Mercerie, aus abwechselnd feiner und grober Fazies.

3.3.2.2 Kapillares Saugen von Alkohol (Würfel mit 4 cm Kantenlänge)

Kapillares Saugen von Alkohol						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	-	-
Mittelw.	20.3	0.249	9.4	59.9	-	-
Std.Abw.	0.8	0.006	0.1	0.6	-	-
Minimum	19.5	0.238	9.2	59.1	-	-
Maximum	21.5	0.255	9.6	60.8	-	-

Tabelle 13. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, des Mainsandsteins.

Kapillares Saugen von Alkohol						
BS Wiesental homogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	4	4	4	4	-	-
Mittelw.	57.5	0.496	14.7	64.7	-	-
Std.Abw.	3.3	0.017	0.2	0.3	-	-
Minimum	53.5	0.471	14.4	64.4	-	-
Maximum	61.3	0.509	15.0	65.0	-	-

Tabelle 14. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der homogenen Fazies des Wiesentalsandsteins.

Kapillares Saugen von Alkohol						
BS Wiesental heterogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	-	-
Mittelw.	23.4	0.243	12.0	64.9	-	-
Std.Abw.	12.0	0.107	1.5	8.2	-	-
Minimum	7.8	0.088	9.8	58.0	-	-
Maximum	35.9	0.356	13.2	79.1	-	-

Tabelle 15. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der heterogenen Fazies des Wiesentalsandsteins

Kapillares Saugen von Alkohol						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	-	-
Mittelw.	21.9	0.214	11.1	68.5	-	-
Std.Abw.	0.5	0.013	0.1	0.3	-	-
Minimum	21.2	0.198	11.0	68.1	-	-
Maximum	22.6	0.231	11.4	69.0	-	-

Tabelle 16. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, des Gurtensandsteins.

Kapillares Saugen von Alkohol						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	-	-
Mittelw.	28.3	0.265	11.1	70.2	-	-
Std.Abw.	1.8	0.013	0.1	0.5	-	-
Minimum	26.1	0.255	10.9	69.6	-	-
Maximum	30.0	0.287	11.2	70.8	-	-

Tabelle 17. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der Molasse von Villarlod.

Kapillares Saugen von Alkohol						
VD Mercurie grob	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	4	4	4	4	-	-
Mittelw.	21.4	0.295	7.9	63.1	-	-
Std.Abw.	1.2	0.010	0.3	0.6	-	-
Minimum	19.7	0.282	7.4	62.6	-	-
Maximum	22.4	0.305	8.1	64.0	-	-

Tabelle 18. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der groben Fazies der Molasse der Mercurie.

Kapillares Saugen von Alkohol						
VD Mercurie fein	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	2	2	2	2	-	-
Mittelw.	10.5	0.137	6.3	72.4	-	-
Std.Abw.	0.4	0.005	0.1	0.5	-	-
Minimum	10.3	0.133	6.2	72.0	-	-
Maximum	10.8	0.140	6.3	72.8	-	-

Tabelle 19. Ergebnisse des kapillaren Saugens von Alkohol, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der feinen Fazies der Molasse der Mercurie.

3.3.2.3 Kapillares Saugen des Festigungsmittels (Würfel mit 4 und 15 cm Kantenlänge)

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	3	3
Mittelw.	19.3	0.227	9.2	58.5	13.6	0.156
Std.Abw.	0.6	0.003	0.2	0.2	0.6	0.011
Minimum	18.3	0.224	9.0	58.1	12.9	0.144
Maximum	20.0	0.229	9.4	58.7	14.2	0.164

Tabelle 20. Ergebnisse 1) des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge und 2) des Aufbringens mit Pinsel auf die Würfel von 15 cm Kantenlänge, des Mainsandsteins.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
BS Wiesental homogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	4	4	7	7	-	-
Mittelw.	55.4	0.416	14.5	63.5	-	-
Std.Abw.	3.8	0.025	0.4	1.1	-	-
Minimum	51.5	0.394	13.9	61.9	-	-
Maximum	59.7	0.446	14.9	64.5	-	-

Tabelle 21. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der homogenen Fazies des Wiesentalsandsteins.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
BS Wiesental heterogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	11	11	-	-
Mittelw.	19.6	0.188	13.3	63.0	-	-
Std.Abw.	11.5	0.086	0.1	0.6	-	-
Minimum	8.4	0.093	13.2	62.5	-	-
Maximum	36.4	0.306	13.4	63.4	-	-

Tabelle 22. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der heterogenen Fazies des Wiesentalsandsteins. Die Heterogenität führt manchmal zu mehreren aufeinanderfolgenden Kinetiken des kapillaren Saugens, welche jede typisch ist für eine Gesteinsschicht mit von der Nachbarschicht verschiedenen Kapillareigenschaften. Für mehr Klarheit, wurden diese aufeinanderfolgenden Kinetiken gemittelt.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
BS Wiesental homo- und heterogen	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	-	-	-	-	3	3
Mittelw.	-	-	-	-	11.9	0.116
Std.Abw.	-	-	-	-	1.5	0.016
Minimum	-	-	-	-	11.0	0.097
Maximum	-	-	-	-	13.7	0.126

Tabelle 23. Ergebnisse des Aufbringens des Festigers mittels Pinsel, durchgeführt an Würfeln von 15 cm Kantenlänge, aus Wiesentalsandstein mit abwechselnd homo- und heterogener Fazies.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	3	3
Mittelw.	24.6	0.191	10.4	63.6	13.7	0.165
Std.Abw.	0.9	0.005	0.1	0.3	2.5	0.039
Minimum	23.6	0.185	10.3	63.3	11.9	0.123
Maximum	26.0	0.199	10.6	64.0	16.5	0.199

Tabelle 24. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge und des Aufbringens mit Pinsel auf die Würfel von 15 cm Kantenlänge, des Gurtensandsteins.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	5	5	5	5	3	3
Mittelw.	29.0	0.269	10.5	66.7	17.5	0.200
Std.Abw.	1.9	0.015	0.2	0.4	2.5	0.007
Minimum	27.1	0.246	10.3	65.9	15.5	0.192
Maximum	31.4	0.284	10.7	67.0	20.3	0.205

Tabelle 25. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge und des Aufbringens mit Pinsel auf die Würfel von 15 cm Kantenlänge, der Molasse von Villarlod.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
VD Mercerie grob	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	4	4	4	4	-	-
Mittelw.	21.5	0.306	7.5	59.7	-	-
Std.Abw.	1.1	0.006	0.4	0.3	-	-
Minimum	19.9	0.299	6.9	59.5	-	-
Maximum	22.4	0.312	7.8	60.1	-	-

Tabelle 26. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der groben Fazies der Molasse der Mercerie.

Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
VD Mercerie fein	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	2	2	2	2	-	-
Mittelw.	10.3	0.187	5.9	67.8	-	-
Std.Abw.	0.4	0.007	0.0	1.0	-	-
Minimum	10.0	0.182	5.9	67.1	-	-
Maximum	10.6	0.192	5.9	68.5	-	-

Tabelle 27. Ergebnisse des kapillaren Saugens des Festigers, durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge, der feinen Fazies der Molasse der Mercerie.

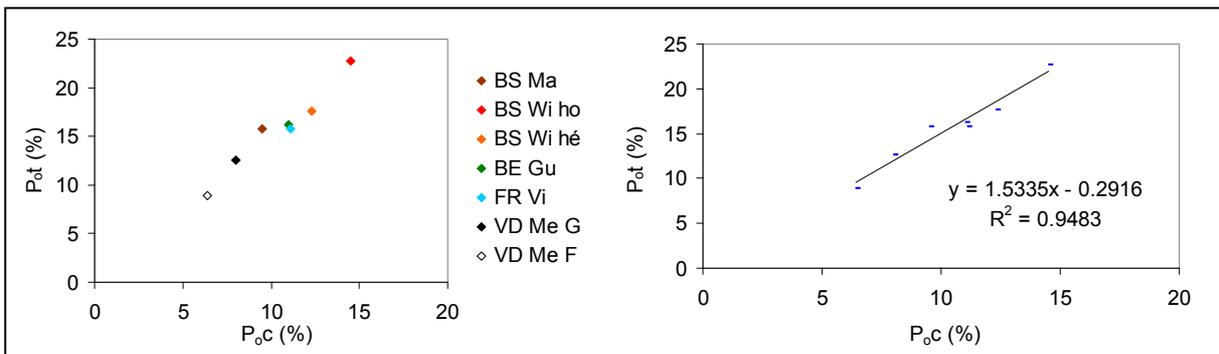
Kapillares Saugen des Festigungsmittels						
VD Mercerie grob und fein	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Anz. Pr.	-	-	-	-	3	3
Mittelw.	-	-	-	-	10.7	0.163
Std.Abw.	-	-	-	-	0.7	0.022
Minimum	-	-	-	-	9.9	0.138
Maximum	-	-	-	-	11.2	0.180

Tabelle 28. Ergebnisse des Aufbringens des Festigers mittels Pinsel, durchgeführt an Würfeln von 15 cm Kantenlänge, der Molasse der Mercerie mit abwechselnd grober und feiner Fazies.

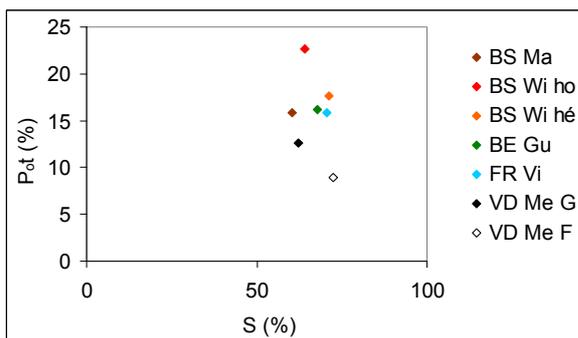
3.3.2.4 Rekapitulative und vergleichende Tabellen und Grafiken

Würfel 4x4x4	Kapillarporosität P _{0c} (%)			Hirschwaldkoeff. S (%)		
	Wasser	Alkohol	Kons.	Wasser	Alkohol	Kons.
BS Maintal	9.5	9.4	9.2	60.4	59.9	58.5
BS Wiesental hom.	14.5	14.7	14.5	64.0	64.7	63.5
BS Wiesental het.	12.3	12.0	13.3	71.2	64.9	63.0
BE Gurten	11.0	11.1	10.4	67.7	68.5	63.6
FR Villarlod	11.1	11.1	10.5	70.6	70.2	66.7
VD Mercerie grob	8.0	7.9	7.5	64.1	63.1	59.7
VD Mercerie fein	6.4	6.3	5.9	72.3	72.4	67.8

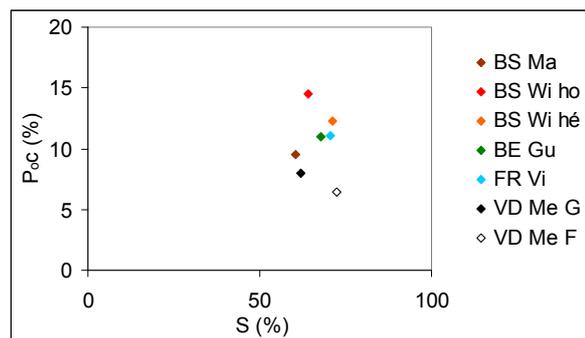
Tabelle 29. Vergleich der Kapillarporositäten (P_{0c}) und der Hirschwald- oder Sättigungskoeffizienten (S) gemessen beim kapillaren Saugen von Wasser, Alkohol und Festigungsmittel an den Würfeln mit 4 cm Kantenlänge der verschiedenen untersuchten Gesteine.



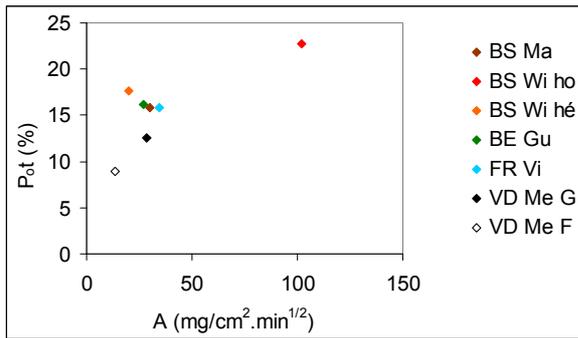
Figur 11. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen der mittleren Gesamtporosität (P_{0t}) und der mittleren Kapillarporosität (P_{0c}) für die Sandsteine Maintal (BS Ma), Wiesental homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurten (BE Gu), sowie die Molassen Villarlod (FR Vi) und Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



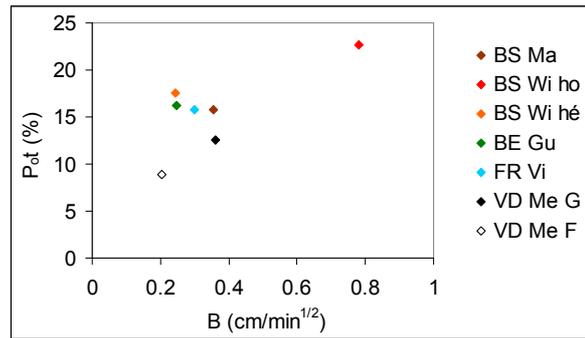
Figur 12. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen der mittleren Gesamtporosität (Pot) und dem mittleren Hirschwaldkoeffizienten (S) für Wasser für die Sandsteine Maintal (BS Ma), Wiesental homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurten (BE Gu), sowie die Molassen Villarlod (FR Vi) und Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



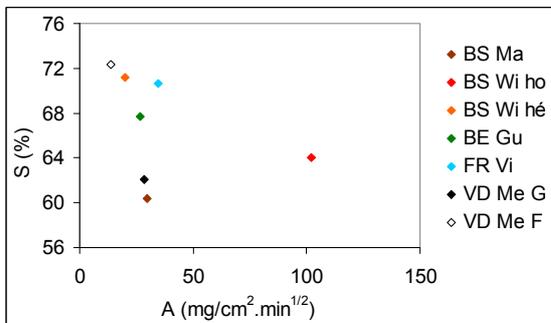
Figur 13. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen dem mittleren Hirschwaldkoeffizienten (S) und der mittleren Kapillarporosität (P_{0c}) für Wasser für die Sandsteine Maintal (BS Ma), Wiesental homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurten (BE Gu), sowie die Molassen Villarlod (FR Vi) und Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



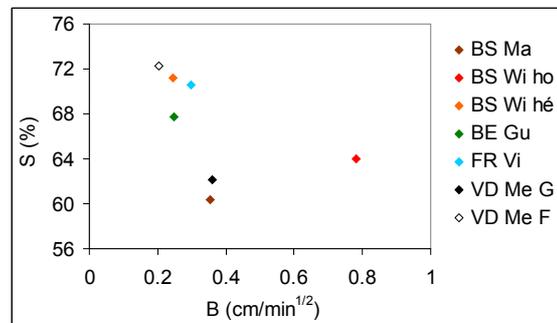
Figur 14. Korrelation zwischen der mittleren Gesamtporosität (P_{ot}) und dem mittleren spezifischen Kapillarkoeffizienten (A) für Wasser für die Sandsteine Maintal (BS Ma), Wiesental homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurten (BE Gu), sowie die Molassen Villarod (FR Vi) und Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



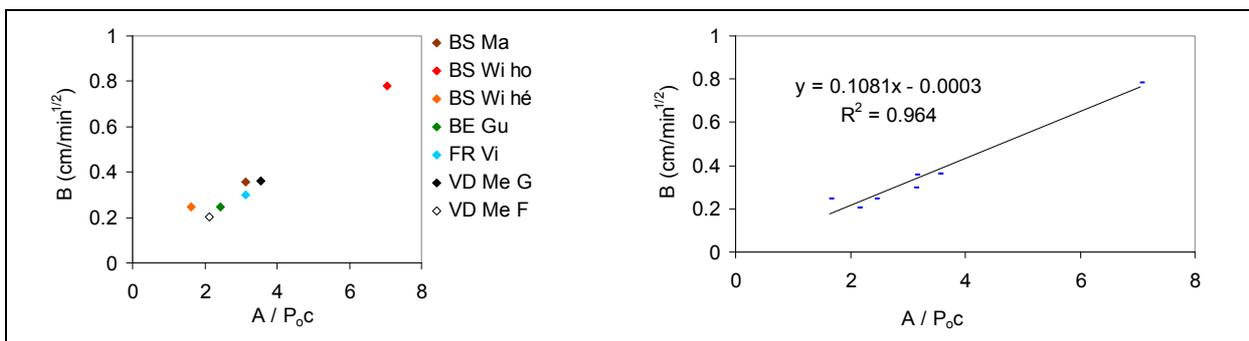
Figur 15. Korrelation zwischen der mittleren Gesamtporosität (P_{ot}) und dem mittleren linearen Kapillarkoeffizienten (B) für Wasser für die Sandsteine Maintal (BS Ma), Wiesental homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurten (BE Gu), sowie die Molassen Villarod (FR Vi) und Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



Figur 16. Grafische Korrelation zwischen dem Hirschwaldkoeffizienten (S) und mittleren spezifischen Kapillarkoeffizienten (A) für Wasser für den Mainsandstein (BS Ma), Wiesentalsandstein homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurtensandstein (BE Gu), die Molasse von Villarod (FR Vi) und die Molasse der Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



Figur 17. Grafische Korrelation zwischen dem Hirschwaldkoeffizienten (S) und dem mittleren linearen Kapillarkoeffizienten (B) für Wasser für den Mainsandstein (BS Ma), Wiesentalsandstein homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurtensandstein (BE Gu), die Molasse von Villarod (FR Vi) und die Molasse der Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).



Figur 18. Kapillares Wassersaugen: Korrelation zwischen dem mittleren linearen Kapillarkoeffizienten (B) dem mittleren, bezüglich der Kapillarporosität korrigierten spezifischen Kapillarkoeffizienten (A/P_{0c}) für den Mainsandstein (BS Ma), Wiesentalsandstein homogen (BS Wi ho) und heterogen (BS Wi hé), Gurtensandstein (BE Gu), die Molasse von Villarod (FR Vi) und die Molasse der Mercerie grob (VD Me G) und fein (VD Me F).

Kapillarkoeff. A (mg/cm ² .min ^{1/2})	Wasser / Saugen		Alkohol / Saugen	Festiger / Saugen	Festiger / Pinseln
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	29.8	31.3	20.3	19.3	13.6
BS Wiesental hom.	102.2	-	57.5	55.4	-
BS Wiesental het.	20.1	26.0	23.4	19.6	-
BS Wiesental hom. + het.	-	-	-	-	11.9
BE Gurten	26.8	29.0	21.9	24.6	13.7
FR Villarlod	34.7	31.1	28.3	29.0	17.5
VD Mercerie grob	28.4	-	21.4	21.5	-
VD Mercerie fein	13.6	-	10.5	10.3	-
VD Mercerie fein + grob	-	19.1	-	-	10.7

Tabelle 30. Vergleich der spezifischen Kapillarkoeffizienten (A) ausgedrückt als mg/cm².min^{1/2}, gemessen für die verschiedenen Sandsteine durch kapillares Saugen (/ Saugen) resp. durch Aufpinseln (/ Pinseln) mit Wasser, Alkohol oder Festiger, auf Würfeln mit Kantenlänge 4 (4x4x4) oder 15 cm (15x15x15).

Kapillarkoeff. A' (l/m ² .h ^{1/2})	Wasser / Saugen		Alkohol / Saugen	Festiger / Saugen	Festiger / Pinseln
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	2.31	2.43	1.27	1.49	1.05
BS Wiesental hom.	7.92	-	3.61	4.28	-
BS Wiesental het.	1.56	2.01	1.47	1.51	-
BS Wiesental hom. + het.	-	-	-	-	0.92
BE Gurten	2.08	2.24	1.37	1.90	1.06
FR Villarlod	2.69	2.41	1.77	2.24	1.35
VD Mercerie grob	2.20	-	1.34	1.66	-
VD Mercerie fein	1.05	-	0.66	0.79	-
VD Mercerie fein + grob	-	1.48	-	-	0.82

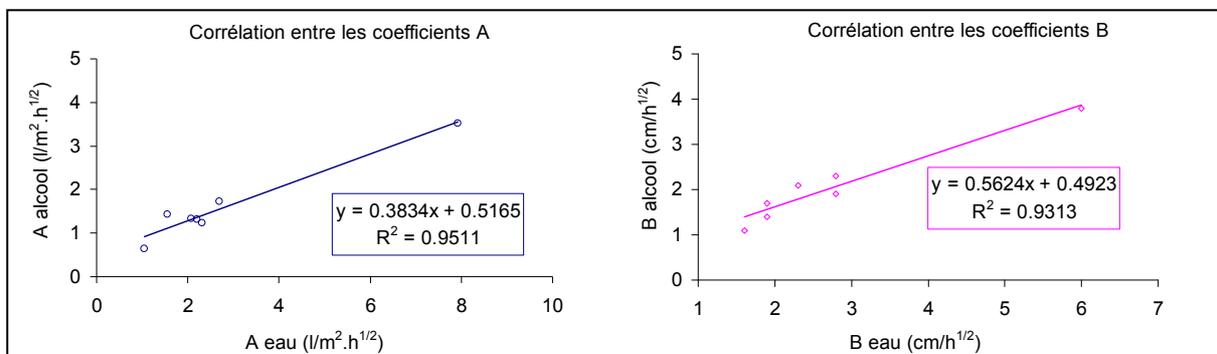
Tabelle 31. Vergleich der volumenspezifischen Kapillarkoeffizienten (A') ausgedrückt als l/m².h^{1/2}, gemessen für die verschiedenen Sandsteine durch kapillares Saugen (/ Saugen) resp. durch Aufpinseln (/ Pinseln) mit Wasser, Alkohol oder Festiger, auf Würfeln mit Kantenlänge 4 (4x4x4) oder 15 cm (15x15x15).

Kapillarkoeff. B (cm/min ^{1/2})	Wasser / Saugen		Alkohol / Saugen	Festiger / Saugen	Festiger / Pinseln
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	0.355	0.364	0.249	0.227	0.156
BS Wiesental hom.	0.781	-	0.496	0.416	-
BS Wiesental het.	0.245	0.227	0.243	0.188	-
BS Wiesental hom. + het.	-	-	-	-	0.116
BE Gurten	0.247	0.284	0.214	0.191	0.165
FR Villarlod	0.298	0.291	0.265	0.269	0.200
VD Mercerie grob	0.361	-	0.295	0.306	-
VD Mercerie fein	0.204	-	0.137	0.187	-
VD Mercerie fein + grob	-	0.250	-	-	0.163

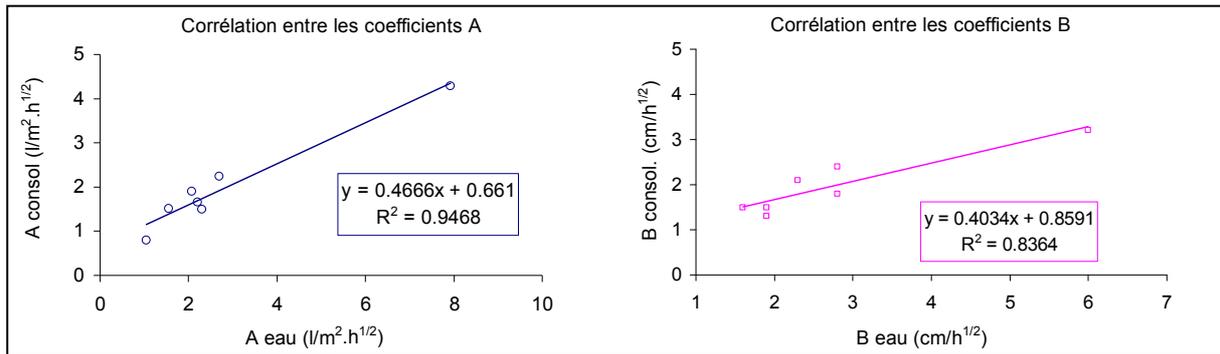
Tabelle 32. Vergleich der linearen Kapillarkoeffizienten (B) in cm/min^{1/2}, gemessen für die verschiedenen Sandsteine durch kapillares Saugen (/ Saugen) respektive durch Aufpinseln (/ Pinseln) mit Wasser, Alkohol oder Festiger, auf Würfeln der Kantenlänge 4 (4x4x4) oder 15 cm (15x15x15).

Kapillarkoeff. B (cm/h ^{1/2})	Wasser / Saugen		Alkohol / Saugen	Festiger / Saugen	Festiger / Pinseln
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	2.8	2.8	1.9	1.8	1.2
BS Wiesental hom.	6.0	-	3.8	3.2	-
BS Wiesental het.	1.9	1.8	1.4	1.3	-
BS Wiesental hom. + het.	-	-	-	-	0.9
BE Gurten	1.9	2.2	1.7	1.5	1.3
FR Villarlod	2.3	2.3	2.1	2.1	1.6
VD Mercerie grob	2.8	-	2.3	2.4	-
VD Mercerie fein	1.6	-	1.1	1.5	-
VD Mercerie fein + grob	-	1.9	-	-	1.3

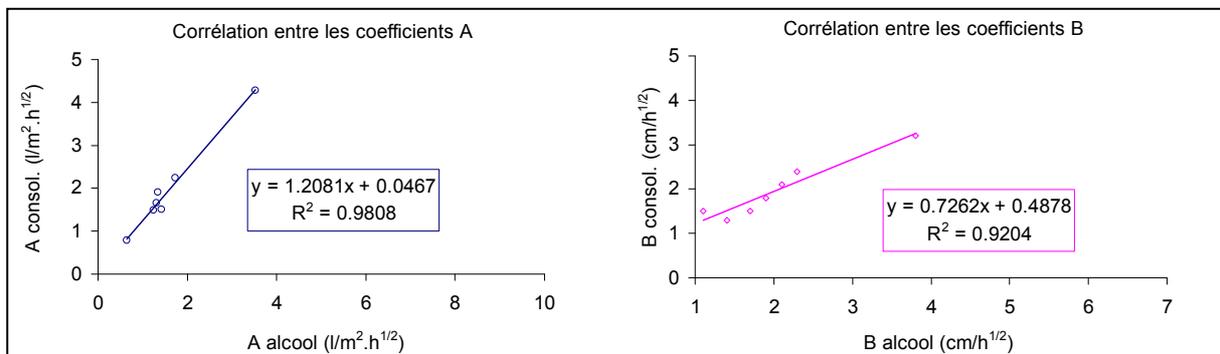
Tabelle 33. Vergleich der linearen Kapillarkoeffizienten (B) in cm/h^{1/2}, gemessen für die verschiedenen Sandsteine durch kapillares Saugen (/ Saugen) respektive durch Aufpinseln (/ Pinseln) mit Wasser, Alkohol oder Festiger, auf Würfeln der Kantenlänge 4 (4x4x4) oder 15 cm (15x15x15).



Figur 19. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen den spezifischen (A) und linearen (B) Kapillarkoeffizienten für Wasser und denjenigen für Alkohol.



Figur 20. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen den spezifischen (A, links) und linearen (B, rechts) Kapillarkoeffizienten für Wasser und denjenigen für das Festigungsmittel.



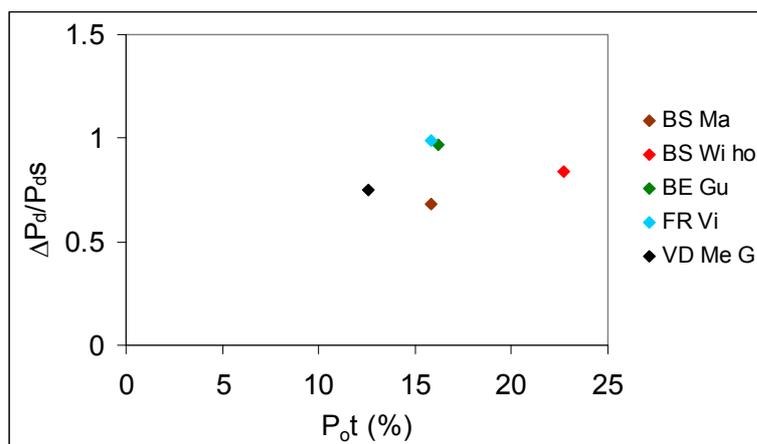
Figur 21. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen den spezifischen (A, links) und linearen (B, rechts) Kapillarkoeffizienten für Alkohol und denjenigen für das Festigungsmittel.

3.3.3 Adsorptionsisotherme für Wasserdampf

Die Adsorptionsmessungen für Wasserdampf wurden an Würfeln von 4 cm Kantenlänge durchgeführt. Für den Wiesentalsandstein und die Molasse der Mercerie wurde nur eine einzige Fazies getestet, nämlich die homogene respektive die grobe Fazies.

Wasserdampfadsorption an Würfeln von 4 cm Kantenlänge					
$\Delta P_d/P_{d,s} \times 100$ (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	0.09	0.14	0.22	0.30	0.68
BS Wiesental homogen	0.16	0.25	0.35	0.45	0.84
BE Gurten	0.27	0.40	0.54	0.63	0.97
FR Villarlod	0.32	0.47	0.61	0.74	0.99
VD Mercerie grob	0.27	0.33	0.42	0.48	0.75

Tabelle 34. Ergebnisse der Wasserdampfadsorption durchgeführt an Würfeln von 4 cm Kantenlänge der der verschiedenen untersuchten Gesteine, ausgedrückt als Wasseraufnahme als Gewichtszunahme beim Erreichen des Gleichgewichts (ΔP_d) in Prozent des des Trockengewichtes ($P_{d,s}$). HR = relative Feuchtigkeit.



Figur 22. Grafische Darstellung der Korrelation zwischen der Wasserdampfadsorption bei 97% relativer Feuchtigkeit ausgedrückt als Gewicht des adsorbierten Wassers im Verhältnis zum Trockengewicht der ($\Delta P_d/P_{d,s}$) und der Gesamtporosität ($P_{o,t}$)

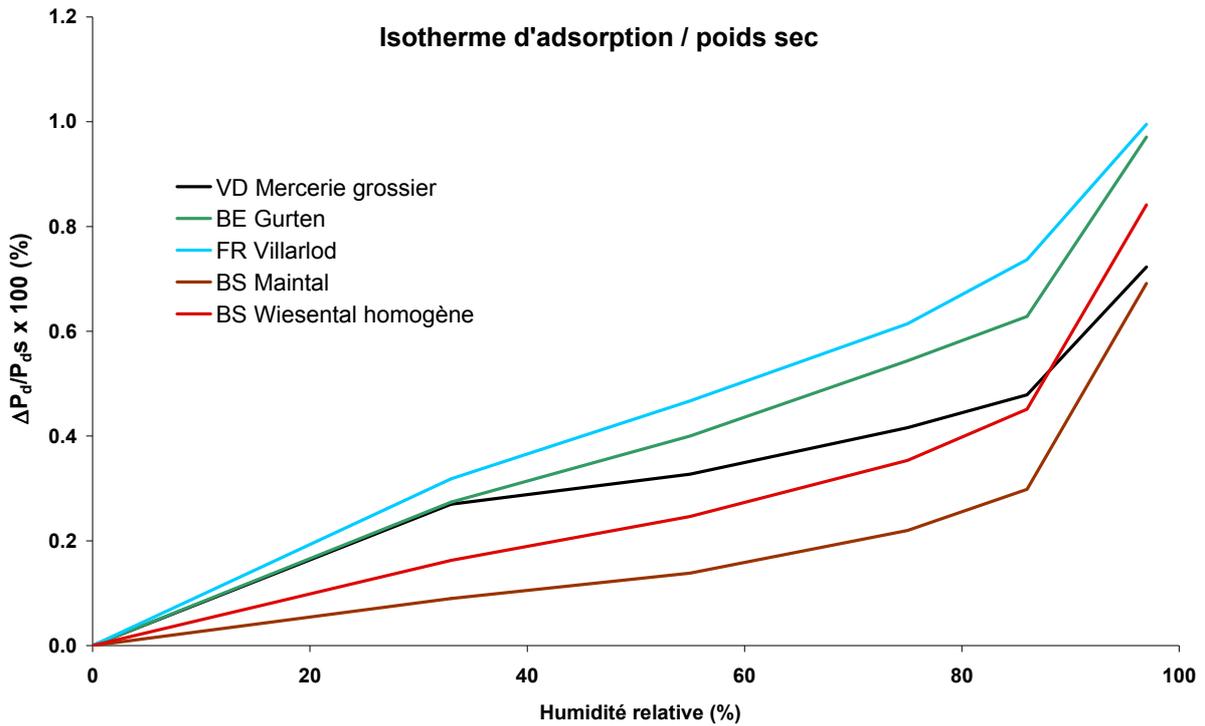
Wasserdampfadsorption an Würfeln von 4 cm Kantenlänge					
Vads / Vvide x 100 (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	1.3	1.9	3.1	4.2	9.8
BS Wiesental homogen	1.5	2.3	3.2	4.1	7.7
BE Gurten	3.8	5.6	7.5	8.7	13.5
FR Villarlod	4.6	6.8	8.9	10.6	14.4
VD Mercerie grob	5.1	6.2	7.9	9.0	14.0

Tabelle 35. Volumen des an Würfeln von 4 cm Kantenlänge der verschiedenen untersuchten Gesteine, beim Erreichen des Gleichgewichts adsorbierten Wassers (Vads) in Prozent des gesamten Porenvolumens (Vvide). HR = relative Feuchtigkeit.

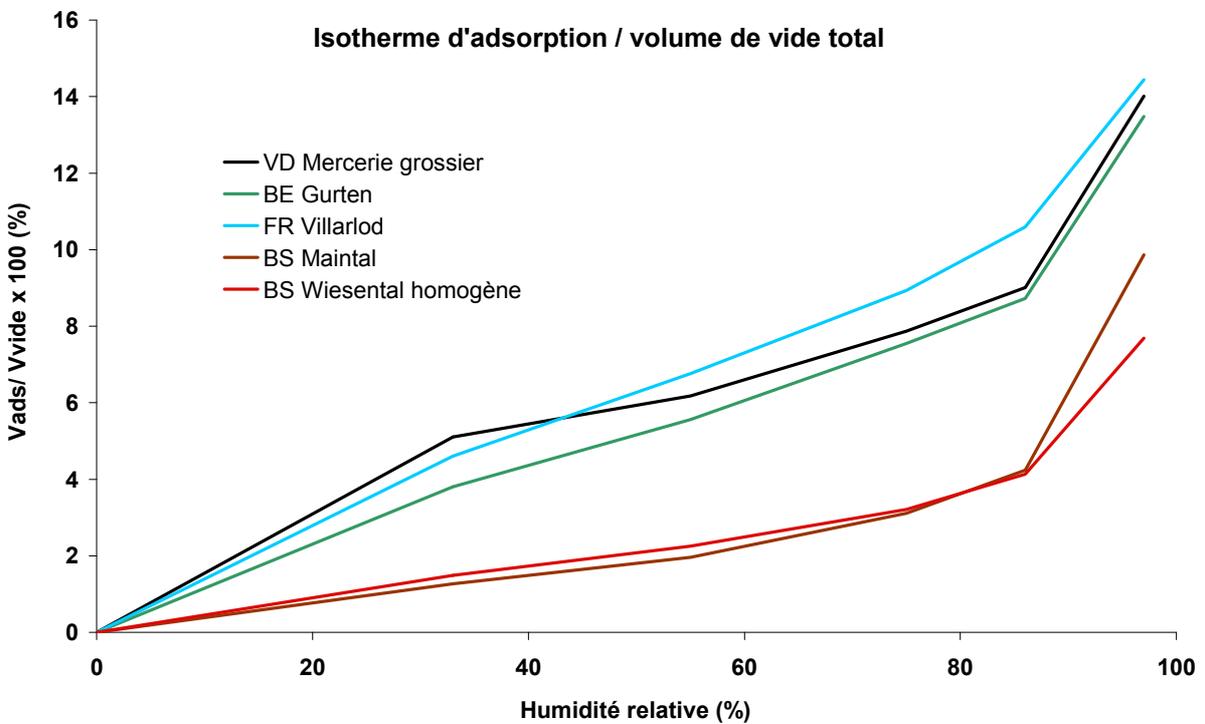
Wasserdampfadsorption an Würfeln von 4 cm Kantenlänge					
Vads / Vcapil x 100 (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	2.1	3.2	5.2	7.0	16.1
BS Wiesental homogen	2.3	3.5	5.0	6.4	11.9
BE Gurten	5.6	8.3	11.2	13.0	20.5
FR Villarlod	6.5	9.5	12.5	15.1	21.3
VD Mercerie grob	7.9	9.7	12.4	14.0	21.6

Tabelle 36. Volumen des an Würfeln von 4 cm Kantenlänge der verschiedenen untersuchten Gesteine, beim Erreichen des Gleichgewichts adsorbierten Wassers (Vads) in Prozent des kapillaren Porenvolumens (Vcapil = Volumen der am Ende des kapillaren Saugens mit Wasser gefüllten Porenräume). HR = relative Feuchtigkeit.

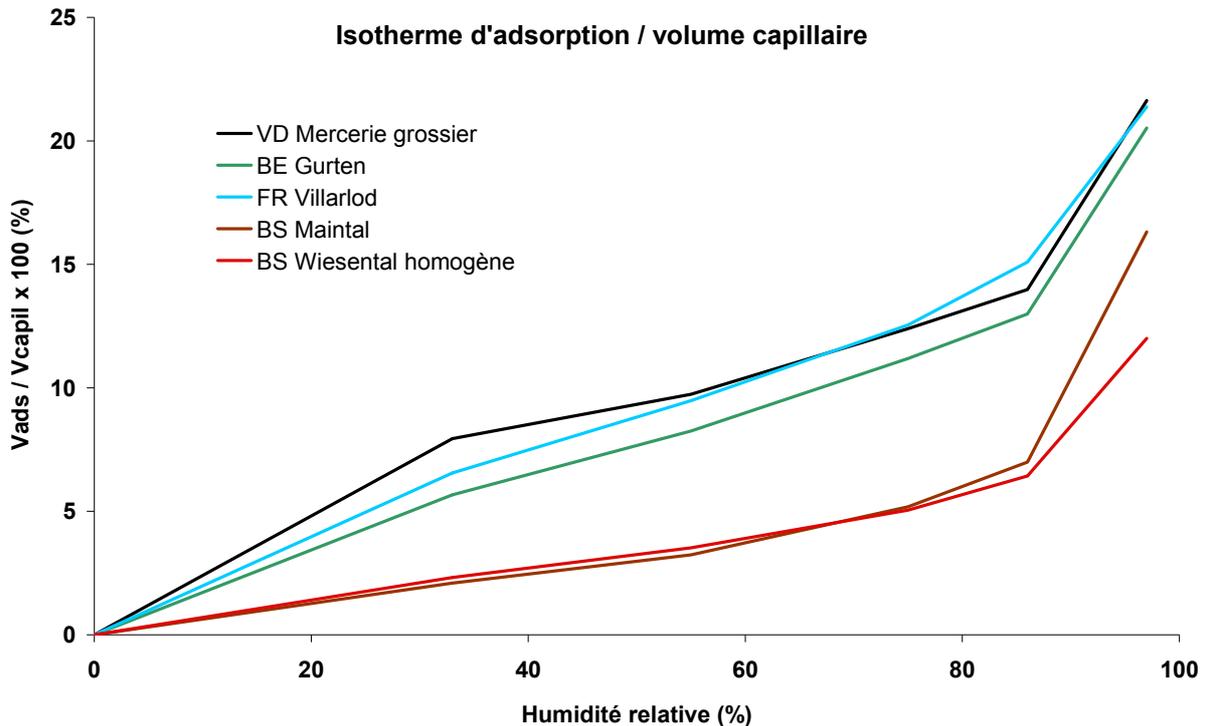
Die grafische Darstellung der in den Tabellen 34 bis 36 Tabelle 36 enthaltenen Ergebnisse heissen Adsorptionsisothermen. Diese Adsorptionsisothermen werden in den Figuren 23 bis 25 Figur 25 gezeigt. Figur 22 stellt die Korrelation zwischen der Gesamtporosität und der Menge an im Porennetzwerk adsorbiertem Wasser dar.



Figur 23. Adsorptionisotherme der Gewichtszunahme durch Wasseraufnahme beim Erreichen des Gleichgewichtes (ΔP_d) in Prozent des Trockengewichtes der Probe ($P_{d,s}$) für die verschiedenen realtiven Luftfechtigkeiten (= humidité relative). Siehe zugehörige Messwerte in Tabelle 34.



Figur 24. Adsorptionisotherme des beim Erreichen des Gleichgewichtes durch Wasser besetzten Porenvolumens in Prozent des Gesamtporenvolumens (V_{vide}) für die verschiedenen realtiven Luftfechtigkeiten (= humidité relative). Siehe zugehörige Messwerte in Tabelle 35.



Figur 25. Adsorptionisotherme des beim Erreichen des Gleichgewichtes durch Wasser besetzten Porenvolumens in Prozent des Kapillarporenvolumens (V_{capil}) für die verschiedenen reaktiven Luftfeuchtigkeiten (= humidité relative). Siehe zugehörige Messwerte in Tabelle 36.

3.3.4 Interpretationen, Vergleiche und Folgerungen für die Festigungen

3.3.4.1 Gesamtporosität und kapillare Eigenschaften

Von den fünf hauptsächlich untersuchten Fazies, haben der Gurtensandstein, die Molasse von Villarlod und der Mainsandstein sehr ähnliche Gesamtporositäten: 16.2, 15.8 respektive 15.8%. Das poröseste Gestein ist der Wiesentalsandstein mit einer mittleren Gesamtporosität von 19.6%, wohngegen das am wenigsten poröse die Molasse der Mercerie ist mit 11.5% (Tabelle 2, p.15).

Unter den fünf Fazies sind diejenigen des Wiesentalsandsteins und der Molasse der Mercerie die heterogensten: in den zur Verfügung stehenden Proben können, sowohl optisch, als auch Dank der Werte der Gesamtporosität, zwei Unter-Fazies unterschieden werden. Wir unterscheiden eine homogene ($P_{o,t} = 22.7\%$) von einer heterogenen Fazies ($P_{o,t} = 17.6\%$) für den Wiesentalsandstein und eine grobe ($P_{o,t} = 12.6\%$) von einer feinen Fazies ($P_{o,t} = 8.9\%$) für die Molasse der Mercerie (s. Tabelle 3 respektive 4 p.16).

Figur 11 (p.25) zeigt, dass für die untersuchten Steine die mittleren Gesamtporositäten und die mittleren Kapillarporositäten für Wasser gut miteinander korrelieren. Dies bedeutet, dass – zumindest für die untersuchten Steine – das Porenvolumen, welches während des kapillaren Saugens frei für die netzende Flüssigkeit zugänglich ist ($P_{o,c}$) direkt mit dem gesamthaft vorhandenen Porenvolumen zusammenhängt ($P_{o,t}$). Oder anders gesagt, für diese Steine gilt, dass je poröser die Probe ist, desto mehr hat sie die Tendenz viel Wasser durch Kapillarität aufzunehmen. Diese Beziehung zeigt, dass eine gute Homogenität des Porennetzwerkes selbst in der Molasse der Mercerie und im Wiesentalsandstein besteht, welche doch makroskopisch heterogener sind.

Diese Homogenität der getesteten Proben wird durch die Korrelation, welche zwischen dem linearen Kapillarkoeffizienten (B) und dem spezifischen Kapillarkoeffizienten korrigiert mit der Kapillarporosität besteht (A/P_{0c})⁵ bestätigt (s. Figur 18 p.26)

Die im Kapitel 3.3.2.1 aufgeführten Ergebnisse illustrieren die Tatsache gut, dass es, mit welcher Flüssigkeit auch immer, nicht möglich ist das Porenvolumen eines Steins mittels einfacher Kapillarität gesamthaft zu füllen: die Sättigungen oder kapillaren Sättigungskoeffizienten (Hirschwaldkoeffizient, S) oder auch die Prozentsätze des totalen Porenvolumens die mit einer netzenden Flüssigkeit nach dem kapillaren Saugen gefüllt worden sein können liegen alle zwischen 60.4% (für den Mainsandstein) und 72.3% (für die feine Fazies der Molasse der Mercerie) (s. Tabelle 5 p.17 bis 27 p.24 und Tabelle 29 p.25). Diese Werte von S bedeuten, dass von sämtlichen untersuchten Gesteinen theoretisch gesehen keines frostgefährdet ist⁶.

Figur 12 sowie 13 (p.25) zeigen, dass die kapillare Sättigung, S, unabhängig von den Werten sowohl der Gesamt- (P_{0t}) als auch der Kapillarporosität (P_{0c}) ist. Diese beiden Werte P_{0t} und P_{0c} , die sich auf das Gesamtvolumen der Probe⁷ beziehen, zeigen dass der Anteil, des am Ende des kapillaren Saugens mit der netzenden Flüssigkeit gefüllten Porenvolumens (S) unabhängig von diesem Gesamtvolumen ist.

Da die spezifischen (A) oder linearen (B) Kapillarkoeffizienten hauptsächlich von der Geometrie des Porennetzwerkes (Verteilung der verschiedenen Porengrössen, Konnektivität) und von den Eigenschaften der kapillar eindringenden Flüssigkeit (dynamische Viskosität, Affinität zum Feststoff, Oberflächenspannung) abhängen, sind korrelieren sie nicht mit der Gesamtporosität (s. Figur 14 und 15 p.26). Diese Kapillarkoeffizienten korrelieren auch nicht mit den kapillare Sättigungskoeffizienten S (s. Figuren 16 und 17, p.26). Sei es, dass die lineare (B) massen- (A) oder volumen-spezifische (A') Eindringgeschwindigkeit betrachtet werden, die Menge des am Ende eines kapillaren Saugens mit Flüssigkeit gefüllten Porenvolumens, ist in jedem Fall vollständig unabhängig von der Geschwindigkeit des Eindringens dieser Flüssigkeit.

Die Ergebnisse in den Tabellen 30 bis 33 zeigen, dass für ein bestimmtes Material, solange es homogen ist, die gemessenen Geschwindigkeiten des spezifischen, volumen-spezifischen oder linearen kapillaren Saugens für die Würfel von 4 oder 15 cm Kantenlänge vergleichbar

⁵ Die Koeffizienten A und B sind nicht direkt vergleichbar: der Koeffizient A beinhaltet – wie der Koeffizient B – die lineare Verschiebungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit aber auch das der netzenden Flüssigkeit beim Saugen zugängliche Porenvolumen, d.h. die Kapillarporosität (Fischer, 1993). Um die Proportionalität zwischen den Faktoren A und B zu ermitteln, muss der Koeffizient A mit dem Wert der Kapillarporosität korrigiert werden, was in Figur 18 gemacht worden ist.

⁶ Da die Volumenausdehnung des Wassers bei seiner Verfestigung 9% ist, liegt die kritische Sättigung oberhalb derer ein poröses Material Gefahr läuft beim Gefrieren zerstört zu werden in der Grössenordnung von 90%. Aber die Struktur des Porenraumes hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Fähigkeit des Kapillarwassers zum Zeitpunkt des Gefrierens mehr oder weniger einfach seinen Platz zu wechseln. So haben verschiedene Autoren experimentell zeigen können, dass die mittlere kritische Sättigung in der Grössenordnung von 80% liegt, aber dass sie für bestimmte Materialien auch über oder unter diesem Wert liegen kann (s. z. B.: - Hirschwald J., 1912. Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung, Berlin Borntraeger; - Kreüger H., 1924. Investigation of the effects of weathering on buildings, Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Handlingar, N°24, Stockholm ; - Thomas W.N., 1938. Experiments on the freezing of certain building materials, Building Research, Technical Paper N°17). Gestützt auf die Ergebnisse von Hirschwald, sind alle porösen Materialien mit einem Sättigungskoeffizienten S grösser als 85% frostgefährdet und alle porösen Materialien mit einem Koeffizienten unter 75% sind frostbeständig.

⁷ Gesamtvolumen einer Probe = Volumen des Festkörpers + Volumen der Poren

sind (s. Mainsandstein, Gurtensandstein oder Molasse von Villarlod). Dies bedeutet, dass für diese Proben, der Komplexitätsgrad des Porennetzwerkes der entsprechenden Steine über Volumen von 62 oder 3375 cm³ quasi gleich ist und, dass für solche Materialien x, die Ergebnisse des kapillaren Saugens durchgeführt an Würfeln mit 4 cm Kantenlänge extrapolierbar sind auf Würfel mit 15 cm Kantenlänge und umgekehrt.

Für heterogenere Gesteine, wie der Wiesentalsandstein oder die Molasse der Mercerie, ist der Vergleich zwischen den an den kleinen und den grossen Würfeln erzielten Werten viel weniger klar zu machen, denn der Grad der Heterogenität der kleinen und der grossen Würfel ist nicht immer gleich.

Abgesehen von der heterogenen Fazies des Wiesentalsandsteins, die eben allzu heterogen ist, sind die Kapillarporositäten, P_{0c} , und die kapillaren Sättigungskoeffizienten, S , berechnet für die Würfel mit 4 cm Kantenlänge eines bestimmten Gesteins ähnlich für Wasser, Alkohol und Festigungsmittel (s. Tabelle 29, p. 25): generell gesehen sind die Werte für Wasser und Alkohol quasi identisch und wenig grösser als diejenigen für die Festigungsmittel. Dagegen variieren die spezifischen (A), volumen-spezifischen (A') und linearen (B) Koeffizienten der Kapillarität gemessen an Würfeln mit 4 cm Kantenlänge eines bestimmten Gesteins je nach der verwendeten Flüssigkeit (s. Tabellen 30, p.27, bis 33, p.28).

Dieser Ergebnisse bedeuten:

- dass der Prozentsatz des Porenvolumens, welches am Ende des kapillaren Saugens *sensu stricto*⁸ durch eine netzende Flüssigkeit eingenommen wird⁹, quasi immer der gleiche ist, unabhängig von der Chemie der Flüssigkeit und, wie bereits weiter oben erwähnt, unabhängig von der Geschwindigkeit des kapillaren Saugens, ob nun linear, spezifisch und volumen-spezifisch betrachtet;
- dass die Werte von P_{0c} und S viel weniger empfindlich sind bezüglich der Heterogenität der Porenstruktur als die linearen, spezifischen oder volumen-spezifischen Eindringgeschwindigkeiten.

Die Tatsache, dass das nach dem Saugen mit Festiger gefüllte Porenvolumen leicht tiefer liegt als das nach dem Saugen von Wasser oder Alkohol gefüllte Volumen könnte sich vielleicht dadurch erklären, dass der Gelbildungsprozess bereits vor dem Ende des kapillaren Saugens beginnt und die Geometrie des für die Flüssigkeit zugänglichen Porenvolumens teilweise verstopft oder zumindest verändert. Aufgrund unserer bisherigen Erkenntnisse können wir dies nicht mit Sicherheit sagen, aber wir konnten beobachten, dass die Kapillarfront bei der Applikation des Festigers auf Würfel mit 15 cm Kantenlänge des Wiesentalsandsteins mittels Pinsel eine Eindringtiefe von 1.5 bis 2 cm überschreiten konnte. Wir nehmen an, dass die in diesen Proben sehr häufigen mikroporösen Zonen normalerweise eine wichtige Rolle beim kapillaren Durchgang von Flüssigkeiten spielt, und dass das Gelieren des Festigers – welches wahrscheinlich beginnt sobald er sich im Porennetzwerk befindet – die Mikroporen sehr rasch verstopft und so die Kapillarfront in einer sehr geringen Tiefe blockiert. Diese Hypothese wäre zu überprüfen.

Der Vergleich der an Würfeln von 4 cm Kantenlänge unter vergleichbaren Bedingungen erzielten erzielten, linearen kapillaren Saugeschwindigkeiten von Wasser, Alkohol sowie Festiger zeigt, dass die linearen Kinetiken für Wasser (zwischen 1.6 und 6 cm/h^{1/2}) viel schneller sind als diejenigen für Alkohol und die Festiger, und dass die linearen Kinetiken für

⁸ Das kapillare Saugen im engeren Sinn wird unterbrochen sobald die Kapillarfront die der Saugfläche gegenüber liegende Oberfläche erreicht hat. Wenn die Flüssigkeitszufuhr darüber hinaus andauert, wird diese erste Saugphase verlängert durch eine Saugphase verlänger, während derer die eingefangene Luft durch die Flüssigkeit hindurch diffundiert. Beide Phasen zusammen gesehen können als das kapillare Saugen im weiteren Sinn betrachtet werden (s. Annexe 2, p.69)

⁹ Eine Flüssigkeit ist dann netzend für einen bestimmten Feststoff, wenn der Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und Feststoff kleiner als 90° ist.

Alkohol (zwischen 1.1 und 3.8 cm/h^{1/2}) und die Festiger (zwischen 1.9 und 3.2 cm/h^{1/2}) sehr ähnlich sind (s. Figuren 19 bis 21 p.28/29 und Tabellen 32 und 33, p.28).

Was die volumen-spezifische¹⁰ kapillare Kinetik betrifft, sind diejenigen des Wassers (zwischen einschliesslich 1.05 und 7.92 l/m².h^{1/2}) viel schneller als diejenigen für Alkohol oder den Festiger, wohingegen die Geschwindigkeit der Festiger¹¹ (zwischen einschliesslich 0.79 und 4.28 l/m².h^{1/2}) alle mit Ausnahme der Molasse von Villarod, schneller als diejenigen von Alkohol liegen (zwischen einschliesslich 0.64 und 3.52 l/m².h^{1/2}), wobei wir uns die Ausnahme nicht erklären können (s. Figuren 19 bis 21 p. 28/29 und Tabelle 31).

Die Ergebnisse erlauben es nicht klare Beziehungen zwischen den für Wasser erzielten linearen oder volumen-spezifischen Koeffizienten und denjenigen für Alkohol oder die Festiger festzustellen. Dies zeigt, dass es für ein bestimmtes Material nicht trivial ist die Geschwindigkeit des kapillaren Saugens (sei es linear, massen- oder volumen-spezifisch) einer Flüssigkeit y von den bekannten Werten für eine andere Flüssigkeit x abzuleiten. Weiter sieht es so aus, dass wenn die Korrelation zwischen den Kapillargeschwindigkeiten von Wasser, Alkohol und Festiger für ein bestimmtes Gestein bekannt wären, es offenbar nicht möglich wäre daraus die Korrelation für die Kapillargeschwindigkeiten der gleichen Flüssigkeiten für einen mutmasslich ähnlichen Stein herzuleiten (siehe Ergebnisse welche für Gurtensandstein und Molasse von Villarod oder die grobe und feine Fazies der Molasse der Mercerie erzielt wurden, Tabellen 30 bis 33).

Wenn die an Würfeln von 4 cm Kantenlänge mit dem Festiger gemessenen linearen oder spezifischen kapillaren Sauggeschwindigkeiten mit denjenigen verglichen werden die durch Applikation mit dem Pinsel auf Würfeln mit 15 cm Kantenlänge¹² erzielt wurden, lässt sich feststellen dass letztere fast systematisch langsamer verlaufen als erstere (s. Tabellen 30 bis 33), dies mit Ausnahme Molasse von Villarod, für welche der mittels Pinsel erzielte volumen-spezifische kapillare Saugkoeffizient erstaunliche 95 grösser ist als derjenige welcher beim kapillaren Aufsaugen festgestellt wurde. Abgesehen von dieser „Anomalie“ sind die durch kapillares Saugen gemessenen massen- (A) und volumen-spezifischen (A') Kapillarkoeffizienten zwischen 30 und 45% grösser als diejenigen welche bei der Applikation mittels Pinsel festgestellt wurden, während die die durch kapillares Saugen gemessenen linearen Kapillarkoeffizienten zwischen 15 und 35% grösser sind als die bei der Pinselapplikation gemessenen. Der Unterschied kann nicht auf die unterschiedliche Probengrösse zurückzuführen sein, denn wie weiter oben erwähnt, spielt diese quasi keine Rolle für die

¹⁰ Da die Laborversuche an kleinen Proben durchgeführt wurden, waren die für Flächen und Zeit verwendeten Einheiten cm² und Minuten. Da weiter Gewichte präziser bestimmt werden als Volumen, wurden die beim kapillaren Saugen aufgenommenen Flüssigkeitsmengen als Gewicht, hier mg, ausgedrückt (s. Tabelle 5 p.17 bis 28, p.24). In den Tabellen Tabelle 31 und Tabelle 33 haben wir diese Laboreinheiten in für die Baustelle praktischere Einheiten umgerechnet, nämlich in m² für Flächen, in Stunden für die Zeit und in Liter für die Mengen. Da die Dichten der verwendeten Flüssigkeiten (Wasser, 94%-er denaturierter Alkohol, Sax OH 100, Funcosil 300) von einander verschieden sind (1, 0.809, 0.997 respektive 1 g/ml), sind die in Volumen ausgedrückten, pro Zeit- und Oberflächeneinheit aufgenommenen Flüssigkeitsmengen für ein bestimmtes Material nicht direkt vergleichbar mit den gleichen Mengen aber ausgedrückt in Gewicht.

¹¹ Wir merken hier an, dass es nicht möglich ist eine Unterscheidung zwischen den beiden verwendeten Festigern zu machen. Tatsächlich sind die erzielten Ergebnisse mit dem einen wie dem anderen nicht genügend klar, um ein verschiedenes Kapillarverhalten zwischen dem Festiger OH100 von Sax und Funcosil 300 von Remmers auszumachen. Weiter ist zu befürchten, dass selbst wenn eindeutig unterschiedliche Ergebnisse erzielt worden wären, es wohl nicht möglich klare Schlussfolgerungen zu ziehen, da die Versuche an unterschiedlichen Gesteinen gemacht wurden.

¹² Les surfaces d'imbibition prises en compte lors des calculs sont toujours de 16 cm² pour les cubes de 4 cm d'arête et de 225 cm² pour ceux de 15 cm d'arête, quelque soit la méthode d'alimentation en liquide.

Geschwindigkeit des kapillaren Saugens von Wasser, wenn dieses unter sonst gleichen Bedingungen erfolgt.

Während der Applikation des Festigers mittels Pinsel, wurde immer darauf geachtet, den Pinsel nicht bis ganz zum Rand zu führen, damit das flüssige Festigungsmittel nicht über die vertikalen Seiten des Würfels fließen konnte. Dadurch wurde ein Streifen von 0.5 bis 1 cm Breite am Rand des Würfels nie direkt mit Festiger versorgt. Aber sehr schnell, nachdem diese nicht bepinselte Oberfläche durch Kapillarität benetzt worden war, verteilte sich die Flüssigkeit bei jedem Auftrag selber bis zum Rand. Deshalb erscheint es nicht vernünftig den Unterschied in der Absorptionsgeschwindigkeit zwischen den "aufsaugenden" Würfeln von 4 cm und den "bepinselten" Würfeln von 15 cm Kantenlänge, auf eine Überschätzung der saugenden Oberfläche in Berechnung des kapillaren Saugens zurückzuführen. Es ist wahrscheinlicher, dass das Ergebnis zeigt, dass die Applikation mittels Pinsel effektiv die Menge an Flüssigkeit, welche kapillar in das Porennetzwerk eingebracht wird verglichen mit derjenigen die beim kapillaren Aufsaugversuch zur Verfügung steht begrenzt. Dieses würde die Ergebnisse von Ferreira Pinto und Delgado Rodrigues (2008) bestätigen, welche gezeigt haben, dass die Applikationsmethode bei Kalksteinen die Menge an in den Stein eingebrachtem Festigungsmittel beeinflusst.

Hier muss auch festgehalten werden, dass weil wir die Würfel mit 15 cm Kantenlänge, auf welchen wir die Festiger mittels Pinsel appliziert haben, nicht vollständig gesättigt haben, es keine zerstörungsfreie Methode gibt, den Prozentsatz des Porenvolumens, welcher am Ende der Applikation mit Festiger gefüllt war zu bestimmen. Wir können folglich nicht bestätigen, dass dieser Prozentsatz für die Versuche mittels Pinselapplikation dem entsprechen würde, den wir beim kapillaren Saugen an den Würfeln mit 4 cm Kantenlänge erreicht haben.

3.3.4.2 *Adsorptionsisothermen*

Figur 22 p. 30 bestätigt, dass die Hygroskopizität, oder Affinität für Wasserdampf, eines Gesteins nicht direkt von seiner Gesamtporosität abhängig ist.

Wenn die Gewichtszunahme durch adsorbiertes Wasser bezüglich des Trockengewichtes einer Probe bei einer relativen Feuchtigkeit von 97% betrachtet wird (Tabelle 34, Figur 23), so zeigt es sich, dass die hygroskopischsten, unter den von uns untersuchten Gesteinen, die Molasse von Villarod (0.0099 g adsorbiertes Wasser pro g trockene Probe) und der Gurtensandstein (0.0097 g/g) sind, während die am wenigsten hygroskopischen der Mainsandstein (0.0068 g/g) und die Molasse der Mercerie (0.0075 g/g) sind. Jedoch bei tieferen relativen Feuchtigkeiten (<86%), sind die beiden Bundsandsteine, Main- und Wiesentalsandstein, die am wenigsten hygroskopischen Gesteine. Wenn die Form der Adsorptionsisothermen (Figur 23) betrachtet wird, kann festgestellt werden, dass die Hygroskopizität des Main-, Wiesental- und Gurtensandsteins sowie der Molasse von Villarod zwischen 33 und 86% relativer Feuchte vergleichsweise konstant wächst und dann zwischen 86 und 97% relativer Feuchte plötzlich ansteigt, was sicherlich auf eine starke Kapillarkondensation in den feinen Poren bei über 86% relativer Feuchte zurückzuführen ist. Die Hygroskopizität der Molasse der Mercerie ist dagegen bei 33% relativer Feuchte vergleichbar mit derjenigen des Gurtensandsteins und danach nimmt sie relativ langsam zu bis 86% wo sie zwischen 86 und 97% relativer Feuchte ein wenig stärker zunimmt. Diese Adsorptionsisotherme zeigt wahrscheinlich, dass die Kapillarkondensation in den feinen Poren für die Molasse der Mercerie bei Feuchtigkeiten über 86% viel geringer ist als für die anderen untersuchten Gesteine.

Für jede Probe, für welche die Wasserdampfadsorption gemessen wurde, wurde der Prozentsatz des Gesamtporenvolumens respektive des kapillaren Porenvolumens¹³ abgeschätzt, der bei den verschiedenen getesteten Feuchtigkeiten mit adsorbiertem Wasser gefüllt waren. Die Ergebnisse werden in den Figuren 24 und 25 und die zugehörigen Zahlen in den Tabellen 35 und 36 wiedergegeben.

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei gleichen relativen Feuchtigkeiten die Anteile der Gesamtporositäten und der kapillaren Porenvolumen, welche von Wasser besetzt sind in den Molassesandsteinen (Molasse der Mercerie, Molasse von Villarod und Gurtensandstein) einerseits und in den Buntsandsteinen (Main- und Wiesentalsandstein) andererseits, unter sich sehr ähnlich sind. Weiter liegen die Werte der ersten systematisch höher als diejenigen der zweiten Gruppe: z.B. bei 75% relativer Feuchtigkeit haben die Molassen zwischen 7.5 und 8.9% ihrer Gesamtporosität respektive 11.2 und 12.5% ihrer Kapillarporosität mit adsorbiertem Wasser gefüllt, wohingegen bei den Buntsandsteinen der mit Wasser gefüllte Anteil 3.1 bis 3.2% der Gesamtporosität respektive 5 bis 5.2% der Kapillarporosität darstellt. Diese Unterschiede zwischen Molassen und Sandsteinen sind bedingt durch verschiedene mineralogische Zusammensetzung und unterschiedliche Porenstrukturen.

Wenn, wie in Kapitel 2.2 erwähnt, die während der Applikation des Festigers im Porennetzwerk vorhandene Wasserdampfmenge eine wichtige Rolle spielt, so zeigen die vorangehend dargelegten Ergebnisse, dass die zum Zeitpunkt der Applikation nötige relative Feuchtigkeit bei den Buntsandsteinen grösser sein muss als bei den Molassesandsteinen. Wenn als angenommen wird, dass zum Zeitpunkt der Applikation mindestens 5% der Gesamtporosität mit adsorbiertem Wasser gefüllt sein muss¹⁴, so muss diese relative Umgebungsfeuchtigkeit für die Molassen in der Grössenordnung von 55% und für die Buntsandsteine von 75% liegen. Aufgrund der Ergebnisse dieser vor der Applikation der Festiger durchgeführten Messungen, haben wir die Proben bei 75% vorkonditioniert, indem sie in dicht verschlossenen Behältern aufbewahrt wurden, wo die relative Feuchtigkeit durch NaCl-Salzlaken konstant gehalten wurden (s. § A 2.3).

4 Ausgewählte Festigungsmittel

	"Steinfestiger OH 100" ¹⁵ von Sax (BS, FR und LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" von Remmers (BE)
Informationsquelle	Produktmerk- und Sicherheitsdatenblatt der Firma Sax ¹⁶	Produktmerk- und Sicherheitsdatenblatt der Firma Remmers ¹⁷

¹³ Hier wird dasjenige Porenvolumen als „kapillares“ Porenvolumen betrachtet, welches dem Prozentsatz des Gesamtporenvolumens entspricht, welcher beim kapillaren Saugen frei zugänglich ist und somit durch Wasser besetzt wird.

¹⁴ Die bei der Festigung mit Kieselsäureester für eine gute Gelbildung notwendige Wassermenge ist in der Literatur nicht zu finden. Wir haben willkürlich festgelegt, dass sie bei 5% der Gesamtporosität liegen müsse. Der genaue Wert könnte nur durch aufwändige Laborversuche bestimmt oder zumindest abgeschätzt werden, welche in dieser Studie nicht durchgeführt wurden.

¹⁵ Im Namen OH100, bedeutet OH "Ohne Hydrophobierung" und 100 bedeutet, dass der Festiger kein Lösungsmittel enthält.

¹⁶ http://www.sax.ch/cms/front_content.php?idcat=86&idart=131

¹⁷ <http://www.remmers.de/html/de/produktsuche/produkt/1541-kse-300/12/baum/1116/produktsuche.html#bot>

	"Steinfestiger OH 100"¹⁵ von Sax (BS, FR und LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" von Remmers (BE)
Art des Festigungsmittels	■ 75% Kieselsäureester in Form von Tetraethylsilicathydrolysat (=Tetraethylsilikat teilweise hydrolysiert, d.h. enthält bereits Oligomere)	60 bis <80% Kieselsäureester in Form von Tetraethylorthosilikat (= Tetraethylsilikat ausschliesslich als Monomere)
Dichte (g/cm³)	0.997	1
Katalysator	Ja aber nicht angegeben welche Art	DiButyltindilaurate C ₃₂ H ₆₄ O ₄ Sn (≤ 0.1%, neutral)
Freigesetzte Produkt	Ethanol	Ethanol
Gelabscheidungs- menge	Nicht angegeben	300g/l, also ein Anteil von 30%
Anzuwenden auf Materialien x	Silikatische Natursteine (Sandsteine, Molassen) und andere Materialien x auf Silikatbasis	Absorbierende, poröse und mürbe Baumaterialien x, vorzugsweise Sandsteine. Möglichkeit Fugen und historische Verputze zu festigen
Zustand des Untergrundes	Die zu behandelnden Flächen müssen sauber, trocken und saugfähig sein	Die zu behandelnden Flächen müssen sauber, trocken saugfähig, nicht erwärmt und mit der relativen Feuchtigkeit der Umgebung im Gleichgewicht sein
Notwendige klimatische Bedingungen	Temperatur > 10°C und < 20°C. relative Luftfeuchtigkeit > 40%. Die zu behandelnde Oberfläche muss vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden	Temperatur > 8°C und < 25°C. relative Luftfeuchtigkeit nicht genauer angegeben. Oberfläche muss vor direkter Sonneneinstrahlung, Wind und Regen geschützt werden
Applikations- methode	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bürste, Sprühen (Niederdruckgerät) ■ Applikation "nass in nass" bis zur „vollständigen Sättigung“ des Materials (=bis es aufhört zu saugen; franz.: „jusqu'à refus“) ■ Wenn nötig, 2^{te} Applikation nach 2 bis 3 Wochen ■ Zur Vermeidung von Farbveränderungen als Folge einer zu starken Sättigung, wird empfohlen die Oberfläche nach der Behandlung mit Aceton abzuwaschen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Je nach Objekt und gewünschtem Effekt Flut- und/oder Kompressenverfahren ■ Applikation "nass in nass" bis zur „vollständigen Sättigung“ des Materials (=bis es aufhört zu saugen; franz.: „jusqu'à refus“) ■ Wenn nötig, 2^{te} Applikation nach 2 bis 3 Wochen. ■ Zur Vermeidung von Farbveränderungen als Folge einer zu starken Sättigung, wird empfohlen die Oberfläche unmittelbar nach der Behandlung mit einem nicht wässrigen Lösungsmittel abzuwaschen
Verbrauch	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0,5 bis 15 l/m² (normalerweise etwa 0,5 l/m²) abhängig von der Art und dem Zustand des Baumaterials. ■ Versuche zum Bestimmen des Verbrauchs empfohlen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0,1 bis mehrere l/m² abhängig von der Art und dem Zustand des zu festigenden Materials, sowie der Applikationsmethode ■ Versuche zum Bestimmen des Verbrauchs empfohlen
Trocknungszeit	ungefähr 2 Wochen (für eine Temperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50%)	ungefähr 3 Wochen (für eine Temperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50%)

	"Steinfestiger OH 100"¹⁵ von Sax (BS, FR und LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" von Remmers (BE)
Gefahren für Mensch und Umwelt	Entflammbar; gesundheitsschädlich beim Einatmen; Reizt die Augen und die Atmungsorgane; Schädlich für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben	Entflammbar; gesundheitsschädlich beim Einatmen; Reizt die Augen und die Atmungsorgane;
Empfehlungen vor dem Auftrag eines Mörtels	Keine Angaben	Zeigen gefestigte Flächen bei nachfolgend durchzuführenden Restauriermörtelarbeiten noch einen störenden Wasser- ABERLEFFekt, so kann dieser durch Benetzung der Oberfläche mit Alkohol unterdrückt werden.

Tabelle 37 Informationen zu den ausgewählten Festigungsmitteln; Münster Basel sowie Kathedralen von Fribourg und Lausanne (Steinfestiger OH100 de Sax) und Münster Bern (FUNCOSIL 300 Steinfestiger von Remmers)

5 Funktionsprinzipien der verwendeten Apparate

Die Betriebsanleitungen und Grenzen der Apparate finden sich im Annexe 3 für das Mikrowellenreflexionsgerät und im Annexe 4 für das Leitfähigkeitsmessgerät.

5.1 Kurzes Funktionsprinzip des MOIST 200B

Das MOIST 200B hergestellt durch *hf sensor*¹⁸ ist ein tragbares Gerät welches Mikrowellen aussendet und dieses vom feuchten Material reflektiert wieder empfangen kann, denn das erhaltene Signal ist wegen der dielektrischen Eigenschaften des Wassers vom Feuchtigkeitsgehalt des Materials abhängig.

Die dielektrischen Messmethoden stützen sich auf die besonderen Eigenschaften des Wassers ab, das ein polares Molekül aufweist. Dies bedeutet, dass Wasser sich im elektrischen Feld nicht neutral verhält: es orientiert sich – polarisiert sich in einem angelegten elektrischen Feld. Wenn Wassermoleküle sich in einem elektromagnetischen Wechselfeld befinden, drehen sie sich mit der Frequenz des angelegten Feldes. Diese Auswirkung wird makroskopisch durch die Dielektrizitätskonstante oder Permittivität beschreiben.

Die Permittivität des Wassers (80) ist sehr viel grösser als diejenige von Baumaterialien (zwischen 2 und 10), so dass es theoretisch möglich ist durch die Messung der Permittivität eines Baumaterials festzustellen ob dieses Wasser enthält und, wenn ja, in welchen Mengen.

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen¹⁹ mit mittlerer Wellenlänge zwischen dem Infrarot- und dem Rundfunkbereich, d.h. Wellenlängen im Bereich zwischen 30 cm (also der Frequenz von 1 GHz) bis 1 mm (300 GHz).

Wenn Wassermoleküle einem den Mikrowellen entsprechenden elektromagnetischen Feld unterworfen werden, wird ihre Orientierung der Wassermoleküle immer schwieriger wegen

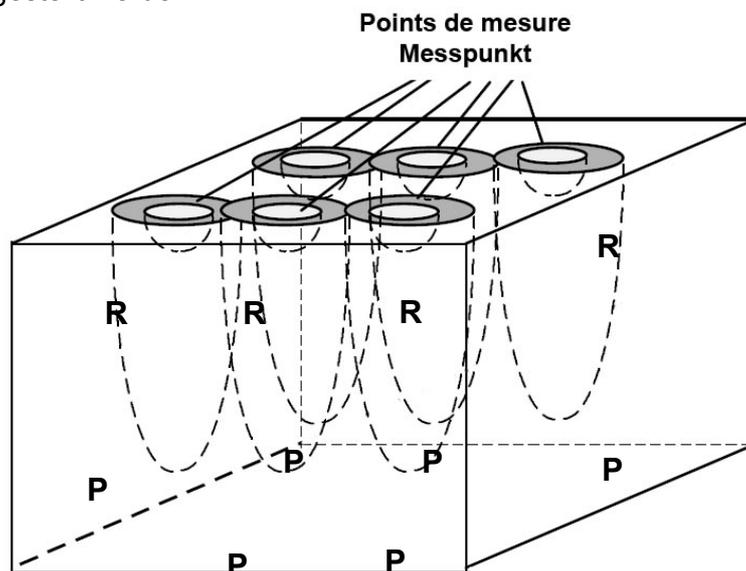
¹⁸ <http://www.hf-sensor.de/>

¹⁹ Zur Erinnerung die Lichtwelle ist eine elektromagnetische Welle deren Wellenlänge dem sichtbaren Spektrum entspricht, also zwischen 380 et 780 nm liegt.

der zwischen ihnen herrschenden Bindungen, was zu Reibungen, auch „dielektische Verluste“ genannt, führt.²⁰

So ist es im elektromagnetischen Bereich der Mikrowellen möglich, an Materialein welche Wasser enthalten zwei Grössen zu messen: die Permittivität und die dielektischen Verluste. Durch die Verwendung von zwei Sorten von kombinierten Sender-Empfängern ist es möglich, auf zerstörungsfreie Art und Weise, die Charakteristik einerseits in der Oberfläche und andererseits in einem etwas tieferen Volumen des Gesteins zu messen. Durch den Vergleich der Messwerte ist es theoretisch möglich Informationen über die Verteilung der Feuchtigkeit im Gestein in Funktion der Tiefe, welche die Sender-Empfänger erreichen, zu erhalten.

Die mit dem MOIST 200B-Gerät auf der Oberfläche eines Materials durchgeführten Messungen liefern Informationen über Materialvolumina deren Formen in Figur 26 schematisch dargestellt werden.



Figur 26 Schema der Formen der Messvolumina im Material mit dem Messkopf R (maximale Eindringtiefe bei ca. 3 cm) und mit dem Messkopf P (maximale Eindringtiefe bei ca. 30 cm). Nach Göller, 1999.

5.2 Kurzes Funktionsprinzip des COMBO 200

Ein Konduktivimeter (oder Leitfähigkeitsmessgerät) ist ein Ohmmeter, d.h. ein Instrument welches es erlaubt den elektrischen Widerstand oder die Leitfähigkeit, die zwischen zwei Elektroden herrscht, zu messen.

Das Grundprinzip des COMBO 200-Geräts, hergestellt durch BES Bollman²¹, besteht darin den elektrischen Widerstand zu messen, d.h. diejenige Eigenschaft, welche die Fähigkeit eines Körpers charakterisiert den Durchgang von elektrischem Strom zu verhindern. Es handelt sich also genauer gesagt um ein Resistivimeter.

²⁰ Wenn die Kraft der Mikrowelle genügend gross ist, wird das Material welches Wasser enthält erhitzt. Dieses Prinzip wird in den Mikrowellenöfen zum erwärmen von Nahrungsmitteln verwendet.

²¹ <http://www.bes-bollmann.de/>

Die meisten Gesteine sind keine guten elektrischen Leiter. Sie besitzen einen hohen elektrischen Widerstand. Das Wasser dagegen ist, wenn es rein ist ein schlechter elektrischer Leiter, aber bereits wenn es geringfügig mineralisiert ist, enthält es Ionen und wird dadurch zu einem elektrischen Leiter. Deshalb wird ein poröses Gestein, welches Wasser enthält elektrischen Strom ziemlich gut durchlassen, denn die in seinen Poren vorhandene Flüssigkeit hat einen geringen elektrischen Widerstand. Weiter gilt also theoretisch gesehen, dass der elektrische Widerstand dieses Gesteins umso geringer ist, je grösser die in seinen Porenräumen enthaltene Wassermenge ist.

Der mit dem COMBO 200-Gerät zwischen zwei Punkten in einem feuchten Gestein gemessene elektrische Widerstand, ergibt also theoretisch den Wassergehalt dieses Gesteins zwischen den beiden Punkten.

6 Messresultate

Im Folgenden gilt, die Werte welches das MOIST liefert sind Absolutwerte, welche direkt das von der Maschine empfangene Signal charakterisieren und "Moisture Index" (MI) oder Feuchtindex genannt werden. Es handelt sich um Zahlen zwischen 0 und 4000, welche vom Feuchtigkeitszustand des Materials abhängen auf welchem sie gemessen worden sind. Unter normalen Anwendungsbedingungen soll dieser Feuchtindex umso höher ausfallen je grösser der Wassergehalt ist.²²

Mit diesem MI zu arbeiten, erlaubt es uns einerseits die Werte, welche an verschiedenen Materialien gemessen wurden und andererseits an einem bestimmten Material unterschiedliche Wassersättigungszustände zu vergleichen.

6.1 Mikrowellenreflexion

6.1.1 Messungen an den trockenen Proben

Die mittleren, minimalen und maximalen mit dem MOIST 200B gemessenen Feuchtindexe werden in den Tabellen 38 bis 42 und in grafischer Form vergleichend in der Figur 27 dargestellt.

MOIST- Messungen / trockene Würfel				
BS Maintal	R	R2	D	P
Mittelw.	2413	3490	451	2350
Anzahl	6	6	6	6
Std.Abw.	17	24	21	42
Minimum	2382	3460	431	2277
Maximum	2431	3517	490	2398

Tableau 38 Mittlere, minimale und maximale Werte des Feuchtindex gemessen an trockenen Würfel mit 15 cm Kantenlänge des Mainsandseins (T = 24°C, HR = 26%).

MOIST- Messungen / trockene Würfel				
BS Wiesental	R	R2	D	P
Mittelw.	2432	3446	684	2173
Anzahl	13	13	13	13
Std.Abw.	28	18	145	64
Minimum	2398	3421	566	2015
Maximum	2480	3480	976	2244

Tableau 39 Mittlere, minimale und maximale Werte des Feuchtindex gemessen an trockenen Würfel mit 15 cm Kantenlänge des Wiesentalsandsteins (T = 23°C, HR = 29%).

²² hf sensor, MOIST 200B, Bedienungsanleitung / Operation manual

MOIST- Messungen / trockene Würfel				
BE Gurten	R	R2	D	P
Mittelw.	2563	3460	1256	1414
Anzahl	9	9	9	9
Std.Abw.	31	25	33	74
Minimum	2515	3406	1185	1333
Maximum	2597	3490	1285	1529

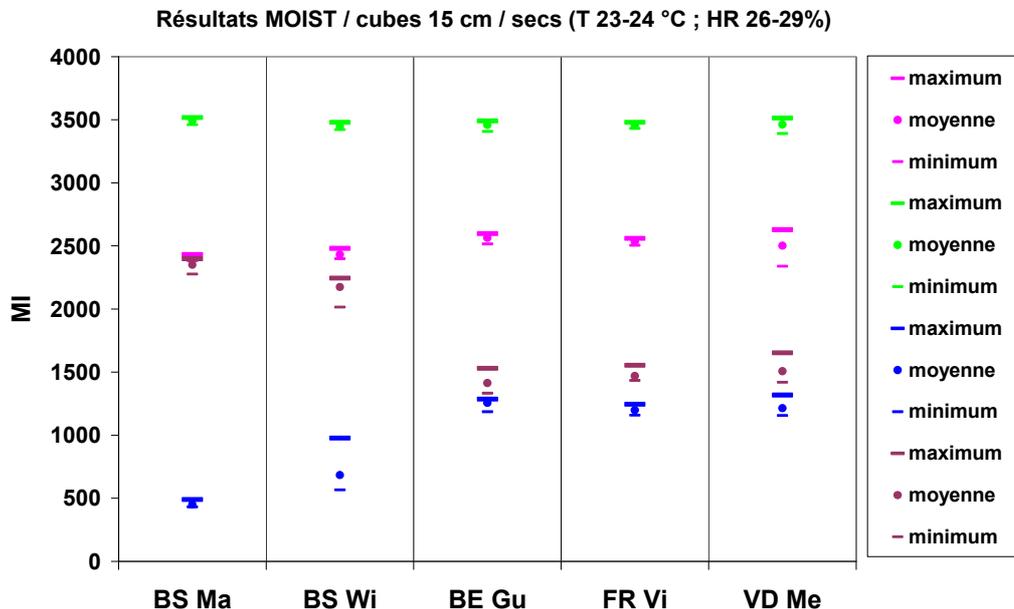
Tableau 40 Mittlere, minimale und maximale Werte des Feuchtindexes gemessen an trockenen Würfel mit 15 cm Kantenlänge des Gurtensandsteins (T = 23°C, HR = 29%).

MOIST- Messungen / trockene Würfel				
FR Villarlod	R	R2	D	P
Mittelw.	2534	3457	1197	1468
Anzahl	10	10	10	10
Std.Abw.	20	18	25	37
Minimum	2505	3431	1158	1433
Maximum	2560	3480	1245	1554

Tableau 41 Mittlere, minimale und maximale Werte des Feuchtindexes gemessen an trockenen Würfel mit 15 cm Kantenlänge der Molasse von Villarlod (T = 24°C, HR = 26%).

MOIST- Messungen / trockene Würfel				
VD Mercerie	R	R2	D	P
Mittelw.	2502	3462	1214	1507
Anzahl	9	9	9	9
Std.Abw.	97	44	49	71
Minimum	2339	3390	1156	1419
Maximum	2628	3513	1318	1652

Tableau 42 Mittlere, minimale und maximale Werte des Feuchtindexes gemessen an trockenen Würfel mit 15 cm Kantenlänge der Molasse der Mercerie (T = 24°C, HR = 28%).



Figur 27 Vergleich der Feuchtindexe (MI) "trocken" Maximum (—), Mittelwert (•) und Minimum (-) gemessen mit den Sonden MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) auf den trockenen Würfeln von 15 cm Kantenlänge der Main- (BS Ma), Wiesental- (BS Wi) und Gurtensandsteins (BE Gu) sowie der Molassen von Villarlod (FR Vi) und der Mercerie (VD Me) bei einer Temperatur von 23-24°C und einer relativen Feuchtigkeit von 26-29%.

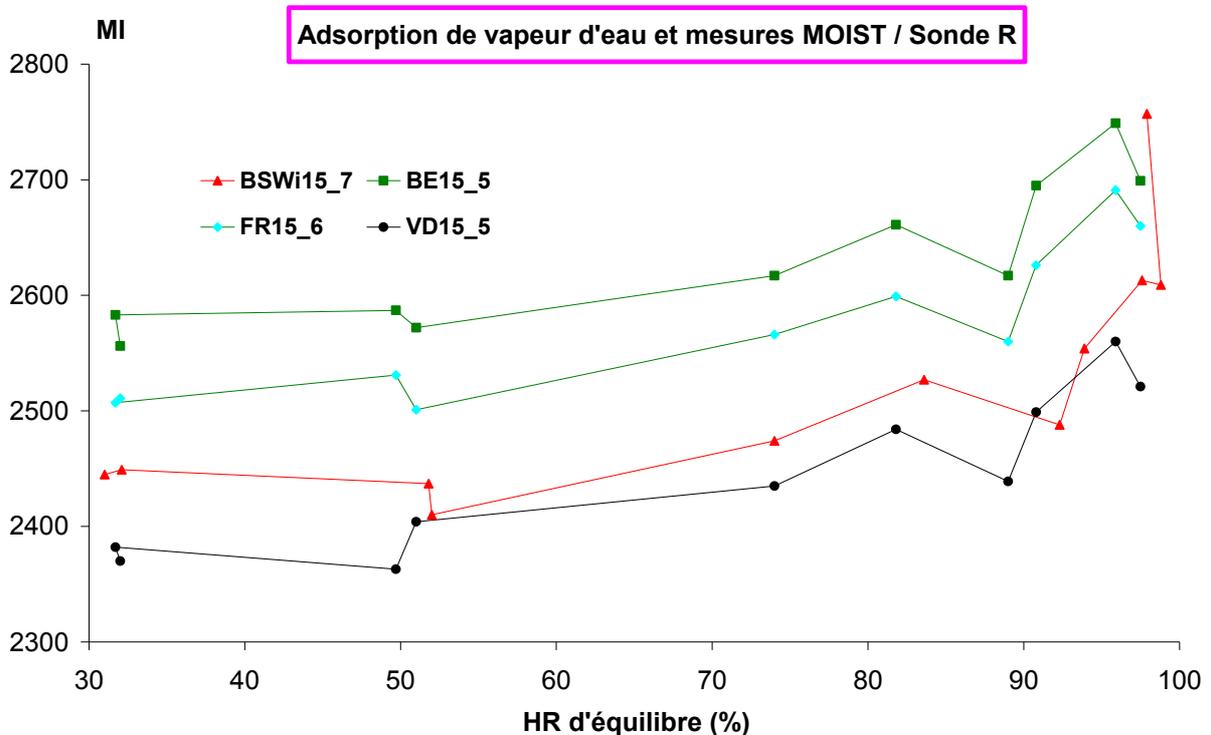
Die Feuchtindexe "trocken" gemessen mit den Sonden R und R2 liegen für die 5 Gesteine relativ nahe beieinander, da sich die Mittelwerte zwischen 2413 und 2566 für die Sonde R und zwischen 3446 et 3490 für die Sonde R2 bewegen (s. Tabellen 38 bis 42). Dagegen sind die Feuchtindexe "trocken" der Sonden D und P deutlich unterschiedlich, ob nun die Buntsandsteine (Mittelwerte zwischen 451 und 684 für die Sonde D und zwischen 2173 und 2350 für die Sonde P) oder die Molassen (Mittelwerte zwischen 1197 und 1256 für die Sonde D und zwischen 1414 und 1507 für die Sonde P) betrachtet werden. Der grosse Unterschied zwischen den Sandsteinen des Buntsandsteins und denen der Molasse lässt vermuten, dass die Sonden D und P stärker durch die mineralogische Zusammensetzung beeinflusst werden als die Sonden R und R2 (s. Figur 27).

Andererseits scheinen die Sonden des MOIST 200B auch empfindlich auf Gesteinheterogenitäten zu sein: die Feuchtindexe "trocken" gemessen am Wiesentalsandstein und an der Molasse der Mercerie zeigen deutliche Standardabweichungen, vor allem für die Sonden D und P (s. Figur 27 und Tabelle 42).

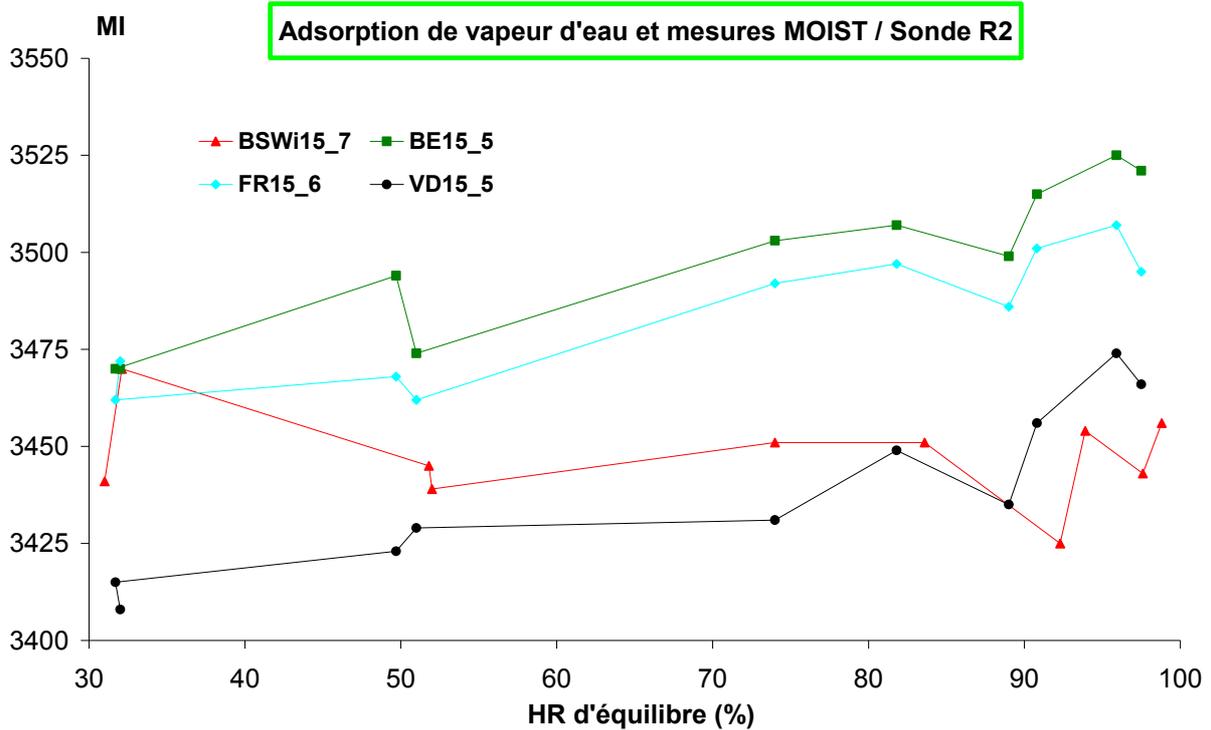
Weiter kann festgestellt werden, dass die mit der Sonde P auf dem Gutensandstein durchgeführten Messungen ebenfalls eine grosse Standardabweichung ergeben haben, was wir nicht erklären können (s. Tabelle 40 p. 42).

6.1.2 Messungen während der Wasserdampfadsorption

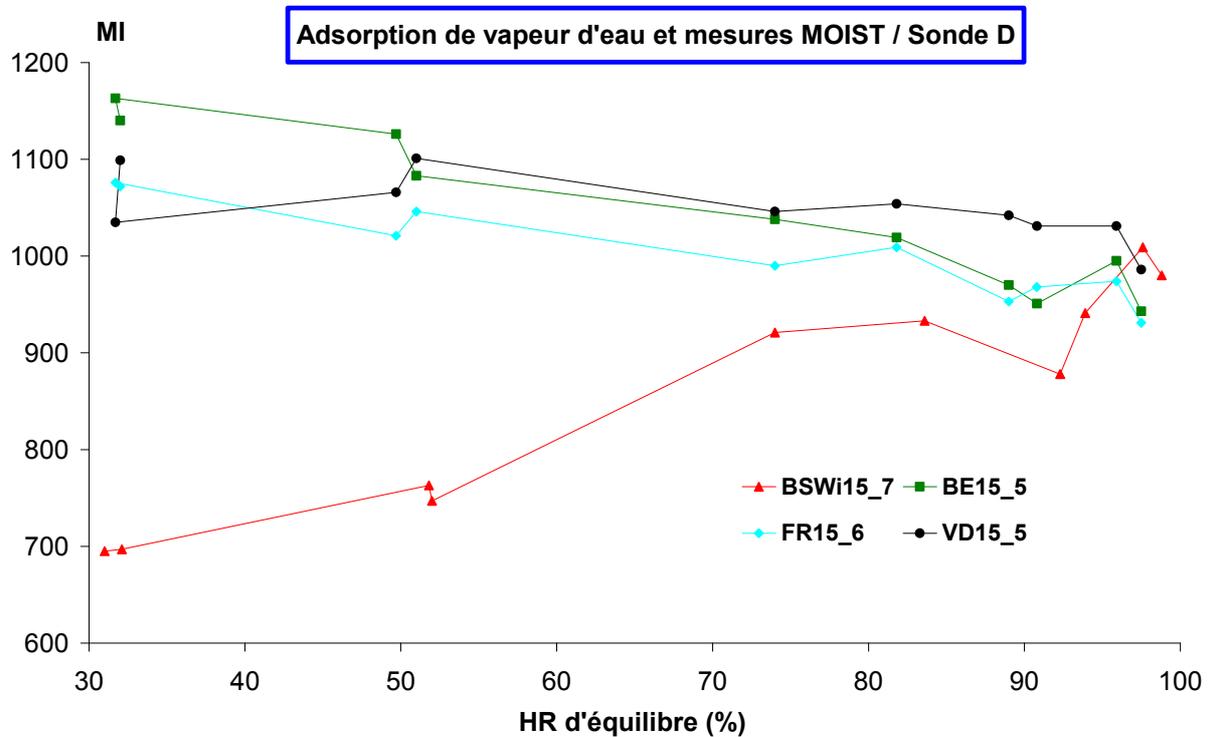
Die an bei zunehmenden relativen Luftfeuchtigkeiten klimatisierten Würfeln mit dem MOIST 200B gemessenen Feuchtindexe werden in den Figuren 28 bis 31 dargestellt. In den Figuren 32 bis 35, werden diese Feuchtindexe mit den an den trockenen Würfeln und den während des kapillaren Wassersaugens gemessenen Werten verglichen.



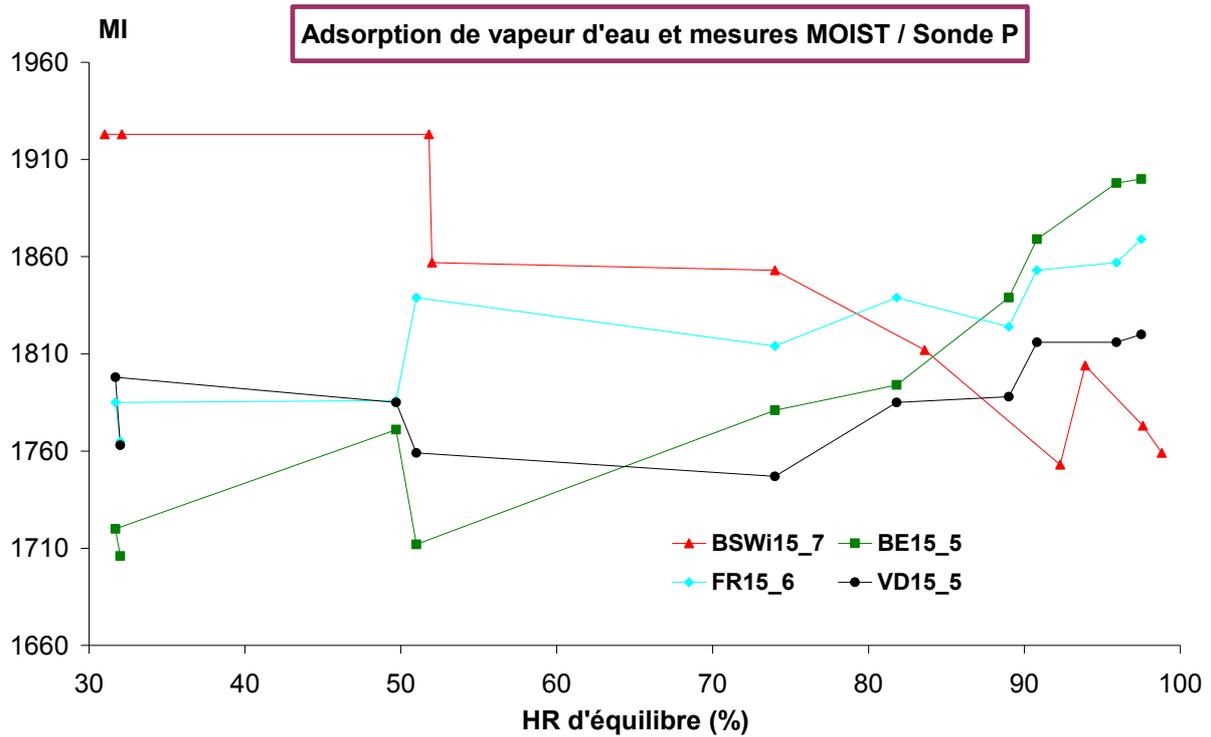
Figur 28 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R an Würfeln von 15 cm Kantenlänge im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten. Rot: Wiesental, grün: Gurten, türkis: Villarod und schwarz: Mercerie.



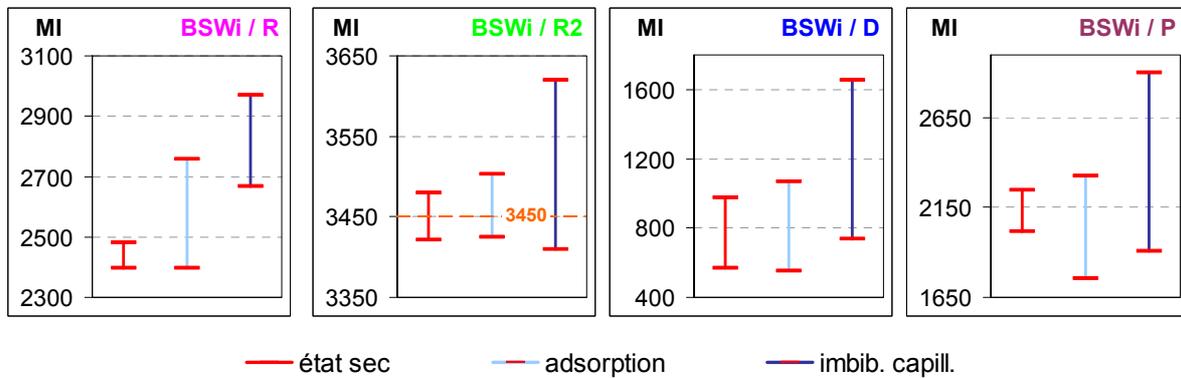
Figur 29 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R2 an Würfeln von 15 cm Kantenlänge im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten. Rot: Wiesental, grün: Gurten, türkis: Villarlod und schwarz: Mercerie.



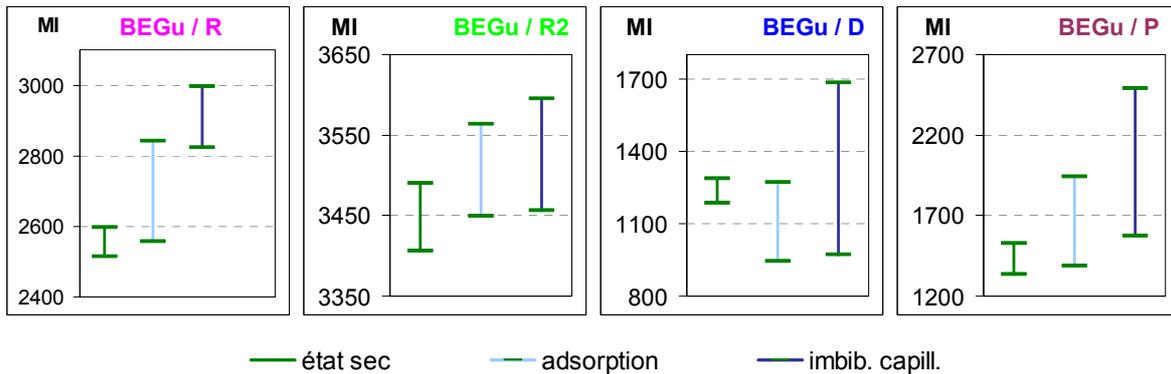
Figur 30 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST D an Würfeln von 15 cm Kantenlänge im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten. Rot: Wiesental, grün: Gurten, türkis: Villarlod und schwarz: Mercerie.



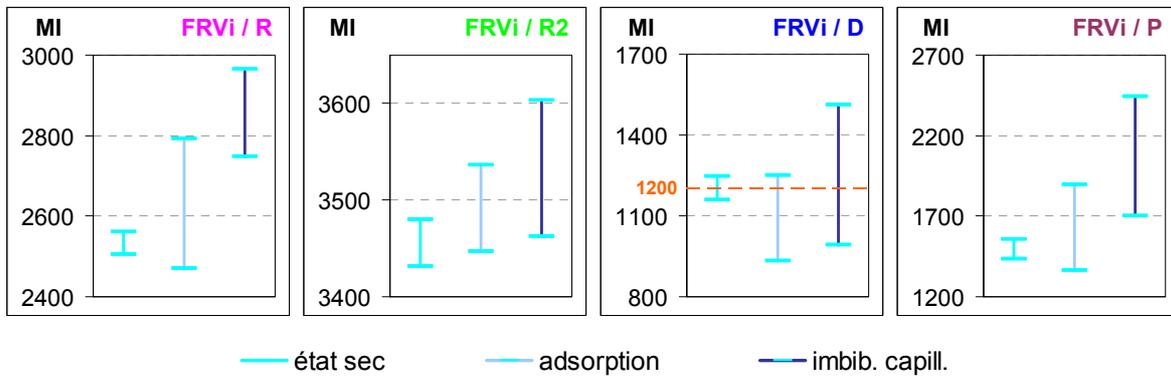
Figur 31 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST P an Würfeln von 15 cm Kantenlänge im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten. Rot: Wiesental, grün: Gurten, türkis: Villarlod und schwarz: Mercerie.



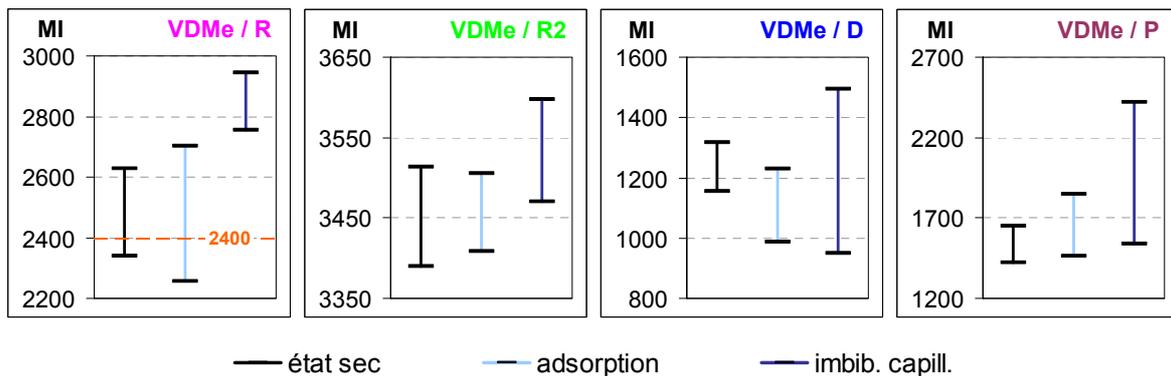
Figur 32 Messwertspanne des Feuchtindex (MI) gemessen mit den Sonden MOIST R, R2, D und P an Würfeln von 15 cm Kantenlänge (nicht gefestigt) aus Wiesentalsandstein im trockenen Zustand („état sec“; 13 Würfel), während dem kapillaren Wassersaugen („imbib. capill.“; 5 Würfel) und im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (1 Würfel).



Figur 33 Messwertspanne des Feuchtindex (MI) gemessen mit den Sonden MOIST R, R2, D und P an Würfeln von 15 cm Kantenlänge (nicht gefestigt) aus Gurtensandsteine im trockenen Zustand („état sec“; 9 Würfel), während dem kapillaren Wassersaugen („imbib. capill.“; 4 Würfel) und im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (1 Würfel).



Figur 34 Messwertspanne des Feuchtindex (MI) gemessen mit den Sonden MOIST R, R2, D und P an Würfeln von 15 cm Kantenlänge (nicht gefestigt) der Molasse von Villarlod im trockenen Zustand („état sec“; 10 Würfel), während dem kapillaren Wassersaugen („imbib. capill.“; 3 Würfel) und im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (1 Würfel).



Figur 35 Messwertspanne des Feuchtindex (MI) gemessen mit den Sonden MOIST R, R2, D und P an Würfeln von 15 cm Kantenlänge (nicht gefestigt) der Molasse der Mercerie im trockenen Zustand („état sec“; 9 Würfel), während dem kapillaren Wassersaugen („imbib. capill.“; 3 Würfel) und im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (1 Würfel).

Trotz nicht idealer Versuchsbedingungen (Messungen durchgeführt ohne angepassten Träger, an Würfeln welche nicht im perfekten Gleichgewicht mit den relativen Feuchtigkeiten im Behälter waren, s. Fussnote 26 und 27, Seite 79), zeigen die Ergebnisse relativ eindeutige Tendenzen: die mit den 4 Sonden des MOIST 200B an Wiesental- und Gurtensandstein sowie den Molassen von Villarlod und der Mercerie gemessenen Feuchtindexe ändern sich mit zunehmender relativer Feuchtigkeit. Die Richtung dieser Änderung hängt von der Sonde und vom Gestein ab:

- mit der Sonde R, für die 4 geprüften Gesteine, tendieren die erzielten MI eindeutig zu zunehmen wenn die relative Feuchtigkeit steigt. Diese Veränderungen folgen einem fast identischen Gefälle für die 3 Molassen (Gurtensandstein, Molassen von Villarlod und der Mercerie) wohingegen die Variationen der MI für die Wiesentalsandsteine einer ganz leicht kräftigeren Steigung folgt (Figur 28);
- mit der Sonde R2, haben die auf den 3 Molassen gemessenen MI eine eindeutige Tendenz mit zunehmender relativer Feuchtigkeit zuzunehmen, mit ähnlichen Gefällen der Kurven, wohingegen die am Wiesentalsandstein gemessenen MI leicht abzunehmen scheinen, wenn die relative Feuchtigkeit zunimmt (Figur 29);
- mit der Sonde D, haben die auf den 3 Molassen gemessenen MI die Tendenz mit zunehmender relativer Feuchtigkeit abzunehmen wohingegen diejenigen vom Wiesentalsandstein steigen. Das Ausmass der Veränderungen ist für die Molasse der Mercerie gering, mittel für die Molasse von Villarlod und stärker für die Gurtensandsteine (Figur 30);
- die mit der Sonde P erzielten Resultate sind umgekehrt zu den mit der Sonde D gemessenen: die MI für die 3 Molassen steigen tendenziell an wohingegen die des Weisentalsandsteins abnehmen, wenn die relative Feuchtigkeit stiegt. Das Ausmass der Variationen ist gering für die Molasse der Mercerie, mittel für die Molasse von Villarlod und stärker für die Gurtensandsteine (Figur 31Figur 31).

Welches auch immer die Sonde oder die Art des Steines sei, die Variationen des MI verlaufen nicht als lineare Funktion der relativen Feuchtigkeit. Aufgrund der nicht optimalen Versuchsbedingungen, ist es jedoch heikel die Beziehung zwischen dem MI und den relativen Luftfeuchtigkeiten bei denen die Gesteine konditioniert worden waren genauer zu bestimmen.

Es ist verlockend sich vorzustellen, dass durch eine Wiederholung der Versuch unter idealen Bedingungen, das MOIST 200B-Gerät geeicht werden könnte um *in situ* die Menge an im Porenraum eines bestimmten Materials adsorbiertem Wasser zu bestimmen. Aber, wenn der vom Gerät während der Adsorption von Wasserdampf angezeigte MI verglichen wird mit dem MI an den trockenen Proben oder an Proben die flüssiges Wasser enthalten, kann festgestellt werden, dass sich die in der grossen Mehrheit der Fälle – zumindest für die hier geprüften Materialien - die Werte überlagern (s. Figur 32 bis 35). Praktisch bedeutet dies, dass es für eine bestimmte Sonde und ein bestimmtes Material sehr schwierig oder unmöglich ist, mittels dem mit dem MOIST 200B gemessenen MI zu bestimmen ob das Material trocken oder ob es eher eine gewisse Menge an adsorbiertem Wasserdampf enthalte oder gar ob es flüssiges Wasser enthalte. Wenn zum Beispiel die Sonde D auf den bei uns im Labor vorhandenen Würfeln von 15 cm Kantenlänge der Molasse von Villarlod den Wert 1200 anzeigt, ist es unmöglich zu präzisieren ob die Probe trocken ist, ob sie adsorbiertes oder flüssiges Wasser enthält (s. Figur 34).

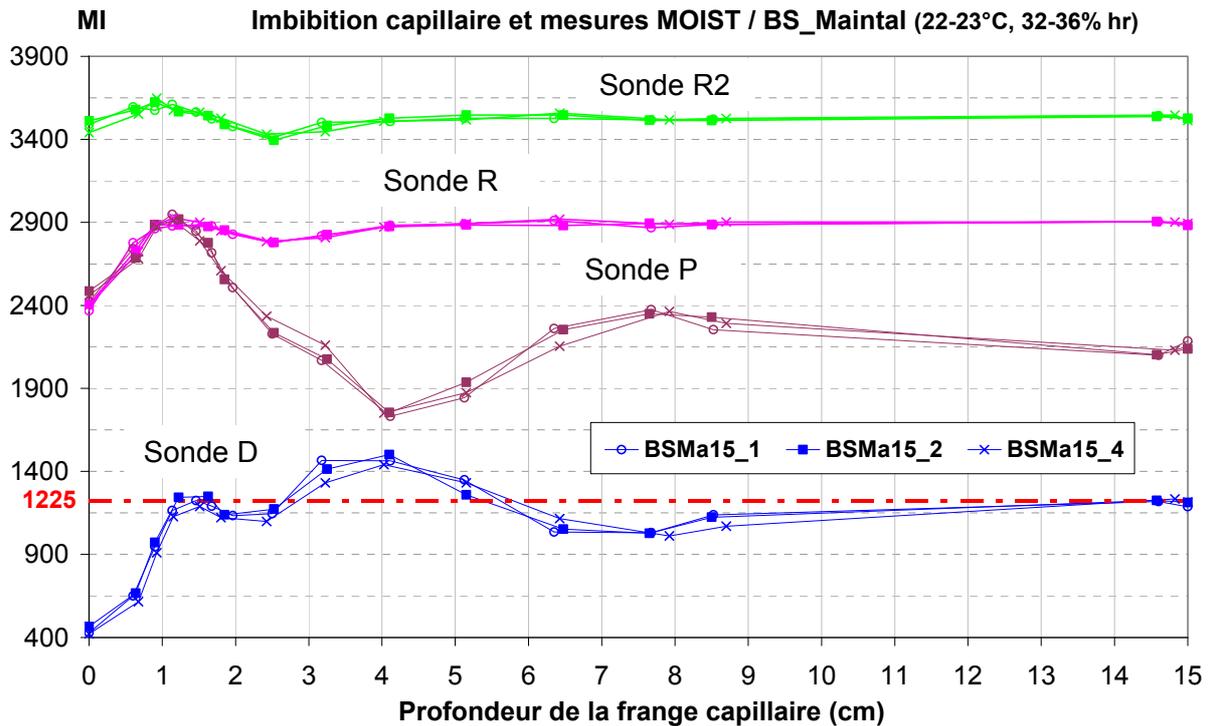
6.1.3 Messungen während des kapillaren Wassersaugens

Die Ergebnisse der während des kapillaren Wassersaugens getätigten Feuchtindex-Messungen werden in den Figuren 36 bis 40 dargestellt.

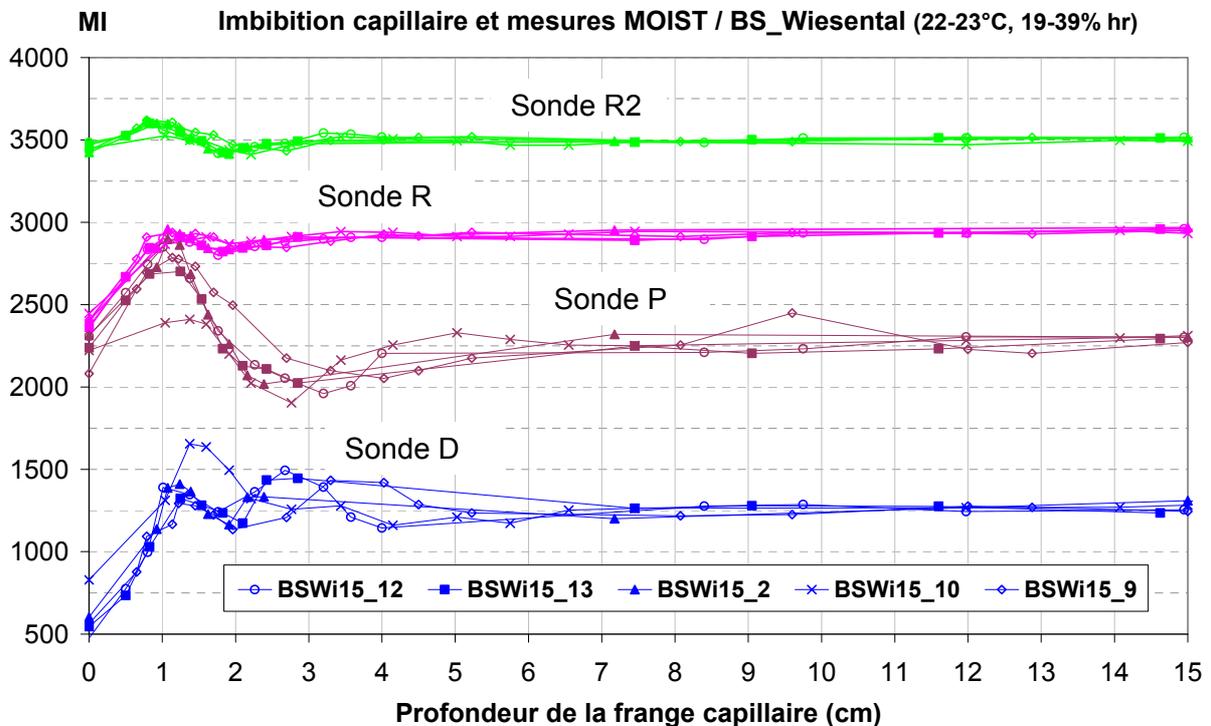
Aus den nachfolgenden Figuren kann abgelesen werden, dass die Variationen des Feuchtindex der vier Sonden des MOIST 200B für die drei Molassen sehr ähnlich sind: die Kurvenverläufe sind sehr ähnlich für die Molassen der Mercerie, von Villarlod und vom Gurten. Dagegen sind diese Variationen für die Main- und Wiesentalsandsteine sehr verschieden, vor allem für die Sonden D und P, welche deren Kurven sehr von denjenigen der Molassen abweichen. Diese Unterschiede sind nach unseren Kenntnissen zu den Wechselwirkungen zwischen Mikrowellen und dem im ungesättigten Porennetzwerk mehr oder weniger gebundenen Wasser nicht erklärbar.

hf sensor erwähnt in der Gebrauchsanweisung des MOIST 200B-Gerätes, dass für eine bestimmte Probe und ideale Versuchsbedingungen (Bedingungen die wir für die Sonden R, R2 und D eingehalten haben), je grösser der MI ist, desto grösser sei der Wassergehalt dieser Probe. Wenn diese Behauptung sich auch für alle Materialien und für alle Sonden bis zu einer Eindringtiefe von 1 cm bewahrheitet, so sind doch die durch das Gerät gegebenen Informationen, für tiefere Eindringtiefen als 1 cm, überhaupt nicht mehr repräsentativ für die Wassermenge. Tatsächlich nehmen, ab einer Tiefe von 1 cm kapillarem Saugen, die MI die durch sämtliche Sonden geliefert werden, tendenziell ab, bevor sie für wenig tiefere Eindringtiefen wieder ansteigen. Mit weiterer Zunahme des kapillaren Saugens, sinkt der MI erneut ab, um danach wieder anzusteigen. Jede Richtungsänderung findet in Abhängigkeit der kapillaren Eindringtiefe, des untersuchten Materials und des Sondentyps mit welcher die Messung durchgeführt wurde statt. Dies bedeutet praktisch, dass es zum Beispiel, wenn die Sonde D auf einem Mainsandstein einen MI 1225 liefert, nicht möglich ist zu wissen, ob die Kapillarfront sich in 1.5, 2.5, 5.75 oder 14.5 cm Tiefe befindet (s. Figur 36); oder ebenso, wenn die Sonde R2 auf einem Gurtensandstein den Wert von 3530 liefert, ist es nicht möglich zu wissen, ob die Kapillarfront sich in 0.4, 1.5, oder 3.5 cm Tiefe befindet (s. Figur 38). Wir konnten zudem beobachten, dass für bestimmte Material-Sonden-Kombinationen, die auf Proben welche bereits kapillar aufgesogenes Wasser enthielten, die gemessenen Feuchtindexe tiefer waren, als sie auf den gleichen Proben im trockenen Zustand gewesen waren. So gibt die Sonde R2, für die 5 untersuchten Gesteine, tiefere MIs als die trockenen Werte, sobald die Kapillarfront in den Molassen 5 cm (Gurten Figur 38, Villarlod Figur 39 und Mercerie Figur 40) oder in den Sandsteinen 2-2.5 cm (Maintal Figur 36 und Wiesental Figur 37) Eindringtiefe überschreitet. Oder auch, für die Buntsandsteine, gibt die Sonde P systematisch tiefere Werte als die Trockenwerte sobald die Kapillarfront sich im Wiesentalsandstein zwischen 2-3 und 4 cm Eindringtiefe befindet (Figur 37) oder 2 cm Eindringtiefe im Mainsandstein überschreitet.

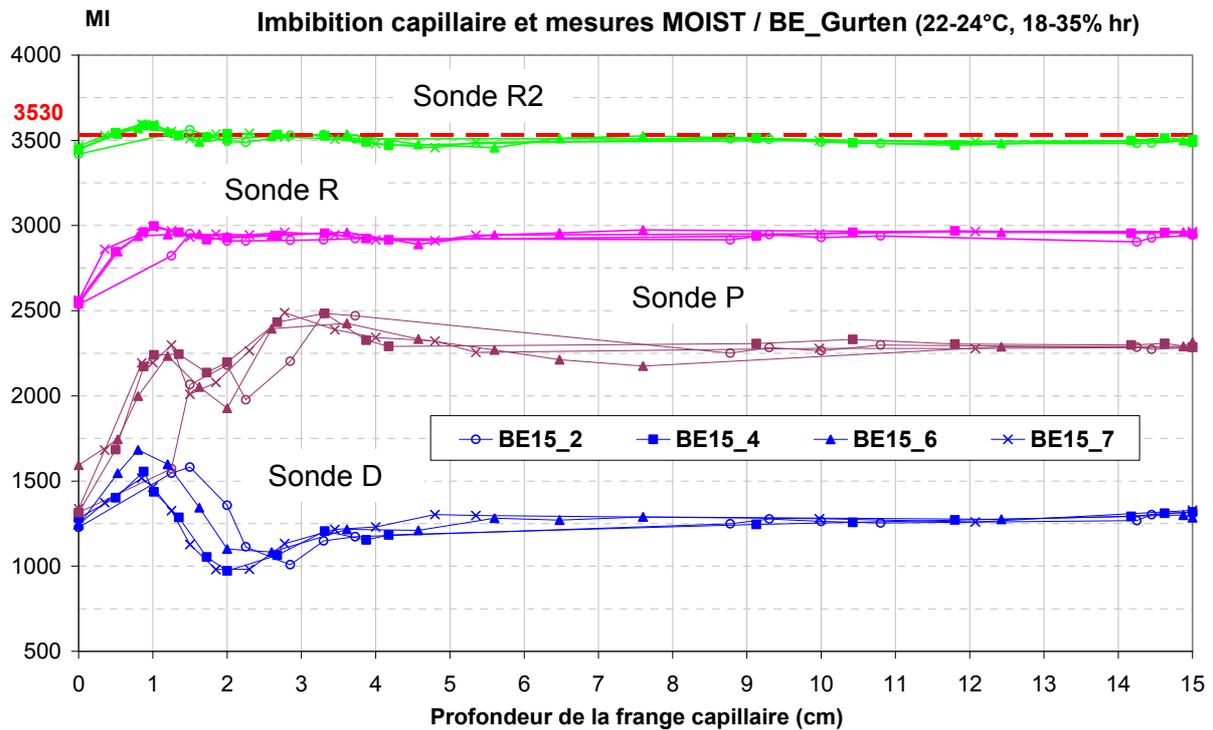
Wir stellen deshalb fest, dass der vom MOIST 200B-Gerät gelieferte Feuchtindex, zumindest für die untersuchten Gesteine, weder zum Abschätzen des Gehalts an Wasser in flüssiger Form im Material noch zum Bestimmen der Eindringtiefe des Kapillarwassers benutzt werden kann, sei dies nun mit der einen oder anderen der vier getesteten Sonden oder durch Vergleich, Addition oder Subtraktion der durch die verschiedenen Sonden ermittelten Werte.



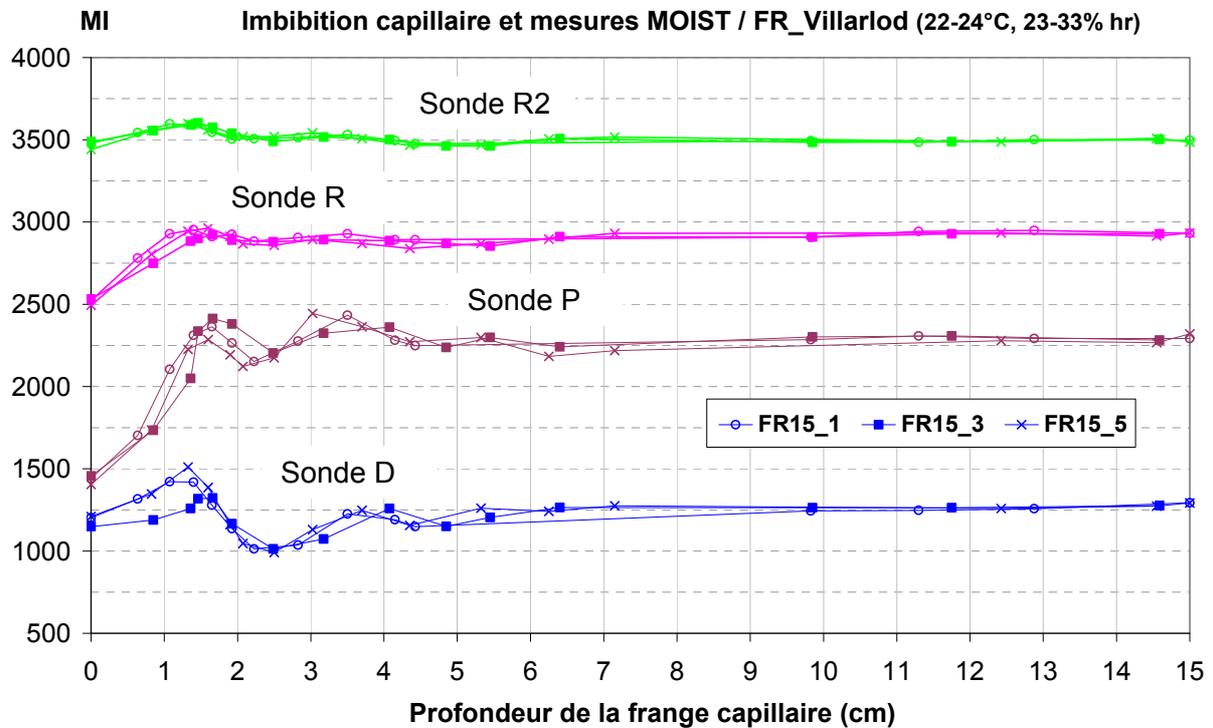
Figur 36 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) während des kapillaren Wassersaugens, an 3 Würfeln von Mainsandstein mit 15 cm Kantenlänge. T 22-23°C, HR 32-36%. „Profondeur de la frange capillaire“ = „Tiefe der Kapillarfront“.



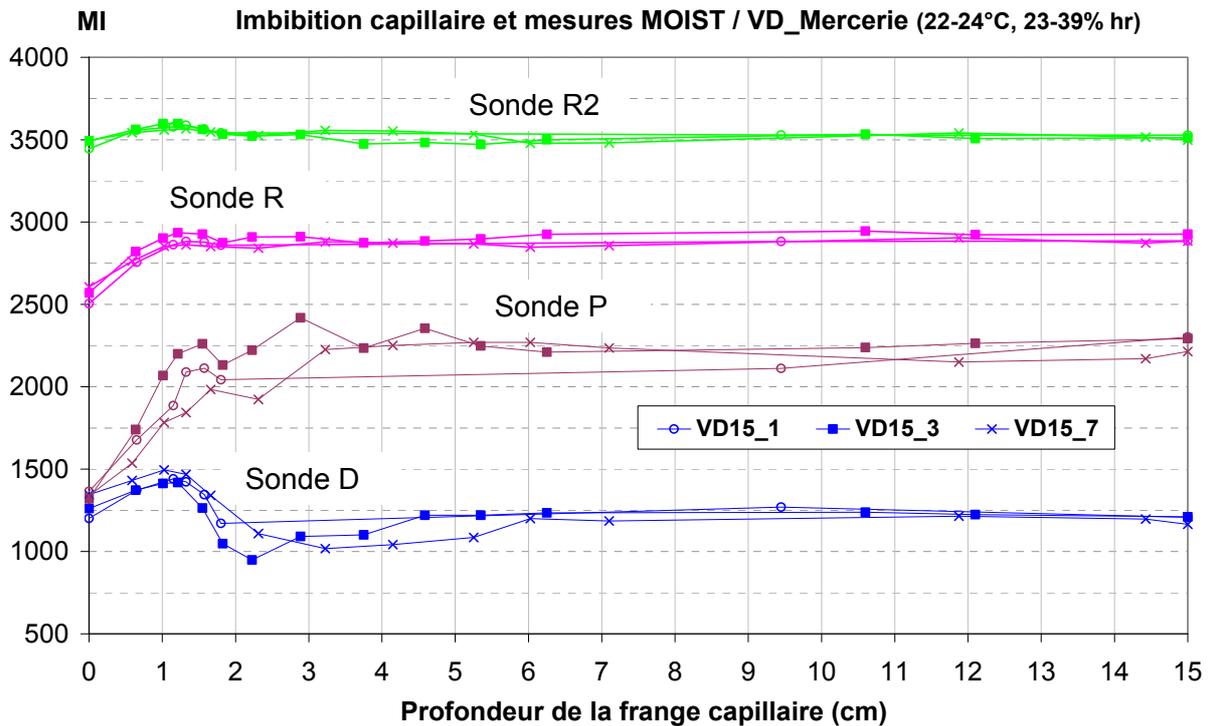
Figur 37 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) während des kapillaren Wassersaugens, an 3 Würfeln von Wiesentalsandstein mit 15 cm Kantenlänge. T 22-23°C, HR 19-39%. „Profondeur de la frange capillaire“ = „Tiefe der Kapillarfront“.



Figur 38 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) während des kapillaren Wassersaugens, an 3 Würfeln von Gurtensandstein mit 15 cm Kantenlänge. T 22-24°C, HR 18-35%. „Profondeur de la frange capillaire“ = „Tiefe der Kapillarfront“.



Figur 39 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) während des kapillaren Wassersaugens, an 3 Würfeln der Molasse von Villarod mit 15 cm Kantenlänge. T 22-24°C, HR 23-33%. „Profondeur de la frange capillaire“ = „Tiefe der Kapillarfront“.

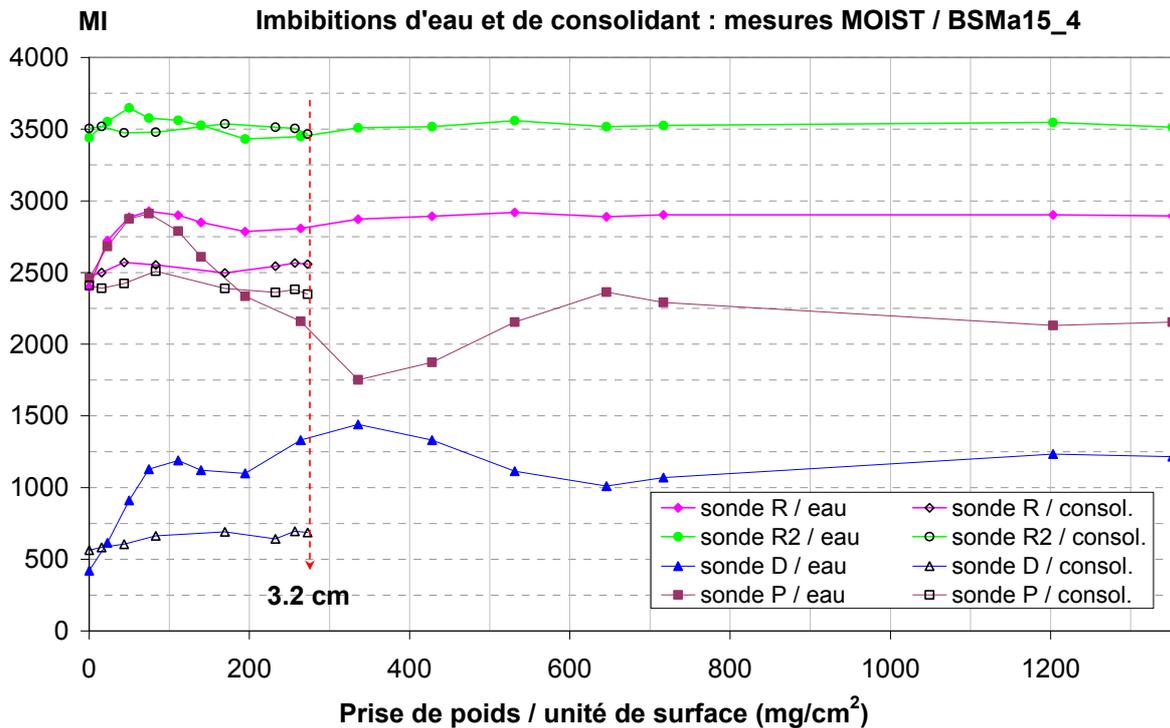


Figur 40 Feuchtindex (MI) gemessen mit der Sonde MOIST R (fuchsia), R2 (grün), D (blau) und P (violett) während des kapillaren Wassersaugens, an 3 Würfeln der Molasse der Mercerie mit 15 cm Kantenlänge. T 22-24°C, HR 23-39%. „Profondeur de la frange capillaire“ = „Tiefe der Kapillarfront“.

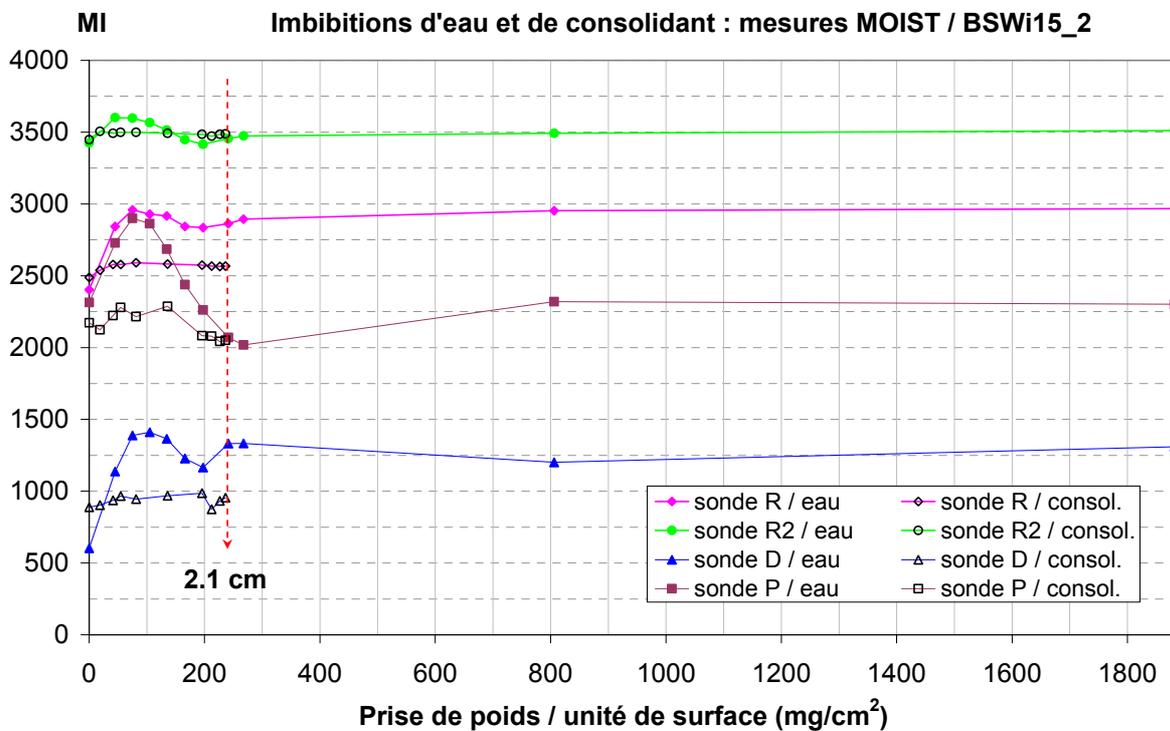
6.1.4 Messungen während der Applikation der Festiger

Da die nach 1, 2, 4 und 6 Wochen nach der Festigung erzielten Messergebnisse nicht signifikant sind, wird hier ausschliesslich über die während der Festigung erzielten Ergebnisse berichtet. In den Figuren 41 bis 45 wird der Feuchtindex (MI) während der Applikation des Festigungsmittels in Bezug auf die Gewichtszunahme an Festiger pro Oberflächeneinheit grafisch dargestellt. Diese Werte werden mit denjenigen verglichen, welche an den gleichen Würfeln während des kapillaren Saugens ermittelt wurden. Die Festiger wurden appliziert bis sie Eindringtiefen zwischen 0.9 und 3.5 cm erreicht hatten. In den Grafiken werden die Ergebnisse einer einzigen Probe pro Gesteinstyp abgebildet: es handelt sich jeweils um diejenige Probe, an welcher die Eindringtiefe am grössten war.

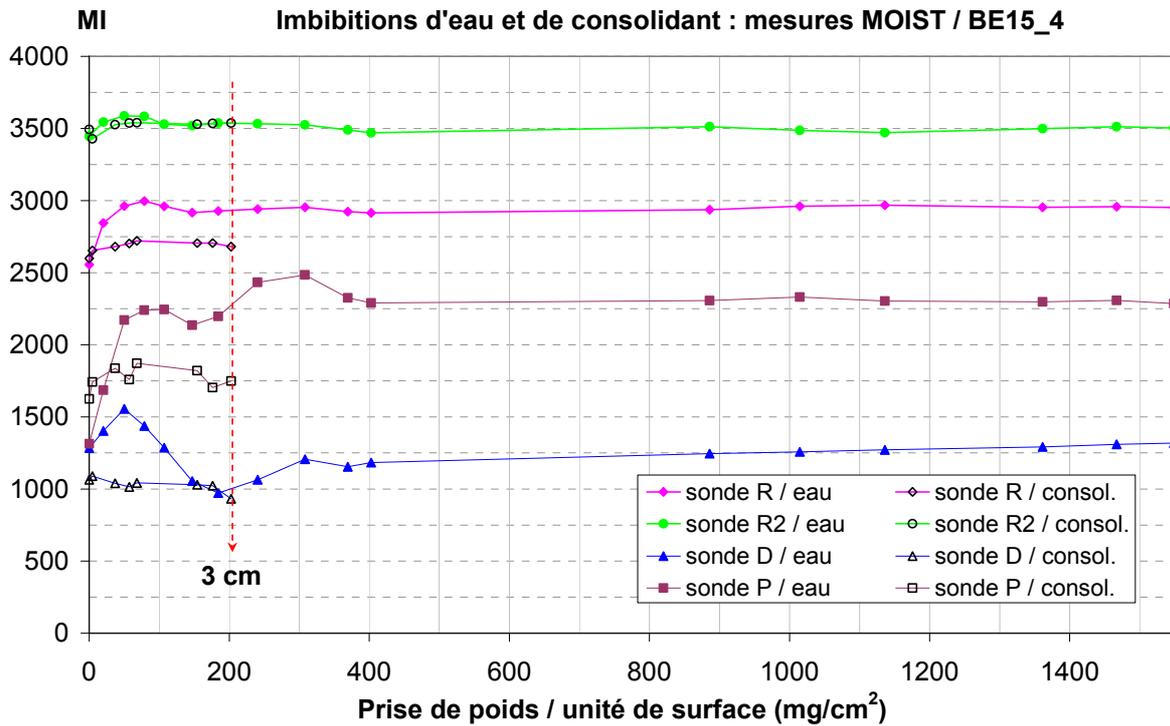
Bei der Festigerapplikation war es nicht möglich jegliches Herunterfliessen des Festigungsmittels entlang der vertikalen Seiten zu verhindern. Deshalb war die Eindringtiefe der Kapillarfront nicht genau so klar abzulesen wie in den Fällen des kapillaren Wassersaugens. Deshalb zeigen die Grafiken in den Figuren 41 bis 45 die MI in Bezug auf die Gewichtszunahme durch das Wasser- oder Festigersaugen pro Einheit der saugenden Oberfläche und nicht wie in den Figuren 36 bis 40 in Funktion der Eindringtiefe.



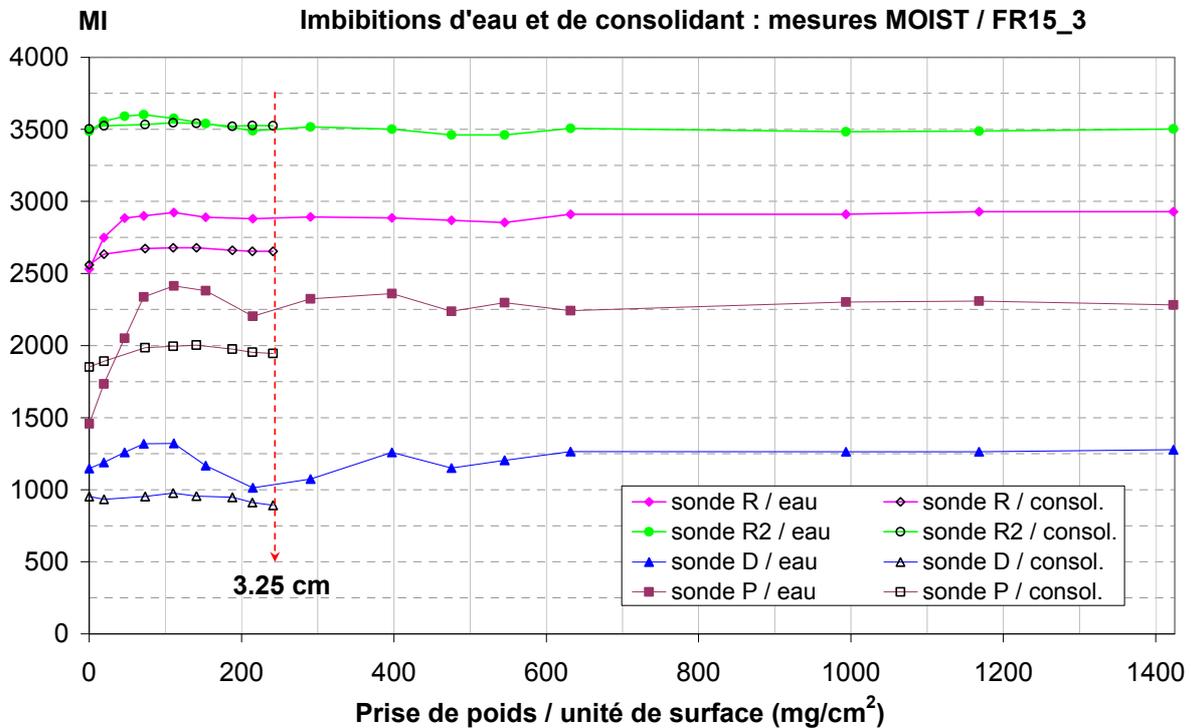
Figur 41 Feuchtindex (MI) gemessen während des kapillaern Saugens (gefüllte Symbole) sowie während der Applikation des Festigers (leere Symbole), ermittelt auf einem Würfel des Mainsandsteins. „Prise de poids / unité de surface“ = „Gewichtszunahme pro Flächeneinheit“



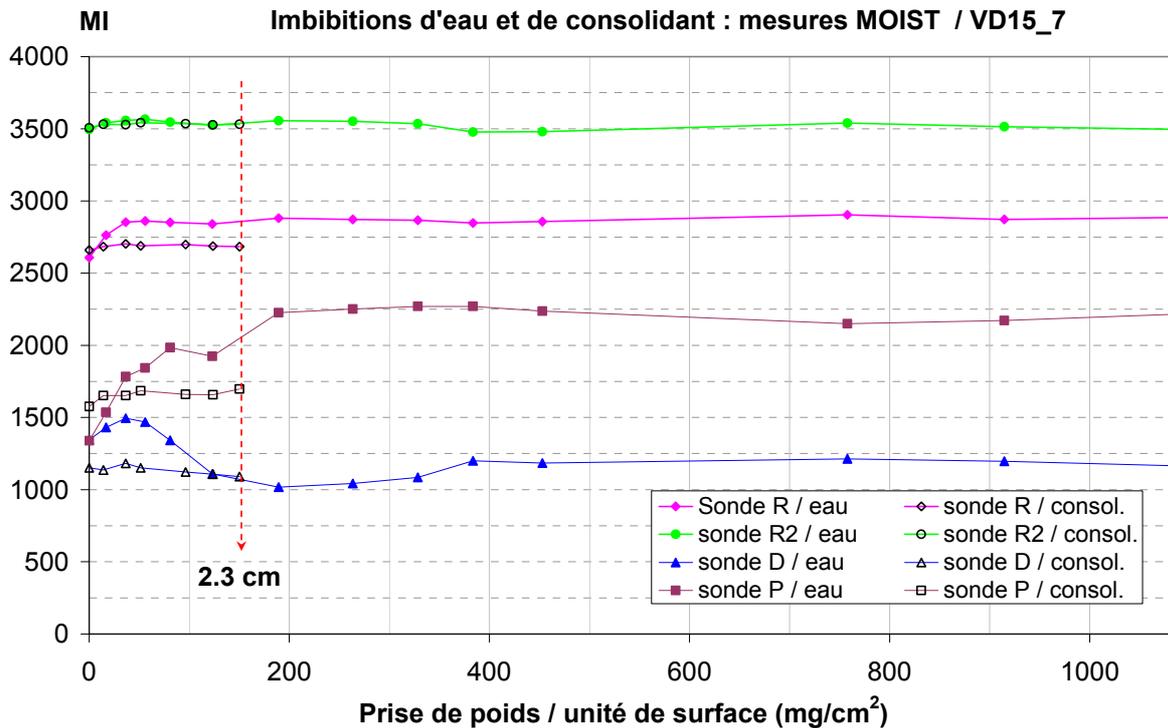
Figur 42 Feuchtindex (MI) gemessen während des kapillaern Saugens (gefüllte Symbole) sowie während der Applikation des Festigers (leere Symbole), ermittelt auf einem Würfel des Wiesentalsandsteins. „Prise de poids / unité de surface“ = „Gewichtszunahme pro Flächeneinheit“



Figur 43 Feuchtindex (MI) gemessen während des kapillaern Saugens (gefüllte Symbole) sowie während der Applikation des Festigers (leere Symbole), ermittelt auf einem Würfel des Gurtensandsteins. „Prise de poids / unité de surface“ = „Gewichtszunahme pro Flächeneinheit“



Figur 44 Feuchtindex (MI) gemessen während des kapillaern Saugens (gefüllte Symbole) sowie während der Applikation des Festigers (leere Symbole), ermittelt auf einem Würfel der Molasse von Villarlod. „Prise de poids / unité de surface“ = „Gewichtszunahme pro Flächeneinheit“



Figur 45 Feuchtindex (MI) gemessen während des kapillaern Saugens (gefüllte Symbole) sowie während der Applikation des Festigers (leere Symbole), ermittelt auf einem Würfel der Molasse der Mercerie. „Prise de poids / unité de surface“ = „Gewichtszunahme pro Flächeneinheit“

Diese Ergebnisse zeigen, dass die durch das MOIST 200B-Gerät ermittelten MI es weder erlauben, die Menge an in die Probe eingedrunenem Festigungsmittel noch die Erreichte Eindringtiefe zu beziffern. Wie beim kapillaren Wassersaugen, steigen die von den vier Sonden gelieferten MI zuerst mit der Eindringtiefe des Festigers an. Wobei dieser Anstieg sehr viel geringer ist als beim Wasser. Sobald die Kapillarfront des Festigers etwa 1 cm erreicht hat, sinken die Feuchtindex manchmal tendenziell ab und oszillieren danach wie im Fall des Wassers, was es unmöglich macht, die Ergebnisse bezüglich der Eindringtiefe oder der Menge an aufgenommenem Festiger zu interpretieren(s. vorheriger §).

Anhand der Figuren 41 bis 45 kann festgestellt werden, dass das MOIST 200B für dieselben Proben und dieselben Sonden unterschiedliche Feuchtindexe für den Trockenzustand („prise de poids“ = 0) vor dem kapillaren Wassersaugen respektive den Trockenzustand vor der Festigung liefert. Dieser Unterschied ist eindeutig an die in den beiden Fällen unterschiedliche adsorbierte Wassermenge gebunden: vor dem kapillaren Saugen waren die Proben im Gleichgewicht mit der relativen Luftfeuchtigkeit im Labor, also einer verhältnismässig niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 19 et 39%, wohingegen sie vor der Festigerapplikation in Behältern von 75% relativer Feuchtigkeit konditioniert worden waren. Deshalb war vor dem Applizieren des Festigers die Menge des an den Porenwänden adsorbierten Wassers grösser als diejenige vor dem kapillaren Wassersaugen und das MOIST 200B-Gerät scheint dies unterscheiden zu können.

6.2 Elektrische Leitfähigkeitsmessung

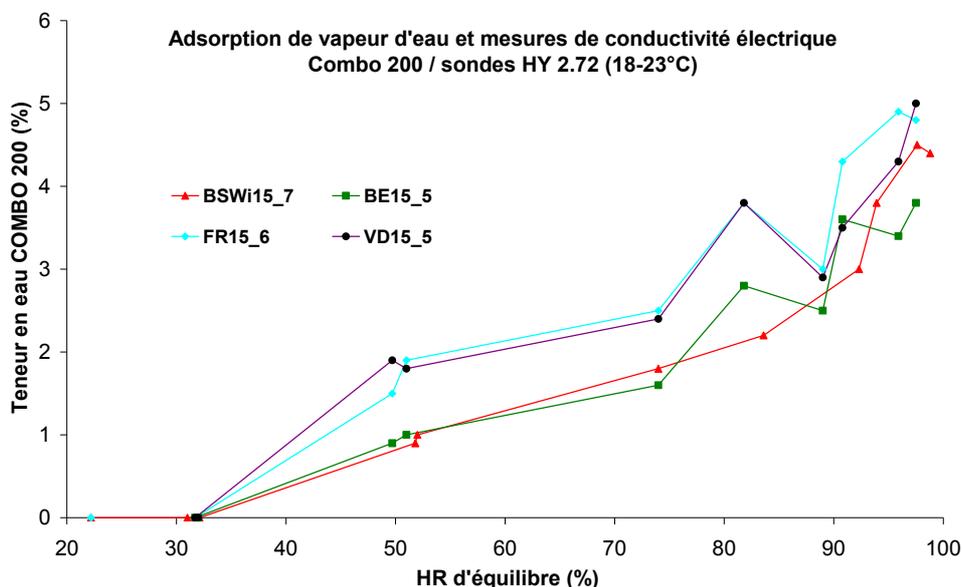
Die im Folgenden angegebenen Prozentwerte sind diejenigen, welche auf der digitalen Anzeige des Gerätes abgelesen werden konnten. Sie stellen den Wassergehalt des Materials in Bezug auf sein Trockengewicht dar.

6.2.1 Messungen während der Wasserdampfadsorption

Sämtliche mit dem Leitfähigkeitsmessgerät COMBO 200, während der Wasserdampfadsorption gemessenen Wassergehalte, werden in Figur 46 in Bezug auf die relative Feuchtigkeit der Konditionierung der Proben dargestellt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die COMBO 200 gelieferten Wassergehalte tendenziell mit der relativen Feuchtigkeit, in welcher die Proben konditioniert worden waren, ansteigen. Aufgrund der nicht idealen Versuchsbedingungen (die Proben hatten nicht wirklich ein perfektes Gleichgewicht erreicht, als die Messungen durchgeführt wurden, siehe Fussnote 26, Seite 79), ist es nicht möglich, die exakte Beziehung welche zwischen den Messwerten des Wassergehalts des COMBO 200 und der relativen Luftfeuchtigkeit in welcher die Steine gelagert wurden zu definieren.

Wie bei der Mikrowellenreflexion, ist es möglich, dass durch eine Wiederholung der Experimente unter idealen Bedingungen, das Leitfähigkeitsmessgerät COMBO 200, geeicht werden könnte, um damit *in situ* die im Porenraum eines Materials adsorbierte Wassermenge zu bestimmen, unter der Voraussetzung, dass das Steinmaterial keine löslichen Salze enthalten würde. Wir halten fest, dass die hier durchgeführten Messungen Oberflächenmessungen sind. Durch bohren von Löchern mit 8 mm Durchmesser in den Materialien, könnte das Gerät möglicherweise auch geeicht werden, um die Menge an adsorbiertem Wasser in der Tiefe festzustellen.



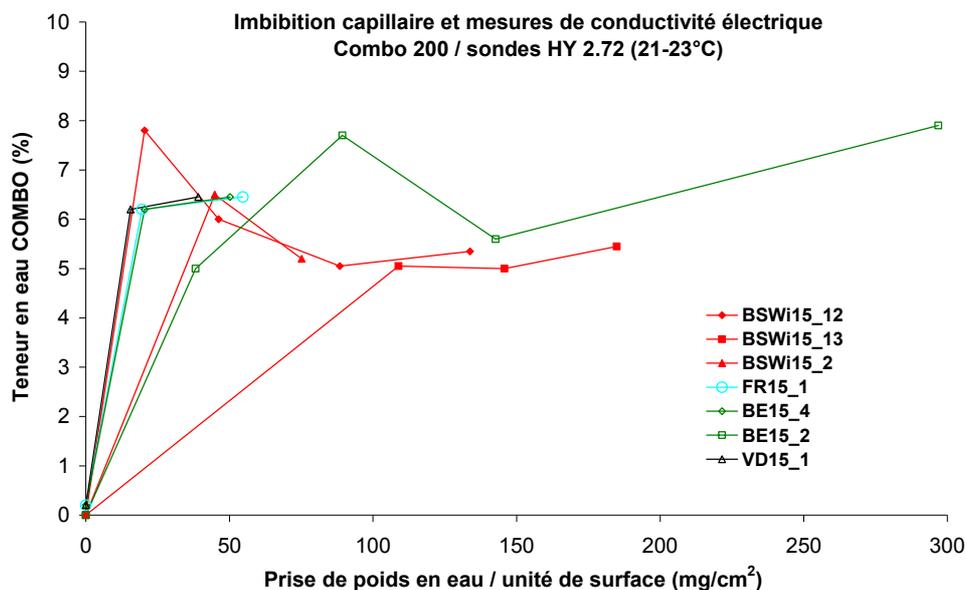
Figur 46 Wassergehalt gemessen an Würfeln von 15 cm Kantenlänge im Gleichgewicht mit verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (= "HR d'équilibre") mit den Sonden HY2.72 des Leitfähigkeitsmessgeräts COMBO 200. Rot: Wiesentalsandstein, grün: Gurtensandstein, türkis: Molasse von Villarod und schwarz: Molasse der Mercerie. Die Oberflächentemperatur der Materialien während der Messungen lag zwischen 18 und 23°C.

6.2.2 Messungen während des kapillaren Wassersaugens

Sämtliche mit dem Leifähigkeitsmessgerät COMBO 200, während des kapillaren Wassersaugens gemessenen Wassergehalte, werden in Figur 47 in Bezug auf die Gewichtszunahme pro Flächeneinheit der Proben dargestellt.

Während der Messungen ist rasch klar geworden, dass das COMBO 200-Gerät, zumindest mittels Oberflächenmessungen, nicht geeignet ist, die Menge an kapillar im Porennetzwerk aufgenommenem Wasser zu bestimmen. Tatsächlich zeigt Figur 47 für alle Steine, dass die vom Gerät gelieferten Wassergehalte zwischen 5 und 8% schwanken, was auch immer die in der Probe enthaltene Wassermenge sei. Dies erklärt sich dadurch, dass die Wassermenge, welche in den äussersten Millimetern des Gesteins, die während des kapillaren Saugens im Kontakt zum Wasser sind, gleich bleibt unabhängig vom weiteren Eindringen der Kapillarfront in das Material. Da das Gerät die elektrische Leitfähigkeit auf dem kürzesten Weg zwischen den beiden Sonden misst und diese Sonden mit nur wenigen Kubikmikrometern des Oberflächenmaterials im Kontakt stehen, ist es unempfindlich für die Eindringtiefe des kapillaren Wassers.

Dies wird durch die Messungen an den Proben BE15_2, BSWi15_12 und BSWi15_13 klar gezeigt, für welche die Messungen bis zum Erreichen der Kapillarfront von 14, 12 respektive 11.5 cm durchgezogen wurden. Die Messungen an den vier anderen Proben bis zu Eindringtiefen der Kapillarfront bis zu einer Grössenordnung von 1 cm, wurden nur gemacht um die ersten Beobachtungen zu bestätigen (s. Figur 47).



Figur 47 Wassergehalt gemessen mit den Sonden HY2.72 des Leifähigkeitsmessgeräts COMBO 200 während der kapillaren Wassersaugens an Würfeln von 15 cm Kantenlänge. Rot: Wiesental-sandstein, grün: Gurtensandstein, türkis: Molasse von Villarod und schwarz: Molasse der Mercerie. Die Oberflächentemperatur der Materialien während der Messungen lag zwischen 21 und 23°C.

Wir halten weiter fest, dass die für die Proben BE15_2, BSWi15_12 und BSWi15_13 festgestellten Schwankungen den unterschiedlichen Anpressdrücken der Sonden entsprechen: wir haben festgestellt, dass je grösser der auf die Sonden ausgeübte Druck war, desto grösser wurde der vom Gerät gelieferte Wassergehalt und eine sehr geringe Änderung des Drucks führte zu einer nicht vernachlässigbaren Änderung im Messresultat.

Diese Ergebnisse zeigen also, dass das COMBO 200-Gerät es nicht erlaubt, durch eine zerstörungsfreie Oberflächenmessung, die Menge an in der Probe enthaltenem Kapillarswassers zu ermitteln. Folglich wurden während der Festigerapplikation keinerlei Messungen mit diesem Apparat durchgeführt.

7 Schlussfolgerungen und offene Fragen

Zu Beginn dieser Studie, hofften wir mittels einer zerstörungsfreien Messung, mit dem MOIST 200B-Gerät – Sender und Empfänger von Mikrowellen – Eindringtiefe und Menge (Wasser oder Festigungsmittel) der Flüssigkeit anzeigen zu können, welche von der Messoberfläche her in einen Stein eingedrungen war. Unglücklicherweise zeigen die Ergebnisse, dass – zumindest für die hier untersuchten Materialien – die Werte, welche das MOIST 200B liefert, weder zur Abschätzung der Flüssigkeitsmenge im Material, sie dies nun Wasser oder Festiger, noch zum bestimmen der Eindringtiefe gebraucht werden kann.

Was das Leitfähigkeitsmessgerät COMBO 200 betrifft, welches wir dazu benutzen wollten die Ergebnisse des MOIST zu bestätigen oder zu präzisieren, so haben die im Verlaufe dieser Studie durchgeführten Versuche gezeigt, dass es in keiner Weise für zerstörungsfreie Oberflächenmessungen an Gesteinen geeignet ist. Es könnte sein, dass es zu Messungen in dazu gebohrten Löchern benutzt werden könnte, was aber eine Zerstörung von Material bedingen würde. Die Tatsache jedoch die Ergebnisse, welche diese Art von Geräten liefern, durch die Anwesenheit von löslichen Salzen stark durcheinander gebracht werden, lässt im Fall von *in situ* Messungen auf verwitterten, immer mehr oder weniger salzhaltigen Steinen verschiedenste Interpretationsschwierigkeiten erahnen.

Diese Studie hat es aber zumindest erlaubt die Porositäten und die kapillaren Saugeigenschaften der von den 4 Bauwerken zur Verfügung gestellten Materialien, d.h. der Buntsandsteine Main- und Wiesentalsandstein für das Münster Basel, die Bernermolasse oder Gurtensandstein für das Münster Bern, die Freiburgermolasse von Villarod für die Kathedrale Fribourg und schliesslich für die aquitane Molasse oder graue Molasse von Lausanne der Mercerie für die Kathedrale Lausanne.

Weiter erlauben es die Ergebnisse die Phänomene, welche das kapillare Eindringen von Flüssigkeiten in ein Gestein bestimmen, besser zu verstehen. Wir beweisen einerseits, dass die Kinetik des kapillaren Saugens, durchgeführt an identischen Proben aber mit verschiedenen netzenden Flüssigkeiten nicht die gleiche ist, dass also die Art der Flüssigkeit eine nicht zu vernachlässigende Rolle für diese Kinetik spielt und andererseits, dass die Kinetik des kapillaren Saugens durchgeführt mit dergleichen netzenden Flüssigkeit an Proben von identischer Form aber von geringfügig anderen Gesteinen, ebenfalls nicht gleich sind, dass also auch die Porenstruktur eine wichtige Rolle für die Kinetik spielt.

Damit wissen wir nun, dass es keinerlei Laborversuch es erlauben würde die für eine optimale Festigung zu applizierende Festigungsmenge zu bestimmen. Praktisch bedeutet dies, dass die beste Art des Festigerauftrags eine Applikation bis zum „Ende des Saugens“ ist. Allerdings muss dieses „Ende des Saugens“ von Fall zu Fall genau definiert werden²³: wie unsere Ergebnisse zeigen, hängen die maximale pro Oberflächen- und Zeiteinheit aufnehmbare Menge an Flüssigkeit sowie ihre Eindringtiefe vom Zustand des Steins, der

²³ „Ende des Saugens“ bedeutet nicht, dass soviel Festiger aufgetragen werden soll bis dieser über die Oberfläche abfließt, sondern bis der Stein nicht mehr aufnimmt. Im Zweifelsfall, ist es vorzuziehen vor dem „Ende des Saugens“ aufzuhören, denn es erscheint viel problematischer zu sein, wenn zu viel als wenn nicht genügend Festiger ins Material gebracht wird.

Applikationsmethode und der Art des Mittels ab (es ist zudem wahrscheinlich, dass die Anwesenheit von löslichen Salzen oder von früheren Konservierungsmitteln auf der Oberfläche und/oder in der Porosität, die absorbierbare Menge stark beeinflussen). So wäre zum Beispiel zum Erreichen einer Eindringtiefe von 1 cm, die Menge und die Applikationskinetik für diese Menge auf einem Gestein x nicht gleiche wie auf einem Gestein y. Die Applikation muss deshalb immer von Fall zu Fall angepasst werden, Baustelle für Baustelle, Stein für Stein und sogar Steinteil für Steinteil bei Steinen die von ungleichmässigen oder graduellen Verwitterungen betroffen sind, d.h. in der Mehrheit der Fälle.

Deshalb kann die Applikation von Festigungsmitteln nicht „mechanisiert“ werden, das Auge und die Erfahrung des/der Applizierenden ist für diese Anpassungen absolut notwendig. Nach dieser Studie zu schliessen, geben sämtliche Laborversuche Ergebnisse, welche allzu entfernt von der Realität sind und momentan scheint keinerlei zerstörungsfreie, kostengünstige Technik²⁴ eine Kontrolle (und danach Nachkontrolle) einer Festigung *in situ* zu erlauben. Deshalb bleiben als einzige Möglichkeit genau zu wissen wie ein Festiger eindringt und sich in einem bestimmten Gestein, mit einer bestimmten Verwitterungsform verteilt, zerstörende Versuche *in situ*. Durch die Anwesenheit bei den Massnahmen und durch einige zerstörende Kontrolluntersuchungen hoffen wir, die Applizierenden bei Anpassungen besser begleiten zu können. Für die Sicherstellung einer intelligenten und nützlichen Nachkontrolle von Festigungsversuchen mit der Zeit, zeigen die Studien, dass es absolut wichtig ist, die Massnahmen zu dokumentieren und zwar sie treffend und brauchbar zu dokumentieren, so dass Personen die nicht mit den Massnahmen vertraut sind, sie auch nach einigen Jahren, respektive Jahrzehnten verstehen werden (Bläuer et al., 1988). Wir können dabei behilflich sein eine derartige Dokumentation aufzubauen.

Diese Studie hat es uns weiter erlaubt, mehr über die Festigungsmittel auf Basis von Ethylsilikaten zu lernen und uns Fragen zu ihrer Wirkung und Dauerhaftigkeit zu stellen. Tatsächlich, sind wir berechtigt zu fragen, welche Rolle das Gel, welches sich nach dem Trocknen ausbildet, genau spielt. Auf welche Weise kann es den auseinander geratene Sandkörnern den Zusammenhalt wiedergeben? Ist es vernünftig jegliche Art der Verwitterung die an den Sandsteinen gefunden wird zu festigen? Oder sonst, welches sind die „festigbaren“ Verwitterungsformen und welche können nicht gefestigt werden? Welches sind also die Grenzen der Benutzbarkeit der Mittel? Andererseits ist uns durch unsere Studien und die Gespräche mit Spezialisten bewusst geworden, dass die Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen die während der Applikation dieser Produkte herrschen nicht irgendwie sein können und das optimale Bedingungen – wie zum Beispiel die zum Zeitpunkt der Applikation im Porennetzwerk vorhandene Menge an adsorbiertem Wasser – je nach der mineralogischen Nature und /oder der Porenstruktur des zu behandelnden Steins anders sind. Und zurzeit scheint klar zu sein, dass die exakten Abhängigkeiten zwischen Umgebungsbedingungen und Festigungsmittel nicht eindeutig definiert sind. Es erschiene uns deshalb wichtig diese Beziehungen besser zu verstehen und besser zu bestimmen, welches die Mindestanforderungen jedes der Gesteine sind.

²⁴ Wir verweisen darauf, dass nach unserer Literaturstudie (CSC, 2007), ausser der Reflexion von Mikrowellen – welche wir hier getestet haben und die sich als unnütz erwiesen hat – NMR-Messungen (NMR = Kernmagnetresonanz) als brauchbar erschien, um *in situ* zerstörungsfrei die Menge und Eindringtiefe einer auf die Oberfläche aufgetragenen, kapillar eindringenden Flüssigkeit zu messen. Wir haben jedoch keine einzige Studie gefunden, welche über die Anwendung dieser Methode (NMR) *in situ* berichten würde und vor einer praktischen Anwendung müssten notwendigerweise Eichungen durchgeführt werden. Da diese Methode jedoch viel kostspieliger und heikler in der Anwendung als die Mikrowellenreflexion erscheint, wäre es noch viel frustrierender, wenn ein solcher Versuch mit negativen Ergebnissen enden würde.

Weiter stellen sich zurecht Fragen bezüglich der Festigeranteile, welche nach der Gelbildung hydrophob bleiben sowie nach dem Einfluss des Kieselgels selber: dieses Kieselgel bedeutet zwangsläufig eine Änderung sowohl der physikalischen als auch chemischen Gesteinseigenschaften. So hat Félix (1994) gezeigt, dass die hydrische (beim Vorhandensein von kapillarem Wasser) Quellung – mittel- oder langfristig verantwortlich für strukturelle Schwächung und folglich Verwitterungen – der aquitanen Molasse, ein Ergebnis, welches indirekt durch Mertz (2006) bestätigt wird, der zeigt, dass Khmer- Sandsteine – den roten Buntsandsteinen ähnliche Gesteine – nach einer Festigung mit einem Ethylsilikat eine erhöhte hydrische (beim Vorhandensein von adsorbiertem Wasser) Quellung aufweisen. Diese Beobachtungen beweisen also, dass das entstandene, nicht inerte Kieselgel, in manchen Fällen, mittel- oder langfristig das Auftauchen von Schäden am gefestigten Stein beschleunigen kann, was in uns das Verlangen weckt, mehr über die unvermeidliche, zeitliche Weiterentwicklung dieses Kieselgels, seine Wechselbeziehungen mit dem Gestein und folglich der Beständigkeit der Festigungen, ob nun reell oder anscheinend, zu erfahren. Verschiedene Studien scheinen zu beweisen, dass es ungünstig oder gar unmöglich ist, Kalksteine mit Ethylsilikaten zu festigen (Wheeler, 2005). Warum das? Wenn dies wirklich der Fall ist, wie steht es dann um die Festigung der schweizerischen Molassen – von Burdigalien oder Aquitanien – welches Sandsteine sind, die einen kalzitischen Zement aufweisen? Andere Studien scheinen zu folgern, dass die Anwesenheit bestimmter Salze die Bildung des Kieselgels behindert (Wheeler, 2005). Wenn dies der Fall ist, was geht dann bei der Applikation des Mittels auf verwitterten Gesteinen, welche immer mehr oder weniger reich an löslichen Salzen sind. Weiter gibt es sogar Untersuchungen, welche zum Schluss kommen, dass es für manche Gesteine vorzuziehen ist auf eine Kieselsäurefestigung zu verzichten (Holleman, 1994). Wenn diese Folgerungen richtig sind, müssen dann nicht die ganzen Festigungsmassnahmen überdacht werden?

Schlussendlich folgt aus dieser Studie, dass es nicht möglich ist die exakten Folgen einer Festigungsmassnahme mit Kieselsäureestern für die Dauerhaftigkeit der behandelten Steine vorauszusagen, und dass folglich eine solche Massnahme nie als präventive Konservierungsmassnahme angewendet werden darf, sondern einzig und exklusive als korrektive Massnahme.

8 Glossar

A	Spezifischer Kapillarkoeffizient = massenbezogene kapillare Sauggeschwindigkeit	$[M/L^2 \cdot T^{1/2}]$
A'	Volumen-spezifischer Kapillarkoeffizient = volumenbezogene kapillare Sauggeschwindigkeit	$[L^3/L^2 \cdot T^{1/2}]$
B	linearer Kapillarkoeffizient = lineare kapillare Sauggeschwindigkeit	$[L/T^{1/2}]$
HR	Relative Luftfeuchtigkeit	[%]
MI	moisture index = Feuchtindex des MOIST 200B- Geräts, dimensionslose Zahl zwischen 0 und 4000, die vom Feuchtezustand des Materials, auf welchem die Messung gemacht wird, abhängt	[-]
P _d	Gewicht	[M]
P _d s	Trockengewicht	[M]
P _o t	Gesamtporosität = Gesamtporenvolumen / Gesamtporenvolumen	[%]

	+ Volumen des Feststoffs = porosité totale	
P_{0c}	Kapillarporosität = Volumen der beim kapillaren Saugen frei zugänglichen Porenräume / Gesamtporenvolumen + Volumen des Feststoffs = porosité capillaire	[%]
P_{0p}	Gefangene Porosität = $P_{0t} - P_{0c}$ = beim kapillaren Saugen eingeschlossenes Luftvolumen / Gesamtporenvolumen + Volumen des Feststoffs = porosité piégée	[%]
S	Hirschwaldkoeffizient = kapillarer Sättigungskoeffizient = P_{0c}/P_{0t} = Volumen der beim kapillaren Saugen frei zugänglichen Porenräume / Gesamtporenvolumen	[%]
V	Volumen	[L ³]
V _{ads}	Volumen des bei einer gegebenen relative Feuchtigkeit an den Porenwandungen adsorbierten Wasserdampfs	[L ³]
V _{capil}	Volumen der beim kapillaren Saugen s.s. frei zugänglichen Porenräume	[L ³]
ΔP_d	Gewichtsänderung	[M]

9 Bibliographie

Amoroso G.G. & Fassina V., 1983. Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Elsevier, Amsterdam, Lausanne, Oxford, New York.

Bläuer C., Martin, B., Morariu D., Schwizer B., and Widmer, P., 1988. Nachkontrolle und Begleitung von Restaurationen an Sandsteinfassaden - Tafeln und Beilagen. Ein Projekt des NFP 16: Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern. (unpublizierter Bericht:) Geologisches Institut der Universität Bern.

CSC, 2007 - Projet "4 cathédrales" : étude de littérature préliminaire. Réunion du 5 juin 2007

Feirreira Pinto, A.P. and Delgado Rodrigues, J., 2008. Stone consolidation: The role of treatment procedures. Journal of Cultural heritage 9 (2008) 38-53.

Félix C., 1994. Déformations de grès consécutives à leur consolidation avec un silicate d'éthyle. Proceedings of the 17th Congress on the Int. Association of Engineering Geology, vol. V, Lisboa (Portugal), September 5-9, 1994. R. Oliviera, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha Ed., A.A. Balkema, 1994, 3543-3550

Fischer C., 1993. Importance des propriétés pétrophysiques et des interactions physico-chimiques dans l'hydrofugation des roches par des silicones. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg. 237p.

Göller A., 1999. Moisture mapping - Flächen- und tiefenaufgelöste Feuchtemessung mit dem MOIST-Verfahren, Feuchtag '99 Umwelt · Meßverfahren · Anwendungen 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin

- Göller A., 2000. Schadensdiagnose, Aufnahmen + Deuten, Feuchtemessung im Raster – das Moisture Mapping / 2. Teil. Bautenschutz +Bausanierung , Heft 08, 33-36.
- Göller A., 2007. Mikrowellenbasierte Rasterfeuchtemessung - Moderne Konzepte der Feuchtemessung in Bauwerken. Bautechnik, 6/2007, 417-422
- Holleman M., 1994. "Überprüfung von ausgewählten Kieselsäurehaltigen Festigern an verwittertem Sandstein." unpubl. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, Fachbereich Restaurierung.
- Horie C.V., 1987. Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings. Architectural Press.
- Mertz J.D., 2006. Salt damage, dilation and actual practices in sandstone conservation. Actes du colloque des architectes de cathedrales à Strasbourg, 2006, Dombaumeister E.V., 153-156.
- Price C., 2006. Consolidation. In Henry Alison Ed., Stone Conservation. Principles and Practice. Donhead.
- Wendler E., 2008. Communication personnelle
- Wheeler G., 2005. Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone. The Getty Conservation Institute, Serie: Research in Conservation.

Fribourg, den 23. Februar 2009

Dr. Bénédicte Rousset
Petrophysikerin

Dr. Christine Bläuer
Mineralogin

Verteiler:

Münster Basel: 3 ausgedruckte Exemplare + eine pdf-Datei
Münster Bern: 3 ausgedruckte Exemplare + eine pdf-Datei
Kathedrale Fribourg: 3 ausgedruckte Exemplare + eine pdf-Datei
Kathedrale Lausanne: 3 ausgedruckte Exemplare + eine pdf-Datei

ANNEXE 1 – EINIGE ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN ZU DEN UNTERSUCHTEN SANDSTEINEN

A1.1 MAIN SANDSTEIN (MÜNSTER BASEL, BS)

A1.1.1 Geologie, Mineralogie, Petrographie

Gäbert & Steuer, 1915, p.459: «Mainsandstein = a) Sandstein des Buntsandsteins, meist rötlich bis rot gefärbt, Bettingen, Wertheim, Boxthal, Reistenhausen usw. (mittlerer Buntsandstein), ...»

Grimm, 1990, p.134: «Umgebung von Wertheim [...] Gestein 087 [...] Wüstenzeller Sandstein; roter feinsandiger Buntsandstein, Plattensandstein („Roter Mainsandstein“); Oberer Buntsandstein [...] feinsandiger, homogener, roter, teils rotbrauner bis rotvioletter Sandstein mit Tongallen und einem deutlichen Hellglimmergehalt auf den Schicht- bzw. Spaltflächen; Sandstein meist plattig aber auch massig ausgebildet.»

A1.1.2 Porosität, physikalische und mechanische Eigenschaften

Grimm, 1990: Wüstenzeller Sandstein, Gestein 087; Dichte rein 2.68; Dichte roh 2.38; Porosität Vol-% 11.05; Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck Gew-% 3.08; Wasseraufnahme unter Vakuum Gew-% 4.64; (Hirschwaldkoeffizient) S = 0.66.

Félix (1996a) vergleicht die Eigenschaften des Mainsandsteins mit schweizerischen Molassesandsteinen

A1.1.3 Verwitterungsverhalten

Generelles zum Verwitterungsverhalten in de Quervain (1983; 1945, p.41;).

Die Gesteine dürften vergleichbar mit Vogesensandsteinen sein, deren Verwitterungsverhalten in Jeannette (1997) beschrieben wird.

A1.2 WIESENTALSANDSTEIN (MÜNSTER BASEL, BS)

A1.2.1 Geologie, Mineralogie, Petrographie

Nach de Quervain (1969) (p.202): « Der obere Buntsandstein (sog. Plattensandstein) enthält gleichmässiger und tiefer rote, feiner körnige Sandsteine, die sich auch für Steinmetz- und Bildhauerarbeiten eignen. Hier war das Wiesental Hauptlieferant für Basel. Eine gewisse Bedeutung hatten zeitweise Vorkommen bei *Riehen*, wo gut gebankte Sandsteine etwas unterschiedlicher Festigkeit und Färbung abgebaut wurden. Auch bei Maisprach und Buus bestanden kleine Brüche. »

Nach de Quervain (1983) p. 1: « Rote Sandsteine des Oberen Buntsandsteins, z.T. auch als Plattensandstein bezeichnet. Merkmale: Wesentlich feiner- und vor allem homogener körnig als Mittlerer Buntsandstein. Lagig-plattige Ausbildungen ebenfalls vorkommend. Farbe meist tief rot, oft etwas fleckig oder streifig. Neben Quarzkörnern viel Feldspat (von Auge selten deutlich), einzelne Glimmerblättchen, meist kalkfrei. Festigkeit sehr unterschiedlich (im gleichen Bruch lagenweise wechselnd) und damit auch die bevorzugte Anwendung. Für Bildhauerzwecke dienen nur die ganz homogenen, meist weicheren Arten.

Wetterbeständigkeit ziemlich unterschiedlich. Herkunft: Hauptbrüche im Wiesental (Hauingen, Steinen, Maienbühl bei Riehen) und um Inzlingen »

A1.2.2 Porosität, physikalische und mechanische Eigenschaften

Keine Angaben gefunden, vermutlich ähnlich den Vogesensandsteinen, dazu siehe Jeannette (1997).

A1.2.3 Verwitterungsverhalten

Generelles zum Verwitterungsverhalten in de Quervain (1945 und 1983).
Die Gesteine dürften vergleichbar mit Vogesensandsteinen sein, deren Verwitterungsverhalten in Jeannette (1997) beschrieben wird.

A1.3 (MOLASSE-)SANDSTEIN VOM GURTEN (MÜNSTER BERN, BE)

A1.3.1 Geologie, Mineralogie, Petrographie

Beschreibung der geologischen Verhältnisse bei Gerber (1982).
Glaukonitführende Arkose (Sandstein mit hohem Gehalt an Feldspäten) mit kalzitischem Bindemittel; häufigste Korngrößen der Bausteine 0.2 bis 0.4. Weitere Angaben in Bläuer, 1987.

Angaben zu Steinbrüchen und Steinverwendung Niggli et al., 1915 (p. 116-120)

A1.3.2 Porosität, physikalische und mechanische Eigenschaften

Bläuer (1987) gibt Porosität, Wasseraufnahme, Kapillarität, Salzgehalt von bruchfrischen Steinen.

Vergleich von schweizerischen Molassesandsteinen unter einander und mit dem Mainsandstein in (Félix, 1996a).

Angaben Wasseraufnahmen und Druckfestigkeiten in Niggli et al. (1915) S. 116-120.

A1.3.3 Verwitterungsverhalten

Bläuer (1987) stellt die Verwitterung der Berner Sandsteine je nach ihren Expositionsbedingungen dar.

Art der Verwitterung: de Quervain (1945) ab S. 39. Laborversuche zur Verwitterungsbeständigkeit: de Quervain et Jenny (1951).

A1.4 MOLASSE VON VILLARLOD (KATHEDRALE FRIBOURG, FR)

A1.4.1 Geologie, Mineralogie, Petrographie

Glaukonitführende Arkose mit calcitischem Bindemittel; häufigste Korngrößen der Bausteine 0.1 bis 0.5. Sehr ähnlich Berner Sandsteine. Ausführliche Beschreibung der Sandsteine des Steinbruchs von Villarod siehe Félix (1977).

Angaben zu Steinbrüchen und Steinverwendung: Niggli et al. (1915), S. 123-130; insbes. S. 127 Gestein-Nr. 1218 (Beauregard) und S. 128, Gestein Nr. 1219 (Villarod).

Angaben zu den im Verlauf der Geschichte verwendeten Steine in de Quervain (1983).

A1.4.2 Porosität, physikalische und mechanische Eigenschaften

Porosität, Wasseraufnahme, Trocknungsverhalten, Salzgehalte bruchfrischer Steine, Festigkeit in Félix (1977).

Vergleich von CH-Molassesandsteinen unter einander und mit dem Mainsandstein in Félix (1996a).

Angaben Wasseraufnahmen und Druckfestigkeiten in Niggli et al. (1915) S. 123-130.

A1.4.3 Verwitterungsverhalten

Wohl ähnlich wie die berner Sandsteine und meist mit diesen zusammen diskutiert.

A1.5 MOLASSE DER MERCERIE (KATHEDRALE LAUSANNE, VD)

A1.5.1 Geologie, Mineralogie, Petrographie

Kündig, 1997, S. 183: « Oligozäne Sandsteine der flachen Molasse: Im Genferseegebiet sind dieses Sandsteine, hier „Molasse grise“ genannt, vom 12. bis etwa ins 18. Jahrhundert von grosser Wichtigkeit gewesen; später wurden sie durch beständigere Sandsteinsorten völlig verdrängt. Bedeutende Brüche befanden sich im Gebiet von Lausanne; die belieferten neben der Stadt auch eine weitere Umgebung, [...] Bei Morges und am Westende des Léman wurden einige Vorkommen hart am Seeufer abgebaut, so dass die Brüche nur zur Winterzeit bei Niedrigwasser betrieben werden konnten... »

de Quervain, 1969, S. 213: « ...oligozänene Molasseschichten (Aquitaniens und Chattien) enthalten innerhalb der vorwiegenden Mergel zahlreiche Sandsteinbänke von sehr unterschiedlicher Beschaffenheit. Teils sind sie weich und porös, analog den meisten Sandsteinen der marinen Molasse, teils aber auch recht fest und dann oft plattig abgesondert. Meist sind sie von grauer Farbe (deshalb oft „Molasse grise“ benannt); es gibt aber auch bräunliche, gelbliche oder sogar rötliche Lagen. Grossenteils sind sie nur mässig beständig. Doch besitzt man auch Angaben über besseres Verhalten. »

« Das Zentrum der früheren Gewinnung befand sich im Stadtgebiet von *Lausanne* oder in dessen Umgebung. Bekannt waren die Steinbrüche Pissieux und an den Côtés de Montbenon. Lokale Ausbeutungen gab es aber in der ganzen Region, wo bessere Bänke zutage traten...»

de Quervain et Gschwind, 1934, S. 260: « ... In der Umgebung von Lausanne bis gegen den Neuenburger See sind graue, gutbankige Sandsteine verbreitet, die in verschiedener Beziehung an die Plattensandsteine der östlichen und zentralen Schweiz erinnern. Sie ... sind allem Anschein nach nur teilweise marin. Sie liegen unter den Schichten der eigentlichen marinen Molasse an der Grenze von Oligozän (Aquitaniens) und Miozän (Burdigalien). Petrographisch erinnern die se Sandsteine stark an die Berner Molasse. Sie sind ebenfalls weich und grossenteils auch nicht besonders wetterbeständig, immerhin besitzt man auch Angaben über besseres Verhalten von einigen Varietäten. Wie der Name besagt, sind sie von grauer Farbe. »

de Quervain (1983) zitiert auf Seite 132 "Akten aus der Bauzeit": "En 1228 est signalée la "vielle carrière" dans la région de la Barre ou du Calvaire, au nord de la Cité" et "vers la Tyollère que le Chapitre se réserve en 1265 des droits d'extraction."

Angaben zu Steinbrüchen und Steinverwendung Niggli et al. (1915) S. 152-156, insbes. S. 152, Gestein Nr. 312: „Pierre de Belmont“ Oberes Aquitanien; Bänke von je 3m Dicke

Cathédrale und Eglise St. François in Lausanne; Historisches: 1907 von A. Blardone übernommen. Vorkommen in der Umgebung des Bruchs: In der Umgebung überall, ziemlich parallel zur Oberfläche.

A1.5.2 Porosität, physikalische und mechanische Eigenschaften

Angaben Wasseraufnahmen und Druckfestigkeiten in Niggli et al. (1915) S. 152-156.
Vergleich von CH-Molassesandsteinen unter einander und mit dem Mainsandstein in Félix (1996a), (in Tabelle 1, S. 3 wird die Molasse de Lausanne als separates Gestein aufgelistet, aber im folgenden Text gibt es keine spezifischen Angaben mehr).
Einzelne Angaben zu Porosität und Festigkeit, sowie Hinweise auf früher erstellte Berichte in Gentile et al. (2005) S. 15-17.

A1.5.3 Verwitterungsverhalten

Einiges wenig zum Verwitterungsverhalten in de Quervain (1945), z.B. S. 22 Fig. 37. Dans Bericht Gentile et al. (2005) sind im Annexe die Seiten 58-65 speziell den "Verwitterungsformen der Molasse" gewidmet sowie auch der Annexe im Bericht von Mühlhaus Ebersole (2002).

A1.6 BIBLIOGRAPHIE ZU ANNEX 1

- Amsler, C. (1995). "Une cathédrale de molasse - Lausanne, expériences et perspectives." Proc. 1995 LCP Congress, Conservation et restauration des biens culturels, Montreux, 24.-29. Sept., 29-44.
- Bläuer, C. (1987). "Verwitterung der Berner Sandsteine." Unpubl. Dissertation, Universität Bern.
- Félix, C. (1977). "Molasses et grès de Villarod (Fribourg)." LPM Fiche technique, 1. Laboratoire des Matériaux Pierreux, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Félix, C. (1985). "Altérations desquamantes et composés soufrés d'atmosphérique: cas des grès tendres molassiques de quelques monuments Lausannois." 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Laus., 25.-27.09., 391-409.
- Félix, C. (1987). "Essais et critères de choix pour des grès (molasses) de substitution lors de travaux de restauration." Chantiers/Suisse, 18, 419-423.
- Félix, C. (1994). "Déformation de grès consécutives à leur consolidation avec un silicate d'éthyle." 7th International IAEG Congress Balkena, Rotterdam,.
- Félix, C. (1996) a. "Choix de grès tendres du plateau suisse pour les travaux de construction." Conservation et restauration des biens culturels, Actes du Congrès LCP 95. Montreux (Suisse), Septembre 1995, 45-71.
- Félix, C. (1996) b. "Peut-on consolider les grès tendres du plateau suisse avec le silicate d'éthyle?" Conservation et restauration des biens culturels, Actes du Congrès LCP 95. Montreux (Suisse), Septembre 1995, 267-274.

- Gäbert, C., A. Steuer, et al. (1915). "Die nutzbaren Gesteinsvorkommen Deutschlands. Verwitterung und Erhaltung der Gesteine." Erster Band des Handbuch der Steinindustrie. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Gentile, S, James, J., Rousset, B. & Mühlhaus Ebersole, S. (2005): Cathédrale de Lausanne - UEF, La conservation de la molasse in situ recherches et évaluations (nettoyage / consolidation / colmatage), rapport de synthèse. Novembre 2005.
- Gerber, M. (1982). "Geologie der Berner Sandsteine. (Das Burdigalien zwischen Sense und Langete, Kanton Bern)." unpubl. Diss. Univ. Bern.
- Grimm, W. E. A. (1990). "Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland." Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 50.
- Holzwarth, D. (1990). "Untersuchungen zur Bausteinverwitterung an der Wernerkapelle in Bacharach im Vergleich zu historischem Bruchmaterial." Unpubl. Diplomarbeit Univ. Mainz.
- Jeannette, D. (1997). "Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments." La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale. Atti del 2° Corso Intensivo Europeo tenuto a Ravello e a Firenze dal 10 al 24 aprile 1994, 49-77.
- Kündig, R. (1997). "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz." Kündig R. [Red.] Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich, ETH-Zentrum.
- Mühlhaus Ebersole S. (2002). "Cathédrale de Lausanne - Arcs boutants". Rapport Expert-Center 01407.
- Niggli, P., U. Grubenmann, et al. (1915). "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 5. Lieferung.
- Quervain de, F. (1945). "Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil I." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 23. Lieferung.
- Quervain de, F. (1969). "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz." Kümmerly & Frey, Bern.
- Quervain de, F. (1983). Gesteinsarten an historischen Bau- und Bildwerken der Schweiz, Aufzeichnungen 1954-1982. Band 2: Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Schaffhausen; Band 9: Bern-Jura; Band 10: Freiburg-Genf-Neuenburg-Waadt.
- Quervain de, F. and M. Gschwind (1934). "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz." Hans Huber, Bern.
- Quervain de, F. and V. Jenny (1951). "Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil II. Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethodik über die Wetterbeständigkeit." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 30. Lieferung.

ANNEXE 2 - LES MESURES PÉTROPHYSIQUES EFFECTUÉES

A2.1 MESURE DE LA POROSITE "TOTALE"

A2.1.1 Généralités

La porosité d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, le pourcentage de porosité (P_{ot}) est donné par la formule suivante :

$$P_{ot} = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 1}$$

La porosité d'une roche est un paramètre qui n'est accessible que par une mesure indirecte. Parmi les méthodes de mesure, la saturation par un fluide mouillant donne une bonne estimation de la porosité réelle (Dullien, 1979).

Nous avons choisi ici de mesurer la porosité par la méthode dite "de la triple pesée" ou par imbibition d'eau sous vide. Cette technique est définie par la norme RILEM (essai n°1.1, 1978), qui prévoit que les éprouvettes de roches soient imbibées en l'absence d'air.

A2.1.2 Principe

Le principe de cette mesure est simple : l'échantillon dont on veut connaître le volume poreux est pesé une première fois alors qu'il est sec puis il est pesé à nouveau lorsque tous les vides sont remplis d'eau. La densité de l'eau étant connue, la différence de masse donne le volume d'eau, égal au volume poreux si la totalité de la porosité est envahie par l'eau. Afin d'assurer le remplissage total, l'imbibition des échantillons a lieu sous vide, puis de l'eau dégazée est introduite progressivement dans la porosité.

A2.1.3 Mode opératoire

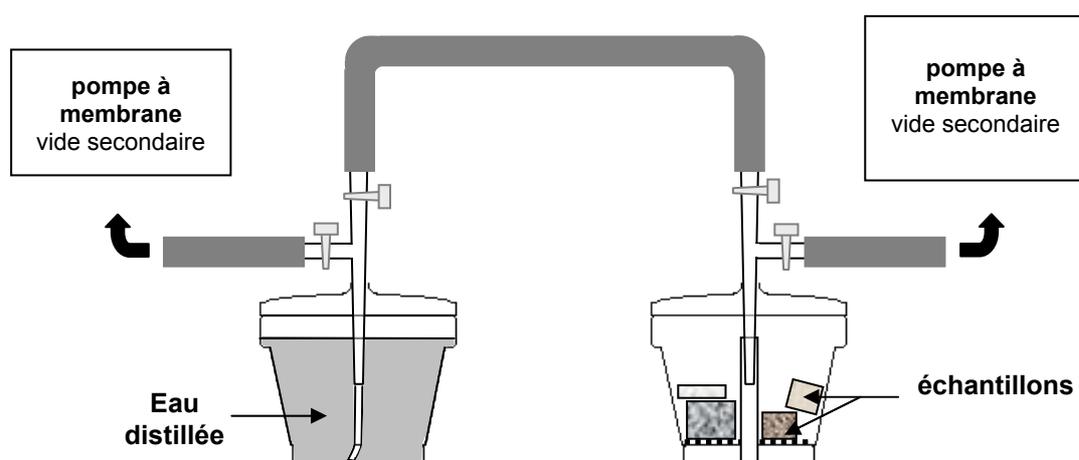


Figure A2.1 Dispositif expérimental de la mesure de porosité totale par imbibition d'eau sous vide

Les échantillons préalablement séchés dans une étuve à 60°C jusqu'à poids constant, sont placés dans un dessiccateur (cf. figure A1.1) où elles sont soumises pendant 24 h à un vide secondaire, entretenu par une pompe à membrane. Dans un second dessiccateur, de l'eau distillée est dégazée à l'aide d'une pompe assurant elle aussi un vide secondaire. Après 24h de dégazage, les deux dessiccateurs sont reliés, puis le vide est partiellement cassé dans le dessiccateur contenant l'eau afin que les éprouvettes puissent être progressivement imbibées par l'eau depuis leur base ; le niveau d'eau est réajusté au fur et à mesure de la migration de la frange capillaire.

La valeur de la porosité, P_{ot} , est ensuite obtenue par la méthode de la triple pesée : connaissant le poids sec de l'échantillon P_{ds} et son poids imbibé P_{d1} , on obtient le volume poreux occupé en totalité par l'eau ($P_{d1} - P_{ds}$), puis à partir d'une pesée hydrostatique P_{d2} , on peut calculer le volume total de l'éprouvette ($V_t = P_{d1} - P_{d2}$). La porosité P_{ot} de l'échantillon s'exprime par :

$$P_{ot} = \frac{P_{d2} - P_{ds}}{P_{d2} - P_{d1}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 2}$$

P_{ot} = pourcentage de volume poreux [%]
 P_{d1} = poids imbibé (obtenu par pesée hydrostatique) [kg]
 P_{d2} = poids de l'éprouvette saturée en eau [kg]
 P_{ds} = poids sec [kg]

A2.2 IMBIBITION CAPILLAIRE

A2.2.1 Généralités

Tout milieu poreux insaturé où coexistent au moins deux fluides, est le siège de tensions capillaires. Ces tensions peuvent induire un écoulement de fluide d'un point à un autre du milieu poreux. Dans des conditions d'humectation atmosphériques (précipitation de pluie, alimentation à partir d'une nappe,...) la cinétique d'imbibition capillaire détermine la quantité d'eau absorbée par une roche, et l'étendue de la zone imbibée, où position de la frange d'imbibition comme nous l'avons déjà expliqué en détails au § 2.1.

A2.2.2 Principe

Lorsque la base d'une éprouvette de roche poreuse est plongée dans un bain d'eau, des ménisques se forment immédiatement et la tension capillaire développée permet l'ascension du fluide à l'intérieur du milieu poreux. Pour caractériser ce type d'expérience, deux paramètres sont pris en compte (cf. figure A2.2) :

- sur la surface externe des échantillons, une frange capillaire est facilement observable. La progression de son déplacement x en fonction du temps t est de la forme :

$$x = B \sqrt{t} \quad \text{Équation 3}$$

- le volume cumulé absorbé peut être connu par l'intermédiaire de la variation de poids. Tant que la frange capillaire n'a pas atteint le sommet, cette variation, ΔP_d , rapportée à la valeur de la surface par laquelle se fait l'absorption, S , évolue en fonction du temps suivant la relation suivante:

$$\frac{\Delta P_d}{S} = A \sqrt{t}$$

Équation 4

Ainsi, lorsque l'échantillon de roche placé en condition d'imbibition capillaire est homogène, c-à-d sans importante variation de texture due par exemple à un litage d'origine sédimentaire, la cinétique observée correspond à la figure A2.2.

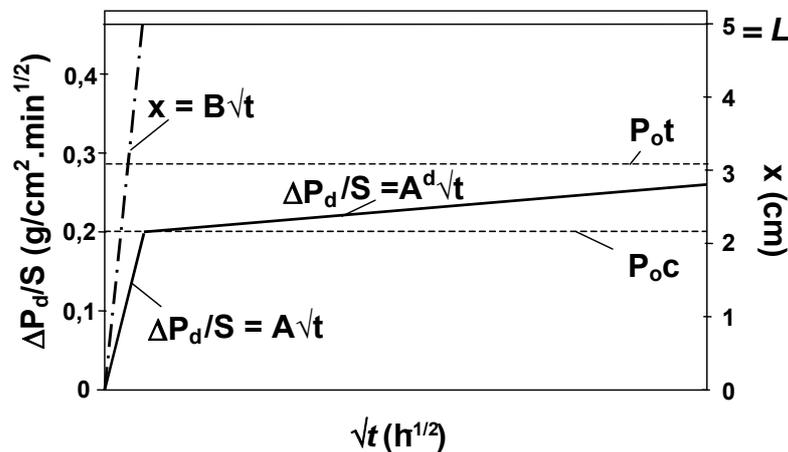


Figure A2.2 Exemple de cinétique d'imbibition capillaire. Cas d'un échantillon homogène. $\Delta P_d/S$ = variation de poids rapporté à l'unité de surface ; x = hauteur de la frange capillaire atteinte au temps t ; L = hauteur de l'échantillon = x max ; P_{0t} = porosité totale ; P_{0c} = porosité capillaire ou porosité libre = porosité occupée par de l'eau au moment où la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon ; A = coefficient de capillarité massique (exprimé ici en $\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) ; B = coefficient de capillarité linéaire ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) ; A^d = coefficient de diffusion de l'air à travers l'eau mesurable en fin d'imbibition capillaire lorsque l'alimentation en eau est maintenue.

La cinétique de migration de la frange capillaire en fonction de la racine carrée du temps définit un segment de droite de pente B , tandis que la cinétique de prise de poids définit un segment de droite de pente A . Lorsque la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon ($x = L$), l'imbibition capillaire *sensu stricto* est terminée, la prise de poids en eau correspond à porosité libre, ou porosité capillaire (P_{0c}), et dès lors elle change de cinétique. En effet, dès que $x = L$, l'évolution de la prise de poids devient beaucoup plus lente, mais reste fonction de la racine carrée du temps (cf. figure A2.2) :

$$\frac{dP_d}{S} = A^d \sqrt{t}$$

Équation 5

Cette phase de l'imbibition est attribuée à la diffusion dans l'eau, des bulles d'air restées piégées dans le réseau poreux. Elle correspond donc à la résorption de l'air piégé ou porosité piégée (Bousquié, 1979, Mertz, 1991). Si on laisse évoluer le système très longtemps, la prise de poids tend progressivement vers la valeur de la porosité totale P_{0t} . Les deux phases, imbibition capillaire s.s. et diffusion de l'air à travers l'eau correspondent à l'imbibition capillaire au sens large.

Dans le cas d'échantillons lités, si les plans de stratification sont orientés perpendiculairement à la direction de l'imbibition, les courbes de capillarité sont perturbées : l'influence des différents niveaux se traduit par une courbe en escalier marquant des variations locales de la cinétique d'imbibition. La migration de la frange capillaire et la prise

de poids par unité de surface, évoluent toutes deux parallèlement suivant des segments de droites de pentes variables.

A2.2.3 Mode opératoire

Le mode opératoire est inspiré du protocole de l'essai n° II.6 de la norme RILEM (1978).

Comme pour les mesures de porosité, les éprouvettes sont d'abord séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilisation du poids. Les variations de température étant capables de perturber la cinétique d'imbibition en modifiant la tension de surface air-eau et la viscosité de l'eau, avant l'imbibition les éprouvettes sorties de l'étuve sont couvertes de papier absorbant et laissées à l'air ambiant le temps qu'elles atteignent l'équilibre thermique.

Les imbibitions se pratiquent sur les échantillons nus, posés verticalement, dans un bac au fond duquel le niveau d'eau déminéralisée est maintenu constant pendant toute la durée de l'expérience (cf. figure A2.3). Le bon contact entre l'eau et la base de l'échantillon est maintenu par un tissu capillaire imbibé d'eau ; l'alimentation capillaire est alors assurée par une pellicule d'eau d'environ 1 mm.

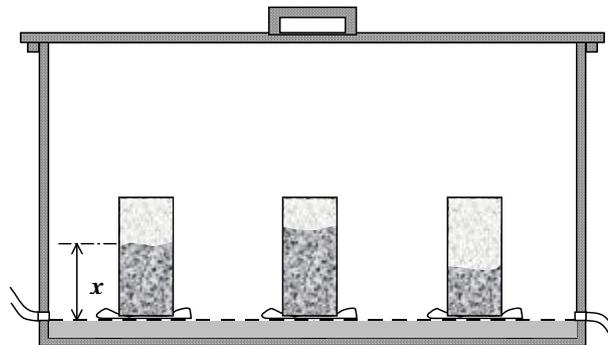


Figure A2.3 Dispositif expérimentale de l'imbibition capillaire

Le bac ferme hermétiquement ce qui permet de maintenir une hygrométrie proche de la saturation. Ainsi la superposition des phénomènes d'évaporation est évitée.

Pendant l'expérience, la hauteur de la frange humide (x) observable sur la surface externe des échantillons et la prise de poids en eau ($\Delta P_d/S$), sont mesurées à intervalles de temps croissants et sont reportées graphiquement, en fonction de la racine carrée du temps (cf. figure A2.2).

La valeur de la porosité envahie par l'eau lors au moment de la rupture de pente de la prise de poids, appelée Porosité capillaire, ou porosité libre (P_{oc}) peut-être calculée grâce à la formule suivante :

$$P_{oc} = \frac{P_{dc} - P_{d1}}{P_{d2} - P_{d1}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 6}$$

P_{oc} = porosité occupé par de l'eau en fin d'imbibition capillaire = porosité capillaire ou porosité libre [%]

P_{d1} = poids imbibé (obtenu par pesée hydrostatique) [kg] (cf. mesure de la porosité totale)

P_{d2} = poids de l'éprouvette saturée en eau [kg] (cf. mesure de la porosité totale)

P_{ds} = poids sec [kg]

P_{dc} = poids de l'échantillon au moment de la rupture de pente de la prise de poids [g]

A2.3 ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

A2.3.1 Généralités

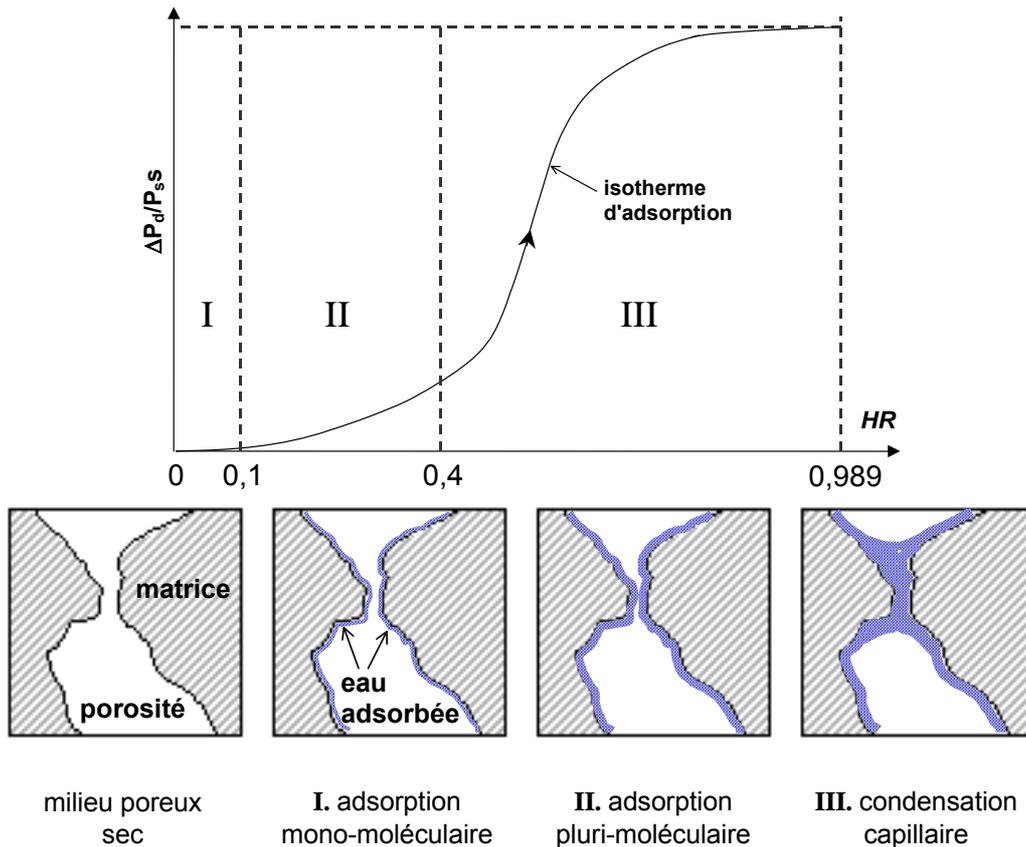


Figure A2.4 Isotherme d'adsorption, et représentation schématique des processus correspondants

D'une manière générale, à partir du moment où l'humidité relative n'est pas nulle, il y a adsorption de molécules de vapeur d'eau sur les surfaces solides en contact avec l'air jusqu'à établissement d'un équilibre entre la quantité d'eau adsorbée et la vapeur d'eau en contact avec le solide considéré. Cette adsorption est le résultat des interactions entre la vapeur d'eau et le solide : les charges insaturées à la surface du solide tendent à fixer les molécules de vapeur d'eau. Le processus d'adsorption se poursuit jusqu'à ce que la couche adsorbée soit en équilibre thermodynamique avec la phase vapeur. La cinétique de cette adsorption et la quantité adsorbée dépendent de l'état physico-chimique du solide et de l'aire de la surface (Fripiat et al., 1971). En d'autres termes, l'hygroscopicité d'une pierre, ou son affinité pour la vapeur d'eau, dépend bien sûr de l'humidité relative ambiante, mais aussi de la surface spécifique de la pierre et de l'hygroscopicité propre à chacun de ses constituants, mais pas vraiment de sa porosité totale. Ainsi, les pierres microporeuses (ayant une surface spécifique très élevée) et/ou contenant des argiles (minéraux les plus hygroscopiques) présentent une hygroscopicité supérieure aux pierres macroporeuses et/ou dépourvues d'argiles.

L'adsorption physique due à une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans le mélange air/vapeur d'eau en contact avec une surface plane et parfaitement lisse, peut théoriquement donner naissance à un film adsorbé d'épaisseur infinie. Mais dans le milieu poreux des roches, l'adsorption à la surface des parois internes est limitée par la taille des pores (Rouger, 1988 ; Quénard et Sallée, 1992 ; Jeannette 1994).

Si on place un échantillon de roche sec dans une enceinte thermostatée dans laquelle on fait varier l'humidité relative (HR), on constate une prise de poids de l'échantillon - correspondant à une fixation de molécules d'eau sur la matrice poreuse - dont l'amplitude dépend de la nature de l'échantillon et de la variation d'HR. Ce type d'expérience permet de tracer une courbe appelée "isotherme d'adsorption" qui permet de caractériser l'aptitude d'un matériau à fixer de l'eau par adsorption, c-à-d l'hygroscopicité du matériau (cf. figure A2.4).

Sur cette courbe, trois étapes peuvent être distinguées :

- pour les très faibles HR, l'adsorption monomoléculaire (domaine I) correspond comme son nom l'indique à la fixation d'une seule couche moléculaire d'eau ;
- pour des valeurs d'HR intermédiaires, l'adsorption plurimoléculaire (domaine II) apparaît ;
- enfin pour les fortes valeurs d'humidités relatives, on passe dans le domaine III qui correspond à la condensation capillaire qui survient lorsque les couches plurimoléculaires adsorbées se rejoignent pour former des ménisques dans les pores les plus petits du réseau poreux.

A2.3.2 Principe

Le principe des mesures consiste à amener des échantillons de roche poreuse initialement secs à un état d'équilibre avec des atmosphères régulées en température et en humidité relative. Les échantillons sont pesés régulièrement de façon à établir la cinétique du processus d'adsorption.

A2.3.3 Mode opératoire

L'appareillage expérimental se compose d'une chambre climatique permettant de réguler la température (fixée ici à 20°C), et d'enceintes hermétiques renfermant différentes solutions salines saturées, qui assurent la régulation de l'humidité relative (cf. figure A2.5).

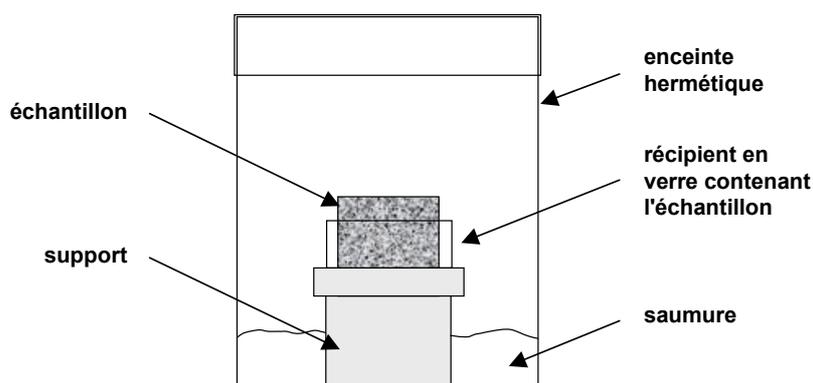


Figure A2.5 Représentation schématique d'une vue de profil d'une enceinte à essai d'adsorption.

Pour cette étude, nous avons choisi 5 humidités relatives différentes : 33, 55, 76, 86 et 97% (cf. norme NF X 15-014, tableau A2.1).

Solutions salines saturées	Humidité relative en pourcentage pour température en degrés Celcius									
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
Hydroxyde de potassium K OH (Note 3)	14	13	10	9	8	7	6	6	6	---
Chlorure de lithium LiCl, X H ₂ O (*)	14	14	13	12	12	12	12	11	11	11
Acétate de potassium K CH ₃ CO ₂	---	21	21	22	22	22	21	20	---	---
Chlorure de magnésium Mg Cl ₂ , 6 H ₂ O (*)	35	34	34	33	33	33	32	32	31	30
Carbonate de potassium K ₂ CO ₃ , 2 H ₂ O (*)	---	47	44	44	43	43	43	42	---	36
Nitrate de magnésium Mg (NO ₃) ₂ , 6 H ₂ O (*)	58	57	56	55	53	52	50	49	46	43
Bichromate de sodium Na ₂ Cr ₂ O ₇ , 2 H ₂ O	59	58	56	55	54	52	51	50	47	---
Nitrate d'ammonium NH ₄ NO ₃ (Note 1)	---	73	69	65	62	59	55	53	47	42
Nitrite de sodium Na NO ₂ (Note 2) (*)	---	---	---	66	65	63	62	62	59	59
Chlorure de sodium Na Cl (*)	76	76	76	76	75	75	75	75	76	76
Sulfate d'ammonium (NH ₄) ₂ SO ₄ (*)	82	82	81	81	80	80	80	79	79	---
Chlorure de potassium K Cl	88	88	87	86	85	85	84	82	81	80
Nitrate de potassium K NO ₃ (*)	96	95	94	93	92	91	89	88	85	82
Sulfate de potassium K ₂ SO ₄	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96

(*) Sels recommandés pour des niveaux d'une humidité relative particulière et tels que les variations en fonction de la température soient très faibles entre 20°C et 30°C.

NOTE 1 . les sels d'ammonium peuvent provoquer la corrosion des pièces en cuivre
 2 . l'addition de 1 à 2 % de tétraborate de sodium permet de retarder le changement de coloration des solutions de nitrite de sodium. Par cette addition, l'humidité relative est réduite de 1% à 20 °C.
 3 . la solution d'hydroxyde de potassium est corrosive et l'on doit éviter le contact avec la peau.

Tableau A2.1 Norme NF X 15-014 – Humidités relatives de l'air au dessus de solutions salines saturées. Les sels utilisés sont grisés.

Pour établir les isothermes d'adsorption, en théorie, il faudrait travailler sur un seul échantillon. Sur cet échantillon, devraient être établies les cinétiques d'adsorption pour toute la gamme d'humidités relatives choisies. Or l'établissement de l'équilibre peut être un processus très long (de plusieurs dizaines de jours). Par gain de temps, pour chaque pierre les essais d'adsorption de vapeur d'eau ont été réalisés sur des lots de cinq cubes de 4 cm d'arête les plus homogènes possible, excepté pour le grès de Wiesental pour lequel nous n'avons travaillé qu'avec trois cubes par manque d'échantillons. Deux de ces cubes ont donc subi deux adsorptions successives : une première à 33 et 55% d'humidité relative et une seconde à 86 et 97%.

Après séchage dans une étuve à 60°C jusqu'à poids constant, les cubes sélectionnés ont été pesés (soit P_{ds} le poids sec de l'échantillon) puis placés nus dans les enceintes hermétiques contenant une saumure donnée. L'évolution de la teneur en eau des échantillons est obtenue par pesée sur une balance de précision 0,0001g. Le rythme des pesées est ajusté à la cinétique d'adsorption elle même : les mesures sont effectuées trois fois le premier jour, deux fois le deuxième jour, une fois par jour pendant trois à cinq jours, et enfin, une fois tous les deux ou trois jours.

L'équilibre est supposé atteint quand la masse de l'échantillon reste stable pendant une période de 5 à 7 jours.

A2.4 BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE 2

Bousquié P., 1979. Texture et porosité des roches calcaires - Thèse de docteur ingénieur, Université Paris VI, 191p.

Dullien F.A.L., 1979. Porous Media - Fluid transport and pore structure - Academic press, New York, 396 p.

Fripiat J., Chaussidon J. et Jelli A., 1971. Chimie physique des phénomènes de surfaces. Masson & Cie éd., Paris 387 p.

Mertz J.-D., 1991. Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès - Sci. Géol., Mém., 90, 149p.

R.I.L.E.M., 1978. Altération et protection des monuments en pierre, méthodes expérimentales conseillées. Colloque international, Paris, 5-9 juin 1978.

ANNEXE 3 - MODE OPERATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU MOIST 200B

A3.1 LIMITES D'UTILISATION

D'après la littérature et les fabricants de l'appareil, un certain nombre de limites d'utilisation de l'appareil MOIST 200B sont connues :

- si des éléments métalliques, tels que des fers, se trouve dans le champ de mesure de l'appareil, les résultats fournis par l'appareil ne sont plus interprétables (Göller, 2007);
- si le matériau étudié est macro-poreux (comme un tuf calcaire par exemple), les ondes se "perdent" dans les cavités et les résultats obtenus ne sont plus interprétables (Göller, 2000);
- la surface sur laquelle la mesure est effectuée ne doit pas être rugueuse, de sorte que l'antenne puisse être appliquée correctement contre cette surface. L'influence de la rugosité est d'autant plus importante que la sonde utilisée mesure à des profondeurs faibles²⁵ ;
- pour obtenir des résultats interprétables, les matériaux sur lesquels les mesures sont faites doivent avoir au minimum 3 cm d'épaisseur lors de l'utilisation de la sonde R, et au minimum 20 cm lors de l'utilisation de la sonde P. D'autre part, pour éviter les effets de bords indésirables, la mesure doit être faite à une distance du bord latéral au moins égale à la moitié du diamètre de la sonde, soit 2.2 cm pour les sondes R, R2 et D, et 10 cm pour la sonde P²⁵.

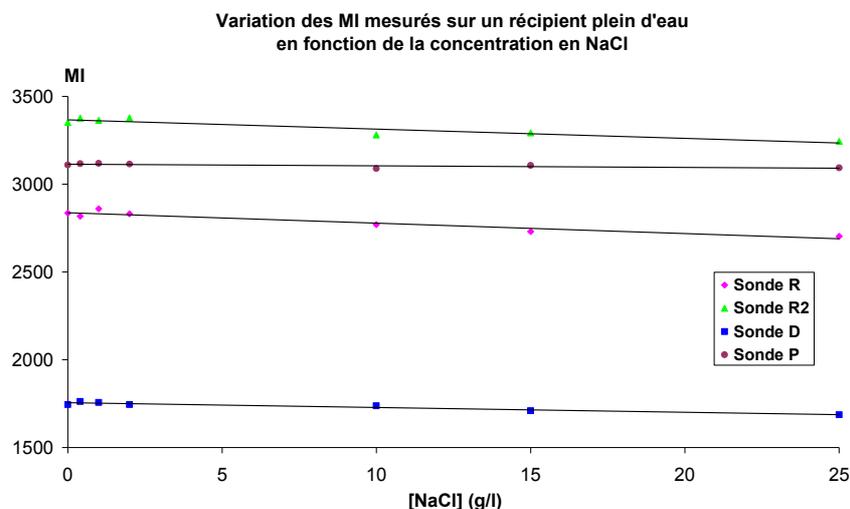


Figure A3.1 Variation des index d'humidités (MI) mesurés avec le MOIST 200B sur un récipient en verre contenant 10 litres d'eau de concentration croissante en chlorure de sodium (NaCl)

Les concepteurs de l'appareil prétendent que les valeurs qu'il fournit ne sont pas perturbées par la présence de sels solubles dans le matériau caractérisé. Pour en être convaincus, nous avons effectué le test suivant : ne souhaitant pas contaminer un échantillon de pierre, nous avons rempli un récipient en verre avec environ 10 litres d'eau du robinet. Après avoir très précautionneusement emballé les sondes du MOIST 200B dans un sac plastique étroitement ajusté - et vérifié que ce dispositif ne perturbait pas les résultats sur un échantillon de pierre connu -, nous avons plongé successivement les 4 sondes sur 1 à 2 mm de profondeur à la surface de l'eau, au centre du récipient, où nous avons mesuré l'index d'humidité. Puis nous

²⁵ hf sensor, MOIST 200B, Bedienungsanleitung / Operation manual

avons répété ces mesures après avoir dissous successivement 4, 10, 20, 100, 150 et 250g de chlorure de sodium. Les résultats (cf. figure A3.1) montrent que les index d'humidité tendent à décroître lorsque la concentration en NaCl augmente, mais ces variations sont relativement faibles. Il est donc probable que la présence de sels solubles dans un échantillon de pierre ne perturbe pas outre mesure les valeurs données par le MOIST 200B, toutefois il serait prudent de le vérifier sur des échantillons de pierre avant d'effectuer des mesures *in situ*.

Pour évaluer l'effet de la température sur les mesures faites avec l'appareil MOIST, nous avons placé un échantillon de grès de Gurten et un échantillon de grès de Wiesental dans une enceinte à 55% d'humidité relative, placée elle-même dans une armoire isotherme dont nous avons fait varier la température entre 15 et 30°C par pas de 5°C tous les 24h. Avant de changer la température, la température de surface des échantillons a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge puis les cubes ont été sortis des enceintes et placés sur un support en plastique (cf. figure A3.3) pour y subir des mesures avec les 4 sondes du MOIST 200B. Les valeurs obtenues ont montré que les index d'humidité fournis par les sondes R et R2 tendent à diminuer lorsque la température augmente, mais ces variations peuvent être considérées comme négligeables. Quant aux valeurs fournies par les sondes P et D, elles montrent des variations "chaotiques" non négligeables que nous ne pouvons pas expliquer (cf. figure A3.2). Il faudra donc prendre garde à faire les mesures dans des conditions de température similaires.

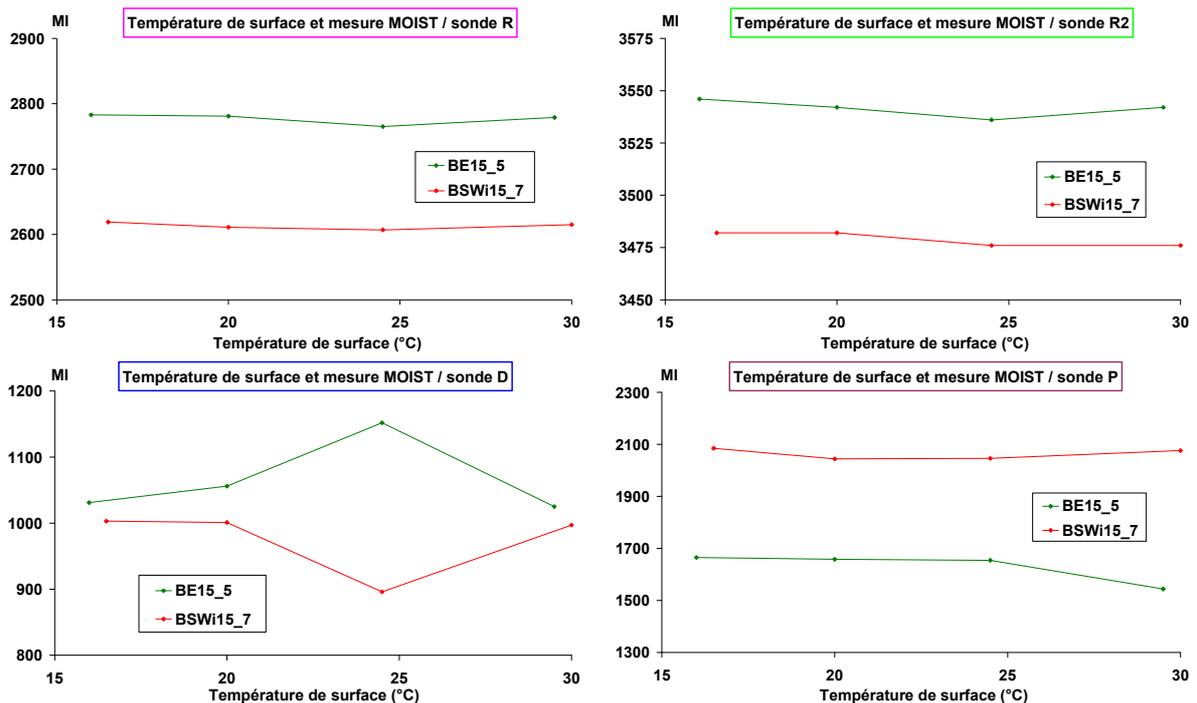


Figure A3.2 Variation des index d'humidité (MI) mesurés par les sondes R, R2, D et P du MOIST 200B en fonction de la température de surface d'un échantillon de grès de Gurten (BE15_5) et d'un échantillon de grès de Wiesental (BSWi15_7) maintenus chacun à 55% d'humidité relative.

Quant à l'influence de l'humidité relative ambiante, sa détermination fera l'objet d'un chapitre à part entière (cf. § 5.3.1.3).

A3.2 GENERALITES CONCERNANT LES MESURES ET LES PRECAUTIONS PRISES

Pour la plupart des points de mesure, les acquisitions ont été faites successivement avec quatre types de sondes : les sondes MOIST R et MOIST R2 qui sont des sondes de surfaces ayant des limites de détection déclarées respectivement à 3 et à 7 cm de profondeur puis les sondes de profondeur MOIST D et MOIST P dont les limites de détection sont annoncées à 11 et 30 cm de profondeur.

Avant d'effectuer nos mesures, nous avons pris soin de vérifier que les résultats ne seraient pas biaisés par des artéfacts imputables aux conditions expérimentales de la manière suivante :

- Nous avons testé plusieurs supports pour poser nos échantillons pendant les mesures et nous avons constaté que la plupart des tables fixes ou mobiles dont nous disposions influençaient les résultats : la présence d'éléments métalliques se trouvant sous l'échantillon fausse les mesures. Finalement, après plusieurs essais infructueux, un tabouret en plastique du type de celui représenté sur la figure A3.3 s'est avéré un support idéal : la matière plastique qui le constitue ne semble pas perturber les mesures ou si elle les perturbe, l'effet est négligeable ou équivalent pour toutes les sondes testées (R, R2, D et P).

D'après nos essais, l'espace vide que ce support offre entre l'échantillon et la table sous-jacente (de l'ordre de 23 cm) permet de s'affranchir totalement de la nature de cette table. De plus la mobilité de ce support permet de faire les mesures n'importe où, en laboratoire ou sur un échafaudage si des mesures de références sur des échantillons témoins sont nécessaires sur un chantier.



Figure A3.3. Support sur lequel les échantillons ont été posés pendant les mesures effectuées avec l'appareil MOIST 200B.

- Les 5 grès testés ne présentent pas de macropores dans lesquels les micro-ondes pourraient se "perdre".
- Les cubes testés ayant été préparés par sciage, les surfaces sur lesquelles les mesures ont été réalisées étaient suffisamment lisses pour que l'effet de rugosité soit négligeable tant pour les sondes de profondeur (D et P) que pour les sondes de surfaces (R et R2).
- Les dimensions choisies pour les cubes (15x15x15cm) sont inférieures aux dimensions acceptables pour obtenir des mesures fiables avec la sonde de profondeur P, mais d'après le mode d'emploi de l'appareil, les trois autres sondes (D, R2 et R) restent utilisables et leurs résultats interprétables sur de tels volumes. Néanmoins, en prenant garde de positionner la sonde toujours au même endroit, au centre de l'une des faces, et par comparaison avec les résultats des 3 autres sondes, nous espérons que les résultats obtenus avec la sonde P puissent être exploités.

- Afin de vérifier que l'appareil ne présentait pas une déviation trop importante ou que les variations de l'humidité et de la température ambiantes n'impliquent pas des variations notables, les mesures faites sur les cubes testés ont été faites en parallèle sur des cubes "témoins" : un cube de chaque sorte de pierre, en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (lorsque nous avons fait nos mesures avec l'appareil MOIST, la température était comprise entre 22 et 24°C tandis que l'humidité relative variait entre 17 et 39%). Les variations observées sur ces témoins n'ayant jamais été significatives, nous ne mentionnerons plus ces mesures témoins dans la suite du rapport.

A3.3 MESURES EFFECTUEES SUR LES ECHANTILLONS SECS

Pour répéter les mesures toujours sur la même face, nous avons attribué des lettres à chaque face des cubes de 15 cm d'arête comme indiqué sur la figure A3.4.

Pour réaliser les mesures à sec, les cubes de 15 cm d'arête en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 23-24°C, humidité relative comprise entre 26 et 29%) ont été posé au centre du support en plastique (cf. figure A3.3) sur la face C, la face A se trouvant ainsi à l'horizontale et vers le haut. Les index d'humidité ont été mesurés au centre de cette face A, comme schématisé sur la figure A3.4, à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B. Ayant constaté que l'appareil présente une certaine déviation, la mesure a été répétée 4 à 5 fois pour chaque sonde et la valeur retenue comme index d'humidité est toujours la moyenne de ces mesures.

Les index d'humidité "à sec" ont été mesurés sur 6 cubes de grès de Maintal, 13 cubes de grès de Wiesental, 9 cubes de grès de Gurten, 10 cubes de molasse de Villarlod et 9 cubes de molasse de la Mercerie.

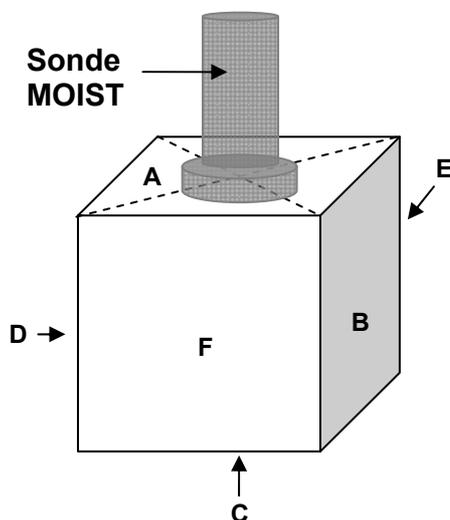


Figure A3.4 Schéma figurant la position des cubes de 15 cm d'arête et l'emplacement des sondes MOIST lors des mesures.

A3.4 mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau

Pour déterminer les index d'humidité correspondant à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores, nous avons procédé comme suit :

- 1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et

39%) - ont été posés, face A vers le haut, dans une enceinte à humidité relative contrôlée à 33%, à côté d'un hygro-thermomètre enregistrant les variations de température et d'humidité pouvant affecter l'intérieur de l'enceinte toutes les demi-heures. 2• Après 7 jours de mise à l'équilibre²⁶, les enceintes ont été ouvertes et aussi rapidement que possible, les index d'humidité ont été mesurés au centre de la face A à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B directement dans l'enceinte²⁷. Les dernières valeurs de température et d'humidité relative enregistrées par l'hygro-thermomètre avant l'ouverture de l'enceinte pour effectuer la mesure sont relevées et considérées égales aux conditions ambiantes avec lesquelles l'échantillon était à l'équilibre au moment de la mesure. 3• Dès la mesure terminée, l'humidité relative de l'enceinte était augmentée à la valeur supérieure, soit 55%, puis les enceintes étaient à nouveau fermées pour une semaine de sorte que l'échantillon puisse se mettre en équilibre avec les nouvelles conditions imposées. 4• Les opérations 2 à 3 ont été répétées encore 4 fois, de sorte que les index d'humidité correspondants à l'eau adsorbée à 75, 86, 93 et 97% d'humidité relative puissent être mesurés.

Aucune mesure n'a été faite sur un échantillon témoin en parallèle avec ces essais.

Les index d'humidité correspondants à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores ont été mesurés sur 1 cube de chaque molasse (grès de Gurten, molasse de Villarlod et molasse de la Mercerie) et sur 1 cube de grès de Wiesental. Ces expériences n'ont été faites sur aucun échantillon de grès de Maintal, tous les cubes de 15 cm d'arête de cette pierre étant utilisés pour d'autres mesures lorsque ces tests ont eu lieu.

A3.5 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE A L'EAU

Pour déterminer les index d'humidité correspondant à différentes quantités et différentes profondeurs de pénétration de l'eau capillaire, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%) - ont été pesés secs puis 2• ils ont été posés sur leur face A dans un récipient contenant une mince couche d'eau régulièrement alimentée de sorte que l'eau pénètre progressivement par imbibition capillaire depuis la face A vers la face C. 3• A intervalles de temps croissants, les échantillons ont été sortis du récipient, grossièrement essuyés à l'aide d'une peau de chamois humide et pesés afin de connaître la quantité d'eau capillaire qu'ils contenaient au temps t. Après la pesée, les échantillons étaient rapidement posés sur le support en plastique (cf. figure A3.3), face C vers le bas et la hauteur de la frange capillaire était mesurée sur les 4 faces B, D, E et F. La moyenne de ces quatre mesures donne la profondeur de pénétration de l'eau capillaire au temps t. 4• Puis aussi rapidement que possible, les index d'humidité ont été mesurés au centre de la face A à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B suivant la configuration schématisée sur la figure A3.4. En raison de la

²⁶ Lorsqu'un cube de 15 cm d'arête est placé dans une enceinte à humidité relative constante, son volume est tel que l'air qui circule dans sa porosité n'atteint l'équilibre parfait qu'après plusieurs semaines. Toutefois, le processus d'adsorption d'eau en fonction du temps décrivant une courbe logarithmique, la majorité de l'adsorption a lieu au cours des premiers jours. Ainsi, après 7 jours à humidité relative constante, on peut admettre qu'un cube de 15 cm d'arête est proche de l'équilibre.

²⁷ Afin de perturber un minimum l'humidité relative des enceintes contenant les échantillons, ces derniers n'ont pas été sortis des enceintes pour être posés sur le support en plastique habituel pour subir les mesures avec l'appareil MOIST. Les mesures ont été faites directement dans l'enceinte, elle-même posée sur une table risquant d'influencer les valeurs fournies par l'appareil de mesure. Toutefois, les enceintes et les échantillons étant restés dans la même position pendant toute la période des essais, nous ne prendrons pas en compte les valeurs absolues mais les variations des résultats en fonction de l'humidité relative imposée.

déviations de l'appareil, nous avons répété la mesure 4 à 5 fois pour retenir la moyenne comme valeur d'index d'humidité au temps t. **5•** Dès la fin des mesures, les cubes ont été reposés, face A dans l'eau, de sorte que l'absorption capillaire puisse se poursuivre. **6•** Les étapes 2 à 5 ont ensuite été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire ait traversé tout l'échantillon.

Des mesures sur un échantillon témoin posé sur un deuxième support en plastique ont été systématiquement faites en parallèle à chaque mesure effectuée sur les échantillons.

Les index d'humidité correspondant à différentes profondeurs de pénétration de l'eau capillaire ont été mesurés sur 3 cubes de grès de Maintal, 3 cubes de molasse de Villarlod, 3 cubes de molasse de la Mercerie, 4 cubes de grès de Berne et 5 cubes de le grès de Wiesental.

A3.6 MESURES EFFECTUEES PENDANT ET APRES APPLICATION DES CONSOLIDANTS

Les cubes de 15 cm d'arête sur lesquels les index d'humidité ont été déterminés pendant l'application de consolidant ont été traités comme suit :

1• afin qu'une quantité suffisante d'eau adsorbée tapisse les parois de leurs pores au moment de l'application du consolidant (cf. § 2.2 et 4), les échantillons à "consolider" ont d'abord été conditionnés dans des enceintes à humidité relative constante et égale à 75% pendant 2 à 3 semaines avant les mesures. Puis **2•** les échantillons ont été sortis de ces enceintes pour être pesés avant **3•** d'être posés sur le support en plastique (cf. figure A3.3) face C vers le bas, face A vers le haut. Dans cette position leur face A a été régulièrement badigeonnée de produit consolidant à l'aide d'un pinceau. Le badigeonnage a été fait de sorte que le pinceau n'approche jamais plus de 5 mm les bords de la face A, ceci afin d'éviter autant que possible des coulures le long des faces verticales, coulures qui auraient masqué la frange capillaire et entraîné une pénétration du produit sur une profondeur trop hétérogène. Le produit a été appliqué à refus : il était appliqué en léger excès par rapport à la quantité de liquide pouvant être absorbé par capillarité et dès que l'excès était absorbé, un nouvel excès de liquide était ajouté. **4•** A intervalles croissants et après avoir attendu l'absorption de tout le liquide en excès, les échantillons étaient pesés, la hauteur de leur frange capillaire mesurée sur les 4 faces B, D, E et F avant **5•** d'être redéposés sur le support en plastique (cf. figure A3.3) où les index d'humidité ont été mesurés aussi rapidement que possible successivement avec les 4 sondes du MOIST 200B, au centre de la face A suivant la configuration schématisée sur la figure A3.4. Comme pour les mesures à sec, la mesure a été répétée 4 à 5 fois puis moyennée. **6•** Dès la fin des mesures, le produit consolidant était à nouveau badigeonné à la surface du cube de sorte que son absorption capillaire se poursuive. **7•** Les étapes 3 à 6 ont été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire atteigne une profondeur de pénétration prédéfinie à l'avance, comprise entre 1 et 3.5 cm, ces profondeurs étant représentatives des profondeurs de pénétration des produits consolidants *in situ*. Les mesures pendant application du consolidant ont été faites à une température oscillant entre 21 et 24°C et à une humidité relative comprise entre 34 et 44%. **8•** Lorsque la profondeur de pénétration désirée a été atteinte, les échantillons ont été replacés dans les enceintes à humidité relative à 75%, face A vers le haut de sorte que le gel de silice puisse se former dans de bonnes conditions (cf. § 2.2 et 4). **9•** Après 1, 2, 4 et 6 semaines, les échantillons ont été ponctuellement ressortis des enceintes à humidité relative contrôlée et posés sur le support en plastique face A vers le haut pour subir de nouvelles mesures d'index d'humidité à différents stades de gélification des consolidants. Les températures et humidités relatives régnant lors de ces mesures, étaient comprises respectivement entre 21 et 26°C et entre 51 et 61%.

Des mesures sur un échantillon témoin posé sur un deuxième support en plastique ont été faites en parallèle lors des mesures sur les échantillons pas encore consolidés puis lors des mesures faites après 1, 2, 4 et 6 semaines de consolidation.

Ces mesures ont été faites sur 3 cubes de 15 cm d'arête de chaque type de pierre, ces cubes ayant été sélectionnés parmi les échantillons sur lesquels les index d'humidité ont préalablement été mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau.

ANNEXE 4 - MODE OPERATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU COMBO 200

A4.1 LIMITES D'UTILISATION

La conductivité de l'eau est d'autant plus grande que sa teneur en sels solubles est élevée. Par conséquent, la détermination de la teneur en eau d'un matériau par une mesure de conductivité électrique est fortement influencée - sinon totalement faussée - par la présence des sels solubles dans le matériau. Il serait donc difficile d'utiliser cet appareil *in situ*, sur des matériaux de construction exposés aux polluants atmosphérique, aux eaux météoriques et aux eaux de ruissellement, agents toujours plus ou moins sources de sels solubles.

La mesure est dépendante de la «valeur de conduction thermique, de la capacité thermique et de la résistance de diffusion de l'eau»²⁸ : la température du matériau sur lequel la mesure est faite est donc un facteur important. Il est recommandé de faire des mesures sur des matériaux à une température proche - sinon égale - à 20°C²⁹, bien que l'appareil puisse être utilisé entre 0 et 45°C de température ambiante.

Il est aussi recommandé de ne faire bouger ni le/les câbles(s), ni les électrodes ni même l'appareil de mesure pendant la lecture des résultats.

A4.2 GENERALITES CONCERNANT LES MESURES ET LES PRECAUTIONS PRISES

Le COMBO 200 est un conductivimètre électrique pré-étalonné pour 4 grands types de bois ainsi que pour 9 grandes familles de matériaux de construction. Toutes les résultats reportés ci-après ont été acquis en mode "matériau de construction / béton gaz (Lever)", ce matériau étant celui qui possède une structure et une composition les plus proches de celles des pierres naturelles parmi les 9 familles de matériaux "d'étalonnage".

Les mesures faites avec l'appareil COMBO 200 étant basées sur la mesure de la conductivité électrique ou de la résistance électrique entre deux sondes, la qualité du contact établi entre ces sondes et le matériau à caractériser influence fortement les résultats. Par conséquent, l'appareil est plus performant pour des mesures en profondeur et plus particulièrement lorsque les deux sondes utilisées sont en forme de clous durs pouvant être "plantés" dans le matériau à caractériser. Ce matériau doit donc être relativement mou. De ce fait l'appareil est tout spécialement indiqué pour déterminer la teneur en eau d'éléments en bois.

Dans le cas de pierres naturelles, l'appareil, pour être performant, doit être utilisé avec deux sondes en forme de tiges plus ou moins longues, terminées par des brosses rondes de 8 mm de diamètre. Ces sondes doivent être introduites dans des orifices de 8 mm de diamètre chacun préalablement creusés dans la pierre. Cette opération nécessitant une destruction du matériau, nous avons choisi de tester les sondes HY2.72 en forme de clous de 3.5 cm de long et séparées par une distance fixe de 3 cm, sondes normalement prévues pour les matériaux mous en application superficielle uniquement.

Comme le mentionne le manuel utilisateur du conductivimètre COMBO 200, «le mesurage [...] de l'humidité des matériaux de construction [à l'aide de cet appareil] offre généralement

²⁸ BES BOLLMANN, BES COMBO 200, Instructions de service, appareil de mesure servant à déterminer le degré d'humidité du bois et des matériaux de construction.

²⁹ Cette valeur de 20°C correspond probablement à la température d'étalonnage de l'appareil et donc à la température à laquelle les valeurs de teneur en eau fournies seront les plus "justes".

pour de nombreux matériaux connus une précision suffisante lorsqu'il s'agit d'investigations simples. Étant donné toutefois les différences de compositions [minéralogiques et de structures poreuses] des matériaux de construction, ce procédé ne saurait être considéré comme une mesure de précision. [...] Pour les raisons précédemment mentionnées, il est impossible de garantir l'exactitude des mesures affichées non plus que les résultats et les conclusions en découlant.» Pour les interprétations, il est donc important de considérer les résultats en relatif et non pas en absolu.

A4.3 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

Afin de déterminer si par une mesure de surface le conductivimètre permet de détecter l'eau adsorbée dans le réseau poreux, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%) - ont été posés, face A vers le haut, dans une enceinte à humidité relative contrôlée à 33%, à côté d'un hygro-thermomètre enregistrant les variations de température et d'humidité pouvant affecter l'intérieur de l'enceinte toutes les demi-heures. 2• Après 7 jours de mise à l'équilibre²⁶, les enceintes ont été ouvertes et aussi rapidement que possible, la température de surface des échantillons a été mesurée avec un thermomètre infrarouge puis les sondes HY2.72 du COMBO 200 ont été appuyées fortement³⁰ en plusieurs endroits de la face A. Parmi les valeurs mesurées, nous n'avons retenue que la plus élevée. Ces mesures ont eu lieu directement dans l'enceinte²⁷. Les dernières valeurs de température et d'humidité relative enregistrées par l'hygro-thermomètre avant l'ouverture de l'enceinte pour effectuer la mesure, sont relevées et considérées égales aux conditions ambiantes avec lesquelles l'échantillon était à l'équilibre au moment de la mesure. 3• Dès la mesure terminée, l'humidité relative de l'enceinte était augmentée à la valeur supérieure, soit 55%, puis les enceintes étaient à nouveau fermées pour une semaine de sorte que l'échantillon puisse se mettre en équilibre avec les nouvelles conditions imposées. 4• Les opérations 2 à 3 ont été répétées encore 4 fois, de sorte que les pourcentages d'humidité correspondants à l'eau adsorbée à 75, 86, 93 et 97% d'humidité relative puissent être mesurés avec le COMBO 200.

Aucune mesure témoin n'a été faite en parallèle à ces mesures.

Les pourcentages d'humidité correspondants à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores ont été mesurés sur 1 cube de chaque molasse (grès de Gurten, molasse de Villarlod et molasse de la Mercerie) et sur 1 cube de grès de Wiesental. Ces expériences n'ont été faites sur aucun échantillon de grès de Maintal, tous les cubes de 15 cm d'arête de cette pierre étant utilisés pour d'autres mesures lorsque ces tests ont eu lieu.

La température de surface de l'ensemble des échantillons a varié entre 18 et 23°C pendant tout le temps des essais.

³⁰ Des essais préalables ont montré que pour assurer un contact plus ou moins équivalent à chaque mesure, la force à exercée sur les sondes appliquées sur les surfaces devait entraîner les premières traces d'écrasement - ou plus précisément de disjonction - des grains superficiels. Elle a donc été adaptée au matériau, la disjonction des grains de la molasse de Villarlod nécessitant par exemple une force plus faible que la disjonction des grains du grès de Wiesental. Par conséquent les résultats obtenus pour un même type de pierre peuvent être comparés entre eux, mais les résultats obtenus sur des pierres différentes ne sont probablement pas comparables.

A4.4 MESURES EFFECTUEES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE A L'EAU

Afin d'évaluer l'intérêt d'une mesure de la conductivité électrique de surface dans le cadre de l'estimation de la quantité d'eau capillaire présente dans le réseau poreux des grès testés, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés ont été laissés plusieurs semaines dans les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%). **2•** Sur la face A de ces cubes "secs", la température de surface a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge puis les sondes HY2.72 du COMBO 200 ont été appuyées fortement³⁰ en plusieurs endroits. **3•** Les cubes ont ensuite été posés sur leur face A dans un récipient contenant une mince couche d'eau régulièrement alimentée, de sorte que l'eau pénètre progressivement par imbibition capillaire depuis la face A vers la face C. **4•** A intervalles de temps croissants, les échantillons ont été sortis du récipient, grossièrement essuyés à l'aide d'une peau de chamois humide et pesés afin de connaître la quantité d'eau capillaire qu'ils contenaient au temps t. Après la pesée, la hauteur de la frange capillaire était mesurée sur les 4 faces B, D, E et F. La moyenne de ces quatre mesures donne la profondeur de pénétration de l'eau capillaire au temps t. **5•** Puis la température de surface de la face A a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge avant d'y appuyer fortement les sondes HY2.72 du COMBO 200 en plusieurs endroits. Parmi les valeurs de teneur en eau mesurées, nous n'avons retenue que la plus élevée comme valeur de pourcentage d'humidité au temps t. **6•** Dès la fin des mesures, les cubes ont été reposés face A dans l'eau, de sorte que l'absorption capillaire puisse se poursuivre. **7•** Les étapes 3 à 6 ont ensuite été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire ait traversé tout l'échantillon.

Aucune mesure témoin n'a été faite parallèlement à ces mesures.

Les pourcentages d'humidité correspondants à différentes quantités et profondeurs de pénétration de l'eau capillaire ont été mesurés :

- de 0 à 11.6 cm de profondeur de pénétration au moins, sur 2 cubes de grès de Wiesental et un cube de grès de Gurten ;
- de 0 à 1 cm de profondeur de pénétration sur 1 cube de grès de Wiesental, 1 cube de grès de Gurten, un cube de molasse de Villarlod et 1 cube de molasse de la Mercerie.

La température de surface de l'ensemble des échantillons a varié entre 21 et 23°C pendant tout le temps des essais.