

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Analyse temporärer Oberflächenbeschichtungen auf Frischbeton

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas BEDNAR

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens HECHT

E206

Institut für Hochbau und Technologie

Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan MARCHTRENKER

E610/0225933

Boerhaavegasse 27/28, 1030 Wien

Wien, im Oktober 2008

Danksagung

Danken möchte ich an dieser Stelle

Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit am Institut für Bauphysik und Akustik
ausführen zu dürfen,

Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens Hecht
für die fachlich äußerst kompetente Betreuung und besonders für die persönliche
Unterstützung in schwierigen Phasen bei der Erstellung dieser Diplomarbeit,

Herrn Dipl.-Ing. Manfred Grüner und Herrn Ing. Georg Eger
für die Hilfe und die vielen wichtigen Informationen, welche bei der Entwicklung
und Durchführung der Versuche von unschätzbarem Wert waren,

den Verantwortlichen von Sasol Germany für die Anregung zu dieser
Diplomarbeit, sowie für die finanzielle und sachliche Unterstützung,

meinen Eltern, die mir durch ihre konsequente Unterstützung meines Studiums
immer festen Rückhalt gegeben haben,

meinem Bruder Felix für die sachkundige Hilfe bei Fragen und Problemen in allen
Teilbereichen der Informatik,

und schließlich all den guten Freunden und Kollegen, die in großem Ausmaß dazu
beigetragen haben, dass mir die Studienzeit immer als wunderbarer und
aufregender Teil meines Lebens in Erinnerung bleiben wird.

Kurzfassung

In der folgenden Arbeit erfolgt eine Analyse der Wirksamkeit von flüssigen Betonnachbehandlungsmitteln auf Paraffindispersionsbasis anhand von zehn verschiedenen Produkten, welche entweder bereits auf dem Markt sind oder Modifikationen für mögliche Weiterentwicklungen darstellen.

Obwohl die Behandlung nur bis in eine Tiefe von etwa 2 cm messbare Verbesserungen der Betoneigenschaften verspricht, ist der Aufwand in der Praxis bei vielen Bauvorhaben notwendig, um Dauerhaftigkeit und somit langfristig auch die Wirtschaftlichkeit der Bauwerke zu gewährleisten.

Die vorliegende Arbeit sucht einerseits nach vereinfachenden Nachweisverfahren für die Wirksamkeit der Nachbehandlung und liefert andererseits eine Bewertung der untersuchten Proben hinsichtlich ihrer Eignung.

Die Beurteilung der Paraffindispersionen erfolgte, nach eingehenden Literaturrecherchen, durch ausgewählte Prüfmethoden. Der Schwerpunkt lag auf der Verbesserung des Verdunstungsschutzes durch die unterschiedliche Nachbehandlung.

Die Ergebnisse zeigen ein sehr breit gefächertes Wirkungsspektrum der geprüften Paraffindispersionen. Es reicht von einem Nachbehandlungsmittel, das zur Verschlechterung gegenüber unbehandelten Betonproben führte, bis zu anderen, die unter bestimmten Bedingungen sogar der Foliennachbehandlung vorzuziehen sind. Vor allem unter Windeinfluss ist bei der Nachbehandlung mit Folie durch Undichtheiten das temperaturbedingte Verdunstungsverhalten sehr groß und führt daher zu schlechteren Ergebnissen als bei guten flüssigen Nachbehandlungsmitteln, die auch hier eine vergleichsweise ausgezeichnete Performance aufweisen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit dienen nicht nur unmittelbar der Wirtschaft bei der Entwicklung verbesserter Nachbehandlungsmethoden, sondern sollen darüber hinaus zum weiteren Forschen auf dem Gebiet der Betonnachbehandlung anregen.

Abstract

The following paper deals with an analysis of ten different liquid membrane-forming compounds for curing concrete based on paraffin wax dispersion.

These liquids, provided by a business concern, are representing already free acquirable products as well as modifications for a potential improvement of the technique.

Although the effects of concrete curing are only detectable up to a depth of 2 cm, the investment is still maintainable. Especially this outermost layer is exposed to several external physical and chemical influences that cause in case of bad developed concrete properties surface damages and further a decline of durability. Out of this repair works would be necessary, which are far more expensive than a curing at the production.

On the one hand this thesis is searching for easy executing test methods for evaluating the efficiency; on the other hand the qualification of the provided products for concrete curing should be rated. Special attention is turned to the practicability on concrete roads and the effects of different climate conditions.

For answering these topics a couple of suitable test methods were elected by literature research. The most important aspect of curing is to retain as much water as possible in the concrete mass for the guarantee of a best possible hydration. Therefore the loss of water was measured during the first 72 hours after application. Furthermore the concrete surface temperature was observed and after 28 days of hardening the bending tensile strength was checked. Porosity was tested only on a few samples for the purpose of comparison. As a new option for controlling the properties of curing compounds just a short time after application thermography was tested. Finally, to complete the analysis, optical characteristics and handling of the different liquids were rated.

The results of the tests show a wide range of efficacy for the curing compounds. One modification causes worse concrete properties than without any treatment. Others, referring to the data from the executed tests, should be preferred even to curing with polyethylene film under certain circumstances. Especially a windy, warm and dry climate may produce a high loss of moisture below the film due to

leaks, while liquid curing compounds still show a very good performance under such conditions.

The results of this thesis shall help at the development of better curing compounds and encourage to further researches as well.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Der Werkstoff Beton	3
2.2	Betonnachbehandlung	9
2.3	Paraffindispersionen	15
3	Grundlagen für die Versuchsdurchführung.....	16
3.1	Probekörperherstellung	16
3.2	Versuchsklimata	17
3.3	Beschreibung ausgewählter Messverfahren	18
4	Versuchsaufbau und -durchführung.....	27
4.1	Herstellung der Versuchskörper	27
4.2	Probekörperlagerung	31
4.3	Ausgeführte Bewertungsverfahren	33
4.4	Versuche zur Einordnung der Nachbehandlungsmittel.....	38
4.5	Überblick über den Versuchsablauf	40
5	Ergebnisse	43
5.1	Eigenschaften der Nachbehandlungsmittel	43
5.2	Beurteilung nach Augenschein.....	45
5.3	Subjektive Bewertungsverfahren.....	47
5.4	Thermographie	49
5.5	Temperaturmessung	51
5.6	Wasserverlust	52
5.7	Biegezugfestigkeit	56
5.8	Quecksilberdruckporosimetrie	58
5.9	Gegenüberstellung der Ergebnisse	60

6	Schlussfolgerungen.....	66
	Literatur- und Quellenverzeichnis	69
	Anhang	71

1 Einleitung

Ständig steigende Kundenansprüche und der Konkurrenzdruck der freien Wirtschaft erfordern in der gesamten Bauindustrie Forschung und ständige Weiterentwicklung in allen Teildisziplinen. Besonders bei der Betontechnologie konnten in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt und somit neue Marktbereiche erschlossen werden. Mit der Entwicklung von hochfesten, ultrahochfesten und selbstverdichtenden Betonen sowie verschiedensten Zusatzmitteln zur Verbesserung der Betonrezeptur gelang es, höhere Festigkeiten und größere Sicherheiten bei der Einstellung vorher bestimmter Eigenschaften zu erreichen.

Um diese in Laboren entwickelten Technologien entsprechend nutzen zu können, müssen auch in der Praxis, also auf der Baustelle, die nötigen Bedingungen für eine einwandfreie Verarbeitung geschaffen werden. Ein Problem stellt hier die Schwächung der obersten Betonschichten durch verschiedenste Umgebungseinwirkungen wie Erschütterung, Temperatur und Wind während des Verfestigungsprozesses dar. Unter Nachbehandlung versteht man den Versuch, Betonen unter widrigen Umständen bestmögliche Bedingungen für die Entwicklung seiner Eigenschaften zu schaffen.

In dieser Arbeit wird ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Prüfung und Herstellung einer Nachbehandlungsmethode, nämlich der mit Paraffindispersionen, geleistet.

Dies erfolgt anhand der konkreten Aufgabenstellung, verschiedene flüssige Nachbehandlungsmittel auf Paraffindispersionsbasis auf ihre Wirksamkeit zur Behandlung von Beton gegen frühzeitige Austrocknung im Straßenbau zu untersuchen. Zur Prüfung wurden von Seiten eines Herstellers zehn verschiedene Produkte zur Verfügung gestellt, deren Bezeichnungen verschlüsselt waren um eine möglichst objektive Bewertung durchführen zu können. Die einzelnen Proben stammten aus bereits am Markt verfügbaren Produkten aus dem mitteleuropäischen Bereich, aus anderen Kontinenten, und aus Konkurrenzprodukten. Die Reihe der zu untersuchenden Proben wurde schließlich

durch einige Modifikationen und Neuentwicklungen ergänzt, bei denen es die Auswirkungen der Veränderungen zu beurteilen galt.

Bewertet werden die Wirksamkeit und Verarbeitbarkeit der verschiedenen Nachbehandlungsmittel in der alltäglichen Anwendung. Darüber hinaus wird ein Urteil darüber gefällt, ob es sinnvoll wäre, in verschiedenen Klimazonen unterschiedliche Substanzen zum Einsatz zu bringen.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist Grundlage für weitere Forschung und Entwicklung verbesserter Nachbehandlungsmittel.

Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen wird mit ausgewählten Prüfverfahren ein Versuchsaufbau entwickelt, um verschiedene Nachbehandlungsmittel auf ihre Eignung und Wirksamkeit zu testen. Es folgt eine Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse untereinander und ein Vergleich mit anderen Nachbehandlungsverfahren.

Schlussendlich erfolgt eine Gesamtbewertung für die geprüften Substanzen, um ihre jeweilige Erfolgswahrscheinlichkeit in der baupraktischen Anwendung unter bestimmten Bedingungen abschätzen zu können.

2 Grundlagen

Im Folgenden wird eine kurze Einleitung über die Herstellung und Verarbeitung von Beton dargestellt. Neben einigen allgemeinen Informationen wird besonders auf die für die weitere Abhandlung bedeutenden Eigenschaften des Werkstoffes hingewiesen.

2.1 Der Werkstoff Beton

Beton ist neben Holz und Stahl der wichtigste Rohstoff für die Bauindustrie. Als Dreistoffgemisch von Zement, Wasser und Zuschlag kann er als künstlicher Stein bezeichnet werden, der in der Natur äquivalent als Konglomerat vorkommt. Da Beton alleine zwar ausgezeichnet auf Druck beanspruchbar ist, aber nur geringe Zugkräfte aufnehmen kann, wird durch Zugabe von Stahlbewehrung ein universal einsetzbarer Werkstoff gewonnen.

Ein besonderer Vorteil von Beton besteht darin, dass seine Eigenschaften je nach Anforderung durch Veränderung der einzelnen Bestandteile an verschiedenste Gegebenheiten angepasst werden können. Die Bestimmung einer anforderungsgerechten Rezeptur kann in vielen Fällen vom verantwortlichen Ingenieur vor Ort durchgeführt werden. Bei besonderen Ansprüchen an die Eigenschaften des Betons sollte hier aber unbedingt ein Betontechnologe oder zumindest ein Betonwerk zu Rate gezogen werden.

Wesentlich für die Eigenschaften des Betons ist die Art des Bindemittels, nur mit ihm können die Zuschlagskörner kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Zement zeichnet sich als hydraulisches Bindemittel dadurch aus, unter chemischen Reaktionen mit dem Anmachwasser zu einem wasserfesten Endprodukt, dem Zementstein, zu erhärten. Das heißt, eine Verfestigung ist sowohl unter Luftlagerung als auch unter Wasser möglich, solange nur ausreichend Wasser für die Reaktionen vorhanden ist.

2.1.1 Die Bedeutung der Betonrezeptur

Beton kann durch Abwandlung seiner Bestandteile den jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Im einfachsten Fall geschieht das nur durch das Verhältnis der Grundbestandteile Zement, Wasser und Zuschlag¹ und deren Eigenschaften.

Der Einfluss des Anmachwassers wird hauptsächlich über den w/z-Wert bestimmt (näheres dazu in 2.1.2). Dieses Verhältnis beeinträchtigt maßgebend die Festigkeit, aber auch die Konsistenz und damit die Verarbeitbarkeit des Betons². In der Regel ist für die Betonherstellung herkömmliches, in der Natur vorkommendes Wasser einsetzbar. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass keine großen Mengen an werkstoffschädigenden Substanzen enthalten sind. Dazu gehören etwa Zucker und Humussäuren, die den Erhärtungsvorgang behindern, Schwebstoffe und Öle, die zu unerwünschten Luftporen führen können, aber etwa auch Chloride, die eine rasche Korrosion der Bewehrung verursachen würden [Hol04] .

Neben der Vermeidung dieser schädigenden Substanzen ist bei der Gesteinskörnung besonders auf eine entsprechende Kornzusammensetzung zu achten. Der Zuschlag ist meist der festeste Bestandteil des Betons und sollte als eigentliches Gerüst nur geringe Hohlräume aufweisen. Bei einer zu groben Gesteinskörnung kann der Zementleim die Hohlräume nicht ausfüllen, ein sehr lockeres Gefüge mit geringer Festigkeit entsteht. Ist der Feinanteil zu groß, wird von den kleinen Körnern sehr viel Bindemittelleim oder Anmachwasser beansprucht, was ein Ausbluten³ des Betons zur Folge hat. Die Normen ÖNORM EN 12620 und ÖNORM B 3131 geben genauen Aufschluss über die Eigenschaften der Körnungen für die unterschiedlichen Anwendungsgebiete.

¹ Die Bezeichnung Zuschlag wurde mit der ÖNORM EN 12620 durch den Begriff Gesteinskörnung ersetzt.

² Für den Wassergehalt der Mischung muss die Feuchte aus der Gesteinskörnung und anderen Nebenbestandteilen mit eingerechnet werden.

³ Unter Bluten des Betons versteht man das Absondern von Wasser beim Verdichten durch Sedimentation der Feststoffe [Spr07] .

Wesentlich umfangreicher sind die Möglichkeiten bei der Auswahl des Zements. Je nach Feinheit und Bestandteilen des Bindemittels werden entscheidende Eigenschaften des Betons wie Festigkeitsentwicklung, Erhärtungsgeschwindigkeit und Chemikalienbeständigkeit verändert. Einen guten Überblick über die verschiedenen erhältlichen Zementarten und ihre Eigenschaften gibt die ÖNORM EN 197-1.

Zur Verbesserung der Eigenschaften des Betons werden heutzutage den drei Grundkomponenten Zusatzmittel und Zusatzstoffe beigelegt.

Derzeit werden folgende Zusatzmittel verwendet [Hol04] :

- Betonverflüssiger zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit bei geringem Wassergehalt;
- Fließmittel als verbesserte Version von Betonverflüssigern, die auch für die Herstellung von selbstverdichtenden Beton (SCC) verwendet werden;
- Luftporenbildner zur Erhöhung des Widerstands gegen Frost-/Tauwechsel;
- Verzögerer zur Erhöhung der Verarbeitungszeit des Betons;
- Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger um den Abbindeverlauf besonders bei niedrigen Temperaturen zu erhöhen;
- Dichtungsmittel und
- Stabilisierer.

Die zielgerichtete Anwendung all dieser Substanzen erweitert den Einsatzbereich von Beton enorm und erleichtert den Verarbeitungsvorgang. Allerdings muss auf die gegenseitige Beeinflussung mancher Zusatzmittel sehr genau geachtet werden. Auch Zusatzstoffe werden dem Beton zur Verbesserung seiner Eigenschaften beigelegt. Allerdings ist ihr Anteil so groß, dass sie bei der Stoffraumrechnung¹ berücksichtigt werden müssen [Hol04] . Beispiele sind diverse Fasern zur

¹ Die Stoffraumrechnung werden die Mengen der Betonkomponenten an 1 m³ Frischbeton bestimmt, indem ihnen jeweils ein bestimmter Volumenanteil zugeteilt wird [Kad00] .

Rissüberbrückung, sowie Kalkstein- und Quarzmehl oder Steinkohlenflugaschen zu Verbesserung der Verarbeitbarkeit und der Gefügezusammensetzung.

2.1.2 Die Hydratation

Als Hydratation wird der komplette Erhärtungsprozess des Betons vom Anmachen, über Ansteifen und Erstarren, bis zur vollständigen Erhärtung bezeichnet. Wesentlicher Vorgang dabei ist die chemische Umwandlung von Zementmineralen zu den wasserhaltigen Verbindungen des Zementsteins, vor allem zu Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen) und Calciumhydroxid. Da es sich um exotherme Vorgänge handelt, wird dabei die sogenannte Hydratationswärme freigesetzt, die bei sehr massigen Bauteilen zu starken Zwangsspannungen während der Erstarrung und in weiterer Folge zu Schädigungen in der Struktur führen kann.

Das bedeutendste Kriterium für eine vollständige Hydratation des Zements ist die ausreichende Verfügbarkeit von freiem Wasser. Das optimale Masseverhältnis von Wasser zu Zement, Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert)¹ genannt, liegt bei etwa 0,40. In Abbildung 1 ist deutlich zu erkennen, was die Auswirkungen eines zu hohen bzw. zu niedrigen Verhältnisses sind. Ist nicht genug Wasser vorhanden, verbleiben Zementmineralreste, die nicht umgewandelt werden konnten, im Beton. Bei einem w/z-Wert über 0,40 bleibt Restwasser in den Zwickeln zwischen dem Zementstein zurück. Dieses verdunstet nach einiger Zeit und hinterlässt ein System an Kapillarporen. Je größer der Anteil dieser Poren im Beton ist, desto schlechter sind seine Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften.

Es dauert allerdings jahrelang, bis die Hydratation bei einem optimalen w/z-Wert vollständig abgelaufen ist. Da das Wasser während dieser Zeit, vor allem in der frühen Erstarrungsphase, sehr leicht durch Verdunstung verloren gehen kann,

¹ Alternativ wird auch die Bezeichnung w/b-Wert für Wasser-Bindemittel-Wert verwendet. Diese Bezeichnung ist vor allem dann exakter, wenn dem Beton Zusatzstoffe beigegeben werden, die auf den Zementgehalt aufgerechnet werden dürfen [Bac04].

werden Betone in der Regel mit einem Verhältnis Wasser zu Zement von etwas über 0,40 hergestellt.

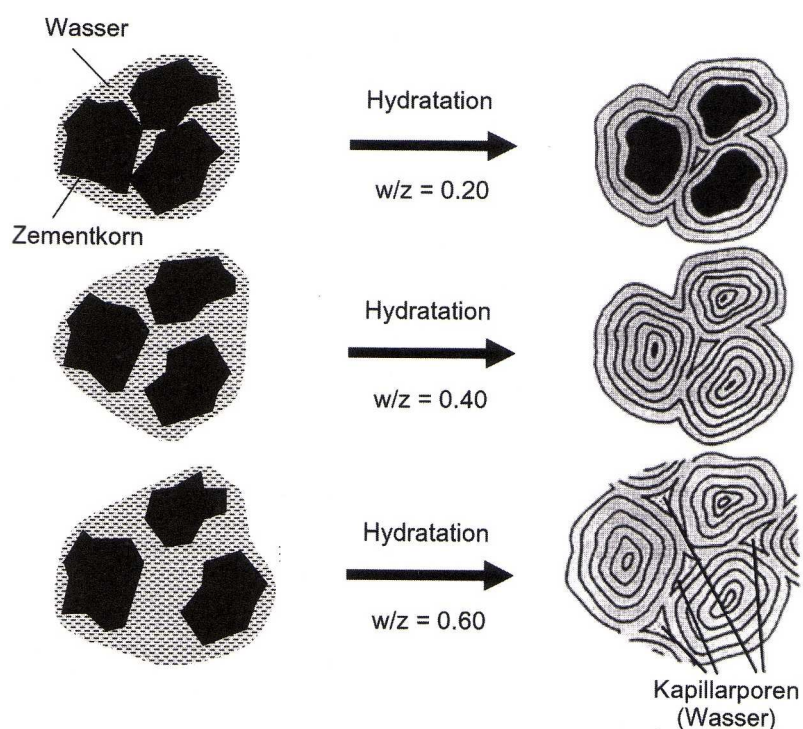


Abbildung 1: Auswirkungen des w/z-Wertes auf Hydratation und Porenbildung (Quelle: [Spr07])

2.1.3 Beton im Straßenbau

Die Herstellung von Betonstraßen erfolgt mit Hilfe eines Gleitschalungsfertigers (siehe Abbildung 2). Diese automatischen Geräte zur Herstellung einer Betondecke werden mit Fahrmischern oder von größeren Muldenfahrzeugen beschickt. In einem kontinuierlichen Vorgang wird mit dem selbstfahrenden Gerät eine gleichmäßige Fahrbahnschicht mit den gewünschten Abmessungen hergestellt. Nach dem groben Verteilen erfolgt eine Verdichtung mit Innenrüttlern, gefolgt von einem Ebnungsvorgang mit Pressbohlen. Vollautomatisch werden auch Dübel und Anker eingerüttelt, die nach der späteren Herstellung von Dehnfugen eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Platten gewährleisten und damit zur Ebenheit der Fahrbahn beitragen. Gut erkennbar ist in Abbildung 2 das Aufbringen der Textur durch das

Nachziehen eines Kunstrasenstückes. Durch das Aufbringen dieser künstlichen Rauheit werden spätere Eigenschaften wie Griffigkeit, Wasserabfluss, Sprühhahnenbildung, Rollwiderstand, Lichtreflexion sowieso Geräuschbildung der Fahrbahn beim Überfahren maßgeblich beeinflusst [Spr07] .

Nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt der Einbau des Betons im Straßenbau in zwei Schichten. Während in der ersten die Dübel und Anker eingebaut werden, soll die zweite nur sehr dünne Schicht eine ebene Fahrbahnoberfläche garantieren. Die Herstellung der beiden Schichten erfolgt kurz hintereinander, um guten Verbund miteinander sicherzustellen.

Soll aufgrund sehr großer Anforderungen an die Ebenheit der Oberfläche auf Fugen verzichtet werden, besteht die Möglichkeit, eine fugenlose Straße herzustellen. Hier ist allerdings eine starke Bewehrung notwendig, um Rissbildungen zu vermeiden. In Österreich kommt diese Methode wegen der hohen Kosten für den Baustahl kaum zur Anwendung.



Abbildung 2: Beispiel eines Gleitschalungsfertigers (Quelle: www.hedke.com)

2.2 Betonnachbehandlung

2.2.1 Allgemeines

Die Maßnahmen, um jungen Beton in der Abbindephase vor schädigenden Einwirkungen wie extremen Temperaturänderungen, Erschütterungen, mechanischen oder chemischen Einflüssen zu schützen, nennt man Nachbehandlung [Bay99]. Besonders wichtig für die wunschgemäße Entwicklung der späteren Eigenschaften des Betons ist, dass die Hydratation nicht durch vorzeitige Austrocknung beeinträchtigt wird. Gelingt dies nicht, kann dieser frühe Wasserverlust nach [Spr07] in der Randzone folgende Auswirkungen haben:

- Einschränkung der Festigkeitsentwicklung;
- poröses Gefüge und damit tiefere Carbonatisierung;
- geringerer Frostwiderstand;
- geringerer Widerstand gegen Chloride;
- geringerer Verschleißwiderstand und
- Absanden der Oberfläche bei bestimmten Zementarten („Verdursten“).

Aus all diesen Konsequenzen folgt eine starke Einschränkung der Dauerhaftigkeit und somit durch erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen erhöhte Kosten. Um die schädliche Austrocknung zu verhindern oder zumindest zu verlangsamen, wurden daher verschiedene Methoden zur Reduktion des Wasserverlustes entwickelt. Die Literatur [Spr07] unterscheidet bei den Möglichkeiten zwischen wasserzuführenden und wasserhaltenden Maßnahmen, welche in den Unterkapiteln 2.2.2 und 2.2.3 näher erläutert werden. Die dort erwähnten Verfahren können zur Wirksamkeitserhöhung natürlich auch in den verschiedensten Kombinationen angewandt werden. Das Wirkungsspektrum verschiedener Nachbehandlungsarten ist durch Arbeiten wie [Bun06] bekannt und kann in Abbildung 3 abgelesen werden.

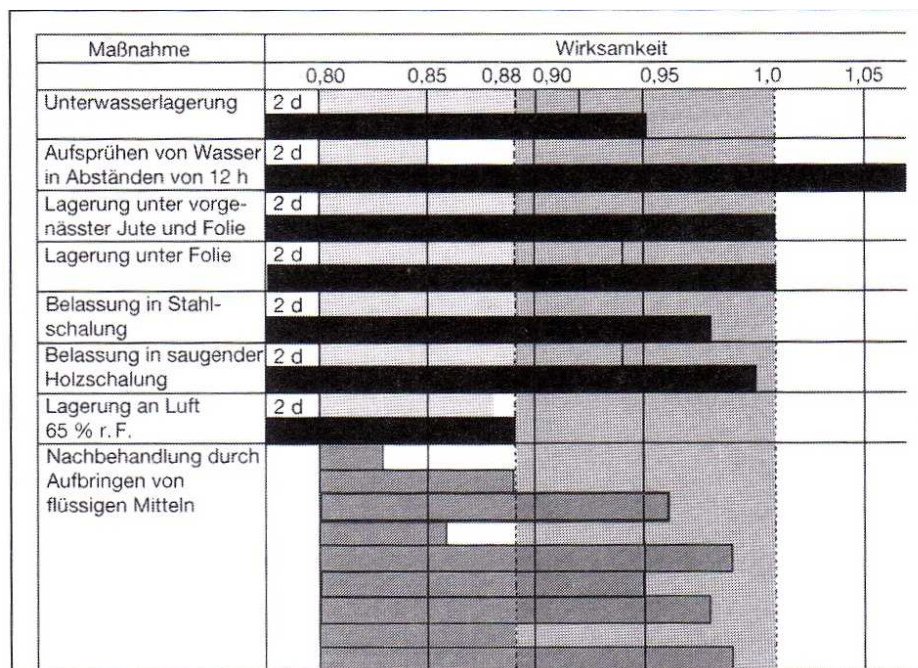


Abbildung 3: zu erwartende Wirksamkeit von Nachbehandlungsmethoden (Quelle: [Bun06])

Ergänzend ist hier auf die Möglichkeit der Überdachung des noch jungen Betons hinzuweisen. Neben dem Abschattungseffekt zur Verhinderung des Aufheizens bei direkter Sonneneinstrahlung ist zusätzlich ein effektiver Schutz bei mechanischer Beanspruchung durch Regen gewährleistet. Darüberhinaus kann, bei entsprechend zeltförmiger Ausbildung, eine Verringerung der verdunstungsfördernden Windbelastung erzielt werden.

Neben der Geschwindigkeit des Erhärtungsvorgangs sind Klimabedingungen ein entscheidender Faktor bei der Bestimmung der erforderlichen Dauer der Nachbehandlung (siehe Abbildung 4). Durch die erhöhte Hydratationsgeschwindigkeit, und damit der Festigkeitsentwicklung, ist bei höheren Temperaturen nur eine kurze Behandlung nötig. Allerdings sollten bei verdunstungsfördernden Einwirkungen wie hohen Windgeschwindigkeiten und geringer Luftfeuchte die angegebenen Zeiten verlängert werden.

Nr.	1	2	3	4	5
Oberflächentemperatur v in °C ^e	Minstdauer der Nachbehandlung in Tagen ^a				
	Festigkeitsentwicklung des Betons ^c $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ^d				
		$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
1	$v \geq 25$	1	2	2	3
2	$25 > v \geq 15$	1	2	4	5
3	$15 > v \geq 10$	2	4	7	10
4	$10 > v \geq 5$ ^b	3	6	10	15

^a Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.
^b Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während derer die Temperatur unter 5 °C lag.
^c Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und nach 28 Tagen (ermittelt nach DIN 1048-5) beschrieben, das bei der Eignungsprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Beton vergleichbarer Zusammensetzung (d. h. gleicher Zement, gleicher w/z-Wert) ermittelt wurde.
^d Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden.
^e Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden.

Abbildung 4: Minstdauer der Nachbehandlung von Beton (Quelle: [Bun06])

2.2.2 Wasserzuführende Maßnahmen

Wenn in der ersten Phase der Hydratation das Austrocknen des Betons durch aktive Wasserzufuhr verhindert wird, so spricht man von einer wasserzuführenden Maßnahme. Eine naheliegende Methode ist die Unterwasserlagerung, die aus baupraktischen Gründen in der Realität kaum zur Anwendung gebracht werden kann. Daher wurden einige ähnliche Verfahren entwickelt, die einen vergleichbaren, oder sogar besseren Effekt erzielen:

- Aufsprühen von Wasser in regelmäßigen Zeitintervallen;
- Lagerung unter vorgemäster Jute (oder anderen feuchtespeichernden Tüchern) und
- Aufbringen feuchten Sandes als Wasserreservoir.

Von diesen Möglichkeiten kommt in der Baupraxis vor allem das regelmäßige Besprühen der Betonoberfläche zur Anwendung. Allerdings kann es hierbei durch unsachgemäßen Wasserauftrag zur Irritation des Betons bei der Festigkeitsentwicklung kommen.

2.2.3 Wasserhaltende Maßnahmen

Alternativ zu den wasserzuführenden Maßnahmen ist es möglich, den Wasserverlust mit sogenannten wasserhaltenden Maßnahmen zu verhindern oder zumindest zu verlangsamen. Meist wird hier mittels einer Sperrschicht versucht, die Verdunstung des Wassers zu verhindern. Die Herstellung dieser Schicht erfolgt nach aktuellem technischen Stand nach einem der beiden folgenden Prinzipien:

- Abdecken mit einer Folie oder
- Aufbringen eines geeigneten Nachbehandlungsmittels (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Aufspritzen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels auf der Baustelle (Quelle: [Hol04])

Abbildung 6 zeigt die bei Foliennachbehandlung sehr sorgfältig auszuführenden Randbereiche und Überlappungsstöße, bei denen schon kleine Undichtheiten zu großen Wasserverlusten führen können. Am linken Rand muss die Folie sehr genau an die Schalung herangeführt und gut gegen den Wind geschützt werden.

Auch beim Stoß der Folienbahnen (Abbildung 6, Bildmitte) ist ein Beschweren gegen Unterlüftung, sowie eine gute Verbindung zwischen den Teilstücken erforderlich.



Abbildung 6: Foliennachbehandlung und deren Problembereiche (Quelle: [Hol04])

In manchen Quellen wird auch das Belassen des Betons in feuchter, saugender Holzschalung als adäquates Mittel der Nachbehandlung gegen frühzeitiges Austrocknen genannt. Da dies nur im Hochbau sinnvoll erscheint, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

2.2.4 Wirkungsweise von Nachbehandlungsmitteln

Sinn der Nachbehandlung von Beton ist eine vollständige Hydratation, und damit die Entwicklung der gewünschten späteren Eigenschaften, besonders im Stadium der Frühverfestigung zu gewährleisten. Verdunstung bewirkt ohne entsprechende Nachbehandlung besonders in den oberflächennahen Schichten rasch eine Unterversorgung von Wasser. Es wird zwar anfangs schnell Wasser aus den weiter innen liegenden Teilen nachtransportiert, jedoch stellt sich schon sehr bald

eine Feuchtigkeitsverteilung ein, welche die erforderlichen 80% Luftfeuchtigkeit (nach [Bet07]) für eine vollständige Hydratation im Randbereich nicht mehr erreicht. In Abbildung 7 aus [Bun06] wird die Auswirkung des Feuchteverlustes auf die relative Feuchte im Beton dargestellt. Es ist sehr gut ersichtlich, dass mit einer entsprechenden Nachbehandlung der Bereich, in dem vollständige Hydratation möglich ist, deutlich vergrößert wird.

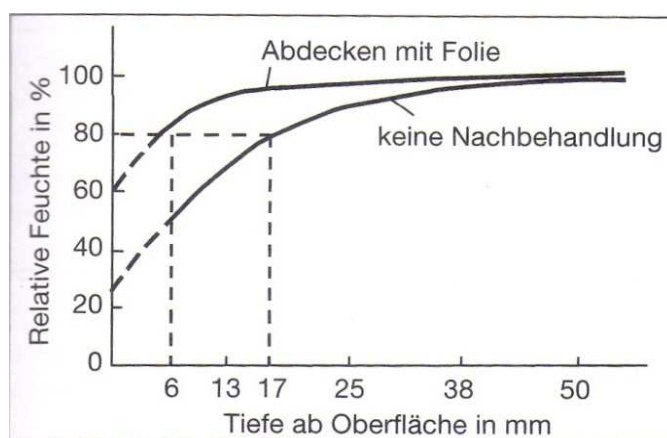


Abbildung 7: Feuchteverteilung in Betonrandbereichen (Quelle: [Bun06])

Allerdings gibt die Darstellung auch klar darüber Aufschluss, dass der Verdunstungsprozess sich nur im äußersten Randbereich und hier bis in eine Tiefe von etwa 2 cm deutlich negativ auswirkt. Abdecken mit Folie verkleinert den gefährdeten Bereich demnach auf 6 mm.

Wenn man diesen relativ kleinen Randbereich betrachtet, erscheint der Aufwand für die Nachbehandlung anfangs recht groß. Gerechtfertigt wird er dadurch, dass bei den meisten Anwendungen gerade diesen äußersten Schichten größte Bedeutung zukommt. Im Stahlbetonbau muss dieser Bereich qualitativ hochwertig sein, um insbesondere das Eindringen von Chloriden und somit eine frühe Korrosion und damit aufwändige Instandsetzungsmaßnahmen zu verhindern. Gerade im Straßenbau werden die obersten Schichten besonders beansprucht. Sie sind nicht nur der direkten mechanischen Belastung durch den Verkehr ausgeliefert, sondern es kommt zu besonderen Beanspruchungen durch Temperaturschwankungen, besonders durch Frost-Tau-Wechsel.

2.3 Paraffindispersionen

Paraffin ist ein Gemisch verschiedener langkettiger Kohlenwasserstoffe, dessen Schmelzpunkt je nach Zusammensetzung häufig zwischen 50°C und 80°C liegt. Es ist ein wachsartiger, brennbarer, geruch- und geschmackloser sowie ungiftiger Stoff. Seine Verwendung in der Baubranche beruht vor allem auf seiner wasserabstoßenden Wirkung und der Reaktionsträgheit (inert) gegenüber vielen Chemikalien.

Rohparaffin wird aus Restprodukten der Erdölverarbeitung, den sogenannten Gatschen, durch Entölung gewonnen und zu verschiedensten Spezialprodukten weiterverarbeitet. Alternativ besteht auch die Möglichkeit der synthetischen Herstellung nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren.

Als Dispersion wird ein heterogenes Gemenge aus mindestens zwei Stoffen, die sich nicht oder kaum ineinander lösen oder chemisch verbinden, bezeichnet. Bei einer Paraffindispersion liegt daher Paraffin möglichst fein verteilt in einem anderen Stoff vor.

Das Anwendungsgebiet von Paraffin in der Bauindustrie liegt vor allem im Bereich der Sanierung und der Abdichtungstechnik. Außerdem kann es als Zuschlagstoff in Beton, für Beschichtungen als Korrosionsschutz bei Stahlbetonbauwerken [Bau07] , oder zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit in der Holzindustrie eingesetzt werden.

3 Grundlagen für die Versuchsdurchführung

3.1 Probekörperherstellung

Für die Herstellung der Proben ist in der Literatur keine einheitliche Vorgangsweise zu ermitteln. Schon bei der Betonrezeptur unterscheiden sich die Forschungsberichte für verschiedene Prüfungen bei ihren Forderungen, wodurch ein Vergleich ein- und derselben Probe nach den verschiedenen Anforderungen nicht möglich ist. In den Technischen Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel [For92] wird die Betonrezeptur für das Prüfverfahren beispielsweise folgendermaßen beschrieben: „Die Prüfungen werden an Prüfkörpern aus Beton durchgeführt, der mit einem w/z-Wert von 0,42 und einem Mischungsverhältnis Zement zu lufttrockenem Kiessand 0/8 mm (in Gewichtsteilen) von 1 zu 3 hergestellt wird.“ Anschließend erfolgen exakte Forderungen zu Sieblinie des Zuschlags, Zementart und genaue Angaben zum Herstellungsvorgang. Das ASTM Dokument [AST07] dagegen stellt an die Rezeptur zur Prüfung des Nachbehandlungsmittels keine Anforderungen. Dies scheint grundsätzlich der richtige Zugang zu sein, da die Nachbehandlungsmittel schließlich bei möglichst allen in der Praxis verwendeten Betonrezepturen ihre volle Wirkung entfalten sollten. Hier ist besonders auf die Einwirkungen von Zusatzmitteln, sowie der Umgebungsbedingungen in der Praxis hinzuweisen, welche die Wirksamkeit der nach den technischen Lieferbedingungen geprüften Nachbehandlungsmittel schlussendlich vermindern können. Aus diesen Gründen ist eine an den wirklichen Baualltag angepasste Beurteilung einer standardisierten vorzuziehen, ausgenommen es handelt sich um eine Zertifizierung im Rahmen der Zulassung eines Produkts.

Noch eklatanter als bei der Rezeptur ist der Unterschied bei den Anforderungen an die Probekörperabmessungen. Es ist leicht einzusehen, dass beispielsweise eine Prüfnorm für die Biegezugfestigkeit eine andere Probekörperform verlangt, wie die bereits genannten Richtlinien zur Beurteilung des Wasserverlustes von nachbehandeltem Beton. Daher ist es bei der Prüfung unterschiedlicher Beton- und Nachbehandlungsmiteleigenschaften nicht möglich, sich exakt an die

Vorgaben der einzelnen Richtlinien zu halten. Vielmehr ist es notwendig, mit einem geeigneten Mittelmaß für alle Messmethoden aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

3.2 Versuchsklimata

Als besondere Fragestellung ist der Einfluss verschiedener Klimabedingungen auf die Nachbehandlung mit den Paraffindispersionen zu behandeln. Die Auswirkungen unterschiedlicher Umgebungsverhältnisse auf das Austrocknungsverhalten von Beton sind allgemein bekannt. So verweisen viele Quellen auf einen Graph, mit dessen Hilfe durch die Eingangsparameter relative Luftfeuchtigkeit, Betontemperatur und Windgeschwindigkeit die verdunstete Wassermenge abgeschätzt werden kann (Abbildung 8).

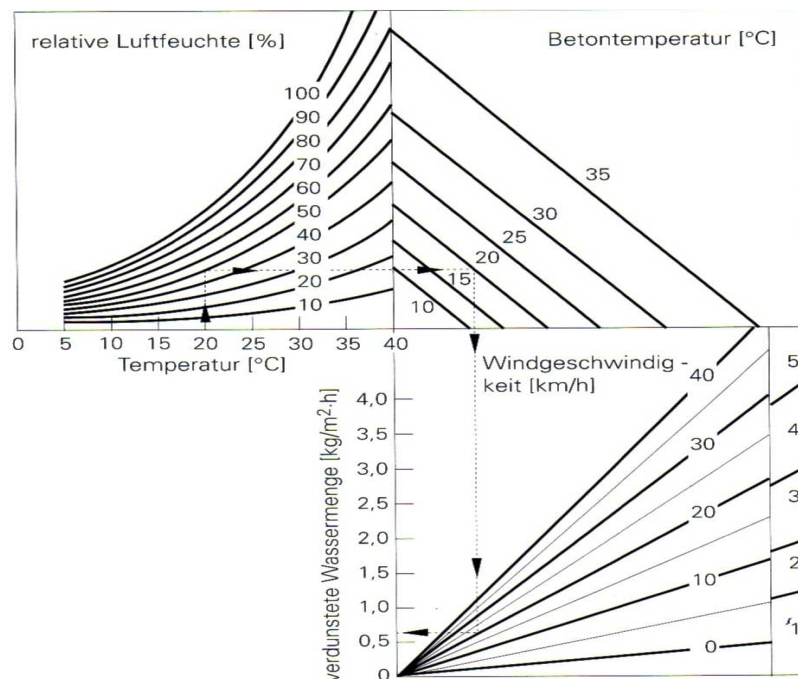


Abbildung 8: Wasserverlust durch Austrocknen in Folge Temperatur, rel. Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit (Quellen: [Ker98])

Temperatur, relative Luftfeuchte, sowie Windgeschwindigkeit beeinflussen naheliegender Weise die Verdunstungsrate. Es muss jedoch darauf hingewiesen

werden, dass mit Hilfe dieses Graphen nur eine grobe Abschätzung erfolgen kann, da die wahre Verdunstungsmenge von weiteren Faktoren abhängt. So kann eine durch Textur oder natürliche Rauheit vergrößerte Oberfläche zu höheren Verdunstungsraten führen. Ebenso wird die Wassermenge wesentlich durch den Feuchtetransport im Inneren des Bauteils, etwa durch die unterschiedliche Ausbildung des Porensystems, beeinflusst. Dauert der Verdunstungsprozess über längere Zeit an, so nimmt der Feuchteverlust immer mehr ab, bis er schlussendlich stagniert, weil kein Wasser mehr nachgeliefert werden kann.

In der vom Autor erstellten Versuchsreihe sollten sich nun möglichst alle Klimabedingungen für das Herstellen von Beton wiederfinden. Aus diesem Grund wurden für die Temperatur die zwei Extrembedingungen mit 10°C und 30°C festgelegt. Diese Werte resultieren aus den Gegebenheiten in der Baupraxis und der Überlegung, dass bei einer Betontemperatur über 30°C Rezepturbestandteile wie Luftporenbildner oder Fließmittel zu unterschiedlichen Reaktionen und somit zur Verfälschung der Versuchsergebnisse führen können. In der Realität freilich kommt es in vielen Fällen zu weitaus extremeren Temperaturbedingungen, und es ist möglich, falls erforderlich, nahe dem Nullpunkt zu betonieren. Es sei aber darauf hingewiesen, dass im Sommer bei intensiver Sonneneinstrahlung durch Abschattung oder andere geeignete Kühlmaßnahmen zur Reduktion von Zwangsspannungen und den daraus resultierenden Rissen die Betontemperatur unter 25°C abgesenkt werden muss [Spr07] und im Winter besondere zusätzliche Maßnahmen, wie Erwärmen des Anmachwassers oder des Zuschlags, erforderlich sind, um ein ordnungsgemäßes Abbinden zu gewährleisten.

3.3 Beschreibung ausgewählter Messverfahren

In der Literatur wird eine große Anzahl an Messmethoden beschrieben, mit deren Hilfe die Auswirkungen verschiedenster Nachbehandlungsarten auf ihre Wirksamkeit beurteilt werden können. Da es nur sehr schwer möglich ist, den Hydratationsgrad an sich zu bestimmen, behilft man sich mit der Untersuchung von Betoneigenschaften, die indirekt über den Verlauf des Erhärtungsvorgangs Auskunft geben. In Tabelle 1 gibt Kern [Ker98] einen Überblick über

verschiedenste Möglichkeiten, die Wirksamkeit von Nachbehandlungsverfahren zu prüfen, und deren Aussagekraft:

**Tabelle 1: Messmethoden zur Überprüfung der Wirksamkeit von Betonnachbehandlung
(Quelle: [Ker98])**

Meßmethode	Literatur	Bewertung der Meßmethode
Druckfestigkeitsprüfung	[30], [55], [58], [65], [68], [94], [99], [106] [91], [97],	+ -
Haftzugfestigkeitsprüfung	[3], [91] [20], [68]	+ -
Prüfung der Oberflächenhärte		
- Rückprallhammer (Schmidt)	[20], [58] [39], [91]	- +
- Pendelhammer	[39]	+
- Nadelversuch (Rockwell)	[58]	-
- Kratzversuch	[20]	-
- Verschleiß/Abtrag	[58]	-
Messung des E - Moduls	[29], [94]	+
Messung des Hydratationsgrades/ der Hydratation	[41], [49], [56], [94]	+
Messung der Wasseraufnahme	[106]	+
- Eindringvermögen (Karsten)	[20], [58],	+
- Kapillares Saugvermögen	[42], [91], [97]	+
- Sättigungsgrad	[56]	+
Messung der Wasserabgabe/ des Wassergehalts	[68], [56], [94], [96], [100], [101], [106], [142]	+
Messung des Gewichtsverlustes	[55]	+
Messung der Porosität		
- Quecksilberdruckporosimetrie	[29], [46], [56], [58], [141]	+
Messung der Karbonatisierungstiefe	[20], [29], [49], [55], [58], [68], [91], [99], [106], [122]	+
Messung der Permeabilität	[29], [30], [36], [39], [40], [58], [91], [126], [142], [148]	+
Frost - Tausalz - Widerstand	[91]	+
- Abwitterung	[55], [56]	+
- Gewichtsverlust	[49]	+
Messung der Betontemperatur	[69]	+
Chlorideindringungsprüfung	[91]	+

Aus dieser Fülle an Möglichkeiten werden jene in den folgenden Unterkapiteln näher betrachtet, die auf Grund der zu erwartenden Aussagekraft der Ergebnisse im Vergleich zum nötigen Aufwand für die Fragestellung relevant erscheinen.

3.3.1 Festigkeitsmessung

Die Festigkeit ist allgemein die wesentliche Eigenschaft zu Beurteilung und Einordnung der Qualität von Beton. Maßgebend für Berechnungen des Statikers und somit für die spätere Verwendung ist die nach Norm geprüfte 28-Tage-Festigkeit.

Für die gegenständliche Untersuchung müssen aber im Vergleich zur normgemäßen Messungen einige Unterschiede berücksichtigt werden. Wesentlich ist, dass nicht der jeweils absolute Wert entscheidend ist, sondern seine Relation zu den anderen Ergebnissen. Da auch eigene Referenzproben mit geprüft werden, ist ein unmittelbarer Vergleich mit anderen Versuchsreihen nicht erforderlich, zumal dies aufgrund unterschiedlicher Betonrezepturen und Klimaverhältnisse ohnehin ein schwieriges Unterfangen wäre. Der Effekt der Nachbehandlung ist, wie in Unterkapitel 2.2.4 bereits beschrieben, nur auf einen etwa 2 cm tiefen Randbereich beschränkt. Es gilt also eine Probengröße zu wählen, bei der dieser Bereich einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Andererseits ist aus Probenherstellungsgründen, und um keine zu großen Verfälschungen aus der Inhomogenität des Materials durch die Zuschlagskörnung zu erhalten, eine Probenabmessung nur von der Größe des relevanten Randbereichs nicht möglich. In [Bun06] wird nach 28 Tagen eine Erhöhung der Würfeldruckfestigkeit von circa 8% bei Nachbehandlung gegenüber nicht nachbehandelten Proben beschrieben. In derselben Arbeit ist angeführt, dass durch Auftrag von Nachbehandlungsmitteln bei Biegezugprüfungen um bis zu 20% erhöhte Festigkeitswerte zu erwarten sind. Diese Werte können durch wasserzuführende Maßnahmen noch erhöht werden, vermutlich weil dann der erforderliche Feuchtegrad für vollständige Hydratation bis zur Oberfläche gegeben ist und die dort im Vergleich zu wasserhaltenden Maßnahmen erhöhten Feuchten in das Ergebnis der Festigkeit mit einfließen (vgl. Abbildung 7).

Bei allen Festigkeitsprüfungen ist auf eine ausreichend große Probenanzahl zu achten, da es wegen der nie ganz gleichmäßigen Verteilung des Zuschlags zu einer bedeutenden Streuung der Ergebnisse kommt. Außerdem sind mit flüssigen Nachbehandlungsmitteln bearbeitete Proben vor der Prüfung bis zu einer Tiefe

von etwa 1 mm abzuschleifen, um durch Rückstände der Nachbehandlung verfälschte Ergebnisse zu vermeiden.

Alternativ zur zerstörenden Festigkeitsermittlung wäre die Messung mit dem Rückprallhammer nach Schmidt möglich. Gerade für die Fragestellung der gegenständlichen Untersuchung wäre eine solche Art der Messung überlegenswert, da aufgrund der handlichen Gerätschaft auch durch eine Vergleichsmessung auf der Baustelle schnell die Wirksamkeit des angewandten Nachbehandlungsverfahrens nachgewiesen werden könnte. Nach [Bun06] wäre hier je nach Nachbehandlungsart eine Schwankungsbreite von fünf Skalenwerten zu erwarten¹. Leider ist der Vergleich zwischen der Bestimmung an den relativ kleinen Proben im Labor mit der am tatsächlichen Bauwerk nur mit Schwierigkeiten möglich. Zum einen müsste wie bei den bereits erwähnten Verfahren auch hier die Oberfläche von jeglichem Fremdmaterial, also von einem Nachbehandlungsmittel, gründlich gereinigt werden, um unverfälschte Ergebnisse zu erhalten. Zum anderen müsste im Labor der Versuchskörper so festgehalten werden, dass sein Gesamtverhalten bei Beanspruchung durch den Rückprallhammer dem des fertigen Bauteils entspricht.

3.3.2 Oberflächeneigenschaften

Neben der Festigkeit ist die Oberflächenhärte eine wesentliche Eigenschaft zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit eines Materials. Gerade bei Betonstraßen gilt es, den Verschleiß durch mechanische Beanspruchung möglichst gering zu halten, um unwirtschaftliche Dimensionierungen oder oftmalige Instandsetzungsarbeiten zu vermeiden. Mit der großen Bedeutung der äußersten Schicht, da ja genau hier die größten Beanspruchungen auftreten, erklärt sich der enorme Vorteil von Betonnachbehandlung in diesem Ingenieurteilgebiet.

¹ Es handelt sich hier um Skalenwerte, die ein Maß für die Rückprallenergie darstellen und mit geeigneten Tabellen auf die Festigkeit rückschließen lassen.

Es sind verschiedenste Methoden der Oberflächenhärtemessung bekannt, beispielsweise sind die Härteprüfung nach Mohs und die Eindringversuche nach Rockwell, Brinell oder Vickers zu nennen.

Zusätzlich könnte auch der Polierwiderstand der Oberfläche mit einem Pendelgerät ermittelt werden, um die Qualität zu überprüfen.

3.3.3 Wasserverlust und Sperrkoeffizient

Der Wasserverlust und damit verbunden der Richtwert des Sperrkoeffizienten ist wohl das meistverwendete Kriterium bei der Bestimmung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln. Dies ist daraus erkennbar, dass die „Technischen Lieferbedingungen für flüssige Nachbehandlungsmittel“ [For92] vor allem bei der Ermittlung der Sperrwirkung und Verdunstung sehr präzise Anforderungen stellen. So wird ein Sperrkoeffizient S gefordert, der bei 30°C, einer relativen Luftfeuchte von 40% und einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s 75% nicht unterschreitet. Dabei ist S das Mittel der Werte S_1 , S_3 und S_7 , die mit folgender Formel jeweils nach $n = 1, 3, 7$ Tagen bestimmt werden:

$$S_n = \frac{W_{un} - W_{bn}}{W_{un}} \times 100 = \left(1 - \frac{W_{bn}}{W_{un}}\right) \times 100(\%)$$

Hierbei stehen W_{un} und W_{bn} für den mittleren Wasserverlust von je drei unbehandelten und drei nachbehandelten Proben.

Ein weiterer Grenzwert findet sich in der ASTM-Richtlinie C 309 – 07 [AST07]. Hier wird bei Anwendung flüssiger Nachbehandlungsmittel ein Gesamtwasserverlust von maximal 0,55 kg/m² nach 72 Stunden verlangt.

Entscheidend ist bei der Beurteilung des Wasserverlusts der Auftragszeitpunkt der Substanz: Wird das Mittel zu früh aufgetragen, zerfließt es im oberflächlichen Zementleim, verdünnt sich und kann so schließlich keinen geschlossenen Film zur Sperrwirkung ausbilden, andererseits kann bei einem zu späten Auftrag die oberste Schicht bereits ausgetrocknet sein und die Sperre verhindert die Aufnahme von Feuchte aus der Umgebungsluft, was die Lage nur noch

verschlimmert. Nach den Richtlinien [AST07] und [For92] liegt der ideale Zeitpunkt zum Aufbringen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels, soweit vom Hersteller nicht anders angegeben, beim Erreichen der Mattfeuchte der Betonoberfläche vor.

Laut Literatur [Bun06] sind bei der Bestimmung der Sperrwirkung bei den verschiedenen Nachbehandlungsarten signifikant unterschiedliche Werte zwischen 35% und 90% zu erwarten. Da mit der Darstellung des Verlaufs des Wasserverlusts eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Wirksamkeit der Maßnahmen getroffen werden kann, ist diese Messung für die Beantwortung der Fragestellung nahezu unentbehrlich.

3.3.4 Wasseraufnahme nach Karsten

Bei der Wassereindringprüfung nach Karsten werden auf die Oberfläche des Betons Glasröhrchen mittels Klebmasse aufgebracht, Wasser eingefüllt und an einer Skala die Wasseraufnahme über die Zeit gemessen. Die Geschwindigkeit der Aufnahme gibt Aufschluss über die Qualität der Oberfläche und den Kapillarwassergehalt während der Verfestigungsphase. Damit erfolgt wieder ein indirekter Nachweis über den erzielten Hydratationsgrad, also den Erfolg der Nachbehandlung. Wie bei vielen anderen Versuchsmethoden ist ein Abschleifen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln erforderlich, um eine Wasseraufnahme nicht durch die Sperrwirkung zu verhindern und so eine repräsentative Messung unmöglich zu machen.

Grübl und Kern [Grü97] messen die Wasseraufnahme über einen Zeitraum von 20 Minuten, wobei alle 2,5 Minuten ein Messwert aufgezeichnet wird, und stellen fest, dass die Ergebnisse der Wasseraufnahme nach Karsten tendenziell jenen entsprechen, die durch Messung des Kapillarwassergehalts und der Hydratation im oberflächennahen Bereich ermittelt wurden.

3.3.5 Porosität

Wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften von Beton hat die Anzahl und Art von Luftporen. Größe und Verteilung der Poren haben verschiedenen Ursprung und zeigen auch unterschiedliche Wirkungen.

Generell stellen Luftporen im Betongefüge Hohlräume dar, die auf die Festigkeitseigenschaften negative Auswirkungen haben. Im Gegensatz zu einem ideal porenfreien Gemisch müssen Kräfte um die Luftporen herum geführt werden und der wirksame Querschnitt wird verkleinert. Außerdem erhöht eine größere Porosität die Gefahr des Eindringens von schädigenden flüssigen oder gasförmigen Substanzen. Besonders in Stahlbeton können Chloride sehr schnell zur Korrosion und somit zur Beschädigung oder sogar Zerstörung der Bewehrung führen. Bezogen auf die Dauerhaftigkeit können bei besonderen Ansprüchen Luftporen sehr wohl gewünscht sein und durch Zugabe von sogenannten Luftporenbildnern gezielt erzeugt werden. Im Gegensatz zu den saugenden Kapillarporen, die das Eindringen und Weiterleiten von Wasser fördern, werden hier aber Kugelporen erzeugt, die das Kapillarsystem unterbrechen und darüber hinaus eine Entlastung des Kristallisationsdrucks von Tausalzen oder gefrierendem Wasser schaffen [Bac04]. Luftporenbildner werden dem Beton besonders dann zugemischt, wenn hohe Anforderungen an die Frost-Tauwechsel Beständigkeit des Betons gestellt werden.

Wie Kern in seiner Dissertation [Ker98] zeigt, kann über die Bestimmung der Porenradienverteilung auf die Güte des Betons rückgeschlossen werden: Liegt der w/z -Wert zu hoch, wird nicht das gesamte verfügbare Wasser gebunden und nach dem Austrocknen des Betons verbleiben dort, wo sich das überschüssige Wasser angesammelt hat, relativ grobe Kapillarporen.

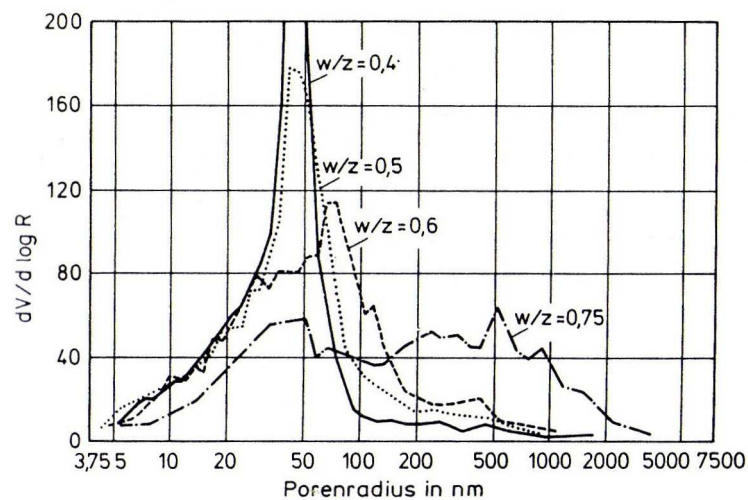


Abbildung 9: Abhängigkeit der Porenradienverteilung vom w/z -Wert (Quelle: [Ker98])

Nach [Hof01] wird der mittlere Porenradius nicht von den Nachbehandlungsparametern, sondern nur von der Temperatur beeinflusst. Besonders die Unabhängigkeit von der Nachbehandlungsart gilt es bei den aktuellen Versuchen zu bestätigen.

3.3.6 Messung der Temperatur und Thermographie

Mit der Messung der Temperatur in den einzelnen Proben wird die beim exothermen Vorgang der Hydratation entstehende Wärme als Bewertungskriterium herangezogen. Auch hier stellt sich das Problem der geringen Wirkungstiefe von Nachbehandlungsmitteln. Nur im obersten Bereich sind zwischen den verschiedenen Nachbehandlungsmitteln merkliche Unterschiede zu erwarten, während in den tieferen Bereichen chemische Vorgänge aufgrund des über lange Zeit durch Verdunstung nicht wesentlich geminderten Wasserangebots weitgehend ähnlich ablaufen. Die Temperaturentwicklung in den Randbereichen wird durch die Verdunstung von Bestandteilen des noch feuchten Nachbehandlungsmittels aber auch des überschüssigen Anmachwassers beeinflusst. Es müssen daher die Wärmeverluste durch diese zwei Einflussfaktoren entkoppelt werden, um eine genaue Aussage über die einzelnen Teilprozesse machen zu können.

Bisher in der Literatur noch nicht erwähnt wird der Einsatz von Thermographie zum Nachweis der Wirksamkeit von flüssigen Nachbehandlungsmitteln, speziell, ob diese Methode zu einer schnellen Beurteilung herangezogen werden kann. Der Verfasser erhofft sich über das Bild des Verdunstungswärmeverlustes frühzeitige Hinweise auf die Gleichmäßigkeit des frisch aufgetragenen Nachbehandlungsmittels, weiters könnte die Wärmeverteilung an der Probenoberfläche Auskunft über die Sperrwirkung der Nachbehandlung geben und für zukünftige Entwicklungen als Schnelltest einsetzbar sein.

3.3.7 Beurteilung der Verarbeitbarkeit und Augenschein

Unter diesem Titel werden all jene Beurteilungskriterien behandelt, die entweder nur durch Augenschein zu erkennen sind, oder aufgrund der Verarbeitbarkeit zu berücksichtigen sind. Hierbei liegt es am Prüfer, ein größtmögliches Maß an Objektivität walten zu lassen, aber leider können ungewollte Ungenauigkeiten bei diesen Beurteilungsverfahren nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Zum Teil sind solche subjektiven Anforderungen auch in verschiedenen Richtlinien als schwammige Bestimmungen zu finden. So wird in den Technischen Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel [For92] vom Sperrfilm bei Normlagerung gefordert „nach 5 Std. klebfrei trocken“ zu sein. Im ASTM Dokument [AST07] wird die erforderliche Trockenzeit gar mit „dry to touch“ also bei Berührung trocken in maximal vier Stunden angegeben.

Neben der Trocknungsgeschwindigkeit sind einige weitere Eigenschaften zur Beurteilung der Anwendbarkeit entscheidend. Der Auftrag, falls vom Hersteller nicht anders angegeben, die Versprühbarkeit, muss unter normalen Bedingungen gut möglich sein. Weiters soll sich ein gleichmäßiger, rissfreier Film an der Oberfläche bilden, um eine gute Sperrwirkung zu gewährleisten. Über die Farbe des Nachbehandlungsmittels kann in den meisten Fällen schon auf die Gefahr der zusätzlichen Erhitzung durch Sonneneinstrahlung abgeschätzt werden. Abschließend sollte noch überprüft werden, ob, in welcher Weise und mit welchem Arbeitsaufwand die Rückstände des Nachbehandlungsmittels wieder entfernt werden können.

4 Versuchsaufbau und -durchführung

In diesem Kapitel wird der Versuchsablauf erklärt und die Ausführung der einzelnen Messungen dargestellt. Die Auswahl der Messmethoden erfolgte nach den Erkenntnissen der in Kapitel 3 behandelten Grundlagenforschung und Literaturrecherche in Abstimmung mit den vor Ort verfügbaren technischen Hilfsmitteln. Es wurde bewusst eine relativ große Breite an Versuchen durchgeführt, um eine gute Gesamtbeurteilung über die verschiedenen Wirkungsmechanismen der Nachbehandlungsmittel abgeben zu können. Ein weiteres Ziel lag in der Darstellung der Vergleichbarkeit der verschiedenen und Aussagekraft jeder einzelnen Nachweismethode über die Wirksamkeit der verschiedenen Paraffindispersionen.

4.1 Herstellung der Versuchskörper

Die Vielfalt der Prüfmethode stellt aufgrund der verschiedenen Prüfnormen und Richtlinien unterschiedliche Anforderungen an die Geometrie der Probekörper und die Betonrezeptur. Dies ist für die gegenständliche Arbeit nicht erfüllbar, da sie eine unangemessen große Anzahl an Probekörpern zu Folge hätte. Außerdem würde, was nicht außer Acht gelassen werden kann, bei Variation der Betonrezeptur (wie in der vorherigen Kapiteln mehrfach beschrieben) die Vergleichbarkeit der einzelnen Nachweismethoden verfälscht und somit nicht haltbar sein.

An dieser Stelle ist es wesentlich, an die Hauptfragestellung dieser Arbeit zu erinnern, nämlich die bereitgestellten Substanzen untereinander zu vergleichen. Es ist daher nicht unbedingt notwendig, in allen Fällen normgerecht ermittelte Absolutwerte zum Vergleich mit anderen Arbeiten zu erhalten, so wünschenswert dieser Gedanke auf dem ersten Blick auch erscheint. Die Probekörperherstellung erfolgte demnach nach versuchspraktischen Gesichtspunkten in Anlehnung an die in der allgemeinen Baupraxis angewendeten Methoden.

Die Betonprobekörper

Als Schalkkörper für die Betonprobenherstellung wurden handelsübliche Aluminiumtassen verwendet, die mit ihren Abmessungen 30 cm x 20 cm x 4 cm ausgezeichnet für diesen Zweck geeignet waren. Bei einer Tiefe von 4 cm kann davon ausgegangen werden, dass bei den Messergebnissen der verschiedenen Tests die Einflüsse der Nachbehandlung trotz der geringen Einwirkungstiefe maßgeblich eingehen. Aufgrund der im Vergleich zur Tiefe großen Längen- und Breitenausdehnung kann, abgesehen vom Randbereich, vereinfachend von eindimensionalen Abläufen vergleichbar einer wirklichen Betonstraße ausgegangen werden. Eingeschränkt war die Größe der Proben vor allem durch die räumliche Begrenzung bei der Lagerung im Klimaschrank und die schlechte Handhabbarkeit großer Proben durch die große Wichte von Beton.

Die Alutassen wurden schließlich vor dem Befüllen mit einer PE-Folie ausgekleidet, um eine Reaktion des Betons mit dem Aluminium zu verhindern und zur schonenderen Behandlung bei Manipulation einzeln auf stabilen Holzplatten platziert.

Die verwendete Betonzusammensetzung basierte ursprünglich auf einer im Straßenbeton üblichen Standardrezeptur (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Beispiel einer Standardrezeptur für Betonstraßen in Österreich¹

Größtkorn der Gesteinskörnungen	mm	11
Zement CEM II/A-S 42,5 N (DZ)	kg/m ³	450
Bindemittel (anrechenbarer Gehalt)	kg/m ³	450
Zusatzmittel FM VP3	kg/m ³	2,2
Zusatzmittel LP NVX	kg/m ³	1
Wassergehalt des Betons	kg/m ³	180
Gesteinskörnung 0/2 (trocken)		460
Gesteinskörnung 4/8 (trocken)		820
Gesteinskörnung 8/11 (trocken)		430
Gesteinskörnung trocken gesamt	kg/m ³	1710
Betoneinbautemperatur	°C	26,1
Lufttemperatur	°C	21,4
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2385
W/B - Wert		0,4

Wegen der geringen Abmessung der Proben und Problemen mit der Konsistenz bei der manuellen Herstellung der Betonkörper mussten einige Abänderungen bei der Gesteinskörnung und dem w/b-Wert vorgenommen werden. Nur die Anwendung von spezialisierten Geräten macht auf der Baustelle ein Arbeiten mit oben genannter Rezeptur möglich. Nach einigen Vorversuchen wurde folgende Betonzusammensetzung für den weiteren Versuchsablauf festgelegt²:

- 8.100 g Zement CEM II/A-S 42,5 N;
- 31.500 g Sand (feucht) 0 – 8 mm;
- 3.000 g Wasser;
- 40 g Fließmittel und
- 18 g Luftporenbildner.

¹ Diese Standardrezeptur stammt aus einem Gespräch mit einem Betontechnologen einer führenden Baufirma Österreichs.

² Die angegebenen Mengen beziehen sich auf die Betonmenge für acht Proben (ca. 42,5 kg Gesamtgewicht). Diese Menge resultiert aus der Tatsache, dass im weiteren Versuchsablauf aus Platzgründen maximal acht Proben gleichzeitig im Klimaschrank gelagert werden konnten.

Die Mischung wurde mit einem handelsüblichen Freifallmischer hergestellt, wobei das Fließmittel gleich zu Beginn dem Anmachwasser zugegeben wurde, der Luftporenbildner jedoch erst gegen Ende des Arbeitsvorgangs eingemischt wurde. Im Anschluss wurde der frische Beton umgehend möglichst gleichmäßig auf acht Schalformen aufgeteilt, mittels Kelle zweilagig eingebracht und verdichtet. Abschließend wurde, ebenfalls mit einer Maurerkelle, glattgezogen um eine möglichst ebene Oberfläche zu erhalten.

Nach Einsetzen der Mattfeuchte bei Lagerung unter Raumtemperatur wurde mit einem feuchten Jutetuch durch Abziehen die Textur aufgebracht und danach die erneute Mattfeuchte zum Auftrag des Nachbehandlungsmittels abgewartet.

Anwendung der Nachbehandlungsmethoden

Neben den zehn verschiedenen flüssigen Nachbehandlungsmitteln auf Paraffinbasis wurden Proben zu Vergleichszwecken hergestellt. Pro Serie wurden zwei Proben mit Folie abgedeckt, eine über die Dauer von 72 Stunden, die andere über 28 Tage. Zusätzlich wurde jeweils eine Referenzprobe ohne Nachbehandlung belassen. Da nach [Grü97] die Nachbehandlung mit Folie etwa gleich wirksam wie eine wasserzuführende Maßnahme ist, sollten durch diese Proben die Wirkungsgrenzen repräsentiert werden (vgl. Abbildung 3).

Die Nachbehandlungsmittel wurden mit einer handelsüblichen Obertopfsprühpistole (Düsenöffnung 2 mm) unter Druckluft von circa 2 bar auf den grünen Beton¹ aufgebracht. Die Entfernung zwischen Düsenöffnung und Oberfläche betrug etwa 40 cm, um den Beton nicht unnötiger Belastung auszusetzen. Die Zielauftragsmenge von 25 g pro Probe errechnet sich aus dem vom Hersteller angegebenen Sollwert von 350 ml/m². Dieser Wert konnte mit einer Genauigkeit von +/-2 g durch Wägung nachgewiesen werden. Um eine Vermischung der Testsubstanzen und somit Messungenauigkeiten zu verhindern,

¹ Als „grüner Beton“ wird der fertig eingebaute Beton unmittelbar nach dem Verdichten aber vor dem Erstarren bezeichnet. Aufgrund der einfacheren Verständlichkeit wird dieser Begriff in dieser Arbeit durch „Frischbeton“ ersetzt.

wurde nach jedem Auftrag die gesamte Gerätschaft gründlich mit heißem Wasser gereinigt.

4.2 Probekörperlagerung

Die Probekörperlagerung erfolgte die ersten 72 Stunden unter speziellen Bedingungen in einem Klimaschrank. Der Zeitraum von 72 Stunden für die spezifische Klimalagerung und den Zeitraum für die meisten Messabläufe wurde gewählt, weil laut [Bun06] in diesem Zeitraum bei unbehandelten Proben der größte Anteil des Wassers durch Verdunstung verloren geht (siehe Abbildung 10). Die Verdunstung erfolgt in den ersten Stunden derart schnell, weil der junge Beton noch wenig dicht ist [Bet07]. Bei der Klimalagerung wurden drei verschiedene Umgebungsbedingungen simuliert, wobei die relative Luftfeuchte über jede Temperatur konstant gehalten wurde, um die Probenanzahl nicht zu groß werden zu lassen. Die tatsächlich möglichen Werte für die Kombination aus Feuchte und Temperatur waren schließlich vom Leistungsvermögen des Klimaschranks abhängig. Es wurde aber ein ausreichend trockenes Klima beachtet, das ohne Nachbehandlung schnell zur Austrocknung der Randbereiche führen würde, um so signifikante Messergebnisse zu erhalten.

Der erste Versuchsdurchgang erfolgte in einem eigens angefertigten Ofen bei 30°C. Die Proben wurden auf einem Holzregal so platziert, dass sie nur einem sehr geringen Luftstrom des Heizungsgeräts ausgesetzt waren. Absolute Windstille war nicht möglich, da sonst eine gleichmäßige Temperatur- und Feuchteverteilung über den Probenraum nicht gesichert gewesen wäre. Bei diesem ersten Versuchsdurchgang wurde die relative Luftfeuchte nicht durch Zwang auf einem bestimmten Level gehalten, sondern es stellte sich die natürliche Feuchte durch die Umgebungsluft ein.

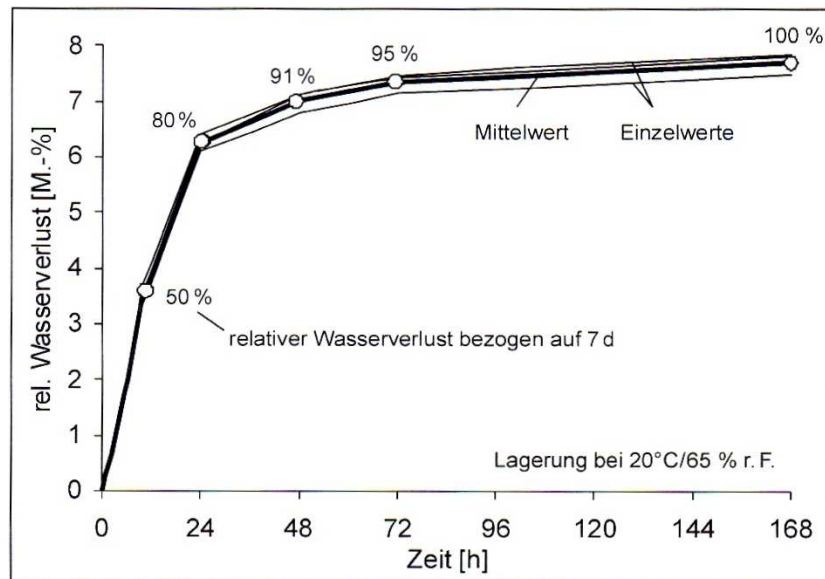


Abbildung 10: relativer Wasserverlust bezogen auf den Gesamtverlust in 7 Tagen (Quelle: [Bun06])

Beim zweiten und dritten Versuchsdurchgang sollten die Proben einmal 10°C bei 40% relativer Feuchte und das andere mal 30°C bei 40-prozentiger relativer Luftfeuchte ausgesetzt werden. Beide Male wurde der Luftstrom des Klimaschranks mit zusätzlich eingebauten Ventilatoren zur Windsimulation auf etwa 2,5 m/s erhöht. Während die Erzeugung des trocken-warmen Klimas ohne Probleme verlief, stieß die Leistung des Klimaschranks bei der kühlen Lagerung an ihre Grenzen. Aus diesem Grund mussten diese Umgebungsbedingungen nach dem ersten Versuch auf 12°C/60% r.F. abgeändert werden¹.

¹ Die Bezeichnung dieses Versuchsklimas erfolgt weiterhin mit „10°C und Wind“.



Abbildung 11: Lagerung der Proben im Klimaschrank (links) und bei Standardbedingungen (rechts)

Nach den ersten 72 Stunden, in denen der größte Anteil der Verfestigung des Betons und der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln verläuft, wurden die Proben schließlich bis zur Prüfung der 28-Tage-Festigkeit bei Standardraumtemperatur gelagert (Abbildung 11).

4.3 Ausgeführte Bewertungsverfahren

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der Versuche, wie sie durchgeführt wurden. Aus den in der Literatur beschriebenen wurden jene ausgewählt, die geeignet erschienen und mit angemessenem Aufwand umsetzbar waren. In Anlehnung an diese Vorlagen wurden leicht abgeänderte Versuche entwickelt, die zu einem Gesamtablauf zusammengefasst wurden.

4.3.1 Beurteilung nach Augenschein

Während der gesamten Versuchsdurchführung wurden die Proben optisch auf Mängel kritisch betrachtet, die mit den anderen Prüfmethoden möglicherweise nicht nachgewiesen werden können. Besonders zu Beginn der Lagerung wurde die Homogenität, Farbe und Trocknungsgeschwindigkeit ständig kontrolliert. Ein klarer Hinweis auf eine Nichteignung der Substanz wären eine unzureichend geschlossene Filmbildung oder gar Risse im Verlauf des Trocknungsvorgangs gewesen. Besonders geachtet wurde darauf, ob die von verschiedenen Richtlinien geforderte klebefreie Oberflächentrockenheit nach vier Stunden erreicht wird.

Um zu einem späteren Zeitpunkt noch Vergleiche zwischen den verschiedenen Oberflächenerscheinungsbildern machen zu können, wurde bei jeder Probe neben schriftlicher Dokumentation der Auffälligkeiten auch das Erscheinungsbild des Nachbehandlungsfilms mit einem Foto festgehalten.

4.3.2 Verarbeitbarkeit

In die Beurteilung der Verarbeitbarkeit flossen im Wesentlichen zwei Aspekte während des Versuchsverlaufs ein.

Beim Auftrag der Nachbehandlungsmittel wurde deren Versprühbarkeit beurteilt. Gefordert wurde ein problemloser Durchgang durch die Düsenöffnung bei einem Druck von 2 bar. Besonders wichtig war, dass es zu keiner Klumpenbildung beim Austritt kommt oder gar die Düse verstopft wird. Dies würde einerseits auf eine Entmischung der Dispersion beim Verarbeitungsvorgang hindeuten und andererseits eine maschinelle Anwendung ohne ständige Kontrolle erschweren.

Das zweite Kriterium für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit stellte die Entfernung des Nachbehandlungsmittels von der Betonoberfläche dar. Nach der 28-Tage-Lagerung wurde die Oberfläche aller Versuchskörper von Verunreinigungen und Dispersionsrückständen mit einer Drahtbürste maschinell

gereinigt.¹ Beurteilt wurde wie schnell, unter welchem Arbeitsaufwand und mit welchem Arbeitsmittelverschleiß die Reinigung möglich war. Diese Beurteilung ist auch von besonderer praktischer Bedeutung, weil die zu prüfenden Paraffindispersionen vor Verkehrsfreigabe von der Straßenoberfläche entfernt werden müssen und es durch diesen Mehrarbeitsaufwand gegenüber anderen Nachbehandlungsmitteln auch zu zusätzlichen Kosten kommt.

Da es sich bei beiden Kriterien um subjektive Beurteilungen handelt, wurden bei der Bewertung nur die Attribute Gut (+), Mittelmäßig (~) und Schlecht (-) vergeben.

4.3.3 Thermographie

Für die Oberflächenthermographie wurde eine Infrarotkamera des Typs inframetric Thermacam SC 1000 verwendet. Für die Aufnahme der Bilder wurde die Kamera auf einem Stativ in einer Höhe von einem Meter über der Probenfläche befestigt.

Von jeder Probe wurden zwei IR-Bilder gemacht: eines unmittelbar nach Auftrag des Nachbehandlungsmittels und eines nach einer Trockendauer von vier Stunden.

4.3.4 Temperaturmessung

Die Messfühler für die Temperaturmessung wurden direkt nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels auf den Probekörpern befestigt. Hierbei wurden je zwei Messfühler pro Versuchsobjekt in einem Bereich angebracht, wo aufgrund der Probenausdehnung bereits eindimensionale Vorgänge zu erwarten waren. Um möglicherweise unterschiedliche Messergebnisse zufolge Hydratationswärme und Verdunstungswärmeverlust zu erhalten, wurde ein Messfühler an der Oberfläche

¹ Da es sich laut Hersteller bei den Produkten nicht um Nachbehandlungsmittel handelte, die durch Abrieb der Fahrzeugreifen im Laufe der Zeit selbstständig abgerieben werden, musste das Entfernen in die Bewertung der Verarbeitbarkeit miteinbezogen werden.

direkt in den Nachbehandlungsfilm eingebracht und beim zweiten versucht, Messfühler auf einer Tiefe von etwa 0,5 cm im Beton zu platzieren.

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte über 72 Stunden automatisch in vorgegebenen Intervallen. Zu Beginn betragen diese noch fünf Sekunden, wurden aber wegen der unnötig großen Datenmenge ohne relevanten Genauigkeitsverlust der Ergebnisse auf 20 Sekunden vergrößert.

4.3.5 Wasserverlust

Der Wasserverlust der Proben wurde über ihren Gewichtsverlust innerhalb von 72 Stunden durch regelmäßiges Wiegen bestimmt. Die erste Messung erfolgte unmittelbar nach dem Auftrag der Paraffindispersionen, weitere nach 4, 14, 24, 48 und schließlich nach 72 Stunden. Es wurden bereits vor dem Auftrag Wiegeungen durchgeführt, die dazu dienten, den Anteil für die Messung nicht relevanter Bestandteile des Versuchsaufbaus wie Messfühler und Schalung zu ermitteln. Auf diese Weise konnte für jede Probe genau das reine Betongewicht sowie die Menge des applizierten Mittels bestimmt werden.

Eine besondere Herausforderung stellten die Kabeln für die Ermittlung der Oberflächentemperatur dar. Bei einer Messgenauigkeit von Zehntelgramm bringt eine ständige Verbindung bei der Wiegung zu große Unsicherheiten mit sich. Deshalb wurden Steckverbindungen eingebaut, die bei den Messungen gelöst wurden, um Ungenauigkeiten zu vermeiden.

4.3.6 Biegezugfestigkeit

Für die Messung der Biegezugfestigkeit war eine Reihe von Vorbereitungsmaßnahmen notwendig. Nach der dreitägigen Erhärtung unter den speziellen Klimabedingungen wurden die Probekörper aus der Schalung entnommen und bis zum 28. Tag nach der Betonherstellung unter Normklima gelagert. Danach wurden die Folien entfernt, die bis zu diesem Zeitpunkt auf den ursprünglichen Schalfflächen belassen wurden, um auch weiterhin ein zusätzliches Austrocknen über die Seiten- und Bodenflächen zu verhindern. Anschließend

wurden die Probenoberflächen mit einer Drahtbürste abgeschliffen, um die Nachbehandlungsmittel zu entfernen. Da für die Biegezugmessung die bisherige Form der Probekörper nicht geeignet war, wurden aus jeder Probe drei Quader (20 x 5 x 4cm) zur Bestimmung der Festigkeit geschnitten. Dies erfolgte mit einer Steinsäge im Trockenschnittverfahren, um ein nachheriges Trocknen der Proben wie beim Nassschnitt zu vermeiden. Bei der Herstellung der Prüfquader ist zu bemerken, dass die Höhe nicht bei allen Prüfquadern exakt 4 cm betrug. Die Ungenauigkeiten resultieren aus der leicht unterschiedlichen Befüllung der Schalkkörper.

Schließlich wurde mit einer Prüfmaschine die Bruchlast im Dreipunkt-Biegezugversuch ermittelt und daraus mit der Formel (ÖNORM B 3303)

$$\beta_{BZ} = (150 \times F) \div (b \times h^2)$$

β_{BZ} = Biegezugfestigkeit in N/mm²

F = Bruchlast in N

b = Breite des Balkens im Bruchquerschnitt der Zugzone in mm

h = Mittlere Höhe des Balkens im Bruchquerschnitt in mm

die Biegezugfestigkeit ermittelt¹. In die Berechnung gehen die Abmessungen der Probekörper an der Bruchfläche ein, die nach jedem Versuch an den Probenreststücken ermittelt wurden. Dadurch wurde die unterschiedliche Probendicke bei der Messwertermittlung berücksichtigt. Mögliche Fehlerquellen bei dieser Prüfmethode werden in [Ike94] angegeben.

¹ Für den Versuch wurde eine Standprüfmaschine der Firma Zwick vom Typ Z250 unter Verwendung der herstellereigenen Prüfsoftware verwendet.

4.3.7 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie¹ wurde zur Überprüfung der Ergebnisse der anderen Prüfungen herangezogen. Da der Zeit- und Kostenaufwand für diese Messung relativ groß ist, war es nicht möglich, alle Prüfkörper dieser Untersuchung zu unterziehen. Aus diesem Grund wurden auf Basis der Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen Proben aus 6 auffälligen Versuchskörpern entnommen.

Die Probengewinnung gestaltete sich als äußerst schwierig, da versucht werden musste, aus den gebrochenen 5 x 4 x 20 cm großen Reststücken der Biegezugprüfung mit Hammer und Meißel geeignete Stücke für die Porosimetrie zu gewinnen. Verwendet werden durften nur Bruchstücke aus dem Randbereich bis zu einer Tiefe von 2 cm von der Oberfläche. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, durften sie außerdem weder große Zuschlagskörner noch eine Randfläche aufweisen, die direkt nachbehandelt worden war.

4.4 Versuche zur Einordnung der Nachbehandlungsmittel

Wie bereits erwähnt, war zu Beginn nur die Information über die zu prüfenden Substanzen vorhanden, dass sie auf Paraffindispersionsbasis hergestellt wurden. Um die verschiedenen Nachbehandlungsmittel grob einteilen zu können, wurden zwei Tests zur Klassifikation durchgeführt. Der Verfasser erhoffte sich, eine Aussage über den Zusammenhang zwischen leicht ermittelbaren Eigenschaften der Dispersionen und ihrer Wirksamkeit zur Betonnachbehandlung treffen zu können.

¹ Die Quecksilberdruckporosimetrie stellt eine gängige Methode zur Bestimmung der Porenradienverteilung dar. Durch den Druck, der aufgewendet werden muss, um das Quecksilber in die Poren zu pressen, kann auf die Porenradien rückgeschlossen werden

Wasserverlust

In Anlehnung an die Feuchteverlustmessung der nachbehandelten Betonproben wurde der Wasserverlust des reinen Nachbehandlungsmittels über die Zeit gemessen. Es wurde ebenso eine Probenmenge von 350 ml/m² auf eine Fläche aufgesprüht, wobei diesmal auf einen nicht saugenden Untergrund geachtet wurde, um das Ergebnis nicht durch Aufnahme von Feuchte durch den Untergrund zu verfälschen. Wie die Betonproben wurden die Nachbehandlungsmittel unter vorgegebenen Klimabedingungen für 72 Stunden gelagert und regelmäßig der Gewichtsverlust ermittelt. Für eine Abschätzung der Größenordnung des Einflusses des Wasserverlustes der Nachbehandlungsmittel auf die Feuchteabgabe der Betonprobe reichte es, diesen Versuch nur unter den Bedingungen „30°C ohne Wind“ durchzuführen und die Ergebnisse dann auf die anderen Klimabedingungen umzurechnen.

Als zusätzlicher Messwert konnte der Wassergehalt der Substanzen ermittelt werden, da die Verdunstung des Nachbehandlungsfilmes im Gegensatz zu den Betonproben mit gehöriger Speicherwirkung natürlich schon nach kurzer Zeit abgeschlossen ist.

Oberflächenspannung

Die Messung der Oberflächenspannung (IFT¹) am hängenden Tropfen wurde für alle zur Verfügung gestellten Nachbehandlungsmittel durchgeführt. Für die Endwerte wurde der Mittelwert über mindestens zehn Teilmessungen je Substanz herangezogen. Die Messungen erfolgten unter normalen Raumklimaverhältnissen mit einem halbautomatischen Gerät DSA100 der Firma Krüss. Der hängende Tropfen wird von einer Kamera aufgenommen und vergrößert. Anschließend wird mittels zugehöriger Software die Tropfenform durch die Young-Laplace-Gleichung mathematisch beschrieben und auf die Oberflächenspannung der Flüssigkeit rückgerechnet.

¹ IFT ist die Abkürzung für Interfacial Tension, dem englischen Begriff für Oberflächenspannung.

Bei dieser Messung wurde besonders auf gleichbleibende Umgebungsbedingungen geachtet, da Erschütterungen oder unterschiedliche Umgebungstemperaturen die Ergebniswerte verfälschen.

4.5 Überblick über den Versuchsablauf

Die Art und Anzahl der durchzuführenden Versuche erforderten eine genaue Planung des Ablaufs. Um die erforderlichen Messungen in einer annehmbaren Zeit durchführen zu können, mussten daher schon im Vorhinein kritische Bereiche des Ablaufs ermittelt und wenn möglich entschärft werden.

Die limitierenden Faktoren bei den Experimenten waren einerseits durch Zeitvorgaben bei den Versuchen und andererseits durch die Kapazitätsgrenzen der Messeinrichtungen gegeben. Da im Klimaschrank nur acht Probekörper gleichzeitig gelagert werden konnten, wurde der gesamte Versuchsablauf auf diese Anzahl abgestimmt. Zeitliche Begrenzungen stellten die 72-Stunden-Lagerung der Proben unter den spezifischen Klimabedingungen und danach das Abwarten der 28-Tage-Festigkeit für die Biegezugversuche dar.

Unter diesen Grundvoraussetzungen ergab sich folgender zeitlicher Ablauf für jeweils acht Proben:

- Herstellen der Betonprobekörper¹;
- bei Mattfeuchte Auftrag der Nachbehandlungsmittel;
- Thermographie;
- Aufbringen der Messfühler für die Oberflächentemperaturmessung;
- Beginn der Klimalagerung;
- Thermographie und Überprüfung der Oberflächentrocknung nach 4 Stunden;
- nach 72 Stunden Ende der Klimalagerung;

¹ Ab dem Herstellen der Probekörper bis zum Ende der 72 Stunden Klimalagerung erfolgten immer wieder Gewichtsmessungen sowie optische Überprüfungen des Nachbehandlungsfilms.

- Fotodokumentation der Oberfläche;
- Ausschalen und Entfernen der bisherigen Messeinrichtungen;
- Lagerung unter Standardbedingungen bis zur 28-Tage-Festigkeit;
- Abschleifen der Betonprobenoberfläche;
- Zuschneiden der Proben für die Biegezugmessung und
- Biegezugversuch.

Die Messung der Porenradienverteilung erfolgte nach Beendigung aller Versuche an sechs ausgewählten Probekörpern. Oberflächenspannung und Wasserverlust der Paraffindispersionen wurden parallel zu den anderen Versuchen durchgeführt.

Die gleichzeitige Arbeit mit unterschiedlichen Probenreihen machte ein Beschriftungssystem der Proben zur Verwechslungsvermeidung unerlässlich. Folgende Abkürzungen werden für die weitere Abhandlung vereinfachend eingeführt:

oNB = ohne Nachbehandlungsmittel

NBF3d = Foliennachbehandlung über 3 Tage

NBF28d = Foliennachbehandlung über 28 Tage

NBM1 bis NBM10 = Nachbehandlungsmittel 1 bis 10

Für eine ständige eindeutige Identifikationsmöglichkeit erhielt jede Probe nach dem in Tabelle 3 ersichtlichen Verfahren eine numerische Bezeichnung. Diesem Code folgt bei den IR-Aufnahmen außerdem noch ein A für die Thermographie unmittelbar nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels oder ein B für die Aufnahme nach vier Stunden Lagerung.

Tabelle 3: Übersicht über die numerische Bezeichnung der Proben

	"30°C ohne Wind"			"10°C mit Wind"			"30°C mit Wind"		
oNB	001	014	027	040	053	066	079	092	105
NBF3d	002	015	028	041	054	067	080	093	106
NBF28d	003	016	029	042	055	068	081	094	107
NBM1	004	017	030	043	056	069	082	095	108
NBM2	005	018	031	044	057	070	083	096	109
NBM3	006	019	032	045	058	071	084	097	110
NBM4	007	020	033	046	059	072	085	098	111
NBM5	008	021	034	047	060	073	086	099	112
NBM6	009	022	035	048	061	074	087	100	113
NBM7	010	023	036	049	062	075	088	101	114
NBM8	011	024	037	050	063	076	089	102	115
NBM9	012	025	038	051	064	077	090	103	116
NBM10	013	026	039	052	065	078	091	104	117

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel finden sich die Ergebnisse der durchgeführten Prüfmethode. Es wird auf Auffälligkeiten und Unregelmäßigkeiten hingewiesen und diese erklärt. Die Kernaussage dieser Arbeit ist in 5.9 zu finden. Hier wird eine Gesamtbewertung der verschiedenen Nachbehandlungsmittel vorgenommen und ihre Stärken und Schwächen gegenübergestellt.

Eine detaillierte Darstellung der Messergebnisse erfolgt zwecks Übersichtlichkeit des Hauptteils erst im Anhang am Ende der Arbeit. Es sind jedoch auszugsweise Beispiele für das Verständnis des Textes unmittelbar dargestellt und Verweise auf den Anhang angegeben. Die Bezeichnung der Nachbehandlungsmittel erfolgt nach dem in Kapitel 4.5 dargestellten System.

5.1 Eigenschaften der Nachbehandlungsmittel

Aus der Messung des Wasserverlusts ergeben sich relativ genaue Informationen über die Menge der flüchtigen Bestandteile in den einzelnen Nachbehandlungsmitteln. Wie in Abbildung 12 ersichtlich lag dieser Anteil bei fast allen um die 40%, bei NBM7 leicht darüber bei 45%. Weit über diesen Werten liegt nur NBM9 mit flüchtigen Anteilen von fast 60%. Der Verlauf des Feuchteverlustes über die Zeit gibt gut Auskunft über das Trocknungsverhalten der Paraffindispersionen. Die Nachbehandlungsmittel 1, 2, 3, 4, und 6 zeigen einen sehr günstigen Verlauf, da sie sehr schnell die flüchtigen Stoffe abgeben und sich danach nicht mehr verändern. Dies erkennt man an der anfangs sehr steilen Kurve, die schon nach 4 bis 18 Stunden abflacht und in die Horizontale übergeht. NBM9 zeigt diesbezüglich ein etwas verzögertes Verhalten, was aber auch am prozentuell großen Anteil der flüchtigen Stoffe bei diesem Mittel liegen kann. Bei den restlichen Nachbehandlungsmitteln ist ein Abschluss der Verdunstungsvorgänge auch nach 72 Stunden noch nicht erkennbar.

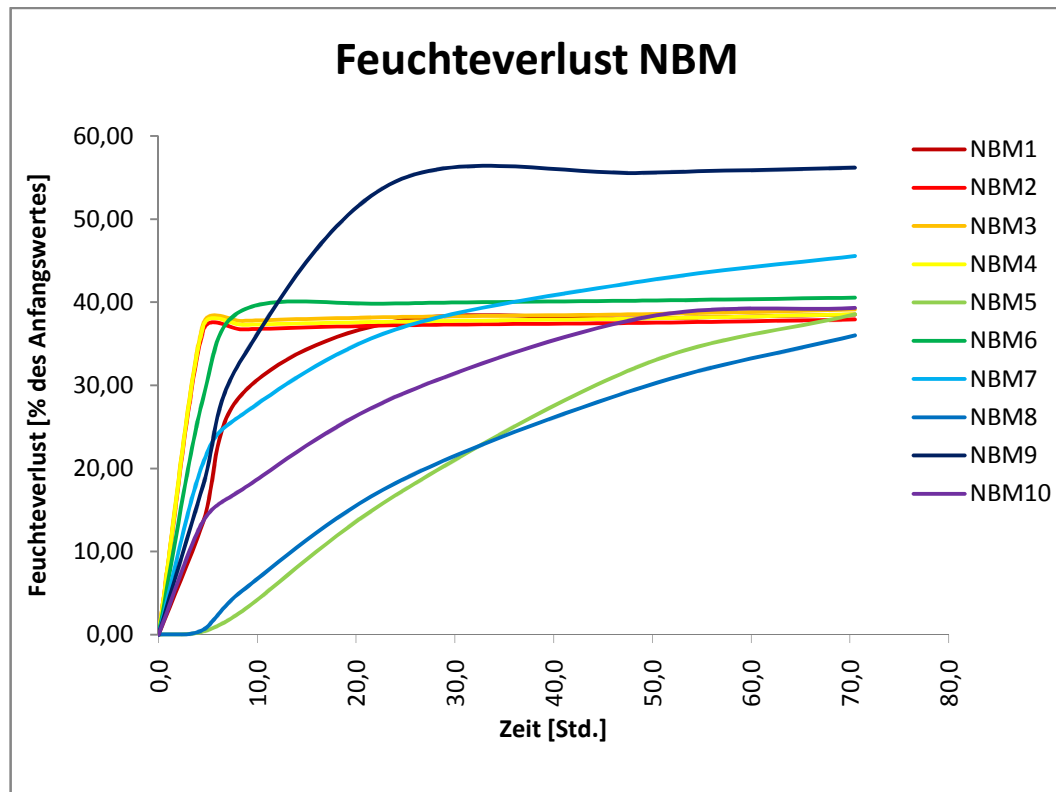


Abbildung 12: Wasserverlust der Nachbehandlungsmittel bei 30°C

Bei der Oberflächenspannungsmessung konnten Werte zwischen 16 und 68 mN/m ermittelt werden. Allerdings sind die Werte von NBM3 und NBM10 nur eingeschränkt aussagekräftig, da hier im Gegensatz zu den anderen Dispersionen eine sehr starke Streuung auftrat. Die Dickflüssigkeit der Substanz machten eine genaue Messung sehr schwierig oder durch einzelne Bestandteile, wie verhältnismäßig große Wachsbestandteile, sogar unmöglich. Betrachtet man die übrigen Nachbehandlungsmittel, so liegen sie alle in einem Bereich von 40 bis 50mN/m (Abbildung 13). Mit 69 mN/m liegt NBM7 deutlich über den Werten der anderen Substanzen.

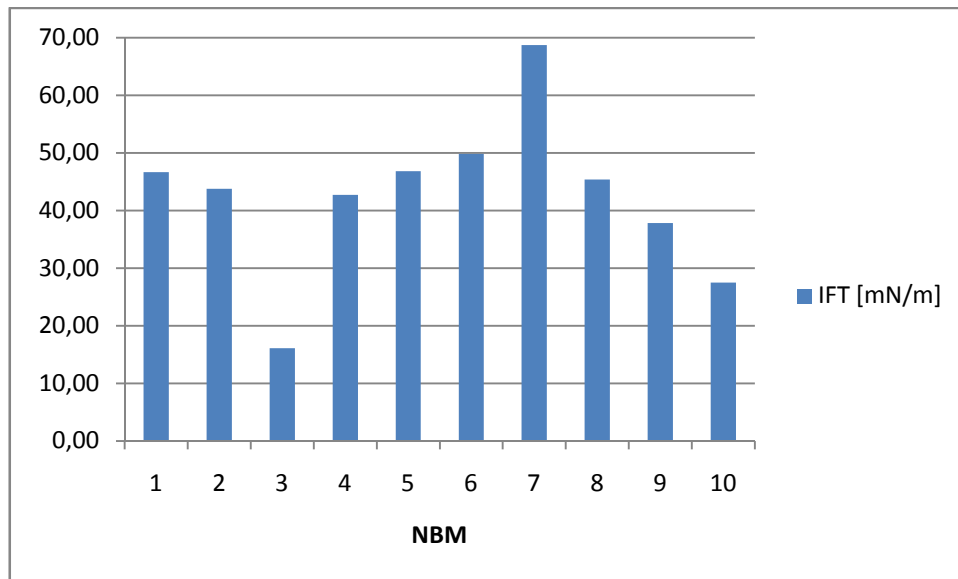


Abbildung 13: Oberflächenspannung der Nachbehandlungsmittel

5.2 Beurteilung nach Augenschein

Die Beurteilung nach Augenschein ergab eine teilweise sehr unterschiedliche Entwicklung der einzelnen Nachbehandlungsfilme im Laufe des Beobachtungszeitraumes. Beim Auftrag weisen alle getesteten Substanzen eine ähnliche Konsistenz mit nur geringfügigen Unterschieden der Viskosität auf. Auch farblich präsentierten sich alle im gleichen gelblich-weißen Bereich. Auffällig waren einerseits der im Vergleich zu den anderen Proben stark bemerkbare Geruch von NBM8 und NBM10, sowie die bläulich-weiße Färbung von NBM9 kurz nach dem Auftrag.

Schon wenige Stunden nach Beginn der Nachbehandlung zeigte sich bei allen Substanzen eine klare Verfärbung des Films. Starke Ähnlichkeiten zeigten die Nachbehandlungsmittel 1, 5, 6, und 8, bei denen sich ein weißlich-grauer wachsartig glänzender Oberflächenfilm bildete. Bei NBM4 stellte sich je nach Klimalagerung unterschiedlich stark eine ocker-beige Oberflächenfärbung ein. NBM 7 lag zwischen diesen beiden Ausprägungen. Interessanterweise konnte man bei NBM3 nach anfänglicher Weißfärbung nach einiger Zeit optisch kaum mehr Unterschiede zu der nicht behandelten Probe feststellen, während NBM10 bis zum Ende der Beobachtung sehr deutlich eine dicke, weißliche Schicht

aufwies. Besonders auffällig zeigten sich NBM9 und NBM2 (Abbildung 14)¹. Bei Ersterem waren in der sonst sehr gleichmäßigen Nachbehandlungsschicht schon nach ein bis zwei Stunden deutliche Risse zu erkennen, die mit der Zeit ein Abblättern des Nachbehandlungsfilms bewirkten. NBM2 zeigte eine sehr ausgeprägte dunkle, olivgrüne Färbung der Beschichtung in der sich auch deutlich die Absonderung einer Teilsubstanz in Form von Bläschen zeigte.

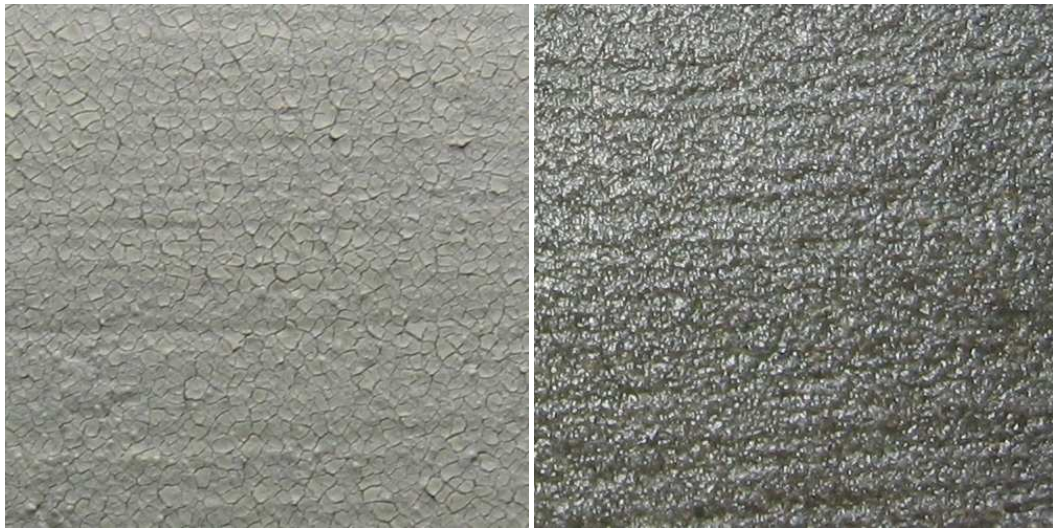


Abbildung 14: Fotos der Oberflächen von NBM9 (links) und NBM2 (rechts) nach 72 h

Die geforderte Trockenheit des Films nach vier Stunden war bei den Nachbehandlungsmitteln 1, 3 und 7 eindeutig nachweisbar. Bei NBM4 war sehr lange eine bedenklich klebrige Oberfläche vorhanden. NBM9 war schon nach ein bis zwei Stunden komplett getrocknet, während NBM2 noch nach Wochen einen deutlich feuchten Nachbehandlungsfilm aufwies. Die restlichen Testsubstanzen erreichten die Trockenheit zwischen vier und acht Stunden nach Auftrag. Es gab hier eine starke Abhängigkeit von der gleichmäßigen Verteilung, da sich an Stellen eines geringfügig dickeren Films die Trocknungszeit sehr stark verlängerte.

¹ Beispielhafte Fotos der Oberflächen aller Nachbehandlungsarten finden sich im Anhang A 1.

5.3 Subjektive Bewertungsverfahren

Bei der Verarbeitbarkeit der Nachbehandlungsmittel war nur eine subjektive Bewertung möglich. Beurteilt wurden einerseits der Auftrag des Nachbehandlungsmittels und andererseits die Entfernung mittels Drahtbürste. Die Bewertung wurde jeweils in den Kategorien Gut (+), Mittelmäßig (~) und Schlecht (-) dargestellt.

Die Verteilung der Nachbehandlungsmittel mit der Sprühpistole verlief im wesentlichen ohne größere Probleme. Lediglich bei NBM3 und NBM10 traten wegen der höheren Viskosität teilweise Probleme beim Durchgang durch die Düse auf. Die Paraffindispersion trat dann nur unregelmäßig aus der Düse aus und bei NBM10 kam es auch manchmal zu einer Verstopfung durch Ablagerungen im Sprühkopf. Die leichte Entmischung durch die schlechte Durchgängigkeit zeigte sich hier auch im Bild des frischen Nachbehandlungsfilms, wo „Kügelchen“, also festere Teilsubstanzen der Dispersion sichtbar waren. Diese Schwierigkeiten konnten mit einer geringen Erwärmung der Flüssigkeit kombiniert mit einer Erhöhung des Luftdrucks beim Auftrag verringert werden. NBM5 und NBM8 können nur mit Mittelmäßig bewertet werden, da sich bei ihnen nach einiger Zeit eine deutlich unregelmäßige Verteilung des Nachbehandlungsmittels auf der Oberfläche zeigte. Diese ist zu Beginn beim Auftrag noch nicht erkennbar, führt aber mit Fortlauf der Verdunstung zu unterschiedlichen Trocknungszeiten. Ansonsten waren alle anderen erwartungsgemäß ohne Probleme zu applizieren.

Tabelle 4: Beurteilung der Nachbehandlungsmittel beim Auftrag

	Aufsprühen	Gleichmäßigkeit	Viskosität	Gesamt
NBM1	+	~	niedrig	+
NBM2	+	+	gut	+
NBM3	-	-	sehr hoch	-
NBM4	+	+	niedrig	+
NBM5	~	~	gut	~
NBM6	+	~	sehr niedrig	+
NBM7	+	+	niedrig	+
NBM8	~	~	gut	~
NBM9	~	+	hoch	+
NBM10	-	~	sehr hoch	-

Die Entfernung der Paraffindispersionen gestaltete sich bei vielen Proben äußerst schwierig. Hauptproblempunkt war ein Verschmieren der Rückstände, wodurch die Drahtbürste mehr polierende als schleifende Wirkung hatte. Generell zeigte sich keine Auswirkung der verschiedenen Klimalagerungen auf das Abschleifverhalten. Bei einem Nebenversuch konnte festgestellt werden, dass bei einem höheren w/z-Wert die Rückstands Entfernung wesentlich leichter von Statten ging. Dies kann möglicherweise auf das Ausbluten überschüssigen Wassers zwischen Betonoberfläche und Paraffinfilm zurückzuführen sein, das bei der Erhärtung durch geringen Zementsteingehalt keine entsprechende Festigkeit entwickeln kann und somit beim Abschleifen zur erleichterten Entfernbareit führt. Bei der Betonrezeptur dieses Versuchsaufbaus zeigte sich besonders bei NBM2, NBM3 und NBM4 eine stark schmierende Wirkung und die Entfernbareit ist daher als nicht zufriedenstellend zu bewerten. Am besten funktionierte das Abschleifen bei den Nachbehandlungsmitteln 1, 7 und 10. NBM9 stellte wieder einen Extremfall dar, da hier der Film schon mit bloßer Hand zu entfernen war oder teilweise sogar selbstständig abfiel. Das Ergebnis konnte wegen der starken Porosität der Oberfläche trotzdem nicht als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Tabelle 5: Bewertung des Abschleifverhaltens der Nachbehandlungsmittel

	Schleifen			Gesamt
	30°C o. W.	10°C + W.	30°C + W.	
NBM1	+	+	+	+
NBM2	-	~	-	-
NBM3	+	-	-	-
NBM4	-	-	~	-
NBM5	~	~	~	~
NBM6	~	~	~	~
NBM7	~	+	+	+
NBM8	~	~	~	~
NBM9	+	+	+	+
NBM10	~	+	+	+

5.4 Thermographie

Die Auswertung der IR-Bilder zum Zeitpunkt unmittelbar nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels ergibt über alle Proben eine ausgezeichnete Verteilung der Paraffindispersionen über die gesamte Auftragsfläche. Selbst bei Beschränkung des Darstellungsspektrums auf circa 2 K sind keine systematischen Auffälligkeiten zu bemerken. Eine Auswirkung der Textur auf die Verdunstung ist bei keiner der Proben zu erkennen oder vorhanden. Bemerkbar ist bei den meisten Proben ein leichter Temperaturanstieg von rechts unten nach links oben. Da dieses Erscheinungsbild aber nicht an die Verwendung eines speziellen Nachbehandlungsmittels gebunden ist, ist es naheliegend, dass es sich hier um Ungenauigkeiten des Versuchsaufbaus handelt. Höchstwahrscheinlich resultiert dieser Temperaturverlauf nur aus der nicht exakt vertikalen Ausrichtung der Kamera, die wegen der Standfüße des Stativs eine minimale Neigung aufwies.

Interessant ist die Darstellung des Temperaturverlaufs bei den Aufnahmen nach vier Stunden Klimalagerung. Bei fast allen Bildern stellt sich hier deutlich ein Temperaturgradient vom Rand zur Mitte der Probe ein, wobei bei den 30°C gelagerten Proben der Innenbereich, dagegen bei 10°C Lagerung der Randbereich höhere Temperaturen aufweist. Diese Temperaturverteilung erfolgt offensichtlich durch die schnellere Anpassung der Randbereiche an die Raumtemperatur,

während im Inneren länger die Temperatur der Klimalagerung gespeichert wird. Im Gegensatz zu diesem bei den meisten Proben klar ausgeprägten Erscheinungsbild stellt sich ohne Nachbehandlung (oNB) und bei Nachbehandlungsmittel 9 (NBM9) stellt sich der Temperaturgradient nicht ein, sondern man sieht eine sehr gleichmäßige Verteilung über die gesamte Probenoberfläche. Hier ist die Verdunstung nach vier Stunden noch im Gange, was einerseits zu den tieferen Temperaturen und andererseits zu dem gleichmäßigen IR-Bild der Oberfläche führt. Um den Unterschied deutlich zu machen, ist in Abbildung 15 beispielhaft je ein IR-Bild von oNB, NBM9 und NBM10 aus der Serie mit Lagerung bei 30 °C ohne Wind dargestellt.¹

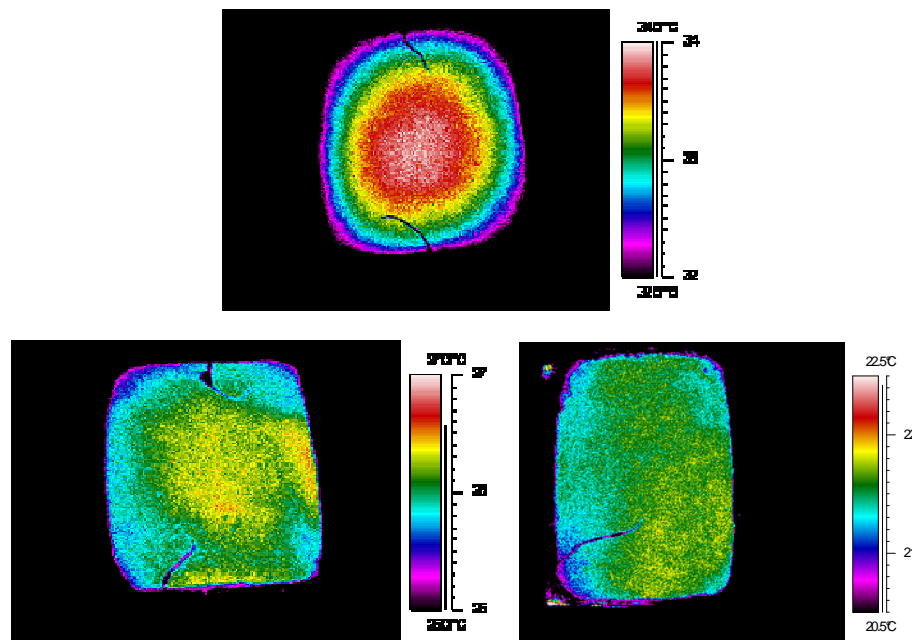


Abbildung 15: Thermographie NBM10 (oben), NBM9 (unten links) und oNB (unten rechts) nach 4 h

Geht man davon aus, dass eine Erhärtung des Betons ohne Nachbehandlung für die Entwicklung der Eigenschaften negativ ist, so lässt sich aus dieser Messung auf die schlechte Eignung von NBM9 als Betonnachbehandlungsmittel schließen.

¹ Ergänzend finden sich die IR-Bilder einer kompletten Serie bei 30°C ohne Wind im Anhang A 2.

5.5 Temperaturmessung

Bei der Temperaturmessung konnte die gewünschte Messgenauigkeit nicht erreicht werden. Zwischen den Messfühlern an der Oberfläche und denen, die tiefer im Beton platziert wurden, konnte kein wesentlicher Unterschied in den Messergebnissen festgestellt werden. Deshalb kann nicht festgestellt werden, ob die Temperaturveränderung mehr der Verdunstung oder der Hydratation zugeschrieben werden soll. Es ist gut ersichtlich, bei welchen Messungen welcher Vorgang überwiegt. Liegt die Kurve über der Solltemperatur der Klimalagerung, so überwiegt Hydratation, liegt sie darunter, so ist die Verdunstung maßgebend. Sichtbare Auswirkungen können generell nur in den ersten 14 Stunden festgestellt werden, danach nähern sich alle Messwerte soweit der Solltemperatur, dass Unterschiede nicht mehr erkennbar sind.

Bei der Lagerung unter 10°C und Wind konnten über den gesamten Messverlauf keine Abweichungen festgestellt werden, was daran liegen dürfte, dass die Vorgänge durch die niedrige Temperatur verlangsamt werden und die Umgebungstemperatur damit vorherrschend wird.

Die Messergebnisse bei den warmen Klimalagerungen zeigen deutlich überwiegende Verdunstung bei den Proben ohne Nachbehandlung und bei NBM9 (Abbildung 16).¹ Bei allen anderen Probekörpern ist die Hydratation stärker ausgeprägt. Eine genauere Rangordnung kann wegen der Streuung der Messergebnisse unter diesen Nachbehandlungsmitteln nicht erstellt werden.

¹ Die Oberflächentemperaturverläufe aller Klimabedingungen sind im Anhang A 3 dargestellt.

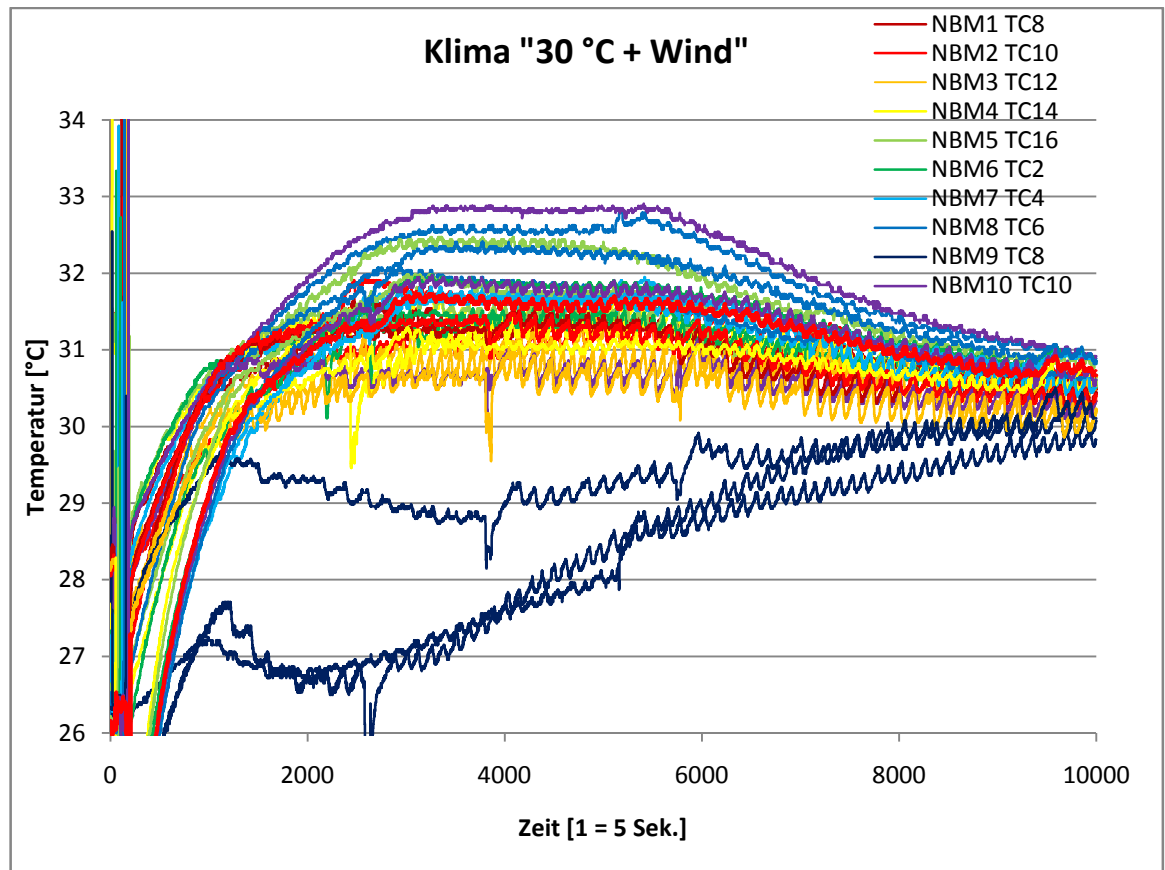


Abbildung 16: Oberflächentemperaturmessung aller NBM bei Lagerung 30°C und Wind
(oNB und NBF nicht dargestellt)

5.6 Wasserverlust

Verdunstungsverlauf

Die Analyse des Verdunstungsverlaufs erfolgt beispielhaft an den Ergebnissen unter Klima 30°C ohne Wind. In Abbildung 17 ist der relative Verlauf des Feuchteverlusts bezogen auf das Anfangsgewicht von Beton und Nachbehandlungsmittel der jeweiligen Probe dargestellt.¹

¹ Die kompletten Verdunstungsverläufe aller Klimabedingungen finden sich im Anhang A 4.

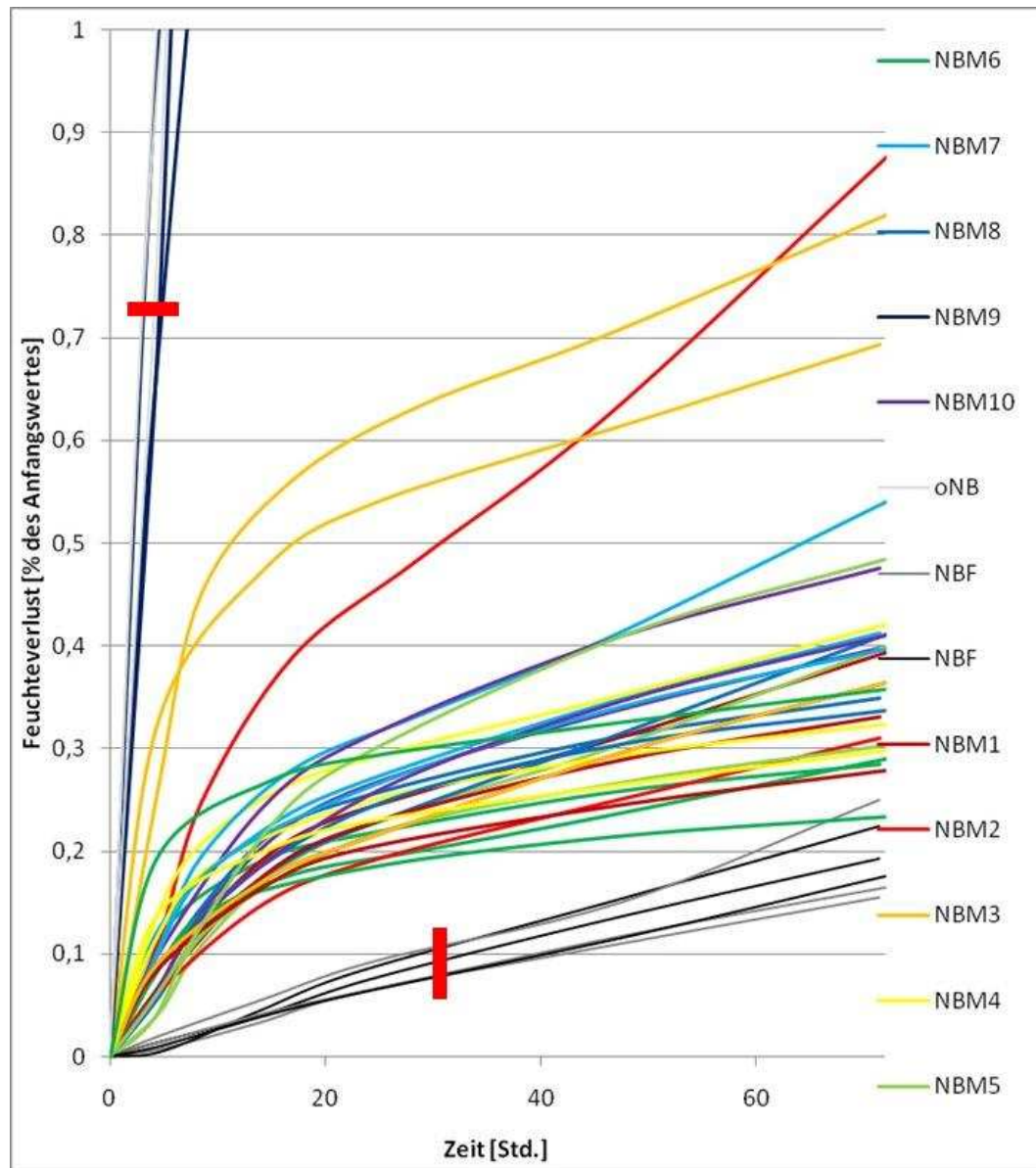


Abbildung 17: Verlauf des Feuchteverlusts bei 30°C ohne Wind

Gut erkennbar sind im unteren Bereich die Kurven der mit Folien abgedeckten Proben (senkrechter roter Balken). Sie zeigen die geringsten Verluste und weisen gegenüber allen anderen Proben über die gesamte Zeit konstante Verdunstungsraten auf. Ebenso auffällig sieht man am linken Rand der Abbildung die Kurven von NBM9 und den unbehandelten Proben steil nach oben führen (waagrechter roter Balken). Es zeigt sich also, dass dieses Nachbehandlungsmittel bezogen auf den Feuchteverlust keine Wirksamkeit aufweist.

Alle anderen Paraffindispersionen befinden sich in einem relativ engen Bereich zwischen den beiden vorher genannten Extremen. Sie weisen alle ähnliche Kurvenverläufe mit einer markanten Steigungsänderung nach fünf bis zehn Stunden auf, die vermutlich zu einem Teil aus der anfangs größeren Verdunstung des Mittels an sich und zum anderen aus dem nachlassenden Nachtransport von Wasser aus dem Inneren des Probekörpers resultiert. Auffällig ist der Messverlauf einer Probe mit NBM2 (rot), der aber aufgrund seiner atypischen Steigung vermutlich auf einen Fehler im Versuchsablauf zurückzuführen ist und deshalb für die weiteren Betrachtungen nicht herangezogen wird. Eine genaue Aussage über die Reihenfolge der einzelnen Nachbehandlungsmittel ist wegen der Dichte und der fast ebenso großen Streuung schwierig. Tendenziell ist festzustellen, dass im oberen Bereich des Spektrums NBM3 leicht schlechtere Schutzeigenschaften als der Durchschnitt aufweist, während NBM6 am unteren Ende durchgehend eine gute Performance zeigt.

Diese Erkenntnisse bestätigen sich im Wesentlichen auch bei den anderen Klimabedingungen.¹ Bei 30°C mit Wind sind jedoch die Verdunstungsraten allgemein etwas höher. Außerdem ist der Nutzen der Folienbehandlung bei der Lagerung unter Wind bei beiden Temperaturen nicht mehr eindeutig größer als der von flüssigen Nachbehandlungsmitteln. Während sie sich bei 10°C zwar noch immer am unteren, „besseren“ Ende des Spektrums finden, kann man bei 30°C und Wind schon bei den meisten flüssigen Nachbehandlungsmitteln von einem effektiveren Schutz gegen Verdunstung sprechen.

Erfüllung der Grenzwerte

Der Vergleich mit den Grenzwerten der Richtlinien konnte nur mit leichten Abänderungen vorgenommen werden. Für die Ermittlung der Werte wurde die Eigenverdunstung der Nachbehandlungsmittel nicht mitberücksichtigt, da diese nur bei Klima 30°C ohne Wind ermittelt wurde. Die Anwendung dieser Daten auf

¹ Im Anhang A 5 sind die Verdunstungsverläufe getrennt nach Nachbehandlungsmethode dargestellt. So kann man bei jeder Einzelnen den Einfluss der Klimabedingungen erkennen.

die anderen Klimabedingungen würde zum Teil zu negativen Verdunstungsraten führen, die nicht der Realität entsprechen.¹ Die in Tabelle 6 dargestellten Werte entsprechen aber auch so in Annäherung der ASTM-Anforderung. Rot markiert sind die Proben, die im Mittel den Maximalwert von 550 g/m² Wasserverlust nach 72 Stunden übersteigen. Klarerweise finden sich darunter die Proben ohne Nachbehandlung. Ähnlich schlecht ist die Performance von NBM9. Außerdem erreichen die Foliennachbehandlungen bei Wärme und Wind sowie NBM3 bei zwei Klimabedingungen nicht die geforderte Wirksamkeit.

Tabelle 6: Absolute Verdunstungswerte in g/m²

	"30°C"	"10°C + Wind"	"30°C + Wind"
oNB	2261,1	2166,3	3131,1
NBF3d	133,9	101,1	1256,7
NBF28d	127,8	63,3	626,1
NBM1	298,3	124,4	280,0
NBM2	450,6	93,9	357,8
NBM3	649,4	370,0	552,8
NBM4	304,4	152,2	295,0
NBM5	346,1	113,3	281,1
NBM6	255,0	110,0	208,3
NBM7	396,7	110,6	432,2
NBM8	311,7	235,6	306,1
NBM9	2152,2	1890,0	2792,8
NBM10	376,1	125,6	396,1

Die Ermittlung des Sperrkoeffizienten ergibt ein ähnliches Resultat, wenn auch in abgeschwächter Form (Tabelle 7). Bei Nachbehandlungsmittel 9 ist der Wert nahe Null und bei NBF und NBM3 wird der erforderliche Wert von 75% einmal nicht erreicht. Auch hier ist aber zu erwähnen, dass der Verlust aus der Paraffindispersion nicht abgezogen wurde. Außerdem wurde vereinfachend, weil bei diesem Versuchsablauf nicht anders möglich, nur S₃ und nicht ein Mittelwert aus S₁, S₃ und S₇ zum Vergleich herangezogen. Eine Korrektur dieser beiden

¹ Im Anhang A 9 sind die Ergebnisse für 30°C ohne Wind angegeben. Ebenso ist die Rückrechnung auf die anderen Klimabedingungen dargestellt.

Mängel könnte unter Umständen dazu führen, dass auch NBM3 unter allen Versuchsbedingungen die Anforderungen knapp erfüllt.

Tabelle 7: Sperrkoeffizienten S nach 3 Tagen

	"30°C"	"10°C + Wind"	"30°C + Wind"
oNB	0,0	0,0	0,0
NBF3d	94,1	95,3	59,9
NBF28d	94,3	97,1	80,0
NBM1	86,8	94,3	91,1
NBM2	80,1	95,7	88,6
NBM3	71,3	82,9	82,3
NBM4	86,5	93,0	90,6
NBM5	84,7	94,8	91,0
NBM6	88,7	94,9	93,3
NBM7	82,5	94,9	86,2
NBM8	86,2	89,1	90,2
NBM9	4,8	12,8	10,8
NBM10	83,4	94,2	87,3

5.7 Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung unterliegen einer sehr großen Streuung und es ist daher schwierig, mit diesem Versuch eine gesicherte Aussage über die Wirksamkeit der Nachbehandlungsverfahren zu treffen.¹ Sinnvoll wäre bei zukünftigen Untersuchungen eine starke Erhöhung der Versuchsanzahl, da bei den hier verwendeten neun Messungen je Versuchszusammenstellung einzelne Extremergebnisse noch zu großen Einfluss auf den Durchschnittswert haben. Alleine zur Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln scheint es aber wirtschaftlich nicht vertretbar, einen derartigen Aufwand zu betreiben, zudem andere in dieser Arbeit behandelte Verfahren bei weitaus geringerem Aufwand zu aussagekräftigeren Ergebnissen kommen.

Tendenziell entsprechen die Ergebnisse dieser Messung aber dennoch den anderen durchgeführten Prüfmethode. Bestätigt wird etwa über alle Klimabedingungen

¹ Im Anhang A 6 sind unter die ermittelten Biegezugfestigkeiten aller Proben, deren Mittelwerte sowie die Bewertungen angegeben.

die positive Wirkung von Nachbehandlung auf die Betonfestigkeit, da die niedrigsten Werte jeweils bei oNB auftreten. Ebenso zeigt sich bei der Klimalagerung ohne Wind die ausgezeichnete Wirkung der Folienbehandlung. Der Wirkungsverlust bei Auftreten eines Luftzugs war zu erwarten, ist aber besonders bei 30°C mit Wind in dieser Signifikanz überraschend, zumal beim Versuchsablauf auf eine möglichst dichte Abdeckung geachtet wurde. Bei diesen Umgebungsbedingungen unter großem Verdunstungspotential zeigen sich auch bei NBM9 die aus den anderen Versuchen zu erwartenden schlechten Werte. Alle anderen Substanzen schwanken in einem Bereich, in dem sich wegen der statistischen Unsicherheit keine sicheren Aussagen machen lassen. Tendenziell befinden sich hier aber besonders die Nachbehandlungsmittel 3 und 8 über alle Klimabedingungen am oberen Ende dieses Spektrums. In Abbildung 18 finden sich die Mittelweltergebnisse der Biegezugfestigkeit für alle geprüften Nachbehandlungsarten dargestellt.

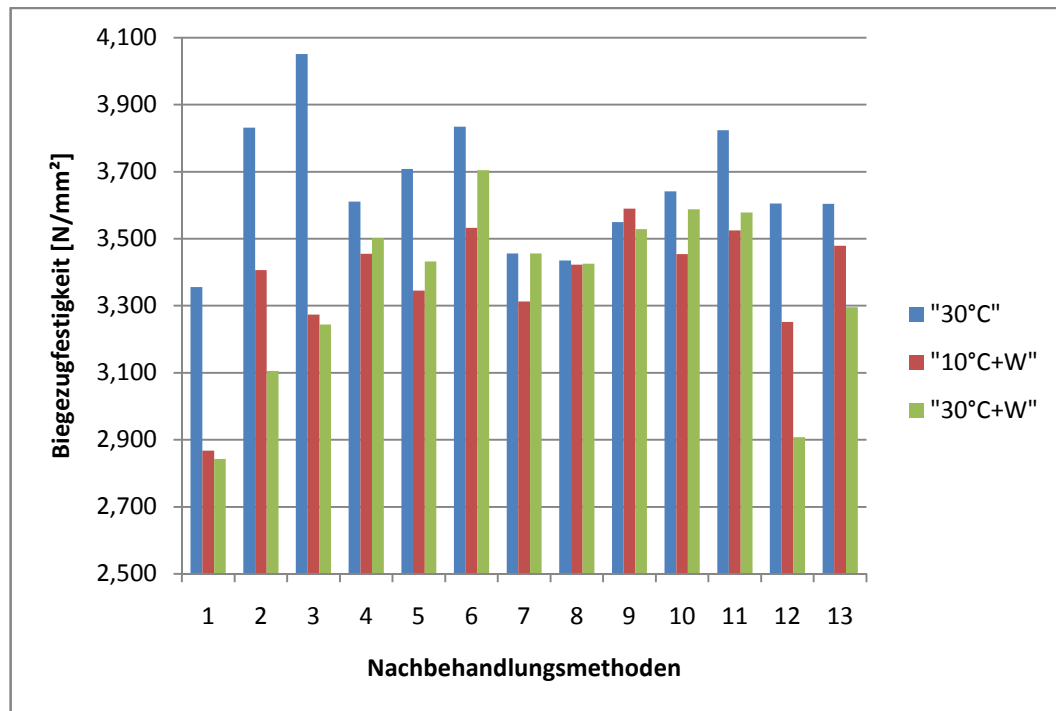


Abbildung 18: Ergebnisse für die Biegezugfestigkeit¹

Bestätigt werden konnte, dass die Nachbehandlung mit flüssigen Paraffindispersionen gegenüber anderen Methoden je nach Umgebungsklima unterschiedlich zu bewerten ist. Herrscht nur geringe Luftbewegung vor, ist bei entsprechend dichter Herstellung die Nachbehandlung mit Folie zu bevorzugen. Je stärker der Wind und je größer das Verdunstungspotential durch die Temperatur, desto größer werden die Vorteile von flüssigen Nachbehandlungsmitteln, da schon ein kleines Leck in der Folienabdeckung zu großen Feuchteverlusten im Beton führen kann.

5.8 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Porosimetrie wurde, wie bereits erwähnt, aus Aufwandsgründen nur bei ausgewählten Proben durchgeführt. Die im Folgenden ausgeführten Beurteilungen

¹ Die Beschriftung für die Nachbehandlungsmethoden ist folgendermaßen: 1 steht für oNB, 2 und 3 für die beiden Folienproben, danach folgen aufsteigend nach Nummerierung die verschiedenen flüssigen Nachbehandlungsmittel.

begründen sich also nur auf Stichproben und wurden statistisch nicht nachgewiesen. Im Allgemeinen kann man aber bei entsprechender Probenentnahme von einer sehr guten Aussagekraft dieser Messmethode ausgehen.

Als Referenz wurde eine Probe ohne Nachbehandlung und eine mit Folie der Prüfung unterzogen. Zusätzlich wurden ein aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse als gut zu bezeichnendes Nachbehandlungsmittel (NBM1) und ein schlecht wirksames (NBM9) der Quecksilberdruckporosimetrie unterzogen. Schließlich wurde die Bandbreite durch NBM6 und NBM8 ergänzt, die nach den anderen Prüfungen als Mittelmaß zu bezeichnen sind. Alle Proben stammten aus der Serie bei Lagerung 30°C ohne Wind, um Einflüsse aus dem Umgebungsklima beim Vergleich auszuschließen. In Abbildung 19 sind die Verteilung der Porenradien und die Summenlinie für jede geprüfte Probe ersichtlich.

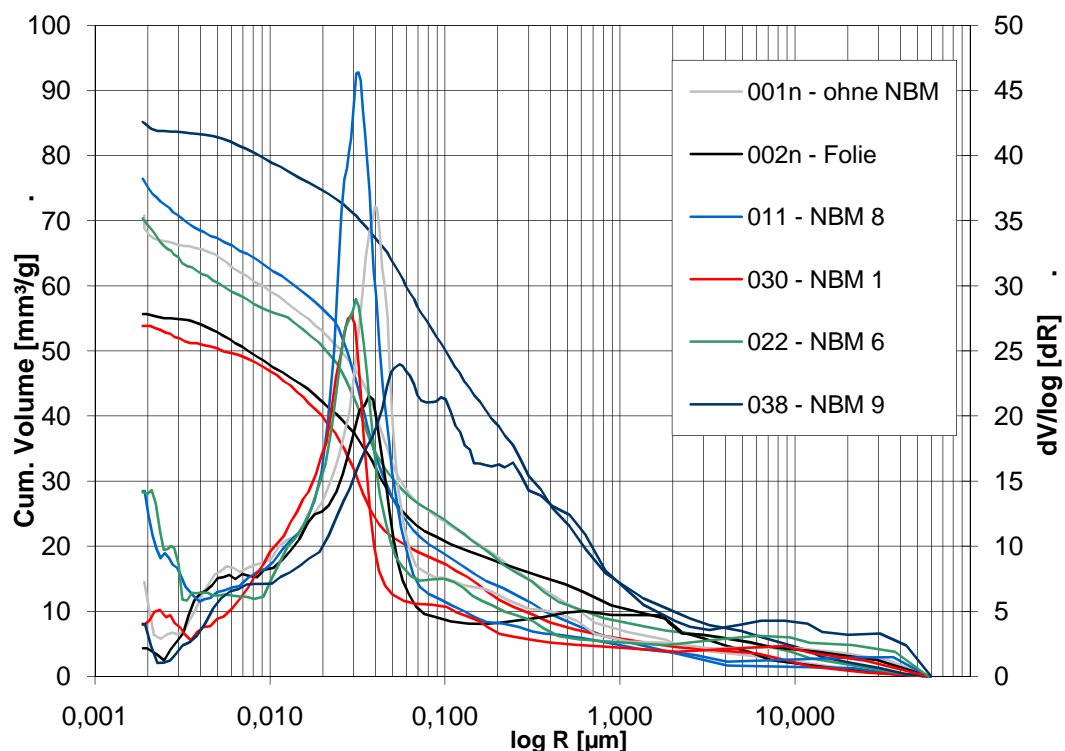


Abbildung 19: Porenradienverteilung der geprüften Proben

Wie zu erwarten, zeigt NBM9 im Vergleich zu den anderen Proben eine klar unterschiedliche Verteilung und hat auch gesamt gesehen den größten Porenanteil.

In den Summenkurven bestätigen sich auch bei allen anderen Verteilungen die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kurven. Wie ebenfalls zu erwarten, weisen NBF und NBM1 den geringsten Porenanteil auf, während NBM6 und NBM8 auch weiter im durchschnittlichen Bereich liegen. Überraschend ist hier nur, dass die Probe ohne Nachbehandlung eher den durchschnittlichen Proben gleicht. Die Verwendung von NBM9 führt also zu deutlich schlechteren Werten als oNB.

Bei den Porenradienverteilungen ist neben NBM9 auch NBM7 auffällig. Es wäre hier zu erwarten gewesen, dass NBF und oNB die Grenzen nach oben wie nach unten darstellen.

5.9 Gegenüberstellung der Ergebnisse

In den folgenden Darstellungen (Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10) sind die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen für jede Klimabedingung gegenübergestellt. Nicht angeführt sind die Thermographie und die Oberflächentemperaturmessung, da sie im Wesentlichen nur den Ausschluss von NBM9 bestätigen.

Die Spalte für den Wasserverlust gibt für jedes Nachbehandlungsmittel den nach der Gesamtverdunstungsmenge nach 72 Stunden bestimmten Rang und darunter den prozentuellen Wert des auf das Anfangsgewicht bezogenen Wasserverlustes an. Für die Gesamtbeurteilung wurde der Schwankungsbereich der Ergebnisse gedrittelt und den drei Bereichen die Attribute Gut (+), Durchschnittlich (~), und Schlecht (-) zugeordnet. Ausgenommen musste für diese Bewertung NBM9 werden, da wegen der extrem schlechten Wirksamkeit sonst die Bewertungsgrenzen zu stark verschoben worden wären. Nach demselben Prinzip ist auch das Ergebnis für die Biegezugfestigkeit angegeben.

Die Ergebnisse der Versuche an den Nachbehandlungsmitteln an sich, Wasserverlust und Oberflächenspannung, sind hier nur als Zusatzinformation für Vergleiche ergänzend angeführt. Wie schon in Kapitel 5.1 näher ausgeführt, bezieht sich hier die Wasserverlustbeurteilung auf die unterschiedliche

Verdunstungsgeschwindigkeit der flüchtigen Bestandteile in den einzelnen Proben. Die Reihenfolge bei den Ergebnissen der Oberflächenspannungsmessung (IFT) bezieht sich nur auf die Größe der Werte zur besseren Orientierung, trifft aber keine Aussage über Rückschlüsse auf die Wirksamkeit.

Der Versuch der Gesamtbeurteilung erfolgte nun auf Basis der Bewertungen von Wasserverlust, Auftragsbeurteilung, Abschleifeigenschaften und Festigkeit, wobei letztere aufgrund der großen Ergebnisungenauigkeit nur im eingeschränkten Maße miteinbezogen wurde. Mit einem X bezeichnet wurden die beiden Substanzen NBM2 und NBM9, die aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit als für die Betonnachbehandlung vollkommen ungeeignet und deshalb grundsätzlich auszuschließen sind.

Tabelle 8: Gesamtbeurteilung bei 30°C ohne Wind

	30°C kaum Luftbewegung		Subjektiv (Optisch, Verarbeitbarkeit)				NBM		GESAMT
	Wasserverlust	Festigkeit	Auftrag	Ausschlusskriterium fett unterstrichen	Abschleifen	Verlust	IFT		
NBM1	3 0,3348 +	5 3,611 ~	+	relativ ungleichmässig nach 4h fast trocken, nach 8h trocken	+	+	7 46,65	1	
NBM2	7 0,5194 ~	3 3,708 +	+	wird olivgrün gleichmässig, bildet kleine Bläschen <u>maß bis zum Ende</u> (sondert ab)	-	+	5 43,77	X	
NBM3	9 0,7484 -	1 3,834 +	-	sehr dickflüssig relativ ungleichmässig nach 4h leicht feucht, nach 8h trocken leicht rissig	+	+	1 16,14	6	
NBM4	2 0,3482 +	9 3,457 -	+	dünnflüssig gelb-grün/beige, gleichmässig nach 4h leicht feucht, nach 8h trocken leicht rissig	-	-	4 42,70	5	
NBM5	5 0,3968 +	10 3,435 -	~	relativ ungleichmässig nach 4h unregelmässig getrocknet, nach 8h trocken	~	~	8 46,85	7	
NBM6	1 0,2916 +	8 3,550 -	+	ungleichmässig nach 4h leicht feucht, nach 8h trocken	~	~	9 49,86	3	
NBM7	8 0,4515 ~	4 3,641 ~	+	gleichmässig nach 4h leicht feucht, nach 8h trocken	~	~	10 68,75	4	
NBM8	4 0,3671 +	2 3,824 +	~	relativ ungleichmässig nach 4h leicht feucht, nach 8h trocken	~	~	6 45,39	2	
NBM9	10 2,5120 --	6 3,606 ~	+	bläulich gleichmässig, <u>sehr rissig, blättert ab</u> schon nach 4h sehr trocken und rissig	+	+	3 37,85	X	
NBM10	6 0,4275 +	7 3,605 ~	-	ungleichmässig, "Kügelchen", verstopft etwas dickflüssig, Geruch nach 4h unregelmässig getrocknet, nach 8h trocken	~	~	2 27,49	8	

Tabelle 9: Gesamtbeurteilung bei 10°C mit Wind

	10°C + Wind		Subjektiv (Optisch, Verarbeitbarkeit)				NBM		GESAMT
	Wasserverlust	Festigkeit	Auftrag	Ausschlusskriterium fett unterstrichen	Abschleifen	Verlust	IFT		
NBM1	5 0,1438 +	5 3,455 ~	+	schneeweiß, wird grünlich, dünnflüssig, gut aufzutragen nach 4 Std trocken ungleichmäßig nach Trocknung	+	+	7 46,65	1	
NBM2	1 0,1036 +	8 3,345 -	+	gelbgrün hell, wird oliv, sehr gleichmäßig feucht bis Schluß, aber keine Bläschenbildung <u>nass bis Schluß</u>	~	+	5 43,77	X	
NBM3	9 0,4328 -	2 3,533 +	-	schneeweiß, dickflüssig, ungleichmäßig fast ganz trocken nach 4 Std. kleine Risse	-	+	1 16,14	8	
NBM4	7 0,1796 +	9 3,313 -	+	beige, gut aufzutragen, rel gleichmäßig trocken nach 4 Std, aber leicht klebrig	-	+	4 42,70	4	
NBM5	3 0,1241 +	7 3,423 ~	~	weißgrau, rel, gut aufzutragen, rel gleichmäßig Trockenheit abhängig von Schichtdicke (dünn nach 4 Std, dick nicht nach 8 Std.), dicke Stellen	~	-	8 46,85	6	
NBM6	4 0,1269 +	1 3,590 +	+	weißgrau, dünnflüssig, gut aufzutragen fast ganz trocken nach 4 Std. rel ungleichmäßig (dicke Stellen)	~	+	9 49,86	3	
NBM7	2 0,1216 +	5 3,455 ~	+	schmutziges weiß -> ockergrau dunkel, dünnflüssig nach 4 Std trocken gut aufzutragen, gleichmäßig	+	-	10 68,75	1	
NBM8	8 0,2747 ~	3 3,525 +	~	hellbeige, dünnflüssig, gut aufzutragen fast ganz trocken nach 4 Std. rel gleichmäßig, Geruch	~	-	6 45,39	7	
NBM9	10 2,2799 ---	10 3,252 -	+	anfangs bläulich, dickflüssig -> weißlich, gut aufzutragen nach 4 Std. trocken und bereits sehr flüssig gleichmäßig, blättert ab	+	~	3 37,85	X	
NBM10	6 0,1447 +	4 3,479 +	-	dickflüssig, schlecht aufzutragen, gleichmäßig nach 4 Std trocken leichte Kügelchen, Geruch	+	~	2 27,49	4	

Tabelle 10: Gesamtbeurteilung bei 30°C mit Wind

	30°C + Wind		Subjektiv (Optisch, Verarbeitbarkeit)			NBM		GESAMT
	Wasserverlust	Festigkeit	Auftrag	Ausschlusskriterium fett unterstrichen	Abschleifen	Verlust	IFT	
NBM1	2 0,3151 +	5 3,502 +	+	fast zu flüssig, gut aufzutragen, rel gleichmässig leichte Kügelchen nach 4 Std trocken	+	+	7 38,54 46,65	1
NBM2	9 0,6767 -	7 3,432 ~	+	oliv, sehr gleichmässig, gut aufzutragen Bläschen, sondert ab <u>bis zum Ende nass</u>	-	-	5 37,91 43,77	X
NBM3	8 0,6430 -	1 3,704 +	-	schlecht aufzutragen, rel ungleichmässig Aussehen wie ohne NB, Kügelchen nach 4 Std trocken	-	-	1 39,14 16,14	8
NBM4	4 0,3364 +	6 3,456 +	+	ocker, rel gleichmässig, gut aufzutragen nach 4 Std trocken, aber leicht klebrig	~	~	4 38,55 42,70	2
NBM5	3 0,3228 +	8 3,425 ~	~	ähnlich Zuckerguß, ungleichmässig mittelmässig aufzutragen, rissähnliche umrandete Felder nach 4 Std nass, nach 8 Std tw. Trocken (dünne Stellen)	~	~	8 38,56 46,85	6
NBM6	1 0,2520 +	4 3,529 +	+	dunkelgrau, fast zu dünnflüssig, gut aufzutragen rel ungleichmässig nach 4 Std leicht feucht, nach 8 Std trocken	~	~	9 40,56 49,86	2
NBM7	7 0,5261 ~	2 3,588 +	+	ocker, gut aufzutragen, gleichmässig nach 4 Std trocken	+	+	10 45,58 68,75	2
NBM8	5 0,3595 +	3 3,579 +	~	schneeweiß cremig --> hellgrau wachsig, rel gleichmässig sehr langsam, aber fein aufzutragen nach 4 Std leicht feucht, nach 8 Std. trocken	~	~	6 36,03 45,39	5
NBM9	10 3,3430 --	10 2,908 -	+	bläulich --> hellgrau, gleichmässig <u>rissig, blättert ab</u> nach 1 Std trocken	+	+	3 56,21 37,85	X
NBM10	6 0,4595 ~	9 3,295 ~	-	hellgrau, schlecht aufzutragen, dickflüssig Kügelchen, gleichmässig nach 4 Std tw trocken, nach 8 Std trocken	+	+	2 39,31 27,49	7

Das Endergebnis der Untersuchung stellt Tabelle 11 dar, in der die Teilergebnisse unter den drei Klimabedingungen gegenübergestellt sind und eine bewertende Reihung aller Flüssigkeiten nach allen Versuchen erfolgt. Ein besonderer Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Performance der Substanzen ist nicht zu erkennen. So bleibt auch die Reihenfolge der Wirksamkeit bei den unterschiedlichen Klimaten generell sehr ähnlich und so kann unbedenklich eine Gesamtbeurteilung über die durchschnittliche „Platzierung“ erfolgen.

Tabelle 11: Gesamtbeurteilung der Paraffindispersionen über alle Klimате

	30°C	10°C+Wind	30°C+Wind	Gesamt
NBM1	1	1	1	1
NBM2	X	X	X	X
NBM3	6	8	8	8
NBM4	5	4	2	4
NBM5	7	6	6	6
NBM6	3	3	2	3
NBM7	4	1	2	2
NBM8	2	7	5	5
NBM9	X	X	X	X
NBM10	8	4	7	6

Die Auswertung weist deutlich NBM1 als klar bestes Produkt aus, da es unter allen Bedingungen die besten Eigenschaften zeigt. Dahinter sind auch NBM6 und NBM7 als für Nachbehandlung gut geeignete Substanzen zu bezeichnen, mit geringem Abstand gefolgt von NBM4 und NBM8. Weitaus schlechtere Eigenschaften weisen NBM5, NBM10 und schließlich NBM3 auf. Hier scheint die Anwendung nur nach einer Verbesserung der Zusammensetzung oder anderen Maßnahmen in der Weiterentwicklung ratsam. Nicht geeignet für den Einsatz als Betonnachbehandlungsmittel sind, wie schon mehrfach erwähnt, die Paraffindispersionen NBM2 und NBM9.

6 Schlussfolgerungen

Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Bedeutung der Nachbehandlung für die Eigenschaften der fertigen Betonoberfläche. Nahezu alle getesteten Produkte führten zu weitaus besseren Ergebnissen hinsichtlich Wasserverlust, Biegezugfestigkeit und Porosität als die unbehandelten Proben. Eine Substanz (NBM9) hatte allerdings keine Wirkung und führte bei einigen Prüfungen sogar zu einer Verschlechterung der Werte gegenüber dem Beton ohne Nachbehandlung. Dies kann nur auf eine Unverträglichkeit eines der Bestandteile dieser Mischung mit dem Beton resultieren, weshalb diese Substanz für den gedachten Einsatzbereich als nicht geeignet und sogar schädlich bezeichnet werden muss. Solche Ergebnisse zeigen, wie ungemein wichtig praxisnahe Prüfungen für den Nachweis der Wirksamkeit dieser Technologie sind.

Die Arbeit bestätigt ferner, dass bei aktuellem Stand der Technik unter Normalbedingungen aus ökonomischen Gründen die Nachbehandlung mit Folie jener mit flüssigen Nachbehandlungsmitteln auf Paraffinbasis vorzuziehen ist. Unter extremen Bedingungen dagegen, wenn aufgrund hoher Temperaturen, starkem Windeinfluss und niedriger Luftfeuchte erhöhte Gefahr der Verdunstung besteht, zeigen sich die Vorteile der flüssigen Nachbehandlungsmittel. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass der Nachbehandlungsfilm viel widerstandfähiger gegen äußere Einwirkungen ist als die Folien, bei denen durch mechanische Einflüsse leicht ein Leck entstehen und dadurch ein Feuchtetransport von der gesamten Betonoberfläche in die Umgebungsluft außerhalb der Sperre erfolgen kann.

Weiters sind flüssige Betonnachbehandlungsmittel auch bei erhöhten Anforderungen an die Qualität und Sicherheit der Nachbehandlung zu empfehlen. Mit dem richtigen Produkt sind Einbußen der Wirksamkeit durch Anwendungsfehler minimiert.

Eine Beschädigung des Nachbehandlungsfilms führt außerdem nur zu lokalen Einflüssen, da wegen der festen Verbindung der Paraffindispersion mit der

Betonoberfläche unter der Sperrschicht kein großflächiger Feuchteaustausch erfolgen kann.

Von den eingesetzten Prüfmethode gibt besonders die Messung des Wasserverlusts deutliche Hinweise auf die Eignung der Nachbehandlungsmittel. Die Ermittlung der Festigkeit ist mit Einschränkungen zu empfehlen, da wegen der Streuung der Messwerte und der sehr geringen Einflusstiefe der Nachbehandlung nur eine sehr große Probenanzahl zu einem repräsentativen Ergebnis führen würde. Als unerlässlich für die Beurteilung und die Anwendbarkeit in der Praxis haben sich die optische Begutachtung und die Beschreibung der Verarbeitbarkeit erwiesen, weil sich durch diese Methoden sonst nicht erhebbare Ausschlusskriterien ergeben können. Oberflächentemperaturmessung und Thermographie allein sind in der angewendeten Form nicht für die Beurteilung der Wirksamkeit ausreichend. Bei einer Adaptierung dieser Verfahren sind aber durchaus aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten. Die stichprobenartige Ermittlung der Porenradienverteilung bestätigt die übrigen durchgeführten Messungen, allerdings kann ihre Aussagekraft in dieser Arbeit wegen zu großer statistischer Unsicherheit nicht genauer beurteilt werden.

Ausblick

Zur endgültigen Entscheidung für eine Nachbehandlungsmethode sind neben den Untersuchungsergebnissen hinsichtlich der technischen Wirksamkeit, wie sie in der vorliegenden Arbeit dargeboten werden, auch wesentlich die Kosten der verschiedenen Verfahren zu beurteilen. Gelingt es nachzuweisen, dass flüssige Nachbehandlungsmittel in der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung gegenüber anderen Methoden nicht teurer oder sogar günstiger sind, so sind sie wegen der erhöhten Anwendungssicherheit anderen Methoden großteils überlegen. Für einen solchen Nachweis ist es aber unerlässlich, die heute angewandten Produkte sowohl in ihrem Wirkungsgrad als auch in ihrer Anwendungsfreundlichkeit weiter zu verbessern.

Um die Entwicklung verbesserter Technologien auch überprüfen zu können, müsste ein vereinfachtes Schnellverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit der neuen Produkte entwickelt werden, um frühzeitig ungeeignete Substanzen ausscheiden zu können. Durch weitere Untersuchungen und im Zuge einer Verbesserung des in dieser Arbeit verwendeten Verfahrens könnte die Thermographie stärker mit einbezogen werden. Unter diesen Voraussetzungen verspricht diese Methode auch eine frühzeitige Überprüfung der Nachbehandlung auf der Baustelle zu ermöglichen und somit wäre ein weiterer Schritt zur Sicherung der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken gemacht.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [AST07] **ASTM International. 2007.** *Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete.* s.l. : Beuth Verlag, 2007.
- [Bac04] **Backe, Hans und Hiese, Wolfram. 2004.** *Baustoffkunde.* München : Werner Verlag, 2004.
- [Bau07] **Baum, Arnulf. 2007.** *Reduktion der Chlorideindringung bei Stahlbetontragwerken durch Applikation von Paraffindispersion.* Wien : TU Wien, 2007. Diplomarbeit.
- [Bay99] **Bayer, Edwin. 1999.** *Beton-Praxis: ein Leitfaden für die Baustelle.* Düsseldorf : Verlag Bau + Technik GmbH, 1999.
- [Bet07] **2007.** *Betonkalender.* Berlin : Ernst & Sohn, 2007.
- [Bun01] **Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. 2001.** *Einfluss von Klima- und Zeitparametern bei der Nachbehandlung von PCC.* Berlin : Bundesdruckerei, 2001.
- [Deu03] **Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. 2003.** *Betonherstellung und Verwendung nach neuer Norm.* Berlin : Ernst & Sohn, 2003.
- [For92] **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. 1992.** *Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel TL NBM-StB 92.* Bonn : s.n., 1992.
- [Grü97] **Grübl, Peter. 1997.** *Wirksamkeit von Nachbehandlungsverfahren.* Darmstadt : Fraunhofer IRB Verlag, 1997.
- [Hof01] **Hoffmann, Dirk und Maultzsch, Matthias. 2001.** *Einfluss von Klima- und Zeitparametern bei der Nachbehandlung von PCC.* Berlin : Bundesdruckerei GmbH, 2001. Forschungsbericht.
- [Hol04] **Holcim GmbH. 2004.** *Betonpraxis - Der Weg zum dauerhaften Beton.* Wien : Holcim (Wien) GmbH, 2004.
- [Ike94] **Iken, Hans W. 1994.** *Handbuch der Betonprüfung.* Düsseldorf : Beton-Verlag, 1994.
- [Kad00] **Kaden, Stefan, Röhling, Helmut und Eifert, Reiner. 2000.** *Betonbau: Planung und Ausführung.* Berlin : Verlag Bauwesen, 2000.

- [Ker98] Kern, Rüdiger. 1998. *Der Einfluß der Austrocknung auf die Wasserbindung und Eigenschaften des Betons*. Darmstadt : TU Darmstadt, 1998.
- [Mac06] Mack, Gunther. 2006. *Einfluss von Paraffin-Dispersionen auf ausgewählte Baustoffeigenschaften von Gipsplatten*. Wien : TU Wien, 2006. Diplomarbeit.
- [Öst07] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr. 2007. *RVS 08.17.02 Betondecken-Deckenherstellung*. Wien : Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2007. Technische Vertragsbedingungen.
- [Rei05] Reinthaler, Petra. 2005. *Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Kalksandstein nach Injektion*. Wien : TU Wien, 2005. Diplomarbeit.
- [Bun06] Schießl, Peter und Huber, Jürgen. 2006. *Nachweisverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln (NBM)*. Bonn : Wirtschaftsverlag NW, 2006. Forschungsbericht.
- [Spr07] Springenschmid, Rupert. 2007. *Betontechnologie für die Praxis*. Berlin : Bauwerk Verlag, 2007.

Anhang

A 1	Erscheinungsbild der Oberflächen nach 72 Stunden.....	72
A 2	IR-Bilder einer kompletten Serie bei „30°C ohne Wind“	74
A 3	Oberflächentemperaturverläufe bei unterschiedlichen Klimaten.....	80
	I. Klima „30°C ohne Wind“	80
	II. Klima „10°C mit Wind“	81
	III. Klima „30°C mit Wind“	82
A 4	Relativer Wasserverlust klimabezogen über 72 Stunden.....	83
	I. Klima „30°C ohne Wind“	83
	II. Klima „10°C mit Wind“	84
	III. Klima „30°C mit Wind“	85
A 5	Wasserverlust: Einfluss des Klimas je Nachbehandlungsmethode....	86
	I. Ohne Nachbehandlungsmittel.....	86
	II. Foliennachbehandlung (Beispiel 3 Tage).....	86
	III. Nachbehandlungsmittel 1.....	86
	IV. Nachbehandlungsmittel 2.....	87
	V. Nachbehandlungsmittel 3.....	87
	VI. Nachbehandlungsmittel 4.....	87
	VII. Nachbehandlungsmittel 5.....	88
	VIII. Nachbehandlungsmittel 6.....	88
	IX. Nachbehandlungsmittel 7.....	88
	X. Nachbehandlungsmittel 8.....	89
	XI. Nachbehandlungsmittel 9.....	89
	XII. Nachbehandlungsmittel 10.....	89
A 6	Gesamtübersicht Biegezugfestigkeit.....	90
A 7	Verdunstung abzüglich NBM-Eigenverdunstung.....	91

A 1 Erscheinungsbild der Oberflächen nach 72 Stunden



Ohne Nachbehandlungsmittel



Nachbehandlung Folie



Nachbehandlungsmittel 1



Nachbehandlungsmittel 2



Nachbehandlungsmittel 3



Nachbehandlungsmittel 4



Nachbehandlungsmittel 5



Nachbehandlungsmittel 6



Nachbehandlungsmittel 7



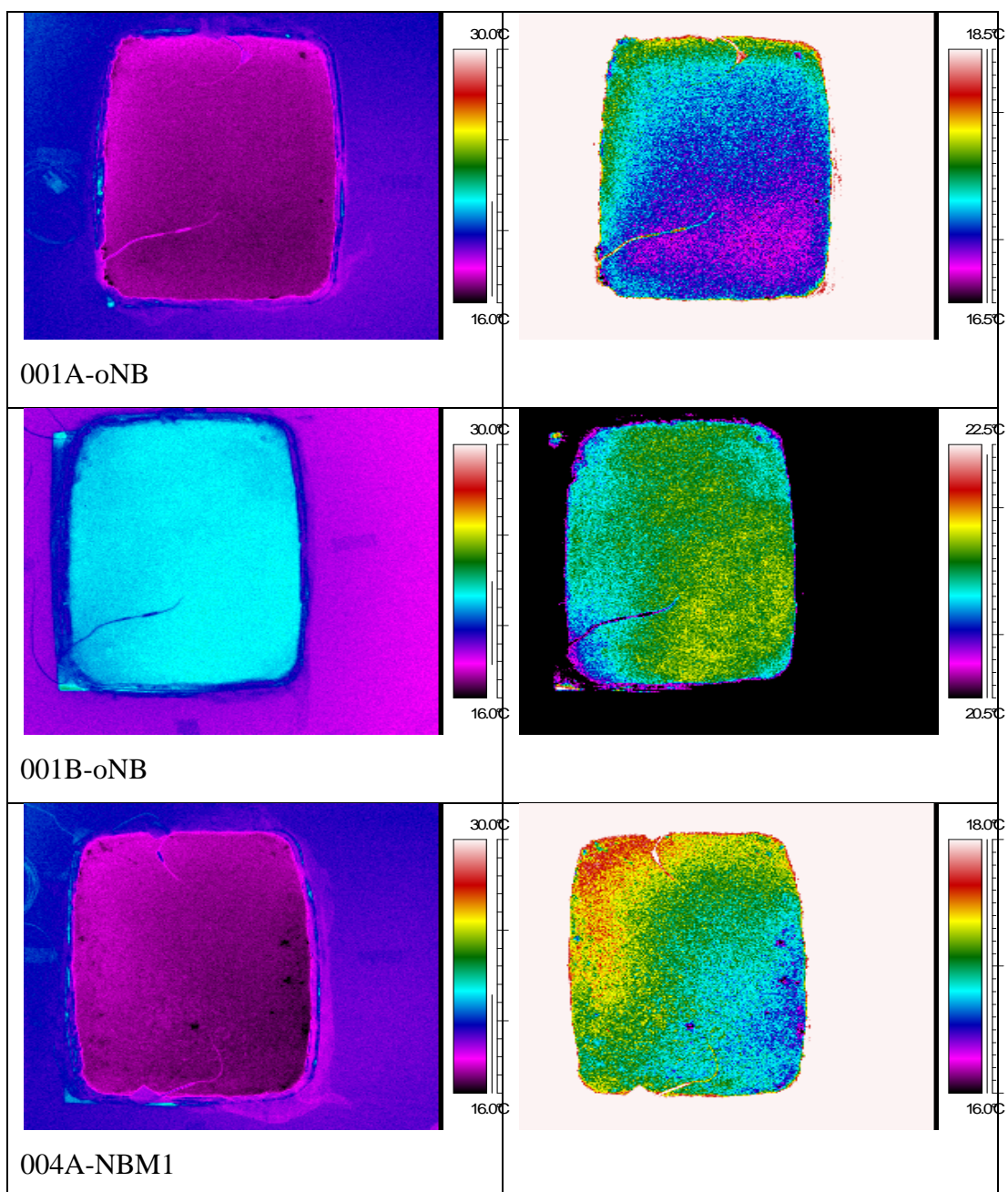
Nachbehandlungsmittel 8



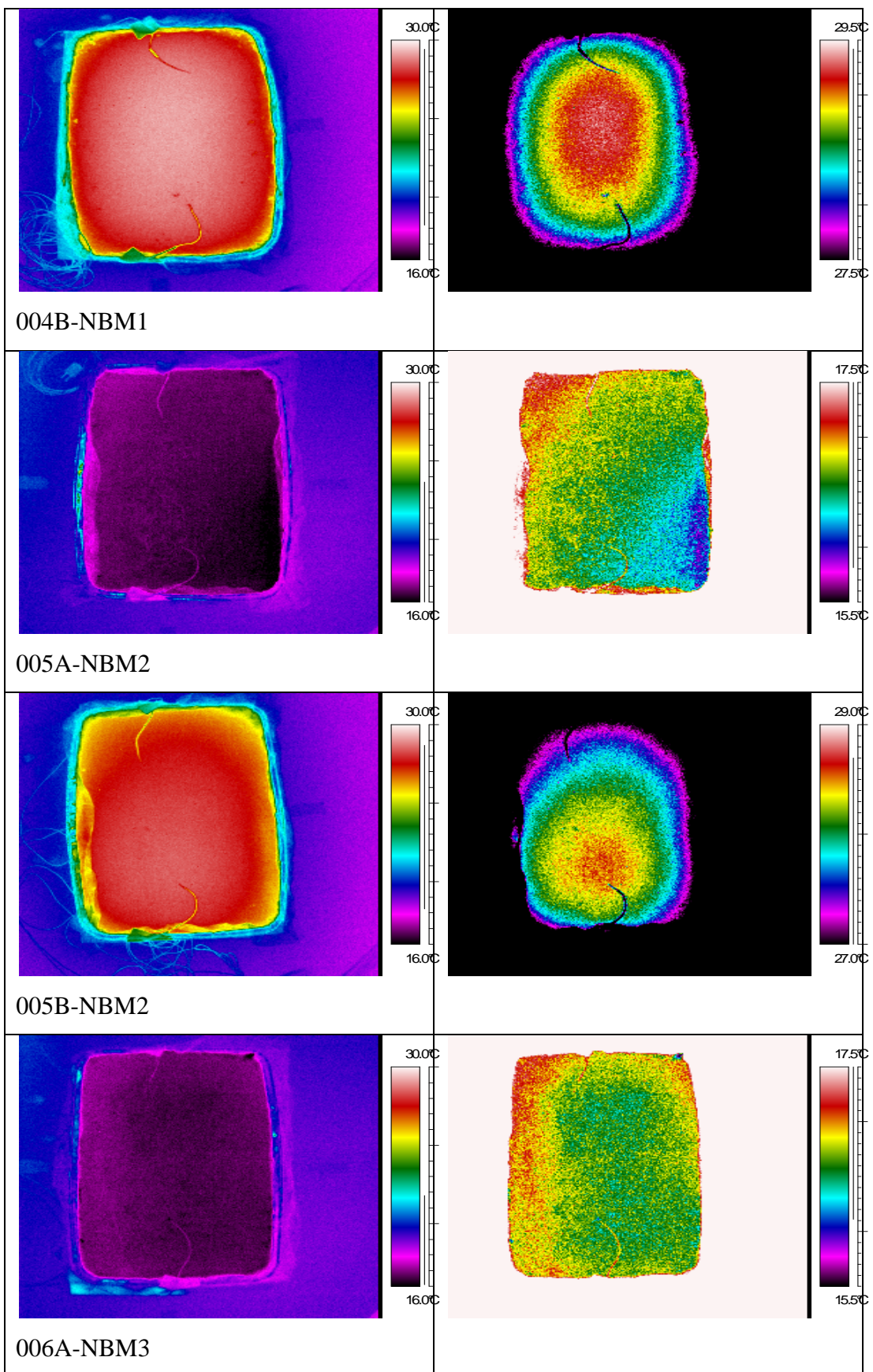
Nachbehandlungsmittel 9

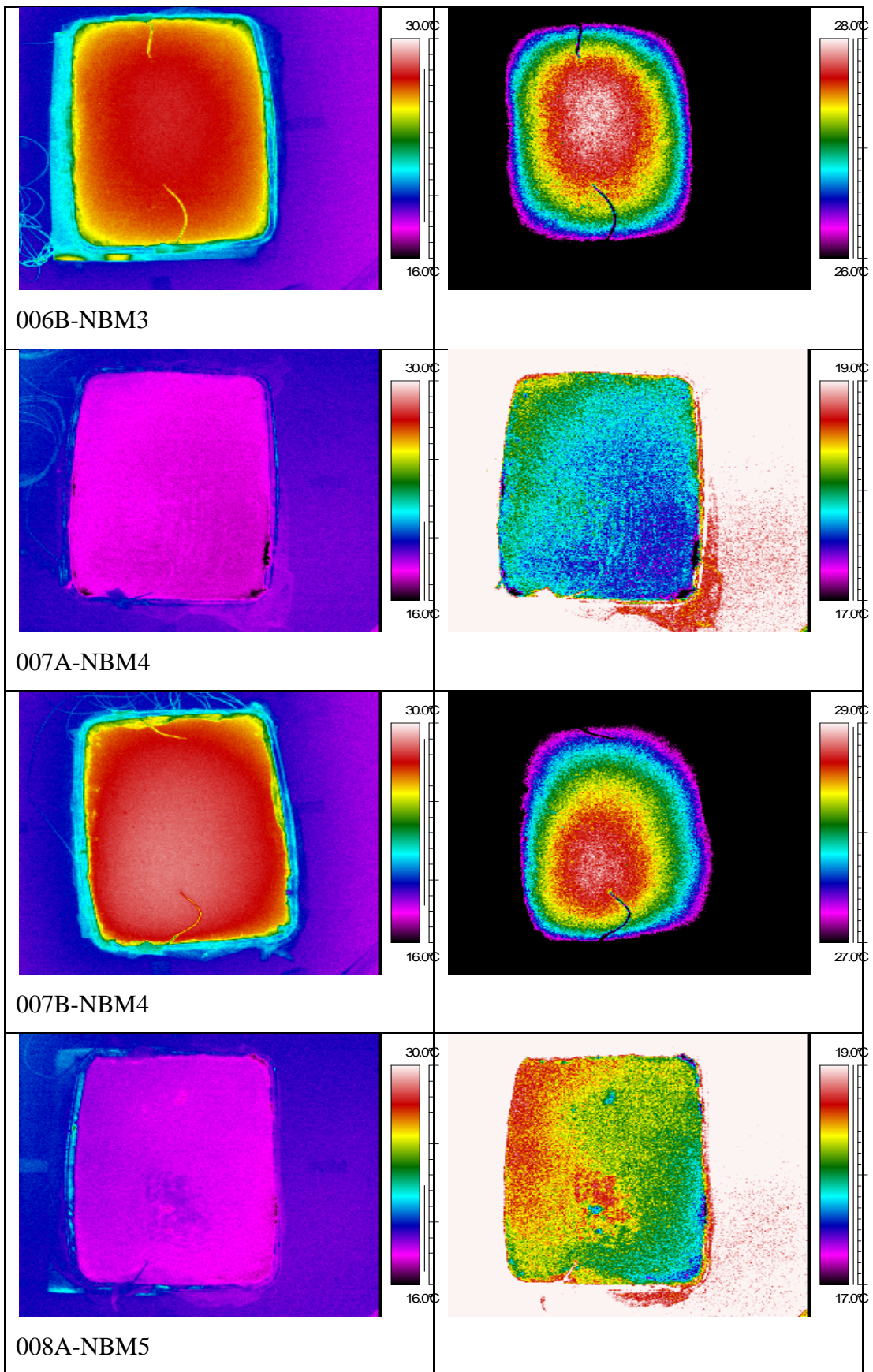


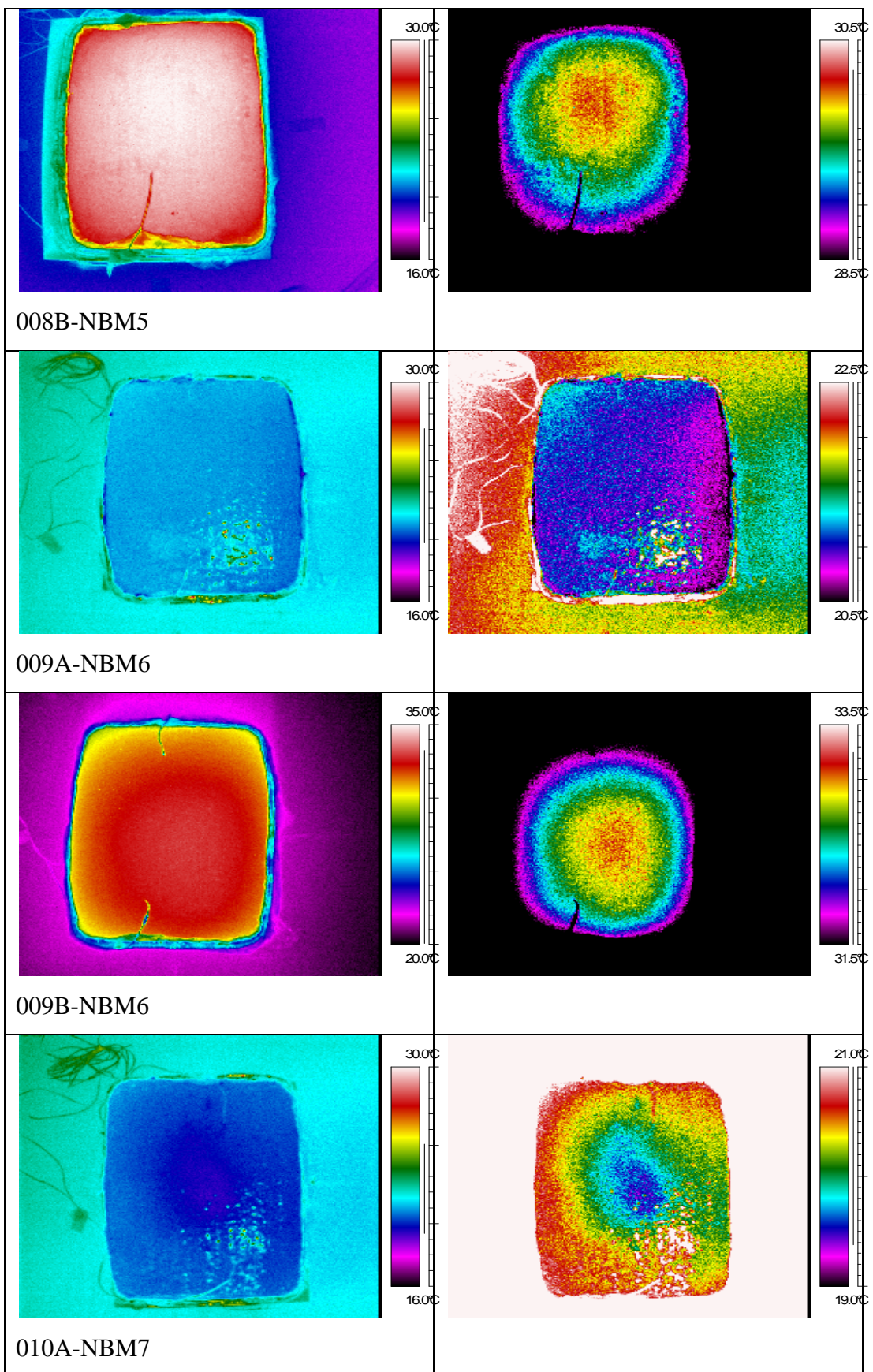
Nachbehandlungsmittel 10

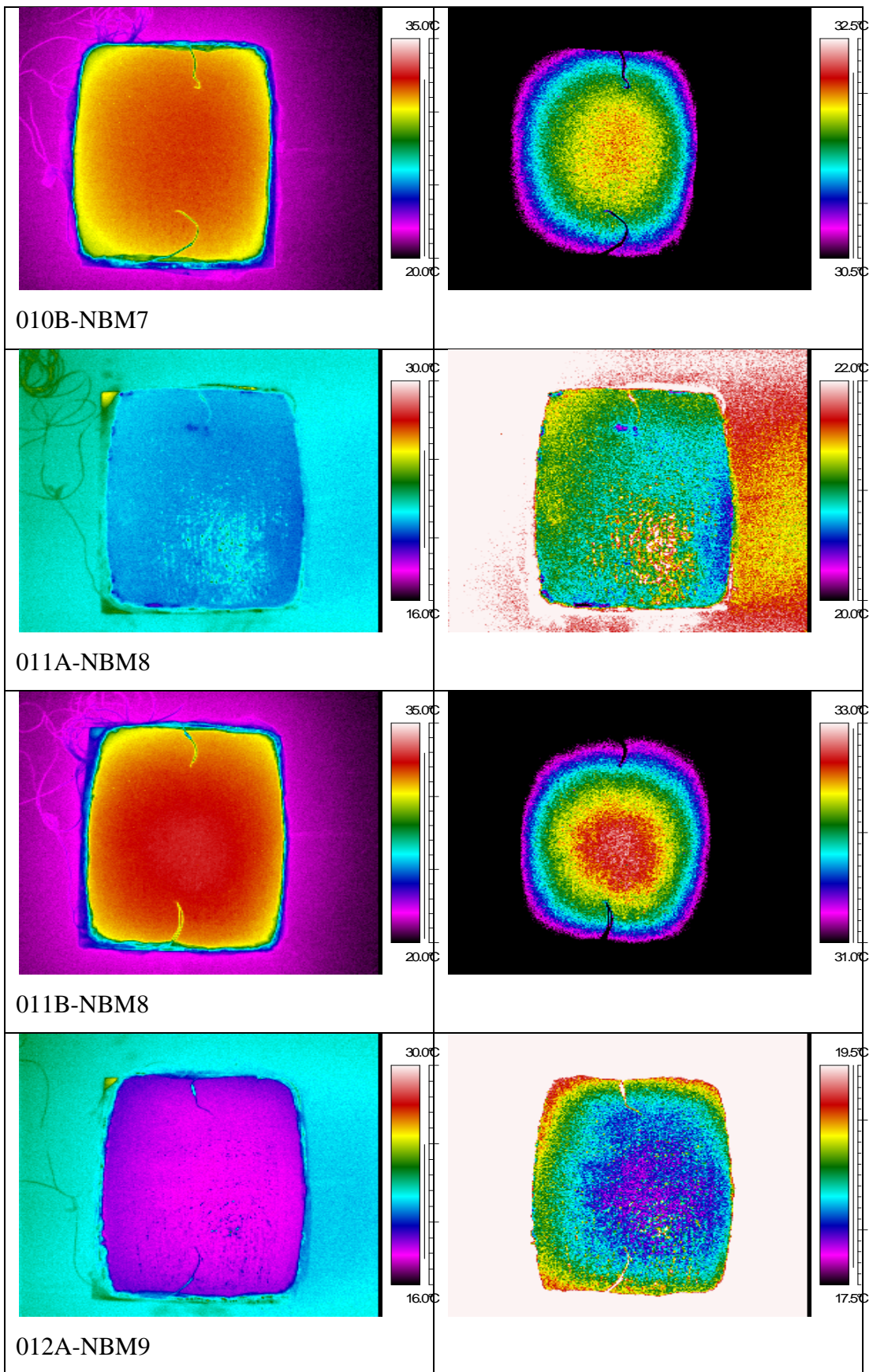
A 2 IR-Bilder einer kompletten Serie bei „30°C ohne Wind“¹

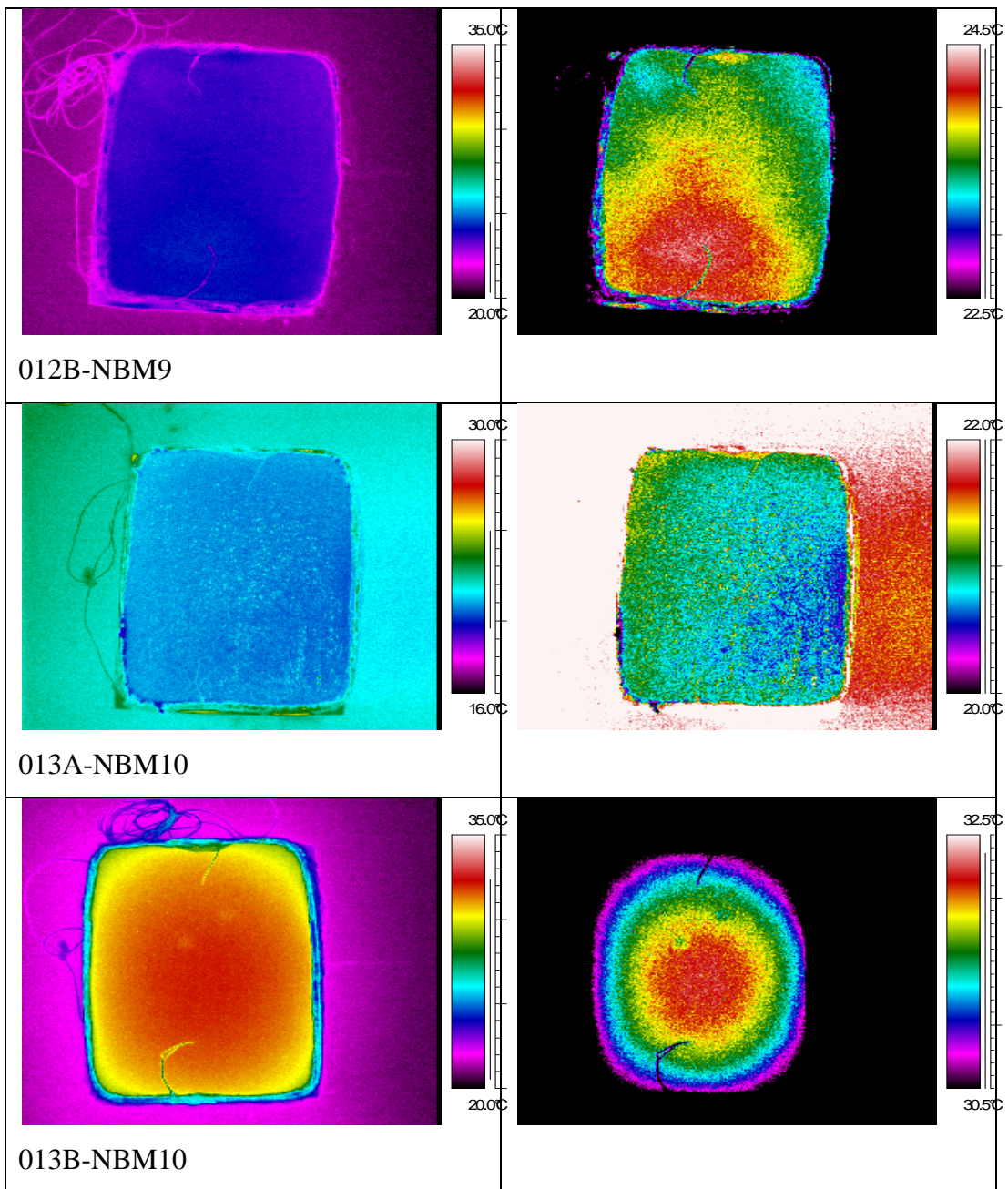
¹ Nach der dreistelligen Bezeichnung der Probe bezeichnet ein A die Messung direkt nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels und ein B die Aufnahme nach 4 Stunden Klimalagerung.





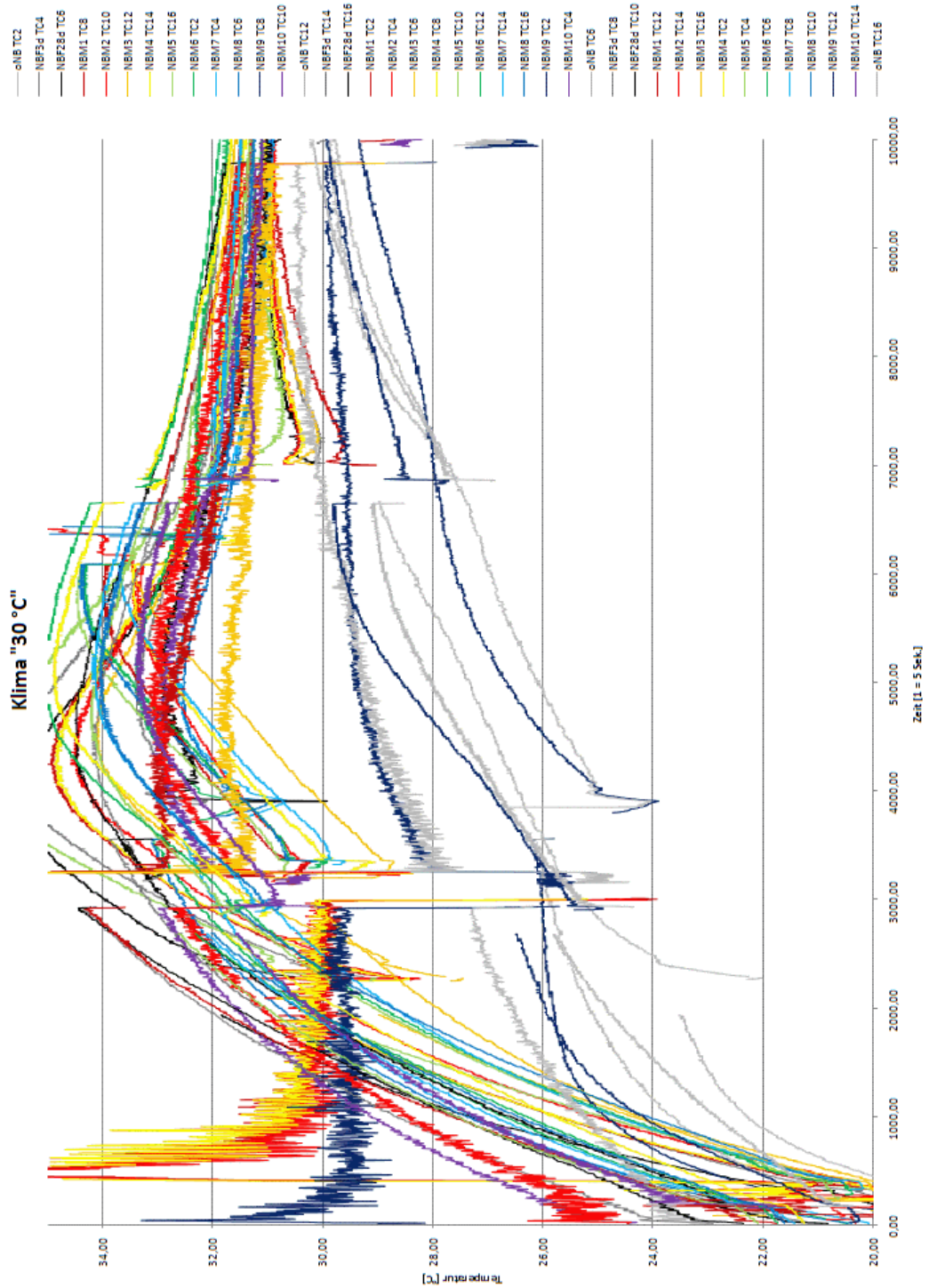




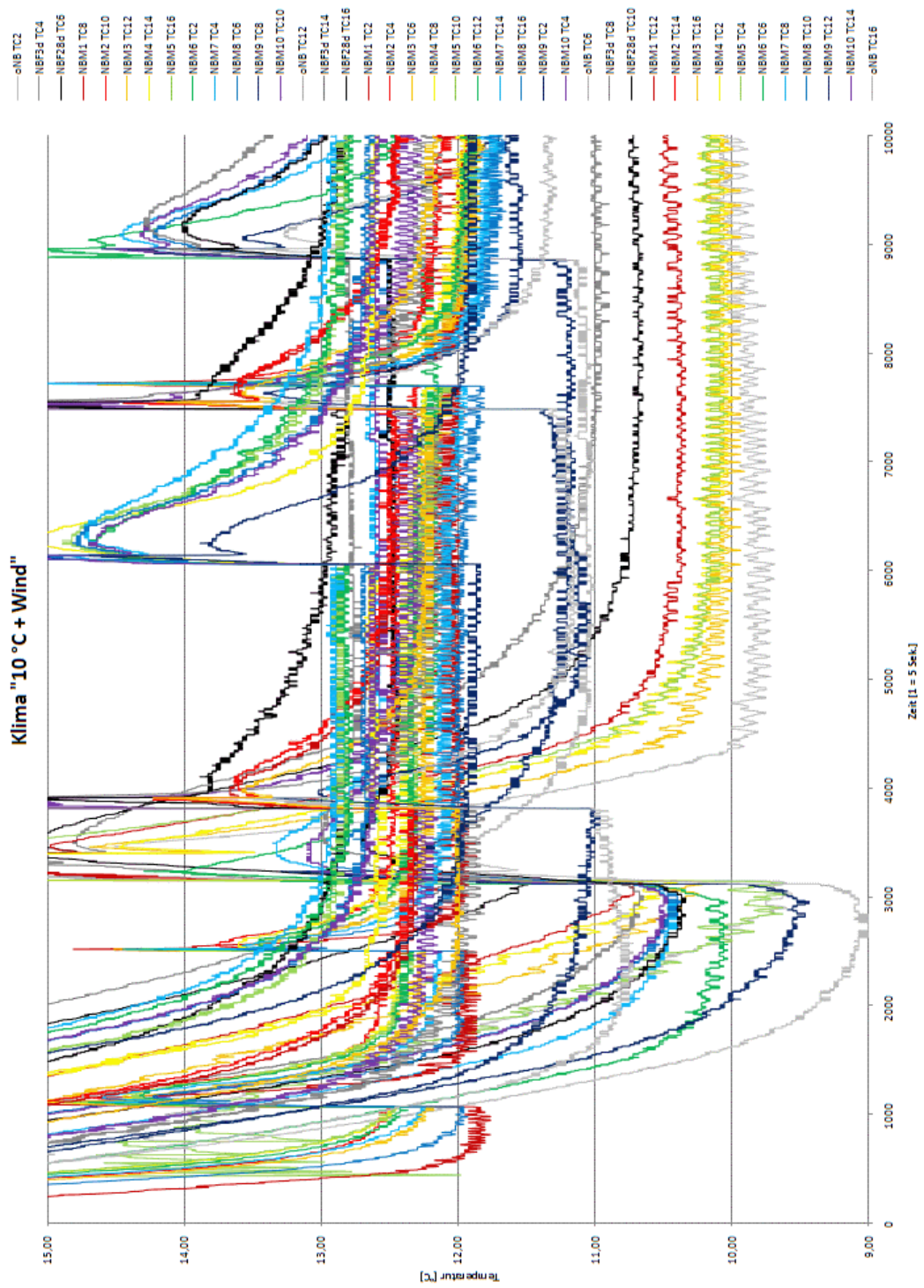


A 3 Oberflächentemperaturverläufe bei unterschiedlichen Klimaten

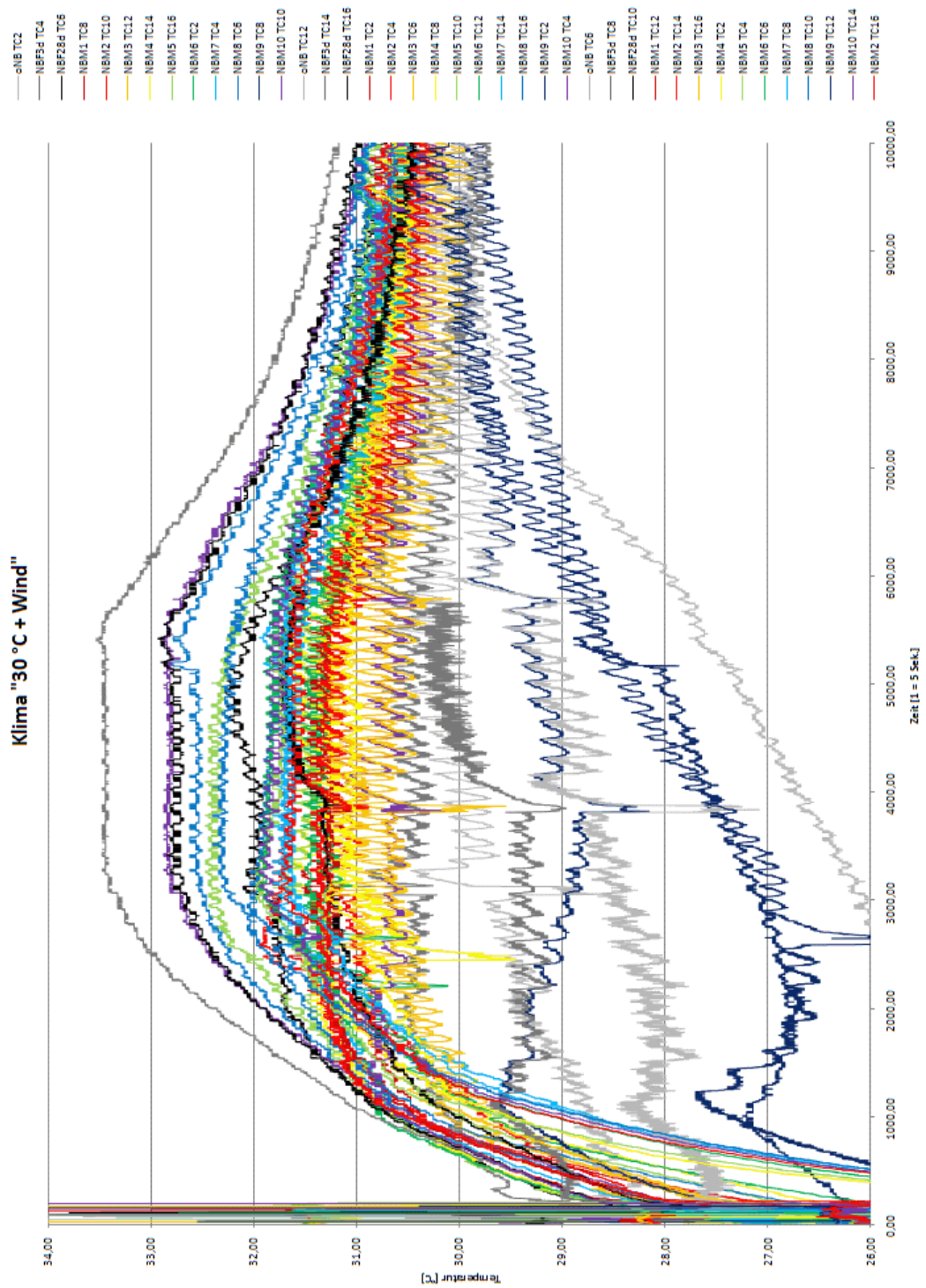
I. Klima „30°C ohne Wind“



II. Klima „10°C mit Wind“

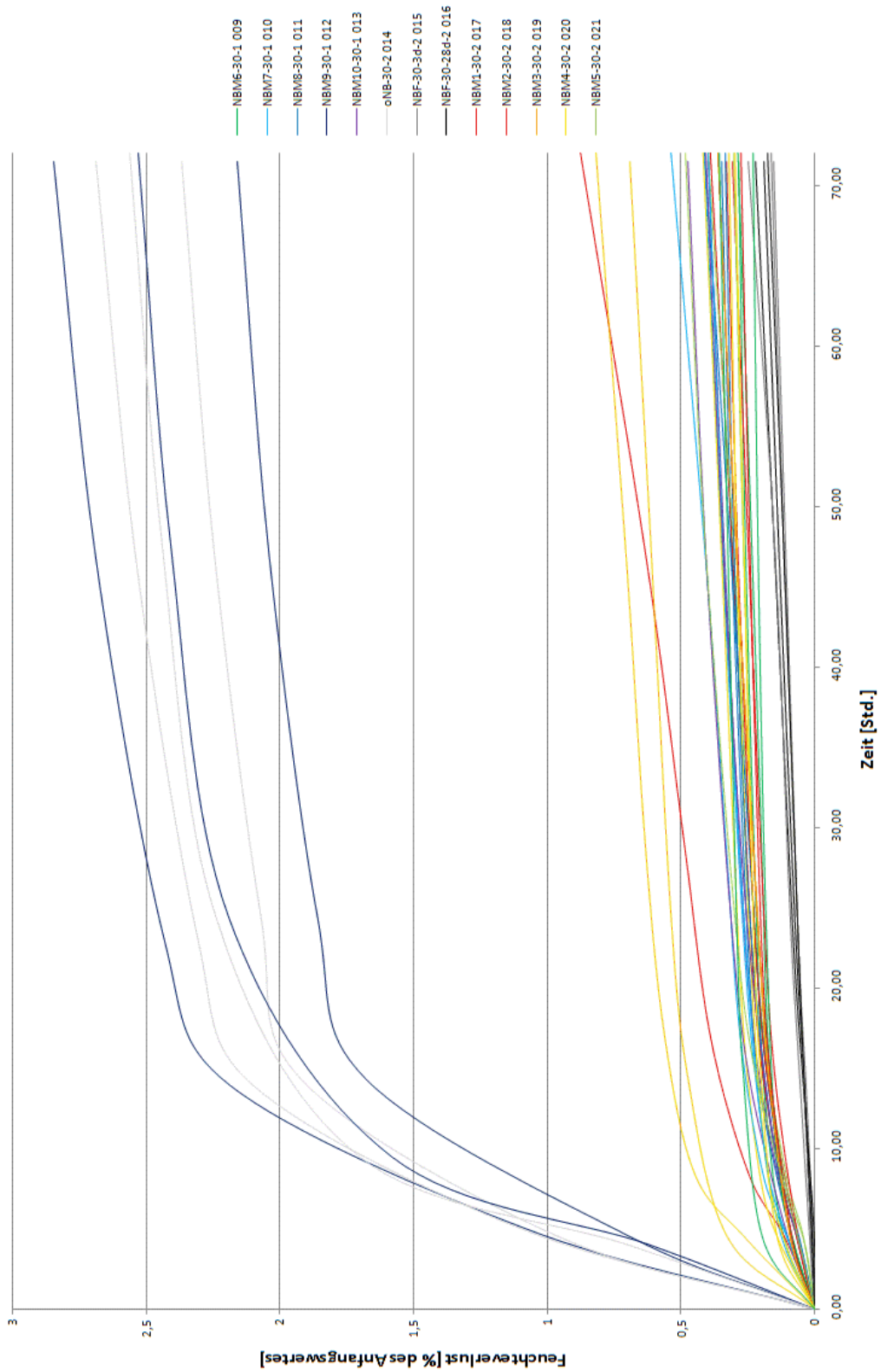


III. „30°C mit Wind“

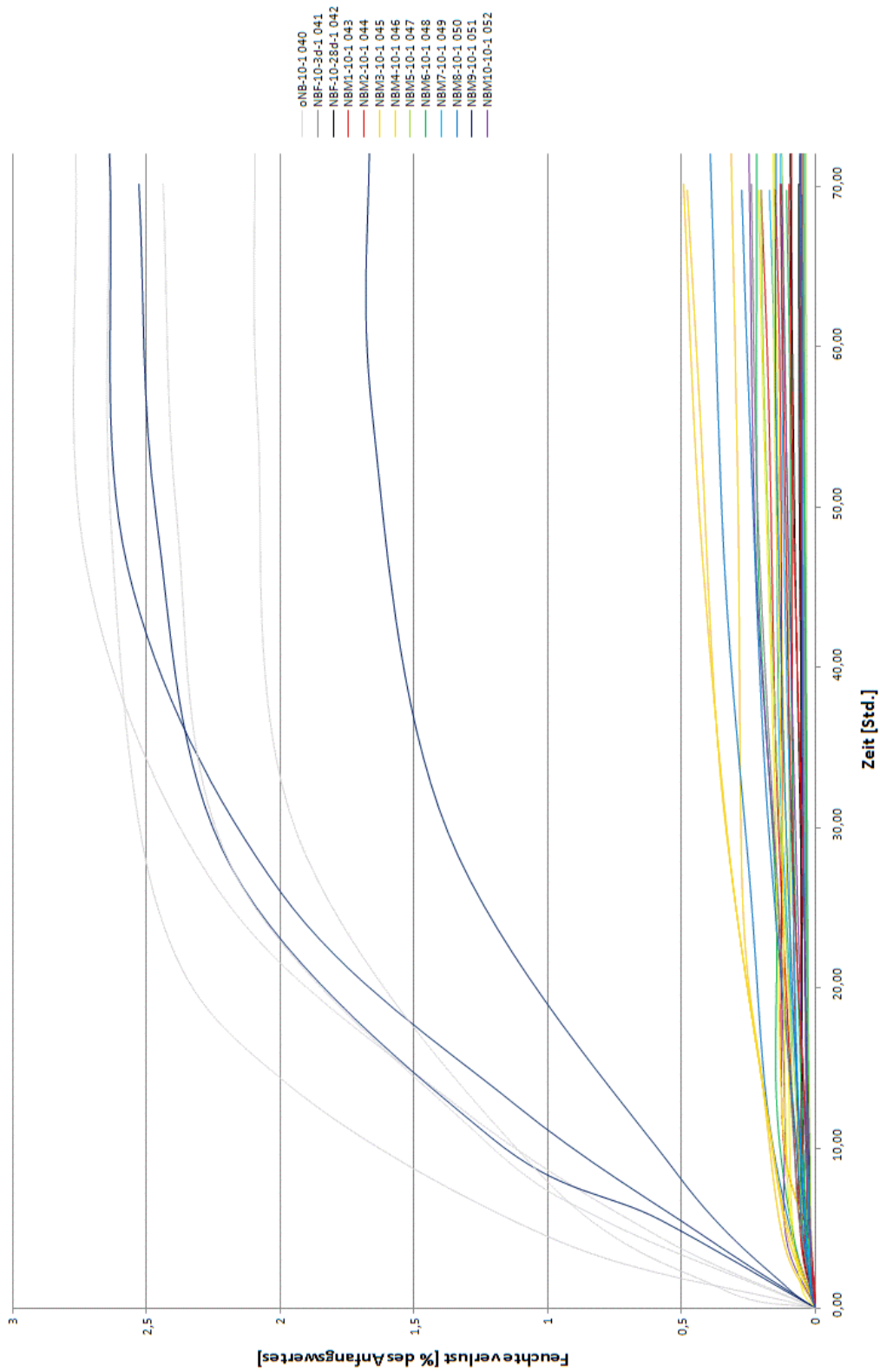


A 4 Relativer Wasserverlust klimabezogen über 72 Stunden

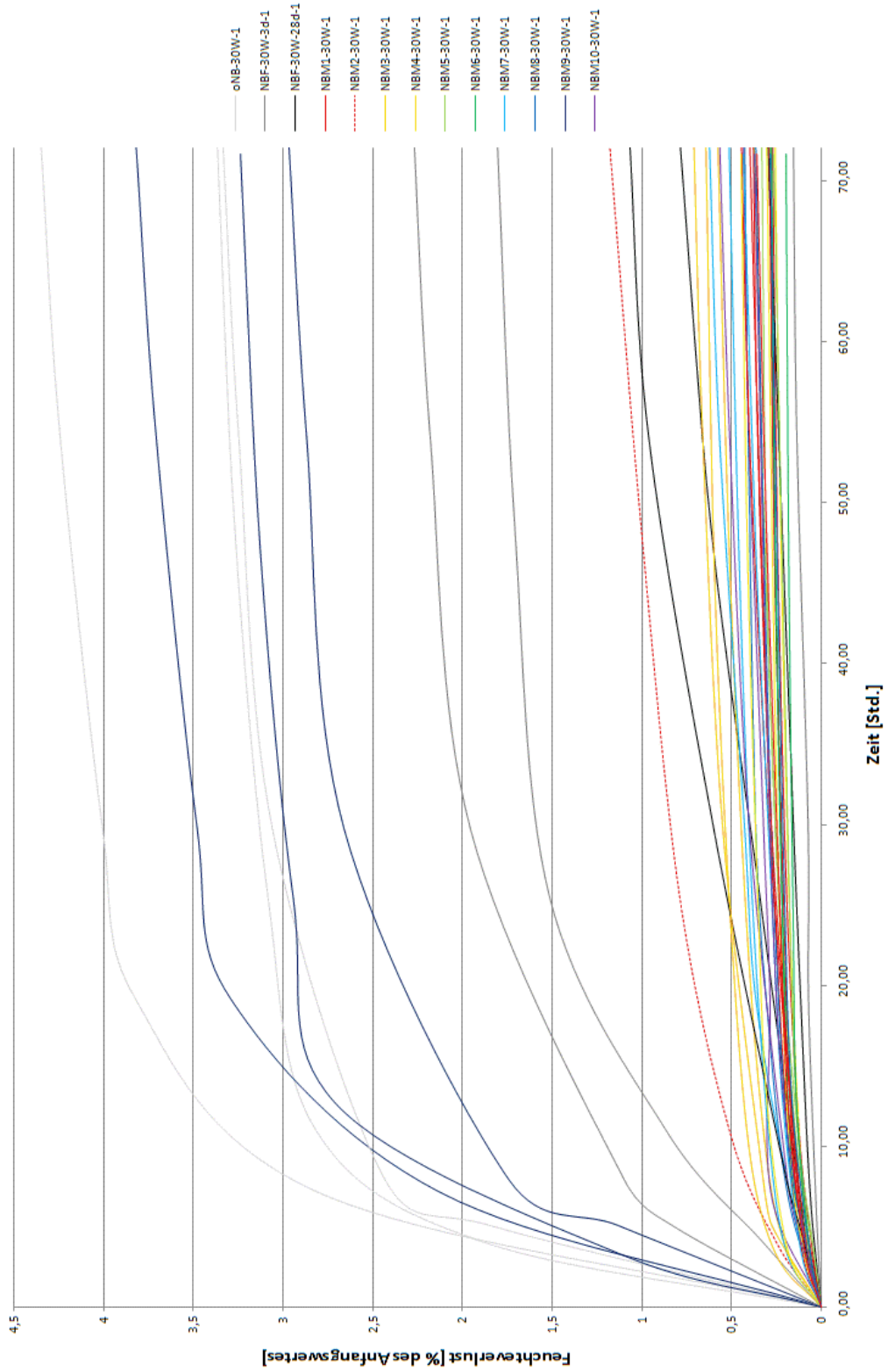
I. Klima „30°C ohne Wind“



II. Klima „10°C mit Wind“

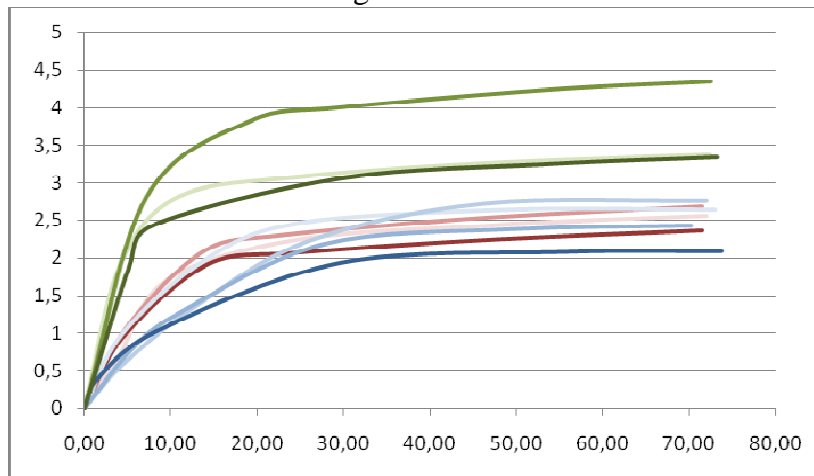


III. Klima „30°C mit Wind“

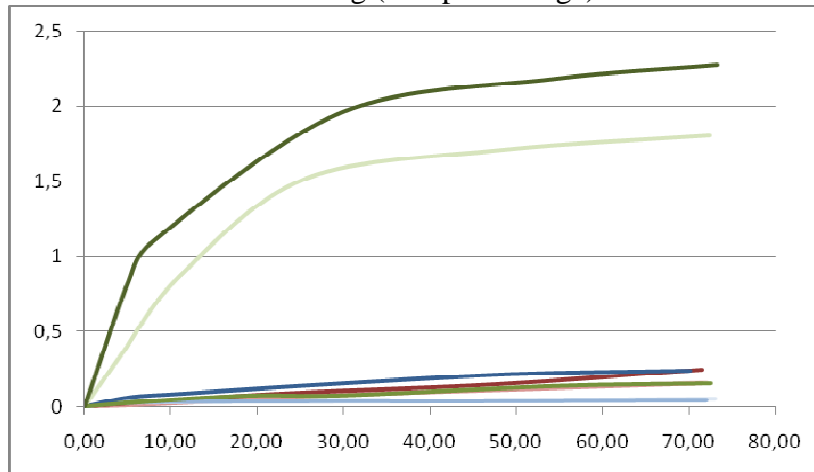


A 5 Wasserverlust: Einfluss des Klimas je Nachbehandlungsmethode¹

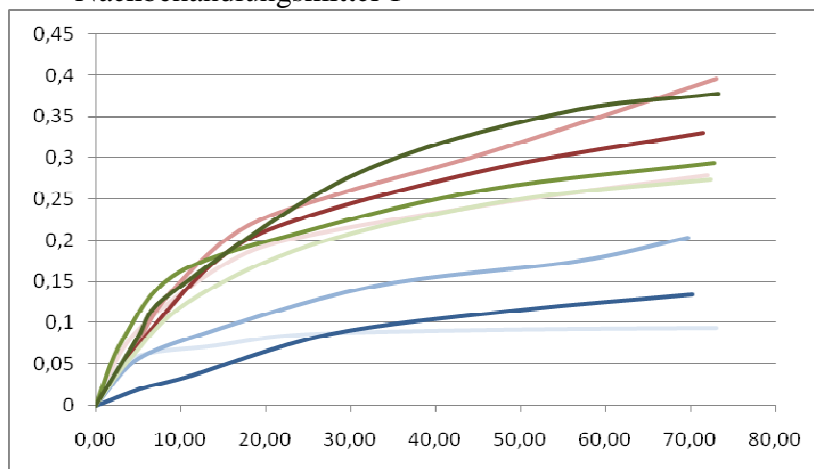
I. Ohne Nachbehandlungsmittel



II. Foliennachbehandlung (Beispiel 3 Tage)

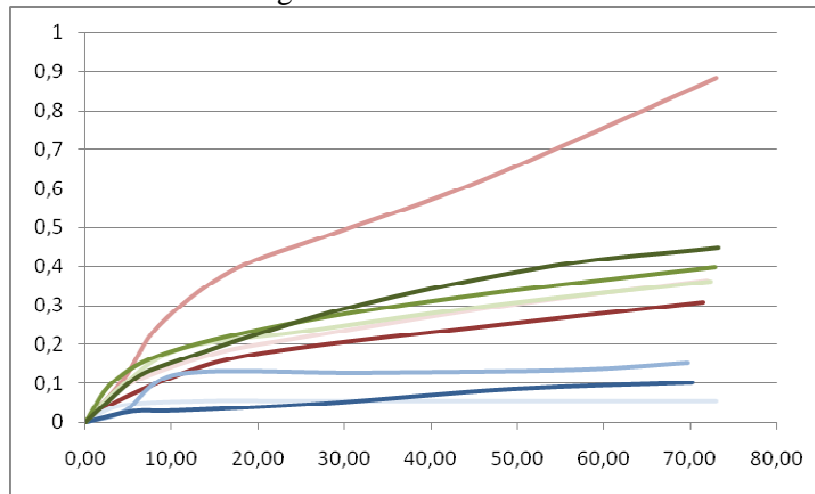


III. Nachbehandlungsmittel 1

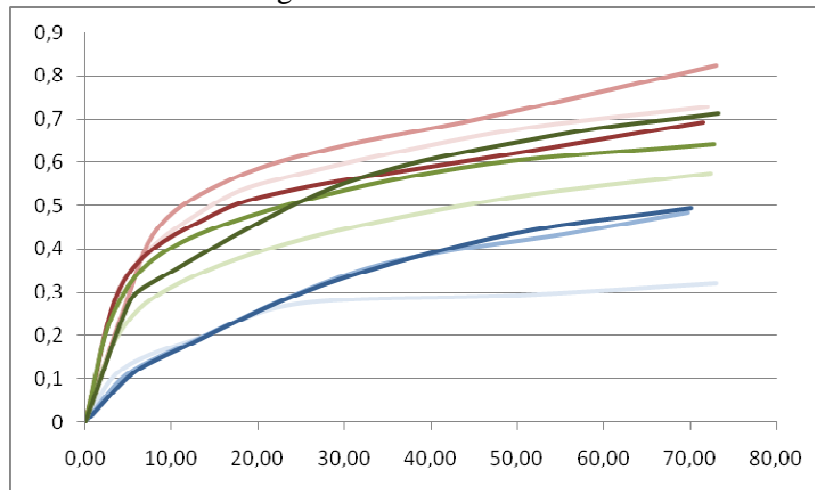


¹ Bedeutung: Rot = „30°C o. W.“, Blau = „10°C m. W.“, Grün = „30°C m. W.“

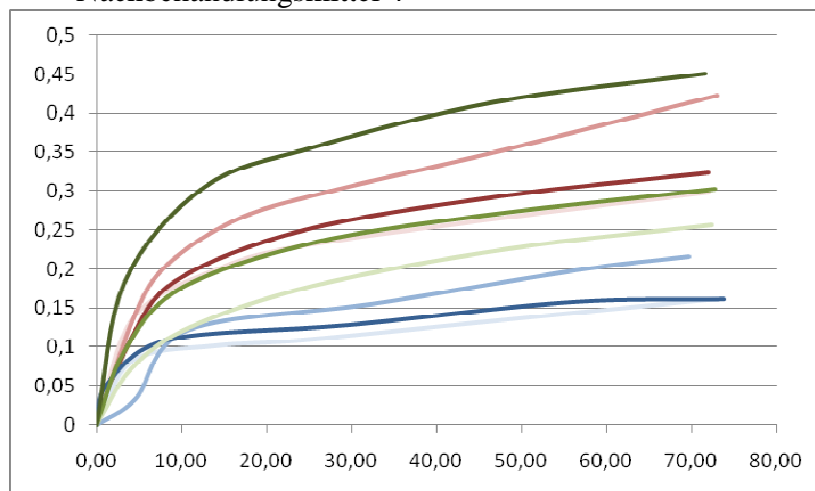
IV. Nachbehandlungsmittel 2



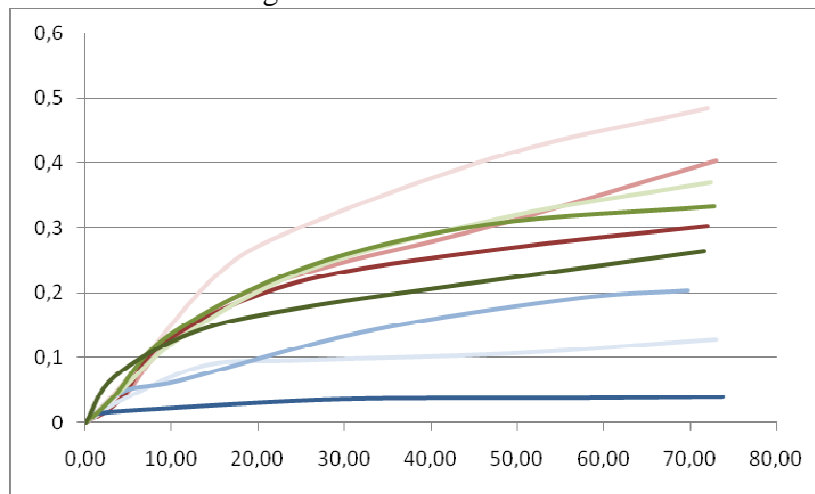
V. Nachbehandlungsmittel 3



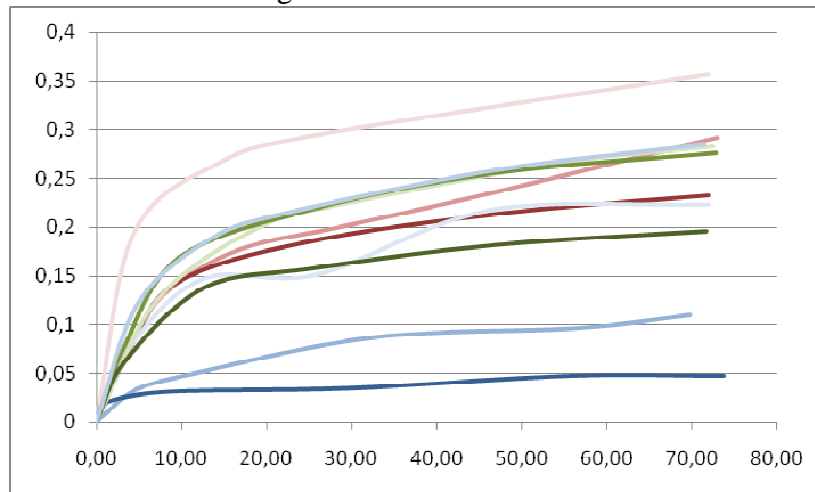
VI. Nachbehandlungsmittel 4



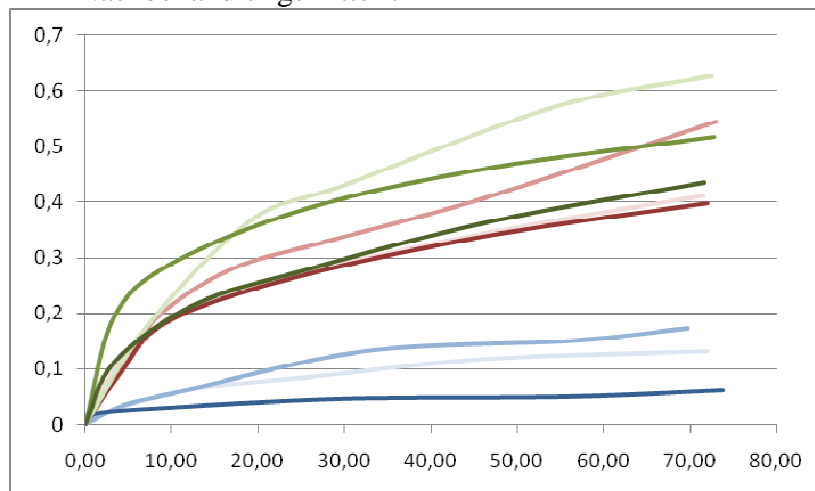
VII. Nahbehandlungsmittel 5



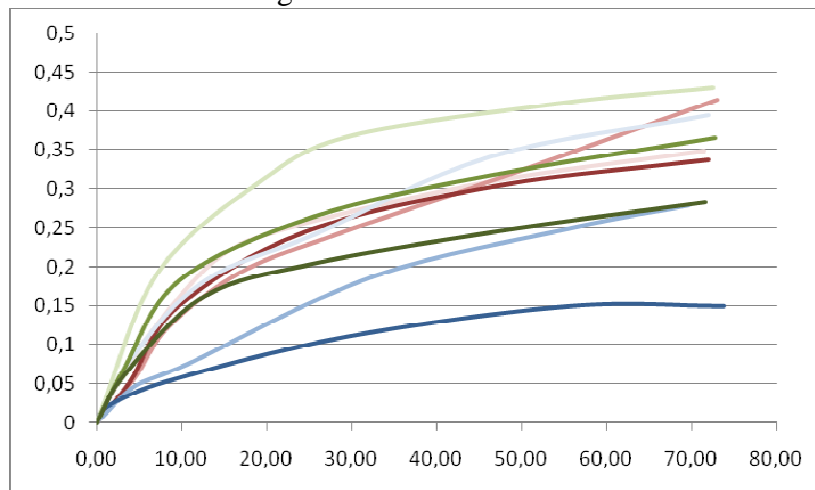
VIII. Nachbehandlungsmittel 6



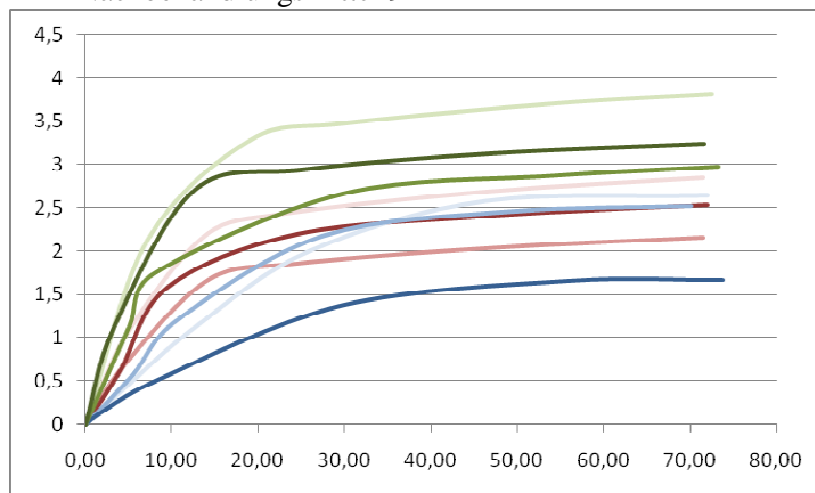
IX. Nachbehandlungsmittel 7



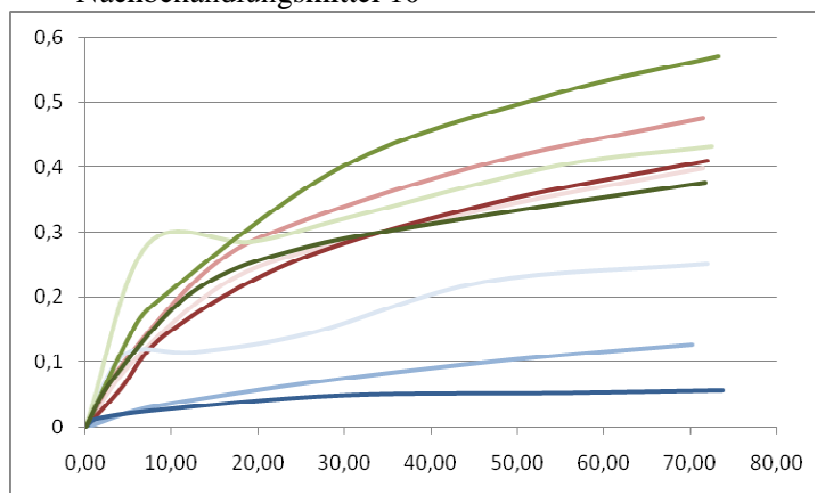
X. Nachbehandlungsmittel 8



XI. Nachbehandlungsmittel 9



XII. Nachbehandlungsmittel 10



A 6 Gesamtübersicht Biegezugfestigkeit

Klima "30°C"	oNB	NBF3d	NBF28d	NBM1	NBM2	NBM3	NBM4	NBM5	NBM6	NBM7	NBM8	NBM9	NBM10
A	3.493	3.744	3.668	3.593	3.766	3.634	3.641	3.529	3.142	3.974	4.936	3.958	4.096
B	3.287	3.646	3.861	3.508	3.240	3.959	3.627	3.781	4.103	4.250	4.122	4.209	3.470
C	2.944	3.594	3.421	3.532	3.728	3.656	3.541	3.748	4.197	4.122	3.924	3.624	4.140
A	3.509	4.032	4.264	3.998	3.466	3.212	3.622	3.180	3.694	3.675	3.686	3.581	3.427
B	3.091	4.008	4.076	3.207	3.628	3.482	3.070	3.534	3.227	3.715	3.519	4.041	2.642
C	3.922	3.754	4.406	3.292	3.699	3.540	3.403	3.303	3.519	3.497	3.621	4.370	3.958
A	3.472	4.009	4.329	3.497	3.653	4.702	2.934	3.623	3.959	3.006	3.501	2.544	3.165
B	2.949	3.825	4.207	3.918	4.091	3.958	3.574	2.947	3.613	3.391	3.552	3.116	3.847
C	3.536	3.877	4.430	4.355	4.081	4.367	3.698	3.275	3.102	3.142	3.559	3.007	3.696
Mittelwert [N/mm²]	3.356	3.832	4.051	3.611	3.708	3.834	3.457	3.435	3.550	3.641	3.824	3.606	3.605
Prozent vom Besten	82,83	94,58	100,00	89,13	91,53	94,64	85,32	84,80	87,63	89,88	94,40	89,00	88,97
Gesamtrang	13	3	1	7	5	2	11	12	10	6	4	8	9
RANG NBM	5	3	1	1	3	1	9	10	8	4	2	6	7
BEWERTUNG NBM	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-

Klima "10°C+W"	oNB	NBF3d	NBF28d	NBM1	NBM2	NBM3	NBM4	NBM5	NBM6	NBM7	NBM8	NBM9	NBM10
A	2.097	2.478	2.356	2.406	3.033	2.254	2.550	2.892	3.076	3.332	3.046	3.400	3.284
B	2.516	2.587	2.445	2.479	2.582	2.738	2.362	2.872	3.257	3.129	2.931	2.979	2.682
C	2.186	2.474	2.299	2.684	2.794	2.431	2.671	3.004	3.341	2.986	3.440	3.096	3.221
A	3.125	3.558	3.462	3.791	2.842	3.658	3.518	3.340	3.708	3.406	3.694	3.315	3.628
B	2.865	3.316	3.303	3.831	3.688	3.688	3.518	3.637	3.823	3.307	3.438	3.268	4.174
C	2.725	3.800	3.351	3.701	3.120	3.443	3.300	3.685	4.019	3.905	3.734	3.247	3.795
A	3.016	4.240	3.645	4.261	4.302	4.913	3.821	3.685	3.857	3.832	3.553	2.958	3.799
B	2.994	4.046	4.260	3.952	3.763	4.026	3.861	3.635	3.587	3.232	3.826	3.207	3.148
C	3.266	4.164	4.344	3.989	3.984	4.446	4.212	3.908	3.639	3.954	4.059	3.795	3.582
Mittelwert [N/mm²]	2.867	3.407	3.274	3.455	3.345	3.593	3.313	3.423	3.590	3.455	3.525	3.252	3.479
Prozent vom Besten	79,88	94,91	91,21	96,24	93,19	98,42	92,28	95,36	100,00	96,24	98,18	90,59	96,92
Gesamtrang	13	8	11	5	9	2	10	7	1	5	3	12	4
RANG NBM	5	8	11	5	8	2	9	7	1	5	3	10	4
BEWERTUNG NBM	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+

Klima "30°C+W"	oNB	NBF3d	NBF28d	NBM1	NBM2	NBM3	NBM4	NBM5	NBM6	NBM7	NBM8	NBM9	NBM10
A	3.386	2.978	2.780	3.528	3.603	3.883	2.919	3.354	3.395	3.389	3.157	2.927	3.007
B	2.926	3.280	3.238	3.385	3.924	3.766	3.168	3.329	3.605	3.064	3.170	2.954	3.250
C	3.213	3.571	3.645	3.288	3.269	3.923	3.255	3.366	3.006	3.205	3.017	2.696	3.095
A	3.044	3.117	3.554	3.882	2.950	3.793	4.101	3.850	3.713	4.018	3.953	2.509	3.363
B	2.700	3.336	3.481	3.743	3.958	3.889	3.656	3.797	3.839	3.714	3.855	2.784	3.478
C	2.657	2.939	2.906	3.230	3.697	3.498	3.114	3.189	3.797	3.447	3.639	2.704	3.497
A	2.584	2.995	3.101	3.481	4.058	3.811	4.137	3.242	3.768	3.997	3.891	3.284	3.579
B	2.384	2.814	2.593	3.442	3.007	3.393	3.256	3.360	3.067	3.519	3.889	2.793	3.218
C	2.715	2.952	2.897	3.536	2.426	3.382	3.498	3.341	3.571	3.942	3.638	3.520	3.171
Mittelwert [N/mm²]	2.843	3.105	3.244	3.502	3.432	3.704	3.456	3.425	3.529	3.588	3.579	2.908	3.295
Prozent vom Besten	76,76	83,83	87,57	94,53	92,66	100,00	93,30	92,47	95,27	96,87	96,61	78,50	88,96
Gesamtrang	13	11	10	5	7	1	6	8	4	2	3	12	9
RANG NBM	4	5	7	5	7	1	6	8	4	2	3	10	9
BEWERTUNG NBM	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-

A 7 Verdunstung abzüglich NBM-Eigenverdunstung

