

Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton

Influence of constituents and concrete composition on the shrinkage and swelling of paving concrete

Übersicht

Betonfahrbahnen weisen bei sachgerechter Herstellung und ausreichender Dimensionierung eine lange Lebensdauer auf. In den letzten Jahren traten jedoch an einzelnen Fahrbahndecken Oberflächenrisse auf, die unter weiterer Verkehrsbeanspruchung zu einer zunehmenden Schädigung des Betons geführt haben. Zur Klärung der Ursachen dieser Oberflächenrißbildung wurde ab 1993 ein breit angelegtes Forschungsprogramm durch den Bundesminister für Verkehr gefördert. Ziel dieses Forschungsprogramms war es, die Rißbildung in Betonfahrbahndecken durch eine bessere Kenntnis möglicher Schädigungsabläufe zu klären und daraus vorbeugende Maßnahmen zur Begrenzung der Oberflächenrißbildung abzuleiten. An der Durchführung der in fünf Themenschwerpunkte unterteilten Untersuchungen war das Forschungsinstitut der Zementindustrie beteiligt. In dem Teilvorhaben des Forschungsinstituts wurde untersucht, ob und in welchem Maße das Quell- und Schwindverhalten von Straßenbeton durch verschiedene Zemente und Zuschläge und unterschiedliche Betonzusammensetzungen beeinflusst wird. Hierzu wurden Betonprobekörper mit unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen gezielt ausgewählten Lagerungsbedingungen ausgesetzt und das Quellen und Schwinden der Probekörper gemessen. Die Schwindwerte von Beton mit unterschiedlichen Zementen oder unterschiedlichen Zuschlägen wichen um bis zu rd. 15 % vom mittleren Schwindverhalten ab. Eine statistisch gesicherte systematische Abhängigkeit der im Labor ermittelten Schwindwerte des Betons von den Zementeigenschaften oder Zementzusammensetzungen konnte nicht nachgewiesen werden. Bei einer baupraktischen Bewertung der Laborergebnisse muß berücksichtigt werden, daß Schwindverformungen unter den realen Bedingungen einer Betonfahrbahndecke – u.a. wegen der höheren Luftfeuchtigkeit häufig nur 50 % der im Labor gemessenen Werte erreichen, wodurch stofflich bedingte Unterschiede zwischen Betonen mit verschiedenen Zementen und Zuschlägen noch geringer ausfallen. Der Einfluß unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen auf das Quellen von Straßenbeton ist bei Verwendung nicht quellfähiger Zuschläge vernachlässigbar.

Abstract

If dimensioned and fabricated properly, concrete road pavings tend to have a long service life. In recent years, however, surface cracks occurred on road pavings in individual cases, initiating more severe damage to the concrete under service conditions. To pinpoint the causes of this surface cracking the Federal Ministry of Transport started sponsoring a comprehensive research programme in 1993. The target of this research programme was to identify the causes of cracking in concrete road pavings by getting a better understanding of how the damage might develop, and to infer preventive steps to limit surface cracking. The Research Institute of the German Cement Industry participated in carrying out the investigations, which were subdivided into five main topics. The subproject that the Research Institute was in charge of was concerned with investigating whether and to what extent the swelling and shrinkage behaviour of paving concrete is influenced by different cements and aggregates and different concrete compositions. To that effect, concrete specimens made from different mix compositions were exposed to purposefully selected storage conditions, and the swelling and shrinkage of the specimens were measured. The shrinkage values of concrete made from different cements or different aggregates deviate from the mean shrinkage behaviour by up to about 15 %. No statistically proven systematic dependence of the shrinkage values of the concrete measured in the laboratory on the cement properties or the cement compositions was detected. When interpreting the laboratory results in a construction practice context, it must be taken into account that deformation due to shrinkage occurring under the actual conditions a concrete road paving is exposed to – among other things owing to higher air moisture – generally amounts to a mere 50 % of the values measured in the laboratory. Thus, the material-related differences between concretes made from different cements and aggregates are even slighter. The influence of different constituents and concrete compositions on swelling of paving concrete is negligible if non-expansive aggregates are used.

1 Einleitung

Fahrbahndecken aus Beton unterliegen im Laufe ihrer Lebensdauer einer Vielzahl von Beanspruchungen aus Verkehr und Witterungseinflüssen. Ausreichend dimensionierte, sachgerecht hergestellte Fahrbahndecken widerstehen diesen Beanspruchungen über

1 Introduction

During the course of their service lives carriageway pavings made of concrete are subjected to a great many stresses from traffic and weather. Adequately dimensioned and properly fabricated carriageway pavings can withstand these stresses for a long time and have

einen langen Zeitraum, so daß sie eine lange Lebensdauer aufweisen. Einige ausreichend dicke Betonfahrbahndecken haben sogar eine Lebensdauer von über 50 Jahren erreicht. An einigen Fahrbahnabschnitten sind jedoch in den letzten Jahren Oberflächenrisse aufgetreten [1, 2], von denen eine weitergehende Schädigung der Betondecke ausging. Oberflächenrisse können durch eine Vielzahl von sich häufig überlagernden Einflüssen verursacht werden. Zum einen haben sie ihre Ursache in lastabhängigen Beanspruchungen aus Verkehr, zum anderen in lastunabhängigen Beanspruchungen. Letztere sind auf unterschiedliche, zum Teil nichtlineare Feuchte- und/oder Temperaturverteilungen zurückzuführen. Als weitere Schadensursache kann auch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion, wie z.B. in Betonfahrbahndecken mit präkambrischer Grauwacke in den neuen Bundesländern, in Betracht kommen [3, 4]. Verschiedentlich wird auch eine nachträgliche Ettringitbildung vermutet [5]. Schäden können zudem durch konstruktive Mängel (z.B. zu geringe Deckendicke oder mangelhafte Entwässerung) oder Fehler bei der Bauausführung (z.B. mangelhafte Nachbehandlung oder zu spätes Schneiden der Fugen) verursacht werden. Zur weitergehenden Klärung möglicher Schadensabläufe wurde vom Bundesminister für Verkehr ein Forschungsprogramm aufgelegt, das nach mehrjähriger Laufzeit nun zum Abschluß gelangt. Darin wurden die Einflüsse der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf Formänderung und Rißbildung ermittelt, wobei auch Untersuchungen zur Ettringitbildung, nicht jedoch zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion eingeschlossen waren. Durch numerische Untersuchungen wurde zudem die Rißentwicklung in Fahrbahndecken infolge lastabhängiger und lastunabhängiger Beanspruchung simuliert. In einem Teilprojekt, über das im folgenden berichtet wird, wurde der Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie untersucht.

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Allgemeines

Als Schwinden und Quellen – häufig als hygrische Verformungen bezeichnet – werden Volumenänderungen von Zementstein, Mörtel oder Beton verstanden, die durch Änderungen des Feuchtegehaltes im Zementstein auftreten. Umgebungsbedingte Änderungen des Feuchtegehaltes im Beton erfolgen durch kapillaren Wassertransport und Diffusion. Diese Zusammenhänge sind u.a. in [2, 6, 7] näher dargestellt. Die Verformungen werden durch Volumenänderungen der schichtförmig aufgebauten Hydratationsprodukte infolge von Entzug oder Einbau von Zwischenschichtwasser hervorgerufen oder sie resultieren aus den Kapillarkräften, die an den Grenzflächen zwischen Wasser und Kapillarporenwandung auf die Feststoffpartikel dieser Porenwandungen ausgeübt werden (Kapillarszension). Die Intensität dieser Kräfte steigt mit abnehmendem Porenradius und hängt somit von der Porengrößenverteilung im Zementstein ab. Feinere Poren im Zementstein bewirken größere Kapillarkräfte, die mit größeren Verformungen bei insgesamt geringeren Wassergehaltsänderungen verbunden sind (Mikrokapillaren mit geringem Porendurchmesser). Änderungen des Feuchtegehaltes in großen Kapillarporen (Makrokapillaren) verursachen dagegen nur vergleichsweise geringe Kapillarkräfte und haben somit trotz höherer Wassergehaltsschwankungen geringere Verformungen zur Folge.

Beim **Schwinden** unterscheidet man vier verschiedene Arten: Das **Frühschwinden** (plastisches Schwinden) entsteht durch Entzug des Wassers aus dem frischen, noch verarbeitbaren, formbaren Beton, z.B. durch wassersaugende Zuschläge oder durch Verdunstung an der Oberfläche. Durch eine rechtzeitige Nachbehandlung von Betonstraßendecken kann ein Frühschwinden vermieden werden. Das **Carbonatisierungsschwinden** wird durch Freisetzen und Verdampfen chemisch gebundenen Wassers infolge Carbonatisierung hervorgerufen. Es spielt bei Betondecken wegen der vernachlässigbaren Carbonatisierung keine Rolle. **Chemisches Schwinden** (Schrumpfen) entsteht durch eine Volumenverminderung infolge der chemischen Einbindung des Anmachwassers in die Hydratphasen während der Hydratation (inneres Austrocknen) und hängt von der Betonzusammensetzung, insbesondere vom w/z-Wert ab [6]. Das **Trocknungsschwinden** wird

long service lives. Some concrete carriageway pavings that are sufficiently thick have even achieved useful lives of over 50 years. However, surface cracks have appeared in some carriageway sections in recent years [1, 2] which have then been the source of more extensive damage to the concrete paving. Surface cracks can be caused by a large number of influencing factors which are frequently superimposed on one another. In some cases they have their origins in load-dependent stresses from traffic, in others in stresses which are independent of the loading. The latter can be attributed to differing, and in some cases non-linear, moisture and/or temperature distributions. Another possible source of damage can be an alkali-silica reaction, e.g. in the concrete carriageway pavings made with Precambrian greywacke in the new federal states [3, 4]. Secondary ettringite formation is occasionally also suspected [5]. Damage can also be caused by design deficiencies (e.g. inadequate thickness of paving or deficient drainage) or faults during construction (e.g. deficient curing or cutting the induced joints too late). To provide more extensive clarification of the possible damage processes the Federal Ministry of Transport set up a research programme which ran for several years and has now finished. The effect of the constituents and the concrete composition on change in shape and cracking was determined, and investigations into ettringite formation, but not into the alkali-silica reaction, were also included. Crack development in carriageway pavings as a result of load-dependent and -independent stressing was also simulated by numerical investigations. The influence of the constituents and concrete composition on the shrinkage and swelling of paving concrete was investigated by the Research Institute of the Cement Industry in a subsidiary project which is described below.

2 Current state of knowledge

2.1 General

Shrinkage and swelling – also referred to as hygro-deformation – are understood to mean volume changes of the hardened cement paste, mortar or concrete which occur as a result of changes in moisture content of the hardened cement paste. Changes in the moisture content of the concrete caused by the surroundings take place through capillary water transport and diffusion. These relationships are described in greater detail in, among other places, [2, 6, 7]. The deformations are either caused by volume changes of the layered hydration products as a result of the removal or addition of water between the layers, or they result from the capillary forces which are exerted at the interfaces between water and capillary wall on the solid particles containing these pore walls (capillary rise). The intensity of these forces increases with decreasing pore radius and therefore depends on the pore size distribution in the hardened cement paste. Finer pores in the hardened cement paste produce greater capillary forces which are associated with larger deformations for smaller overall changes in water content (microcapillaries of small pore diameter). In contrast, changes of moisture content in large capillary pores (macrocapillaries) cause only comparatively small capillary forces and therefore result in smaller deformations in spite of the greater fluctuations in water content.

There are four different types of shrinkage. **Early shrinkage** (plastic shrinkage) results from the withdrawal of water from the fresh, mouldable concrete while it is still workable by, for example, water-absorbent aggregates or by evaporation at the surface. Early shrinkage of concrete road pavings can be avoided by timely curing. **Carbonation shrinkage** is caused by the liberation and vaporization of chemically combined water as a result of carbonation. It plays no part in concrete pavings due to the negligible amount of carbonation. **Chemical shrinkage** (contraction) is caused by reduction in volume as a consequence of the chemical fixation of the mixing water in the hydrate phases during hydration (internal drying) and depends on the concrete composition, especially on the w/c ratio [6]. **Drying shrinkage** is caused by the loss of the free, chemically uncombined, water from the capillary pores of the hardening solid concrete (external drying). **Drying shrinkage** depends, above all, on the ambient moisture, the concrete composition and the dimensions of the component. Shrinkage deformation of concrete carriageway pavings is influenced greatly by drying shrinkage and to a lesser extent by chemical shrinkage.

durch Abgabe des chemisch nicht gebundenen freien Wassers aus den Kapillarporen des erhärteten Festbetons hervorgerufen (äußeres Austrocknen). Das Trocknungsschwinden hängt vor allem von der Umgebungsfeuchte, der Betonzusammensetzung und den Bauteilabmessungen ab. Einfluß auf die Schwindverformung der Betonfahrbahndecke hat insbesondere das Trocknungsschwinden und in geringerem Maße das chemische Schwinden.

Bei mindestens eintägiger Schalzeit und Austrocknung im Klima 20 °C/65 % r.F. beträgt das gesamte Schwinden von Zementstein mit w/z-Werten zwischen 0,4 und 0,6 rd. 3 bis 4 ‰ [6]. Für praxisnahe Betone mit nichtschwindenden quarzitischen Zuschlägen reduziert sich dieser Wert infolge des geringeren Zementsteinanteils des Betons und der aussteifenden Wirkung des Zuschlagkorngerüsts auf rd. 0,6 bis 0,8 ‰, also auf rd. 1/5. Dieser für Laborbedingungen gültige Wert vermindert sich unter den in Deutschland üblichen Praxisbedingungen wegen der gegenüber den Versuchsbedingungen höheren mittleren Luftfeuchtigkeit (im Mittel rd. 80 %) nochmals auf rd. die Hälfte. Das Schwinden einer Betondecke beträgt unter praktischen Bedingungen erfahrungsgemäß maximal 0,3 ‰ [8]. Langzeitmessungen an einer Autobahn ergaben nach 12 Jahren ein Schwindmaß von 0,2 ‰, wobei die Nullmessung bereits einen Tag nach dem Betoneinbau, d.h. bei vergleichsweise hoher Ausgangsfeuchte des Betons durchgeführt wurde [9].

Quellen ist die Volumenvergrößerung von Zementstein, Mörtel oder Beton infolge Feuchtigkeitsaufnahme. Das Quellen von Zementstein bei Wasserlagerung ohne vorherige Austrocknung beträgt nach Grube [6] im Alter von 120 Tagen rd. 0,6 ‰ und erreicht nach längerer Wasserlagerung rd. 1 ‰ [10]. Das Quellen von Beton bei Wasserlagerung beträgt analog zum Schwinden etwa 1/5 des Quellens von Zementstein, d.h. rd. 0,1 ‰ bis 0,2 ‰ [2, 11, 12]. Das Quellen von Beton nach vorausgehender Austrocknung kann wesentlich größere Werte annehmen und rd. 40 % bis 80 % des durch die Austrocknung bedingten Schwindens betragen [10].

Kennzeichnend für die Betonfahrbahndecke sind wegen des dichten Gefüges des Straßenbetons Feuchteänderungen (Austrocknung und Wiederbefeuchtung) im oberflächennahen Bereich, während der Beton im Kernbereich eine relativ gleichmäßige Feuchte aufweist [13]. Bei einer gefügedichten Betonfahrbahndecke führen kurzfristige Änderungen der Umgebungsfeuchte (z.B. durch Beregnung nach einer langen Trockenperiode im Sommer) nur zu Feuchtetransporten in den oberen Millimetern der Fahrbahndecke. Die aus den hygrischen Verformungen resultierenden Spannungen konzentrieren sich deshalb bei diesen kurzfristigen Feuchteänderungen auf eine geringe Tiefe. Wegen der dadurch verursachten steilen Feuchte- und Spannungsgradienten entstehen überwiegend oberflächennahe Eigenspannungen, die durch Relaxation des oberflächennahen Betons stark abgebaut werden. Nur bei langfristigen (saisonalen) Veränderungen der Feuchtebedingungen werden tiefere Bereiche der Fahrbahndecke in ihrem Feuchtehaushalt beeinflusst; die daraus resultierenden Spannungen werden zeitlich entsprechend langsam aufgebaut und durch Relaxation teilweise gemindert [8]. Bei einer mangelhaften Entwässerung des Oberbaus kann außerdem eine wechselnde Durchfeuchtung an der Unterseite der Fahrbahndecke auftreten (Fußbad).

Einflüsse auf das Schwinden von Zementstein, Mörtel und Beton wurden von zahlreichen Autoren untersucht. Zusammenfassungen sind u.a. in [2, 6, 14 bis 18] enthalten. Quellversuche wurden wesentlich seltener durchgeführt, u.a. [2, 18, 19, 20]. Beim Vergleich verschiedener Ergebnisse müssen unbedingt die Versuchsbedingungen mitberücksichtigt werden. Besonders die Vorlagerung und die Lagerung der Probekörper – d.h. die zu Versuchsbeginn vorhandene Feuchteverteilung im Beton – haben einen erheblichen Einfluß sowohl auf die Schwind- als auch auf die Quellverformung. Aber auch die Meßmethoden beeinflussen die Ergebnisse. Häufig ist in den Literaturstellen keine eindeutige Beschreibung der Versuchsbedingungen enthalten,

With a minimum of one day in the formwork and drying out under conditions of 20 °C/65 % r.h. the total shrinkage of hardened cement paste with w/c ratios between 0.4 and 0.6 is about 3 to 4 ‰ [6]. For concrete made under realistic conditions with non-shrinking quartz aggregates this value is reduced to about 0.6 to 0.8 ‰, i.e. to about 1/5, as a result of the lower proportion of cement in the concrete and the stiffening effect of the skeleton of aggregate particles. This value, which applies to laboratory conditions, is further reduced to about half under the practical conditions usual in Germany because the average ambient moisture (averaging about 80 %) is higher than for the test conditions. Experience shows that the maximum shrinkage of concrete paving under practical conditions is 0.3 ‰ [8]. Long-term measurements on a motorway showed shrinkage of 0.2 ‰ after 12 years, in which the zero measurements were made at only one day after placement of the concrete, i.e. when the concrete had a comparatively high initial moisture [9].

Swelling is the increase in volume of hardened cement paste, mortar or concrete as a result of absorption of water. According to Grube [6] the swelling of hardened cement paste during water storage without previous drying out is about 0.6 ‰ after 120 days and reaches about 1 ‰ after longer water storage [10]. The swelling of concrete during water storage is, analogous to the shrinkage, about 1/5 of the swelling of the hardened cement paste, i.e. about 0.1 ‰ to 0.2 ‰ [2, 11, 12]. The swelling of concrete after previous drying out can take on substantially larger values, amounting to about 40 to 80 % of the shrinkage caused by drying out [10].

Because of the dense microstructure of paving concrete, concrete carriageway pavings are characterized by moisture changes (drying out and re-wetting) in the region close to the surface while the concrete in the core region has a relatively uniform moisture content [13]. In a concrete carriageway paving with a dense microstructure short-term changes in the ambient moisture (e.g. caused by rain after a long dry period in summer) only lead to moisture transport into the top few millimetres of the carriageway paving. During these short term changes in moisture the stresses resulting from the deformation due to loss or gain of water are therefore concentrated close to the surface. The main effect of the resulting steep moisture and stress gradients is to produce internal stresses near the surface which are greatly reduced by relaxation of the concrete close to the surface. The moisture content of deeper parts of the carriageway paving is only affected during long-term (seasonal) changes in the moisture conditions; the resulting stresses build up correspondingly slowly and are to some extent reduced by relaxation [8]. Alternating saturation of the underside of the carriageway pavement (footbath storage) can also occur if the pavement is not properly drained.

The factors affecting the shrinkage of hardened cement paste, mortar and concrete have been examined by many authors. Summaries can be found in, among other places, [2, 6, 14 to 18]. Swelling trials, including [2, 18, 19, 20], have been carried out substantially less frequently. When comparing different results it is absolutely essential to take the test conditions into account. The preliminary and subsequent storage of the test pieces – i.e. the moisture distribution in the concrete at the start of the test – has a particularly large effect on deformation caused both by shrinkage and by swelling. The test methods also influence the results, and the literature references often do not contain any clear description of the test conditions, so it is difficult to carry out a comparison between the results from different authors.

2.2 Influence of the constituents on shrinkage and swelling

2.2.1 Cement

Shrinkage

The influence of the type of cement has been examined by Graf [21], Walz [22], Grube [6] and Mills [6] among others. In hardened cement paste made with Portland fly ash cement and with Portland limestone cement Grube found a somewhat smaller shrinkage than in hardened cement paste made with Portland cements. These cement-dependent differences are hardly detectable in concretes. Graf, for example, found no clear relationship between cement type and shrinkage in mortars, nor did Walz in mortars and

so daß ein Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Autoren nur schwer möglich ist.

2.2 Einfluß der Ausgangsstoffe auf Schwinden und Quellen

2.2.1 Zement

Schwinden

Der Einfluß der Zementart wurde u.a. von Graf [21], Walz [22], Grube [6] und Mills [23] untersucht. Grube fand bei Zementstein mit Portlandflugaschzement und mit Portlandkalkzement ein etwas geringeres Schwinden als bei Zementstein mit Portlandzementen. Diese zementbedingten Unterschiede sind bei Betonen kaum noch feststellbar. So fanden Graf an Mörteln und Walz an Mörteln und Betonen keine klare Abhängigkeit zwischen Zementart und Schwinden. Mills dagegen stellte ein etwas größeres Schwinden bei Betonen mit Hochofenzementen fest und führte dies auf die größere Mahlfeinheit der Hochofenzemente zurück.

Der Einfluß der Mahlfeinheit auf das Schwinden von Zementstein wurde von Czernin [24] auf Unterschiede im Hydratationsgrad zurückgeführt. Feiner gemahlene Zemente hydratisieren schneller und bilden schneller und mehr Zementgel mit kleinen Kapillarporen, die das Schwindmaß begünstigen. Außerdem weist Beton mit einem gröber aufgemahlten Zement nach gleicher Hydratationszeit mehr unhydratisierte Zementpartikel auf, die wie Zuschlag wirken und das Schwinden des Zementsteins behindern [6].

Mehrere Autoren [2, 6, 15 bis 19, 21 bis 28] haben den Einfluß der Zusammensetzung des Zements auf das Schwinden untersucht. Ergebnisse von Venuat [25] mit Mörtelprismen zeigen ein Ansteigen des Schwindens mit steigendem C_3A -Gehalt, steigender Mahlfeinheit und steigendem Alkaligehalt (Na_2O , K_2O). Grube [6] fand bei höheren C_3A -, C_4AF - und Alkali-Gehalten tendenziell ein stärkeres Schwinden. Untersuchungen von Blaine [16, 19, 26] mit einer Vielzahl von industriell hergestellten Zementen zum Einfluß von Na_2O und K_2O zeigen an Zementstein ein größeres Schwinden mit zunehmendem Alkaligehalt. Bei den diesen Zementen hergestellten Betonen wurde hingegen keine Abhängigkeit des Schwindmaßes vom K_2O -Gehalt und sogar ein geringeres Schwinden bei einem höheren Na_2O -Gehalt festgestellt. Burrows [27] führte dies auf eine Mikrorißbildung im Beton zurück. Fleischer [2] fand zwar bei Zementstein und entsprechendem Mörtel und Beton ein größeres Schwinden bei Verwendung eines Zements mit höherem Alkaligehalt, die an Betonzylindern gemessenen Unterschiede waren jedoch mit rd. $\pm 0,1\%$ relativ gering. Das stärkere Schwinden führte er auf die größere innere Oberfläche des Zementsteins (d.h. mehr kleine Poren), die bei Zement mit höherem Alkaligehalt entsteht, zurück. Pickett [28] stellte ebenfalls fest, daß eine Zunahme des Alkaligehaltes oder des C_3A -Gehaltes bei gleichbleibendem Gipsgehalt das Schwinden des Betons erhöht.

Um Laboruntersuchungen mit Praxisbedingungen zu korrelieren, wurden auf Veranlassung der PCA (Portland Cement Association) in den USA Betone mit insgesamt 27 verschiedenen Zementen an verschiedenen Stellen der USA in Betonbauwerken eingebaut und einer Langzeituntersuchung unterzogen [27]. Bei der Brüstungswand einer Staumauer traten zum Teil Rißbildungen auf, die auf ein erhöhtes Trocknungsschwinden zurückgeführt wurden. Die Rißbildungen waren tendenziell stärker bei Verwendung von Zementen mit höherem Alkali- und C_3A -Gehalt und einer höheren Mahlfeinheit. Daß diese Rißbildung bei anderen Außenlagerungsbedingungen nicht auftrat, wird auf eine höhere Luftfeuchtigkeit zurückgeführt. Inwieweit dabei unterschiedliche Zuschläge einen Einfluß hatten, wurde nicht geklärt. Eine Schädigung durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurde jedoch ausgeschlossen.

Quellen

Die das Schwinden fördernden kleinen Kapillarporen des Zementsteins führen bei Wasserlagerung auch zu einem größeren Quellen. Nach Fleischer [2] führt ein höherer Alkaligehalt des Zements zu einem etwas größeren Quellen von Zementstein, Mörtel und Beton. Nach Blaine [19] bewirken höhere Na_2O -Gehalte des Zements bei Wiederbefeuchtung von Beton eine geringere Massenzunahme, aber ein größeres Quellen. Nach [18] ist das Quellen von

concretes. Mills, on the other hand, found a somewhat greater shrinkage in concretes made with blastfurnace cements, and attributed this to the greater fineness of the blastfurnace cements.

The influence of fineness on the shrinkage of hardened cement paste has been attributed by Czernin [24] to differences in the degree of hydration. More finely ground cements hydrate more rapidly and form cement gel with small capillary pores (which promote the degree of shrinkage) faster and in greater quantity. After the same hydration time a concrete made with a coarser cement contains more unhydrated cement particles which act like aggregate and hinder the shrinkage of the hardened cement paste [6].

Several authors [2, 6, 15 to 19, 21 to 28] have investigated the influence of the composition of the cement on shrinkage. Results by Venuat [25] with mortar prisms show an increase in shrinkage with increasing C_3A content, increasing fineness and increasing alkali content (Na_2O , K_2O). Grube [6] found a tendency towards greater shrinkage with higher levels of C_3A , C_4AF and alkalis. Investigations by Blaine [16, 19, 26] into the influence of Na_2O and K_2O in a large number of industrially produced cements show a greater shrinkage in hardened cement paste with increasing alkali content. On the other hand, no dependence of the amount of shrinkage on the K_2O content was found in concretes made with these cements, and the shrinkage was in fact less at a higher Na_2O content. Burrows [27] attributed this to microcracking in the concrete. In hardened cement paste and the corresponding mortar and concrete Fleischer [2] did in fact find greater shrinkage when using a cement with higher alkali content, but the differences of about $\pm 0.1\%$ measured on concrete cylinders were relatively small. He attributed the greater shrinkage to the greater internal surface area of the hardened cement paste (i.e. more small pores) which is found in cements with higher alkali contents. Pickett [28] also found that with constant gypsum content an increase in alkali content or C_3A content raises the shrinkage of the concrete.

At the investigation of the PCA (Portland Cement Association) in the USA concretes made with a total of 27 different cements were incorporated in concrete structures at different locations in the USA and submitted to long-term investigation in order to correlate laboratory investigations with practical conditions [27]. Cracking, which was attributed to intensified drying shrinkage, occurred in places in the parapet wall of a concrete dam. The cracking tended to be more severe when cements with higher levels of alkalis and C_3A and greater levels of fineness were used. This cracking did not occur under other external storage conditions, so it was attributed to higher ambient moisture. The extent to which different aggregates had an influence here was not clarified, but damage by alkali-silica reaction was ruled out.

Swelling

The small capillary pores in hardened cement paste which promote shrinkage also lead to greater swelling during water storage. According to Fleischer [2] a higher alkali content in the cement leads to somewhat greater swelling of the hardened cement paste, mortar and concrete. According to Blaine [19] higher levels of Na_2O in the cement cause a fairly small increase in weight if the concrete is wetted again, but quite large swelling. According to [18] the swelling of concrete made with cement with a high alkali content is smaller during underwater storage than in concrete made with low-alkali cements with the same C_3A content and optimized addition of SO_3 . In [20] levels of swelling of 0.6% were measured for concrete made with basalt chippings in concrete test pieces stored partially immersed in water (footbath). No reason was given for these very high values.

2.2.2 Aggregate

Hygro-deformation of the concrete is caused mainly by the hardened cement paste, which means that it is dependent on the quantity of hardened cement paste in the concrete. Increasing the quantity of aggregate therefore leads to a reduction in deformation. The aggregate has a direct influence on hygro-deformation through its elastic modulus. Shrinkage and swelling deformations are hindered by the stiffening effect of the skeleton of aggregate grains, and this effect is greater the higher their elastic modulus [29]. For example

Beton aus Zement mit hohem Alkaligehalt bei Unterwasserlagerung geringer als bei Beton aus NA-Zementen bei gleichem C_3A -Gehalt und optimierter SO_3 -Zugabe. In [20] wurden Quellmaße für Beton mit Basaltsplitt von 0,6 ‰ an fußbadgelagerten Betonprobekörpern gemessen. Eine Begründung für diese sehr hohen Werte wurde nicht gegeben.

2.2.2 Zuschlag

Hygrische Verformungen des Betons werden im wesentlichen durch den Zementstein verursacht und sind deshalb von der Menge des Zementsteins im Beton abhängig. Eine Erhöhung des Zuschlaggehaltes führt somit zu einer Verringerung der Verformungen. Unmittelbar beeinflusst der Zuschlag die hygrischen Verformungen durch seinen E-Modul. Die Schwind- und Quellverformungen werden durch das aussteifende Gerüst der Zuschlagkörner behindert, und zwar um so mehr, je größer deren E-Modul ist [29]. So wies z.B. Beton mit weniger steifem Zuschlag, in diesem Fall Sandstein (E-Modul rd. 25 kN/mm²), mit 1,25 ‰ ein wesentlich höheres Endschwindmaß auf als Beton mit dem steifen Zuschlag Basalt (E-Modul rd. 100 kN/mm²), der ein Endschwindmaß von rd. 0,40 ‰ erreichte [29]. Weiterhin beeinflussen poröse Zuschläge, die selbst quellen und schwinden (z.B. einige Muschelkalksplitte oder rezyklierter Zuschlag) ebenfalls die hygrischen Verformungen der daraus hergestellten Betone. So wies Beton mit quellfähigem Muschelkalksplitt ein höheres Quellen auf als Basaltbeton [30]. Die Verwendung von vorgehärtetem quellfähigem Zuschlag für die Betonherstellung erhöht das Schwinden [31], kann jedoch das Quellen des Betons infolge des „Vorquellens“ des Zuschlags verringern.

2.2.3 Zusatzmittel

Im Betonstraßenbau werden Luftporenbildner und, in einigen Fällen, Fließmittel und Verflüssiger als Zusatzmittel verwendet. Luftporenbildner beeinflussen das Schwind- und Quellverhalten der Betone nur geringfügig [18]. Die Durchmesser der gleichmäßig verteilten Luftporen sind zu groß, um Kapillarkräfte zu erzeugen und wirken sich daher auf die hygrischen Verformungen nicht aus. In [32] wurde bei Betonen mit Fließmittelzugabe in den ersten vier Wochen ein geringfügig höheres Schwinden festgestellt, das Endschwindmaß der Betone war jedoch annähernd gleich. Eine Begründung für den Fließmitteleinfluß wurde nicht angegeben, ist aber in fließmittelbedingten Unterschieden im Hydratationsablauf [33] zu vermuten.

2.3 Einfluß der Betonzusammensetzung auf Schwinden und Quellen

Bei der Betonzusammensetzung hat, wie die Literaturobwertung von Grube [6] und seine eigenen Versuche zeigen, der Zementleimgehalt den größten Einfluß auf das Schwinden. Auch die Sieblinie des Zuschlags hat einen Einfluß auf das Schwinden. Sandreiche Betone zeigen nach Grube [6] bei gleichem Leimgehalt gegenüber sandarmen Betonen ein geringeres Schwindmaß, da feinere Zuschläge wirkungsvoller zur aussteifenden Wirkung des Zuschlags beitragen als gröbere Zuschlagkörner mit ggf. wasserreicher Kontaktzone. Der Einfluß der Betonzusammensetzung auf das Quellen wurde bislang nicht systematisch untersucht. Grundsätzlich sind die vom Schwinden her bekannten Einflüsse auch für das Quellen maßgebend. Insgesamt sind jedoch die Unterschiede in den absoluten Werten für das Quellen gering.

2.4 Zusammenfassung des Schrifttums und Zielsetzung der Untersuchungen

Das Gesamtschwinden des Zementsteins wird in erster Linie durch die umgebungsbedingten Feuchteänderungen beeinflusst. Je geringer die mittlere relative Luftfeuchte und je höher die Windgeschwindigkeit ist, um so größer ist das Endschwindmaß. Untersuchungen zum Einfluß des Zementes liefern widersprüchliche Ergebnisse, da die Versuche z.T. mit unterschiedlichen Versuchsbedingungen und z.T. auch mit künstlich hergestellten Zementen durchgeführt wurden. Als Einflußgrößen wird u.a. die Zusammensetzung des Zementes und die Mahlfineinheit genannt. Ein größeres Schwinden wird z.T. bei höherem C_3A -Gehalt, höherem Alkaligehalt,

concrete with less rigid aggregate, in this case sandstone (elastic modulus about 25 kN/mm²), exhibited a substantially higher final shrinkage of 1.25 ‰ than concrete made with rigid basalt aggregate (elastic modulus about 100 kN/mm²), which reached a final shrinkage of about 0.40 ‰ [29]. Porous aggregates which themselves swell and shrink (e.g. some shell limestone chippings or recycled aggregates) also affect the hygro-deformation of the concretes produced from them. Concrete made with swellaible shell limestone chippings, for example, exhibits greater swelling than basalt concrete [30]. The use of pre-wetted swellaible aggregate for producing concrete increases the shrinkage [31] but can reduce the swelling of the concrete as a result of the "pre-swelling" of the aggregate.

2.2.3 Admixtures

Air-entraining agents, and in some cases plasticizers and super-plasticizers, are used as admixtures in concrete paving construction. Air-entraining agents have only a slight effect on the shrinkage and swelling behaviour of concretes [18]. The diameters of the uniformly distributed air voids are too large to generate capillary forces and therefore have no effect on the deformation due to loss or gain of water. In [32] a slightly higher shrinkage was found in the first four weeks in concretes with added plasticizers, but the final shrinkage values of the concretes were virtually identical. No reason was given for the effect of the plasticizers, but can be presumed to lie in plasticizer-induced differences in hydration behaviour [33].

2.3 Influence of the concrete composition on shrinkage and swelling

In the concrete composition it is the cement paste content which has the greatest influence on shrinkage, as is shown by the literature evaluation by Grube [6] and by his own tests. The grading curve of the aggregate also has an effect on the shrinkage. According to Grube [6] sand-rich concretes with the same paste content exhibit less contraction than low-sand concretes, as finer aggregates contribute more effectively to the stiffening effect of the aggregate than do coarser aggregate grains with possibly water-rich contact zones. The influence of the concrete composition on swelling has not yet been investigated systematically. In principle, the influencing factors known from the shrinkage will also apply to swelling. However, the differences in the absolute values for swelling are slight.

2.4 Summary of the literature and aim of the investigations

The total shrinkage of the hardened cement paste is primarily affected by the changes in moisture caused by the surroundings. The lower the average relative air humidity and the higher the wind speed the greater is the final shrinkage. Investigations into the influence of the hardened cement paste give conflicting results as in some cases the tests were carried out under different test conditions and sometimes also with artificially produced cements. The composition of the cement and its fineness are cited, among others, as influencing variables. Greater shrinkage is sometimes found with higher C_3A content, higher alkali content and/or greater fineness. Only a few investigation results are available on the influence of the cement on swelling of the hardened cement paste. Here again there are conflicting results. According to [2] a higher alkali content in the cement leads to greater swelling.

On average the hygro-deformation of concrete is about 20 ‰ that of the pure hardened cement paste. The shrinkage and swelling of concrete is influenced primarily by the cement paste content. Increased cement paste content leads to greater shrinkage and swelling. The influence of the cement is generally regarded as secondary. However, the influence of the alkali content of the cement on the shrinkage and swelling of the concrete is stressed in [2]. The aggregate influences shrinkage and swelling essentially through its elastic modulus. Aggregates which themselves shrink or swell can increase the swelling and shrinkage of the concrete. The shrinkage of paving concrete under laboratory conditions is of the order of 0.6 ‰, and the swelling of between 0.1 and 0.2 ‰. The shrinkage values found in practice lie substantially below the values measured in the laboratory.

Tafel 1: Mechanische und physikalische Kennwerte der Portlandzemente
 Table 1: Mechanical and physical properties of the Portland cements

Kennwert/Property		Zement/Cement											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erstarrungsbeginn Initial set	min	100	165	155	175	155	130	95	120	150	125	90	205
Erstarrungsende Final set	min	160	220	220	230	210	180	170	170	190	180	190	260
Wasseranspruch Water demand	Gew.-%	23,5	24,5	26,0	26,5	27,5	25,5	26,0	26,5	26,0	29,0	28,5	29,0
Spezifische Oberfläche Specific surface	cm ² /g	2990	2840	3470	3090	3170	3020	3230	3120	2940	3600	3120	2960
Druckfestigkeit Compressive strength	2 d N/mm ²	21,6	21,4	28,1	26,4	25,8	20,0	24,1	25,2	26,5	29,6	25,6	33,9
Druckfestigkeit Compressive strength	28 d N/mm ²	54,9	49,2	51,9	47,8	48,8	52,2	54,3	48,7	45,8	47,5	46,9	49,7

halt und/oder höherer Mahlfeinheit gefunden. Über den Einfluß des Zements auf das Quellen von Zementstein liegen nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. Auch hier gibt es widersprüchliche Ergebnisse. Nach [2] führt ein höherer Alkaligehalt des Zements zu einem größeren Quellen.

Die hygrischen Verformungen des Betons betragen im Mittel rd. 20 % der des reinen Zementsteins. Das Schwinden und Quellen des Betons wird in erster Linie vom Zementsteingehalt beeinflusst. Erhöhter Leimgehalt führt zu größerem Schwinden und Quellen. Der Einfluß des Zements wird im allgemeinen als untergeordnet angesehen. In [2] wird allerdings der Einfluß des Alkaligehaltes des Zements auf das Schwinden und Quellen des Betons hervorgehoben. Der Zuschlag beeinflusst Schwinden und Quellen im wesentlichen durch den E-Modul. Zuschläge, die selbst schwinden oder quellen, können das Quellen und Schwinden des Betons erhöhen. Das Schwinden des Straßenbetons unter Laborbedingungen liegt in der Größenordnung von rd. 0,6 ‰ und das Quellen zwischen 0,1 und 0,2 ‰. Die Schwindwerte in der Praxis liegen wesentlich unter den im Labor ermittelten Werten.

Aus dem Schrifttum geht hervor, daß über den Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Beton z.T. widersprüchliche Ergebnisse vorliegen. In den durchgeführten Untersuchungen sollte deshalb geklärt werden, ob verschiedene Ausgangsstoffe und unterschiedliche Betonzusammensetzungen signifikante, baupraktisch relevante

There are sometimes conflicting results in the literature about the influence of the constituents and the concrete composition on the shrinkage and swelling of concrete. The investigations carried out were therefore intended to clarify whether different constituents and different concrete compositions have a significant effect, relevant to building practice, on the swelling and shrinkage behaviour of paving concrete, and whether more far reaching material specifications for the concrete constituents and the composition of paving concretes would have to be introduced to keep the deformation caused by shrinkage and swelling, and the resulting stresses in concrete carriageway paving, as low as possible.

3 Test procedure

3.1 Constituents

So far, carriageway paving concrete has usually been produced using Portland cements [34]. Twelve Z 35 F Portland cements from twelve different works were therefore included in the trials. The cements cover the normal range of Portland cements in Germany with respect to composition and properties, and cements were also included which did not meet the specifications for paving concrete [34]. Their most important mechanical, physical and chemical properties are listed in Tables 1 and 2.

The following aggregates were chosen for the trials: finely ground quartz sand 0/0.2 mm (density: 2.60 kg/m³), quartz sand in the 1/2 mm particle size range (density 2.60 kg/m³), Rhine sand in

Tafel 2: Chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Portlandzemente in Gew.-%
 Table 2: Chemical and mineralogical composition of the Portland cements in weight-%

	Zement/Cement											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K ₂ O	0,57	0,78	1,03	1,15	1,14	1,18	1,47	1,41	1,58	1,69	1,36	1,72
Na ₂ O	0,17	0,14	0,10	0,12	0,21	0,19	0,16	0,21	0,17	0,15	0,36	0,19
Na ₂ O-Äquivalent	0,55	0,65	0,78	0,88	0,96	0,97	1,12	1,16	1,21	1,26	1,26	1,32
SiO ₂	20,6	20,1	20,6	19,4	19,8	20,8	20,7	20,2	19,4	20,5	20,5	19,8
Al ₂ O ₃	5,9	5,3	5,7	6,1	5,6	6,4	5,6	4,7	5,3	5,4	5,3	5,8
TiO ₂	0,26	0,26	0,34	0,29	0,28	0,29	0,30	0,22	0,26	0,25	0,27	0,23
P ₂ O ₅	0,08	0,17	0,11	0,12	0,12	0,14	0,11	0,04	0,05	0,07	0,07	0,06
Fe ₂ O ₃	3,0	3,1	2,5	2,9	2,4	2,4	3,1	2,3	3,4	3,0	2,5	3,3
Mn ₂ O ₃	0,04	0,09	0,06	0,06	0,11	0,05	0,11	0,03	0,04	0,05	0,10	0,04
CaO	65,1	66,5	65,6	65,1	63,8	64,4	63,4	65,8	64,1	62,9	62,9	63,7
MgO	0,96	1,11	1,37	2,00	3,32	1,38	1,86	2,26	2,41	2,30	3,44	1,68
SO ₃	3,29	2,51	2,60	2,72	3,04	2,77	3,19	2,68	3,34	3,54	3,18	3,51
C ₃ S	53,3	67,9	58,2	61,6	56,0	47,1	46,7	69,9	61,3	46,9	49,4	53,1
C ₂ S	18,7	6,4	15,0	9,2	14,6	24,1	24,1	5,5	9,5	23,5	21,5	16,6
C ₃ A	11,4	9,8	12,0	12,3	11,7	13,9	10,5	9,2	9,0	10,0	10,7	10,6
C ₄ AF	9,3	9,6	7,8	9,0	7,8	7,4	9,8	7,2	10,4	9,4	7,8	10,0

Tafel 3: Betonzusammensetzung
Table 3: Concrete composition

Bestandteile Components		Mischung/Mix							
		M 1 bis M 12	M 13	M 14	M 15	M 16	M 17	M 18	M 19 ¹⁾
w/z-Wert w/c ratio	-	0,45	0,45		0,45	0,40	0,50	0,45	0,45
Zement Cement	-	1 bis 12	3	12	3	3	3	3	3
Zementgehalt Cement content	kg/m ³	350	350		350	350	350	300	350
Wassergehalt Water content	kg/m ³	157,5	157,5		157,5	140	175	135	157,5
Sand 0/2 Sand 0/2	kg/m ³	604	650		613	619	589	636	574
Kiessand (Splitt) 2/16 Rhenish sand/gravel (chippings)	kg/m ³	1254	1394 ²⁾		1268 ³⁾	1285	1223	1322	1193

¹⁾ LP-Bildner 0,35 g/kg Zement / Air entraining agent 0,35 g/kg cement ²⁾ Basalt ³⁾ Muschelkalk / Shell limestone

Einflüsse auf das Quell- und Schwindverhalten von Straßenbeton haben und ob weitergehende stoffliche Anforderungen an die Betonausgangsstoffe und die Zusammensetzung von Straßenbetonen eingehalten werden müssen, um Verformungen aus Schwinden und Quellen und die dadurch entstehenden Spannungen in Betonfahrbahndecken möglichst gering zu halten.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ausgangsstoffe

Für die Herstellung von Fahrbahndeckenbeton wurden bisher meistens Portlandzemente verwendet [34]. In die Untersuchungen wurden deshalb zwölf Portlandzemente Z 35 F einbezogen, die aus zwölf verschiedenen Werken stammten. Die Zemente decken den bei Portlandzementen hinsichtlich Zusammensetzung und Eigenschaften in Deutschland üblichen Bereich ab, wobei auch Zemente einbezogen wurden, die den Anforderungen an Straßenbauzemente [34] nicht entsprechen. Die wichtigsten mechanischen, physikalischen und chemischen Kennwerte sind in den Tafeln 1 und 2 zusammengestellt.

Für die Versuche wurden die folgenden Zuschläge ausgewählt: Quarzmehl 0/0,2 mm (Dichte: 2,60 kg/m³), Quarzsand der Korngruppe 1/2 mm (Dichte: 2,60 kg/m³), Rheinsand der Korngruppe 0/2 mm (Dichte: 2,60 kg/m³), Rheinkiesand der Korngruppen 2/8 und 8/16 mm (Dichte: 2,60 kg/m³), Basaltsplitt der Korngruppen 2/5, 5/8 und 8/16 mm (Dichte: 3,00 kg/m³) und Muschelkalksplitt der Korngruppen 2/5, 5/8, 8/11 und 11/16 mm (Dichte: 2,65 kg/m³).

Für die Herstellung der Betone wurden i.a. keine Zusatzmittel verwendet. In einem Zusatzversuch wurde ein Luftporenbeton unter Zugabe eines Luftporenbildners auf der Basis eines Wurzelharzes hergestellt. Als Zugabewasser wurde Leitungswasser aus dem Trinkwassernetz der Stadt Düsseldorf verwendet.

3.2 Betonzusammensetzung und -herstellung

Um den Einfluß von Zement, Zuschlag und Betonzusammensetzung auf Schwinden und Quellen des Betons zu untersuchen, wurden in drei Versuchsreihen 19 verschiedene Betonzusammensetzungen hergestellt (Tafel 3). Die Sieblinie lag in der Mitte des Bereiches AB 16 der DIN 1045.

Versuchsserie 1: Einfluß des Zements

Mit den Zementen 1 bis 12 wurde je eine Mischung mit Rheinkiesand, einem w/z-Wert von 0,45 und einem Zementgehalt von 350 kg/m³ hergestellt (M 1 bis M 12 nach Tafel 3).

Versuchsserie 2: Einfluß des Zuschlags

Mit dem Quarzmehl und dem Rheinsand (0/2 mm) sowie einem der drei Zuschläge Rheinkies, Basaltsplitt oder Muschelkalksplitt (2/16 mm) wurde je eine Mischung mit dem Zement 3, einem w/z-Wert von 0,45 und einem Zementgehalt von 350 kg/m³ her-

the 0/2 mm particle size range (density 2.60 kg/m³), Rhine sand/gravel in the 2/8 and 8/16 mm particle size ranges (density 2.60 kg/m³), basalt chippings in the 2/5, 5/8 and 8/16 mm size ranges (density 3.00 kg/m³) and shell limestone chippings in the 2/5, 5/8, 8/11 and 11/16 mm size ranges (density 2.65 kg/m³).

In general, no admixtures were used in the production of the concretes. Air-entrained concrete was produced in an additional trial by adding an air-entraining agent based on wood resin. Tap water from the drinking water supply system for the town of Düsseldorf was used as the mixing water.

3.2 Concrete composition and production

Nineteen different concrete compositions were produced in three test series (Table 3) in order to investigate the influence of cement, aggregate and concrete composition on the shrinkage and swelling of concrete. The grading curve lay in the middle of the AB 16 range specified in DIN 1045.

Test series 1: Influence of the cement

A mix with Rhine sand/gravel, a w/c ratio of 0.45 and a cement content of 350 kg/m³ was produced with each of the cements 1 to 12 (M 1 to M 12 in Table 3).

Test series 2: Influence of the aggregate

Mixes with cement 3, a w/c ratio of 0.45 mm and a cement content of 350 kg/m³ were produced with the finely ground quartz sand and the Rhine sand (0/2 mm) and each of the three aggregates Rhine sand/gravel, basalt chippings or shell limestone chippings (2/16 mm) (M 3, M 13, M 15). Another mix contained basalt chippings and cement 12 (M 14).

Test series 3: Influence of the concrete composition

Mixes with a cement content of 350 kg/m³ and w/c ratios of 0.40, 0.45 and 0.50 (M 16, M 3, M 17) were produced with cement 3. Another concrete composition had a cement content of 300 kg/m³ and a w/c ratio of 0.45 (M 18). An air-entraining agent was also used in a mix with cement 3, a cement content of 350 kg/m³ and a w/c ratio of 0.45 (M19). Rhine sand/gravel 0/16 mm was used in all the mixes.

The aggregates were added in an air-dry state. The concretes were mixed for 2 minutes in a 250 l laboratory pan mixer in batches of about 180 l.

For the solid concrete investigations the following test pieces were produced from each mix in steel moulds: twelve cubes of 15 cm edge length, eight 10 cm x 10 cm x 50 cm beams, and four cylinders with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm.

3.3 Storage of the test pieces

The beams and cylinders for the deformation measurements were covered with a plastic film and a glass plate immediately after pro-

gestellt (M 3, M 13, M 15). Eine weitere Mischung enthielt den Basaltplitt und den Zement 12 (M 14).

Versuchsserie 3: Einfluß der Betonzusammensetzung

Mit dem Zement 3 wurden Mischungen mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und w/z-Werten von 0,40; 0,45 und 0,50 hergestellt (M 16, M 3, M 17). Eine weitere Betonzusammensetzung wies einen Zementgehalt von 300 kg/m^3 bei einem w/z-Wert von 0,45 auf (M 18). Außerdem wurde bei einer Mischung mit dem Zement 3, einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und einem w/z-Wert von 0,45 ein Luftporenbildner verwendet (M 19). Bei allen Mischungen wurde Rheinkiesand 0/16 mm eingesetzt.

Die Zuschläge wurden lufttrocken zugegeben. Die Betone wurden in Chargen von rd. 180 l in einem 250-l-Labortellermischer 2 min lang gemischt.

Für die Festbetonuntersuchungen wurden je Mischungsvariante in Stahlformen folgende Probekörper hergestellt: zwölf Würfel mit 15 cm Kantenlänge, 8 Balken $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ und vier Zylinder mit $\varnothing 15 \text{ cm}$ und $h = 30 \text{ cm}$.

3.3 Lagerung der Probekörper

Die für die Verformungsmessung vorgesehenen Balken und Zylinder wurden direkt nach der Herstellung mit einer Plastikfolie und zusätzlich mit einer Glasscheibe abgedeckt. Alle Probekörper verblieben 24 Stunden in der Form in einem Feuchtkasten bei rd. 20°C und wurden anschließend ausgeschalt. Die für die Druckfestigkeitsprüfung vorgesehenen Würfel wurden entsprechend DIN 1048 gelagert. An den für die Verformungsmessungen bestimmten Probekörpern wurden Meßmarken bzw. -zapfen wie folgt angebracht: Auf den beiden Seitenflächen ($50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) der Balken jeweils zwei Meßmarken mittig im Abstand von 40 cm (Bild 1), auf der oberen und unteren Stirnfläche der Zylinder jeweils zwei Meßmarken im Abstand von 10 cm, auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien der Zylinder in unterschiedlicher Höhe jeweils zwei in den Beton eingeklebte Meßzapfen. Unmittelbar im Anschluß an die Nullmessung im Alter von einem Tag wurden die Probekörper bis zum Alter von drei Tagen in enganliegenden Folien luftdicht verpackt. Durch diese Lagerung wurde eine dreitägige Nachbehandlung simuliert. Im Alter von drei Tagen wurden die Probekörper aus den Folien entnommen und folgenden Lagerungsvarianten im Klimaraum $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.F.}$ unterworfen (Bild 1):

Balken: a) Luftlagerung (ohne Abdichtung), b) Wasserlagerung (ohne Abdichtung), c) vollständige Abdichtung der Probekörper (Lagerung an Luft), d) Fußbadlagerung (alle Seitenflächen abgedichtet).

Zylinder: e) Luftlagerung (Mantelfläche und Unterseite abgedichtet), f) Fußbadlagerung (Mantelfläche abgedichtet).

Die Abdichtung der jeweiligen Flächen erfolgte durch ein bitumenbeschichtetes Aluminiumband (siehe Bild 1). Bei der Fußbadlagerung wurden die Probekörper rd. 1 cm tief in Wasser eingetaucht.

3.4 Prüfungen

3.4.1 Frischbeton

10 min nach dem Mischen des Betons wurde die Konsistenz mit dem Verdichtungsmaß, der Luftgehalt mit dem Druckausgleichsverfahren (LP-Topf) und die Rohdichte im LP-Topf nach DIN 1048 ermittelt.

3.4.2 Festbeton

Die Betondruckfestigkeit wurde nach DIN 1048 als Mittel aus drei Würfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von eins, zwei, sieben und 28 Tagen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel 4 zusammengefaßt.

Die Nullmessung zur Bestimmung des Schwindens und Quellens wurde im Alter von einem Tag vorgenommen. Der Abstand der Meßmarken an den Balken und an den Stirnflächen der Zylinder wurde mit einem Setzdehnungsmesser und der Abstand der Meßzapfen in unterschiedlichen Höhen der Zylinder mit einem Meßtaster, der in einem Metallrahmen befestigt war, gemessen. Weitere Messungen wurden nach drei, vier, sieben, 14, 28, 56, 85, 119, 182, 238, 301 und 365 Tagen durchgeführt und hieraus das

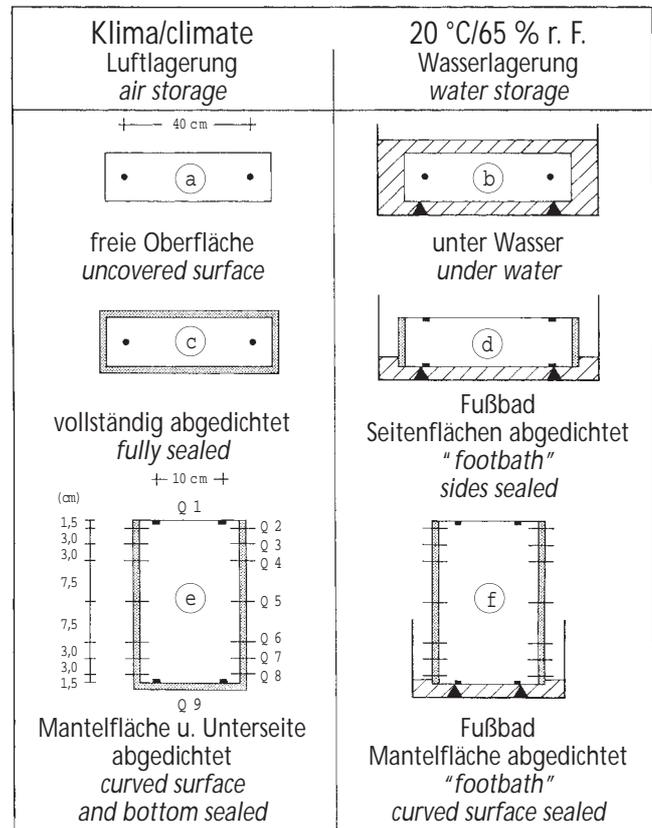


Bild 1: Lagerungsvarianten der Balken und Zylinder im Klimaraum $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.F.}$

Fig. 1: Different methods of storing beams and cylinders in the climatic chamber $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.h.}$

duction. All test pieces remained for 24 hours in the mould in a humidity chamber at about 20°C and were then demoulded. The cubes for the compressive strength testing were stored as specified in DIN 1048. Measuring marks or gauging pins were placed as follows on the test pieces used for deformation measurements: two measuring marks centrally at a spacing of 40 cm on each of the two side faces ($50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) of the beams (Fig. 1); two measuring marks at a spacing of 10 cm on both the upper and lower end faces of the cylinders; pairs of gauging pins glued to the concrete at different levels on two opposing generating lines on the cylinder. Immediately on completion of the zero measurements at the age of one day the test pieces were kept in air-tight packaging closely wrapped in plastic film until three days old. This storage simulated 3-day curing. At the age of 3 days the test piece was removed from the film and submitted to the following different types of storage in a $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.h.}$ climatic chamber (Fig. 1):

Beams: a) air storage (without sealing), b) water storage (without sealing), c) complete sealing of the test piece (storage in air), d) footbath storage (partially immersed in water, all side surfaces sealed).

Cylinders: e) air storage (curved surface and underside sealed), f) footbath storage (curved surface sealed).

The respective surfaces were sealed with bitumen-coated aluminium strip (see Fig. 1). For footbath storage about 1 cm of the test piece was immersed in water.

3.4 Testing

3.4.1 Unset concrete

10 minutes after the concrete had been mixed the consistency was determined by the degree of compaction, the air content was determined by the pressure equalization method (air void test vessel), and the bulk density was determined in the air void test vessel in accordance with DIN 1048.

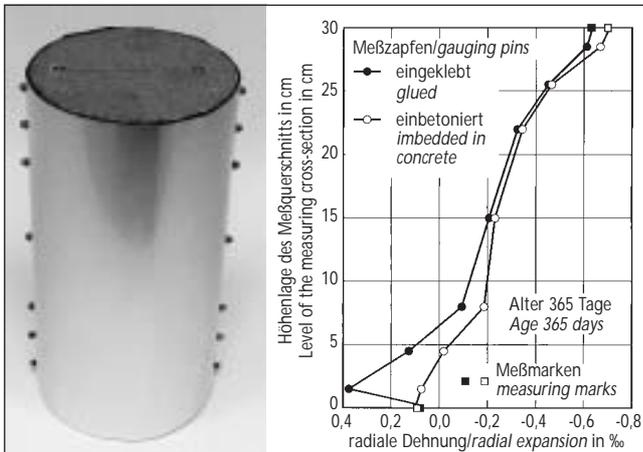


Bild 2 links: Zylinder mit abgedichteter Mantelfläche

Fig. 2 left: Cylinder with curved surface sealed

Bild 2 rechts: Radiale Dehnung von fußbadgelagerten Zylindern im Alter von 365 Tagen mit eingeklebten bzw. direkt einbetonierten Meßzapfen

Fig. 2 right: Radial expansion of cylinders stored in a footbath of water at the age of 365 days with gauging pins glued resp. directly embedded in the concrete

Quellen und Schwinden der Balken in Längsrichtung bzw. der Zylinder in radialer Richtung in den neun Meßebenen bestimmt (siehe Bild 1 und Bild 2). Bei jeder Verformungsmessung wurde auch jeweils das Gewicht der Probekörper ermittelt. Die im folgenden dargestellten Werte sind Mittelwerte aus jeweils zwei Probekörpern. Einzelwerte der Längenänderung weichen in der Regel um nicht mehr als $\pm 0,02 \text{ ‰}$ und die der Masseänderung um nicht mehr als $\pm 0,001 \text{ ‰}$ vom Mittelwert ab. In Einzelfällen, die sehr selten auftraten, betrug die Abweichung bei den Längenänderungen $\pm 0,05 \text{ ‰}$. Im Verlauf des Versuchsprogramms zeigte sich bei einigen fußbadgelagerten Zylindern bei den Meßpunkten 1,5, 4,5 und teilweise auch bei 8,0 cm über der Unterkante der Probekörper eine über das übliche Quellen hinausgehende Längenänderung (Bild 2, links). Die Längenänderung bei 1,5 cm war sogar größer als die der Stirnseite. Ursache hierfür war ein Quellen des Klebers der eingeklebten Zapfen. Nach einer Änderung des Befestigungssystems durch ein Einbetonieren der Zapfen wurde eine erhöhte Längenänderung nicht mehr festgestellt.

4 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

4.1 Frischbeton

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in Tafel 4 zusammengestellt. Der Luftgehalt des Frischbetons ohne Luftporen lag zwischen 1,4 % und 2,5 % und der des Luftporenbetons bei 5,6 %. Die Verdichtungsmaße lagen bei gleicher Zusammensetzung, aber Verwendung von zwölf unterschiedlichen Zementen und drei unterschiedlichen Zuschlägen zwischen 1,27 und 1,45. Tendenziell führte erwartungsgemäß ein höherer Wasseranspruch des Zements zu einem etwas steiferen Beton. Trotz der unterschiedlichen Verdichtungsmaße konnten – wie die Luftgehalte und Rohdichten zeigen (siehe Tafel 4) – alle Betone auf dem Rütteltisch vollständig verdichtet werden. Durch Zugabe eines LP-Bildners wurde das Verdichtungsmaß von 1,37 (M 3) auf 1,23 (M 19) verringert.

4.2 Druckfestigkeit

Die an 15-cm-Würfeln ermittelte Druckfestigkeit (siehe Tafel 4) lag im Bereich der Festigkeit üblicher Straßenbetone, wenn man berücksichtigt, daß bis auf eine Ausnahme keine Luftporenbildner verwendet wurden. Sie erfüllte die Anforderungen der ZTV-Beton an die Bauklasse SV für hochbelastete Betonfahrbahndecken.

4.3 Schwinden und Quellen

4.3.1 Allgemeines

Während der ersten drei Tage lagerten alle Probekörper unter konservierenden Bedingungen, d.h. ein Tag in der Schalung und

3.4.2 Solid concrete

The concrete compressive strength was measured in accordance with DIN 1048 as the average from three cubes of 15 cm edge length after one, two, seven and 28 days. The results are summarized in Table 4.

The zero measurements for determining the shrinkage and swelling were made after one day. The distances between the measuring marks on the beams and on end faces of the cylinders were measured with a stress-probing extensometer, and the distances between the gauging pins at different heights on the cylinders were measured with a measuring stylus attached to a metal frame. Further measurements were carried out after three, four, seven 14, 28, 56, 85, 119, 182, 238, 301 and 365 days, and from these were determined the swelling and shrinkage of the beams in the longitudinal direction and of the cylinders in the radial direction in the nine test planes (see Figs. 1 and 2). The weight of the test piece was also measured at each deformation measurement. The values given below are each mean values from two test pieces. As a rule, the individual values for change in length did not deviate by more than $\pm 0.02 \text{ ‰}$, nor those of the change in weight by more than $\pm 0.001 \text{ ‰}$ from the mean value. In individual cases, which occurred very rarely, there were deviations in the change in length of $\pm 0.05 \text{ ‰}$. During the test programme a change in length beyond the usual swelling occurred in some cylinders with footbath storage at the test points 1.5, 4.5 and in some cases also 8.0 cm above the bottom edge of the test piece (Fig. 2, left 2). The change in length at 1.5 cm was even greater than that of the end face. The reason for this was the swelling of the adhesive used for attaching the gauging pins. Excessive changes in length were no longer found after the attachment system had been changed by concreting the measuring pegs in place.

4 Presentation and discussion of the test results

4.1 Unset concrete

The results of the unset concrete tests have been summarized in Table 4. The air content of the unset concrete without air voids lay between 1.4 % and 2.5 %, and that of the air-entrained concrete was 5.6 %. With the same composition, but using twelve different cements and three different aggregates, the compacting factor lay between 1.27 and 1.45. As expected, a higher water demand of the cement tended to lead to a somewhat stiffer concrete. In spite of the differing compacting factors all the concretes could be fully compacted on the vibrating table – as is shown by the air content and bulk density (see Table 4). Addition of an air-entraining agent reduced the compacting factor from 1.37 (M 3) to 1.23 (M 19).

4.2 Compressive strength

The compressive strengths (see Table 4) measured on 15 cm cubes lay in the range of strength of normal paving concretes taking into account the fact that, with one exception, no air-entraining agents were used. The strengths fulfilled the requirements for road concrete in the SV construction class for heavily loaded concrete carriageway pavings.

4.3 Shrinkage and swelling

4.3.1 General

During the first three days all test pieces were kept under protective conditions, i.e. one day in the mould and two days in plastic film. They were not able to take in or give off water. Any changes in length during these three days can therefore be attributed to chemical shrinkage. To measure the shrinkage and swelling the measured changes in length were related to the original length of the test piece after removal from the mould at the age of one day. This means that no account is taken of the moisture-induced changes in length during the first day which, for a road paving concrete with a w/c ratio in the region of 0.45, are less than 0.01 ‰ [6], and are therefore negligibly small. When evaluating the swelling the changes in length are calculated from the difference in the length of the test piece at the particular time of measurement and the reference length after one day. This ignores the fact that the swelling deformation is reduced by the extent of the chemical shrinkage which occurs up to the start of water storage at the age of three days.

Tafel 4: Frisch- und Festbetoneigenschaften
 Table 4: Properties of unset and hardened concrete

Nr.	Zement Cement -	Frischbetoneigenschaften Properties of unset concrete			Festbetoneigenschaften Properties of hardened concrete			
		Rohdichte Density [kg/dm ³]	Verdichtungsmaß Compacting factor -	Luftgehalt Air content [Vol.-%]	Druckfestigkeit in N/mm ² Compressive strength			
					1 d	2 d	7 d	28 d
M 1	1	2,40	1,27	1,9	22,1	34,1	49,5	65,5
M 2	2	2,39	1,32	2,4	20,4	34,7	50,9	65,1
M 3	3	2,40	1,37	1,8	22,8	38,7	50,3	65,1
M 4	4	2,38	1,32	2,5	28,9	36,7	44,2	59,8
M 5	5	2,38	1,37	2,4	26,1	38,2	46,3	54,2
M 6	6	2,37	1,32	2,5	16,5	30,9	50,3	65,5
M 7	7	2,38	1,32	2,3	26,3	36,3	51,3	65,6
M 8	8	2,39	1,37	2,1	23,4	36,4	45,4	59,1
M 9	9	2,40	1,36	1,9	25,8	37,8	44,0	57,2
M 10	10	2,38	1,42	2,2	24,8	35,0	42,1	56,4
M 11	11	2,39	1,35	2,1	25,9	35,3	44,6	58,6
M 12	12	2,39	1,45	2,1	37,4	42,4	46,3	59,7
M 13	3	2,61	1,31	1,4	27,0	40,0	56,0	70,4
M 14	12	2,58	1,40	1,9	36,0	43,4	48,5	60,0
M 15	3	2,41	1,38	2,0	26,1	38,4	45,9	62,4
M 16	3	2,41	1,49	2,2	33,6	47,2	56,5	70,8
M 17	3	2,37	1,12	2,0	19,1	31,7	45,9	57,5
M 18	3	2,38	1,47	2,4	26,1	40,0	53,6	67,0
M 19 ¹⁾	3	2,27	1,23	5,6	15,6	29,2	39,2	51,2

¹⁾ Verwendung eines LP-Bildners/Use of air entraining agent

zwei Tage in Folie. Sie konnten dabei Wasser weder aufnehmen noch abgeben. Längenänderungen während dieser drei Tage sind deshalb auf chemisches Schwinden zurückzuführen. Für die Ermittlung der Schwind- und Quelldehnungen werden die gemessenen Längenänderungen auf die ursprüngliche Länge der Probekörper nach dem Ausschalen im Alter von einem Tag bezogen. Dadurch werden die Feuchtedehnungen während des ersten Tags nicht berücksichtigt, die für Straßendeckenbeton mit einem w/z-Wert im Bereich von 0,45 weniger als 0,01‰ betragen [6] und damit vernachlässigbar gering sind. Bei der Auswertung des Quellens werden die Längenänderungen durch Bildung der Differenz zwischen der jeweils zum Meßzeitpunkt gemessenen Länge des Prüfkörpers und der Bezugsgröße nach einem Tag berechnet. Damit wird vernachlässigt, daß die Quellverformung um den Betrag des bis zum Beginn der Wasserlagerung im Alter von drei Tagen eingetretenen chemischen Schwindens verringert ist.

Schwinden und Quellen wurde sowohl an Balken (10 cm x 10 cm x 50 cm) in Längsrichtung als auch an Zylindern (d = 15 cm/h = 30 cm) in radialer Richtung ermittelt. Die an den Balken bestimmten Schwind- und Quelldehnungen entsprachen in etwa den Werten, die an Ober- und Unterseite der Zylinder ermittelt wurden (siehe Tafel 5). Eine Ausnahme bildeten die an den fußbadgelagerten Balken bestimmten Dehnungen; das Quellen an der Unterseite war größer und das Schwinden an der Oberseite kleiner als die entsprechenden Dehnungen der Zylinder bzw. der an Luft oder vollständig unter Wasser gelagerten Balken. Diese lagerungsbedingten Unterschiede dürften auf veränderte Eigenspannungsverläufe zurückzuführen sein.

Das gesamte Schwinden der Betone, d.h. die Dehnungen infolge des Trocknungsschwindens und des chemischen Schwindens, dessen zeitlicher Verlauf und Streubreite in Bild 3 oben dargestellt sind, betrug nach sieben Tagen 0,15‰ bis 0,25‰, nach 28 Tagen 0,3‰ bis 0,4‰ und nach 365 Tagen 0,5‰ bis 0,7‰ (siehe Tafel 5, Spalte a). Das chemische Schwinden (siehe Tafel 5, Spalte c)

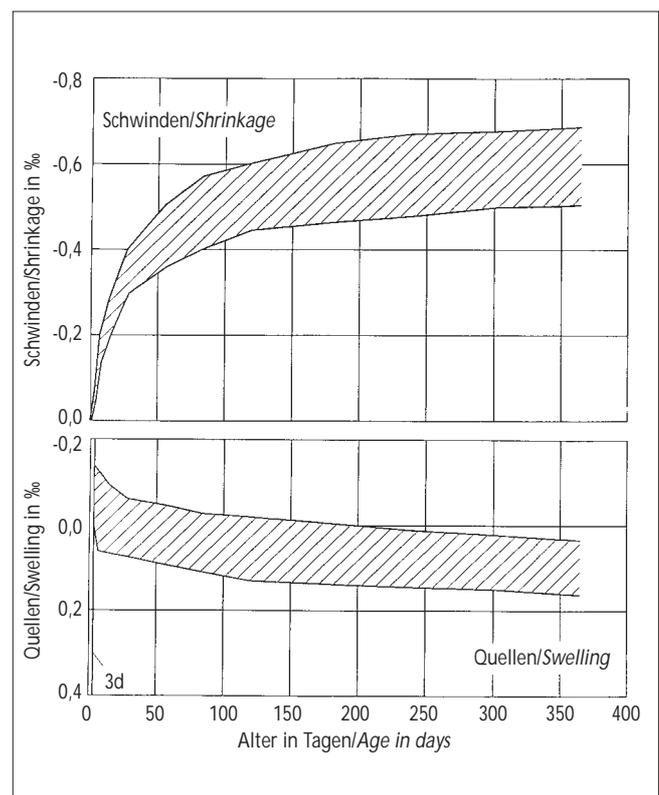


Bild 3: Schwinden und Quellen der an Luft (Lagerung a) bzw. unter Wasser (Lagerung b) gelagerten Balken in Abhängigkeit vom Alter der Probekörper
 Fig. 3: Shrinkage and swelling of beams stored in the air (storage a) and under water (storage b), respectively, in relation to the age of the specimens

Tafel 5: Quellen und Schwinden der Probekörper in ‰
 Table 5: Swelling and shrinkage of specimens in ‰

Nr.	Balken/Beams								Zylinder/Cylinders							
	Luftlagerung/Air storage				Wasserlagerung/Water storage				Luftlagerung/Air storage				Fußbad/"Footbath"			
	freie Oberfläche uncovered surface		vollständig abgedichtet fully sealed		unter Wasser under water	Fußbad "Footbath"			Meßquerschnitt Measuring cross-section				Meßquerschnitt Measuring cross-section			
	a		c		b	d			e				f			
28 d	365 d	28 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	365 d	
M 1	-0,30	-0,51	-0,06	-0,09	0,06	-0,39	0,10	-0,52	-0,50	-0,37	-0,10	-0,51	-0,44	-0,32	0,06	
M 2	-0,30	-0,52	-0,08	-0,19	0,09	-0,44	0,19	-0,57	-0,52	-0,41	-0,21	-0,57	-0,52	-0,39	0,10	
M 3	-0,36	-0,65	-0,14	-0,18	0,09	-0,57	0,09	-0,65	-0,59	-0,41	-0,18	-0,66	-0,62	-0,43	0,06	
M 4	-0,33	-0,61	-0,11	-0,20	0,10	-0,54	0,17	-0,60	-0,56	-0,38	-0,20	-0,55	-0,50	-0,37	0,04	
M 5	-0,36	-0,61	-0,13	-0,21	0,10	-0,57	0,19	-0,63	-0,57	-0,37	-0,18	-0,63	-0,57	-0,39	0,16	
M 6	-0,38	-0,64	-0,09	-0,13	0,07	-0,53	0,12	-0,52	-0,44	-0,36	-0,13	-0,55	-0,51	-0,36	0,06	
M 7	-0,36	-0,67	-0,07	-0,13	0,08	-0,62	0,15	-0,59	-0,56	-0,30	-0,10	-0,66	-0,54	-0,31	0,12	
M 8	-0,36	-0,60	-0,04	-0,15	0,16	-0,54	0,28	-0,62	-0,54	-0,35	-0,17	-0,61	-0,55	-0,34	0,19	
M 9	-0,34	-0,58	-0,13	-0,20	0,12	-0,53	0,15	-0,63	-0,56	-0,34	-0,15	-0,63	-0,58	-0,39	0,10	
M 10	-0,37	-0,57	-0,04	-0,07	0,14	-0,54	0,21	-0,59	-0,50	-0,31	-0,08	-0,61	-0,52	-0,31	0,10	
M 11	-0,41	-0,69	-0,17	-0,19	0,04	-0,72	0,16	-0,73	-0,72	-0,44	-0,17	-0,70	-0,67	-0,45	0,09	
M 12	-0,40	-0,69	-0,13	-0,27	0,04	-0,65	0,13	-0,66	-0,58	-0,42	-0,22	-0,71	-0,61	-0,45	0,11	
M 13	-0,26	-0,53	-0,10	-0,17	0,04	-0,50	0,05	-0,46	-0,42	-0,29	-0,12	-0,50	-0,49	-0,33	0,09	
M 14	-0,28	-0,51	-0,12	-0,18	0,08	-0,44	0,13	-0,52	-0,52	-0,35	-0,19	-0,52	-0,47	-0,33	0,06	
M 15	-0,32	-0,52	-0,06	-0,07	0,22	-0,48	0,26	-0,54	-0,53	-0,35	-0,07	-0,57	-0,55	-0,41	0,23	
M 16	-0,42	-0,62	-0,14	-0,18	0,04	-0,59	0,09	-0,57	-0,49	-0,30	-0,13	-0,56	-0,49	-0,38	0,11	
M 17	-0,41	-0,69	-0,06	-0,12	0,04	-0,55	0,09	-0,65	-0,64	-0,47	-0,14	-0,66	-0,64	-0,46	0,07	
M 18	-0,40	-0,62	-0,12	-0,15	0,05	-0,58	0,05	-0,55	-0,52	-0,40	-0,15	-0,49	-0,48	-0,37	0,11	
M 19	-0,43	-0,69	-0,05	-0,13	0,07	-0,62	0,16	-0,69	-0,66	-0,47	-0,16	-0,72	-0,66	-0,47	0,10	

betrug nach 28 Tagen 0,04 ‰ bis 0,17 ‰ und nach 365 Tagen 0,07 ‰ bis 0,21 ‰¹⁾. Das Quellen der Betone, dessen zeitlicher Verlauf und Streubreite mit Ausnahme des Betons mit Muschelkalksplitt in Bild 3 unten dargestellt sind, lag nach 365 Tagen zwischen 0,04 ‰ und 0,16 ‰. Beton mit quellendem Muschelkalksplitt (M 15) hatte ein Quellen von 0,22 ‰ (Tafel 5, Spalte b). Nach Beendigung der dreitägigen konservierenden Vorlagerung wiesen die Betone ein geringes chemisches Schwinden auf (siehe Bild 3 unten), bevor sie mit einsetzender Wasseraufnahme zu quellen begannen. Berücksichtigt man das durch den Quellvorgang zuerst einmal rückgängig gemachte Schwinden, so erhöht sich das gesamte Quellen auf Werte von 0,07 ‰ bis 0,21 ‰ und bei Beton mit Muschelkalk auf 0,25 ‰. Gelegentlich angegebenes größeres Quellen von normalem Straßenbeton kann u.U. darauf zurückzuführen sein, daß die Probekörper vor der Unterwasserlagerung nicht konserviert gelagert wurden, also austrocknen konnten.

Bild 4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Schwindens bzw. Quellens der unterschiedlich gelagerten Zylinder. Beide Zylinder konnten über die Herstellungsoberseite austrocknen. Während der Zylinder bei Luftlagerung an der Unterseite abgedichtet war (Bild 4 links), konnte der Zylinder bei Fußbadlagerung über die Unterseite Wasser aufnehmen (Bild 4 rechts). Das Schwinden in radialer Richtung der oberen Hälfte beider unterschiedlich gelagerter Zylinder ist nahezu identisch (Tafel 5, Spalte e und f). Das Schwinden in der unteren Hälfte des abgedichteten Zylinders war an allen Stellen in etwa gleich groß und entsprach dem chemischen Schwinden des vollständig abgedichteten Balkens. Es zeigt sich, daß die Austrocknungsfrent bei diesem dichten Straßenbeton selbst bei Lagerung im Klimaraum 20 °C/65 % r.F. auch nach ei-

Shrinkage and contraction were measured both in the longitudinal direction on beams (10 cm x 10 cm x 50 cm) and in the radial direction on cylinders (d = 15 cm, h = 30 cm). The shrinkage and swelling determined on the beams corresponded approximately to the values measured on the top and bottom of the cylinders (see Table 5). One exception to this were the changes in length measured on beams with footbath storage; the swelling at the underside and the shrinkage at the upper side were smaller than the corresponding changes in the cylinders or in the beams stored in air or stored completely under water respectively. These storage-induced changes may well be attributable to changed internal stress distributions.

The total shrinkage of the concretes, i.e. the changes as a result of drying shrinkage and chemical shrinkage, for which the time curves and range of scatter are shown at the top of Fig. 3, came to 0.15 ‰ to 0.25 ‰ after 7 days, 0.3 ‰ to 0.4 ‰ after 28 days, and 0.5 ‰ to 0.7 ‰ after 365 days (see Table 5, Column a). The chemical shrinkage (see Table 5, Column c) was 0.04 ‰ to 0.17 ‰ after 28 days and 0.07 ‰ to 0.21 ‰ after 365 days¹⁾. The behaviour with time and the range of scatter of the swelling of the concretes are, with the exception of the concrete made with shell limestone chippings, shown in the lower part of Fig. 3. After 365 days the swelling values lay between 0.04 ‰ and 0.16 ‰. Concrete made with the swellable shell limestone chippings (M 15) had a swelling value of 0.22 ‰ (Table 5, Column b). After completion of the three-day protective preliminary storage the concretes exhibited slight chemical shrinkage (see Fig. 3, bottom) before they began to swell with the onset of water absorption. When the shrinkage which has to be cancelled out first by the swelling process is taken into account then the total swelling is increased to values of 0.07 ‰

¹⁾ Das mit 0,27 ‰ verhältnismäßig hohe Schwinden der Balken der Mischung M 12 (Alter 365 Tage, siehe Tafel 5), das über das chemische Schwinden der anderen Betone wesentlich hinausging, konnte nicht geklärt werden. Der überhöhte Wert scheint auf Prüfeinflüsse zurückzuführen zu sein, da der an der abgedichteten Unterseite der Zylinder gemessene Wert nur 0,22 ‰ betrug.

¹⁾ The relative large shrinkage of 0.27 ‰ of the beams made with mix M 12 (age 365 days, see Table 5) which was substantially greater than the chemical shrinkage of the other concretes could not be explained. The excessively high value seems to be attributable to test effects, as the value measured on the sealed underside of the cylinder was only 0.22 ‰.

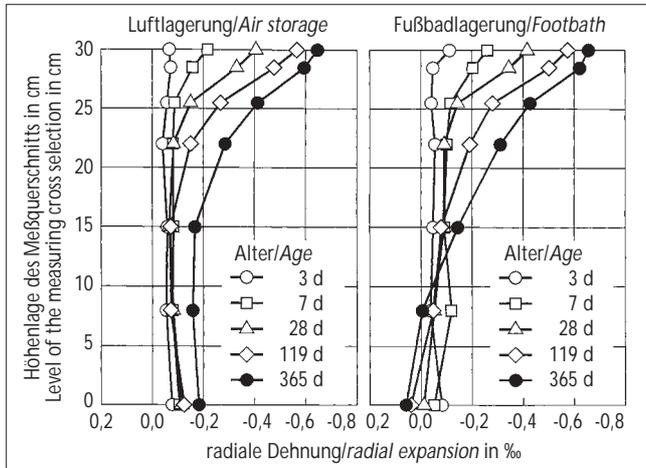


Bild 4: Radiale Dehnung der luftgelagerten (links, Lagerung e) bzw. fußbadgelagerten (rechts, Lagerung f) Zylinder in Abhängigkeit vom Alter der Probekörper (Mischung M 3)

Fig. 4: Radial expansion of cylinders stored in the air (left-hand side, storage e) and in a footbath of water (right-hand side, storage f), respectively, in relation to the age of the specimens (mixture M 3)

nem Jahr nur bis zur Mitte des Zylinders vordrang. Das Quellen des fußbadgelagerten Zylinders begann an der Unterseite und machte sich in höhergelegenen Meßquerschnitten erst nach längerer Zeit bemerkbar. In der Mitte des 30 cm hohen Zylinders trat praktisch kein Quellen, sondern nur ein Schwinden in der Größenordnung des chemischen Schwindens auf.

Bei den im folgenden dargestellten geringen Unterschieden zwischen dem Quellen bzw. dem Schwinden verschiedener Betone muß berücksichtigt werden, daß Einzelergebnisse um bis zu $\pm 0,02$ ‰ vom Mittelwert abweichen können.

4.3.2 Schwinden

Unterschiedliche Zemente beeinflussen das Schwinden des Zementsteins und damit in stark abgeminderter Form (siehe Teil 1, Abschnitt 2.2.1) auch das Schwinden des Betons. Der Mittelwert des Gesamtschwindens der untersuchten Betone (M 1 bis M 12) lag nach sieben Tagen bei rd. 0,2 ‰ und nach einem Jahr bei rd. 0,6 ‰ (siehe Bild 3 oben und Tafel 5, Spalte a, e und f). Die Abweichung vom Mittelwert betrug für die untersuchten Portlandzemente nach sieben Tagen rd. $\pm 0,05$ ‰ und nach einem Jahr rd. $\pm 0,1$ ‰. Die über die Prüfstreuung hinausgehenden Unterschiede

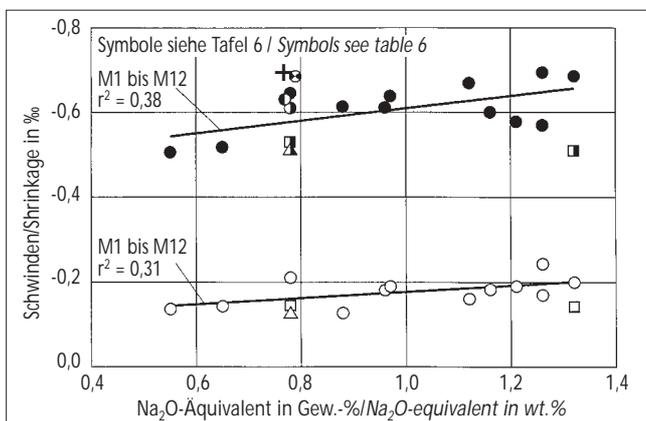


Bild 6: Schwinden der luftgelagerten Balken (Lagerung a) in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung, vom Zuschlag und vom Na_2O -Äquivalent des Zements (Bestimmtheitsmaß r^2 für die Mischungen M 1 bis M 12)

Fig. 6: Shrinkage of the beams stored in the air (storage a) in relation to the concrete composition, the aggregate and the Na_2O -equivalent of the cement (coefficient of determination r^2 for the mixtures M 1 to M 12)

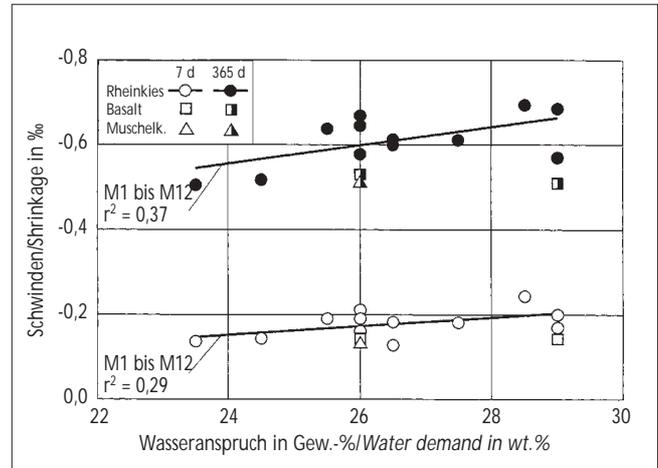


Bild 5: Schwinden der luftgelagerten Balken (Lagerung a) in Abhängigkeit vom Zuschlag und vom Wasseranspruch des Zements (Bestimmtheitsmaß r^2 für die Mischungen M 1 bis M 12)

Fig. 5: Shrinkage of the beams stored in the air (storage a) in relation to the aggregate and the water demand of the cement (coefficient of determination r^2 for the mixtures M 1 to M 12)

to 0,21 ‰, and for concrete with shell limestone to 0,25 ‰. The higher swelling values for normal paving concrete which are occasionally quoted can, under some circumstances, be attributed to the fact that the test pieces were not submitted to protective storage before underwater storage and so were able to dry out.

Fig. 4 shows the behaviour with time of the shrinkage or swelling of the cylinders stored under differing conditions. Both lots of cylinders were able to dry out through the surface which had been at the top during production. For air storage the underside of the cylinder was sealed (Fig. 4, left), but in the footbath storage the cylinder was able to take up water through the underside (Fig. 4, right). The shrinkage in the radial direction of the upper halves of the two lots of cylinders stored under different conditions is virtually identical (Table 5, Columns e and f). The shrinkage in the lower half of the sealed cylinder was approximately the same at all points and corresponded to the chemical shrinkage of the completely sealed beam. It is apparent that even during storage in a 20 °C/65 % r.h. climatic chamber the drying front in this dense paving concrete had only penetrated to the middle of the cylinder even after a year. The swelling of the cylinder with footbath storage began at the underside and only became noticeable at the higher measuring cross-sections after a fairly long time. Practically no swelling occurred at the middle of the 30 cm high cylinder, but only shrinkage of the same order of magnitude as the chemical shrinkage.

In the slight differences shown below between the swelling or shrinkage of different concretes it must be borne in mind that individual results can deviate from the mean value by as much as $\pm 0,02$ ‰.

4.3.2 Shrinkage

Different cements affect the shrinkage of the hardened cement paste, and therefore also, to a greatly diminished extent (see Part 1, Section 2.2.1), the shrinkage of the concrete. The mean value of the total shrinkage of the concretes under investigation (M 1 to M 12) was about 0,2 ‰ after seven days and about 0,6 ‰ after a year (see Fig. 3, top, and Table 5, Columns a, e and f). The deviation from the mean value for the Portland cements under investigation was about $\pm 0,05$ ‰ after 7 days and about $\pm 0,1$ ‰ after a year. The differences in shrinkage beyond the experimental error are the result of differences in the absorption and loss of moisture by the concrete, which are caused by the structure of the hardened cement paste. The formation of the structure of the hardened cement paste is affected by the chemo-mineralogical and physical properties of the cement. Structure-induced effects on the shrinkage and swelling are often discussed in the literature [1, 2] in relation to the

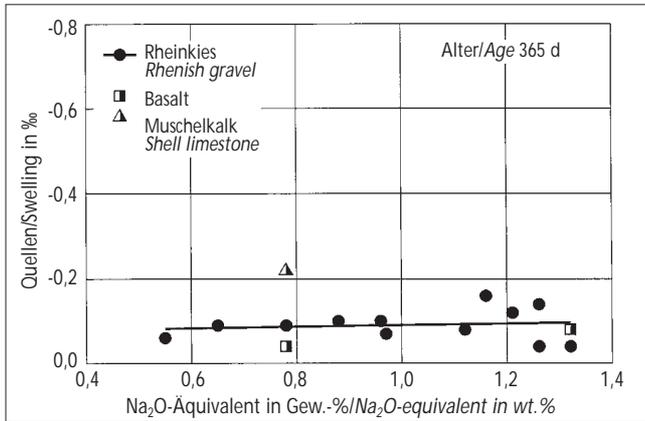


Bild 7: Quellen der wassergelagerten Balken (Lagerung b) in Abhängigkeit vom Zuschlag und vom Na₂O-Äquivalent des Zements
 Fig. 7: Swelling of the beams stored under water (storage b) in relation to the aggregate and the Na₂O-equivalent of the cement

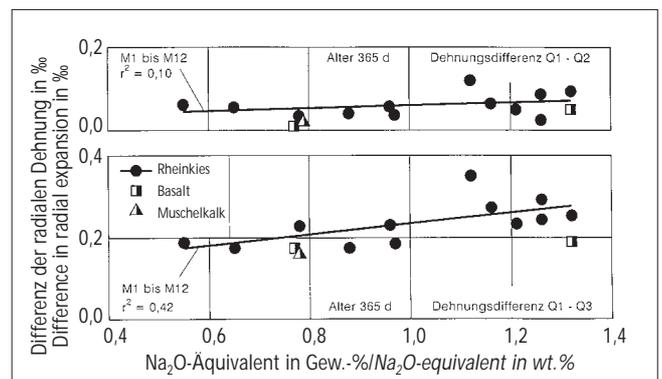
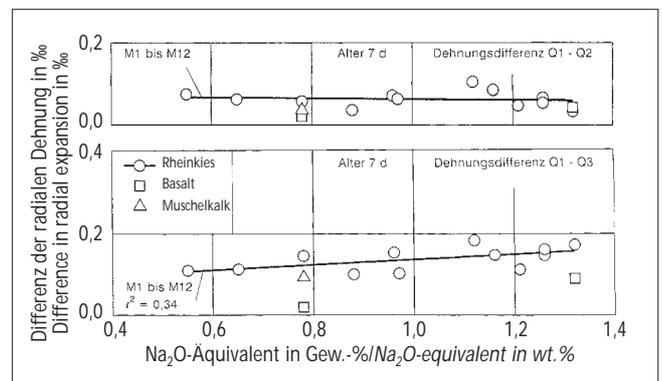
im Schwinden beruhen auf Unterschieden in der Feuchteaufnahme und -abgabe des Betons, die ihre Ursache in der Struktur des Zementsteins haben. Die Strukturbildung des Zementsteins wird beeinflusst von den chemisch-mineralogischen und den physikalischen Eigenschaften des Zements. Strukturbedingte Auswirkungen auf das Schwinden und Quellen werden in der Literatur [1, 2] häufig in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung des Betons und dabei bevorzugt in Abhängigkeit vom Na₂O-Äquivalent des Zements diskutiert. Im folgenden werden zur Überprüfung dieser vermuteten Abhängigkeit die im Rahmen dieser Untersuchung bestimmten Dehnungen auch in Abhängigkeit vom Na₂O-Äquivalent des Zements dargestellt.

Tendenzmäßig nahm das Schwinden mit zunehmendem Wasseranspruch (siehe Bild 5) und zunehmendem Alkaligehalt der Zemente (siehe Bild 6) zu. In die Bilder wurde die Regressionsgerade für die Betone mit unterschiedlichen Zementen eingetragen (M 1 bis M 12). Eine statistisch gesicherte Korrelation zwischen dem Schwinden und dem Wasseranspruch bzw. dem Na₂O-Äquivalent des Zements konnte bei einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,37$ bzw. $r^2 = 0,38$ nicht festgestellt werden. Es ist daher nicht möglich, die durch Zementeinflüsse bedingte Streuung des Schwindverhaltens des Betons allein auf Unterschiede im Wasseranspruch oder im Alkaligehalt des Zements zurückzuführen. Auch für weitere Zusammensetzungsmerkmale oder Eigenschaften der Zemente konnte kein systematischer, statistisch gesicherter Einfluß auf das Schwindverhalten von Beton nachgewiesen werden. Multiple Regressionsrechnungen mit einer Kombination mehrerer Zementkennwerte erbrachten ebenfalls keine Verbesserung der statistischen Korrelation. Wie die Versuche bestätigen, wirken sich die in reinem Zementstein feststellbaren strukturbedingten Unterschiede in der Feuchteaufnahme und -abgabe im Beton wegen des vergleichsweise geringen Zementsteinanteils im Stoffraumvolumen kaum noch aus, so daß sich zementbedingte Einflüsse auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton gegenüber den anderen Einflußfaktoren, wie z.B. Zuschlag, nicht mehr signifikant durchsetzen. Eine erhöhte Mikrorißbildung des Betons, die auf Unterschiede im Schwindverhalten zwischen Zementstein und Beton in der Literatur [27] zurückgeführt wurde, konnte in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden. Eine Überprüfung dieser Vermutung durch Mikroskopie von Anschliffen unter rd. 100facher Vergrößerung ergab keinen Hinweis auf eine Mikrorißbildung und erst recht keinen auf Unterschiede zwischen Betonen mit Zementen mit niedrigem und solchen mit Zementen mit hohem Na₂O-Äquivalent.

Wie die Bilder 5 und 6 für den Zement 3 (Na₂O-Äquivalent = 0,78 Gew.-%; Wasseranspruch = 26 Gew.-%) bzw. für den Zement 12 (Na₂O-Äquivalent = 1,32 Gew.-%; Wasseranspruch = 29 Gew.-%) zeigen, wurde bei Betonen mit Basalt- und Muschelkalksplit nach einem Jahr ein gegenüber Beton mit Zuschlag aus Rheinkies um rd. 0,1 % bis 0,2 % verringertes Schwinden ermittelt (siehe

material composition of the concrete, and particularly in relation to the Na₂O-equivalent of the cement. The changes in length measured during this investigation are also shown as a function of the Na₂O-equivalent of the cement in order to check this supposed relationship.

The shrinkage tended to increase with increasing water demand (see Fig. 5) and increasing alkali content of the cements (see Fig. 6). The regression line for concretes made with different cements (M 1 to M 12) are plotted in the diagrams. No statistically confirmed correlation between the shrinkage and the water demand or Na₂O-equivalent of the cement could be established at coefficients of determination of $r^2 = 0.37$ and $r^2 = 0.38$ respectively. The spread in the shrinkage behaviour of the concrete due to the nature of the cement cannot therefore be attributed solely to the differences in water demand or in alkali content of the cement. Nor could any systematic, statistically confirmed, influence of other composition features or properties of the cements on the shrinkage behaviour of concrete be proved. Even multiple regression calculations with a combination of several cement parameters failed to produce any improvement in the statistical correlation. The trials confirmed that the structure-induced differences in absorption and loss of moisture which can be detected in pure hardened cement paste have hardly any effect in the concrete because of the comparatively small proportion of hardened cement paste in the overall volume of the material. This means that cement-induced effects are no longer significant in the shrinkage and swelling of paving concrete when compared with other influencing factors, such as the aggregate. In this investigation it was not possible to substantiate the increased



Bilder 8 und 9: Differenz der radialen Dehnung zwischen der Oberfläche (Q1) und einem 1,5 cm (Q2) – jeweils im Bild oben – sowie einem 4,5 cm (Q3) – jeweils im Bild unten – tiefer liegenden Meßquerschnitt der fußbadgelagerten Zylinder (Lagerung f) in Abhängigkeit vom Zuschlag und vom Na₂O-Äquivalent des Zements (Bestimmtheitsmaß r^2 für die Mischungen M 1 bis M 12)
 Bild 8 im Alter von 7 Tagen / Bild 9 im Alter von 365 Tagen

Fig. 8 and 9: Difference in radial expansion between the top surface (Q1) and measuring cross sections positioned 1.5 cm (Q2) – in each Fig. at the top – and 4.5 cm (Q3) – in each Fig. at the bottom – of cylinders stored in a footbath of water (storage f), in relation to the aggregate and the Na₂O-equivalent of the cement (coefficient of determination r^2 for the mixtures M 1 to M 12)
 Fig. 8 at the age of 7 days / Fig. 9 at the age of 365 days

auch Tafel 5). Es betrug bei den Splittbetonen im Alter von einem Jahr unabhängig von unterschiedlichen Zementen 0,51‰ bis 0,53‰. Die verwendeten Splitte wiesen einen höheren E-Modul und einen besseren Verbund zur Matrix auf, zeigten insgesamt also eine bessere aussteifende Wirkung als Rheinkies [6 und 29], so daß sich zementbedingte Unterschiede im Schwindverhalten noch weniger auswirken konnten.

Die Zementgehalte und w/z-Werte wurden in den Untersuchungen nur in sehr engen Grenzen variiert, da alle Betonzusammensetzungen in etwa im Bereich üblicher Straßenbetone liegen sollten. Somit erlauben diese Untersuchungen nur tendenzielle Aussagen über den Einfluß dieser Zusammensetzungsparameter auf das Schwindverhalten. Wie erwartet nahm das Schwinden mit zunehmendem Leimgehalt bzw. bei Verwendung eines Luftporenbildners zu. Für den Zement 3 sind die Ergebnisse in Bild 6 dargestellt. Aus dem Bild geht hervor, daß die durch Zuschläge und unterschiedliche Betonzusammensetzungen auftretenden Unterschiede im Schwindverhalten in gleicher Größenordnung lagen wie die, die durch Zemente hervorgerufen wurden.

Die Vermutung, daß das chemische Schwinden als Phänomen der Strukturbildungsprozesse im Zementstein stärker mit den Zementeigenschaften korreliert, konnte ebenfalls nicht bestätigt werden. Im Alter von 28 Tagen (Tafel 5, Spalte b) sind zwar relativ große Unterschiede vorhanden, infolge der insgesamt kleinen Werte konnte aber kein systematischer zement-, zuschlag- oder zusammensetzungsbedingter Einfluß festgestellt werden.

4.3.3 Quellen

Das Quellen der Betone mit unterschiedlichen Zementen ist nach 365 Tagen mit 0,04‰ bis 0,16‰ (siehe Bild 3 unten und Tafel 5, Spalte b) sehr gering. In Bild 7 ist das Quellen in Abhängigkeit vom Na₂O-Äquivalent der verwendeten Zemente aufgetragen. Die Unterschiede des Quellens liegen z.T. im Bereich der Prüfstreuung. Eine zementbedingte Abhängigkeit ist nicht feststellbar. Quellende Zuschläge können das Quellen des Betons vergrößern. Bei dieser Untersuchung ergab sich eine Steigerung von 0,09‰ bei Beton mit Rheinkies auf 0,22‰ bei Beton mit Muschelkalksplitt (siehe Tafel 5, Spalte b, M 15). Bei dem geringen Quellen sind auch Einflüsse aus unterschiedlichen Betonzusammensetzungen nicht feststellbar.

4.3.4 Feuchtegradienten

Straßenbetondecken weisen bei wechselnder Durchfeuchtung nichtlineare Feuchtegradienten auf. Die daraus resultierenden Feuchtedehnungen führen zu Dehnungsgradienten und zugehörigen Eigenspannungsverteilungen. Das Austrocknungsverhalten

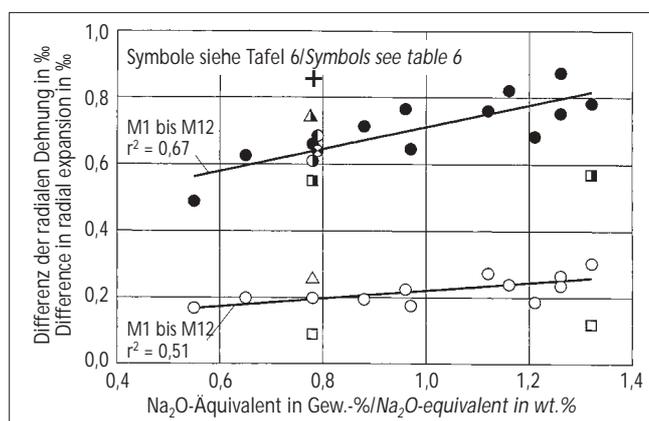


Bild 10: Differenz der Dehnung zwischen dem Quellen an der Unterseite und dem Schwinden an der Oberseite der fußbadgelagerten Balken (Lagerung d) in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung, dem Zuschlag und dem Na₂O-Äquivalent des Zements (Bestimmtheitsmaß r^2 für die Mischungen M 1 bis M 12)

Fig. 10: Difference in expansion between the swelling at the bottom side and the shrinkage at the upper side of the beams stored in a footbath of water (storage d) in relation to the concrete composition, the aggregate and the Na₂O-equivalent of the cement (coefficient of determination r^2 for the mixtures M 1 to M 12)

microcracking of the concrete, which has been attributed in the literature [27] to differences in the shrinkage behaviour between hardened cement paste and concrete. Investigation of this supposition by microscopic examination of polished sections at a magnification of about x100 produced no evidence of microcracking, nor even of differences between concretes made with cements with low and high Na₂O-equivalents.

As is shown by Figs. 5 and 6 for cement 3 (Na₂O-equivalent = 0.78 wt.%, water demand = 26 wt.%) and for cement 12 (Na₂O-equivalent = 1.32 wt.%, water demand = 29 wt.%), shrinkages were measured which after a year were about 0.1‰ to 0.2‰ smaller in concretes with basalt and shell limestone chippings than in concrete with aggregate made from Rhine gravel (see also Table 5). In the concrete made with chippings these were 0.51‰ to 0.53‰ after one year regardless of the different cements. The chippings used had a higher elastic modulus and a better bond to the matrix, and therefore as a whole exhibited a better stiffening action than Rhine gravel [6 and 29], so that cement-induced differences in the shrinkage behaviour also had less effect.

The cement contents and w/c ratios were only varied within very narrow limits in the investigations as all the concrete compositions were intended to lie approximately in the range covered by normal paving concretes. These investigations therefore only allow information to be deduced about trends in the way these composition parameters affect the shrinkage behaviour. As expected, the shrinkage increases with increasing cement paste content or when an air-entraining agent is used. The results for cement 3 are shown in Fig. 6. It can be seen from the diagram that the differences in shrinkage behaviour caused by aggregates and different concrete compositions were of the same order of magnitude as those caused by cements.

It was also not possible to confirm the supposition that, as a phenomenon of the structure building process, the chemical shrinkage in the hardened cement paste correlates more strongly with the cement properties. At 28 days (Table 5, Column b) there were in fact relatively large differences present but because of the small overall values it was not possible to establish any systematic effect caused by cement, aggregate or composition.

4.3.3 Swelling

The swelling of concretes made with different cements of 0.04‰ to 0.16‰ after 365 days is very low (see Fig. 3, bottom, and Table 5, Column b). The swelling is plotted in Fig. 7 as a function of the Na₂O-equivalents of the cements used. The differences in the swelling sometimes lay within the range of experimental error, and it is not possible to establish any cement-dependent relationship. Swellable aggregates can increase the swelling of the concrete. In this investigation there was an increase from 0.09‰ in concrete made with Rhine gravel to 0.22‰ in concrete with shell limestone chippings (see Table 5, Column b, M 15). With the low swelling values it was also not possible to establish any influence of different concrete compositions.

Tafel 6: Legende für die Bilder 6 bis 10

Table 6: Explanation of the symbols used in the figures 6 to 10

Zuschlag Rheinkies/Alter des Betons 365 d Aggregate Rhenish gravel/Age of the concrete 365 d			
z [kg/m ³]	300	350	350
w/z	0,45	0,40	0,45
Leimgehalt [l/m ³] cement paste content	232	253	270
	●	●	●
LP-Beton/Air entrained concrete			+
z = 350 kg/m ³		w/z = 0,45	
Rheinkies Rhenish gravel	○	□	△
7d	○	□	△
365d	●	■	▲

wechselnd durchfeuchteter Straßenbetone kann näherungsweise durch die im Rahmen dieser Arbeit an Zylindern ermittelten Dehnungsgradienten beschrieben werden. Bei Beton mit schneller Austrocknung sind die Dehnungsgradienten wesentlich kleiner als bei Beton mit langsamem Austrocknungsverhalten, bei dem deshalb auch größere Eigenspannungen auftreten können.

Da die Dehnungsgradienten im Rahmen der hier betrachteten Fragestellung nur im oberen Bereich der Fahrbahndecke von Bedeutung sind, sind die Gradienten aus den ermittelten radialen Schwinddehnungen zwischen der Oberseite der Zylinder (Q1) und zwei darunterliegenden Horizonten im Abstand von 1,5 (Q2) bzw. 4,5 cm (Q3) im Alter der Betone von sieben und 365 Tagen in den Bildern 8 und 9 angegeben. Je größer der Unterschied zwischen dem Schwinden der Horizonte ist, um so größer wird i.d.R. auch die Eigenspannung. Eine Abhängigkeit zwischen dem Dehnungsgradient des Betons und dem Alkaligehalt des Zements konnte zwischen Oberseite und zweitem Meßhorizont (Q1-Q2) nicht und zwischen Oberseite und drittem Meßhorizont (Q1-Q3) nur als Tendenz festgestellt werden. Ein signifikanter Einfluß der Zusammensetzung oder der Eigenschaften des Zements auf das Austrocknungsverhalten und auf die daraus resultierenden Unterschiede bei den Eigenspannungen konnte nicht ermittelt werden.

Auch bei den fußbadgelagerten Balken stellt sich ein Feuchtegradient bzw. Dehnungsgradient ein. Die Differenz der Längenänderung zwischen Oberseite und Unterseite eines Probekörpers – bei fußbadgelagerten Balken ist dies die Addition der Absolutbeträge der Quell- und der Schwindverformungen – geben einen Hinweis auf die mögliche Aufschüsselung einer Fahrbahn. In Bild 10 ist diese zugehörige Dehnungsdifferenz für fußbadgelagerte Balken im Alter von sieben und 365 Tagen dargestellt. Während nach sieben Tagen praktisch kein Unterschied zwischen unterschiedlichen Betonarten feststellbar ist, zeigt sich bei 365 Tagen ein tendenzieller Einfluß des Na_2O -Äquivalents des verwendeten Zementes. Die Abweichungen vom Mittelwert liegen bei $\pm 0,2\%$. Die Korrelation zwischen der Dehnungsdifferenz und dem Na_2O -Äquivalent des Zements war aber mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,67$ nach einem Jahr und von $r^2 = 0,51$ nach sieben Tagen wenig ausgeprägt. Wie bereits beim Schwinden festgestellt, konnte bei Betonarten mit der größeren aussteifenden Wirkung des Basaltspalts ein zementbedingter Einfluß nicht mehr festgestellt werden. Die Unterschiede, die durch verschiedene Betonzusammensetzungen und Zuschläge hervorgerufen werden, sind in Bild 10 für Betone mit dem Zement 3 (Na_2O -Äquivalent = 0,78 Gew.-%) dargestellt. Sie liegen wiederum in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede für Betone mit unterschiedlichen Zementen.

Die Laboruntersuchungen ergaben, daß Unterschiede in den Feuchtegradienten unterschiedlich zusammengesetzter Betone sich bei der Lagerung bei 20 °C und 65 % r.F. erst nach verhältnismäßig langer Austrocknung von mehr als zwei Wochen (siehe Bild 4) einstellen. Solch lange Austrocknungsperioden mit derartig geringen Luftfeuchten treten bei Betonfahrbahndecken in Deutschland praktisch nicht auf. Trotzdem kann bei intensiver Sonneneinstrahlung, geringer Luftfeuchtigkeit und/oder starkem Wind die Betonfahrbahn an der Oberfläche austrocknen. Wegen des in Fahrbahndeckenbeton nur langsam ablaufenden Feuchtetransports sind i.d.R. nur die oberflächennahen Bereiche der Fahrbahndecke von den Folgen wechselnder Feuchtebeaufschlagung betroffen. Bei Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons durch die dabei möglichen Eigenspannungen bilden sich feinste Oberflächenrisse aus, die allerdings nur eine sehr geringe Tiefe von wenigen Millimetern im Beton erreichen. Diese i.d.R. mit bloßem Auge nicht sichtbaren Risse sind nicht von den Ausgangsstoffen und der Zusammensetzung des Betons abhängig und haben bei ausreichend dimensionierten Fahrbahndecken erfahrungsgemäß keine negativen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Betonfahrbahn.

5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

An einzelnen Betonfahrbahndecken sind in der Vergangenheit Oberflächenrisse aufgetreten. Als mögliche Schadensursache wurden behinderte Schwind- und Quelldehnungen des Betons genannt und Unterschiede im Verhalten verschiedener Betonfahr-

4.3.4 Moisture gradients

Road concrete pavings exhibit non-linear moisture gradients during cyclic wetting. The resulting changes in length due to moisture lead to strain gradients and associated internal stress distributions. As an approximation, the drying characteristics of road concretes exposed to cyclic wetting can be described by the strain gradients measured on cylinders during the course of this work. In concrete which dries out rapidly the strain gradients are substantially smaller than in concrete with slow drying characteristics in which larger internal stresses can therefore occur.

In the situation being considered here the strain gradients are only important in the upper part of the carriageway paving, so the gradients from the measured radial shrinkage strains between the top of the cylinder (Q1) and the horizontal planes below it at distances of 1.5 (Q2) and 4.5 cm (Q3) are given in Figs. 8 and 9 for the concrete ages of seven and 365 days. The greater the difference between the shrinkage in the horizontal planes the greater, as a rule, is also the internal stress. A dependence between the strain gradient of the concrete and the alkali content of the cement could not be established between the top and the second test plane (Q1-Q2) and only as a trend between the top and the third test plane (Q1-Q3). It was not possible to establish any significant influence of the composition or the properties of the cement on the drying characteristics and the resulting differences in internal stresses.

Moisture gradients and strain gradients were also established in the beams subjected to footbath storage. The difference in change in length between the top and bottom of a test piece – for beams with footbath storage this is the sum of the absolute contributions of swelling and shrinkage deformations – provides information about the possible dishing of a pavement. Fig. 10 shows this associated difference in expansion for beams with footbath storage at the age of seven and 365 days. After seven days practically no difference can be found between different concretes but at 365 days a trend in the influence of the Na_2O -equivalent of the cement used becomes apparent. The deviations from the mean value are around $\pm 0,2\%$. However, the correlation between the difference in expansion and the Na_2O -equivalent of the cement was not very marked, with coefficients of determination of $r^2 = 0,67$ after a year and $r^2 = 0,51$ after seven days. As already established with shrinkage, it was not possible to show any cement-dependent influence in concretes with the greater stiffening effect of the basalt chippings. The differences which are caused by different concrete compositions and aggregates are shown in Fig. 10 for concretes made with cement 3 (Na_2O -equivalent = 0,78 wt.%). They are again of the same order of magnitude as the differences for concretes made with different cements.

The laboratory investigations have shown that for storage at 20 °C and 65 % r.h. the differences in the moisture gradients in concretes of differing compositions are established only after relatively long drying out periods of more than two weeks (see Fig. 4). Such long drying out periods with such low air humidities practically never occur with concrete carriageway pavings in Germany. In spite of this it is possible for the surface of a concrete carriageway to dry out with intensive sunshine, low air humidity and/or strong winds. Moisture transport only takes place slowly in carriageway paving concrete, so as a rule it is only the parts of the carriageway paving close to the surface which are affected by the consequences of cyclic exposure to moisture. If the tensile strength of the concrete is exceeded by the internal stresses which may occur then very fine surface cracks are formed which, however, only penetrate to a very small depth of a few millimetres in the concrete. These cracks, which are not normally visible to the naked eye, are not dependent on the constituents or composition of the concrete, and experience shows that with adequately dimensioned carriageway pavings they have no detrimental effects on the durability of the concrete carriageway.

5 Summary and evaluation of the results

In the past, surface cracks have appeared in individual concrete carriageway pavings. Constricted shrinkage and swelling of the concrete have been cited as possible causes of the damage, and differences in the behaviour of different concrete carriageway pavings

bahndecken auf unterschiedliche Portlandzemente und hierbei in erster Linie auf unterschiedliche Alkaligehalte dieser Zemente zurückgeführt [1, 2].

Aus der Literatur geht hervor, daß das Schwinden des Zementsteins mit steigender Feinheit und steigendem Alkaligehalt des Portlandzements bei Prüfung im Labor zunimmt. Maßgebend hierfür sind Strukturunterschiede im Zementstein. Diese Unterschiede im Schwinden des Zementsteins wirken sich beim Straßenbeton in geringerem Maße aus, da der Zementsteinanteil nur rd. 25 % bis 27 % beträgt. Das Schwinden des Betons wird vom Zementsteinanteil, vom E-Modul des Zuschlags und vom Verbund des Zuschlags zum Zementstein beeinflusst. Für die Schwinddehnungen in der Praxis sind die Austrocknungsbedingungen maßgebend.

Das Schrifttum enthält z.T. widersprüchliche Ergebnisse über den Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Quellen und Schwinden von Beton. In einem mit finanzieller Unterstützung des BMV durchgeführten Forschungsvorhaben wurde deshalb untersucht, ob verschiedene Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen signifikante, baupraktisch relevante Einflüsse auf das Schwind- und Quellverhalten von Straßenbeton haben und ob weitergehende stoffliche Anforderungen an die Betonzusatzstoffe und die Zusammensetzung von Straßenbetonen eingehalten werden müssen.

In die Untersuchungen wurden zwölf Portlandzemente, drei Zuschläge und vier unterschiedliche Betonzusammensetzungen einbezogen. Es wurden auch Zemente berücksichtigt, die den Anforderungen an Straßenbauzemente [34] nicht entsprechen. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Das Gesamtschwinden (Trocknungsschwinden und chemisches Schwinden) der bei 20 °C und 65 % r.F. gelagerten Betone lag nach 365 Tagen zwischen 0,5 ‰ und 0,7 ‰. Splitt als Zuschlag verringerte das Schwinden des Betons.
- Das chemische Schwinden der Betone lag nach 28 Tagen zwischen 0,04 ‰ und 0,17 ‰ und nach 365 Tagen zwischen 0,07 ‰ und 0,21 ‰.
- Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung bzw. den Eigenschaften der Zemente und dem Gesamtschwinden bzw. dem chemischen Schwinden des Betons konnte nicht gefunden werden.
- Das Quellen der Betone unter Wasser lag nach 365 Tagen zwischen 0,04 ‰ und 0,22 ‰. Quellende Zuschläge, wie der verwendete Muschelkalksplitt vergrößerten das Quellen. Weitere systematische Einflüsse der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Quellen von Straßenbeton konnten nicht festgestellt werden.

Gegenüber den Laborbedingungen (Klimaraum 20 °C/65 % r.F.) mit einer mittleren Schwinddehnung im Alter von einem Jahr von rd. 0,6 ‰ verringert sich die Schwinddehnung in der Praxis wegen der wesentlich höheren Umgebungfeuchte und der häufigen Wiederbefeuchtung der Betonfahrbahndecke auf etwa 0,3 ‰ [8, 9]. Unterschiede im Schwindverhalten von Betonen mit verschiedenen Ausgangsstoffen und Zusammensetzungen wirken sich bei diesen verringerten Schwinddehnungen praktisch nicht mehr aus, so daß die im Labor ermittelten Unterschiede bei Verwendung verschiedener Zuschläge oder Portlandzemente keine Rolle mehr spielen. Schon Anfang der 60er Jahre [22] wurde deshalb eine Schwindprüfung an Zementen abgeschafft. Weiterhin muß grundsätzlich bei möglichen Auswirkungen von Schwinddehnungen auf das Verhalten von Betonfahrbahndecken berücksichtigt werden, daß der Straßenbeton teilweise die aus Schwinden resultierenden Eigenspannungen durch Relaxation abbaut.

Für die Praxis können folgende Hinweise gegeben werden:

- Wegen der hygrischen Verformungen ist es nicht notwendig, weitergehende Anforderungen an die Ausgangsstoffe des Straßenbetons zu stellen. Die bisherigen Anforderungen des Bundesministers für Verkehr an Zemente für Betonfahrbahndecken [34] und der ZTV Beton-StB 93 sind ausreichend.
- Wirksame Fugenabdichtungen und eine gute Entwässerung verhindern das Eindringen von Wasser und damit eine Fußbadlagerung der Betondecke. Zusätzliche Beanspruchungen durch ein Quellen an der Unterseite der Fahrbahndecke werden somit vermieden.

have been attributed to different Portland cements, primarily to the different alkali contents of these cements [1, 2].

The literature shows that in laboratory tests the shrinkage of the hardened cement paste rises with increasing fineness and increasing alkali content of the Portland cement. Differences in the structure of the hardened cement paste are a decisive factor here. These differences in the shrinkage of the hardened cement paste have less effect in paving concrete because the proportion of hardened cement paste is only about 25 % to 27 %. The shrinkage of the concrete is affected not only by the proportion of hardened cement paste but also by the elastic modulus of the aggregate and its bond with the hardened cement paste. In practical applications the drying out conditions are a decisive factor in shrinkage.

The literature contains some occasionally contradictory results on the influence of the constituents and of the concrete composition on the swelling and shrinkage of concrete. The fineness or the Na₂O-equivalent of the cement are often cited as influencing parameters. In a research project supported financially by the BMV (Federal Ministry of Transport) an investigation was therefore carried out to find whether different constituents and concrete compositions have a significant effect relevant to building practice on the shrinkage and swelling behaviour of paving concrete, and whether it is necessary to set stricter material specifications for the concrete constituents and the composition of paving concretes.

The investigations covered twelve Portland cements, three aggregates and four different concrete compositions. Cements which did not meet the specifications for road-building cements were also considered [34]. The following results were obtained:

- The total shrinkage (drying shrinkage and chemical shrinkage) of concrete stored at 20 °C and 65 % r.h. after 365 days lay between 0.5 ‰ and 0.7 ‰. The shrinkage of the concrete was reduced when chippings were used as the aggregate.
- The chemical shrinkage of concrete after 28 days lay between 0.04 ‰ and 0.17 ‰, and after 365 days between 0.07 ‰ and 0.21 ‰.
- No statistically significant connection could be found between the composition or properties of the cements and the total shrinkage or the chemical shrinkage of the concrete.
- The swelling of the concretes under water after 365 days lay between 0.04 ‰ and 0.22 ‰. Swellable aggregates, such as the shelly limestone chippings used, increased the swelling. No other systematic effects of the constituents or the concrete composition on the swelling of paving concrete could be detected.

When compared with the laboratory conditions (climatic chamber 20 °C/65 % r.h.) with an average shrinkage at one year of about 0.6 ‰ the shrinkage under practical conditions is reduced to about 0.3 ‰ because of the substantially higher ambient moisture and the frequent wetting of the concrete carriageway paving [8, 9]. With these reduced shrinkage movements the differences in the shrinkage behaviour of concretes with different constituents and compositions no longer have any practical effect, so the differences measured in the laboratory when using different aggregates or Portland cements no longer play a part. A shrinkage test on cements was therefore abolished at the start of the 60s [22]. Furthermore, when considering possible effects of shrinkage movements on the behaviour of concrete carriageway pavings it should, in principle, be borne in mind that the internal stresses resulting from shrinkage are partially reduced by relaxation of the paving concrete. The following advice can be given for practical conditions:

- The deformation caused by the loss or gain of water does not need stricter specifications to be set for the constituents of paving concrete. The existing specifications set by the Federal Ministry of Transport for cements for concrete carriageway pavings [34] and by ZTV Beton-StB 93 are sufficient.
- Effective sealing of induced joints and good drainage prevent the penetration of water and prevent the bottom of the concrete carriageway from being permanently immersed in water. This avoids additional stressing caused by swelling of the underside of the carriageway paving.
- Concrete carriageways are subject to a large number of stresses which are frequently superimposed on one another. Slight differ-

– Betonfahrbahnen unterliegen einer Vielzahl von Belastungen, die sich häufig überlagern. Geringfügige Unterschiede der Betone hinsichtlich des hygrischen Verformungsverhaltens wirken sich daher kaum auf die Gesamtbeanspruchung einer Betonfahrbahn-decke aus. Betonfahrbahnen müssen so robust dimensioniert und sachgerecht ausgeführt werden, daß die auftretenden Beanspruchungen während einer langen Lebensdauer zuverlässig aufgenommen werden können, ohne daß Schäden entstehen.

ences in the concretes in respect of the deformation behaviour caused by loss or gain of water therefore have hardly any effect on the total stressing in concrete carriageway paving. Concrete carriageways must be generously dimensioned and properly constructed so that they can cope reliably with the stresses which occur during a long service life without any resulting damage.

Literatur

- [1] Springenschmid, R.; Fleischer, W.: Untersuchung der Ursachen von Oberflächenrissen (Netzrissen) in Betondecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 651, Bonn 1993
- [2] Fleischer, W.: Einfluß des Zements auf Schwinden und Quellen von Beton. Dissertation der TU München (1992)
- [3] Siebel, E.; Reschke, T.; Sylla, H.-M.: Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer. Betontechnische Berichte 1995-1997, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1998, S. 133-144; ebenso: Beton 46 (1996) H. 5, S. 298-301 und H. 6, S. 366-370
- [4] Stark, D.: Handbook For The Identification Of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures. Strategic Highway Research Program, Washington 1991
- [5] Stark, J.; Bollmann, K.: Untersuchungen zur Bildung von Oberflächenrissen in Betonfahrbahndecken. Wissen. Z. Hochsch. Archit. Bauwesen - Weimar 41 (1995) H. 6-7, S. 65-74
- [6] Grube, H.: Ursache des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 52, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1991
- [7] Wittmann, F. H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (1977) H. 290, S. 45-101
- [8] Springenschmid, R.: Die Ermittlung der Spannungen infolge von Schwinden und Hydratationswärme in Beton. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984) H. 10, S. 263-269
- [9] Birmann, D.: Langzeitbeobachtung der Fugenöffnung von Betonfahrbahnen – Messung und Bewertung. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München (1988) H. 60, S. 35-54
- [10] Zement-Taschenbuch 1984, 48. Ausgabe. Verein Deutscher Zementwerke. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1984
- [11] DIN 4227 Teil 1 (1988) Spannbeton
- [12] CEB-FIP Model Code 1990: CEB Bulletin d'Information No. 213-214. Comité Euro-International du Béton, Lausanne 1993
- [13] Janssen, D.: Moisture in Portland Cement Concrete. Transportation Research Record 1121 (1981) S. 40-44
- [14] Pickett, G.: Shrinkage stresses in concrete. American Concrete Institute Journal 17 (1946) H. 3, S. 165-204
- [15] Calleja, J. C.: Surface Cracking of Hydrated Cement Pastes: An Interpretation. Hwy. Res. Board Sp. Rep. no. 90, S. 145, Madrid 1966
- [16] Blaine, R. L.: A Statistical Study of the Effects of Trace Elements on the Properties of Portland Cement. Proc. 5th Int'l Symp. Chemistry of Cement, Tokyo 1968, Vol. III, S. 86-91
- [17] Morjaria, J. D.: A Study of the Effects of Gypsum on the Properties of Alkali containing Portland cement. Univ. of Trondheim, Norway 1976
- [18] Jawed, I.; Skalny, J.: Alkalies in Cement: a Review - II. Effects of Alkalies on Hydration and Performance of Portland Cement. Cem. Concr. Research, Vol. 8 (1978), S. 37-52
- [19] Blaine, R. R.: Supplementary Paper III-50: A Statistical Study of the Effects of Trace Elements on the Properties of Portland Cement. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo 1968, Vol. III, S. 86-91
- [20] Sodeikat, Ch.; Fleischer, W.: Auswirkungen unterschiedlicher Eigenschaften von Ober- und Unterbeton auf die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken Teil I: Vorstudie. Schlußbericht zum Forschungsauftrag des BMV, FE.-Nr. 08.118 R92C, Baustoffinstitut der TU München, März 1995
- [21] Graf, O.: Untersuchungen über das Schwinden und Quellen von Zementmörtel bei Verwendung von Zementen verschiedener Mahlung und verschiedener Herkunft. Zement 15 (1926) S. 459-461 und S. 475-477
- [22] Mills, R. H.: Bewertung des Schwindmaßes verschiedener Zemente. Beton 11 (1961) H. 8, S. 557-558; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 235-239
- [23] Walz, K.: Shrinkage of concrete containing blast furnace slag. Colloque International sur le retrait des bétons hydrauliques, Madrid 1968, Vol. I, II-J
- [24] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin 1977
- [25] Venuat, M.: Influence du ciment sur le retrait hydraulique après prise. Colloque International sur le retrait des bétons hydrauliques, Madrid 1968, Vol. I, I-H
- [26] Blaine, R. L.: A statistical study of shrinkage of neat cements and concretes. Colloque International sur le retrait des bétons hydrauliques, Madrid 1968, Vol. I, I-H
- [27] Burrows, R. W.: The Visible and Invisible Cracking of Concrete. Denver, Colorado, 1997
- [28] Pickett, G.: Effect of Gypsum Content and Other Factors on Shrinkage of Concrete Prisms. American Concrete Institute - Proceedings 44 (1948), S. 149-175
- [29] Rüsche, H.; Kordina, K.; Hilsdorf, H.: Der Einfluß des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (1962) H. 146, S. 19-133
- [30] Graf, O.: Über das Schwinden und Quellen sowie über die Dehnungsfestigkeit von Beton mit verschiedenen Zuschlagstoffen. Beton und Eisen (1933) S. 120-123
- [31] Eickschen, E.; Siebel, E.: Feinkörnige Straßenbetonrecyclingmaterialien als Zuschlag in neuen Betondecken. Schlußbericht zum Forschungsauftrag des BMV, FE.-Nr. 08.138 G 95 B. Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf 1998
- [32] Whiting, D.; Dziedzic, W.: Effects of Conventional and High-Range Water Reducers on Concrete Properties. Research and Development Bulletin RD 1075, Portland Cement Association, Skokie 1992
- [33] Spanka, G.; Thielen, G.: Untersuchung zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten. Beton 45 (1995) H. 5, S. 320-327; ebenso Betontechnische Berichte 1995-1997, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1998, S. 33-43
- [34] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 19/1995: Zemente für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton. Bundesminister für Verkehr, Bonn, 15. Juli 1995

