WAPNO HYDRATYZOWANE

SPRAWDZONY DODATEK DO TRWAŁYCH NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

przegląd literatury

EuLA

Tytuł oryginału: HYDRATED LIME. A PROVEN ADDITIVE FOR DURABLE ASPHALT PAVEMENTS

Tłumaczenie: Lido Lang Technical Translations

Korekta merytoryczna: dr inż. Krzysztof Błażejowski

ISBN 978-83-925644-1-6

Copyright © 2011 by EuLA

Wydawcy: EuLA - European Lime Association, Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego

Wydawcy dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej publikacji informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności za ich wykorzystanie. Wydawcy nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe ze stosowania informacji zawartych w publikacji.

EuLA

WAPNO HYDRATYZOWANE

SPRAWDZONY DODATEK DO TRWAŁYCH NAWIERZCHNI ASFALTOWYCH

PRZEGLĄD LITERATURY

Raport Europejskiego Stowarzyszenia Wapna / Zespół ds. Nawierzchni Asfaltowych

Grudzień 2011

Słowo wstępne

W wielu pracach naukowych i badawczych udowodniono, że wapno hydratyzowane ma korzystny wpływ na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, stosowanych do budowy drogowych nawierzchni asfaltowych. Zagadnienie to zostało dogłębnie przebadane w Stanach Zjednoczonych (USA), gdzie wapno występuje w 10% produkowanych corocznie mieszanek (ang. HMA – Hot Mix Asphalt). Niestety, w Europie skuteczność działania wapna hydratyzowanego ciągle pozostaje raczej mało znana i dlatego jego zastosowanie jest tutaj mniej powszechne. W ostatnich latach dokonano przeglądu metod projektowania i zarządzania infrastrukturą drogową, aby lepiej sprostać wyzwaniom wynikającym z rosnącego natężenia ruchu drogowego oraz wymaganiom ochrony środowiska. Poza tym, ograniczenia budżetowe wymagają bardziej optymalnego wykorzystania wszelkich dostępnych zasobów (finansowych, materiałowych, itd.).

Aby przybliżyć tę problematykę odpowiednim organizacjom i instytucjom, przy całej złożoności rynku wapna, przemysł wapienniczy chciałby zapewnić wiarygodny i spójny przekaz skierowany do odbiorców produktów wapienniczych. Dlatego **Europejskie Stowarzyszenie Wapna (EuLA – European Lime Association)** postanowiło zwiększać w Europie świadomość korzyści wynikających ze stosowania wapna w mieszankach mineralno-asfaltowych. Uznano, że warto przekonywać organizacje odpowiedzialne za budowę i utrzymanie dróg, do stosowania wapna w sposób bardziej systematyczny. W 2008 r. pierwsza, powołana doraźnie, grupa EuLA opracowała ulotkę reklamową zatytułowaną „Wapno w nawierzchniach asfaltowych", która jest dostępna na stronie internetowej EuLA (www.eula.be/121.html#c1285).

W roku 2009 EuLA w ramach Komisji ds. Stosowania Wapna utworzyła zespól roboczy ds. mieszanek mineralno-asfaltowych (**ATF – Asphalt Task Force**).
Ma on następujące cele podstawowe:

1. Opracowanie długofalowej (5-10 lat), europejskiej strategii promocji stosowania wapna hydratyzowanego w mieszankach mineralno-asfaltowych.
2. Usprawnienie i koordynacja kontaktów w tym zakresie z organizacjami krajowymi i regionalnymi.
3. Pozyskanie środków pochodzących z przemysłu wapienniczego do promowania lub inicjowania badań naukowych.
4. Rozwijanie odpowiednich instrumentów i działań promocyjnych.

Zespól roboczy ds. mieszanek mineralno-asfaltowych rozpoczął prace od zebrania danych ogólnoeuropejskich, pochodzących ze wszystkich krajów. Dotyczą one rozwoju stosowania wapna hydratyzowanego w nawierzchniach asfaltowych, głównie w mieszankach na gorąco. Tabela 1 przedstawia stan aktualny.

Kolejnym zadaniem, powierzonym zespołowi, było podsumowanie istniejącej wiedzy na temat modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym. Na podstawie tych danych szukano lepszego wytłumaczenia sposobu działania wapna hydratyzowanego w tego rodzaju zastosowaniach. Określenie istniejących luk w znajomości tego tematu, pozwoliło także na zainicjowanie i podjęcie nowych prac badawczych. Wszyscy członkowie zespołu wymieniali się informacjami. Zebrano i przeanalizowano dużą ilość publikacji. Na tej podstawie D. Lesueur przygotował pierwszą wersję niniejszego raportu, który został zweryfikowany przez J. Petita, D. Puiattiego i H.-J. Rittera. W oparciu o pierwszy przegląd i uwagi wszystkich członków zespołu przygotowano wersję drugą. Trzecia i ostateczna wersja raportu uwzględnia wszystkie zgłoszone uwagi i komentarze.

Podziękowania: Autor dziękuje wszystkim członkom zespołu ATF za ich cenne komentarze i spostrzeżenia oraz pomoc w przygotowaniu niniejszego raportu. Wszelkie pytania dotyczące niniejszego raportu lub zespołu ATF proszę kierować przez pocztę internetową na adres: secretariat@ima-europe.eu

Skład zespołu ATF w okresie przygotowywania niniejszego raportu:

- **przewodniczący**: Daniel Puiatti (Lhoist Europe),
- **sekretarz**: Bert D'Hooghe (IMA-Europe / EuLA),
- **eksperci techniczni**: Didier Lesueur (Lhoist R&D), Jöelle Petit (Carmeuse Benelux), Han-Josef Ritter (Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.),
- **członkowie zespołu ATF**: Gorka Argaiz (Calcinor), Hans-Günther Brendl (Schaefer Kalk), Larry Byrne (Clogrennane Lime), Angelo Canziani (Unicalce), Joe Connolly (Clogrennane Lime), Christophe Denayer (Carmeuse), Steve Foster (Singleton Birch), Christoph Kunesch (Wopfinger Baumit), Emma Lopez (Ancade), Alan Lowe (Roadstone), Siegmund Luger (Schaefer Kalk), Stefan Neumann (Wopfinger Baumit), Rafal Pozyczka (Lhoist Poland), Martin Sarobe (Calcinor), Tom Zaremba (Lhoist North America).

Tabela 1. Aktualne zużycie wapna hydratyzowanego w mieszankach mineralno-asfaltowych w Europie. Wszystkie dane zostały zebrane przez zespół ATF. Należy zwrócić uwagę, że udziały procentowe mieszanek zmodyfikowanych wapnem hydratyzowanym w całej produkcji mieszanek są określone szacunkowo i w dużym przybliżeniu, oraz służą do oceny ilościowej poziomu „świadomości znaczenia wapna" w danym kraju. Kolor pomarańczowy: ponad 5% mieszanek zmodyfikowanych wapnem hydratyzowanym; kolor szary – około 1%. AC – beton asfaltowy; SMA – mieszanka mastyksowo-grysowa; PA – asfalt porowaty; CMA – mieszanka asfaltowa na zimno; BBTM – beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw.

Kraj	Rodzaj zdobytego doświad-czenia	Początek	Mieszanki modyfikowane wapnem w porównaniu do mieszanek ogółem (szacun-kowo w %)	% wapna hydraty-zowanego w mieszance	Postać	Cel	Zastosowania
Austria	z własnej inicjatywy	2003	1	1,5 do 3,5	czysty	odmywanie, tworzenie się kolein	AC, SMA, PA
Belgia	zarówno obowiązkowe jak i z własnej inicjatywy	lata 80.	< 1	1,5	wypełniacz mieszany	odmywanie	SMA, PA (guma asfaltowa)
Czechy	próby	1996	< 1	1,5	czysty	odmywanie, tworzenie się kolein	AC, PA (guma asfaltowa)
Dania	z własnej inicjatywy	połowa lat 90.	< 1	1 do 1.5	czysty	odmywanie	AC
Finlandia	z własnej inicjatywy	?	< 1	1 do 2	czysty lub wypełniacz mieszany	odmywanie, starzenie, inne	AC, SMA, CMA
Francja	z własnej inicjatywy	? (> 1945)	1	1 do 1,5	czysty lub wypełniacz mieszany	odmywanie, starzenie, inne	AC, CMA, PA, PA (guma asfaltowa), BBTM
Hiszpania	z własnej inicjatywy	2004	< 1	1 do 2	czysty	odmywanie	SMA
Holandia	obowiązkowo	połowa lat 90.	7	2	wypełniacz mieszany	odmywanie, starzenie, trwałość	PA
Irlandia	z własnej inicjatywy	2001	< 1	2	czysty	odmywanie, tworzenie się kolein	PA
Niemcy	z własnej inicjatywy	2000	< 1	1 do 3	czysty lub wypełniacz mieszany	odmywanie, starzenie	AC, SMA
Polska	z własnej inicjatywy	1998	< 1	1 do 3	wypełniacz mieszany	odmywanie	AC
Portugalia	z własnej inicjatywy	początek lat 2000	< 1	1 do 2	czysty	odmywanie	PA (guma asfaltowa)
Rumunia	próby	2007	< 1	2	wypełniacz mieszany	odmywanie, tworzenie się kolein	AC, SMA
Słowacja	próby	2009	< 1	2	czysty lub wypełniacz mieszany	odmywanie	
Szwajcaria	preferencyjnie	2006	1	1,5	czysty	odmywanie, starzenie, trwałość	PA, AC, SMA,
Szwecja	z własnej inicjatywy / obowiązkowo	1998	< 1	1	czysty	odmywanie, starzenie	AC
Węgry	próby	2009	< 1	2	jeszcze nie określono	odmywanie, tworzenie się kolein	AC
Wielka Brytania	z własnej inicjatywy	wczesne lata 2000	1	1 do 2	czysty	odmywanie	AC
Włochy	z własnej inicjatywy	połowa lat 90.	< 1	1 do 2	wypełniacz mieszany	odmywanie	SMA, PA

Spis treści

Słowo wstępne 4
Spis treści 6
Streszczenie 8
Wstęp 10

1. Wapno hydratyzowane jako aktywny wypełniacz mieszanek mineralno-asfaltowych 12

1.1 Wapno hydratyzowane: właściwości 12
1.2 Wapno hydratyzowane jako wypełniacz 13
1.2.1 Wolne przestrzenie w suchym, zagęszczonym wypełniaczu (met. Rigdena) 13
1.2.2 Badania metodą różnicy temperatury mięknienia 14
1.2.3 Inne właściwości 15

2. Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych 17

2.1 Odporność na uszkodzenia spowodowane wodą i mrozem 17
2.2 Odporność na chemiczne starzenie się 28
2.3 Właściwości mechaniczne 32
2.3.1 Mastyks 32
2.3.2 Moduł 34
2.3.3 Wytrzymałość 36
2.3.4 Odporność na powstawanie kolein 37
2.3.5 Spękania zmęczeniowe 39
2.3.6 Spękania termiczne 41
2.4 Wapno hydratyzowane w połączeniu z innymi dodatkami 43
2.4.1 Wapno hydratyzowane i polimery 43
2.4.2 Wapno hydratyzowane i kwasy polifosforowe 44

3. Mechanizm modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym 45

3.1 Wpływ na kruszywo 45
3.1.1. Modyfikowanie powierzchni 45
3.1.2 Flokulacja cząstek ilastych 46
3.2 Wpływ na asfalt 47
3.2.1 Oddziaływanie chemiczne na asfalt 47
3.2.2 Fizyczne oddziaływanie na asfalt 49

4. Wapno hydratyzowane w mieszankach mineralno-asfaltowych w praktyce 52

4.1 Jak dodawać wapno hydratyzowane do mieszanki mineralno-asfaltowej 52

4.1.1 Czyste wapno hydratyzowane sypane do urządzenia do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej 53

4.1.2 Wapno hydratyzowane jako wypełniacz mieszany 53

4.1.3 Inne sposoby dodawania wapna hydratyzowanego 54

4.2 Obserwowany wzrost trwałości nawierzchni w USA 54

4.3 Obserwowany wzrost trwałości nawierzchni w Europie 56

4.4 Dozowanie wapna hydratyzowanego 56

Podsumowanie i wnioski 59

Spis rysunków 61

Wykaz tabel 63

Załącznik 1 (źródła) 65

Załącznik 2 (lista dokumentów z uwzględnieniem rodzaju oddziaływania materiałów) 67

Bibliografia 73

Streszczenie

Wapno hydratyzowane znane jest od bardzo dawna jako dodatek do mieszanek mineralno-asfaltowych. To rozwiązanie cieszyło się dużym zainteresowaniem w latach 70. XX w. w USA. Częściowym powodem ogólnego spadku jakości lepiszczy asfaltowych był kryzys naftowy w 1973 r., kiedy uszkodzenia nawierzchni spowodowane przez wodę i mróz stały się jednymi z najbardziej uporczywych rodzajów zniszczeń, jakie kiedykolwiek występowały. Wapno hydratyzowane było postrzegane jako najbardziej skuteczny dodatek powstrzymujący proces uszkodzeń nawierzchni, dlatego jego dodawanie do mieszanek jest obecnie wymagane w wielu stanach USA. Ocenia się, że 10% mieszanek mineralno-asfaltowych produkowanych obecnie w USA zawiera wapno hydratyzowane.

Szerokie zastosowanie wapna hydratyzowanego w ciągu ostatnich 40 lat w USA dowodzi że, jest to coś więcej niż tylko dodatek zapobiegający niszczeniu nawierzchni dróg przez wodę i mróz. Jak zostało to szczegółowo omówione w niniejszym raporcie, wapno hydratyzowane jest czynnikiem spowalniającym chemiczne starzenie się asfaltów. Co więcej, powoduje silniejsze usztywnianie mastyksu niż zwykły wypełniacz mineralny (według obserwacji wyłącznie w temperaturze wyższej niż temperatura pokojowa). Wpływa to na właściwości mechaniczne mieszanki mineralno-asfaltowej. Stwierdzono, że wytrzymałość i moduł materiału mieszanki zmieniają się przez dodanie wapna hydratyzowanego w ponad połowie kompozycji mieszanek, a odporność na powstawanie kolein poprawia się w około 75% kompozycji mieszanek. We wszystkich przypadkach, większość prac badawczych koncentruje się na zawartości wapna hydratyzowanego rzędu 1-1,5%. Pozytywny wpływ jest na ogół bardziej wyrazisty w przypadku jego wyższych zawartości. Również opublikowane wyniki badań nad wytrzymałością zmęczeniową wskazują, że wapno hydratyzowane w 77% przypadków zwiększa wytrzymałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych.

Udowodniono, że dodatek wapna hydratyzowanego nie powoduje efektu silniejszego usztywniania niż wypełniacz mineralny w niskiej temperaturze. Jednocześnie, w bibliografii brak informacji o wpływie wapna hydratyzowanego na wytrzymałość na spękania termiczne.

Korzystny efekt dodatku wapna hydratyzowanego w mieszankach mineralno-asfaltowych wynika z silnego oddziaływania pomiędzy dwoma głównymi składnikami: kruszywem i asfaltem. Jest także skutkiem połączenia obu tych materiałów. Wapno hydratyzowane modyfikuje właściwości powierzchniowe kruszywa, umożliwiając rozbudowę składu chemicznego powierzchni (jony wapnia) oraz zwiększenie chropowatości (mikrotekstury) powierzchni ziaren kruszywa (osadzanie się wytrąceń), co jest korzystniejsze dla polepszenia przyczepności asfaltu. A zatem, wapno hydratyzowane działa na istniejące cząstki ilaste znajdujące się na powierzchni kruszywa, powstrzymując ich szkodliwy wpływ ma mieszankę. Wchodzi w reakcję chemiczną z kwasami zawartymi w asfaltach, co z kolei spowalnia kinetykę starzenia i neutralizuje efekt „złych" aktywatorów adhezji obecnych w asfalcie przed dodaniem wapna. Tym samym poprawia odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na wodę i mróz. Znacząca porowatość wapna hydratyzowanego tłumaczy jego właściwości usztywniające w temperaturach wyższych od pokojowej. Zależność od temperatury oraz kinetyka efektu usztywniania mogą wyjaśniać, dlaczego nie zawsze obserwuje się efekt usztywniania mieszanek mineralno-asfaltowych przez użycie wapna hydratyzowanego, a także dlaczego wpływ wapna jest bardziej wyraźny w regionach, gdzie panują wyższe temperatury i gdzie dominującym problemem jest powstawanie kolein.

W raporcie opisaliśmy różne sposoby dozowania wapna hydratyzowanego: do otaczarki bębnowej, jako składnik wypełniacza mieszanego, jako domieszka sucha do kruszywa wilgotnego, w postaci mleczka wapiennego, z sezonowaniem lub bez. Nie ma wyraźnych dowodów, że którykolwiek z tych sposobów jest bardziej skuteczny niż inne. Wszystkie metody potwierdzają korzystny wpływ wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe. Jeśli chodzi o sterowanie procesem produkcji, to wapno hydratyzowane można bardzo łatwo dozować do mieszanek mineralno-asfaltowych.

Przyjmując, że wszystkie wyżej podane właściwości mieszanek decydują o ich trwałości, zastosowanie wapna hydratyzowanego, które je poprawia, ma znaczny wpływ na finalną trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej. Doświadczenia w terenie, w warunkach naturalnych, opisywane przez agencje rządowe USA pozwalają oszacować, że wapno hydratyzowane dodawane do mieszanki w ilości 1,0-1,5% (w stosunku do masy suchego kruszywa) zwiększa trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych od 2 do 10 lat, tj. od 20 do 50%.

Próby w Europie nie są jeszcze tak zaawansowane jak amerykańskie, ale tutaj także zauważa się korzystny wpływ wapna hydratyzowanego na trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych. Przykładowo, francuska firma Sanef, która zarządza autostradami w północnej części Francji, wymaga obecnie dodawania wapna hydratyzowanego do warstwy ścieralnej nawierzchni dróg na ich sieci. Firma ta wykazała, że mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane wapnem hydratyzowanym charakteryzują się o 20-25% większą trwałością. Podobne spostrzeżenia doprowadziły Holendrów do sformułowania wymogu dodawania wapna do asfaltu porowatego, mieszanki stanowiącej obecnie nawierzchnię 70% autostrad w tym kraju. Dodawanie wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych staje się coraz bardziej powszechne i widoczne w większości krajów europejskich, a zwłaszcza w Austrii, Francji, Holandii, Wielkiej Brytanii i Szwajcarii.

Pomimo, iż zalety stosowania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych zostały jasno dowiedzione, przy całej różnorodności materiałów (kruszywa, asfalt, zestawy mieszanek) stanowiących nawierzchnię dróg na 5 kontynentach, to doświadczenia europejskie pozostają nieco w tyle w porównaniu z amerykańskimi. W efekcie wpływ wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe, mierzony zgodnie z europejskimi znormalizowanymi metodami badań, nie został opisany w bibliografii. Do najważniejszych metod badawczych zalicza się parametr opisujący wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITSR, oraz zmęczenie.

Również opis wapna hydratyzowanego w normach europejskich dotyczących kruszyw nie jest do końca właściwy. Po pierwsze, próby takie jak metodą różnicy temperatury mięknienia („ΔPiK") nie mogą być wykonywane na wapnie hydratyzowanym, mimo że są one wymagane dla wypełniaczy mineralnych. Potraktowanie czystego wapna hydratyzowanego jako wypełniacza w normach dotyczących mieszanek mineralno-asfaltowych jest sprawą podstawową dla rozwiązania tej sytuacji. Dodatkowo, klasy wypełniaczy mieszanych, pojawiające się w normach dotyczących kruszyw, nie obejmują wszystkich istniejących produktów, które są aktualnie stosowane.

Wreszcie należy zrozumieć niektóre aspekty teoretyczne, a zwłaszcza zależność temperaturową usztywniającego działania wapna hydratyzowanego w asfalcie, oraz zmiany na powierzchni kruszywa zachodzące po dodaniu wapna hydratyzowanego.

Wstęp

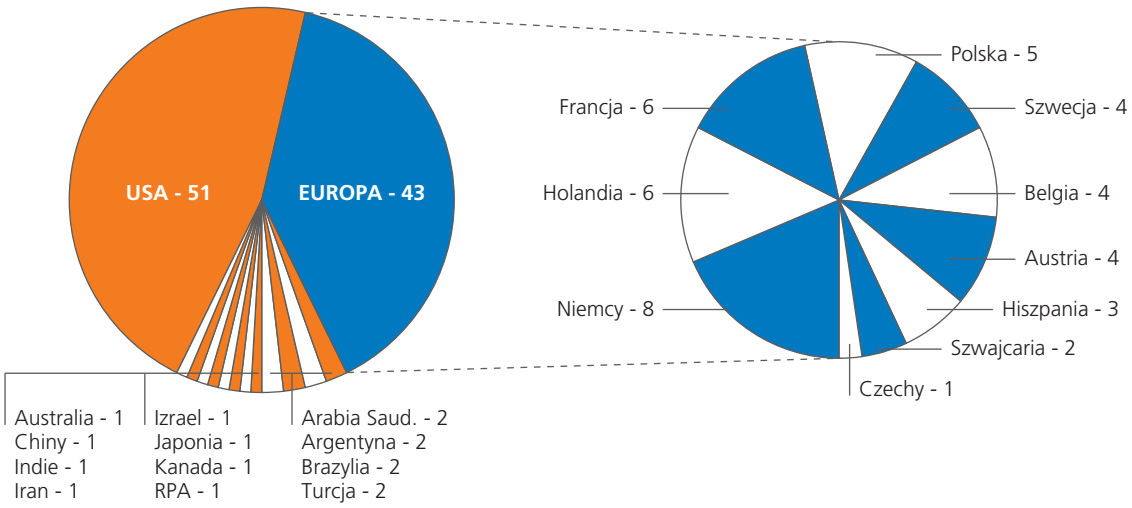
Wapno hydratyzowane było stosowane do mieszanek mineralno-asfaltowych od samego początku. W USA, już pod koniec XIX w. firma National Vulcanite Company stosowała do budowy dróg w miastach Washington (DC) i Buffalo własną mieszankę mineralno-asfaltową zwaną Vulcanite, zawierającą wapno hydratyzowane (0,3% m/m wapna gaszonego [1]). Na początku XX w. inne kompozycje mieszanek mineralno-asfaltowych, opracowywane w USA, takie jak Warrenite [2] i Amiesite, zawierały wapno hydratyzowane [2, 3, 4], a Richardson wspomina o stosowaniu wapna gaszonego z miękką smołą powęglową w Anglii [5].

Kilka dekad później w USA, wapno hydratyzowane było wciąż wymieniane jako możliwy do wykorzystania składnik wypełniacza w mieszankach mineralno-asfaltowych [6]. Mniej więcej w tym samym czasie we Francji, Duriez i Arrambide opisywali i zalecali stosowanie wapna hydratyzowanego dla poprawy właściwości adhezyjnych mieszanki asfalt (smoła)-kruszywo [7]. Wspomnieli oni o stosowaniu wapna hydratyzowanego jako wypełniacza dla nawierzchni o nazwie tarmacadam. Jest to nawierzchnia tłuczniowa, smołowana, sporządzona z mieszanki smoły węglowej i kruszywa „open-graded" (1), stosowana głównie na lotniskach wojskowych w latach 50. w Anglii, Francji i Niemczech.

(1) Kruszywo „open-graded" zawiera niewielką ilość wypełniacza, lub w ogóle nie ma w swoim składzie wypełniacza, bądź też występuje w nim stosunkowo duża zawartość wolnych przestrzeni w kruszywie zagęszczonym (przyp. tłum.).

W latach 70. XX w., ponownie wzrosło zainteresowanie wapnem hydratyzowanym. Stało się tak częściowo w związku z ogólnym spadkiem jakości lepiszczy asfaltowych z powodu kryzysu naftowego w 1973 r. Zniszczenia nawierzchni dróg spowodowane wodą i mrozem stały się jednymi z najbardziej uporczywych rodzajów wad, jakie kiedykolwiek występowały [8, 9]. Zarówno w laboratoriach, jak i w warunkach terenowych, testowano różne dodatki do mieszanek mineralno-asfaltowych. Stwierdzono, że wapno hydratyzowane jest dodatkiem najbardziej skutecznym [8]. Z tego względu jest ono obecnie wymagane w wielu stanach USA. Ocenia się, że 10% mieszanek mineralno-asfaltowych produkowanych w USA zawiera wapno hydratyzowane [10].

Biorąc pod uwagę szerokie stosowanie wapna hydratyzowanego w ostatnich 30 latach w USA, jest ono postrzegane jako coś więcej niż tylko skuteczny dodatek w walce z uszkodzeniami nawierzchni dróg, powodowanymi wodą [11, 12, 13, 14]. Jak opisujemy w tym raporcie, wapno hydratyzowane jest znane jako czynnik spowalniający chemiczne starzenie się asfaltu. Ponadto, ogólnie zwiększa sztywność mieszanki mineralno-asfaltowej, podnosząc jej odporność na powstawanie kolein. Jednocześnie zwiększa się również wytrzymałość na spękania. W związku z tym agencje stanowe USA szacują, że wapno hydratyzowane zwiększa trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych nawierzchni dróg samochodowych od 2 do 10 lat, tj. 20 do 50%.

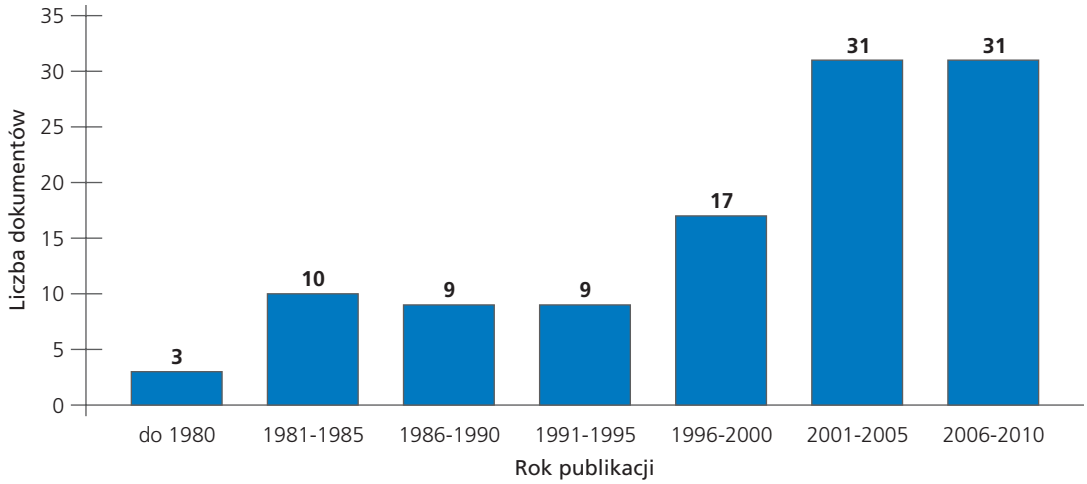


Rys. 1. Kraj pochodzenia pierwszego autora pozycji bibliograficznej umieszczonej w bazie danych (110 dokumentów).

Doświadczenia europejskie nie są jeszcze tak zaawansowane, jak w Stanach Zjednoczonych, ale istnieją również liczne informacje o korzystnym wpływie stosowania wapna hydratyzowanego na trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych. Przykładowo firma Sanef, zarządzająca siecią 1.740 km dróg i autostrad w północnej Francji, wymaga obecnie stosowania wapna hydratyzowanego w warstwie ścieralnej nawierzchni dróg, które jej podlegają [15]. Firma ta stwierdziła, że mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane wapnem hydratyzowanym mają o 20-25% większą trwałość [15]. Podobne obserwacje skłoniły Holandię do wprowadzenia wymagania stosowania wapna hydratyzowanego do warstw asfaltu porowatego [16, 17], tj. mieszanki o dużej zawartości wolnych przestrzeni, która obecnie stanowi nawierzchnię 70% autostrad w tym kraju [18]. W związku z tym dodawanie wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych staje się coraz bardziej powszechne w większości krajów europejskich, a zwłaszcza w Austrii, Francji, Holandii, Wielkiej Brytanii i Szwajcarii.

Biorąc pod uwagę omówiony powyżej kontekst, celem raportu jest przegląd istniejących dowodów na wzrost trwałości nawierzchni asfaltowych z dodatkiem wapna hydratyzowanego. Przy jego opracowywaniu przestudiowano wiele źródeł i stworzono bazę danych bibliograficznych, obejmującą 110 dokumentów (informacje szczegółowe – patrz Załączniki 1 i 2). Pochodzenie i daty publikacji przedmiotowych dokumentów podano odpowiednio na Rys. 1 i 2.

Wapno hydratyzowane w mieszankach mineralno-asfaltowych budzi duże zainteresowanie we wszystkich większych krajach Europy, pomimo iż znaczna część bibliografii pochodzi ze Stanów Zjednoczonych. Publikacje z innych krajów, takich jak Arabia Saudyjska, Argentyna, Brazylia, Chiny, Indie, Iran, Japonia, Korea czy Turcja, potwierdzają, że może być ono z powodzeniem stosowane jako dodatek do materiału (mieszanki) pochodzącego z każdego źródła. Poza tym większość tej bibliografii to pozycje stosunkowo nowe (Rys. 2). Świadczy to o tym, że na świecie aktualnie prowadzone są intensywne badania w tej dziedzinie.



Rys. 2. Rok publikacji dokumentów znajdujących się w bazie danych (110 dokumentów).

Struktura raportu

W rozdziale **pierwszym** omówiono właściwości wapna hydratyzowanego pozwalające na stosowanie go do mieszanek mineralno-asfaltowych.

W **drugim** przedstawiono szczegółowo, zbadane w laboratorium, skutki działania wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymieniono i opisano najczęściej stosowane procedury badawcze, pozwalające na ocenę trwałości mieszanki mineralno-asfaltowej w aspekcie uszkodzeń powodowanych wodą i mrozem, starzeniem się i właściwościami mechanicznymi (moduł sprężystości, podatność na powstawanie kolein, zmęczenie i spękania termiczne).

Rozdział **trzeci** zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy na temat mechanizmu modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym.

Ostatni, **czwarty** rozdział, zawiera informacje o bieżących doświadczeniach praktycznych z zastosowania wapna hydratyzowanego, potwierdzające nie tylko wyniki badań laboratoryjnych w zakresie trwałości mieszanek, ale także wyjaśniające sposoby dozowania wapna hydratyzowanego w wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych.

1. Wapno hydratyzowane jako aktywny wypełniacz mieszanek mineralno-asfaltowych

1.1 Wapno hydratyzowane: właściwości

Wapno hydratyzowane składa się głównie z wodorotlenku wapnia $Ca(OH)_2$. Otrzymuje się je przez gaszenie wapna palonego (w zasadzie tlenku wapnia CaO) przy wykorzystaniu specjalnych urządzeń, tzw. hydratorów. Wapno palone uzyskuje się przez wypalanie wapienia o bardzo dużej porowatości (składającego się z węglanu wapnia $CaCO_3$) w temperaturze około 900°C w specjalnie do tego celu przeznaczonych piecach [4].

Taki sam cykl obróbki można przeprowadzić z użyciem dolomitu, składającego się z $CaCO_3$ i $MgCO_3$ w celu otrzymania wapna dolomitowego (CaO.MgO), całkowicie hydratyzowanego – $Ca(OH)_2.Mg(OH)_2$ lub wapna chudego (zwanego niekiedy dolomitycznym) – $Ca(OH)_2.MgO.Mg(OH)_2$ [4].

Wapno hydratyzowane i wapno palone, włącznie z wapnami dolomitowymi, stosowane w budownictwie, specyfikowane są w normie europejskiej EN 459-1 [19]. Podstawowe cechy jakościowe różnych rodzajów produktów hydratyzowanych zestawione są w Tabeli 2. Klasy określone są dla hydratyzowanego wapna wapniowego i oznaczone są kodami:

CL XX S

w których **CL** oznacza wapno wapniowe. Liczba **XX** określa czystość pod kątem zawartości masy CaO+MgO. Litera **S** oznaczająca wapno suchogaszone (ang. „slaked") i określa produkty hydratyzowane w postaci sproszkowanej. System oznaczeń pozwala na różnicowanie wapna palonego (Q) (ang. „quicklime") i wapna hydratyzowanego w postaci ciasta wapiennego (S PL) lub mleka wapiennego (S ML).

Klasa	CaO + MgO [% m/m]	Wapno dostępne [% m/m]
CL 90 S	≥ 90	≥ 80
CL 80 S	≥ 80	≥ 65
CL 70 S	≥ 70	≥ 55

Tabela 2. Różne klasy wapna hydratyzowanego zgodnie z normą EN 459-1:2010.

Do modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych najczęściej stosowane jest standardowe hydratyzowane wapno wapniowe lub dolomitowe wapno hydratyzowane, które zachowuje się podobnie [20, 21, 22]. Jednocześnie **wykazano, że wapno palone jest szkodliwe, jeśli zastosuje się je zamiast wapna hydratyzowanego** [20]. W niektórych, bardzo specyficznych zastosowaniach używa się albo wapna palonego, albo hydratyzowanego, razem z porowatym kruszywem (żużel, itp.) w celu zapobiegania zjawisku tzw. „tworzenia się zupy", które występuje gdy woda z kruszywa emulguje asfalt podczas transportu mieszanki [23]. W tym przypadku woda pozostająca w porach kruszywa powoduje hydratyzację wapna palonego dzięki czemu w mieszance powstaje wapno hydratyzowane. W raporcie będziemy się koncentrować na standardowym wapnie hydratyzowanym, chociaż wyniki odnoszą się w większości także do wapna dolomitowego.

Czystość wapna hydratyzowanego można ocenić na podstawie normy EN 459-2 [24]. Metoda zasadniczo polega na miareczkowaniu alkacymetrycznym. Ta sama zasada jest wykorzystywana przy dozowaniu wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych, co opisujemy szczegółowo w Rozdziale 4.

Wapno hydratyzowane zazwyczaj występuje w postaci suchego, białego proszku (Rys. 3) o gęstości ziaren 2,2 Mg/m^3 [4]. Z uwagi na wysoki poziom porowatości cząstek (rzędu 50%), gęstość objętościowa tego wapna, wyznaczana zgodnie z normą EN 459-2, wynosi zazwyczaj od 0,35 do 0,8 Mg/m^3.

Wapno hydratyzowane może być dodawane w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych bezpośrednio z silosa (opisujemy to szczegółowo w Rozdziale 4). Niektóre wytwórnie nie dysponują jednak specjalnym silosem przeznaczonym na wapno. Dlatego też wolą stosować wypełniacz mieszany składający się z mieszanki zawierającej od 10 do 75% wapna hydratyzowanego oraz inny wypełniacz, zwykle sporządzany z czystego wapienia (mączkę wapienną).

Rys. 3. Wapno hydratyzowane (źródło: Lhoist).

1.2 Wapno hydratyzowane jako wypełniacz

Z uwagi na mineralne pochodzenie wapna hydratyzowanego oraz jego proszkową postać, w branży wytwórczej mieszanek mineralno-asfaltowych, porównywane jest ono do wypełniacza mineralnego. Normy europejskie (serii EN 13108-1 do -7) dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco wskazują, że wapno hydratyzowane powinno być uważane za wypełniacz, a przypis 1 w punkcie 4.3.4 normy wyraźnie stwierdza, że: „wypełniacz obejmuje takie materiały jak cement i wapno hydratyzowane" [25].

Jako wypełniacz mineralny, wapno hydratyzowane można oceniać posługując się specyfikacjami kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń. Szczegółowo podaje to norma EN 13043 [26]. Istotna część tej normy dotycząca wypełniaczy, odnosi się też do wapna hydratyzowanego i wypełniacza mieszanego.

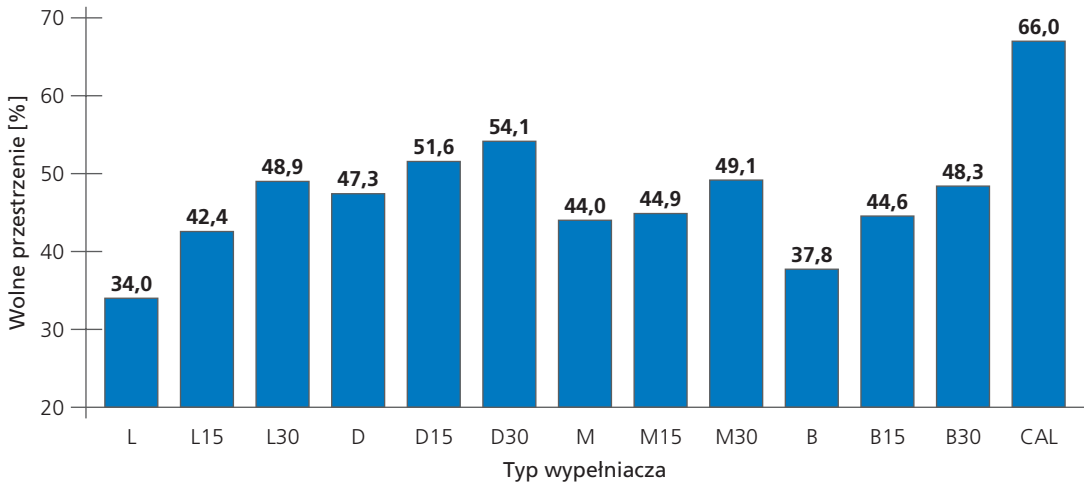
Norma EN 13043 [26] dotyczy między innymi tych właściwości wypełniacza, które związane są z jego usztywniającym działaniem na asfalt. W szczególności określa się zawartość wolnych przestrzeni w suchym, zagęszczonym wypełniaczu (wolne przestrzenie wg Ridgena) oraz wzost temperatury mięknienia metodą ΔPiK („pierścienia delta i kuli").

1.2.1 Wolne przestrzenie w suchym, zagęszczonym wypełniaczu (met. Rigdena)

Badanie wolnych przestrzeni w suchym, zagęszczonym wypełniaczu (EN 1097-4 [27]) polega na pomiarze gęstości zagęszczonej na sucho próbki badanego wypełniacza i podzieleniu jej przez gęstość ziaren (cząstek stałych) wypełniacza. Stosunek tych dwóch wartości jest miarą udziału objętościowego wolnych przestrzeni w zagęszczonym wypełniaczu. Badania te zostały zaproponowane przez P.J. Rigdena z British Road Research Laboratory w 1947 r. [28] i dlatego przyjęło się dla nich określenie „wolne przestrzenie wg Rigdena".

Wypełniacze mineralne charakteryzują się generalnie wolnymi przestrzeniami rzędu 28 do 45% v/v [29, 30, 31, 32, 33, 34], przy czym 30 do 34% to typowy zakres dla wielu wypełniaczy, takich jak większość wypełniaczy wapiennych, patrz Rys. 4. Wapno hydratyzowane ma znacznie więcej wolnych przestrzeni wg Rigdena, na ogół pomiędzy 60 a 70%, zazwyczaj około 65% [29, 31]

Rozpatrując wypełniacze mieszane, udział wolnych przestrzeni wg Rigdena zwiększa się ze wzrostem zawartości wapna hydratyzowanego i zazwyczaj wynosi 45-50% v/v dla zawartości wapna hydratyzowanego wynoszącej 25% m/m w wypełniaczu mieszanym ([29, 31, 35] – Rys. 4). Należy nadmienić, że popiół lotny przyczynia się do zwiększenia udziału wolnych przestrzeni wg Rigdena [35].



Rys. 4. Wolne przestrzenie wg Rigdena dla kilku wypełniaczy i wypełniaczy mieszanych. L – wapień; D - dolomit; M – melafir; B – bazalt; CAL – wapno hydratyzowane; X15 – wypełniacz X z 15% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego; X30 – wypełniacz X z 30% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego (na podstawie [31]).

1.2.2 Badania metodą różnicy temperatury mięknienia

Badania metodą różnicy temperatury mięknienia PiK (EN 13179-1 [36]), polegają na wykonywaniu dwóch pomiarów temperatury mięknienia asfaltu rodzaju 70/100 – bez wypełniacza i po dodaniu 37,5% v/v badanego wypełniacza.

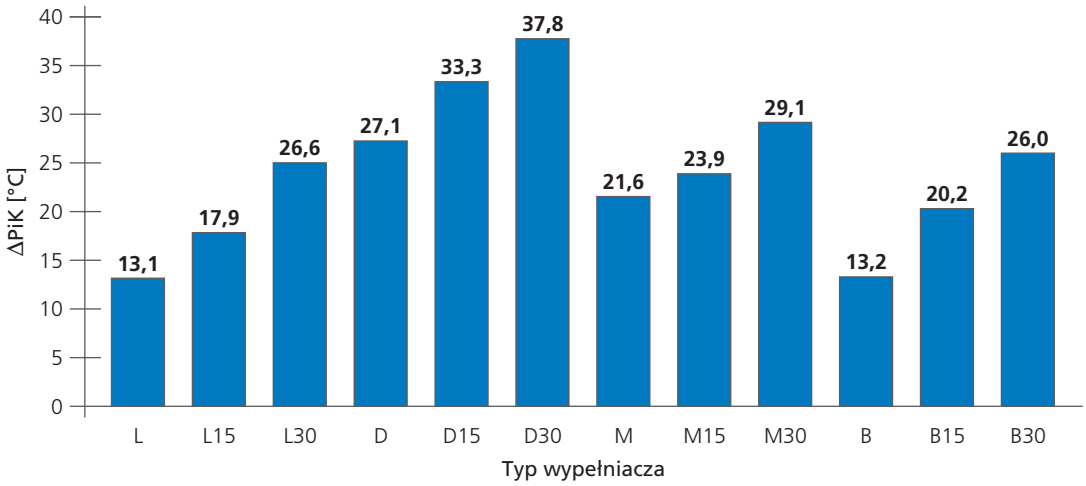
Dla wypełniaczy mineralnych wartości przyrostów ΔPiK wynoszą zazwyczaj od 8 do 25°C, średnio 15°C ([29, 31] – Rys. 5).

Próby ΔPiK nie mogą być przeprowadzane na czystym wapnie hydratyzowanym. Zostało to szczegółowo opisane w kilku pracach [31, 37]. Faktyczna zdolność usztywniania mieszanek mineralno-asfaltowych przez wapno hydratyzowane jest tak duża, że mieszanina asfaltu z jego udziałem wynoszącym 37,5%, objętościowo nie jest wystarczająco płynna, aby przygotować próbkę do testów (wypełnić pierścienie).

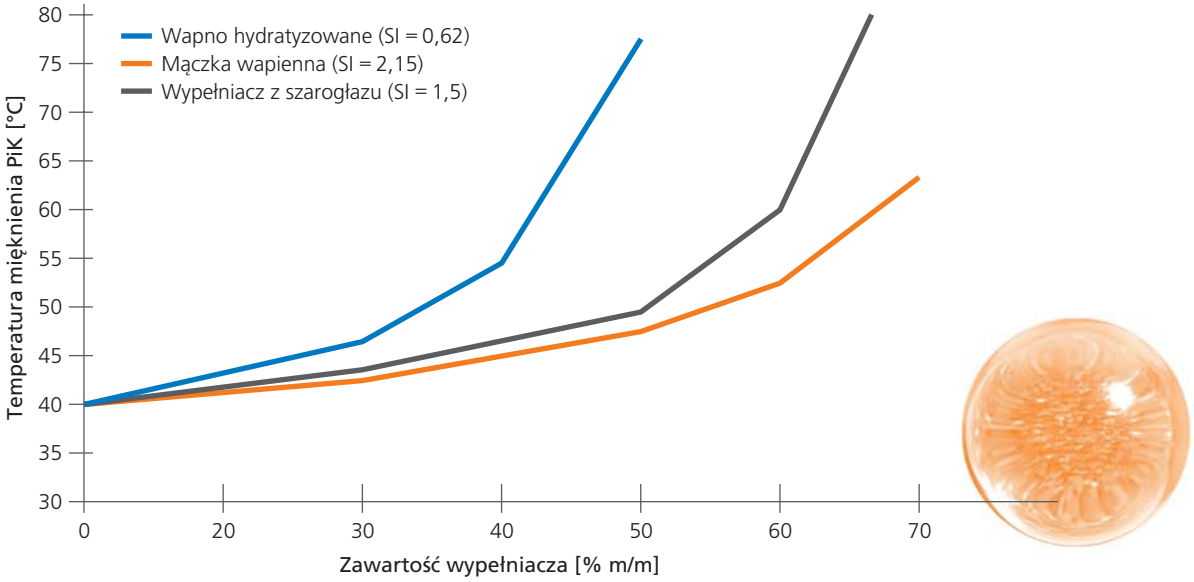
Mimo to, ilość wapna hydratyzowanego mniejsza niż podano w normie europejskiej, pozwala na ocenę ilościową efektu usztywniania [37, 38, 39], Rys. 6. Na przykład w badaniach niemieckich, generalnie stosuje się Wskaźnik Stabilności, odpowiadający takiemu stosunkowi wypełniacza do asfaltu (W:A), który przy próbie ΔPiK powoduje przyrost temperatury mięknienia asfaltu o penetracji w 25°C równej 200 dmm o 20°C [38, 39]. Typowe wartości W:A dla wapna hydratyzowanego wynoszą zazwyczaj 0,7 do 1,0, co oznacza, że zawartość wapna hydratyzowanego w ilości 40-50% m/m zwiększa temperaturę mięknienia zaprawy o 20°C. Wypełniacze mineralne zazwyczaj charakteryzują się wartością W:A od 1,5 do 2,5 [29, 37, 38, 39].

W efekcie, dla wypełniacza mieszanego z wapnem hydratyzowanym stwierdzono, że dodanie wapna hydratyzowanego w ilości 15 i 30% m/m zwiększało temperaturę mięknienia metodą pierścienia i kuli odpowiednio od 2 do 10°C oraz od 8 do 20°C (Rys. 5).

Warto zwrócić uwagę, że udział objętościowy wapna, stosowany w opisanych próbach, nie jest reprezentatywny dla typowej zawartości wapna hydratyzowanego w mieszance mineralno-asfaltowej. Wynosi ona od 1 do 1,5% m/m suchego kruszywa. Dla typowej zawartości lepiszcza wynoszącej 5% m/m (w odniesieniu do masy suchego kruszywa) wielkość ta wynosi 20-30% m/m lub 10-15% v/v wapna hydratyzowanego w stosunku do asfaltu.



Rys. 5. Wartości zmierzone dla kilku wypełniaczy metodą różnicy temperatury mięknienia. L – wapień; D - dolomit; M – melafir; B – bazalt; X15 – wypełniacz X z 15% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego; X30 – wypełniacz X z 30% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego (na podstawie [31]).



Rys. 6. Temperatura mięknienia PiK mieszaniny asfaltu drogowego o penetracji 200 dmm z różnymi zawartościami masowymi wypełniaczy: mączki wapiennej, wapna hydratyzowanego i wypełniacza z szarogłazu (na podstawie [38]).

1.2.3 Inne właściwości

Inne właściwości wykorzystywane przy specyfikowaniu wypełniaczy mineralnych w przemyśle mieszanek mineralno-asfaltowych zestawiono w Tabeli 3. Interesującym i charakterystycznym wskaźnikiem jest liczba asfaltowa (EN 13179-2 [40]). Określanie jej polega na pomiarze ilości wody (w ml), jaką należy dodać do 100 g wypełniacza, aby uzyskać konsystencję porównawczą, definiowaną wielkością penetracji równą 5 do 7 mm. Próba ta wykonywana jest najczęściej w Holandii (gdzie liczba ta jest również znana jako liczba Van der Baana). Daje ona informację o wpływie wypełniacza na usztywnienie mieszanki, przez co jest w pewnym sensie zbliżona do wartości wolnych przestrzeni wg Rigdena.

Właściwość	Metoda	Jednostka	Wapno hydratyzowane	Wypełniacz mineralny	Bibliografia
Gęstość	EN 1097-7	Mg/m^3	2,2	2,6 - 2,9	[29, 31]
Wolne przestrzenie w suchym, zagęszczonym wypełniaczu	EN 1097-4	%	60 - 70	28 - 45	[29, 31, 34]
Różnica temperatury mięknienia	EN 13179-1	°C	niemierzalne	8 - 25	[29, 31]
Liczba asfaltowa	EN 13179-2	–	70 - 120	40 - 50	[31, 35]
Gęstość w nafcie	EN 1097-3	Mg/m^3	0.3	0,5 - 0,9	[26]
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	EN 196-6	cm^2/g	> 10 000	7 000	
Powierzchnia właściwa	BET z adsorpcją azotu	cm^2/g	150 000 - 200 000	14 000 - 95 000	[4, 34]
Badanie błękitem metylenowym	EN 933-9	g/kg	< 1	0 - 20	[34]

Tabela 3. Typowe właściwości wapna hydratyzowanego w porównaniu do wypełniaczy mineralnych.

Do charakteryzowania wypełniaczy (EN 1097-3 [41]), wykorzystywana jest czasami, gęstość w nafcie. Mierzy się tzw. gęstość objętościową 10 g wypełniacza w 25 ml nafty, określonej przez wysokość wypełniacza, który osadza się w nafcie po upływie 6 godzin. P. J. Rigden [28] wykazał, że mimo, iż pomiar wykonywany był w benzenie, dla przewidywania efektu usztywniania lepiszczy bitumicznych przez wypełniacze mineralne, parametr ten jest mniej istotny, niż zawartość wolnych przestrzeni w suchym zagęszczonym wypełniaczu.

Badanie błękitem metylenowym (EN 939-9 – [42]) nie jest istotne dla wapna hydratyzowanego, ponieważ próba ta ma na celu pomiar ilości materiałów ilastych (pęczniejących) w kruszywie. Nawet jeżeli do produkcji wapna stosowany jest wapień ilasty, iły są modyfikowane chemicznie w piecu. Nie ma ich w materiale końcowym. Mimo to, producenci mieszanek mineralno-asfaltowych szeroko wykonują te próby dla potrzeb kontrolnych wypełniaczy. Nie ma żadnych przeszkód aby próby takie wykonywać dla wapna hydratyzowanego. Uzyskiwany wynik z tego badania jest zazwyczaj mniejszy niż 1 g/kg.

Chociaż metoda Blaine'a (EN 196-6 – [43]) została opracowana do badania cementów, niekiedy jest ona także wykorzystywana przy badaniu wapna hydratyzowanego. Nie jest to właściwe, ponieważ duża porowatość wapna hydratyzowanego, znajdująca się poza zakresem wymaganego przez normę poziomu porowatości materiału uniemożliwia poprawne wykonywanie badania, co z kolei znacząco pogarsza powtarzalność metody. Mimo to można uzyskać wyniki, które są zazwyczaj większe niż 10 000 cm^2/g (= 1 m^2/g) dla typowego wapna hydratyzowanego. Powierzchnię właściwą wapna najlepiej mierzy się metodą Braunauera-Emmetta-Tellera (BET), poprzez adsorpcję azotu. Jest ona zazwyczaj rzędu 15-20 m^2/g [4]. Większość wypełniaczy charakteryzuje się wielkością 1 do 5 m^2/g, ale można znaleźć także wartości większe, bliskie 10 m^2/g [34]. Nie ma jednak odpowiednich norm, opisujących szczegółowo sposób, w jaki metoda BET powinna być stosowana dla wypełniaczy mineralnych, albo dla wapna hydratyzowanego.

W Tabeli 3. przedstawiono zestawienie typowych wartości wybranych właściwości wapna hydratyzowanego w porównaniu z wypełniaczami mineralnymi (wyprodukowanymi przemysłowo). Są to wyłącznie szacunkowe dane dla wymienionych właściwości, które oczywiście zmieniają się w zależności od pochodzenia materiałów. Wypełniacze pochodzące z innych źródeł (takich jak popioły lotne, itp.), mają zupełnie inne właściwości niż wypełniacze mineralne. Dlatego też nie należy ich mylić z wypełniaczami mineralnymi.

2. Wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych

Wzrost zainteresowania wapnem hydratyzowanym, jaki obserwowano w latach 70. XX., koncentrował się na jego korzystnym wpływie na odporność nawierzchni na uszkodzenia powodowane wodą i mrozem. Okazało się jednak, że wapno hydratyzowane poprawiało także inne właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych. Obecnie postrzegane jest jako dodatek wielofunkcyjny, który zwiększa trwałość nawierzchni asfaltowych. Niestety, w laboratoriach nie da się precyzyjnie zmierzyć trwałości mieszanek, z uwagi na wiele czynników wpływających na sposób ich zniszczenia w warunkach naturalnych.

Mimo to, istnieją pośrednie metody badawcze do oceny odporności materiałów nawierzchni drogowych na działanie szkodliwych czynników takich jak: woda, cykle zamarzania i rozmarzania, wystawienie na działanie temperatur i promieniowania UV (starzenie), a także nasilony ruch drogowy.

Dlatego też pokazujemy w tym rozdziale przegląd informacji zebranych z bibliografii technicznej, świadczących o wpływie wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe w zakresie:

- odporności na uszkodzenia powodowane działaniem wody i mrozu,
- odporności na starzenie chemiczne,
- właściwości mechanicznych, a zwłaszcza modułu sprężystości, wytrzymałości, odporności na powstawanie kolein, zmęczenie i spękania termiczne.

Wprawdzie próby laboratoryjne mogą umożliwiać porównywanie materiałów, zwłaszcza w odniesieniu do materiałów o znanym zachowaniu w warunkach naturalnych, jednak dostarczają one niewiele bezpośrednich informacji o trwałości mieszanek, a szczególnie o okresie czasu do wystąpienia uszkodzeń materiału w warunkach terenowych. Poza obserwacjami występowania spękań zmęczeniowych i podatności na powstawanie kolein, z których dane można wykorzystywać w metodach projektowania nawierzchni, takie właściwości jak podatność na uszkodzenia powodowane wodą/mrozem i starzenie się, trudno jest przetransponować na trwałość rzeczywistej nawierzchni. Dlatego w tym rozdziale koncentrujemy się tylko na próbach laboratoryjnych. Rozdział 4 poświęcony jest zachowaniu się nawierzchni w warunkach eksploatacyjnych drogi.

2.1 Odporność na uszkodzenia spowodowane wodą i mrozem

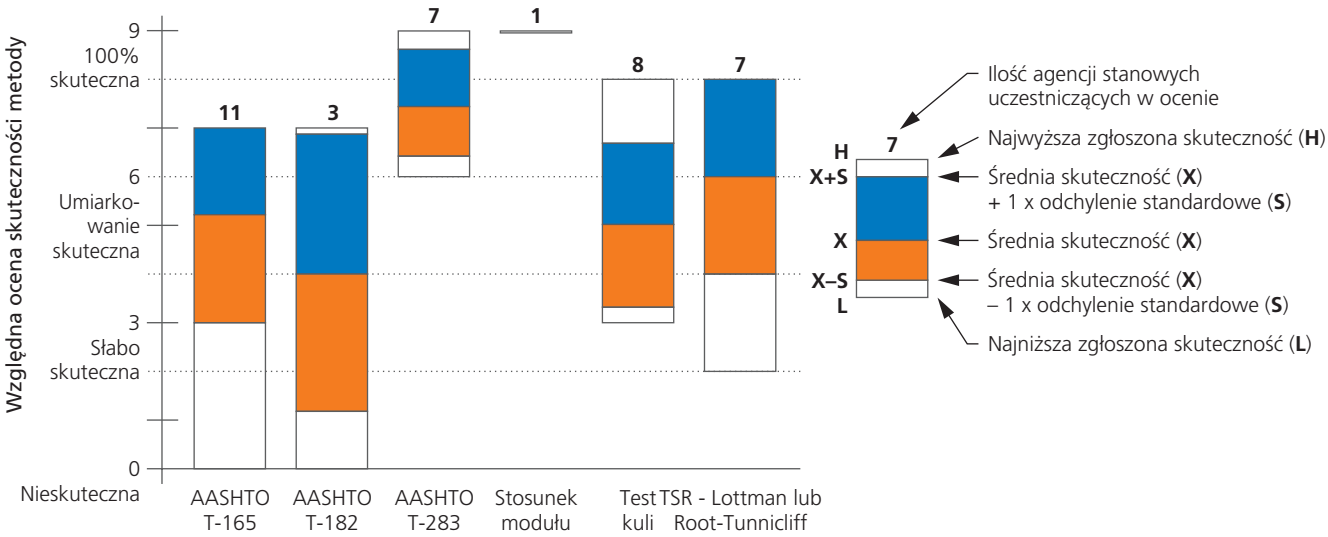
Uszkodzenia spowodowane obecnością wody oraz cyklami zamarzania i rozmarzania, są powszechnym zjawiskiem dla nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych. Generalnie przejawia się to stopniową utratą kruszywa z warstwy mieszanki, Rys. 7. W obecności wody, wiązanie kruszywa z asfaltem ulega osłabieniu do momentu, w którym staje się ono na tyle słabe, że ziarna nie są dalej utrzymywane na swoim miejscu. Powszechnie proces ten nazywa się odmywaniem asfaltu z powierzchni ziaren kruszywa. Jego skutkiem jest wykruszanie się ziaren z warstwy oraz tworzenie się dużych powierzchni zniszczonej nawierzchni [44]. Innym typem wymywania wodą, które również prowadzi do utraty kruszywa, jest występujące w warstwach podbudowy i wiążącej, działanie ciśnienia wody powodowane przez ruch pojazdów po nawierzchni [9]. Jeżeli uszkodzenia takie nie są naprawiane, mogą zniszczyć związanie asfaltowe i doprowadzić do zmiany warstwy asfaltowej w warstwę niezwiązaną i rozwijać się, aż do powstania wybojów. Cykle zamarzania i rozmarzania wzmacniają te niekorzystne skutki, a ostra zima może bezpośrednio powodować powstawanie wybojów.

Rys. 7. Odrywanie kruszywa od podłoża na skutek uszkodzenia nawierzchni spowodowanego obecnością wody (na podstawie [45]).

Zgodnie z badaniami ankietowymi przeprowadzonymi w USA we wczesnych latach 90. XX w. [8], zniszczenia nawierzchni dróg spowodowane obecnością wody, do budowy których stosowano mieszanki mineralno-asfaltowe bez dodatków polepszających adhezję asfaltu do kruszywa, występują średnio między 3 a 4 rokiem po zakończeniu budowy, a niekiedy nawet w pierwszym roku eksploatacji.

Od lat wiadomo, że wapno hydratyzowane zwiększa odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na uszkodzenia spowodowane przez wodę. M. Duriez z Francuskiego Centralnego Laboratorium Dróg i Mostów (LCPC) wraz ze swoim współpracownikiem – J. Arrambide, szeroko mówili o tym zagadnieniu, gdy technologia mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco była jeszcze mało rozwinięta w Europie [7, 46]. Ta właściwość wapna hydratyzowanego wyjaśnia także wznowienie zainteresowania tą tematyką 40 lat temu w Stanach Zjednoczonych [8]. Według organów rządowych USA jest to ważny powód, dla którego nakładają wymóg dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do budowy dróg, za które odpowiadają [10].

Istnieje wiele metod oceny odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na wodę i mróz. W tabeli 4 wyszczególniono metody najczęściej wymieniane w bibliografii. Ich zdolność do przewidywania zachowania mieszanek mineralno-asfaltowych jest ciągle dyskutowana i nie ma wyraźnej zgody co do tego, która z nich najlepiej nadaje się do eliminowania uszkodzeń nawierzchni drogowych, spowodowanych przez wodę w normalnych warunkach eksploatacyjnych [47]. W szczególności, rozchodzenie się wody w mieszance [47] nie jest obecnie mierzone bezpośrednio, a mogłoby to wyjaśnić 100% nasycenie wodą, jakie obserwowano w mieszankach nawierzchni, które uległy zniszczeniu w terenie [9]. Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych prowadzonych w laboratoriach, wskazują na zaledwie 80% nasycenie wodą. Mimo to, metoda Lottmana (AASHTO T-283 – Tabela 4) okazała się jedną z najbardziej skutecznych metod ze wszystkich, stosowanych w USA w 1999 r. (Rys. 8).

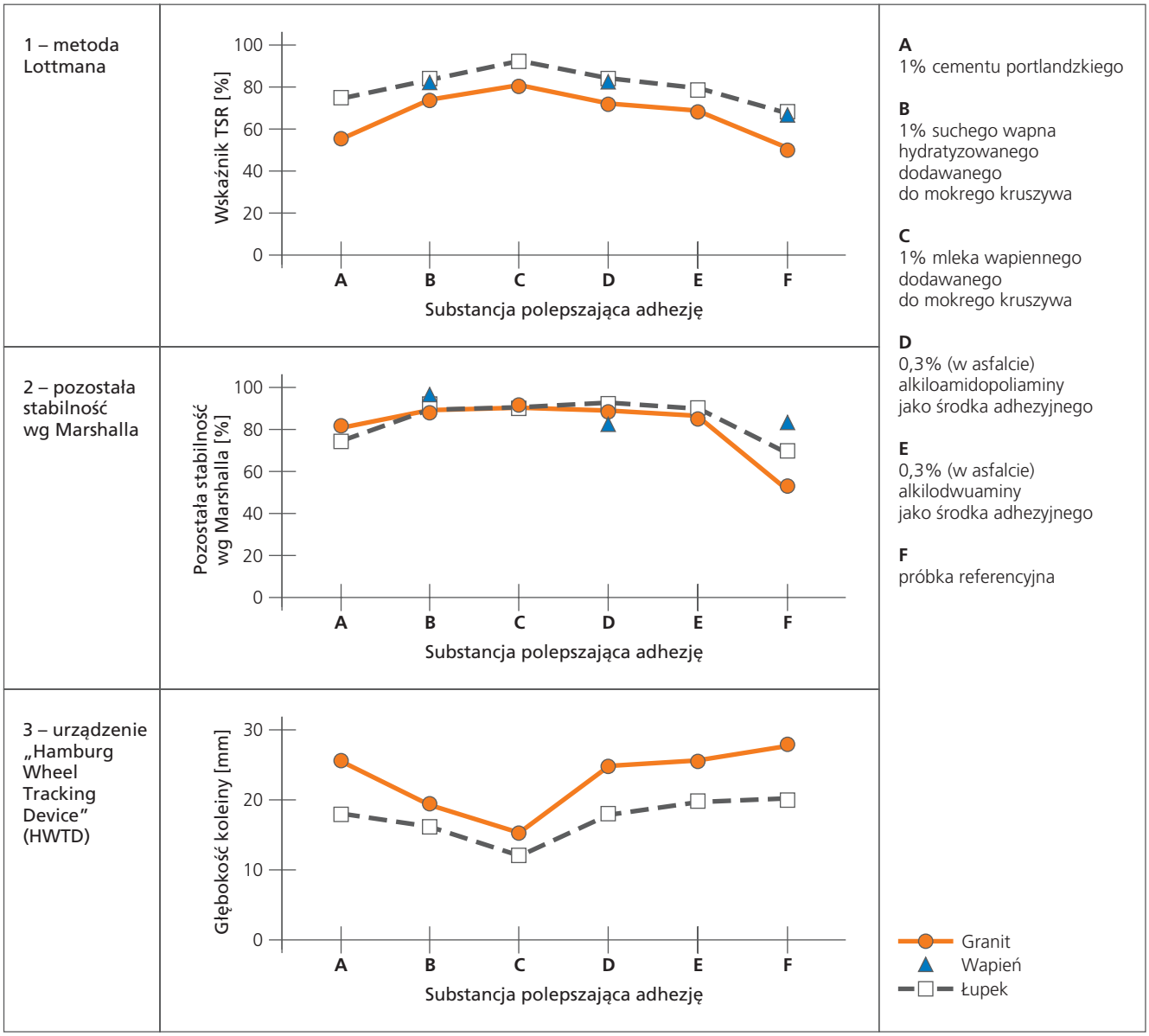


Rys. 8. Porównanie skuteczności kilku metod badawczych dla przewidywania uszkodzeń spowodowanych przez wodę, zgodnie z szacunkami w oparciu o doświadczenia organów rządowych USA (na podstawie [8]).

We wszystkich przypadkach, publikowane dane potwierdzają, że wapno hydratyzowane dodane w ilości od 0,5 do 2% m/m do suchego kruszywa, zwiększa odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na uszkodzenia nawierzchni spowodowane obecnością wody i mrozu, bez względu na zastosowaną metodę badania. Dla uzyskania optymalnych efektów należy dodać przynajmniej 1% m/m wapna hydratyzowanego [48]. Przykłady potencjalnych korzyści podano w Tabelach 5, 7, 8 i 9.

Rys. 9 przedstawia porównanie działania kilku dodatków polepszających przyczepność asfaltu do kruszywa, przy wykorzystaniu szerokiej gamy badań na kruszywach pochodzących z różnych źródeł. Dane zaczerpnięto z badań P. Hao i Y. Hachiya z Państwowego Instytutu Zafrządzania Ziemią i Infrastrukturą Japońskiego Ministerstwa Gospodarki Terenowej, Infrastruktury i Transportu [49]. Widać, że niektóre metody badań są bardziej wymagające niż inne. W szczególności, wyniki badań wszystkich dodatków (z wyjątkiem cementu portlandzkiego) prezentują się identycznie, jeśli jako kryterium przyjmie się pozostałą stabilność wg Marshalla (Rys. 9). Metoda Lottmana (AASHTO T-283) jest jednak bardziej różnicujące i wyraźnie wskazuje, że wapno hydratyzowane zachowuje się lepiej niż inne dodatki, jeśli metoda jest bardziej wymagająca (Rys. 9). Próba z użyciem urządzenia do badania koleinowania w wodzie (HWTD) również wskazuje, że dodatek wapna hydratyzowanego daje lepszy efekt niż inne dodatki, w zakresie zwiększenia odporności mieszanki mineralno-asfaltowej na koleinowanie i na działanie wody (Rys. 9 – patrz także punkt 2.3.4 opis wyników próby).

Wynik badania skuteczności działania dodatków zależy od zastosowanej metody badawczej oraz od zastosowanych materiałów (Tabela 5). Dobry przegląd porównawczy skuteczności płynnego środka adhezyjnego oraz wapna hydratyzowanego, sporządził prof. R. E. Sebaaly z Uniwersytetu Nevada w Reno [13]. Podobne porównania były też przedmiotem kilku innych badań [49, 50]. Wszystkie te prace wskazują, że wapno hydratyzowane jest równie dobrym, lub nawet lepszym środkiem, niż dostępne na rynku płynne środki adhezyjne. Mimo to, z wyników badań przeprowadzonych dla posiadanych surowców i przy wybranej metodzie ich oceny, w jednym przypadku można było stwierdzić, że płynne środki adhezyjne dają lepsze wyniki (Tabele 7 i 9, Rys. 9). Dlatego też procedury wielokrotnego zamarzania i rozmrażania (jak metoda Lottmana – Rys. 10 lub badanie teksańskie – Tabela 8) oraz HWTD (Tabela 5) są najbardziej różnicującymi metodami badań, pozwalającymi wykazać korzystny wpływ stosowania wapna hydratyzowanego [13, 51]. W terenie, w normalnych warunkach eksploatacyjnych, doświadczenia z wapnem hydratyzowanym są rozstrzygające. Opublikowanych zostało kilka prac opisujących dobre wyniki badań laboratoryjnych uzyskane dla wapna hydratyzowanego, które znalazły potwierdzenie w terenie. Np. G.W. Maupin Jr. z Virginia Transportation Research Council przedstawił wyniki badań, wykonanych dla około 12 odcinków dróg podległych Departamentowi Transportu w stanie Wirginia. Porównano w nich wpływ dodatku wapna hydratyzowanego i innych, płynnych środków adhezyjnych [52]. Po 3-4 latach na 3 odcinkach dróg, gdzie do mieszanki mineralno-asfaltowej dodawano wapno hydratyzowane, występowało dużo mniejsze wykruszanie się ziaren z nawierzchni, niż na odcinkach dróg zawierających dodatki chemiczne [52].



Rys. 9. Odporność na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych 0/20 mm sporządzonych z kruszywa pochodzącego z różnych źródeł, o zawartości asfaltu 70/100 w ilości 4,8% m/m oraz z kilkoma dodatkami polepszającymi adhezję. Badania wykonane różnymi metodami: 1 – wg metody Lottmana; 2 – pozostałej stabilności wg Marshalla; 3 – przy użyciu urządzenia HWTD w temperaturze 60°C (na podstawie [49]).

Nazwa badania	Norma	Typ próbki	Metoda	Kondycjonowanie	Wynik próby
Urządzenie „Hamburg Wheel Tracking Device" (HWTD)	EN 12697-22 – metoda B pod wodą	płyty prostokątne 260 x 300 mm o ustalonej grubości końcowej	koleinowanie pod wodą	próba pod wodą w 50°C	głębokość kolein w mm
Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITSR)	EN 12697-12 – metoda A	próbka cylindryczna o średnicy 100 mm (lub 150 lub 160 dla mieszanek o bardzo grubym ziarnie) mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITS) przy 25°C i 50 mm/min.	• próbki w warunkach podciśnienia (7 kPa) przez 30 min. • 70 godz. w wodzie przy 40°C • 2 godz. przy 25°C	współczynnik ITS (wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) w % (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Duriez	EN 12697-12 – metoda B	próbka cylindryczna o średnicy 100 mm (lub 80 lub 120 lub 150 lub 160) mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań	wytrzymałość na ściskanie przy 18°C i 55 mm/min.	• próbki w warunkach podciśnienia (47 kPa) przez 120 min. • 7 dni w wodzie przy 18°C	współczynnik ITS (wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) w % (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Cantabro	EN 12697-17	próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 63,5 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań (generalnie asfalt porowaty)	utrata masy po 300 obrotach w próbie Los Angeles (bez kul stalowych)	generalnie tak samo jak dla normy ASTM D1075	utrata masy (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Sztywność na rozciąganie przy starzeniu powodowanym nasyceniem wodą (ang. SATS)	specyfikacja brytyjska dla robót drogowych na autostradach – klauzula 953	próbka cylindryczna o średnicy 100 x 60 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań, wyciętej z płyty z ilością wolnych przestrzeni = 8%	moduł sztywności na rozciąganie pośrednie mierzony przy 20°C przy użyciu aparatu Nottingham Asphalt Tester	• próbki w warunkach podciśnienia (55 kPa) przez 30 min. • 65 godz. przy 85°C i 2,1 MPa w zbiorniku z wodą • 24 godz. przy 30°C i 2,1 MPa	sztywność przy rozciąganiu pośrednim w % (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Metoda Lottmana	AASHTO T283 Tex 531-C	próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 63,5 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań, zagęszczonej tak, że ilość wolnych przestrzeni wynosiła 6,5-7,5%	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITS) przy 25°C i 50,8 mm/min.	• nasycenie porów 70-80% • 16 godz. przy -17,8°C • 24 godz. w wodzie przy 60°C • 2 godz. w wodzie przy 25°C	współczynnik ITS (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Powtarzalne cykle w metodzie Lottmana	–	próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 63,5 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań zagęszczonej tak, że ilość wolnych przestrzeni wynosiła 6,5-7,5%	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (ITS) przy 25°C i 50,8 mm/min.	kondycjonowanie wg Lottmana, ale z kolejnymi cyklami zamrażania-rozmrażania (generalnie od 1 do 20)	współczynnik ITS (wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) w funkcji liczby cykli zamrażania-rozmrażania

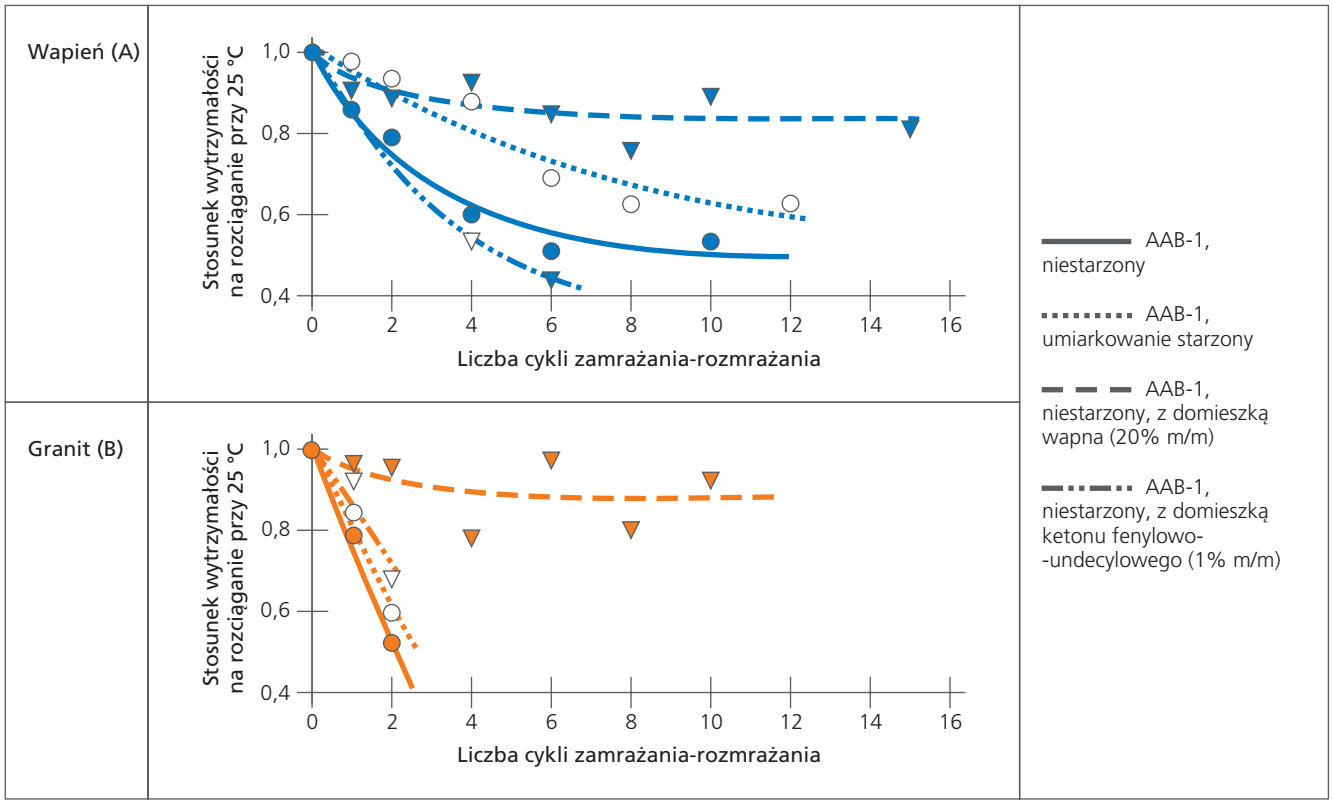
Tabela 4. Najczęściej stosowane metody prób do oceny zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych (ciąg dalszy na następnej stronie).

Nazwa badania	Norma	Typ próbki	Metoda	Kondycjonowanie	Wynik próby
Próba teksańska (Texas Freeze-Thaw Pedestal)		próbka cylindryczna o średnicy 41,3 x 19 mm z powłoką piaskową 0,4/0,8 z asfaltem w ilości optymalnej +2%, zagęszczona ciśnieniem statycznym 27,58 kN przez 20 min.	wizualnie (pęknięcia)	• próbka zanurzona w wodzie destylowanej • 15 godz. przy -12°C • 45 min. w wodzie przy 24°C • 9 godz. przy 49°C następnie powtórzone	liczba cykli zamrażania-rozmrażania do momentu, w którym nastąpiło uszkodzenie próbki
Pozostała wytrzymałość na rozciąganie (współczynnik rozłupania przez rozciąganie / wytrzymałość na rozciąganie pośrednie / próba wg Root-Tunnicliffa)	ASTM D4867	próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 63,5 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badania po zagęszczeniu dowolną metodą (statyczną / wg Marshalla, itp.) tak, że ilość wolnych przestrzeni wynosiła 6-8%	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie przy 25°C i 50,8 mm/min.	• nasycenie porów 55-80% • 24 godz. w wodzie przy 60°C • 1 godz. przy 25°C	współczynnik ITS (wytrzymałość na rozciąganie pośrednie) (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Zanurzanie / ściskanie	ASTM D1075 AASHTO T165	próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 101,6 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badania po zagęszczeniu statycznym po obu stronach (3000 psi przez 2 min.)	wytrzymałość na ściskanie przy 25°C i 5 mm/min.	• 4 dni w wodzie przy 48,9°C • 1 dzień w wodzie przy 60°C	wytrzymałość na ściskanie (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Metoda określania stabilności resztkowej wg Marshalla		próbka cylindryczna o średnicy 101,6 x 76,2 mm mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badania po zagęszczeniu uderzeniami (50 lub 75 uderzeń)	stabilność wg Marshalla przy 60°C – 50,8 mm/min.	24 godz. w wodzie przy 60°C	współczynnik stabilizacji (po kondycjonowaniu / bez kondycjonowania)
Próba „Texas Boil"	ASTM D3625 Tex 530-C	(300 g + zawartość asfaltu) mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badania lub (100 g + asfalt) kruszywa 4,8/9,8	ocena wizualna (powierzchnia kruszywa pokryta asfaltem)	mieszanka mineralno-asfaltowa we wrzącej wodzie przez 10 min.	powierzchnia kruszywa pokryta asfaltem po badaniu (po gotowaniu) w %

Tabela 4. (ciąg dalszy z poprzedniej strony) Najczęściej stosowane metody prób do oceny zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych.

Materiały	Zawartość wapna hydratyzowanego i sposób dozowania [% dla suchego kruszywa]	Kryteria	Bez wapna hydratyzowanego	Z wapnem hydratyzowanym	Typ materiału porównawczego	Materiał porównawczy	Bibliografia
Mieszanki Colorado 4 różne kruszywa 5,1% AC-20 6,5% wolnych przestrzeni	1%	głębokość kolein przy 45°C po 20 000 przejazdów (w nawiasach mieszanki niespełniające wymagań)	• miesz. 1: (17 mm) • miesz. 2: (> 20 mm) • miesz. 3: (> 20 mm) • miesz. 4: 8,7 mm	• miesz. 1: 1,4 mm • miesz. 2: 2,3 mm • miesz. 3: 2,5 mm • miesz. 4: 2,3 mm	0,5% najlepszego środka adhezyjnego w lepiszczu	• miesz. 1: 2,2 mm M • miesz. 2: 8,1 mm • miesz. 3: (13,7 mm) • miesz. 4: 6,2 mm	[56, 11]
Mieszanki Louisiana 0/19 wapień krzemionkowy 3,6-4% lepiszcza 3,6% wolnych przestrzeni	1,5% w postaci mleka wapiennego (LS) lub w lepiszczu (LM) – zamiennik wypełniacza	głębokość kolein przy 50°C po 20 000 przejazdów	• PG64-22: 10,1 mm • PG70-22: 3,7 mm • PG76-22: 3,5 mm	• PG64-22: 9,5 mm (LS) 8,9 mm (LM) • PG70-22: 2,6 mm (LS) 2,9 mm (LM) • PG76-22: 1,9 mm (LS) 1,8 mm (LM)			[57]
Mieszanka C Granit Lithonia 5% PG67-22	2%	głębokość kolein przy 50°C po 8 000 przejazdów	12 mm	4 mm	0,5% środka adhezyjnego w lepiszczu	4 mm	[58]
Mieszanki Texas DOT 6 różnych kruszyw 4,6-5,5% AC-20 7% wolnych przestrzeni		nachylenie krzywej pełzania (cykle przy 40°C aby powstała koleina o głęb. 1 mm w strefie pełzania) / nachylenie krzywej odmywania asfaltu z kruszywa (cykle przy 40°C aby powstała koleina o głęb. 1 mm w strefie pełzania); NS = nie zaobserwowano odrywania	• miesz. 1: 4 856/459 • miesz. 2: 2 979/640 • miesz. 3: 1 926/446 • miesz. 4: 9 815/NS • miesz. 5: 2 082/279 • miesz. 6: 907/163	• miesz. 1: 8 871/NS • miesz. 2: 9 919/NS • miesz. 3: 7 026/NS • miesz. 4: 10 465/NS • miesz. 5: 5 252/NS • miesz. 6: 3 427/NS	płynny środek adhezyjny	• miesz. 1: 5 469/777 • miesz. 2: 4 780/1 050 • miesz. 3: 3 626/1 402 • miesz. 4: 5 770/NS • miesz. 5: 1 511/491 • miesz. 6: 3 471/744	[59, 14]
Mieszanki Superpave z kruszywa wapniowego 0/16 na nawierzchnie najlepszej jakości + kruszywo żwirowe 5,4-5,8% PG64-22 3,6-4,5% wolnych przestrzeni	1% suchego wapna do wilgotnego kruszywa (B2) lub mleko wapienne (B3) – bez zamiennika wypełniacza	punkt odmywania asfaltu z kruszywa przy 50°C (liczba cykli)		B2: 4 300 B3: 2 200	1% pozostałości na sicie przy przesiewaniu wapienia (bez zamiennika lepiszcza)	1 800	[60]
Beton asfaltowy 0/11 S Asfalt 50/70	1,5% jako wypełniacz mieszany (Ka_{25})	głębokość kolein przy 50°C po 20 000 cykli	10,9	5,2			[37]
Beton asfaltowy 0/16 S Asfalt 50/70	1,5% jako wypełniacz mieszany (Ka_{25})	głębokość kolein przy 50°C po 20 000 cykli	4,6	3,1			[37]

Tabela 5. Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego z użyciem urządzenia HWTD (EN 12697 – mały aparat – metoda B, w wodzie). Patrz także opis wyników badań, punkt 2.3.4.



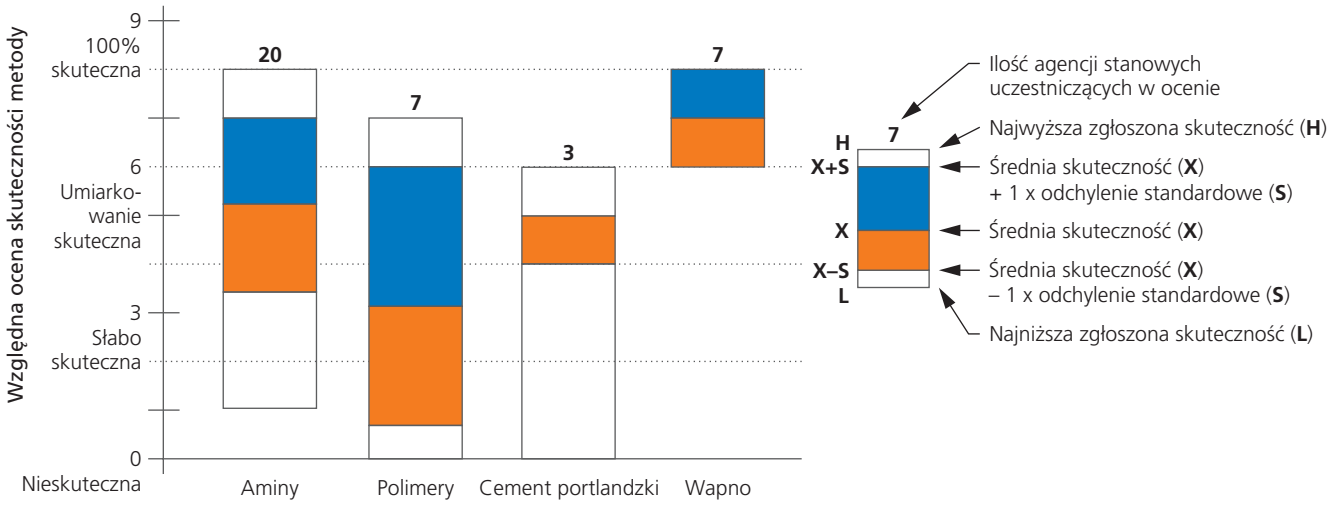
Rys. 10. Próby z wielokrotnym cyklem zamrażania-rozmrażania mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzone dla kruszywa z wapienia (A) lub granitu (B) i asfaltu AAB-1. Przeprowadzono próby lepiszcza, które nie uległo procesowi starzenia i które uległo starzeniu, a także lepiszcza modyfikowanego wapnem hydratyzowanym w ilości 20% w stosunku do masy lepiszcza, przy zawartości lepiszcza 5,5% wagowo w mieszance oraz lepiszcza modyfikowanego ketonem fenylowo-undecylowym w ilości 1% w stosunku do masy lepiszcza (na podstawie [65]).

15 odcinków doświadczalnych na drogach zarządzanych przez Federalną Administrację Drogową USA (FHWA) na terenie stanów: Wyoming, Montana, Nowy Meksyk i Georgia, gdzie dodawano wapno hydratyzowane, zachowało się w stanie od dobrego do doskonałego, po ponad 5 latach eksploatacji [53]. Według doświadczeń Departamentu Transportu stanu Nevada, odcinki dróg z mieszanki mineralno-asfaltowej z domieszką wapna hydratyzowanego, zachowywały się lepiej przez okres 5 – 10 lat, niż nawierzchnie bez tej domieszki. Na 4 odcinkach, wykonanych z mieszanki mineralno-asfaltowej z wapnem hydratyzowanym, nie występowało obniżenie wskaźnika PSI (am. Present Serviceability Index – bieżący wskaźnik stanu nawierzchni). Wyjątkiem był jednen przypadek, kiedy to obniżenie było umiarkowane, podczas gdy dla materiałów bez tych domieszek, wskaźnik ten zmniejszył się w stopniu od umiarkowanego (2) do silnego (2) [54].

W Europie, na polskim odcinku drogi z nawierzchnią wykonaną z materiałów zmodyfikowanych wapnem hydratyzowanym, nie pojawiły się uszkodzenia przez 4 lata eksploatacji [55].

Najbardziej przekonującego dowodu dostarczyły wykonane w 1991 r. badania, związane z istniejącymi dodatkami stosowanymi do polepszenia jakości nawierzchni, w celu ograniczenia uszkodzeń spowodowanych przez wodę [8]. Amerykańskie agencje rządowe odnotowały, że najbardziej skutecznym z dotychczas stosowanych dodatków było wapno hydratyzowane (Rys. 11). Co więcej, żadna agencja rządowa USA nie zgłosiła, że wapno hydratyzowane było tylko trochę skuteczne, podczas gdy niektóre agencje właśnie tak określiły wszelkie inne dodatki.

Na podstawie badań ankietowych przeprowadzonych w 2003 r., organy rządowe USA poinformowały, że głównym powodem, dla którego stosują wapno hydratyzowane jest sprawa zapobiegania uszkodzeniom nawierzchni, spowodowanym przez wodę (Tabela 6 – [10]).



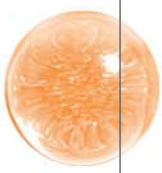
Rys. 11. Porównanie efektywności kilku dodatków stosowanych w celu ograniczenia uszkodzeń nawierzchni drogowych powodowanych wodą, według oceny dokonanej na podstawie doświadczeń organów rządowych USA (na podstawie [8]).

Agencja drogowa / Stan USA	Polepszenie adhezji asfaltu do kruszywa	Zwiększenie odporności na starzenie	Usztywnienie lepiszcza	Poprawa wytrzymałości na pękanie	Zmiana właściwości kruszyw drobnych
Arizona	1	3	2	3	2
Kalifornia	1	2	3	3	3
Kolorado	1	3	3	3	1 (w miarę potrzeb)
Federalna Administracja Autostrad (ogólnokrajowa)	1	2	3	2	3
Georgia	1	3	3	3	3
Mississipi	1	1	2	—	3
Newada	1	3	3	2	1
Oregon	1	2	3	3	3
Płd. Karolina	1	2	2	2	2
Teksas	1	3	2	3	2
Utah	1	2	2	2	2

Tabela 6. Ocena przesłanek stosowania wapna hydratyzowanego na podstawie doświadczenia organów rządowych USA. Poziom znaczenia: 1 – bardzo ważne; 2 – umiarkowanie ważne; 3 – mniej ważne (na podstawie [10]).

Materiały	Zawartość wapna hydratyzowanego i sposób dozowania [% dla suchego kruszywa]	Kryteria	Bez wapna hydratyzowanego	Z wapnem hydratyzowanym	Typ materiału porównawczego	Materiał porównawczy	Bibliografia
Mieszanka C Granit Lithonia 5% PG67-22	2%	nie kondycjonowana, wytrzymałość (MPa) / kondycjonowana wytrzymałość (MPa) / pozostała wytrzymałość przy 25°C	1 / 0,4 / 40%	1,2 / 1,1 / 92%	0,5% środka adhezyjnego w lepiszczu	1,1 / 1,1 / 100%	[58]
Mieszanki Superpave z kruszywa wapniowego 0/16 na nawierzchnie najlepszej jakości + kruszywo żwirowe 5.4-5.8% PG64-22 3.6-4.5% pustek	1% suchego wapna do wilgotnego kruszywa (B2) lub mleko wapienne (B3) – bez zamiennika wypełniacza	pozostała wytrzymałość przy 25°C	69%	B2: 77% B3: 74%	1% pozostałości na sicie przy przesiewaniu wapienia (bez zamiennika wypełniacza)	77%	[60]
Mieszanka Nevada Żwir rzeczny Lepiszcze AR-4000	1-2% suchego wapna do wilgotnego kruszywa	pozostała wytrzymałość przy 25°C	36%	1%: 84% 2%: 70%	0,5, 1 i 2% najlepszego środka adhezyjnego w lepiszczu	0,5%: 41% 1%: 66% 2%: 79%	[61, 14]
Mieszanka wapienia Kalifornia Lepiszcze AR-4000	1-2% suchego wapna do wilgotnego kruszywa	pozostała wytrzymałość przy 25°C	37%	1%: 93% 2%: 81%	0,5, 1 i 2% najlepszego środka adhezyjnego w lepiszczu	0,5%: 47% 1%: 58% 2%: 76%	[61, 14]
Mieszanki Nevada DOT 0/25 Typ 2C Bazalt / felzyt Lockwood asfalt modyfikowany polimerami AC-20	1,5% suchego wapna do wilgotnego kruszywa z 48 godz. sezonowaniem (DLW) lub bez (DLN), albo mleko wapienne z sezonowaniem (LSW) lub bez (LSN)	pozostała wytrzymałość przy 25°C	39,8%	DLN: 108,7% DLW: 97,2% LSN: 100,0% LSW: 108,0%			[62]
Mieszanki Nevada DOT 0/25 Typ 2C Bazalt / felzyt Lockwood asfalt modyfikowany polimerami PG64-34	1,5% suchego wapna do wilgotnego kruszywa z 48 godz. sezonowaniem (DLW) lub bez (DLN), albo mleko wapienne z sezonowaniem (LSW) lub bez (LSN)	pozostała wytrzymałość przy 25°C	68,4%	DLN: 89,3% DLW: 96,5% LSN: 84,3% LSW: 92,8%			[62]
Mieszanki Nevada DOT0/25 Typ 2C Żwir kwarcytowo-wapienny Lone Mountain AC-30	1,5% suchego wapna do wilgotnego kruszywa z 48 godz. sezonowaniem (DLW) lub bez (DLN), albo mleko wapienne z sezonowaniem (LSW) lub bez (LSN)	pozostała wytrzymałość przy 25°C	35,3%	DLN: 104,8% DLW: 109,7% LSN: 103.1% LSW: 105,2%			[62]

Tabela 7. Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego wg metody Lottmana.

Materiały	Zawartość wapna hydratyzowanego i sposób dozowania [% dla suchego kruszywa]	Kryteria	Bez wapna hydratyzowanego	Z wapnem hydratyzowanym	Typ materiału porównawczego	Materiał porównawczy	Bibliografia
Polska mieszanka 0/16 z granitem Glensanda 2/16 i piasek Graniczna 0/2 Dwa lepiszcza: asfalt D50 z Płocka i Olexobit 45 z BP Polska (1)	1,5%	pozostała wytrzymałość po 18 cyklach zamrażania-rozmrażania (bez dokładnego powtarzania obciążenia wg próby Lottmana)	B50: 68% O45: 76%	B50: 81% O45: 89%	0.4% płynnego środka adhezyjnego (amina tłuszczowa) w lepiszczu	B50: 74% O45: 81%	[63]
Mieszanki Superpave z kruszywa wapniowego 0/16 na nawierzchnie najlepszej jakości + kruszywo żwirowe 5,4-5,8% PG64-22 3,6-4,5% wolnych przestrzeni (1)	1% suchego wapna do wilgotnego kruszywa (B2) lub mleko wapienne (B3) – bez zamiennika wypełniacza	pozostała wytrzymałość po 6 cyklach	11%	B2: 49% B3: 40%	1% pozostałości na sicie przy przesiewaniu wapienia (bez zamiennika wypełniacza)	11%	[60]
Kruszywo żwirowe Idaho o gęstości klasy 0/16 5,3% PG58-28 (1)	1% suchego wapna do wilgotnego kruszywa z sezonowaniem 48 godzin	moduł sztywności przy 25°C (ksi) po 0-21 cyklach zamarzania-rozmarzania		0: 264 3: 268 6: 272 9: 266 12: 243 15: 184 21: 172	0,5% środka adhezyjnego w lepiszczu	0: 233 3: 255 6: 228 9: 161 12: 176 15: 106 21: 86	[64]
Mieszanka wapienna Wyoming 0/19 asfalt 5.,5% AAB-1 7% wolnych przestrzeni (1)	1% wapna w lepiszczu	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (kPa) po 0-15 cyklach zamarzania-rozmarzania	0: 591 1: 505 2: 464 4: 352 6: 298 10: 310 12: nie przeszła próby	0: 524 1: 473 2: 471 4: 480 6: 446 10: 466 15: 423			[65]
Mieszanka granitowa Wyoming 0/19 asfalt 5,5% AAB-1 7% wolnych przestrzeni (1)	1% wapna w lepiszczu	wytrzymałość na rozciąganie pośrednie (kPa) po 0-10 cyklach zamarzania-rozmarzania	0: 573 1: 459 2: 296 4: zniszczenie próbki	0: 484 1: 468 2: 464 4: 385 6: 477 8: 396 10: 448			[65]
Mieszanka asfaltu betonowego z 62% żwiru typu Pea, 15% płukanego piasku i 23% piasku polnego 5% lepiszcza AC-20 (2)	1,5% wapna (suche wapno do wilgotnego kruszywa i mleko wapienne LS z sezonowaniem lub bez, niekiedy obrabiając tylko jedną frakcję ziarna)	liczba cykli zamarzania-rozmarzania do zniszczenia próbki	6	• > 137 kiedy dodano do całego kruszywa • 113 tylko dla obróbki LS żwiru • 25 tylko dla obróbki LS piasku polnego • 23 tylko dla obróbki LS piasku płukanego			[2, 66]
Drobny żwir rzeczny E lub lepiszcze A (2)	mleko wapienne	liczba cykli zamarzania-rozmarzania do zniszczenia próbki	E: 4 A: 4	E: 22 A: > 25	21 środków adhezyjnych (aminy, amidoaminy, imidoazolile, pirydina i sole amoniowe krzemo-organiczne)	E: 3-10 A: 2-10	[2, 67]

Materiały	Zawartość wapna hydratyzowanego i sposób dozowania [% dla suchego kruszywa]	Kryteria	Bez wapna hydratyzowanego	Z wapnem hydratyzowanym	Typ materiału porównawczego	Materiał porównawczy	Bibliografia
Asfalt porowaty z asfaltem B40/50 lub PMB z 3% EVA (3)	1%	pozostała wytrzymałość na ściskanie	B40/50: 62% PMB: 88%	B40/50: 78% PMB: 78%			[68]
Zagęszczona mieszanka porfirowa 0/16, 6,4% wypełniacza 1,9-2,5% wolnych przestrzeni (4)	1,6% jako wypełniacz aktywny (Ka_{25})	ubytek masy po 300 obrotach	ropa arabska: 1,3	ropa arabska: 1,0			[69]
Zagęszczona mieszanka żwirowa 0/11, 5,7% wypełniacza 1,9-2,5% wolnych przestrzeni (4)	1,4% jako wypełniacz aktywny (Ka_{25})	ubytek masy po 300 obrotach	ropa wenezuelska: 1,6	ropa wenezuelska: 1,5			[69]
Asfalt porowaty z asfaltem B40/50, lub PMB z 3% EVA (4)	1%	ubytek masy	B40/50: 1.02 PMB: 0.99	B40/50: 0.93 PMB: 0.94			[68]
Zagęszczona mieszanka porfirowa 0/16, 6,4% wypełniacza 1,9-2,5% wolnych przestrzeni (5)	1,6% jako wypełniacz aktywny (Ka_{25})	pozostała stabilność	ropa arabska: 89% ropa wenezuelska: 97%	ropa arabska: 91% ropa wenezuelska: 102%			[69]
Zagęszczona mieszanka żwirowa 0/11, 5,7% wypełniacza 1,9-2,5% wolnych przestrzeni (5)	1,4% jako wypełniacz aktywny (Ka_{25})	pozostała stabilność	ropa arabska: 97% ropa wenezuelska: 111%	ropa arabska: 97% ropa wenezuelska: 120%			[69]
Bliżej nieokreślone mieszanki granitowe Lithonia 5% PG67-22 (6)	2%	% pokrytej powierzchni	5%	90%	0,5% środka adhezyjnego w lepiszczu	95%	[58]
Polska mieszanka 0/16 z granitem Glensanda 2/16 i piaskiem 0/2 Graniczna asfalt D50 (6)	1,5%	% pokrytej powierzchni	90%	100%	0,4% środka adhezyjnego (amina tłuszczowa) w lepiszczu	100%	[63]
Żwir rzeczny (piasek szlachetny) (6)	wapno wapniowe (c) / wapno dolomitowe (d)	% pokrytej powierzchni	10%	c: 68% d: 72%			[2]
Wapień (6)	wapno wapniowe (c) / wapno dolomitowe (d)	% pokrytej powierzchni	60%	c: 72% d: 80%			[2]

Tabela 9. Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego przy zastosowaniu powszechnych metod badań. Metoda prób: (3) – Duriez; (4) – Cantabro; (5) – stabilność resztkowa, wg Marshalla; (6) – próba Texas Boil.

strona 26:
Tabela 8. Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na powtarzalne cykle zamrażania-rozmrażania mieszanek mineralno-asfaltowych przez dodanie wapna hydratyzowanego. Metoda prób: (1) – z powtarzanym obciążeniem, wg Lottmana; (2) – próba „teksańska".

2.2 Odporność na chemiczne starzenie się

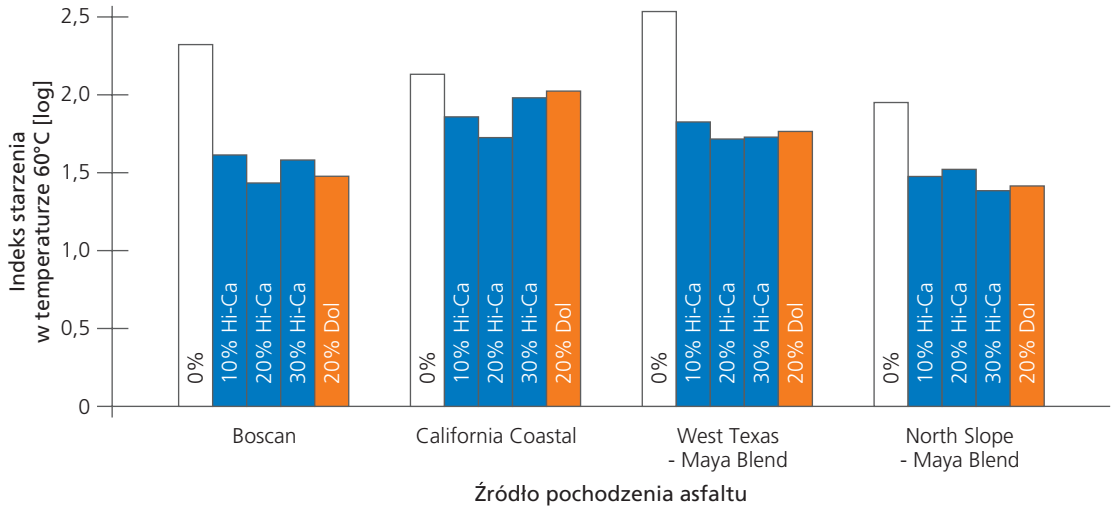
Już wcześniej zauważono, że wapno hydratyzowane jest czynnikiem spowalniającym starzenie się asfaltu. Pierwsze obserwacje wpływu wapna hydratyzowanego na spowolnienie starzenia materiałów bitumicznych pochodzą z Utah, z końca lat 60. XX w. C. V. Chachas i jego współpracownicy ze stanowego Departamentu Autostrad Utah stwierdzili wówczas, że próbki kontrolne asfaltu pobrane z mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem wapna hydratyzowanego, były zdumiewająco bardziej miękkie, niż materiały porównawcze [70, 71]. Od tego czasu wiele badań laboratoryjnych (Tabela 10) potwierdziło wpływ wapna hydratyzowanego na spowolnienie procesu chemicznego starzenia się (utwardzania) asfaltu. Wyniki kilku innych, potwierdziły także istnienie tej prawidłowości w warunkach naturalnych (Tabela 11).

Wykazanie spowolnienia procesu starzenia w warunkach in situ, jest trudne z uwagi na problemy w odzyskaniu lepiszcza, które uległo zestarzeniu. Ponieważ starzenie się jest najbardziej intensywne na powierzchni warstwy ścieralnej, aby określić w sposób ilościowy proces starzenia się, należy pobrać pierwsze centymetry (jeśli nie milimetry) warstwy nawierzchni. W niektórych przypadkach, analizowana jest cała warstwa mieszanki, czasem o grubości kilku centymetrów. Rozmywa to ocenę skutków starzenia się, poprzez uwzględnianie w badaniach również słabo postarzonego asfaltu, ze spodniej części warstwy.

Na podstawie opublikowanych przykładów (opisanych szczegółowo w Tabeli 10), wpływ wapna hydratyzowanego na starzenie się asfaltu można scharakteryzować w sposób następujący:

- Asfalty modyfikowane wapnem hydratyzowanym wykazują zmniejszoną podatność na starzenie się [11, 12, 72, 73, 74, 75, 76]. Przejawia się to wolniejszym wzrostem lepkości (lub innej właściwości mechanicznej), w stosunku do czasu starzenia się, Rys. 12.
- Równocześnie następuje spowolnienie szybkości tworzenia się karbonyli w asfaltach modyfikowanych wapnem hydratyzowanym [72, 74, 75]. Tego rodzaju efekty zaobserwowano jednak tylko przy temperaturze starzenia się wynoszącej 88°C i więcej. Nie stwierdzono ich przy badaniu starzenia w niższej temperaturze (60°C – [76]).
- Wapno hydratyzowane nie zmienia tworzenia się siarczków, sulfotlenków i ketonów [22, 76].
- We wszystkich przypadkach zawartość asfaltenów wzrasta wolniej w asfaltach modyfikowanych wapnem hydratyzowanym, niż w tych bez domieszki [22, 69, 72, 74, 75).
- Asfalty, które stykały się z wapnem hydratyzowanym (które potem zostało usunięte), nadal wykazują wolniejsze starzenie się [22, 72].
- Efekty te stwierdzono tylko w przypadku wapna hydratyzowanego. Nie obserwuje się ich dla wypełniacza wapiennego [22, 77].

Niektóre aspekty interpretacji tych spostrzeżeń, w kategoriach wzajemnego oddziaływania asfaltu i wapna hydratyzowanego, opisujemy w Rozdziale 3.



Rys. 12. Indeks starzenia w temperaturze 60°C (stosunek lepkości po starzeniu do lepkości przed starzeniem) dla asfaltów pochodzących z różnych źródeł, modyfikowanych wapnem hydratyzowanym w różnych proporcjach wagowych (Hi-Ca) i dolomitowym wapnem hydratyzowanym (Dol). Starzenie wywołano w próbie przyśpieszonego starzenia się cienkiej warstwy (TFAAT - Thin Film Accelerated Aging Test), co odpowiada przetrzymywaniu próbki przez 3 dni w temperaturze 113°C w warunkach wymiany powietrza (na podstawie [22]).

Badacz, rok	Procedura starzenia	Lepiszcza poddawane próbom	Zawartość wapna hydratyzowanego [% m/m w stosunku do asfaltu]	Główne wnioski	Bibliografia
Plancher, 1976	• próby starzenia (RTFOT wg EN12607-1 - 75 min. przy 163°C) • starzenie w Rolling MicroFilm Circulating Oven RMF-C (48 godz. przy 98,9°C)	4 AC10 pochodzący z różnych miejsc	50 (z roztworów 1/1/600 HL / asfalt / benzen, a następnie usunięto HL i rozpuszczalnik)	• dodatek wapna hydratyzowanego obniża twardnienie starzeniowe (mniejsza sztywność, niższa zawartość asfaltenów, niższa zawartość produktów utleniania typu karbonyli) • efekt zależy od asfaltu, ale wszystkie asfalty z dodatkiem wapna hydratyzowanego wykazują poprawę właściwości	[72]
Edler, 1985	• komora kondycjonowania: 65°C z cyklicznym naświetlaniem promieniami UV przez 102 min. i UV + natrysk wodą przez 18 min. (3 bary), 32,5 godz., 73,5 godz., 7 dni, 14 dni • RTFOT 163°C, 75 min. • RTFOT + POB (ciśnieniowa bomba tlenowa, 65°C, ciśnienie tlenu = 2,06 MPa, 96 godz.) • RTFOT + TFOT 163°C, 5 godz. • lepkość, FTIR, GPC	60/70 i 80/100	6 lub 12% m/m wapno hydratyzowane	• dużo wolniejsze starzenie po dodaniu wapna hydratyzowanego stwierdzone na podstawie lepkości, prawie bez względu na zawartość wapna hydratyzowanego • asfalty modyfikowane wapnem wykazały niższą wartość stosunku C=O abs. (1710 cm^{-1}) / C=C abs. (1600 cm^{-1}) po zestarzeniu • efekt bardziej wyraźny w komorze kondycjonowania, prawie niedostrzegalny w próbie RTFOT • niewielki wpływ na ciężar molowy	[78]
Petersen, 1987	przyśpieszona próba starzenia się cienkiej warstewki (TFAAT) materiałów potraktowanych wapnem przy 113°C przez 3 dni	• AC10 California Coastal • AC10 Boscan • AC10 North Slope / Maya • AC10 West Texas / Maya	• wapno hydratyzowane 10, 20, 30 • wapno dolomitowe 20	• procedura starzenia podobnie jak 11-13 lat w warunkach naturalnych • 10% wapna hydratyzowanego wystarczy do zneutralizowania większości kwasów w lepiszczach • modyfikowanie wapnem hydratyzowanym zmniejsza twardnienie starzeniowe (mniejsza sztywność, niższa zawartość asfalten, niższa zawartość produktów utleniania typu karbonyli) • szybkość tworzenia się karbonyli zmniejsza się w asfaltach modyfikowanych wapnem hydratyzowanym • szybkość tworzenia się siarczków, sulfotlenków i ketonów w asfaltach nie zmieniona wapnem hydratyzowanym • efekt zależy od asfaltu, ale wszystkie asfalty poprawiają swoje właściwości po dodaniu wapna hydratyzowanego • wypełniacz wapienny nie ma żadnego wpływu na starzenie się asfaltu	[22, 12]
Johansson, 1995	1 + 2 tygodnie w naczyniu ciśnieniowym do prób starzenia (PAV) przy 60°C i ciśnieniu powietrza 2,1 MPa	asfalty rdzeniowe 8 SHRP	20	• wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe stwierdzone na podstawie wskaźnika starzenia (współczynnik lepkości) z wyjątkiem asfaltu AAG • wapno hydratyzowane nie wpływa na tworzenie się karbonylu lub sulfotlenków, z wyjątkiem jednego asfaltu (AAK)	[76, 71]
Oliver, 1995	próba trwałości ARRB (RTFOT + starzenie się cienkiej, 20-mikronowej warstwy przy 100°C)	85/100	6-26	wapno hydratyzowane poprawia trwałość, jak stwierdzono w próbie ARRB	[79]

*Tabela 10. Przegląd badań laboratoryjnych określania wpływu wapna hydratyzowanego na proces starzenia się asfaltu**(ciąg dalszy na następnej stronie).*

Badacz, rok	Procedura starzenia	Lepiszcza poddawane próbom	Zawartość wapna hydratyzowanego [% m/m w stosunku do asfaltu]	Główne wnioski	Bibliografia
Johansson, 1996	próba cienkiej warstwy, 144 godz., (TFOT – EN 12607-2) + PAV 60°C + 80°C	• AAA-1 • AAD-1	5	• wapno hydratyzowane obniża aktywność katalityczną związków wanadu • nie zaobserwowano specjalnych interakcji między wapnem hydratyzowanym i związkami wanadu • $Mg(OH)_2$ nie jest skuteczny jako związek przeciwdziałający starzeniu się asfaltu • efekt zależy od rodzaju asfaltu	[80, 71]
Wisneski, 1996	naczynie z tlenem pod ciśnieniem (POV) przy 88, 93 i 99°C	• AAA-1 • AAF-1 • mieszany lub nie z 4 środkami odmładzającymi	1-20	• efekt antystarzeniowy obserwowany zarówno dla wapna palonego jak i hydratyzowanego, nieco lepszy dla HL • wapno obniża tworzenie się asfaltenów w czasie starzenia • wapno obniża tworzenie się karbonyli • wapno obniża podatność na twardnienie (nachylenie krzywej lepkości w funkcji strefy karbonylu) • efekt zależy od rodzaju asfaltu	[75]
Lesueur i Little, 1999	TFOT + PAV 100°C 20 godz.	• AAD • AAM	12,5	• wapno hydratyzowane obniża efekt twardnienia starzeniowego stwierdzony na podstawie wskaźnika starzenia się (współczynnik lepkości) dla asfaltu AAD • wyższa lepkość wzrasta dla AAM z HL po zestarzeniu, chociaż nie stwierdzono tego wzrostu w strefie karbonylu: częściowo lepkość wzrasta z uwagi na kinetykę interakcji asfalt / HL	[81]
Hopman, 1999	RTFOT (2,5 i 7 godz.)	• Wenezuela 70/100 • Środkowy Wschód 70/100	12,5	• wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe (penetracja, próba pierścienia i kuli, tworzenie się asfaltenów) • efekt zależy od rodzaju asfaltu	[69]
Verhasselt, 2001	RTFOT (normalnie i 7 godz.)	• Wenezuela 35/50 • Środkowy Wschód 35/50	12,5	• wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe (penetracja, próba pierścienia i kuli, tworzenie się asfaltenów) • efekt zależy od rodzaju asfaltu	[73]
Huang, 2002	PAV 60°C 100-2000 godz.	• AAD-1 • ABD-1	20	• wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe (współczynnik lepkości, tworzenie się asfaltenów) • efekt zależy od rodzaju asfaltu • wypełniacz wapienny w ogóle nie wpływa na starzenie się asfaltu	[65]
Verhasselt i Puiatti, 2004	RCAT 235 min. przy 163°C lub 17, 65 i 140 godz. przy 90°C	• Wenezuela 35/50, 50/70 i 70/100 • Środkowy Wschód 35/50	12,5	• wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe (penetracja próba pierścienia i kuli, tworzenie się asfaltenów) • po dodaniu wapna hydratyzowanego spadek absorbancji o 1700 cm^{-1} (grupy karboksylowe) • efekt zależy od rodzaju asfaltu	[74]
Miro, 2005	długotrwałe starzenie w piecu (LTOA) mieszanki z 4,5% asfaltu i 27% pustek przy 80°C	80/100	17-44	wapno hydratyzowane obniża twardnienie starzeniowe (penetracja, próba pierścienia i kuli, lepkość)	[82]

Tabela 10. (ciąg dalszy z poprzedniej strony) Przegląd badań laboratoryjnych określania wpływu wapna hydratyzowanego na proces starzenia się asfaltu.

Badacz, rok, kraj	Typ mieszanki	Wiek [lata]	Zawartość wapna hydratyzowanego [ciężar w % w stosunku do suchego kruszywa]	Główne wnioski	Biblio-grafia
Chachas, 1971, USA (Utah)	wiele różnych mieszanek z 24 istniejących projektów, wiek od 1 do 6 lat, połowa z nich z dodatkiem wapna oraz 6 nowych projektów, wszystkie z dodatkiem wapna	0-6	1% (z wyjątkiem 2 przypadków)	• pierwsze spostrzeżenia o wpływie wapna hydratyzowanego na starzenie się asfaltu (mała lepkość) • obserwacje oparte na odzysku asfaltu o większej lepkości dla mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym w porównaniu do mieszanek niemodyfikowanych • stwierdzono, że stopień wpływu zależy od źródła asfaltu	[70]
Decoene, 1983, Belgia	asfalt porowaty 2-4 cm i beton asfaltowy 5 cm z lepiszczami niemodyfikowanymi i modyfikowanymi polimerami, niektóre z dodatkiem wapna hydratyzowanego	do 10		tak samo dobry stan dla odcinków z wapnem hydratyzowanym jak dla asfaltu modyfikowanego polimerami (PmB) na odcinku N5 między Neuville i Mariembourg	[83, 11]
Bruce, 1987, USA (Montana, odcinki dróg w hrabstwie Big Timber)	jeden typ kruszywa, asfalt 120/150 na większości odcinków – z wyjątkiem: • 85/100 na jednym odcinku • 200/300 + Chemcrete na jednym odcinku • 200/300 + sadza na jednym odcinku	3	1,5% w otaczarce bębnowej	penetracja odzyskanego asfaltu z mieszanek z wapnem hydratyzowanym średnio 11% większa od wielkości porównawczej	[84]
Oliver, 1995, Australia	nawierzchnia typu chip seal z asfaltem o klasie penetracji 85/100	7,7-10,6	1,5-15,3% w lepiszczu	• nie ma znaczącego wpływu wapna • być może na skutek nasycenia wapna dwutlenkiem węgla	[79]
Jones, 1997, USA (Utah)		8		lepkość lepiszcza 50% mniejsza dla mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym, wykazuje wolniejsze starzenie	[11]
Huang, 2002, USA (Montana, odcinki dróg w hrabstwie Big Timber)	j.w. (Bruce, 1987)	5	1,5% w otaczarce bębnowej	prawie ta sama lepkość dla wszystkich materiałów (modyfikowanych i nie)	[65]
Schneider, 2002, Schellenberg, 2004, Niemcy	• SMA 0/8 S • AB 0/11	2	1,4% jako wypełniacz mieszany	badanie metodą pierścienia i kuli odzyskanego asfaltu od 1,5 do 7°C, mniej dla mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym	[29, 85]
Sewing, 2006, Szwajcaria	• HMT 22 • SMA 11 • AB 11 N	2-4	2%	badanie metodą pierścienia i kuli odzyskanego asfaltu od 1,5 do 1,7°C, mniej dla mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym, z wyjątkiem jednej mieszanki	[86, 87]
Bianchetto, 2008, Argentyna	mieszanka 0/19	0	1%	niższy wskaźnik starzenia się dla mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym produkowanych w temperaturze 135 lub 160°C	[88]

Tabela 11. Przegląd badań wpływu wapna hydratyzowanego na starzenie się asfaltu w warunkach terenowych.

2.3 Właściwości mechaniczne

Już od samego początku stosowania wapna hydratyzowanego stwierdzono, że poprawia ono właściwości mechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych. Rzeczywiście, badania przedstawione powyżej, w rozdziale dotyczącym uszkodzeń nawierzchni dróg spowodowanych przez wodę, opierają się generalnie na próbach właściwości mechanicznych przed i po pewnym kondycjonowaniu. Niektórzy badacze szybko dostrzegli, że mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane wapnem hydratyzowanym wykazują większą wytrzymałość i wyższą wartość modułu sztywności, niż mieszanki niemodyfikowane.

Wynik ten nie zaskakuje, zważywszy, że znany jest silny efekt usztywniania przez wapno hydratyzowane. Potwierdzają to badania zgodne z Normami Europejskimi (patrz Rozdział 1). Mimo to, część tego opracowania rozpoczyna się od przeglądu reologii mastyksu [1] (tj. mieszanek tylko asfaltu i wypełniacza), wykazujących szczególne zachowanie się wapna hydratyzowanego. Zostało to już częściowo stwierdzone w badaniach metodą różnicy temperatury mięknienia ΔPiK. Dalej w tym rozdziale dokonano przeglądu opublikowanych wyników badań, potwierdzających zmianę właściwości mechanicznych mieszanek mineralno-asfaltowych, modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. W szczególności modułów wytrzymałości, odporności na powstawanie kolein, zmęczenia i odporności na spękania termiczne.

Przyczyny, dla których wapno hydratyzowane wpływa na usztywnianie mieszanek mineralno-asfaltowych opisane są w Rozdziale 3.

2.3.1 Mastyks

W celu lepszego zrozumienia właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, wielu badaczy jako systemy modelowe wykorzystywało materiały pośrednie, takie jak mastyks, tj. mieszanka tylko asfaltu i wypełniacza [1]. Ideą przyświecającą tym badaniom był fakt, iż materiałem spajającym kruszywo w mieszance asfaltowej nie był asfalt, ale jego mieszanka z najdrobniejszymi elementami szkieletu mineralnego, tj. z wypełniaczem.

Badając mastyks staje się oczywiste, że sporządzony z wapnem hydratyzowanym zachowuje się inaczej, niż z normalnym wypełniaczem mineralnym. Wcześniej opisane badania metodą róznicy temperatury mięknienia ΔPiK (Rozdział 1) są już badaniami wykonanymi tylko na mastyksie. Pokazują, że wapno hydratyzowane ma większe zdolności usztywniania, niż zwykłe wypełniacze mineralne.

Wyniki kilku badań potwierdziły, że lepkość (co jest równoważne modułowi zespolonemu) poprawia się przy użyciu wapna hydratyzowanego, zamiast zwykłego wypełniacza mineralnego [89, 90, 91]. Aby efekt ten rozwinął się, potrzebny jest czas, jak wyjaśniono w Rozdziale 3 (patrz Rys. 27). Mimo to, większość asfaltów wykazuje silniejszy efekt usztywniania po zmodyfikowaniu ich wapnem hydratyzowanym, niż bez takiej modyfikacji. Z doświadczenia wynika, że w przeciętnej mieszance mineralno-asfaltowej z wypełniaczem mineralnym w ilości 5% i asfaltem też w ilości 5%, można zastąpić 1% i 2% wypełniacza wapnem hydratyzowanym. Taka zamiana części wypełniacza byłaby ekwiwalentna użyciu asfaltów o temperaturze mięknienia PiK wyższej odpowiednio o ~2,5 i ~8°C. Zauważmy, że w aktualnych wymaganiach europejskich, różnica temperatury PiK między dwoma sąsiednimi klasami asfaltów wynosi około 5°C [92].

Zatem zastąpienie wypełniacza wapnem hydratyzowanym w ilości 2% średnio daje podobny efekt, co podniesienie twardości asfaltu o jedną klasę (tzn. asfalt 35/50 z wapnem hydratyzowanym byłby podobny do asfaltu 20/30 bez wapna hydratyzowanego).

W kategoriach ilościowych można to określić **lepkością** $[\eta]$ definiowaną jako:

$$[\eta] = \lim_{\phi \to 0} \left(\frac{\eta(\phi) - \eta_0}{\eta_0} \right)$$

gdzie:

$\eta(\phi)$ lepkość mastyksu o udziale objętościowym wypełniacza ϕ

η_0 lepkość asfaltu podstawowego (bazowego)

Lepkość $[\eta]$ pozwala na dobre oszacowanie efektu zmiany lepkości mastyksu dla każdej wartości udziału objętościowego wypełniacza. To oszacowanie można przeprowadzić korzystając z następującego równania zaproponowanego przez W. Heukeloma i P.W.O. Wijga z Koninklijke Shell Laboratorium w Amsterdamie (Holandia) [93], którego słuszność została potwierdzona przez innych autorów [81, 94]:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{[\eta]\phi}{2} \right)^{-2}$$

Korzystając z tego parametru, który kwantyfikuje efekt usztywniający wypełniacza, pokazano, że wapno hydratyzowane ($[\eta]$ ~ 3-10) posiada właściwości usztywniające około dwukrotnie silniejsze w porównaniu do innych wypełniaczy mineralnych ($[\eta]$ ~ 2,5-5) (Tabela 12 – [95]).

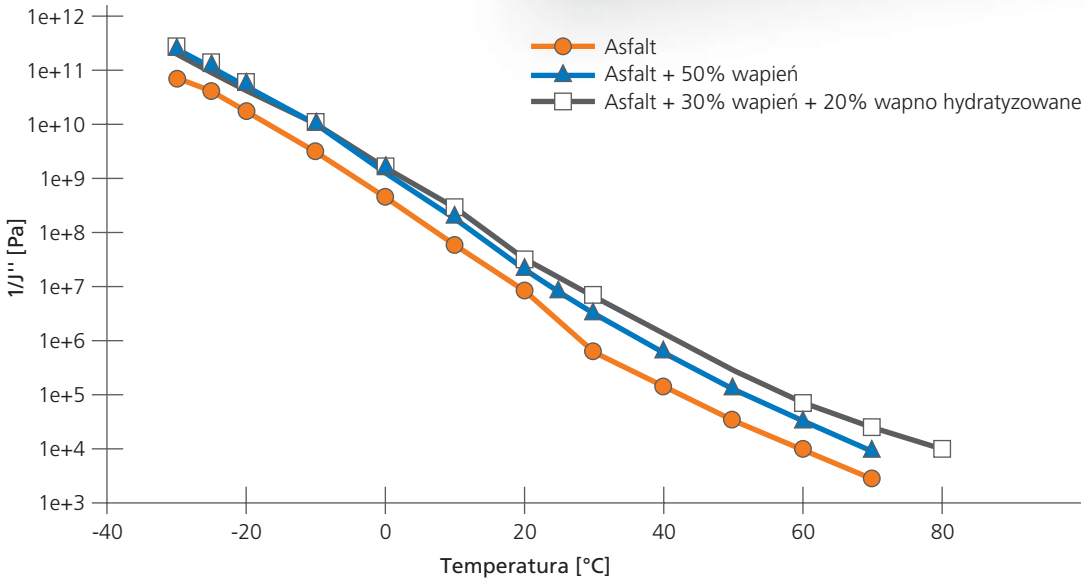
(1) W polskiej nomenklaturze asfaltowej, mieszanina asfaltu i wypełniacza nazywa się zaprawą asfaltową, natomiast mastyks to mieszanina asfaltu, wypełniacza i piasku (przyp. K. Błażejowski)

Typ wypełniacza	[η]
Wapień	3,8
Wapień	2,6 - 3,9 (25 °C) 3,0 - 3,7 (70 °C)
Wapień	2,5 (65 °C) 2,4 (135 °C)
Wapień dolomitowy	4,9 (25 °C) 4,4 (70 °C)
Wapno hydratyzowane	3,2 - 10
Wapno	7
Piaskowiec	2,8 (25 °C) 4,0 (70 °C)
Wypełniacz krzemionkowy	2,4 (65 °C) 2,4 (135 °C)
Granit	2,7 - 4,2 (25 °C) 3,5 - 4,1 (70 °C)
Popiół lotny	10,2 (25 °C) 14,1 (70 °C)
Mączka łupkowa	4,2
Glina garncarska	3,2
Kaolin	6,7
Sadza	2,6 (65 °C) 3,9 (135 °C)
Azbest	16,5
Włókna poliestrowe	26 - 34
Włókna mineralne	26

Tabela 12. Lepkość [η] różnych wypełniaczy (na podstawie [95]).

Kluczową sprawą jest tutaj jednak temperatura, a wyniki przedstawione powyżej są akceptowane tylko dlatego, że próby były przeprowadzane w wyższej temperaturze pomiaru. Z drugiej strony, badania w niskiej temperaturze wskazują, że efekt usztywniający wapna hydratyzowanego jest zbliżony do innych wypełniaczy mineralnych [33, 96]. Przejście z jednego rejonu o niskiej temperaturze i normalnym usztywnianiu, do rejonu o wysokiej temperaturze i silnym usztywnianiu, następuje w temperaturze bliskiej pokojowej. Stwierdził to, dla trzech różnych asfaltów, J. P. Wortelboer i in. w badaniach przeprowadzonych wspólnie przez ESHA (Groningen, Holandia) i French Central Laboratory of Roads and Bridges (LCPC – Rys. 13 [97]). Inne dane potwierdzają, że efekt poprawy sztywności przez wapno hydratyzowane zależy od temperatury, a jego działanie jest podobne do wypełniacza mineralnego w temperaturze niższej od pokojowej, ale silniejsze w temperaturze wyższej [12, 81, 98, 99, 100].

Więcej informacji na temat interpretacji tych efektów podano w Rozdziale 3.



Rys. 13. Zależność temperaturowa efektu usztywniania przez wapno hydratyzowane w porównaniu do wypełniacza wapiennego: odwrotność podatności urojonej (1/j") przy prędkości 10 rad/s w funkcji temperatury dla referencyjnego asfaltu z bezpośredniej destylacji 70/100 i tego samego asfaltu z 50% wagowo dodatkiem wypełniacza wapiennego lub mieszanego wypełniacza wapiennego zawierającego 40% wapna hydratyzowanego (na podstawie [97]).

2.3.2 Moduł

Moduł (sprężystości) jest podstawową właściwością mechaniczną materiałów [101]. Wyraża się stosunkiem wielkości naprężenia przyłożonego do materiału i wynikającej z tego wielkości odkształcenia (lub odwrotnie, jeśli materiał poddawany jest próbie w trybie kontrolowanego odkształcenia). Nazywany jest modułem Younga lub modułem rozciągania, jeśli odkształcenie określane jest na podstawie pomiaru rozciągania (ściskanie jest w tym przypadku traktowane jako rozciąganie ujemne). Dla opisywania odkształcenia określanego na podstawie działania sił ścinających, operuje się modułem Coulomba lub inaczej modułem ścinania. Można także spotkać się z innymi rodzajami pomiaru odkształcenia (zginanie, itd.).

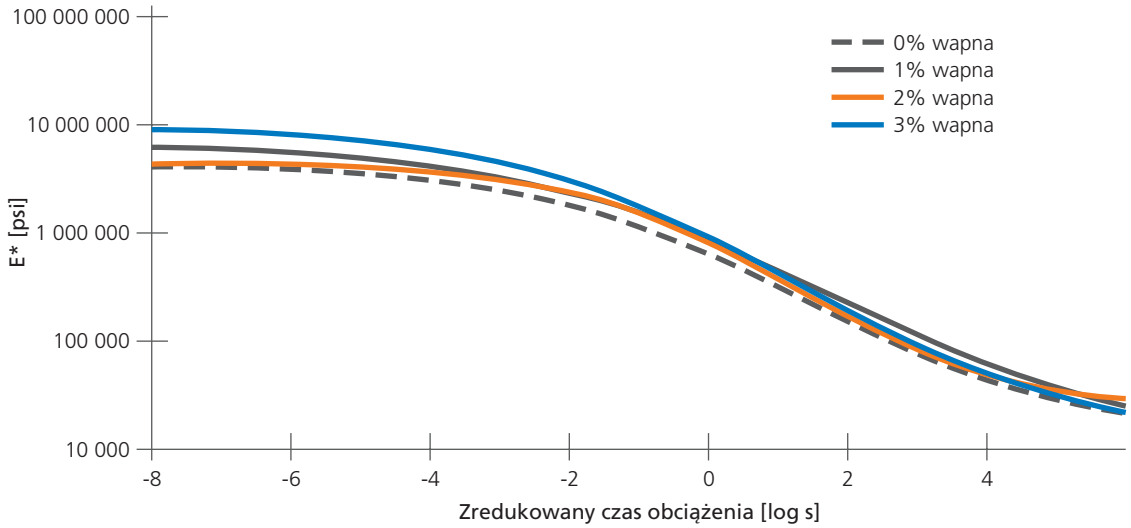
Wiadomo, że właściwości mechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych zależą od temperatury i czasu działania obciążenia, jako wynikające z ich własności lepkosprężystych [102]. Ich moduł (nazywany modułem sztywności) zależy od temperatury i czasu (lub częstotliwości) i ogólnie wyraża się w postaci liczby zespolonej. Jest to więc zespolony moduł sztywności.

Z punktu widzenia kompozycji mieszanki mineralno-asfaltowej, moduł sztywności przyjmuje wartość najwyższą przy optymalnej zawartości asfaltu. Rośnie wraz ze wzrostem modułu lepiszcza, a maleje ze wzrostem ilości wolnych przestrzeni [102].

Moduł ma decydujące znaczenie przy projektowaniu warstw nawierzchni drogowych, ponieważ odpowiada za rozkład naprężeń wewnątrz każdej warstwy nawierzchni. Przy danym obciążeniu i grubości warstwy, wyższy moduł oznacza mniejsze naprężenia w warstwie.

Mimo, że moduł stanowi nieodłączną właściwość materiału (oznacza to, że jego wartość powinna być niezależna od sposobu przeprowadzania prób), obserwuje się niewielkie różnice przy jego pomiarach w trybie ściskania, zginania, rozciągania lub rozciągania pośredniego. Geometria przeprowadzanej próby (tj. kształt próbki, rozmiar, a także rodzaj obciążenia, tzn. przy kontrolowaniu odkształcenia lub naprężenia, amplitudy, itd.), także w pewien sposób wpływa na otrzymywane wyniki. Dlatego też, kiedy mówi się o module mieszanek mineralno-asfaltowych, należy zwrócić uwagę na podanie warunków, w jakich dokonano pomiaru. W celu ograniczenia tego rodzaju różnic, opracowana została odpowiednia norma europejska EN 12697-26 [103].

Niewiele badań studialnych dostarcza informacji o wpływie wapna hydratyzowanego na moduł mieszanek mineralno-asfaltowych. Prawdopodobnie najbardziej dogłębne badania przeprowadził prof. M. W. Witczak i J. Bari z Arizona State University [104, 105]. Mierzyli oni moduł dynamiczny w trybie rozciągania-ściskania w temperaturze od minus 10°C do plus 54,4°C i przy częstotliwościach w zakresie od 0,1 do 25 Hz, dla 17 kombinacji udziałów procentowych mieszanka-wapno oraz sześciu różnych kompozycji mieszanek na gorąco. Próbki były zagęszczane w prasie żyratorowej do uzyskania 7% wolnych przestrzeni, a następnie pocięte na próbki cylindryczne o średnicy 101,6 mm i wysokości 152,4 mm. Mieszanki te były sporządzone z czterech różnych lepiszczy w ilości 4,5 do 5,2% m/m, i zawierały 0, 1, 1,5, 2, 2,5 lub 3% m/m wapna hydratyzowanego, jako zamiennika części wypełniacza. Typowe wyniki z tych prób przedstawiono w postaci krzywej wiodącej na Rys. 14.



Rys. 14. Krzywa wiodąca (wartość normalna modułu zespolonego w funkcji zredukowanego czasu obciążenia) otrzymana przy temperaturze 21,1°C dla mieszanek 0/18 sporządzonych z kruszywa typu Two-Guns (4,3% wypełniacza) i 4,6% asfaltu PG64-22 (na podstawie [104]).

Wyniki tych prób pokazały, że wapno hydratyzowane powodowało zwiększenie wartości modułu mieszanek mineralno-asfaltowych od 8 do 65% w całej serii badanych mieszanek, z różnymi dodatkami wapna hydratyzowanego. Średni wzrost modułu dla wszystkich mieszanek, przy wszystkich temperaturach i częstotliwościach, wyniósł 25%. Obserwowane wzrosty wynosiły 25, 23, 8, 66 i 24% odpowiednio dla 1, 1,5, 2, 2,5 i 3% zawartości wapna hydratyzowanego. Tak silne zmiany modułu, ze zmianą zawartości wapna spowodowane były tym, że żadna z mieszanek nie zawierała pełnego zestawu wapna hydratyzowanego. Dane dla 1, 1,5, 2, 2,5 i 3% zawartości wapna, uzyskano odpowiednio dla 4, 1, 2, 1 i 3 kompozycji mieszanek. Zatem zmiany te, spowodowane były użyciem asfaltów różnego pochodzenia i różną zawartością wypełniacza w mieszance (między 2,6 a 6,1%). Stąd też różnice w usztywnianiu na poziomie mastyksu. Warto zauważyć, że nie stwierdzono takiego wpływu temperatury jaki zaobserwowano dla mastyksu (patrz punkt 2.3.1).

Opublikowane dane nie dostarczają jednoznacznych wyników na temat wpływu zawartości wapna hydratyzowanego na wielkość modułu. Jak wspomniano wcześniej, w badaniach Witczaka największą zdolność usztywnienia zaobserwowano przy zawartości wapna wynoszącej 2,5%, chociaż nie przeprowadzano badań dla wszystkich zawartości wszystkich materiałów. W innych badaniach, przeprowadzonych przez F. Thiago, S. Aragao i in. z Uniwersytetu Nebraska stwierdzono, że optymalna zawartość wapna hydratyzowanego wynosi 1,5%, przy zawartości wapna zmieniającej się od 0,5, 1, 1,5, 2 i 3% [106]. Niestety, w badaniach nie uwzględniono materiałów porównawczych bez domieszki wapna. Jednak w innych badaniach M. Ghouse Baig i H.I. Al-Abdul Wahhab z King Fahd University (Arabia Saudyjska) zaobserwowali, że przy zwiększaniu zawartości wapna hydratyzowanego poprzez 1, 2, 3, 4 i 5,5% optymalną ilością okazało się być 4% [107].

Wnioski były takie, że dodatek wapna hydratyzowanego nie zawsze powoduje wzrost modułu mieszanek mineralno-asfaltowych. Z opisanych tutaj 71 kompozycji mieszanek, tylko 42 (tj. 59% mieszanek) wykazywało większą wartość modułu. Jeśli efekt ten występował, to wzrost był zazwyczaj rzędu 25%, dla zawartości wapna wynoszącej 1,5%. Optymalna zawartość wapna hydratyzowanego, dla wzmocnienia tego efektu, wydaje się silnie zależeć od rodzaju mieszanki. W publikowanych danych podawane są wartości rzędu 1,5 do 4%.

Badacz, rok	Warunki prób	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym	Zakres zawartości wapna hydratyzowanego	Sposób dozowania	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym o znacznie większym module niż dla materiału porównawczego	Bibliografia
Waite, 1986	25°C	5		B, D, LS	2	[11]
Stroup-Gardiner i Epps, 1987	-28,9 / -1,1 / 25 / 40°C	10	1,5%	B, D, LS	4	[20]
Pickering, 1992	25°C	4	1 - 2%		4	[61,30]
Epps, 1992	25°C	8	1 - 2%		8	[11]
Nevada DOT, 1998	25°C	4			4	[11]
Ghouse Baig i Al-Abdul Wahhab, 1998	25°C	5	1 / 2 / 3 / 4 / 5,5%		4	[107]
Mohammad, 2000	5 / 25 / 40°C	4	1,5%	LS	2	[108]
Sebaaly, 2003	25°C	3	–		1	[54,13]
McCann i Sebaaly, 2003	25°C	12	1,5%	D, DM, LS, LSM	1	[62]
Berthelot, 2005	20°C	1	1%		1	[109]
Jaskuła i Judycki, 2005	20°C	2	1,5%		1	[63]
Huang, 2008	-10 / 4,4 / 21,1 / 37,8 / 54,4°C	1	1%		1	[110]
Mohammad, 2008	-10 / 4,4 / 21,1 / 37,8 / 54,4°C	6	1,5%	B, LS	4	[57]
Khattak, 2008	25°C	2	0,9%	B	1	[99]
Vural Kok i Yilmaz, 2008		4	2%		4	[111]

Tabela 13. Przegląd opublikowanych danych dotyczących modułu sztywności. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost modułu mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania.

Dane te pokazują, że tylko niewiele ponad połowa mieszanek wykazuje wzrost modułu po dodaniu wapna hydratyzowanego. Brak jednak jasnego wytłumaczenia, dlaczego dla niektórych mieszanek tak jest, a dla innych nie. Częściowo może to wynikać z poniższych przesłanek:

- Z zależności efektu usztywniania od temperatury (Rys. 13) widać, że przy typowej zawartości wapna hydratyzowanego wynoszącej od 1 do 1,5%, w temperaturze zbliżonej do pokojowej (w jakiej moduł jest zazwyczaj mierzony), powinno występować nieco większe usztywnienie, niż dla powszechnie stosowanych wypełniaczy mineralnych. Mimo, że tylko w dwóch badaniach [20, 110] wskazuje się, że efekt zależny od temperatury obserwowany jest dla mieszanek mineralno-asfaltowych, to istniejąca tendencja świadczy o tym, iż większa zawartość wapna hydratyzowanego generalnie oznacza podwyższenie wartości modułu.
- Występowanie powoli narastającej interakcji między wapnem hydratyzowanym i asfaltem, obserwowanej dla niektórych asfaltów, podczas gdy inne asfalty reagują szybko [81], co omówiono w Rozdziale 3.

I na koniec, inne badania, przeprowadzone przez M. Stroup-Gardinera and J. A. Eppsa z University of Nevada poświęcone porównaniu próbek mieszanki z różnych metod dozowania wapna hydratyzowanego w terenie i próbek wykonanych w laboratorium [53]. Autorzy zauważyli, że na moduł może wpływać sposób dozowania wapna hydratyzowanego, zwłaszcza, kiedy używana była otaczarka bębnowa. Wpływ ten wydawał się być specyficzny dla tego rodzaju badania. Próbki terenowe także charakteryzowały się wyraźnie wyższymi wartościami modułu, w porównaniu do próbek sporządzonych laboratoryjnie.

2.3.3 Wytrzymałość

Wytrzymałość jest jedną z właściwości mechanicznych materiałów [101]. Odpowiada wielkości naprężenia przyłożonego do materiału, które powoduje jego zniszczenie. Wytrzymałość mieszanek mineralno-asfaltowych jest zazwyczaj mierzona przez test ściskania, albo przez bezpośrednie rozciąganie. Pomiaru dokonuje się zwykle w temperaturach zbliżonych do pokojowej.

Moduł sztywności i wytrzymałość wykazują pewną współzależność, jeżeli wyznaczane są w tej samej temperaturze i przy takich samych warunkach obciążania, mimo że moduł jest właściwością nieodłączną (samoistną) materiału, a wytrzymałość silnie zależy od kształtu i rozmiaru próbki. Nie jest więc nieodłączną (samoistną) cechą materiału [101]. Jednak o wiele łatwiej jest mierzyć wytrzymałość materiału niż jego moduł, a więc cechę o dominującym znaczeniu w inżynierii materiałowej. Jako zasadę ogólną opartą na doświadczeniu, należy uznać, że stosunek wielkości modułu do wytrzymałości jest zazwyczaj wartością prawie stałą dla danej klasy materiałów i dla sposobu przykładania obciążenia (ściskanie, zginanie, itd.)

Z uwagi na tę prawie stałą wartość stosunku modułu do wytrzymałości, zmienne charakteryzujące mieszanki wpływają prawie tak samo na ich wytrzymałość, jak i na wartość modułu. Tak więc wytrzymałość przybiera wartość szczytową, przy optymalnej zawartości asfaltu. Moduł wzrasta wraz ze wzrostem modułu lepiszcza, a maleje wraz ze wzrostem zawartości wolnych przestrzeni [102].

W wielu badaniach podaje się wartości wytrzymałości, ponieważ przy wyznaczaniu większości danych, dotyczących odporności na skutki obecności wody, zwykle wykorzystuje się wartości wytrzymałości przed i po kondycjonowaniu (patrz punkt 2.1). Dlatego też, dane dotyczące wytrzymałości „na sucho" pozwalają dokonać oceny wpływu wapna hydratyzowanego na wytrzymałość. Tabela 14 zawiera zestawienie opublikowanych danych.

Wapno hydratyzowane nie zawsze powoduje zwiększenie wytrzymałości mieszanek mineralno-asfaltowych. Ze 113 kompozycji wymienionych w Tabeli 14, tylko 63 (tj. 56%) wykazywało większą wytrzymałość. Opublikowane dane wskazują, że tylko około połowa zwiększa wytrzymałość po dodaniu wapna hydratyzowanego. Brak jednak jasnego uzasadnienia, dlaczego dla niektórych tak się dzieje, a dla innych nie. Odsetek jest podobny jak w przypadku obserwacji dotyczących modułu. Również przyczyny są prawdopodobnie takie same: niska zawartość wapna hydratyzowanego, temperatura pomiarowa w strefie słabego usztywniania (Rys. 13) i kinetyka efektu usztywniania, co omówiono w Rozdziale 3.

Badacz, rok	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym	Zakres zawartości wapna hydratyzowanego	Sposób dozowania	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym o znacznie większej wytrzymałości niż dla materiału porównawczego	Biblio-grafia
Kennedy, 1983 (mieszanki sporządzane w laboratorium)	16	1,5%	B, D, LS, LSM	1	[66]
Kennedy, 1983 (mieszanki sporządzane w wytwórni)	12	1,5%	D, LSM	4	[66]
Stroup-Gardiner i Epps, 1987	10	1,5%	B, D, LS	5	[20]
Jimenez, 1990	1	1,5%		0	[112]
Hicks, 1991	5		B, D, LS, LSM	1	[8,11]
Pickering, 1992	4	1 - 2%		4	[61,13]
Mohammad, 2000	8	1,5%	LS	5	[108]
Sebaaly, 2003	6		D,LS	6	[113,13]
McCann i Sebaaly, 2003	12	1,5%	D, DM, LS, LSM	4	[62]
Huang, 2005	2	1%	B	0	[65]
Jaskuła i Judycki, 2005	2	1,5%	–	0	[63]
Ameri i Aboutalebi, 2008	10	3%	–	10	[114]
Kim, 2008	2	1%	D,LS	2	[60]
Mohammad, 2008	12	1,5%	B, LS	10	[57]
Maldonado i Fee, 2008	1	2%	–	1	[58]
Gorkem i Sengoz, 2009	6	1 / 1,5 / 2%	–	6	[115]
Vural Kok i Yilmaz, 2008	4	2%	–	4	[111]

Tabela 14. Przegląd opublikowanych danych dotyczących wytrzymałości. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost wytrzymałości mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania.

2.3.4 Odporność na powstawanie kolein

Powstawanie kolein w nawierzchniach wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych zaobserwowano od samego początku stosowania tej technologii. Zjawisko to znacząco nasiliło się po drugiej wojnie światowej, kiedy szybko zaczęło wzrastać obciążenie ruchem drogowym [116]. Powstawanie kolein ma miejsce wtedy, gdy obciążenie mieszanki mineralno-asfaltowej przekracza wartość graniczną plastyczności mieszanki. Następuje wówczas trwałe odkształcenie plastyczne (Rys. 15). Koleiny powstają szybciej, gdy obciążenie przemieszcza się po nawierzchni drogi z małą prędkością, oraz przy wysokich temperaturach otoczenia [117]. Jest to jednak proces złożony, ponieważ mieszanki mineralno-asfaltowe w tych warunkach ulegają odkształceniu lepkosprężystemu.

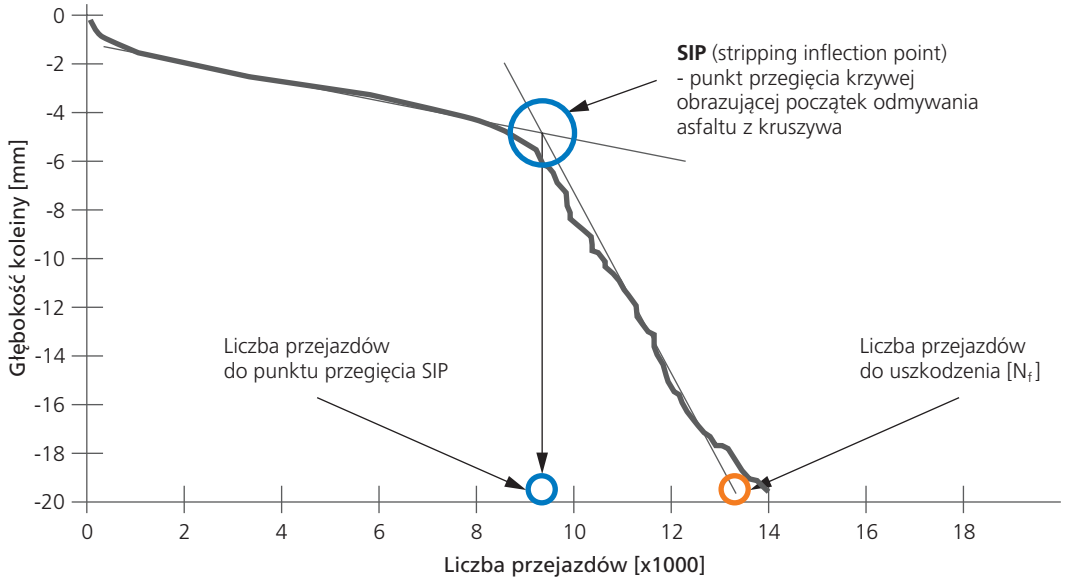
Z punktu widzenia kompozycji mieszanki mineralno-asfaltowej, powstawaniu kolein sprzyja kilka czynników: zawartość asfaltu, duża zawartość piasku, okrągły kształt ziaren kruszywa (np. żwir nie poddany kruszeniu), duża podatność lepiszcza na odkształcenia [116]. Dlatego czynniki sprzyjające usztywnianiu mieszanek mineralno-asfaltowych, powinny także zwiększać odporność mieszanek na powstawanie kolein. Z uwagi na to, właściwościami mechanicznymi decydującymi o ryzyku powstawania kolein w wysokich temperaturach (kiedy lepiszcze mięknie) są te, które zależą od zakresu temperatur otoczenia. Jest to typowe dla warunków europejskich (40 do 60°C).

Rys. 15. Koleiny w nawierzchni wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej (na podstawie [45]).

Zgodnie z przytoczonymi [8] badaniami prowadzonymi w USA we wczesnych latach 90. XX. w., powstawanie kolein zazwyczaj dotyczy mieszanek bez wapna hydratyzowanego i następuje średnio w okresie 5 lat po zakończeniu budowy drogi. Niekiedy już w pierwszym roku jej eksploatacji.

Istnieje kilka metod badawczych pozwalających na określanie odporności na powstawanie kolein w nawierzchniach wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych. Większość z nich, związana jest z użyciem symulatorów ruchu drogowego. Inne są próbami określania właściwości mechanicznych kwantyfikujących trwałe odkształcenie, zakumulowane w materiale na skutek powtarzającego się oddziaływania nacisku w wysokich temperaturach (zwykle w zakresie 40-60°C). Dla celów testowania mieszanek mineralno-asfaltowych, pod kątem odporności na powstawanie kolein [118], istnieje w Normach Europejskich kilka konfiguracji aparatów i procedur przeprowadzania badania. Do symulatorów ruchu drogowego należy także tzw. Analizator Nawierzchni Asfaltowej (APA - Asphalt Pavement Analyzer). Można korzystać także z niektórych prób mechanicznych, takich jak testy pełzania (niekiedy powtarzalnego) lub ściskanie dynamiczne.

Dane otrzymane przy wykorzystaniu urządzenia Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) przytoczone zostały już wcześniej, w rozdziale dotyczącym odporności na działanie wody (Tabela 5). Nie są one w pełni jednoznaczne, jeśli idzie o odporność na powstawanie kolein. W takich próbach, pomiar następuje w pierwszej części badania, zaś jego druga część, po punkcie przegięcia krzywej obrazującej odmywanie asfaltu z ziaren kruszywa, dotyczy raczej określenia potencjału wrażliwości na wodę (patrz Rys. 16 – [13], gdzie zamieszczono dość dobry opis urządzenia HWTD).

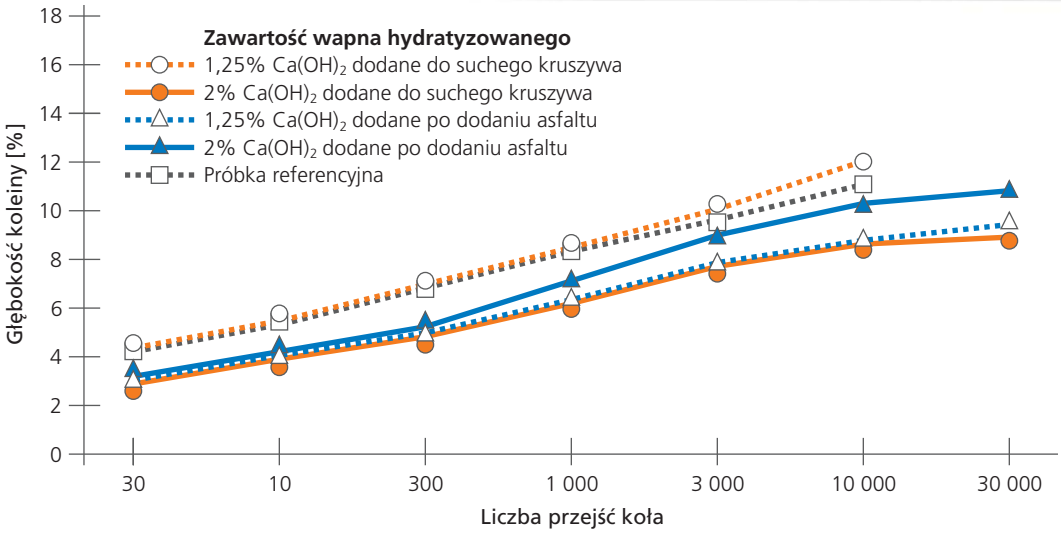


Rys. 16. Interpretacja wyników prac doświadczalnych prowadzonych z użyciem urządzenia HWTD (na podstawie [13]).

Trudno określić, czy korzyści osiągane zazwyczaj dzięki modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym są skutkiem większej odporności na tworzenie się kolein, czy większej odporności na działanie wody, czy też obu tych właściwości. Dlatego właśnie próby te zostały opisane w poprzednim rozdziale, dotyczącym odporności na działanie wody. Pokazano, że są bardzo przydatne w uzasadnieniu korzyści wynikających z modyfikowania mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym (patrz punkt 2.1).

Pomijając dane uzyskane z badań urządzeniem HWTD, to bardzo niewiele jest innych publikacji na temat odporności na powstawanie kolein w nawierzchniach wykonanych z użyciem mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym (Tabela 15). Rys. 17 przedstawia wpływ wapna hydratyzowanego na odporność na koleinowanie różnych kompozycji mieszanek mineralno-asfaltowych.

Wnioski wypływające z tych badań pozwalają stwierdzić, że wapno hydratyzowane w większości przypadków zwiększa odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na powstawanie kolein. 15 kompozycji z 20, przedstawionych w Tabeli 15 (tj. 75%), wykazywało większą odporność na powstawanie kolein. Dane te wyraźnie świadczą o tym, że wapno hydratyzowane generalnie zwiększa odporność na powstawanie kolein. Porównując dane dotyczące modułów i wytrzymałości, można stwierdzić, że efekt usztywniania mieszanki powodowany dodaniem wapna hydratyzowanego jest wyraźniejszy w wyższych temperaturach (w takich warunkach mierzone są powstające koleiny). Poza tym, zawartość wapna hydratyzowanego wyższa niż 1,5%, jest generalnie bardziej skuteczna dla występowania znaczących efektów.



Rys. 17. Wpływ wapna hydratyzowanego na odporność na tworzenie się kolein dla francuskich mieszanek mineralno-asfaltowych BBSG 0/14 mm: głębokość koleiny w funkcji liczby cykli obciążania, mierzona francuskim aparatem do koleinowania (tzw. dużym aparatem) w temperaturze 60°C. Dodano 1,25 lub 2% wapna hydratyzowanego, albo do suchego kruszywa albo po dodaniu asfaltu (na podstawie [73]).

Badacz, rok	Metoda	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym	Zakres zawartości wapna hydratyzowanego	Sposób dozowania	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym o znacznie większej odporności niż dla materiału porównawczego	Bibliografia
Little, 1994		3			3	[12]
Hiérnaux, 1995	francuska, 60°C	1	1%		1	[23]
Kim, 1995		1			1	[11]
Collins, 1997	APA	8			5	[119, 11]
Ghouse Baig i Al-Abdul Wahhab, 1998	45 i 60°C	2	2 - 5,5%		1	[107]
LCPC, 1999	francuska, 60°C	4	1 - 2%	D, B	3	[73]
Piłat, 2000	pełzanie, 40°C	1	20% wypełniacza	MF	1	[100]
Little i Petersen, 2005	APA, 45°C	2	1%	D	2	[13]
Sewing, 2006	ściskanie dynamiczne, 55°C	2	2%	D	2	[86]

Tabela 15. Przegląd opublikowanych danych dotyczących odporności na powstawanie kolein. Należy nadmienić, że wyniki badań z użyciem urządzenia HWTD opisano wcześniej, w Tabeli 5. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost odporności mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym na powstawanie kolein. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania; MF – wypełniacz mieszany.

2.3.5 Spękania zmęczeniowe

Spękania zmęczeniowe nawierzchni asfaltowych są zjawiskiem badanym od niedawna. Zostały uznane za możliwy proces powstawania uszkodzeń mieszanek mineralno-asfaltowych również przez M. Duriez z French Central Laboratory of Roads and Bridges (LCPC) w latach 50. [7]. Zjawisko to było zaprezentowane w znanych próbach AASHO w USA, w latach 1957-1961 [120]. Spękania zmęczeniowe występują wtedy, gdy na skutek powtarzalnych obciążeń nawierzchni drogowej, dochodzi do uszkodzeń i pęknięć rozchodzących się od spodu warstw asfaltowych ku górze (Rys. 18). Ich powstawaniu sprzyja mała grubość warstw asfaltowych lub słabe związanie kolejnych warstw nawierzchni. Czynniki te wpływają na powstawanie wysokich naprężeń zginających na spodzie warstw asfaltu [121].

Rys. 18. Spękania zmęczeniowe (inaczej spękania siatkowe) mieszanki mineralno-asfaltowej (na podstawie [45]).

Z punku widzenia składu mieszanki mineralno-asfaltowej, wiadomo, że odporność na zmęczenie wzrasta ze wzrostem zawartości asfaltu, lub kiedy stosuje się lepiszcza o wysokich parametrach eksploatacyjnych [102]. W zależności od sposobu pomiaru zmęczenia, miękkie lepiszcze może zwiększać trwałość zmęczeniową (badanie w trybie kontrolowanego odkształcenia) lub ją zmniejszać (tryb kontrolowanego naprężenia).

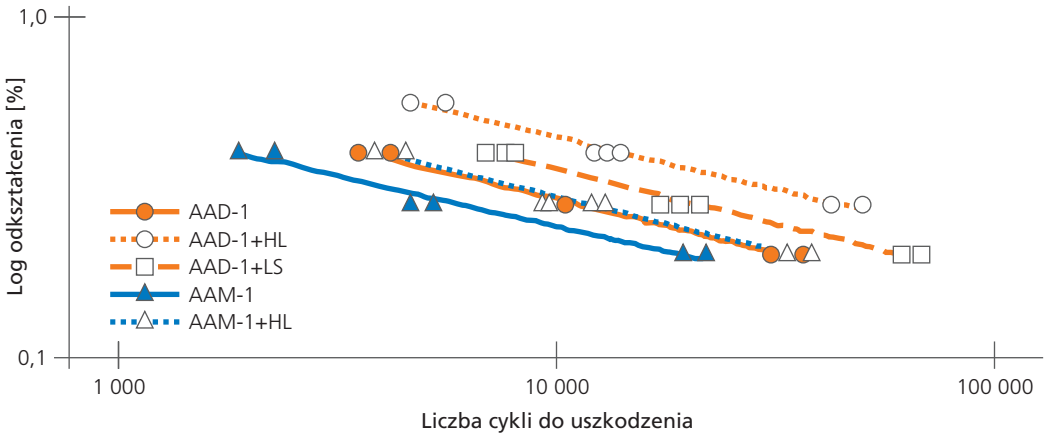
Spękania zmęczeniowe są głównym procesem destrukcyjnym nawierzchni drogowej, który jest brany pod uwagę przy projektowaniu warstw nawierzchni. Mówiąc bardziej dokładnie, warstwy asfaltowe projektuje się o takiej grubości, aby nie dochodziło do pojawiania się spękań zmęczeniowych w projektowanym czasie eksploatacji nawierzchni (od 10 do 40 lat dla warunków europejskich [122]).

Trwałość zmęczeniowa badana jest głównie w laboratoriach, przez poddawanie próbki powtarzającym się obciążeniom o stałym natężeniu. Obciążenie można aplikować albo poprzez kontrolę naprężeń, albo odkształceń. W próbach z kontrolowanym naprężeniem łatwo jest określić moment zniszczenia próbki. W próbach z kontrolowanym odkształceniem, zniszczenie próbki jest zazwyczaj definiowane jako moment, w którym początkowy moduł sztywności próbki zmniejszył się o połowę. Liczba cykli do momentu zniszczenia próbki mierzona jest w funkcji natężenia obciążenia. Typowe krzywe zmęczeniowe przedstawia Rys. 19. Do określania odporności na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych, została opracowana Norma Europejska EN 12697-24 [123].

Bibliografia dotycząca badań poświęconych oddziaływaniu wapna hydratyzowanego na odporność zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych jest dość uboga. W Tabeli 16 zestawione są przykładowe badania, pokazujące wpływ wapna hydratyzowanego na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych.

Z wyjątkiem badań prowadzonych przez prof. L. N. Mohammada i in. z Louisiana State University [108], wszystkie inne potwierdzają, że wapno hydratyzowane ma korzystny wpływ na odporność zmęczeniową. 17 z 20 mieszanek (77%) wykazywało zwiększoną odporność na zmęczenie. Żadne z badań nie opierało się jednak na Normach Europejskich. Natomiast wszystkie z nich ograniczały się do wyznaczenia wielkości stosunku odkształcenie/naprężenie. Wartości te dawały przewidywaną trwałość znacznie poniżej 1 miliona cykli. Nie jest zatem właściwe ekstrapolowanie okresu żywotności mieszanki na podstawie tych danych, dla przypadków, kiedy obciążenie skumulowane wynosi od 1 do 100 milionów.

Podsumowując, niewiele jest opublikowanych danych dotyczących wpływu wapna hydratyzowanego na odporność zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych. W 77% przypadków dane te potwierdzają, że wapno hydratyzowane zwiększa trwałość zmęczeniową. Dane te jednak ograniczają się do niewielkiej liczby cykli, a procedury prób nie uwzględniały Norm Europejskich. Dlatego badania te nie są w pełni rozstrzygające.



Rys. 19. Wpływ wapna hydratyzowanego na trwałość zmęczeniową piaskowych mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych próbom na skręcanie. Na rysunku podano zależność liczby cykli do momentu zniszczenia próbki dla kilku mieszanek piaskowo-asfaltowych zawierających 10% wapna hydratyzowanego (HL) lub wypełniacza wapiennego (LS) w asfalcie, dla asfaltów pochodzących z dwóch źródeł: AAD-1 i AAM-1 (na podstawie [90]).

Badacz, rok	Warunki prób	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym	Zakres zawartości wapna hydratyzowanego	Sposób dozowania	Liczba mieszanek z wapnem hydratyzowanym o znacznie większej odporności niż dla materiału porównawczego	Bibliografia
Rhagava Chari i Jacob, 1984	30°C, 1Hz	5	3 / 5 / 7 / 9 / 11%		5	[124]
Kim, 1995		1			1	[119,11]
M. Ghouse Baig i H. I. Al-Abdul Wahhab, 1998	45°C	5	1 / 2 / 3 / 4 / 5,5%		5	[124]
Mohammad, 2000	25°C	8	1,5%	LS	3	[108]
Little i Petersen, 2005		3	1%	D	3	[13]

Tabela 16. Przegląd opublikowanych danych dotyczących odporności na zmęczenie. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost odporności mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym na zmęczenie. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania; MF – wypełniacz mieszany.

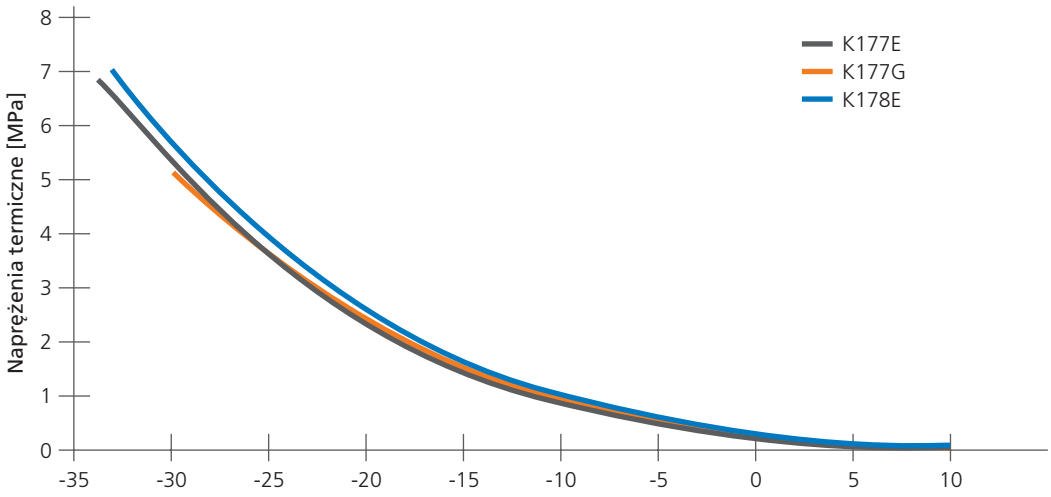
2.3.6 Spękania termiczne

Spękania termiczne występują głównie w rejonach o chłodnym klimacie. Niskie temperatury działające na asfalt sprawiają, że staje się on kruchy. W konsekwencji ochładzania w materiale rozwija się skurcz termiczny generujący naprężenie rozciągające, które może przekroczyć wytrzymałość materiału na rozciąganie, powodując spękania (Rys. 20).

Spękania termiczne nie są jednak ograniczone tylko do chłodnych rejonów geograficznych. Duże wahania temperatury pomiędzy nocą i dniem także mogą przyczynić się do występowania spękań indukowanych na powierzchni warstwy ścieralnej i rozwijających się w głąb nawierzchni. Zjawisko to zostało zaobserwowane w Południowej Francji [125], a nie jest rzadkością i na innych obszarach [126].

Z punktu widzenia składu mieszanki mineralno-asfaltowej, podobnie jak w przypadku spękań zmęczeniowych, zwiększeniu odporności na spękania termiczne sprzyja zastosowanie zwiększonej zawartości asfaltu lub zastosowanie najlepszych funkcjonalnie lepiszczy [127]. Zastosowanie miękkich asfaltów zwiększa odporność nawierzchni na spękania, stąd ich stosowanie w regionach północnych.

Spękania termiczne zazwyczaj bada się w laboratoriach poddając próbki cyklowi ochładzania (jak w teście TSRST). Podczas badania, dzięki zamocowaniu końców próbki, jej wielkość jest stała, co umożliwia powstawanie w niej naprężeń termicznych. Temperatura, w której dochodzi do pęknięcia próbki jest rejestrowana. Typowy przebieg wykresu pomiarowego przedstawia Rys. 20.



Rys. 20. Naprężenia termiczne w funkcji temperatury (ang. TSRST – thermal stress vs temperature) dla betonu asfaltowego 0/22 z asfaltem modyfikowanym polimerami w ilości 4,5% i wapnem hydratyzowanym w ilości 2,5%. Krzywe odpowiadają próbom powtarzanym dla tego samego materiału (na podstawie [128]).

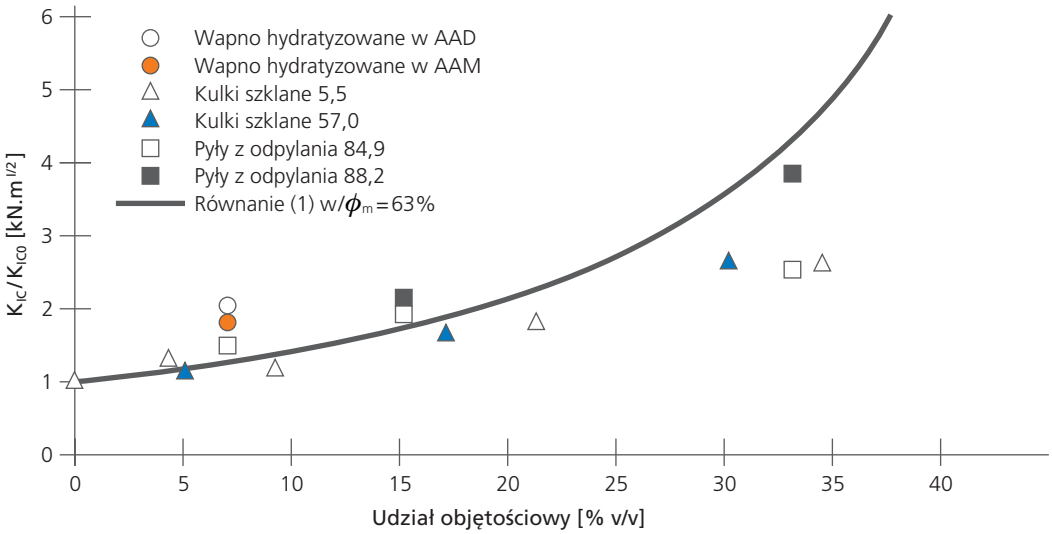
Mieszanka mineralno-asfaltowa	Temperatura początkowa [°C]	Gradient temperatury [K/h]	Maks. wywołane naprężenie termiczne [N/mm²]	Temperatura pęknięcia [°C]
SMA 0/8 z 7,3% asfaltu 50/70, z zawartością 1,6% wapna hydratyzowanego (w postaci wypełniacza mieszanego Ka_{25})	20	-10	4,279 4,339	-24,3 -24,6
SMA 0/8 z 7,3% asfaltu 50/70	20	-10	4,296 4,238	-24,1 -24,5
AC 0/11 z 6,2% asfaltu 70/100, z zawartością 1,4% wapna hydratyzowanego (w postaci wypełniacza mieszanego Ka_{25})	20	-10	4,761 4,573	-26,6 -26,2
AC 0/11 z 6,2% asfaltu 70/100	20	-10	4,558 4,523	-26,3 -26,0

Tabela 17. Naprężenia termiczne w funkcji temperatury (TSRST – thermal stress vs temperature) dla dwóch różnych mieszanek mineralno-asfaltowych z wapnem hydratyzowanym oraz bez wapna hydratyzowanego (na podstawie [29]).

Dane przedstawione w Tabeli 17 pokazują temperaturę pękania wg metody TSRST, która zasadniczo pozostaje niezmieniona, jeśli porównywać mieszankę mineralno-asfaltową modyfikowaną wapnem i bez tej modyfikacji. Wyniki uzyskane przez M. McCanna (U.S. Forest Service) i prof. P. E. Sebaaly'ego (University of Nevada) potwierdzają, że ani temperatura (przy której następowało zniszczenie próbki), ani naprężenia termiczne, nie były znacząco różne dla materiałów modyfikowanych i niemodyfikowanych wapnem hydratyzowanym [62].

Warto zauważyć, że prof. L. N. Mohammad i in. z Louisiana State University, podali niektóre dane dotyczące energii pękania dla mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych wapnem hydratyzowanym, które wskazują, że energia pękania maleje po dodaniu wapna hydratyzowanego [57]. Wyniki te nie są sprzeczne z wynikami prób TSRST, o których mowa powyżej, ponieważ w rzeczywistości uzyskane były w temperaturze 25°C, a więc próby te nie mierzyły tej samej właściwości.

Wyniki te są zgodne z wynikami odporności na obciążenia, otrzymanymi dla mastyksu. Stwierdzono, że wapno hydratyzowane zwiększa wytrzymałość mastyksu asfaltowego w tym samym stopniu, co wypełniacz mineralny, przy takiej samej procentowej zawartości objętościowej (Rys. 21 – [81]). Tak więc nie oczekuje się, aby wapno hydratyzowane wpływało na pękanie w niskich temperaturach inaczej, niż wypełniacz mineralny. Zostało to potwierdzone w nielicznych publikacjach, na temat braku zwiększenia odporności na spękania w niskich temperaturach mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych wapnem hydratyzowanym.



Rys. 21. Wytrzymałość mastyksu (zredukowanego do wartości referencyjnej osiągniętej z asfaltem bazowym) w zależności od zawartości objętościowej wypełniacza, zbadana dla kilku rodzajów mastyksu wykonanych z dwoma rodzajami asfaltu i wapnem hydratyzowanym. Dane te porównano z opublikowanymi danymi dla wypełniaczy mineralnych (pyły z odpylania) lub kulek szklanych (na podstawie [81]). Równanie (1) odpowiada temu samemu równaniu, które podano dla lepkości w p.2.3.1, gdzie $[\eta] = 2/\phi_m = 3,17$ (na podstawie [81]).

2.4 Wapno hydratyzowane w połączeniu z innymi dodatkami

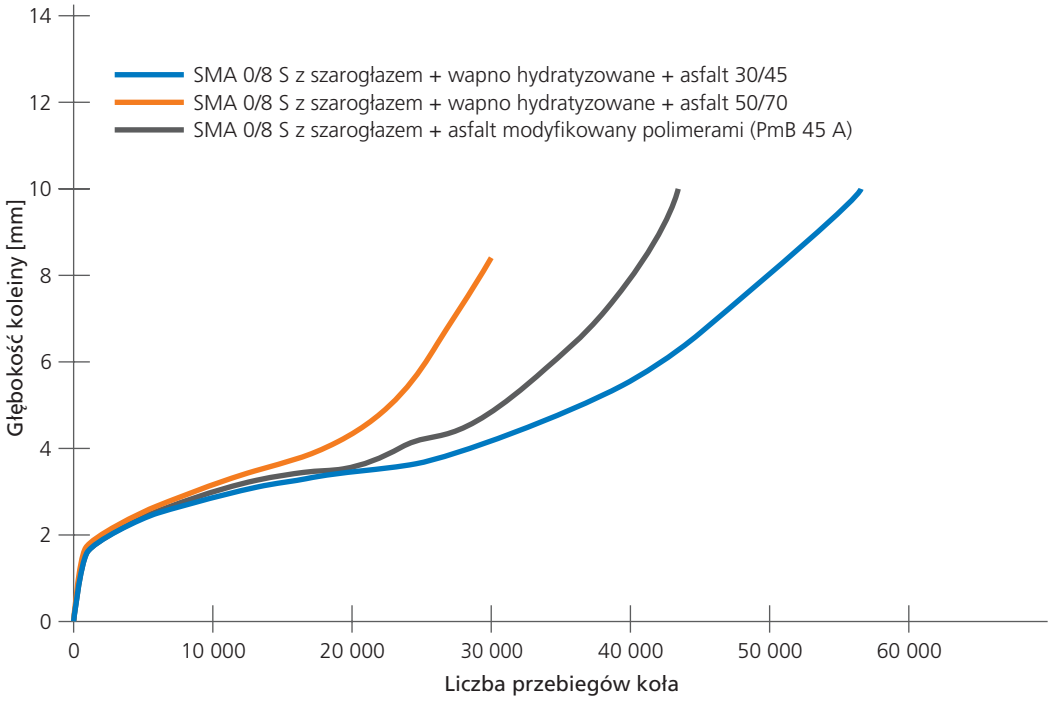
2.4.1 Wapno hydratyzowane i polimery

Kilka badań wykazało, że wapno hydratyzowane i polimery mogą działać w sposób synergiczny. Polimery stosowane są w celu modyfikowania właściwości mechanicznych mieszanek mineralno-asfaltowych [95, 129]. Możliwe jest więc uzyskanie korzyści z potencjalnych efektów wpływu wapna hydratyzowanego na właściwości mechaniczne, w celu uzyskania mieszanek o dobrych właściwościach, ale przy mniejszej zawartości polimerów, ponieważ są to materiały droższe.

W zależności od projektowanych właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, można określić równoważną kombinację, polimery – wapno hydratyzowane.

B. Brûlé i in. z Entreprise Jean Lefebvre (obecnie Eurovia) wykazali, że asfalt porowaty z 7% dodatkiem kopolimeru octanu winylowego etylenu (EVA - Ethylene Vinyl Acetate) jako modyfikatora asfaltu, był równoważny asfaltowi z dodatkiem wapna hydratyzowanego w ilości 1% i tylko 3% dodatku EVA, przy przyjęciu próby Cantarbo jako głównych kryteriów oceny [68]. Mieszanka ta była zastosowana na autostradzie A4 w Reims (we Francji) w 1992 r. i eksploatowana była do roku 2009, przez cały czas wykazując doskonałą trwałość asfaltu porowatego.

Według P. Cramer i in. z Basalt AG, mieszanka SMA 0/8 z asfaltem modyfikowanym polimerami (PmB 45 A) jest równoważna mieszance z 1,4 % wapna hydratyzowanego i lepiszcza 30/45, gdy jako kryterium główne przyjmuje się próbę z urządzeniem HWTD (Rys. 22 – [37]).



Rys. 22. Krzywe koleinowania uzyskane z pomiarów z użyciem urządzenia HWTD dla kilku mieszanek SMA 0/8 sporządzonych z tego samego kruszywa (szarogłaz) ale z różnymi lepiszczami: asfaltem modyfikowanym polimerami (PmB 45 A) lub asfaltem drogowym 30/45 lub 50/70 z 1,4% wapna hydratyzowanego (w postaci wypełniacza mieszanego). Odpowiednio dobrane zawartości lepiszcza i wapna hydratyzowanego mogą dać właściwości równoważne tym, jakie uzyskuje się dla lepiszczy modyfikowanych polimerami (na podstawie [37]).

C. Gorkem i B. Sengoz z Dokuz Eylul University w Izmirze (Turcja) wykazali, że mieszanka betonu asfaltowego 0/19 sporządzona z dwóch kruszyw była równoważna pod względem wytrzymałości na rozciąganie i pozostałej wytrzymałości na rozciąganie, mieszance z lepiszczem modyfikowanym 2-3% dodatkiem kopolimeru blokowego butadienowo-styrenowego (SBS), lepiszczem modyfikowanym 3-4% dodatkiem octanu winylowego etylenu (EVA) lub mieszance z 2% dodatkiem wapna hydratyzowanego [115].

B. Vural Kok i M. Yilmaz z Firat University w Elazig (Turcja) udowodnili, że mieszanka betonu asfaltowego 0/19 z lepiszczem modyfikowanym 4% dodatkiem SBS była równoważna mieszance z 2% dodatkiem SBS i 2% wapna hydratyzowanego, kiedy jako kryterium przy projektowaniu przyjęto moduł, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, lub badanie Lottmana [111].

M. Iwański i M. Pobocha z Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, próbowali zastosować w asfalcie porowatym, kilka kombinacji wapna hydratyzowanego (10-50% m/m w wypełniaczu) i SBS (2-8% w asfalcie) [130]. Na podstawie uszkodzeń spowodowanych wodą (zanurzanie / ściskanie i metoda Lottmana) oraz właściwości mechanicznych (pełzanie i próby Marshalla), wyznaczyli wartości optymalne dla tej kombinacji, wynoszące 30% wapna hydratyzowanego w wypełniaczu i 4% SBS.

Doświadczenia austriackie, oparte wówczas na metodzie Marshalla i potwierdzone badaniami odporności na powstawanie kolein (30 000 cykli przy 60°C) pokazują, że dodatek 3,5% wapna hydratyzowanego do czystego asfaltu 70/100, może stanowić zamiennik dla mieszanek mineralno-asfaltowych, sporządzonych z asfaltów modyfikowanych polimerami PmB 30-50 lub 60-90 [131]. Pierwsze potwierdzenie uzyskano dla mieszanek mineralno-asfaltowych BA dla warstwy ścieralnej i podbudowy (odpowiednio AB 11 LK i BT 32 LK S). Obecnie, na wielu odcinkach dróg wykonywana jest nawierzchnia z podobnych mieszanek, z 2,5-3,5% dodatkiem wapna hydratyzowanego. Wyniki eksploatacyjne są całkiem zadowalające [132].

Podsumowując, wapno hydratyzowane zawsze było i jest stosowane z dużym powodzeniem do mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych domieszką miału gumowego, zwłaszcza przy pierwszych próbach stosowania asfaltu porowatego w Europie, jak opisujemy w punkcie 4.3.

2.4.2 Wapno hydratyzowane i kwasy polifosforowe

W Ameryce Północnej, niektóre lepiszcza asfaltowe są obecnie modyfikowane kwasami polifosforowymi (PPA - PolyPhosphoric Acids). Powoduje to, że lepiszcza uzyskują większą sztywność [95, 133]. Technologia ta przyjmuje obecnie zasięg światowy. Ponieważ PPA jest kwasem, toczą się dyskusje nad zgodnością wapna hydratyzowanego (jako materiału zasadowego) z kwasem PPA. W publikowanych danych nie wspomina się jednak o żadnych niepożądanych wynikach reakcji.

Na przykład badania T. Arnolda i in. z Federal HighWay Administration w USA przeprowadzone z użyciem urządzenia HWTD wykazały, że modyfikacja kwasem PPA w połączeniu z 1% domieszką wapna hydratyzowanego nie grozi uszkodzeniami powodowanymi obecnością wody [134].

Wyniki te są zgodne ze spostrzeżeniami uzyskanymi przez National Center for Asphalt Technology (USA), na odcinku testowym w Auburn (Alabama) [135], wskazującymi że kwas PPA i wapno hydratyzowane działają korzystnie w połączeniu. Potwierdzają to również niektóre, ostatnie badania brazylijskie, przeprowadzone na Uniwersytecie w Sao Paulo [136].

3. Mechanizm modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych wapnem hydratyzowanym

Mechanizm, zgodnie z którym wapno hydratyzowane powoduje modyfikację mieszanek mineralno-asfaltowych, jest w pewnym sensie hipotetyczny. Pomimo tego, w bibliografii znaleźć można wiele wyników wskazujących na to, że wapno hydratyzowane rzeczywiście wpływa na różne właściwości mieszanek. Niektóre z nich dotyczą adhezji, inne starzenia, a jeszcze inne właściwości mechanicznych.

Dlatego uzasadnione są wnioski, że wapno hydratyzowane działa na różnych poziomach:

- Modyfikuje powierzchnię ziaren kruszywa. Większość stosowanych w USA metod polega na dodawaniu wapna bezpośrednio do wilgotnego kruszywa, czasem z sezonowaniem (Tabela 20). Pokazuje to, że modyfikacja powierzchni ziaren kruszywa jest jedną z kluczowych cech jego modyfikacji wapnem hydratyzowanym.
- Reaguje z asfaltem. Reakcje chemiczne zachodzą między zasadowym związkiem chemicznym, a niektórymi kwaśnymi częściami cząstek, o specjalnych właściwościach chemicznych normalne obecnymi w asfalcie. Cechę tę odnosi się do wpływu chemicznego na asfalt.
- Generuje niektóre fizyczne interakcje z asfaltem, wynikające z porowatej struktury wapna. Jak wspomniano w Rozdziale 1, odróżnia to wapno hydratyzowane od innych wypełniaczy mineralnych i jest odnoszone do wpływu fizycznego na asfalt.

Biorąc wszystkie te czynniki pod uwagę, można powiedzieć, że interakcja między wapnem hydratyzowanym i innymi składnikami mieszanki mineralno-asfaltowej jest dość intensywna. Wyjaśnia to poprawę tak odmiennych właściwości jak: odporność na uszkodzenia powodowane obecnością wody, odporność na starzenie i właściwości mechaniczne.

3.1 Wpływ na kruszywo

3.1.1 Modyfikowanie powierzchni

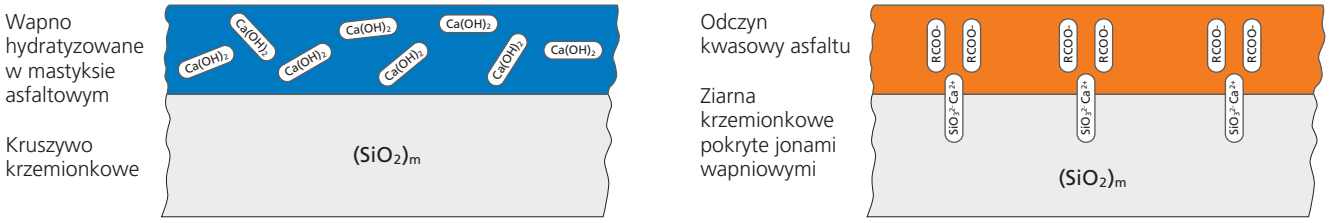
W budownictwie drogowym (w technologii nawierzchni asfaltowych) wiadomo, że kruszywa krzemionkowe (tzw. kwaśne) w porównaniu z wapiennymi (zasadowymi) charakteryzują się najgorszymi właściwościami adhezyjnymi w stosunku do asfaltów [8, 137]. Przyczyną tego jest fakt, iż zarówno surfaktanty anionowe jak i kationowe (tj. środki powierzchniowo czynne normalnie obecne w asfalcie), silnie wiążą z jonami wapnia, podczas gdy z atomami krzemionki, silnie wiążą tylko surfaktanty kationowe [138]. W wyniku tego, surfaktanty anionowe w kruszywach krzemionkowych są łatwo przemieszczane przez wodę.

Jednym z efektów użycia wapna hydratyzowanego, jest umożliwienie wytrącania się jonów wapnia na powierzchni ziaren kruszywa. Dzięki temu staje się ona bardziej sprzyjająca dla asfaltu. To zjawisko zaobserwowali I. Ishaia i J. Crausa z Techion-Israel Institute of Technology w 1977 r. (Rys. 23 – [139, 140]). W związku z tym obróbka powierzchni ziaren kruszywa, prawie już bez cząstek wapna hydratyzowanego, poprawia możliwości adhezji asfalt-kruszywo [141].

Poza tym, węglan wapnia w obecności wody może się wytrącać na etapie produkcji lub in-situ, jeśli wystawiony jest na działanie wody opadowej. Dzięki temu może się tworzyć powierzchnia ziaren kruszywa o większej chropowatości , co również sprzyja zwiększeniu adhezyjności dla asfaltu [142].

Efekt ten może być na tyle silny, że część wapna hydratyzowanego nie jest odzyskiwana po ekstrakcji asfaltu (opis w punkcie 4.4 poniżej). W przypadku wypełniacza bazaltowego, około 40% wapna hydratyzowanego nie zostało odzyskane, prawdopodobnie na skutek reakcji z kruszywem.W przypadku wypełniacza wapiennego ponad 90% wapna zostało odzyskane razem z mączką wapienną (patrz Rys. 30).

Efekt modyfikacji powierzchni ziaren kruszywa, nie jest jedynym mechanizmem. Zjawisko to, prawie nie występuje na kruszywie wapiennym. Wiadomo jednak, że wapno hydratyzowane zwiększa również adhezję kruszyw wapiennych (Rys. 9 – patrz także [57, 77]. Muszą więc działać inne mechanizmy, a zwłaszcza te w stosunku do asfaltu (opis poniżej).

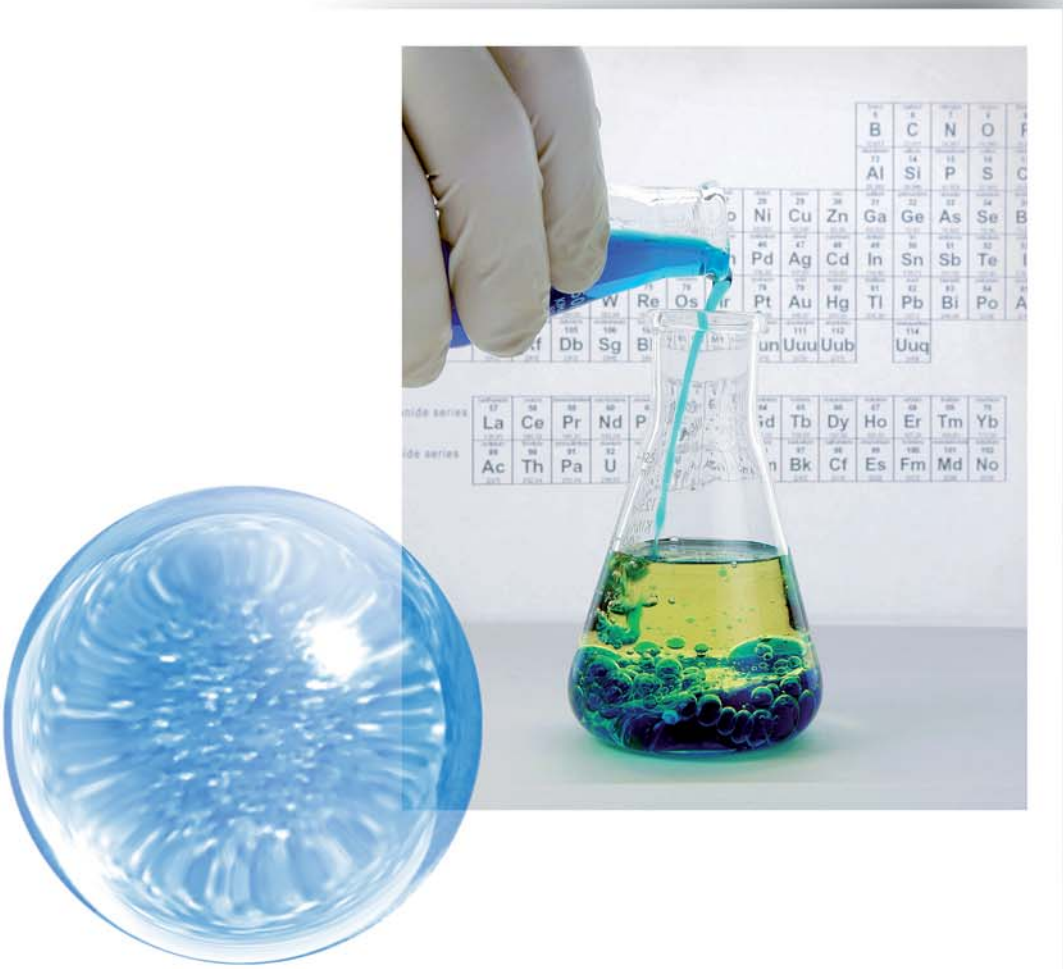


Rys. 23. Wpływ wapna hydratyzowanego na powierzchnię ziaren kruszywa, wg I. Ishaia i J. Crausa (na podstawie [139]).

3.1.2 Flokulacja cząstek ilastych

W przypadku stosowania kruszyw z materiałów ilastych, wapno hydratyzowane jest bardzo skuteczne w zwiększaniu odporności mieszanki mineralno-asfaltowej, na uszkodzenia nawierzchni powodowane obecnością wody. Dlatego właśnie jest ono stosowane w takich stanach USA jak: Kalifornia, Kolorado, Nevada czy Utah, gdzie kruszywa są silnie zanieczyszczone materiałem ilastym. Generalnie, cząstki ilaste występują w postaci niewielkich wtrąceń w skałach i są uwalniane podczas ich kruszenia. W tym przypadku, rola wapna hydratyzowanego jest podobna do działania w czasie ulepszania gruntu [143]. Wapno powoduje flokulację cząstek ilastych, chroniąc je przed rozwijaniem się bariery między asfaltem i kruszywem, przemieszczanej wraz z wodą.

Badania niemieckie przeprowadzone przez H.-J. Eulitza i in. z Institut für Materialsprüfung im. Dr. Schellenberg w Rottweil, poświęcone kontrolowanemu zanieczyszczeniu materiałem pęczniejącym potwierdziły, że wapno hydratyzowane skutecznie przeciwdziała skutkom powodowanych przez minerały ilaste [38, 39].

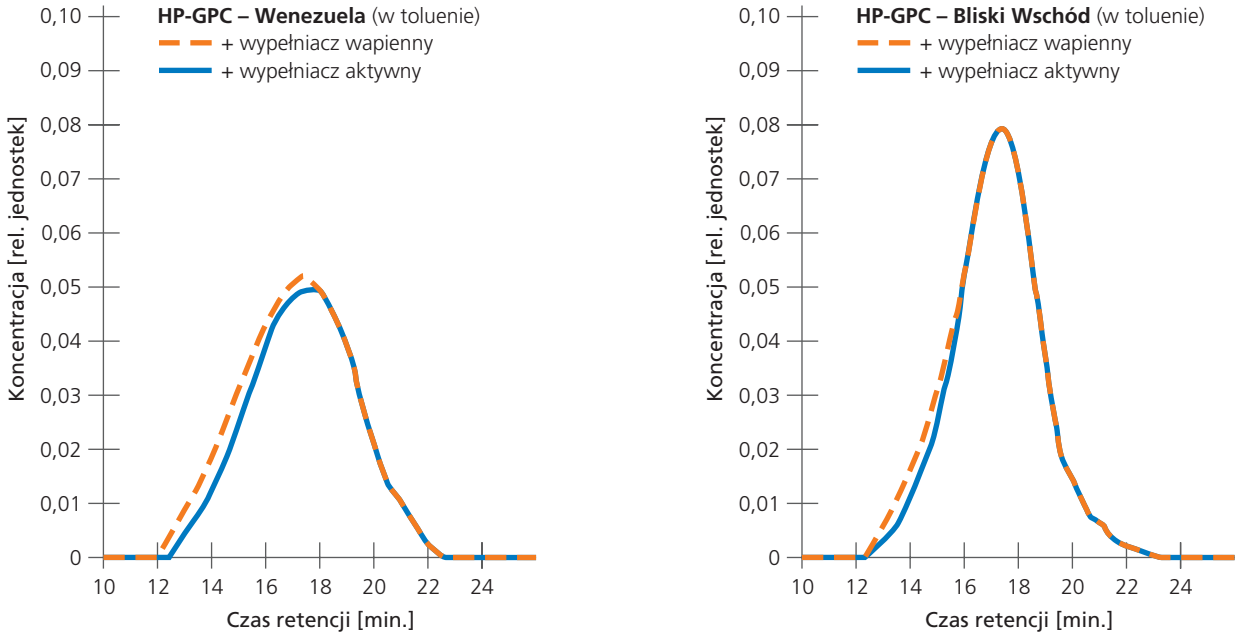


3.2 Wpływ na asfalt

3.2.1 Oddziaływanie chemiczne na asfalt

Chemiczne działanie wapna hydratyzowanego na asfalt, zaobserwował Plancher i in. z Western Research Institute (WY, USA) już w 1976 r. [72]. Do badań użyli 4 rodzajów asfaltu, znacznie różniących się składem chemicznym. Przygotowali roztwory asfaltu z wapnem hydratyzowanym i benzenem, w stężeniu masowym odpowiednio 1:1:600 i odstawili go na 24 godziny. Po odwirowaniu i usunięciu rozpuszczalnika, odzyskali asfalty modyfikowane wapnem, a następnie poddali je dokładnej analizie spektroskopowej w podczerwieni. Okazało się, że około 4-6% m/m każdego asfaltu, było silnie zaadsorbowane na cząstkach wapna hydratyzowanego [72].

Niedawno P. C. Hopman z Netherlands Pavement Consulting wykazał, że wapno hydratyzowane jest bardziej skuteczne niż wypełniacz wapienny, jeśli chodzi o wzajemne oddziaływanie asfaltu i wypełniacza. Średnio, adsorpcja asfaltu z kilku rozpuszczalników (n-heptan, eter cykliczny tetrahydrofuran – THF, toluen i chlorek metylu) przez aktywny wypełniacz wapienny, zawierający 25% m/m wapna hydratyzowanego, była 1,4 i 2,1 razy silniejsza, niż przez normalny wypełniacz wapienny dla asfaltów z rejonu Bliskiego Wschodu i Wenezueli, [69]. Porównując krzywe uzyskane z wysokosprawnej chromatografii żelowej (ang. HP-GPC), w toluenie z asfaltów związanych wypełniaczem wapiennym, albo wypełniaczem aktywnym (Rys. 24), okazało się, że wapno hydratyzowane zaadsorbowało niektóre ciężkie cząsteczki asfaltów. Efekt ten był mniej wyrazisty dla tetrahydrofuranu niż dla toluenu [69].



Rys. 24. Wysokosprawna chromatografia żelowa w toluenie dla dwóch asfaltów, z Wenezueli i Bliskiego Wschodu, po kontakcie albo z wypełniaczem wapiennym, albo z tym samym wypełniaczem po dodaniu 25% wagowo wapna hydratyzowanego (wypełniacz aktywny) (na podstawie [69]).

Informacje dotyczące gatunków asfaltu adsorbowanego przez wapno hydratyzowane, można również znaleźć w bibliografii. W Tabeli 18 pokazujemy materiały modyfikowane wapnem, w badaniach przeprowadzonych przez H. Planchera i in. z Western Research Institute (WRI) w Laramie (Wyoming, USA – [72]).

Wykazały one niższe stężenie w kwasach karboksylowych, bezwodnikach dwukarboksylowych i 2-chinolonach, które typowo gromadzą się w cięższych składnikach asfaltu i zwane są asfaltenami (patrz [95] , przegląd struktury i chemizm asfaltów). Ketony były jednak bardziej liczne. Sulfotlenki nie ulegały znaczącej zmianie.

Asfalty	Stężenie [mole/litry]				
	Ketony	Kwasy karboksylowe	Bezwodniki dwukarboksylowe	Typy 2-chinolonów	Sulfotlenki
B-2959 bez wapna / z wapnem	0,015 0,039	ślady (1)	0,0014 (1)	0,003 (1)	0,015 0,013
B-3036 bez wapna / z wapnem	0,021 0,039	ślady (1)	0,001 (1)	0,001 (1)	0,022 0,019
B-3051 bez wapna / z wapnem	0,017 0,039	0,014 (1)	0,003 0,001	0,009 0,004	0,010 0,008
B-3602 bez wapna / z wapnem	0,045 0,1	0,06 (2) 0,014 (2)	(1) 0,007	0,011 0,006	0,015 0,015

Tabela 18. Stężenie grup funkcjonalnych w czterech asfaltach AC-10 o różnym składzie chemicznym przed dodaniem i po dodaniu wapna hydratyzowanego. (1) – poniżej poziomu wykrywalności; (2) – obecne w postaci soli karboksylowych (na podstawie [72]).

Mówiąc ściśle, wapno hydratyzowane reaguje z kwasami, bezwodnikami i 2-chinolonami asfaltu. Do wniosków tych doszła ta sama grupa pracowników naukowych, w nowszych badaniach [22]. 150-gramowe próbki kilku asfaltów pozostawiono do przereagowania, mieszając przez 6 godzin w temperaturze 150°C, z różnymi ilościami wapna hydratyzowanego lub dolomitowego wapna hydratyzowanego. Wapna hydratyzowane zostały następnie wyekstrahowane rozpuszczalnikami. W celu przeprowadzenia analizy materiałów z wapnem lub bez oraz przed i po próbie przyśpieszonego starzenia cienkiej warstwy (TFAAT), zastosowano spektroskopię w podczerwieni (wyniki uzyskane dla tych samych materiałów – patrz Rys. 12). Jak widać w Tabeli 19, obecność wapna hydratyzowanego redukuje ilość ketonów, bezwodników i większość kwasów karboksylowych, które tworzą się w procesie starzenia.

Reakcje między zasadowym wapnem hydratyzowanym i kwasami normalnie obecnymi w asfalcie są w pełni potwierdzone w bibliografii. Są zgodne z przeglądem, jaki opracowali D.N. Little z Texas Transportation Institute (College Station, Texas) i J.C.Petersen, emerytowany pracownik WRI (World Resources Insitute) [12]. Poza tym, znaczenie reakcji chemicznej zasada-kwas dla skutków starzenia, potwierdzają też inne dane:

- L.Johansson i in. ze Swedish Royal Institute of Technology (KTH) stwierdził, że efekt zapobiegania starzeniu nie występuje w obecności $Mg(OH)_2$, który ma słabszy odczyn zasadowy niż $Ca(OH)_2$ [80].
- M. Wisneski i in. z Texas A&M University stwierdził, że wapno palone ma taki sam wpływ na starzenie, co wapno hydratyzowane [75].

Obróbka wapnem		Próba starzenia	Stężenie [mole/litry]				
Typ	%		Ketony	Bezwodniki	Kwasy karboksylowe	Typy 2-chinolonów	Sulfotlenki
Bez wapnia	0	niestarzone	0	0	0,015	0,017	0,02
	0	starzone	0,28	0,007	0,015	0,017	0,35
Wysoka zawartość wapnia	10	niestarzone	0,03	0	0,005	0,016	0,03
	10	starzone	0,24	0,005	0,004	0,016	0,32
Wysoka zawartość wapnia	20	niestarzone	0,03	0	0,003	0,014	0,03
	20	starzone	0,22	0,006	< 0,002	0,017	0,34
Wysoka zawartość wapnia	30	niestarzone	0,03	0	< 0,002	0,013	0,03
	30	starzone	0,21	0,006	< 0,002	0,014	0,32
Wapno dolomitowe	20	niestarzone	0,03	0	0,006	0,013	0,03
	20	starzone	0,22	0,006	0,005	0,014	0,34

Tabela 19. Stężenie grup funkcjonalnych w asfalcie Boscan przed starzeniem i po starzeniu (TFAAT) w obecności różnych ilości wapna hydratyzowanego lub dolomitowego wapna hydratyzowanego (na podstawie [22]).

Mimo to, reakcje zasada-kwas są prawdopodobnie niewystarczające dla wyjaśnienia całego zachodzącego procesu interakcji chemicznych. J.C. Petersen i in. z WRI wystąpił z sugestią, że wapno hydratyzowane działa jak czynnik powstrzymujący utlenianie katalizatorów, naturalnie występujących w asfalcie [22, 72]. Zostało to częściowo potwierdzone przez L. Johanssona (KTO) i innych, którzy wykazali, że wpływ katalityczny związków wanadu na starzenie się asfaltu zmniejsza się po dodaniu wapna hydratyzowanego. Aby wyjaśnić swoje obserwacje, nie wskazali wyraźnie na żadne konkretne interakcje, między wanadem a wapnem hydratyzowanym [80]. We wszystkich tych przypadkach należy pamiętać, że intensywność interakcji wapno hydratyzowane-asfalt zależy od chemizmu asfaltu, a zatem od źródła pochodzenia ropy naftowej [22, 72, 74, 81].

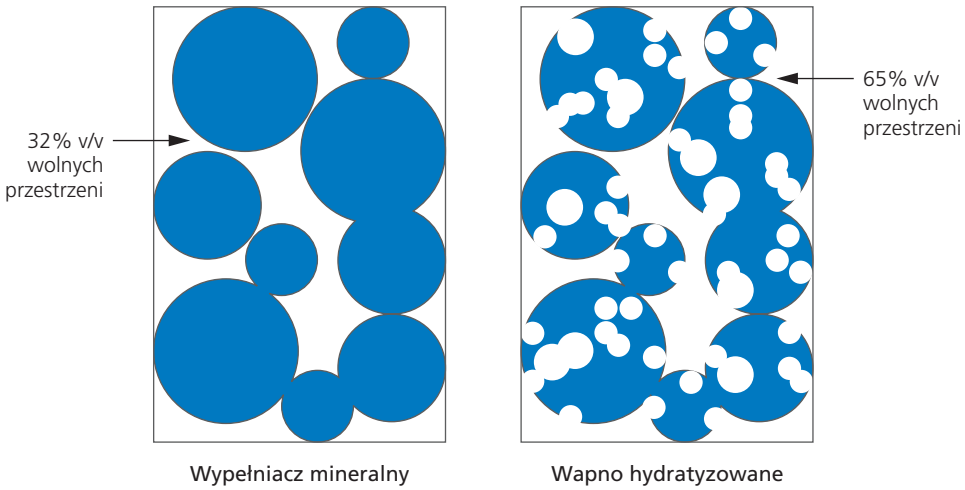
Podsumowując, chemiczna interakcja wapno hydratyzowane-asfalt działa dwojako:

- Po pierwsze, cząsteczki polarne zobojętnione przez wapno hydratyzowane pozostają adsorbowane przez cząstki wapna hydratyzowanego [12, 22, 72]. Zapobiega to dalszemu reagowaniu na skutek chemicznego starzenia się asfaltu. Ponieważ są szczególnie podatne na starzenie się, usunięcie ich generuje ogólną kinetykę starzenia.
- Po drugie, cząsteczki polarne zobojętnione przez cząstki wapna hydratyzowanego, są także powstrzymywane przed dyfundowaniem, na powierzchni granicy rozdziału asfalt-kruszywo. W wyniku tego, tylko pozostałe surfaktanty asfaltu, nie mające odczynu kwaśnego, mogą się przemieszczać na powierzchnię granicy asfalt-kruszywo [137, 142]. Inne środki powierzchniowo czynne, zazwyczaj na bazie aminy [144], nie ulegają tak łatwemu przemieszczaniu przez wodę, jak surfaktanty anionowe [137, 138]. Zaobserwowano, że dodanie wapna hydratyzowanego bezpośrednio do asfaltu, poprawia odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na uszkodzenia spowodowane obecnością wody [20, 53, 65].

Można wywnioskować, że interakcje chemiczne między wapnem hydratyzowanym a fragmentami cząsteczek asfaltu posiadającymi odczyn kwaśny, przyczyniają się zarówno do poprawy odporności na starzenie, jak i zwiększenia adhezji mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym.

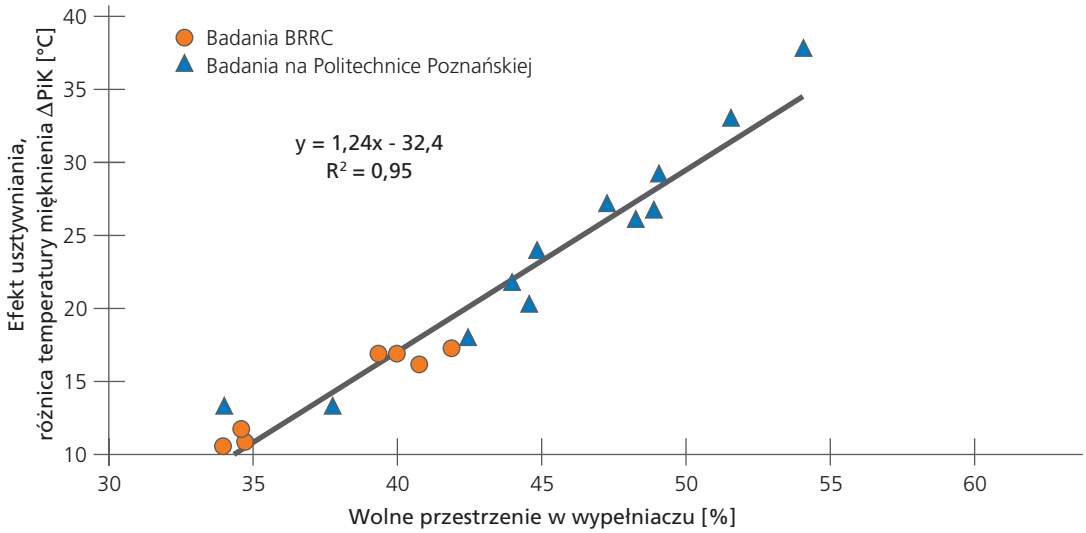
3.2.2 Fizyczne oddziaływanie na asfalt

Wapno hydratyzowane w stanie suchym, charakteryzuje się większą porowatością (wolne przestrzenie wg Rigdena) niż wypełniacze mineralne. Sięga ona od 60 do 70% v/v, podczas gdy porowatość wypełniaczy mineralnych wynosi około 30-34% v/v (Rys. 4). Różnica ta wynika z dużej porowatości cząstek wapna hydratyzowanego (Rys. 25). W wypełniaczach mineralnych porowatość bierze się głównie z pustych przestrzeni między cząstkami. Porowatość wewnątrz cząstek w wapnie hydratyzowanym sumuje się z porowatością między cząstkami, co ostatecznie czyni ją o wiele większą.



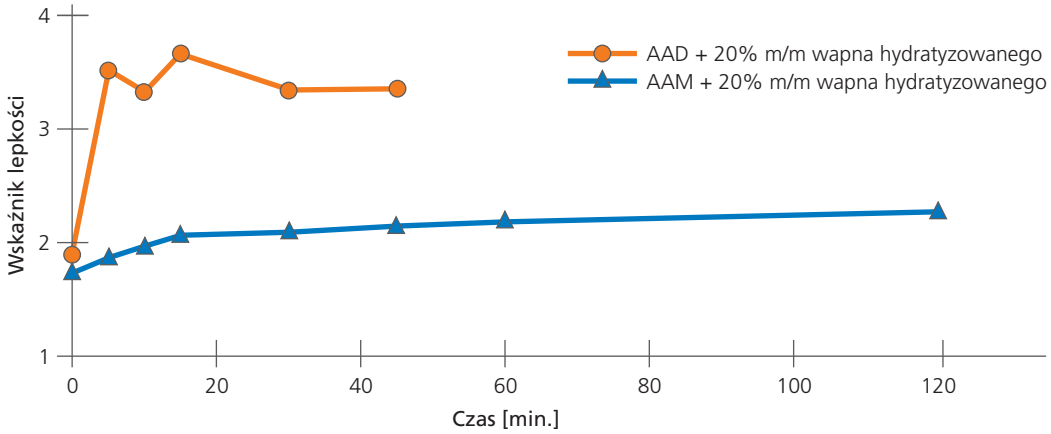
Rys. 25. Porowatość zagęszczonego na sucho wapna hydratyzowanego (po prawej) jest większa niż porowatość wypełniacza mineralnego (po lewej), ponieważ znacząca porowatość wewnątrz cząstek wapna (która jest zaniedbywalnie mała w wypełniaczu mineralnym), sumuje się z porowatością między cząstkami.

Wolne przestrzenie wg Rigdena wykazują bardzo dobrą korelację ze zdolnością usztywniania, zgodnie z wynikami prób różnicy temperatury mięknienia ΔPiK. Rys. 26 obrazuje dane z badań prowadzonych przez S. Vansteenkistego i A. Verstraetena z Belgian Road Research Center [30], uzupełnione o wyniki badań W. Grabowskiego i in. z Politechniki Poznańskiej, opisanych wcześniej w Rozdziale 1 ([31] – patrz Rys. 4 i Rys. 5).



Rys. 26. Korelacja między efektem usztywniania dla kilku wypełniaczy o różnej zawartości wolnych przestrzeni wg Rigdena. Dane zaczerpnięto z dwóch badań: z Politechniki Poznańskiej [30] (opisanych wyżej na Rys. 4 i Rys. 5) oraz innych, przeprowadzonych przez Belgian Road Research Center [31].

Efekt usztywniania wapnem hydratyzowanym w wysokiej temperaturze można wyjaśnić, przynajmniej częściowo, większą porowatością mieszczącą się w wysokich wartościach wolnych przestrzeni Rigdena. Narastanie tego efektu nie rozpoczyna się jednak natychmiastowo. Zauważono, że na rozwinięcie się w jednym z asfaltów (AAM) silnego efektu usztywniającego, po zmodyfikowaniu go wapnem hydratyzowanym, potrzeba kilku godzin w temperaturze 138°C. Dla innego asfaltu (AAD), efekt ten następował w tej samej temperaturze, niemal natychmiast (Rys. 27 – [81]). Kinetyka tego procesu mogłaby wyjaśnić, dlaczego podczas przeprowadzania prób mieszanek mineralno-asfaltowych, nie zawsze jest obserwowany efekt usztywniania wapna hydratyzowanego (patrz Rozdział 2).



Rys. 27. Kinetyka przyrastania lepkości w temperaturze 138°C dla dwóch asfaltów modyfikowanych domieszką wapna hydratyzowanego w ilości 20% m/m. Dla asfaltu AAD lepkość szybko się stabilizuje, a dla asfaltu AAM wzrasta aż do 120 min. Czysty asfalt (bez dodatków) nie wykazuje znaczącej zmiany lepkości w czasie średnim (na podstawie [81]).

Warto wziąć pod uwagę udział także innych czynników. Kilka opracowań nawiązuje do adsorpcji niektórych składników asfaltów, przez cząstki wapna hydratyzowanego [12, 81]. Konsekwencją tego byłby wzrost efektywnego udziału objętości pewnych cząstek, wpływający na mechaniczne właściwości mastyksu. Jednak znaczenie tych efektów było silnie uzależnione od rozmiarów cząstek, a wyliczenie oczekiwanego efektu jest trudne, bez dokładnej znajomości grubości adsorbowanej warstwy.

Można więc wyciągnąć wniosek, że przyczyna fizycznego efektu powodowanego przez wapno hydratyzowane, zasadniczo leży w jego porowatości. Generuje ona silniejsze usztywnienie niż normalne wypełniacze mineralne, co zauważył Rigden w swoich badaniach wolnych przestrzeni. Jednak ciągle pozostaje do wyznaczenia ilościowy udział efektu usztywniania, pochodzący z potencjalnie adsorbowanej warstwy składników asfaltu, przez cząstki wapna hydratyzowanego.

Ostatecznie, jak opisano to w punkcie 2.3.1, silny wpływ na usztywnianie mieszanki pod wpływem domieszki wapna hydratyzowanego w wysokich temperaturach, zanika poniżej temperatury pokojowej (patrz Rys. 13). Jak dotychczas, nikt nie zinterpretował tego zjawiska. Jego przyczyną może być kontrast mechaniczny między pęczniejącymi w asfalcie cząstkami wapna hydratyzowanego i strukturą asfaltu. W wysokich temperaturach wewnętrzne pory w cząstkach wapna hydratyzowanego wypełniają się asfaltem. Są wówczas twardymi kulkami w strukturze asfaltu, zwiększając w nim swój udział objętościowy. To istotne zjawisko odpowiedzialne jest za efekt usztywniania i wynika z obecności cząstek wapna hydratyzowanego wypełnionych asfaltem (BFHLP - Bitumen-Filled Hydrated Lime Particles). Poniżej temperatury pokojowej, te cząstki BFHLP stają się coraz bardziej podatne na deformację, a kontrast mechaniczny między strukturą asfaltu i wtrąceniami zmniejsza się. Całość zmierza więc do zachowywania się jak funkcja rzeczywistego udziału objętościowego substancji w stałym stanie skupienia, a nie cząstek BFHLP.

4. Wapno hydratyzowane w mieszankach mineralno-asfaltowych w praktyce

4.1 Jak dodawać wapno hydratyzowane do mieszanki mineralno-asfaltowej

Istnieje kilka sposobów dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanki mineralno-asfaltowej w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Jego zawartość wynosi zazwyczaj pomiędzy 1 i 2,5% masy suchego kruszywa, najczęściej ok. 1,0-1,5% (Tabela 20). W większości metod projektowania recept, wapno hydratyzowane traktowane jest jak wypełniacz mineralny. W wyniku tego, zawartość wypełniacza zostaje zmniejszona o ilość dodawanego wapna. Całkowita zawartość wypełniacza pozostaje stała.

Kraj / Stan	Zawartość wapna hydraty-zowanego [%]	Metody dodawania wapna hydratyzowanego					
		Czyste wapno hydraty-zowane	Wypełniacz mieszany	Suche do suchego kruszywa	Suche do mokrego kruszywa	Mleko wapienne do kruszywa	Sezonowanie
Europa							
Austria	1,5 - 3,5	X					
Francja	1 - 1,5	X	X				
Holandia	2		X				
Szwajcaria	1,5	X					
Wielka Brytania	1 - 2	X					
USA							
Arizona	1				X		
Kalifornia	0 7 - 1,2					X	wymagane
Kolorado	1				X	X	wg uznania
Floryda		X				X	
Georgia	1	X		X			
Mississipi	1				X		
Montana	1,4	X					
Nevada	1 - 2,5				X		wymagane
Nowy Meksyk					X		
Oregon	1				X		wg uznania
Płd. Karolina	1				X		
Płd. Dakota					X		
Teksas	1 - 1,5	X			X	X	
Utah	1 - 1,5					X	wg uznania
Wyoming	1 - 1,5				X		

Tabela 20. Obecnie stosowane metody dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych. Dane dla USA zaczerpnięto z bibliografii [145]. Szczegółowe dane dla Europy podano wcześniej w Tabeli 1. Tutaj skupiono się na tych krajach europejskich, w których stosowanie wapna hydratyzowanego wynosi blisko 1% lub więcej (dane szacunkowe w kategoriach wielkości procentowych mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych wapnem hydratyzowanym porównano z ogólną produkcją mieszanek na gorąco).

Krajowe Stowarzyszenie Wapna opublikowało przegląd obecnie stosowanych w USA metod dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych [145]. Należy do nich dołączyć metody dodawania wypełniaczy mineralnych stosowane w Europie (Tabela 20). Istnieje wiele badań poświęconych porównaniu kilku sposobów dozowania wapna do mieszanek mineralno-asfaltowych, ale wnioski z nich są rozbieżne [20, 57, 60, 146, 147, 148, 149]. Interesujące jest to, że wszystkie te metody uznane zostały za równie racjonalne i uzasadnione, dla uzyskania korzyści z dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych [145, 150].

Głównymi czynnikami wpływającymi na wybór określonej metody, są osobiste preferencje kierownika wytwórni (WMB), oraz miejscowe warunki i wymagania.

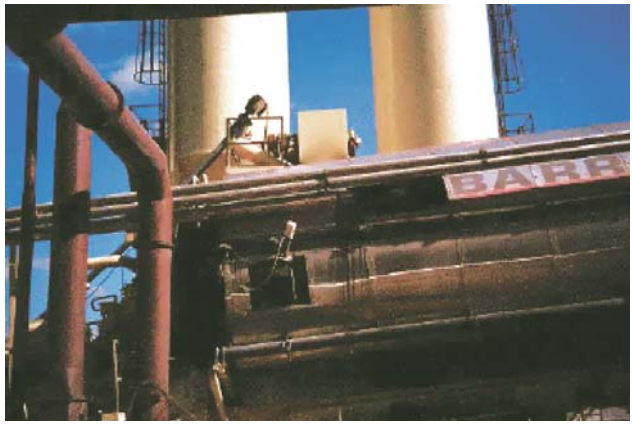
4.1.1 Czyste wapno hydratyzowane sypane do urządzenia do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej

Wapno hydratyzowane można podawać do urządzenia produkującego mieszanki mineralno-asfaltowe, ze specjalnego silosa z bezpośrednim dostępem do otaczarki bębnowej (Rys. 28).

W przypadku urządzeń pracujących cyklicznie, na zasadzie dozowania do mieszalnika, najbardziej powszechne jest ważenie wapna hydratyzowanego na tej samej wadze, co wypełniacz mineralny (zwykle mączka wapienna). Instalacja urządzeń polega na połączeniu „transportowym" silosa wapna hydratyzowanego z istniejącym systemem, przy użyciu podajnika śrubowego.

W otaczarkach typu ciągłego, najczęściej stosuje się zasobnik wagowy, z którego wapno hydratyzowane podawane jest przez obrotowy podajnik łopatkowy. Następnie wprowadzane jest do otaczarki bębnowej przez podajnik śrubowy. Wlot wapna znajduje się najczęściej 1 metr przed wlotem lepiszcza [145]. Metoda ta jest stosowana w Europie (Austria, Francja, Niemcy, UK) oraz w USA (stany: Floryda, Georgia, Montana i Teksas) (Tabela 20).

Pierwsze wdrożenia tej technologii w zakładach z ciągłą produkcją mieszanki mineralno-asfaltowej, prowadziły do dość słabego mieszania się i łączenia wapna hydratyzowanego z mieszanką mineralno-asfaltową, na skutek strat i powstawania dużej ilości pyłu [2]. Problem ten można rozwiązać modyfikując system podajnika wapna hydratyzowanego. Stosuje się wówczas deflektory w kształcie w kształcie tzw. torusa (w oryginale: kształt jaki ma donut – pączek z dziurką) [2].



Rys. 28. Wytwórnia bębnowa mieszanki mineralno-asflatowej w stanie Georgia (USA), z dwoma silosami: jeden na wypełniacz mineralny i drugi na wapno hydratyzowane (na podstawie [145]).

Jeśli chodzi o pojemność silosa, należy pamiętać, że wapno hydratyzowane charakteryzuje się mniejszą gęstością objętościową, niż wypełniacz mineralny. Dlatego pojemność silosa musi wynosić co najmniej 70 m^3, aby można było rozładować cały transport wapna, dostarczonego przez samochód ciężarowy. W silosie musi być zapewniony również system napowietrzania z odwilżaczem. Wlot powietrza powinien znajdować się na wysokości 1 m ponad stożkiem silosa. Silos powinien być także wyposażony, w górnej części, w niewielką jednostkę filtrów workowych [145].

4.1.2 Wapno hydratyzowane jako wypełniacz mieszany

Wapno hydratyzowane można dodawać do urządzenia produkującego mieszanki mineralno-asfaltowe, wykorzystując ten sam silos, który jest przeznaczony na wypełniacz mineralny. W tym przypadku wapno hydratyzowane należy mieszać z wypełniaczem mineralnym przed wprowadzeniem go do urządzenia. Większość dostawców dostarcza wypełniacz już wymieszany z wapnem, który jest standardowym produktem w Europie. W specyfikacjach kruszyw do mieszanek mineralno-asfaltowych, wymienia się kilka jego klas (EN 13043 – [26]). Tabela 21 przedstawia zestawienie klas wypełniaczy mieszanych.

Klasa	Zawartość wodorotlenku wapnia [% wagowo]
Ka_{25}	≥25
Ka_{20}	≥20
Ka_{10}	≥10
$Ka_{deklarowane}$	<10
Ka_{NR}	bez wymagań

Tabela 21. Klasy wypełniaczy mieszanych wg normy EN 13043 [26].

Większość krajów europejskich posiada doświadczenia z wypełniaczem mieszanym. Ponieważ we wszystkich krajach zawartość docelowa wapna hydratyzowanego wynosi 1 do 1,5%, jego ilość w wypełniaczu mieszanym należy regulować. Dlatego np. Holendrzy, specyfikują wapno hydratyzowane jako Ka_{25}, z 25% zawartością wapna hydratyzowanego, dla wszystkich asfaltów porowatych stosowanych w tym kraju [16]. Niemcy także mają wiele doświadczeń z wapnem Ka_{25}, ale na tamtejszym rynku można znaleźć więcej klas wypełniaczy [151]. W obu tych krajach, ilość wypełniacza dodawanego do mieszanek mineralno-asfaltowych jest duża (5 do 10%), z uwagi na stosowanie piasku płukanego. Inaczej jest we Francji. Stosuje się tam wypełniacze mieszane z większą ilością wapna hydratyzowanego. We Francji istnieje tendencja, aby dostarczać wypełniacz mieszany z 75% zawartością wapna hydratyzowanego, przy zastosowaniu niewielkich ilości wypełniacza (zazwyczaj 2%), z uwagi na stosowanie piasku niepłukanego.

4.1.3 Inne sposoby dodawania wapna hydratyzowanego

Istnieją także inne sposoby dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych. Metody te nie są obecnie stosowane w Europie, ale nieźle funkcjonują w USA (Tabela 20). W większości przypadków do mieszania wapna hydratyzowanego z kruszywem wykorzystuje się mieszarki łopatkowe (Rys. 29). Wapno hydratyzowane może być też sypane bezpośrednio do kruszywa z przenośnika taśmowego, chociaż nie jest to sposób preferowany z uwagi na straty materiałowe spowodowane pyleniem [2].

Rys. 29. Mieszarka łopatkowa stosowana do mieszania wapna hydratyzowanego z mokrym kruszywem, w Południowej Karolinie (USA) (na podstawie [145]).

Najbardziej powszechną metodą jest dodawanie do mokrego kruszywa suchego wapna hydratyzowanego (stąd potrzeba specjalnego silosa), przy wykorzystaniu mieszarki łopatkowej (Tabela 20). Niektóre wytwórnie (WMB) w stanie Georgia, w USA, nadal preferują dodawanie wapna hydratyzowanego do suchego kruszywa (Tabela 20). Natomiast w Kalifornii czy Utah, preferuje się dodawanie wapna hydratyzowanego w postaci mleka wapiennego. Stwarza to oczywiście konieczność dysponowania odpowiednią instalacją na tą zawiesinę. Dodawanie mleka wapiennego stosowane jest także przez niektóre wytwórnie w stanach Kolorado, Floryda i w Teksasie (Tabela 20).

W niektórych stanach USA specyfikuje się też okres sezonowania, który zazwyczaj wynosi od 24 do 48 godzin. Kruszywo może być wówczas modyfikowane wapnem hydratyzowanym bezpośrednio w kamieniołomie i utrzymywane na zwałowisku celem sezonowania. Po jego zakończeniu, poddawane jest dalszej obróbce w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych [145].

Proces sezonowania ma na celu zapewnienie lepszej obróbki kruszyw zawierających materiał ilasty. Poza tym, uproszczona jest także kontrola jakości, ponieważ zawartość wapna hydratyzowanego można mierzyć bezpośrednio w materiale na hałdzie.

Okresu sezonowania nie powinno się zbytnio wydłużać, ponieważ istnieje ryzyko wystąpienia procesu wtórnego nasycania wapna hydratyzowanego dwutlenkiem węgla. Na przykład w stanie Nevada maksymalny, dopuszczany okres sezonowania, wynosi 45 dni [145]. Proces ponownego nasycania dwutlenkiem węgla, nawet po 6 miesiącach sezonowania, ma miejsce tylko w górnej części zwałowiska, do głębokości 8 cm [13].

4.2 Obserwowany wzrost trwałości nawierzchni w USA

Doświadczenia zebrane w USA dotyczące trwałości nawierzchni są dobrze udokumentowane. Badania ankietowe przeprowadzone przez Krajowe Stowarzyszenie Wapna (USA) w 2003 r. pozwoliły na zebranie dość dokładnych liczb, dotyczących zmian trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych, spowodowanych zastosowaniem wapna hydratyzowanego [10]. Badania te przeprowadzono poprzez rozesłanie ankiet do wszystkich agencji, które mają doświadczenie ze stosowaniem wapna hydratyzowanego i zebranie odpowiedzi. Wyniki badań przedstawia Tabela 22.

Agencja	Modyfikowane wapnem			Bez dodatku wapna		
	10%	Średnio	90%	10%	Średnio	90%
Drogi międzystanowe						
Arizona	13	15	17	10	12	14
Kalifornia	8	10	12	6	8	10
Kolorado	8	10	12	6	8	10
Georgia	7	10	15		N/A	
Mississipi	7	10	15		N/A	
Nevada (1)	7	8	9	3	4	7
Oregon	10	15	20	8	12	15
Płd. Karolina	10	12	15		N/A	
Teksas	8	12	15	7	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
Drogi stanowe i federalne USA						
Arizona	18	20	22	15	17	20
Kalifornia	8	10	12	6	8	10
Kolorado (1)	8	10	12		8	
FHWA	15	20	25		N/A	
Georgia	8	10	14		N/A	
Mississipi	12	15	17		N/A	
Nevada	10	12	14	6	8	10
Oregon	15	17	20	8	12	15
Płd. Karolina	8	10	12		N/A	
Teksas	10	12	15	8	10	12
Utah	15	20	25	7	10	15
Drogi o małym natężeniu ruchu						
Arizona	20	25	30	15	20	25
Kalifornia		N/A			N/A	
Kolorado (1)	10	12	15	8	10	12
FHWA	15	20	25		N/A	
Georgia	8	10	15	8	10	15
Mississipi	12	15	17		N/A	
Nevada	18	20	22	12	15	18
Oregon	15	20	25	7	10	15
Płd. Karolina	10	15	20		N/A	
Teksas	8	12	15	7	10	15
Utah	7	10	15	3	5	7

Tabela 22. Przewidywana trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych, z wapnem hydratyzowanym i bez, w USA. (1) – konserwacja nawierzchni; N/A = nie dotyczy (na podstawie [10]).

Na podstawie danych widać, że przewidywana trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z wapnem hydratyzowanym, dla wszystkich dróg wydłuża się od 2 do 10 lat. Przyjmując, że przewidywana trwałość mieszanek bez modyfikacji wynosi od 5 do 20 lat, względny wzrost tej trwałości wyniósł od 20 do 50%. Warto nadmienić, że dane tylko z jednego stanu USA (Georgia) – nie potwierdzają poprawy trwałości mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym (dotyczy to tylko dróg o niewielkim natężeniu ruchu).

4.3 Obserwowany wzrost trwałości nawierzchni w Europie

Sytuacja w Europie nie jest udokumentowana w takim stopniu jak w USA. Doświadczenia europejskie wskazują, że korzystny efekt wynikający ze stosowania wapna hydratyzowanego na zwiększoną trwałość nawierzchni wynosi zazwyczaj o 20-25% więcej w kategoriach trwałości przewidywanej.

Francuska firma SANEF, zarządzająca siecią autostrad, poinformowała, że wapno hydratyzowane zwiększa trwałość warstwy ścieralnej nawierzchni o 20-25% [15]. Jedno z pierwszych zastosowań asfaltu porowatego we Francji miało miejsce w 1984 r. na drodze A1 z Paryża do Lille. Autostrada ta stanowi fragment sieci SANEF i należy do najbardziej obciążonych ruchem drogowym we Francji. Przejeżdża nią 35 000 pojazdów dziennie, w tym 27% pojazdów ciężkich. Na 10 km odcinka tej autostrady, między Ressons a Compiègnes (kierunek Lille-Paryż), położono asfalt porowaty modyfikowany dodatkiem wapna hydratyzowanego i granulatem gumowym [152, 153]. Nawierzchnia ta eksploatowana była przez 16 lat. W nowszym zastosowaniu asfaltu porowatego, modyfikowanego polimerami i wapnem hydratyzowanym na autostradzie A4 w Reims, czas eksploatacji wynosił 17 lat. Doświadczenia z asfaltem porowatym bez wapna, potwierdzają trwałość rzędu 12 lat. Dowodzi to wyraźnie wyższości mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem wapna hydratyzowanego.

Doświadczenia duńskie także potwierdzają zwiększoną trwałość nawierzchni rzędu 20% w przypadku stosowania mieszanek mineralno-asfaltowych z wapnem hydratyzowanym [23].

Holendrzy wprowadzili wymaganie stosowania wapna hydratyzowanego do mieszanek asfaltu porowatego, używanego w ich kraju [16, 154]. Produkowane tam asfalty porowate zawierają wyłącznie asfalt drogowy 70/100. Nawierzchnie wykonane z użyciem tego typu asfaltu, pokrywają 70% sieci autostrad [18]. Przy obecnie stosowanym składzie mieszanki żywotność nawierzchni jest szacowana na 11 lat [18]. Mimo, że nie ma danych porównawczych odnoszących się do mieszanek nie zawierających wapna hydratyzowanego i nie można ocenić stopnia wzrostu trwałości nawierzchni, to i tak wiadomo, że brak wapna hydratyzowanego w mieszance asfaltowej jest jedną z głównych przyczyn przedwczesnego niszczenia nawierzchni dróg [18].

Ponadto, interesującym jest również to, że francuska Federation Internationale de l'Automobile (FIA) nakłada wymóg stosowania wapna hydratyzowanego do warstwy ścieralnej nawierzchni torów wyścigowych (Tabela 23).

Wszystko to dowodzi, że wzrost trwałości nawierzchni dróg europejskich jest zgodny z danymi publikowanymi w USA. W oparciu o bogate doświadczenia światowe zebrane w naturalnych warunkach eksploatacji dróg, można stwierdzić, że wapno hydratyzowane zwiększa trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych przynajmniej o 20%.

Kraj	Tor wyścigowy	Rok budowy	Lepiszcze
Brazylia	Rio de Janeiro	1999	PMB
Portugalia	Estoril	2001	PMB
Włochy	Fiorano	2002	PMB
Bahrajn	Manama	2003/2004	PMB
Chiny	Szanghaj	2004	PMB
Hiszpania	Barcelona	2004	PMB
Turcja	Istambuł	2005	B50/70+TE

Tabela 23. Tory wyścigowe z nawierzchnią z mieszanek mineralno-asfaltowych, modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. W ostatniej kolumnie podano rodzaj użytego lepiszcza: PMB – asfalt modyfikowany polimerami; TE – Trinidad Epure (twardy asfalt naturalny).

4.4 Dozowanie wapna hydratyzowanego

Wapno hydratyzowane można dozować do mieszanki mineralno-asfaltowej. Bibliografia opisuje dwie metody dozowania wapna hydratyzowanego. Pierwszy opis pochodzi z Niemiec, drugi z USA.

Metoda niemiecka [155, 156] jest bardzo prosta i opiera się na charakterystykach wapna, opisanych szczegółowo w normie EN 459-2 [24]. Wyznacza trzy różne sposoby charakteryzowania wapna:

- Czystość wapna hydratyzowanego.
- Zawartość wapna hydratyzowanego w wypełniaczu mieszanym.
- Zawartość wapna hydratyzowanego w wypełniaczu odzyskanym z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Określenie składu wapna hydratyzowanego, polega na miareczkowaniu kwasu solnego do zawiesiny produktu, który ma być poddany testom. Kwas, w przypadku wypełniaczy mieszanych lub odzyskanych, musi być słabszy (0,5 M), aby dostosować go do niższej alkaliczności. Wypełniacz odzyskiwany jest z mieszanki mineralno-asfaltowej na drodze ekstrakcji rozpuszczalnikowej asfaltu, jak opisuje norma EN 12697-1 (zazwyczaj przy użyciu trójchloroetylenu lub czterochloroetylenu jako rozpuszczalnika – [157]). Zawiesina, która ma być poddawana miareczkowaniu, uzyskiwana jest przez zmieszanie 1 g odzyskanego wypełniacza z 150 ml wody, 10 ml izobutanolu i 5 ml roztworu surfaktantu (1 g siarczanu dodecylu i 1 g glikolu polietylenowego – eteru dodecylowego w 100 ml wody).

Roztwór surfaktantu potrzebny jest tylko wtedy, gdy testom poddawany ma być wypełniacz odzyskany po ekstrakcji, aby wymyć pozostałości asfaltu lub rozpuszczalnika z ekstrakcji. Barwnikiem wskaźnikowym jest fenoloftaleina (0,5 g w 50 ml etanolu, uzupełnione wodą do 100 ml). Szybkość miareczkowania na początku wynosi 12 ml/min, ale w pobliżu punktu przemiany, spada do 4 ml/min. Metoda działa dla różnych typów wypełniaczy, włącznie z wypełniaczem wapiennym [155].

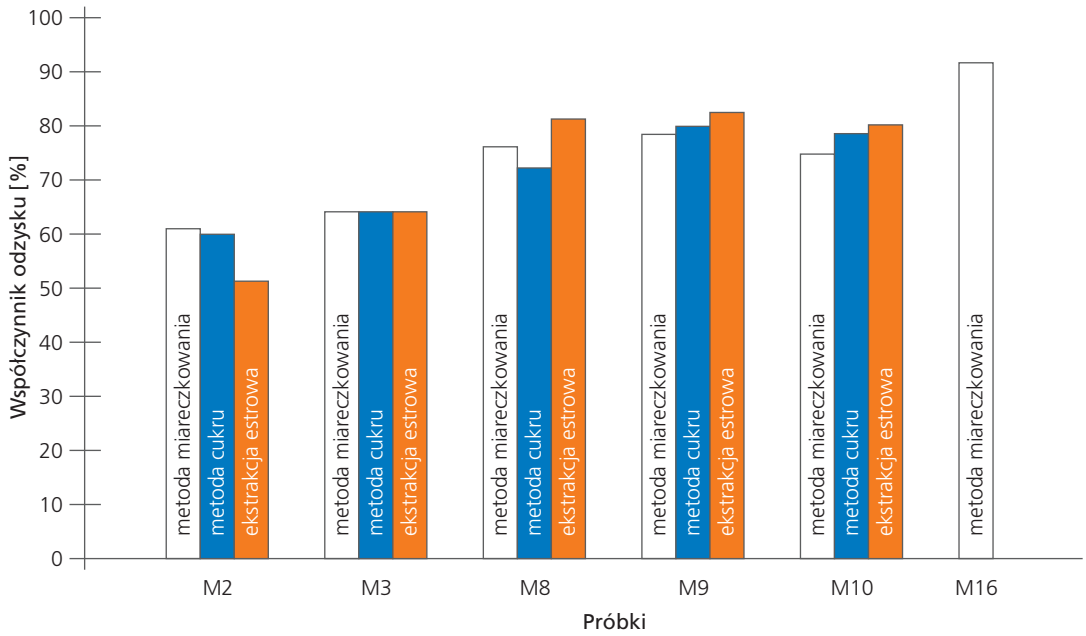
Odcinek	Zawartość nominalna wapna hydratyzowanego [% m/m]	Zawartość wapna hydratyzowanego zmierzona w odzyskanym wypełniaczu [% m/m]
1	0	0,9
2	0	0,7
3	25	29,2
4	25	26,0

Tabela 24. Wyniki walidacji niemieckiej metody kontroli dozowania (na podstawie [155]).

Niezależne testy wykonało 12 laboratoriów. Powtarzalność (w kategoriach % m/m wapna hydratyzowanego w wypełniaczu) wyniosła 0,52% m/m, a odtwarzalność 0,91% m/m, przy średniej 27,3% m/m.

Metoda ta została potwierdzona na próbkach pobranych z rdzeni 1,5 roku po zakończeniu budowy (Tabela 24). Mieszanki SMA 0/8 S sporządzono z normalnym wypełniaczem, albo z wypełniaczem mieszanym, zawierającym 25% m/m wapna hydratyzowanego. Wyniki przedstawia Tabela 24 [155].

Badania studialne korzystające z obu metod pokazały, iż metoda miareczkowania była równoważna metodzie z użyciem cukru, do której występuje odniesienie w normie EN 459-2. Porównanie oparte na mieszankach bazaltowych, przeprowadzone dla dwóch różnych kruszyw wykazało, że część wapna hydratyzowanego nie została całkowicie odzyskana, z uwagi na zachodzące reakcje wapno hydratyzowane – kruszywo (Rys. 30). W efekcie, reakcje te były ważniejsze dla kruszywa bazaltowego (odzysk ok. 60%), niż dla materiału morenowego (ok. 80%) i wypełniacza wapiennego (ok. 90%).

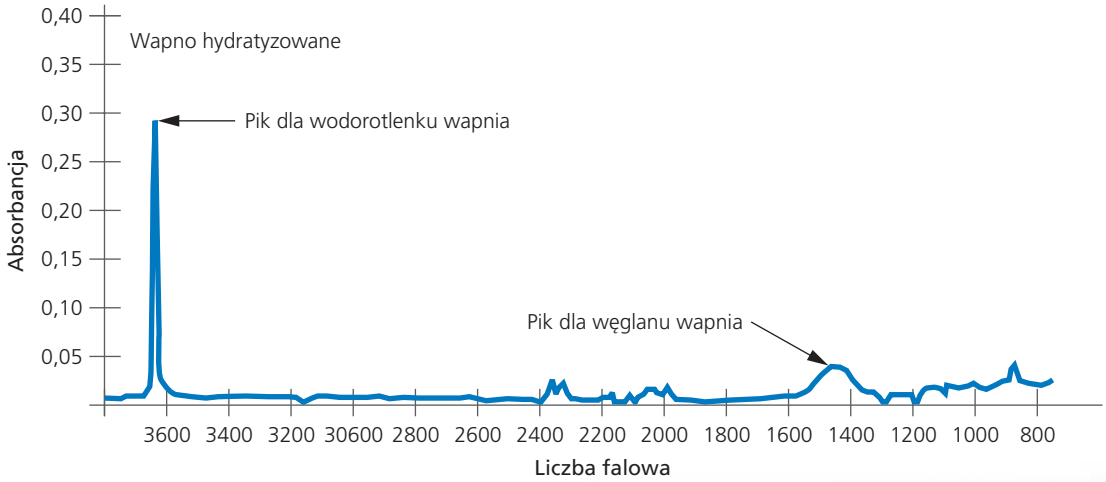


Rys. 30. Współczynnik odzysku (mierzony jako wynik dzielenia ilości wapna hydratyzowanego przez nominalną zawartość wapna hydratyzowanego) obliczony przy stosowaniu trzech różnych metodchemicznych: „metoda miareczkowania" odnosi się do bezpośredniego miareczkowania wg metody niemieckiej [156] opisanej w powyższym tekście; „metoda cukru" odnosi się do miareczkowania wyciągu sacharozy z wypełniacza, który był poddawany testom; „ekstrakcja estrowa" odnosi się do ekstraktu acetylooctanu etylu (na podstawie [155]). Materiałami były mieszanki mineralno-asfaltowe z różnymi wypełniaczami zmieszanymi z wapnem hydratyzowanym: M2 i M3 – z wypełniaczem bazaltowym (odpowiednio 5 i 20% wapna hydratyzowanego); M8 i M9 – z wypełniaczem z materiału morenowego (odpowiednio 5 i 20% wapna hydratyzowanego); M10 – z 67% materiału morenowego oraz 33% wypełniacza wapiennego (25% wapna hydratyzowanego); M16 – z wypełniaczem wapiennym (20% wapna hydratyzowanego).

Metoda amerykańska została opracowana przez Federal High-Way Administration (FHWA – [158, 159]). Polega na pomiarze widma transformaty Fouriera w podczerwieni (FTIR - Fourier Transform Infra-Red) dla wypełniacza i ilościowym określeniu zawartości wapna hydratyzowanego z piku przy 3640 cm^{-1} odpowiadającej wodorotlenkowi wapnia (Rys. 31). Węglan wapnia osiąga pik dla 1390 cm^{-1} i może być wyraźnie oddzielony od wodorotlenku (Rys. 31).

Analiza okazała się bardzo łatwa do wykonania przy użyciu 15-20 g pyłu, uzyskanego na drodze wiercenia udarowego w mieszance asfaltowej, wiertłem z węgliku wolframu o średnicy 9,5 mm [158, 159].

Pomiary wykonane na materiałach pochodzących z 10-letnich nawierzchni drogowych z Nevady nie wykazywały wystąpienia przez cały ten okres wtórnego nasycenia dwutlenkiem węgla ani ługowania [158, 159].



Rys. 31. Widmo FTIR wapna hydratyzowanego (na podstawie [158]).

Podsumowanie i wnioski

Wapno hydratyzowane znane jest od bardzo dawna jako dodatek do mieszanek mineralno-asfaltowych. Cieszyło się dużym zainteresowaniem w latach 70. XX w. w USA. Wynikało to częściowo z ogólnego spadku jakości asfaltów, spowodowanego kryzysem naftowym w 1973 r., kiedy uszkodzenia nawierzchni spowodowane wodą i mrozem stały się bardziej uporczywe niż kiedykolwiek. Wapno hydratyzowane było postrzegane jako najbardziej skuteczny dodatek, dlatego dodawanie go jest obecnie wymagane w wielu stanach USA. Ocenia się, że 10% mieszanek mineralno-asfaltowych, produkowanych obecnie w USA, zawiera wapno hydratyzowane.

Wpływ wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe został dokładnie przebadany na drodze analizy 110 dokumentów pochodzących z 5 kontynentów. Mimo, iż wapno hydratyzowane od dawna jest z powodzeniem stosowane w mieszankach mineralno-asfaltowych, ciągle stanowi przedmiot intensywnych badań naukowych. W ostatnim czasie powstaje duża liczba publikacji na ten temat.

Przegląd bibliografii potwierdza, że wapno hydratyzowane jest bardzo skutecznym środkiem zwiększającym odporność nawierzchni dróg na zniszczenia powodowane obecnością wody i mrozu. Wszystkie istniejące metody badawcze potwierdzają korzystny efekt tego dodatku. Bardziej rygorystyczne metody, takie jak wielokrotne zamrażanie-rozmrażanie lub próby z użyciem urządzenia HWTD, silnie odróżniają wapno hydratyzowane od innych rozwiązań, takich jak stosowanie płynnych środków adhezyjnych.

Biorąc pod uwagę szerokie stosowanie wapna hydratyzowanego w ciągu ostatnich 40 lat w USA, można zauważyć, że postrzegane jest jako coś więcej niż tylko dodatek zapobiegający niszczeniu nawierzchni dróg przez wodę i mróz. Wapno hydratyzowane znane jest jako czynnik spowalniający chemiczne starzenie się asfaltów. Ogólny efekt polega na zmniejszeniu stopnia twardnienia, jakiemu ulega asfalt przy długotrwałym wystawieniu na działanie wysokich temperatur, w warunkach swobodnej wymiany powietrza. Stwierdzono, że wapno hydratyzowane zasadniczo zmniejsza tworzenie się asfaltenów, czyli surfaktantów (tj. fragmentów cząsteczek asfaltu wykazujących specyficzne właściwości zwiększania lepkości materiału).

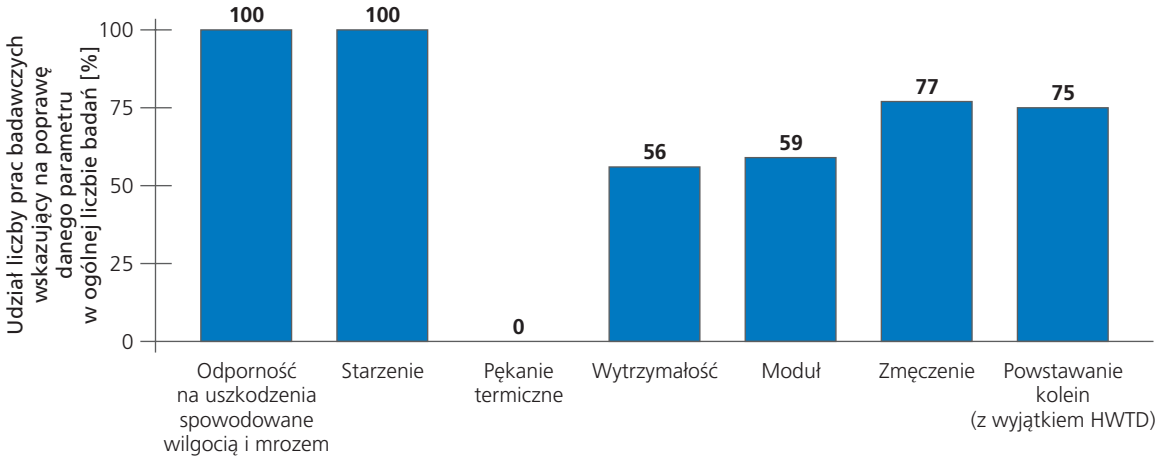
Wapno hydratyzowane usztywnia mastyks bardziej niż normalny wypełniacz mineralny. Jest to dobrze opisane w bibliografii. Jednak efekt ten występuje tylko w temperaturach wyższych od temperatury pokojowej. Efekt usztywniania mastyksu wpływa na właściwości mechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych. Wytrzymałość i moduł sztywności, które generalnie mierzone są w temperaturze zbliżonej do pokojowej, postrzegane są jako ulegające zmianie po dodaniu wapna hydratyzowanego, do ponad połowy różnych kompozycji (recept) mieszanek mineralno-asfaltowych. Jednak odporność na powstawanie kolein, najczęściej mierzona w temperaturach 45-60°C, zwiększa się po dodaniu wapna hydratyzowanego w ok. 75% przebadanych mieszanek. Większość badań studialnych koncentruje się na zawartości wapna hydratyzowanego w ilości 1-1,5% m/m, ale na ogół te zjawiska są bardziej widoczne przy wyższych jego zawartościach.

Na koniec dodajmy, że klika opublikowanych wyników badań studialnych nad odpornością zmęczeniową materiału dowodzi, iż wapno hydratyzowane zwiększa odporność na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych w 77%. Nie natrafiono jednak na badania, które opierałyby się na raportach, nawiązujących do metod badawczych wg obecnych Norm Europejskich. Tak więc opublikowane materiały dowodowe, byłyby bardziej rozstrzygające, gdyby mieszanki mineralno-asfaltowe poddawane były próbom z ponad 1 milionem cykli do momentu zniszczenia próbki i w temperaturach poniżej 20°C.

Równolegle ze spostrzeżeniami, że wapno hydratyzowane nie daje silniejszego efektu usztywniania niż wypełniacz mineralny w niskich temperaturach, nie ma bibliografii na temat zwiększenia odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania termiczne.

Rys. 32 przedstawia podsumowanie skuteczności wapna hydratyzowanego na kłopoty i problemy z nawierzchniami asfaltowymi dróg opisywane w bibliografii.

Wysoka skuteczność wapna hydratyzowanego w zastosowaniu do mieszanek mineralno-asfaltowych, wynika z silnych wzajemnych oddziaływań zachodzących między głównymi składnikami (kruszywem i asfaltem) oraz z połączonego wpływu czterech efektów (dwa odnoszą się do kruszywa, dwa do asfaltu). Wapno hydratyzowane modyfikuje właściwości powierzchni ziaren kruszywa, umożliwiając przebudowę składu chemicznego ich powierzchni (jony wapniowe). Zwiększenie mikrotekstury powierzchni ziaren (wytrącanie) sprzyja adhezji asfaltu. Wapno hydratyzowane może więc być środkiem powodującym neutralizację cząstek ilastych, przylegających do ziaren kruszywa, powstrzymując szkodliwy wpływ tych cząstek na mieszankę mineralno-asfaltową. Reaguje chemicznie z kwasami zawartymi w asfalcie, co z kolei spowalnia kinetykę twardnienia starzeniowego i neutralizuje efekt „złych" aktywatorów adhezji, pierwotnie występujących w asfalcie. Zwiększają w ten sposób odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na obecność wody. Wysoka porowatość wapna hydratyzowanego wyjaśnia jego zdolność usztywniania w temperaturze wyższej od pokojowej. Zależność temperaturowa i kinetyka efektu usztywniania mogłaby wyjaśnić, dlaczego nie zawsze obserwuje się efekt usztywniania mieszanek mineralno-asfaltowych przez wapno hydratyzowane, a także dlaczego wapno hydratyzowane jest bardziej skuteczne w regionach geograficznych o wyższej temperaturze, gdzie powstawanie kolein jest problemem dominującym.



Rys. 32. Poprawa wybranych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przez zastosowanie dodatku w postaci wapna hydratyzowanego. Wielkości wyrażone w procentach należy rozumieć jako udział opublikowanych prac, w których wykazano poprawę. Badania odporności na powstawanie kolein nie uwzględniają wyników badań metodą HWTD (koleinowanie w wodzie), ponieważ są one bardziej odpowiednie dla kategorii uszkodzeń nawierzchni powodowanych obecnością wody.

Metody dodawania wapna hydratyzowanego w wytwórniach (WMB) zostały szczegółowo opisane. Omówiono następujące sposoby dodawania wapna hydratyzowanego: do otaczarki bębnowej jako wypełniacz mieszany, w postaci suchego wapna do mokrego kruszywa, dozowanie wapna w postaci mleka wapiennego, w wariantach z uwzględnianiem sezonowania lub bez. Nie ma przekonywujących dowodów, aby jedna metoda była bardziej skuteczna niż inne. Wszystkie uważa się za dające korzyści ze stosowania wapna hydratyzowanego. W czasie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych, wapno hydratyzowane może być łatwo dozowane do mieszanki.

Biorąc pod uwagę, że wszystkie wyżej opisane właściwości wpływają na trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych, stosowanie wapna hydratyzowanego ma silny wpływ na ich trwałość. Doświadczenia zebrane przez stanową administrację drogową USA z obserwacji odcinków drogowych, pozwalają na szacunkową ocenę, że wapno hydratyzowane stosowane w typowych ilościach wynoszących 1-1,5% do mieszanek mineralno-asfaltowych (w stosunku do suchego kruszywa), wydłuża trwałość mieszanek od 2 do 10 lat, tj. o 20 do 50%.

Doświadczenia europejskie nie są jeszcze tak bogate jak amerykańskie, ale w Europie także szeroko mówi się o korzystnym wpływie wapna hydratyzowanego na trwałość mieszanki mineralno-asfaltowej. Przykładowo, firma francuska SANEF, zarządzająca autostradami w północnej części kraju, wymaga obecnie dodawania wapna hydratyzowanego do warstwy ścieralnej nawierzchni dróg ich sieci. Uznano, że mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane wapnem hydratyzowanym charakteryzują się o 20-25% dłuższą trwałością. Podobne spostrzeżenia Holendrów, doprowadziły do nakładania wymogu dodawania wapna do asfaltu porowatego, tj. mieszanki, która obecnie stanowi nawierzchnię 70% autostrad w tym kraju. Dodawanie wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych, staje się coraz bardziej powszechne w większości krajów europejskich, a zwłaszcza w Austrii, Francji, Holandii, Wielkiej Brytanii i Szwajcarii.

Korzyści płynące ze stosowania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych wydają się być zrozumiałe i oczywiste, przy całej różnorodności materiałów (kruszywa, asfalt, recepta mieszanki), stanowiących nawierzchnię dróg na 5 kontynentach. Jednak doświadczenia europejskie pozostają nieco w tyle za amerykańskimi. Wobec tego, wpływ wapna hydratyzowanego na mieszanki mineralno-asfaltowe, mierzony zgodnie z kilkoma znormalizowanymi testami europejskimi, nie został opisany w bibliografii. Do najbardziej istotnych zaliczyć należy parametr opisujący wytrzymałość na rozciąganie pośrednie ITSR, oraz zmęczenie.

Opis wapna hydratyzowanego w Normach Europejskich dotyczących kruszyw, też nie jest do końca właściwy. Po pierwsze, takie badania jak metoda różnicy temperatury mięknienia ΔPiK, nie mogą być wykonywane na wapnie hydratyzowanym, mimo że są one wymagane dla wypełniaczy mineralnych. Sprawą podstawową dla rozwiązania tej sytuacji, jest traktowanie wapna hydratyzowanego jako wypełniacza w normach dotyczących mieszanek mineralno-asfaltowych. Pojawiające się klasy wypełniaczy mieszanych, w normach dotyczących kruszyw, nie obejmują wszystkich istniejących produktów aktualnie stosowanych.

Niektóre aspekty teoretyczne nie zostały jeszcze wyjaśnione. O ile skutki chemiczne oddziaływania wapna hydratyzowanego na asfalt są opisane należycie, to właściwości fizyczne są zaledwie napomknięte. W związku z tym, interpretacja dotycząca zależności temperaturowej efektu usztywniania asfaltu przez wapno hydratyzowane, nadal wymaga weryfikacji. Efekt oddziaływania na właściwości powierzchniowe ziaren kruszywa, zwłaszcza w obecności wytrąconego osadu, nie został dotąd szczegółowo omówiony w bibliografii i mógłby być celem nowych badań naukowych.

Spis rysunków

Numer	Opis rysunku	Strona
Rys. 1.	Kraj pochodzenia pierwszego autora pozycji bibliograficznej umieszczonej w bazie danych (110 dokumentów).	10
Rys. 2.	Rok publikacji dokumentów znajdujących się w bazie danych (110 dokumentów).	11
Rys. 3.	Wapno hydratyzowane (źródło: Lhoist).	12
Rys. 4.	Wolne przestrzenie wg Rigdena dla kilku wypełniaczy i wypełniaczy mieszanych. L – wapień; D - dolomit; M – melafir; B – bazalt; CAL – wapno hydratyzowane; X15 – wypełniacz X z 15% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego; X30 – wypełniacz X z 30% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego (na podstawie [31]).	13
Rys. 5.	Wartości zmierzone dla kilku wypełniaczy metodą różnicy temperatury mięknienia. L – wapień; D - dolomit; M – melafir; B – bazalt; X15 – wypełniacz X z 15% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego; X30 – wypełniacz X z 30% m/m dodatkiem wapna hydratyzowanego (na podstawie [31]).	14
Rys. 6.	Temperatura mięknienia PiK mieszaniny asfaltu drogowego o penetracji 200 dmm z różnymi zawartościami masowymi wypełniaczy: mączki wapiennej, wapna hydratyzowanego i wypełniacza z szarogłazu (na podstawie [38]).	15
Rys. 7.	Odrywanie kruszywa od podłoża na skutek uszkodzenia nawierzchni spowodowanego obecnością wody (na podstawie [45]).	17
Rys. 8.	Porównanie skuteczności kilku metod badawczych dla przewidywania uszkodzeń spowodowanych przez wodę, zgodnie z szacunkami w oparciu o doświadczenia organów rządowych USA (na podstawie [8]).	18
Rys. 9.	Odporność na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych 0/20 mm sporządzonych z kruszywa pochodzącego z różnych źródeł, o zawartości asfaltu 70/100 w ilości 4,8% m/m oraz z kilkoma dodatkami polepszającymi adhezję. Badania wykonane różnymi metodami: 1 – wg metody Lottmana; 2 – pozostałej stabilności wg Marshalla; 3 – przy użyciu urządzenia HWTD w temperaturze 60°C (na podstawie [49]).	19
Rys. 10.	Próby z wielokrotnym cyklem zamrażania-rozmrażania mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzone dla kruszywa z wapienia (A) lub granitu (B) i asfaltu AAB-1. Przeprowadzono próby lepiszcza, które nie uległo procesowi starzenia i które uległo starzeniu, a także lepiszcza modyfikowanego wapnem hydratyzowanym w ilości 20% w stosunku do masy lepiszcza, przy zawartości lepiszcza 5,5% wagowo w mieszance oraz lepiszcza modyfikowanego ketonem fenylowo-undecylowym w ilości 1% w stosunku do masy lepiszcza (na podstawie [65]).	23
Rys. 11.	Porównanie efektywności kilku dodatków stosowanych w celu ograniczenia uszkodzeń nawierzchni drogowych powodowanych wodą, według oceny dokonanej na podstawie doświadczeń organów rządowych USA (na podstawie [8]).	24
Rys. 12.	Indeks starzenia w temperaturze 60°C (stosunek lepkości po starzeniu do lepkości przed starzeniem) dla asfaltów pochodzących z różnych źródeł, modyfikowanych wapnem hydratyzowanym w różnych proporcjach wagowych (Hi-Ca) i dolomitowym wapnem hydratyzowanym (Dol). Starzenie wywołano w próbie przyśpieszonego starzenia się cienkiej warstwy (TFAAT - Thin Film Accelerated Aging Test), co odpowiada przetrzymywaniu próbki przez 3 dni w temperaturze 113°C w warunkach wymiany powietrza (na podstawie [22]).	28
Rys. 13.	Zależność temperaturowa efektu usztywniania przez wapno hydratyzowane w porównaniu do wypełniacza wapiennego: odwrotność podatności urojonej (1/j") przy prędkości 10 rad/s w funkcji temperatury dla referencyjnego asfaltu z bezpośredniej destylacji 70/100 i tego samego asfaltu z 50% wagowo dodatkiem wypełniacza wapiennego lub mieszanego wypełniacza wapiennego zawierającego 40% wapna hydratyzowanego (na podstawie [97]).	33
Rys. 14.	Krzywa wiodąca (wartość normalna modułu zespolonego w funkcji zredukowanego czasu obciążenia) otrzymana przy temperaturze 21,1°C dla mieszanek 0/18 sporządzonych z kruszywa typu Two-Guns (4,3% wypełniacza) i 4,6% asfaltu PG64-22 (na podstawie [104]).	34
Rys. 15.	Koleiny w nawierzchni wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej (na podstawie [45]).	37
Rys. 16.	Interpretacja wyników prac doświadczalnych prowadzonych z użyciem urządzenia HWTD (na podstawie [13]).	38
Rys. 17.	Wpływ wapna hydratyzowanego na odporność na tworzenie się kolein dla francuskich mieszanek mineralno-asfaltowych BBSG 0/14 mm: głębokość koleiny w funkcji liczby cykli obciążania, mierzona francuskim aparatem do koleinowania (tzw. dużym aparatem) w temperaturze 60°C. Dodano 1,25 lub 2% wapna hydratyzowanego, albo do suchego kruszywa albo po dodaniu asfaltu (na podstawie [73]).	39
Rys. 18.	Spękania zmęczeniowe (inaczej spękania siatkowe) mieszanki mineralno-asfaltowej (na podstawie [45]).	40

Numer	Opis rysunku	Strona
Rys. 19.	Wpływ wapna hydratyzowanego na trwałość zmęczeniową piaskowych mieszanek mineralno-asfaltowych poddanych próbom na skręcanie. Na rysunku podano zależność liczby cykli do momentu zniszczenia próbki dla kilku mieszanek piaskowo-asfaltowych zawierających 10% wapna hydratyzowanego (HL) lub wypełniacza wapiennego (LS) w asfalcie, dla asfaltów pochodzących z dwóch źródeł: AAD-1 i AAM-1 (na podstawie [90]).	40
Rys. 20.	Naprężenia termiczne w funkcji temperatury (ang. TSRST – thermal stress vs temperature) dla betonu asfaltowego 0/22 z asfaltem modyfikowanym polimerami w ilości 4,5% i wapnem hydratyzowanym w ilości 2,5%. Krzywe odpowiadają próbom powtarzanym dla tego samego materiału (na podstawie [128]).	41
Rys. 21.	Wytrzymałość mastyksu (zredukowanego do wartości referencyjnej osiągniętej z asfaltem bazowym) w zależności od zawartości objętościowej wypełniacza, zbadana dla kilku rodzajów mastyksu wykonanych z dwoma rodzajami asfaltu i wapnem hydratyzowanym. Dane te porównano z opublikowanymi danymi dla wypełniaczy mineralnych (pyły z odpylania) lub kulek szklanych (na podstawie [81]). Równanie (1) odpowiada temu samemu równaniu, które podano dla lepkości w p.2.3.1, gdzie $[\eta] = 2/\phi_m = 3,17$ (na podstawie [81]).	42
Rys. 22.	Krzywe koleinowania uzyskane z pomiarów z użyciem urządzenia HWTD dla kilku mieszanek SMA 0/8 sporządzonych z tego samego kruszywa (szarogłaz) ale z różnymi lepiszczami: asfaltem modyfikowanym polimerami (PmB 45 A) lub asfaltem drogowym 30/45 lub 50/70 z 1,4% wapna hydratyzowanego (w postaci wypełniacza mieszanego). Odpowiednio dobrane zawartości lepiszcza i wapna hydratyzowanego mogą dać właściwości równoważne tym, jakie uzyskuje się dla lepiszczy modyfikowanych polimerami (na podstawie [37]).	43
Rys. 23.	Wpływ wapna hydratyzowanego na powierzchnię ziaren kruszywa, wg I. Ishaia i J. Crausa (na podstawie [139]).	46
Rys. 24.	Wysokosprawna chromatografia żelowa w toluenie dla dwóch asfaltów, z Wenezueli i Bliskiego Wschodu, po kontakcie albo z wypełniaczem wapiennym, albo z tym samym wypełniaczem po dodaniu 25% wagowo wapna hydratyzowanego (wypełniacz aktywny) (na podstawie [69]).	47
Rys. 25.	Porowatość zagęszczonego na sucho wapna hydratyzowanego (po prawej) jest większa niż porowatość wypełniacza mineralnego (po lewej), ponieważ znacząca porowatość wewnątrz cząstek wapna (która jest zaniedbywalnie mała w wypełniaczu mineralnym), sumuje się z porowatością między cząstkami.	49
Rys. 26.	Korelacja między efektem usztywniania dla kilku wypełniaczy o różnej zawartości wolnych przestrzeni wg Rigdena. Dane zaczerpnięto z dwóch badań: z Politechniki Poznańskiej [30] (opisanych wyżej na Rys. 4 i Rys. 5) oraz innych, przeprowadzonych przez Belgian Road Research Center [31].	50
Rys. 27.	Kinetyka przyrastania lepkości w temperaturze 138°C dla dwóch asfaltów modyfikowanych domieszką wapna hydratyzowanego w ilości 20% m/m. Dla asfaltu AAD lepkość szybko się stabilizuje, a dla asfaltu AAM wzrasta aż do 120 min. Czysty asfalt (bez dodatków) nie wykazuje znaczącej zmiany lepkości w czasie średnim (na podstawie [81]).	50
Rys. 28.	Wytwórnia bębnowa mieszanki mineralno-asflatowej w stanie Georgia (USA), z dwoma silosami: jeden na wypełniacz mineralny i drugi na wapno hydratyzowane (na podstawie [145]).	53
Rys. 29.	Mieszarka łopatkowa stosowana do mieszania wapna hydratyzowanego z mokrym kruszywem, w Południowej Karolinie (USA) (na podstawie [145]).	54
Rys. 30.	Współczynnik odzysku (mierzony jako wynik dzielenia ilości wapna hydratyzowanego przez nominalną zawartość wapna hydratyzowanego) obliczony przy stosowaniu trzech różnych metod chemicznych: „metoda miareczkowania" odnosi się do bezpośredniego miareczkowania wg metody niemieckiej [156] opisanej w powyższym tekście; „metoda cukru" odnosi się do miareczkowania wyciągu sacharozy z wypełniacza, który był poddawany testom; „ekstrakcja estrowa" odnosi się do ekstraktu acetylooctanu etylu (na podstawie [155]). Materiałami były mieszanki mineralno-asfaltowe z różnymi wypełniaczami zmieszanymi z wapnem hydratyzowanym: M2 i M3 – z wypełniaczem bazaltowym (odpowiednio 5 i 20% wapna hydratyzowanego); M8 i M9 – z wypełniaczem z materiału morenowego (odpowiednio 5 i 20% wapna hydratyzowanego); M10 – z 67% materiału morenowego oraz 33% wypełniacza wapiennego (25% wapna hydratyzowanego); M16 – z wypełniaczem wapiennym (20% wapna hydratyzowanego).	57
Rys. 31.	Widmo FTIR wapna hydratyzowanego (na podstawie [158]).	58
Rys. 32.	Poprawa wybranych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przez zastosowanie dodatku w postaci wapna hydratyzowanego. Wielkości wyrażone w procentach należy rozumieć jako udział opublikowanych prac, w których wykazano poprawę. Badania odporności na powstawanie kolein nie uwzględniają wyników badań metodą HWTD (koleinowanie w wodzie), ponieważ są one bardziej odpowiednie dla kategorii uszkodzeń nawierzchni powodowanych obecnością wody.	60

Wykaz tabel

Numer	Opis tabeli	Strona
Tab. 1.	Aktualne zużycie wapna hydratyzowanego w mieszankach mineralno-asfaltowych w Europie. Wszystkie dane zostały zebrane przez zespół ATF. Należy zwrócić uwagę, że udziały procentowe mieszanek zmodyfikowanych wapnem hydratyzowanym w całej produkcji mieszanek są określone szacunkowo i w dużym przybliżeniu, oraz służą do oceny ilościowej poziomu „świadomości znaczenia wapna" w danym kraju. Kolor pomarańczowy: ponad 5% mieszanek zmodyfikowanych wapnem hydratyzowanym; kolor szary – około 1%. AC – beton asfaltowy; SMA – asfalt mastyksowy kamienny; PA – asfalt porowaty; CMA – zimna mieszana asfaltowa; BBTM – bardzo cienka warstewka asfaltu.	4
Tab. 2.	Różne klasy wapna hydratyzowanego zgodnie z normą EN 459-1:2010.	12
Tab. 3.	Typowe właściwości wapna hydratyzowanego w porównaniu do wypełniaczy mineralnych.	15
Tab. 4	Najczęściej stosowane metody prób do oceny zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych.	20-21
Tab. 5.	Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego z użyciem urządzenia HWTD (EN 12697 – mały aparat – metoda B, w wodzie). Patrz także opis wyników badań, punkt 2.3.4.	22
Tab. 6.	Ocena przesłanek stosowania wapna hydratyzowanego na podstawie doświadczenia organów rządowych USA. Poziom znaczenia: 1 – bardzo ważne; 2 – umiarkowanie ważne; 3 – mniej ważne (na podstawie [10]).	24
Tab. 7.	Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego wg metody Lottmana.	25
Tab. 8.	Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na powtarzalne cykle zamrażania-rozmrażania mieszanek mineralno-asfaltowych przez dodanie wapna hydratyzowanego. Metoda prób: (1) – z powtarzanym obciążeniem, wg Lottmana; (2) – próba „teksańska".	26
Tab. 9.	Niektóre przykłady oceny ilościowej zwiększenia odporności na wodę mieszanek mineralno-asfaltowych po dodaniu wapna hydratyzowanego przy zastosowaniu powszechnych metod badań. Metoda prób: (3) – Duriez; (4) – Cantabro; (5) – stabilność resztkowa, wg Marshalla; (6) – próba Texas Boil.	27
Tab. 10.	Przegląd badań laboratoryjnych określania wpływu wapna hydratyzowanego na proces starzenia się asfaltu.	29-30
Tab. 11.	Przegląd badań wpływu wapna hydratyzowanego na starzenie się asfaltu w warunkach terenowych.	31
Tab. 12.	Lepkość [η] różnych wypełniaczy (na podstawie [95]).	33
Tab. 13.	Przegląd opublikowanych danych dotyczących modułu sztywności. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost modułu mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania.	35
Tab. 14.	Przegląd opublikowanych danych dotyczących wytrzymałości. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost wytrzymałości mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania.	37
Tab. 15.	Przegląd opublikowanych danych dotyczących odporności na powstawanie kolein. Należy nadmienić, że wyniki badań z użyciem urządzenia HWTD opisano wcześniej, w Tabeli 5. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost odporności mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym na powstawanie kolein. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania; MF – wypełniacz mieszany.	39
Tab. 16.	Przegląd opublikowanych danych dotyczących odporności na zmęczenie. Dla każdego badania podano całkowitą liczbę mieszanek z wapnem hydratyzowanym oraz zakres zawartości wapna hydratyzowanego, a także liczbę danych dla których występował znaczący wzrost odporności mieszanek modyfikowanych wapnem hydratyzowanym na zmęczenie. Oznaczenia sposobu dozowania wapna: B – do lepiszcza; D – suche wapno do wilgotnego kruszywa; LS – mleko wapienne; M – w przypadku sezonowania; MF – wypełniacz mieszany.	41

Numer	Opis tabeli	Strona
Tab. 17.	Naprężenia termiczne w funkcji temperatury (TSRST – thermal stress vs temperature) dla dwóch różnych mieszanek mineralno-asfaltowych z wapnem hydratyzowanym oraz bez wapna hydratyzowanego (na podstawie [29]).	42
Tab. 18.	Stężenie grup funkcjonalnych w czterech asfaltach AC-10 o różnym składzie chemicznym przed dodaniem i po dodaniu wapna hydratyzowanego. (1) – poniżej poziomu wykrywalności; (2) – obecne w postaci soli karboksylowych (na podstawie [72]).	48
Tab. 19.	Stężenie grup funkcjonalnych w asfalcie Boscan przed starzeniem i po starzeniu (TFAAT) w obecności różnych ilości wapna hydratyzowanego lub dolomitowego wapna hydratyzowanego (na podstawie [22]).	48
Tab. 20.	Obecnie stosowane metody dodawania wapna hydratyzowanego do mieszanek mineralno-asfaltowych. Dane dla USA zaczerpnięto z bibliografii [145]. Szczegółowe dane dla Europy podano wcześniej w Tabeli 1. Tutaj skupiono się na tych krajach europejskich, w których stosowanie wapna hydratyzowanego wynosi blisko 1% lub więcej (dane szacunkowe w kategoriach wielkości procentowych mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych wapnem hydratyzowanym porównano z ogólną produkcją mieszanek na gorąco).	52
Tab. 21.	Klasy wypełniaczy mieszanych wg normy EN 13043 [26].	53
Tab. 22.	Przewidywana trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych, z wapnem hydratyzowanym i bez, w USA. (1) – konserwacja nawierzchni; N/A = nie dotyczy (na podstawie [10]).	55
Tab. 23.	Tory wyścigowe z nawierzchnią z mieszanek mineralno-asfaltowych, modyfikowanych wapnem hydratyzowanym. W ostatniej kolumnie podano rodzaj użytego lepiszcza: PMB – asfalt modyfikowany polimerami; TE – Trinidad Epure (twardy asfalt naturalny).	56
Tab. 24.	Wyniki walidacji niemieckiej metody kontroli dozowania (na podstawie [155]).	57

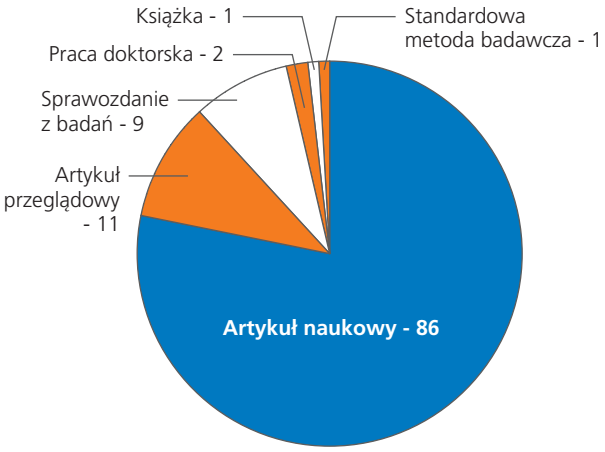
Załącznik 1 (źródła)

Raport ten został sporządzony w oparciu o badania studialne dokumentów pochodzących z całego świata i dotyczących przedmiotowej problematyki. Pełna lista tych dokumentów podana jest w Załączniku 2.

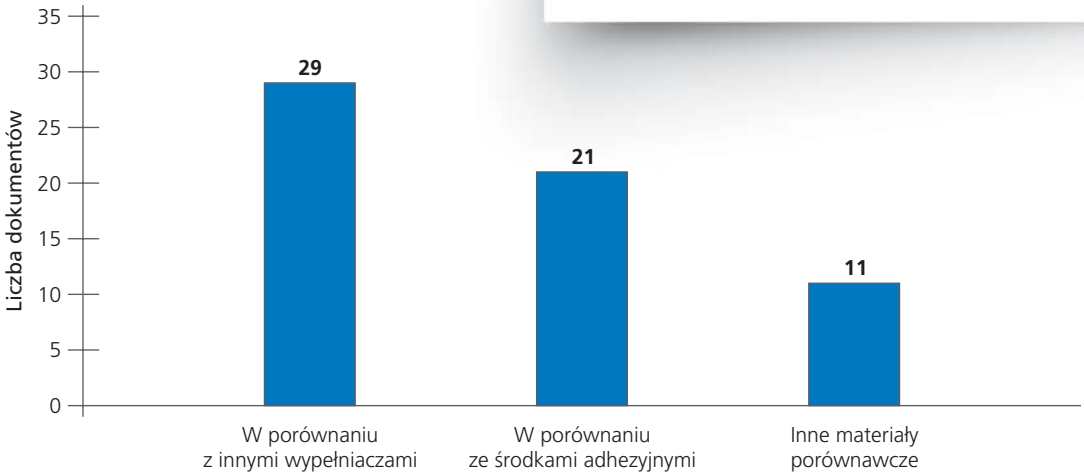
Dokumenty te były identyfikowane na kilka sposobów. Po pierwsze, klasyczne poszukiwanie pozycji bibliograficznych przeprowadzono przy wykorzystaniu baz danych bibliografii technicznej, takich jak Hcaplus, ITRD, Compendex, Civileng, NTIS i Dissabs. Następnie, poszukiwania te uzupełniono o przeszukiwanie Internetu, korzystając z przeglądarki www.google.com i posługując się tymi samymi słowami kluczowymi. Do listy dokumentów dodano też pozycje bibliograficzne, znane wcześniej niektórym członkom grupy roboczej Zespołu ds. Nawierzchni Asfaltowych. Na zakończenie, do bazy danych dodano dokumenty, wymienione w spisach bibliografii dokumentów pozyskanych w sposób jak wyżej, ale które nie zostały znalezione wcześniej.

Podsumowując, dla celów sporządzenia tego raportu przeanalizowano 110 dokumentów dotyczących stosowania wapna hydratyzowanego w materiałach asfaltowych. We wstępie podano kraj pierwszego autora (Rys.1) oraz rok publikacji (Rys. 2). Na Rys. 33 przedstawiono rodzaj dokumentów, przy czym są to głównie artykuły naukowe.

Z punktu widzenia treści interesujące jest to, że w publikowanych opracowaniach, wapno hydratyzowane porównywane jest głównie z wypełniaczami mineralnymi lub innymi aktywatorami adhezji (przede wszystkim płynnymi środkami adhezyjnymi) (Rys. 34). W innych materiałach wykorzystywanych do porównań wapna hydratyzowanego, omawiane są takie czynniki chemiczne jak asfalt modyfikowany siarką, dwuaminodwutiokarbaminian ołowiu (LDADC – antyutleniacz), hedmanite (naturalne włókno wełny mineralnej), keton fenylowo-undecylowy (modelowy związek zwiększający adhezję), włókna kokosowe, kwas polifosforowy (PPA) oraz polimery.



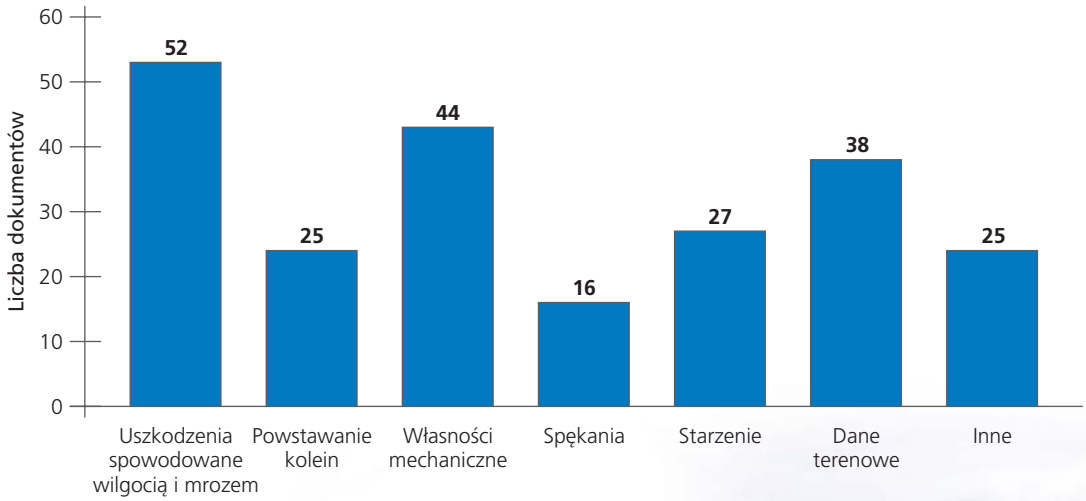
Rys. 33. Rodzaj dokumentów umieszczonych w bazie danych (110 dokumentów).



Rys. 34. Z jakimi substancjami porównywano wapno hydratyzowane?

Rys. 35 ilustruje liczbę opracowań naukowych, poświęconych poszczególnym właściwościom materiałów. Łącznie jest to ponad 110 dokumentów, ponieważ w niektórych pracach analizowano kilka właściwości. Uszkodzenia nawierzchni powodowane obecnością wody i mrozem, są najczęściej omawianym przedmiotem badań, co potwierdza, że wapno hydratyzowane jest czynnikiem najbardziej znanym i odgrywającym największą rolę. Właściwości mechaniczne (tj. inne niż podatność na spękania lub powstawanie kolein) są również dobrze udokumentowane, ponieważ z oczywistych powodów, mieszanki mineralno-asfaltowe są zazwyczaj projektowane w oparciu o ich właściwości mechaniczne. Kolumna „Inne" obejmuje prace poświęcone właściwościom wapna hydratyzowanego (próby wypełniaczy), mastyksu, a także metodom dozowania.

W Załączniku 2 podano wykaz pozycji bibliograficznych, z rozróżnieniem rodzaju oddziaływania poszczególnych materiałów w mieszankach mineralno-asfaltowych.



Rys. 35. W jakich aspektach oceniano działanie wapna hydratyzowanego?

Załącznik 2 (lista dokumentów z uwzględnieniem rodzaju oddziaływania materiałów)

Aby ułatwić znalezienie właściwej pozycji bibliograficznej, poniżej podano zawartość bazy danych pozycji bibliograficznych wykorzystanych przy opracowywaniu raportu. Obok każdej pozycji podano **tematykę**, której jest ona poświęcona, z użyciem następujących oznaczeń literowych:

- **Md** – odporność na uszkodzenia spowodowane przez wodę i mróz, włącznie z próbami HWTD,
- **Ag** – starzenie,
- **Me** – właściwości mechaniczne, włącznie ze stabilnością wg Marshalla, modułami, wytrzymałością (tylko w przypadku, kiedy próba wykonywana jest oddzielnie, tzn. nie jako element próby odporności na uszkodzenia spowodowane przez wodę i mróz, z kondycjonowaniem i bez), ale z wyłączeniem badania odporności na powstawanie kolein i spękania,
- **Ru** – odporność na powstawanie kolein, włącznie z próbami HWTD,
- **Fr** – podatność na pękanie, w tym na zmęczenie,
- **Ot** – inne, włącznie z próbami mastyksu, dozowaniem wapna, testami wypełniaczy, itp.,
- **Fi** – dane uzyskane w warunkach naturalnych, w terenie.

Analizę bazy danych, przeprowadzoną pod kątem poruszanej tematyki, przedstawiono w Załączniku 1 (Rys. 35).

Najważniejsze pozycje bibliograficzne wyróżniono pogrubioną czcionką.

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
M. I. Al-Jarallah and K. W. Lee, "Evaluation of hydrated lime as an antistripping additive for asphalt mixtures", J. Eng. Sci. King Saud Univ. 13(1), pp.65-83, 1987	X						
M. Ameri and M. Aboutalebi Esfahani, "Evaluation and performance of hydrated lime and limestone powder in porous asphalt", Road Materials Pavement Design 9(4), pp.651-664, 2008	X		X				
T. S. Arnold, M. Rozario-Ranasinghe and J. Youtcheff, "Determination of lime in hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1962, pp.113-120, 2006						X	
T. S. Arnold, J. Rozario and J. Youtcheff, "New lime test for hot mix asphalt unveiled", Public Roads 70(5), March/April 2007						X	
T. Aschenbrener and N. Far, Influence of Compaction temperature and Anti-Stripping Treatment on the Results from the Hamburg Wheel-Tracking Device, Report CDOT/DTD/R-94-9, Denver (Colorado, USA): Colorado Department of Transportation, 1994	X			X			
J. Bari and M. W. Witczak, "Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt: Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", Transportation Research Record 1929, pp.10-19, 2005			X				
G. Baumgardner, J.-V. Martin, R. B. Powell and P. Turner, "Polyphosphoric acid and styrene-butadiene-styrene block copolymer modified asphalt: Evaluation of paved section at the NCAT test track built in 2000 and 2003", Proc. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-029, 2008							X
C. Berthelot, A. Anthony and C. Raducanu, "Mechanistic characterization of anti-stripping additives in Saskatchewan asphalt mixes", Proc. Annual Conf. Transportation Association Canada, Calgary, Sept. 2005			X				
H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, "Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: Un caso real", Carreteras 16, pp.54-64, 2008		X					
R. Blab und B. Hofko, Eignung von mit Kalkhydrat und polymermodifiziertem Bindemittel hergestelltem Asphaltmischgut für hoch belastete Verkehrsflächen, Report for Project 0727E, Wien (Austria): Technische Universität Wien, 2008			X		X		
J. Blazek, G. Sebor, D. Maxa, M. Ajib and H. Paniagua, "Effect of hydrated lime addition on properties of asphalt", Petroleum and Coal, 42(1), pp.41-45, 2000	X						
A. L. Bock, D. Hartmann, J. Budny, L. P. Specht e J. A. P. Ceratti, „Estudio laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adiçao de cal a concreto asfaltico", Teoria e Pratica na Engenharia Civil 14, pp.59-69, 2009	X		X				
G. Bordonado, « Une expérience d'enrobés drainants sur l'autoroute A1 », Revue Générale des Routes et Aérodromes 625, pp.47-50, décembre 1985							X

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
B. Bruce, "Asphalt as a variable – Big Timber test sections", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.688-710, 1987				X	X		X
B. Brûlé, F. Le Bourlot et B. Simaillaud, « Enrobés drainants : Optimisation de la composition des liants et des mastics », Proc. 5th Eurobitume Congress, Stockholm, paper 3.20, pp.591-595, June 1993	X		X			X	
M. Buchta und C. Kunesch, "Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat - Ergebnisse aus der Praxis", Gestrata Journal 111, pp.7-12, 2005 (http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_111.pdf)							X
J. W. Button, "Maximizing the Beneficial Effects of Lime in Asphalt Paving Mixtures", ASTM STP 899 pp.134-146, 1984	X						X
C. V. Chachas, W. J. Liddle, D. E. Peterson and M. L. Wiley, Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement, Report PB 213 170, Salt Lake City (Utah, USA): Utah State Highway Department, 1971		X					X
P. Cramer, G. Herz und M. Radenberg, „Kalhydrat: Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels", Asphalt 6, pp.17-25, 2001	X			X			
Y. Decoene, "Enrobés bitumineux perméables, expériences récentes belges", La Technique Routière 2, pp.20-40, 1983							X
A. C. Edler, M. M. Hattingh, V. P. Servas and C. P. Marais, "Use of aging tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 54, pp.118-139, 1985		X					
H.-J. Eulitz, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und S.-O. Schmidt, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat", Report 2/98/B005, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 1998	X	X					X
J. Gallego Medina, "Efectos del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas", Carreteras 123, pp.68-80, 2002	X	X		X			
M. Ghouse Baig and H. I. Al-Abdul Wahhab, "Mechanistic evaluation of hedmanite and lime modified asphalt concrete mixtures", J. Materials in Civil Engineering 10(3), pp.153-160, 1998	X		X	X	X		
C. Gorkem and B. Sengoz, "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", Construction Building Materials 23, pp.2227-2236, 2009	X		X				
W. Grabowski, J. Wilanowicz and T. Soból, "Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime", Proc. 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009						X	
D. I. Hanson, R. E. Graves and E. R. Brown, "Laboratory evaluation of the addition of lime treated sand to hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1469, pp.34-42, 1994	X						
P. Hao and Y. Hachiya, "Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives", Proc. Japan Soc. Civil Engineers 61(746), pp.265-273, 2003	X	X		X			
R. G. Hicks, Moisture Damage in Asphalt Concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice 175, Washington (District of Columbus, USA): Transportation Research Board, 1991	X						X
R. G. Hicks and T. V. Scholz, Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, 3 vol., Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 (http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_I.pdf, http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_II.pdf, http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_III.pdf)						X	X
P. C. Hopman, Hydroxide in Filler, Netherlands Pavement Consulting Report n°97316, Utrecht (The Netherlands): Netherlands Pavement Consulting, 1998	X	X				X	
P. C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt and D. Walter, "Effects of hydrated lime on the behaviour of mastics and on their construction ageing", Proc. 5th Int. Conf. on Durable and Safe Road Pavements, Kielce, vol. 1, pp.59-68, May 1999	X	X				X	
J. F. Huang, S. P. Wu, L. Pan and Y. Xiao, "Effects of hydrated lime on the dynamic properties of gneiss asphalt mixtures", Proc. 2nd Int. Conf. on Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM), Huangshan (China), pp.1057-1060, 2008			X				
S.-C. Huang, J. C. Petersen, R. E. Robertson and J. F. Branthaver, "Effect of hydrated lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt", Transportation Research Report 1810, pp.17-24, 2002		X					

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
S.-C. Huang, R. E. Robertson, J. F. Branthaver and J. C. Petersen, "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage", J. Materials in Civil Engineering 17(6), pp.711-718, 2005	X						
I. Ishai and J. Craus, "Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228–258, 1977	X		X				
R. P. Izzo and M. Tahmoressi, "Use of the Hamburg wheel-tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1681, pp.76-85, 1999	X			X			
M. Iwański and M. Pabocha, "Water and frost resistance of gap-graded asphalt modified with the SBS polymer and hydrated lime", Foundations of Civil and Environmental Engineering 11, pp.29-39, 2008 (http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2008.11/full/fcee_2008-11_029-039_water_and_frost_resistance_of_gap-graded.pdf)	X		X				
P. Jaskuła and J. Judycki, "Evaluation of effectiveness of hydrated lime additive in protecting asphalt concrete against water and frost", Proc. 6th Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, May 2005	X		X	X			X
P. Jaskuła, "The effectiveness of hydrated lime as asphalt concrete additive", Foundations of Civil and Environmental Engineering 10, pp.99-109, 2007 (http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee_2007-10_099-109_the_effectiveness_of_hydrated_lime.pdf)	X		X	X			X
R. A. Jimenez, "Methods and treatments to control debonding", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 59, pp.94–137, 1990	X						X
L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "A study of rheological properties of lime treated paving asphalts aged at 60°C in a pressure aging vessel", Fuel Science Technology Int. 13(10), pp.1317-1343, 1995		X				X	
L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "The influence of metal-containing compounds on enhancement and inhibition of asphalt oxidation", Fuel Science Technology Int. 14(8), pp.1143-1159, 1996		X					
L. S. Johansson and U. Isacsson, "Effect of filler on low temperature physical hardening of bitumen", Construction Building Materials 12 pp.463-470, 1998						X	
L. S. Johansson, Bitumen ageing and hydrated lime, Ph. D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden); 1998		X				X	
P. S. Kandhal and I. J. Rickards, "Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories", J. Association Asphalt Paving Technologists 70, pp.301-349, 2001							X
T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327–341, 1982	X						
T. W. Kennedy, N. Turnham, J. A. Epps, C. W. Smoot, F. M. Young, J. W. Button and C. D. Zeigler, "Evaluation of methods for field applications of lime to asphalt concrete mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 52, pp.508–534, 1983	X						X
T. W. Kennedy, Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures, National Lime Association Bulletin 325, 1984	X						X
T. W. Kennedy and W. V. Ping, "An evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 60, pp.230-263, 1991	X						X
M. J. Khattak and V. Kyatham, "Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions", Transportation Research Record 2057, pp.64-74, 2008			X		X		
O. K. Kim, C. A. Bell and R. G. Hicks, "The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures", ASTM Special Technical Publication 899, Philadelphia (Pennsylvania, USA): American Society for Testing and Materials, pp.51-72, 1985	X			X	X		
Y.-R. Kim, D. N. Little, I. Song, "Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental characteristics", Transportation Research Record 1832, pp.1-8, 2003			X		X		
Y.-R. Kim and D. N. Little, "Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics", J. Materials in Civil Engineering 16(2), pp.122-132, 2004						X	

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
Y.-R. Kim, J. Sudo Lutif, A. Bhasin and D. N. Little, "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing", J. Materials Civil Engineering 20(10), pp.659-667, 2008	X			X		X	
C. Kunesch und S. Neumann, "Kalkhydrat – Mischgut für das hochrangige Strassennetz", Gestrata Journal 126, pp.20-24, 2009 (http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_126.pdf)							X
R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab and J. Eberhardsteiner, "Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multiscale analysis", J. Materials in Civil Engineering 17(5), pp.485-491, 2005						X	
D. Lesueur and D. N. Little, "Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen", Transportation Research Record 1661, pp.93-105, 1999		X			X	X	
D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2001 (http://www.lime.org/Abenefit.pdf)	X	X	X	X	X	X	X
D. N. Little and J. C. Petersen, "Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited, J. Materials in Civil Engineering 17(2), pp.207-218, 2005		X		X	X	X	
R. Maldonado and D. Fee, "Bitumen modification with polyphosphoric acid", Proc. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-020, 2008	X			X			
G. W. Maupin Jr, Effectiveness of Antistripping Additives in the Field, Report VTRC 96-R5, Charlottesville (Virginia, USA): Virginia Transportation Research Council, 1995 (http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/96-r5.pdf)	X						X
M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluation of Moisture Sensitivity and Performance of Lime in Hot-Mix Asphalt: Resilient Modulus, Tensile Strength, and Simple Shear Tests", Transportation Research Record 1832 pp.9-16, 2003	X		X				
M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluating the performance of lime in hot-mix asphalt mixtures", Proc. American Soc Civil Engineers Meeting on Airfield and Highway Pavements, pp.614-624, 2006	X		X		X		
R. Miro Recasens, A. Martinez, F. Perez Jimenez and H. Bianchetto, "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures", Transportation Research Record 1901, pp.10-17, 2005		X	X				
L. N. Mohammad, C. Abadie, R. Gokmen and A. J. Puppala, "Mechanistic evaluation of hydrated lime in hot-mix asphalt mixtures", Transportation Research Record 1723, pp.26-36, 2000	X		X	X	X		
L. N. Mohammad, S. Saadeh, M. Kabir and A. Othman, "Mechanistic properties of hot-mix asphalt mixtures containing hydrated lime", Transportation Research Record 2051, pp.49-63, 2008	X		X	X	X		
F. Mücke und F. Stolz, „Möglichkeit zur verbesserung von Asphalteigenschaften", Asphalt, Heft 7, 2004							X
National Lime Association, How to Add Hydrated Lime to Asphalt – An Overview of Current Methods, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 (http://www.lime.org/howtoadd.pdf)							X
J. W. H. Oliver, "Results of road trials of two asphalt antioxidants", Transportation Research Record 1488, pp.96-102, 1995		X					X
J. C. Petersen, H. Plancher and P. M. Harnsberger, "Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.632-653, 1987		X					
K. Pickering, P. E. Sebaaly, M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Evaluation of new generation of antistripping additives", Transportation Research Record 1342, pp.26-34, 1992	X		X				
J. Piłat, P. Radziszewski and M. Kalabińska, "The analysis of visco-elastic properties of mineral-asphalt mixes with lime and rubber powder", Proc. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, vol.1, paper 0036, pp.648-654, 2000			X				X
H. Plancher, E. L. Green and J. C. Petersen, "Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 45, pp.1-24, 1976		X					
S. Raghava Chari and K. A. Jacob, "Influence of lime and stone dust fillers on fatigue properties of bituminous concrete mixes", Highway Research Bulletin 23, pp.19-32, 1984					X		

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
C. Raynaud, "L'ajout de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux", BTP Matériaux n°22, pp.42-43, oct. 2009							X
W. Ricardo De Grande, A. Paula Furlan, A. Carlos Gigante, L. M. Gutierrez Klinsky and G. T. Pessa Fabbri, "Efeitos da cal hidratada e do acido polifosforico na suscetibilidade termica de misturas asfalticas densas", Proc. Proc. 23rd Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes Congress, paper AC381, 2009			X				
F. T. Sacramento Aragao, Y.-R. Kim and J. Lee, Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska, Report to NDOR Research Project Number P579, Lincoln (Nebraska, USA): University of Nebraska Lincoln, 2008 (http://www.nlc.state.ne.us/epubs/R6000/B276-2008.pdf)			X	X	X		
A. Sainton, « Les aspects techniques des enrobés drainants au bitume caoutchouc Flexochape – Procédé Drainochape », Revue Générale des Routes et Aérodromes 618, pp.67-70, avril 1985							X
A. Sainton, D. Puiatti et D. Walter, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Revue Générale des Routes et Aérodromes 770, pp.3-10, 1999	X	X	X	X		X	X
A. Sampedro Rodriguez y J. Gallego Medina, "De cal y carreteras...", Carreteras 135, pp.6-22, 2004	X	X	X	X		X	
K. Schellenberg und H.-J. Eulitz, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat", Bitumen 1, pp.2-8, 1999	X	X				X	
K. Schellenberg und M. Schneider, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Paxisversuche", Strasse und Autobahn 3, pp.136-141, 2004	X	X	X			X	X
H.-M. Schiffner, "Test method for determining hydrated lime in asphalt", Cement-Lime-Gypsum International 56(6), pp.76-82, 2003						X	
M. Schneider, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und H.-M. Schiffner, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik", Report 2/02/B012, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 2002	X		X		X	X	X
P. E. Sebaaly, E. Hitti and D. Weitzel, "Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements", Transportation Research Record 1832, pp.34-41, 2003	X						X
P. E. Sebaaly, D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2006 (http://www.lime.org/BENEFITSHYDRATEDLIME2006.pdf)	X	X	X	X	X	X	X
P. E. Sebaaly, Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2007 (http://www.lime.org/MoistureDamageHotMix.pdf)	X			X	X		X
P. E. Sebaaly, D. N. Little, E. Y. Hajj and A. Bhasin, "Impact of lime and liquid antistrip agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation Research Record 1998, pp.65-67, 2007	X		X				X
P. E. Sebaaly, E. Hajj and E. Berger, "Impact of Lime and Liquid Antistrip on Moisture Sensitivity of HMA Mixtures", Proc. Int. Conf. on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens (Greece), pp. 651-661, June 2007	X		X		X		X
D. Sewing, „Verbesserung von Asphaltbelägen mit Kalkhydrat: Neue Ergebnisse aus dem Glarnerland", Strasse und Verkehr 5, pp.19-22, May 2006		X		X			X
D. Sewing, „Aktuelle Untersuchungen zur Verbesserung von Asphalt mit Kalkhydrat", Strasse und Verkehr 3, pp.31-33, March 2008		X		X			X
M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Four variables that affect the Performance of Lime in Asphalt-Aggregate Mixtures", Transportation Research Record 1115, pp.12-22, 1987	X		X				
M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Effect of lime on asphalt concrete performance", Proc. American Soc. Civil Engineers Materials Congress, pp.921-930, August 1990	X		X				X
M. Stroup-Gardiner and D. Newcomb, "Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives", Transportation Research Record 1269, pp.56-68, 1990	X		X				
K. Stuart, Moisture Damage in Asphalt Mixtures – A State-of-the-Art Report, Report FHWA-RD-90-019, MacLean (Virginia, USA): Federal Highway Administration, 1990 (http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013679.pdf)	X						X
Technische Prüfvorshriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau, Teil 3.9, Bestimmung des Calciumhydroxidgehaltes in Mischfüllern, Ausgabe 2008						X	
Transportation Research Board, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar - San Diego February 2003, Miscellaneous Report, Washington (District of Columbia, USA): Transportation Research Board, 2003	X						X

Pozycja bibliograficzna	Md	Ag	Me	Ru	Fr	Ot	Fi
D. G. Tunnicliff, "Binding effect of mineral filler", Proc Association Asphalt Paving Technologists 36 pp.114–154, 1967						X	
J. T. Van der Zwan, T. Goeman, H. J. A. J. Gruis, J. H. Swart and R. H. Oldenburger, "Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review", Transportation Research Record 1265, pp.95-110, 1990							X
S. Vansteenkiste and A. Vanelstraete, "Properties of fillers : relationship with laboratory performance in hot mix asphalt", J. Association Asphalt Paving Technologists 77, pp.361-398, 2008						X	
A. Verhasselt, F. Verhelst, A. Sainton, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Proc. 19ème Congrès Belge de la Route, Genval, Sept. 2001		X					
A. Verhasselt and D. Puiatti, "Effect of hydrated lime on ageing behaviour of bituminous mastics", Proc. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, paper 108, pp.746-756, 2004		X				X	
J. L. M. Voskuilen and J. M. M. Molenaar, "Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate", Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.078, 1996						X	
J. L. M. Voskuilen and P. N. W. Verhoef, "Causes of premature ravelling failure in porous asphalt", Proc. RILEM symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, pp.191-197, 2003							X
B. Vural Kok and M. Yilmaz, "The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", Construction Building Materials 23, pp.1999-2006, 2009	X		X				
M. L. Wisneski, J. L. Chaffin, R. R. Davison, J. A. Bullin and C. J. Glover, "Use of lime in recycling asphalt", Transportation Research Record 1535, pp.117-123, 1996		X					
M. W. Witczak and J. Bari, Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures, Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University, 2004 (http://www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf)			X				
J. P. Wortelboer, H. J. Hoppen, G. Ramond and M. Pastor, "Rheological properties of bitumen/filler mixtures", Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.079, 1996						X	

Bibliografia

[1] E. Love, Pavements and roads; their construction and maintenance, New York (New York, USA): Engineering Building Record, 1890

[2] T. W. Kennedy, Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures, National Lime Association Bulletin 325, 1984

[3] D. McNichols, Paving the Way: Asphalt in America, Lanham (Maryland, USA): National Asphalt Pavement Association, 2005

[4] R. S. Boynton, Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 2nd ed., New York (New York, USA): Wiley--Interscience, 1980

[5] C. Richardson, The Modern Asphalt Pavement, 2nd ed., New York: Wiley; 1910

[6] Asphalt Institute, The Asphalt Handbook, Lexington (Kentucky, USA): Asphalt Institute, 1947

[7] M. Duriez et J. Arrambide, Liants Hydrocarbonés, Paris (France): Dunod, 1954

[8] R. G. Hicks, Moisture Damage in Asphalt Concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice 175, Washington (District of Columbus, USA): Transportation Research Board, 1991

[9] P. S. Kandhal and I. J. Rickards, "Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories", J. Association Asphalt Paving Technologists 70, pp.301-349, 2001

[10] R. G. Hicks and T. V. Scholz, Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt, 3 vol., Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 (http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_I.pdf, http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_II-.pdf, http://www.lime.org/LCCA/LCCA_Vol_III.pdf)

[11] D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2001 (http://www.lime.org/ABenefit.pdf)

[12] P. E. Sebaaly, D. N. Little and J. A. Epps, The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2006 (http://www.lime.org/BENEFITSHYDRATEDLIME2006.pdf)

[13] D. N. Little and J. C. Petersen, "Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited, J. Materials in Civil Engineering 17(2), pp.207-218, 2005

[14] P. E. Sebaaly, Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2007 (http://www.lime.org/MoistureDamageHotMix.pdf)

[15] C. Raynaud, "L'ajout de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux", BTP Matériaux n°22, pp.42-43, oct. 2009

[16] CROW, Deelhoofdstuk 31.2 Asfaltverhardingen, Ede (The Netherlands): CROW, 2007

[17] J. L. M. Voskuilen and P. N. W. Verhoef, "Causes of premature ravelling failure in porous asphalt", Proc. RILEM symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, pp.191-197, 2003

[18] E. T. Hagos, A. A. A. Molenaar and M. F. C. Van de Ven, "Chemical characterization of laboratory and field bitumen aging in Porous Asphalt Concrete", Proc. 7th Int. RILEM Symposium Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Rhodes, Greece, May 2009

[19] European Committee for Standardization, EN 459-1: Building Lime. Part. 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2001

[20] M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Four variables that affect the Performance of Lime in Asphalt-Aggregate Mixtures", Transportation Research Record 1115, pp.12-22, 1987

[21] M. Stroup-Gardiner and D. Newcomb, "Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives", Transportation Research Record 1269, pp.56-68, 1990

[22] J. C. Petersen, H. Plancher and P. M. Harnsberger, "Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.632-653, 1987

[23] A. Sainton, D. Puiatti et D. Walter, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Revue Générale des Routes et Aérodromes 770, pp.3-10, 1999

[24] European Committee for Standardization, EN 459-2: Building Lime. Part. 2: Test Methods, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2001

[25] European Committee for Standardization, EN 13108-1 through 7: Bituminous Mixtures – Material Specifications, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2006

[26] European Committee for Standardization, EN 13043: Aggregates for Bituminous Mixtures and Surface Treatments for Roads, Airfields and other Trafficked Areas, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2002

[27] European Committee for Standardization, EN 1097-4: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 4: Determination of the Voids of Dry Compacted Filler, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 1999

[28] P. J. Rigden, "The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler binder systems in relation to filler characteristics", J. Soc. Chem. Industry 66, pp.299-309, 1947

[29] M. Schneider, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und H.-M. Schiffner, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Praxisversuch/Mischtechnik", Report 2/02/B012, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 2002

[30] S. Vansteenkiste and A. Vanelstraete, "Properties of fillers: relationship with laboratory performance in hot mix asphalt", J. Association Asphalt Paving Technologists 77, pp. 361-398, 2008

[31] W. Grabowski, J. Wilanowicz and T. Soból, "Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime", Proc. 6th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino (Italy), paper 78, July 2009
[32] A. Sampedro Rodriguez y J. Gallego Medina, "De cal y carreteras...", Carreteras 135, pp.6-22, 2004
[33] R. Lackner, M. Spiegl, R. Blab and J. Eberhardsteiner, "Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multi-scale analysis", J. Materials in Civil Engineering 17(5), pp.485-491, 2005
[34] D. Lesueur, S. Guédon-Dubied, A. Le Roux, L. Odie, C. Leroux, C. Such, J. J. Potti and J. F. Castilla, „Characterization of the reactivity of road aggregates with respect to bituminous emulsions 1: Petrographic analysis", Bull. Labo. Ponts et Chaussées 246-247, 5-18, 2003 (available in both English and French from http://www.lcpc.fr/fr/sources/callistee/iframe.php)
[35] J. L. M. Voskuilen and J. M. M. Molenaar, "Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate", Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.078, 1996
[36] European Committee for Standardization, EN 13179-1: Tests for Filler Aggregate Used in Bituminous Mixtures - Part 1: Delta Ring and Ball Test, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2000
[37] P. Cramer, G. Herz und M. Radenberg, „Kalhydrat: Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels", Asphalt 6, pp.17-25, 2001
[38] K. Schellenberg und H.-J. Eulitz, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Einsatz von Kalkhydrat", Bitumen 1, pp.2-8, 1999
[39] H.-J. Eulitz, K. Schellenberg, H.-J. Ritter und S.-O. Schmidt, „Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat", Report 2/98/B005, Köln (Germany): Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V., 1998
[40] European Committee for Standardization, EN 13179-2: Tests for Filler Aggregate Used in Bituminous Mixtures - Part 2: Bitumen Number, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2000
[41] European Committee for Standardization, EN 1097-3: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 1998
[42] European Committee for Standardization, EN 933-9: Tests for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines. Methylene Blue Test, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2009
[43] European Committee for Standardization, EN 196-6: Methods of Testing Cement. Part 6: Determination of Fineness, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2010
[44] S. Caro, E. Masad, A. Bhasin and D. N. Little, "Moisture susceptibility of asphalt mixtures. Part 1: Mechanisms", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.81-98, 2008 and "Moisture susceptibility of asphalt mixtures. Part 2: Characterisation and modelling", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.99-114, 2008
[45] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Catalogue des Dégradations de Surface des Chaussées, Méthode d'Essai n°52, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1998
[46] M. Duriez et J. Arrambide, Nouveau Traité de Matériaux de Construction, Tome 3, 2nd Ed., Paris (France): Dunod; 1962
[47] N. Kringos, A. Scarpas, C. Kasbergen and P. Selvadurai, "Modelling of combined physical-mechanical moisture--induced damage in asphaltic mixes. Part 1: Governing processes and formulations", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.115-128, 2008 and N. Kringos, A. Scarpas, A. Copeland and J. Youtcheff, "Modelling of combined physicalmechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes. Part 2: Moisture susceptibility parameters", Int. J. Pavement Engineering 9, pp.129-151, 2008
[48] D. I. Hanson, R. E. Graves and E. R. Brown, "Laboratory evaluation of the addition of lime treated sand to hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1469, pp. 34-42, 1994
[49] P. Hao and Y. Hachiya, "Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives", Proc. Japan Soc. Civil Engineers 61(746), pp.265-273, 2003
[50] T. W. Kennedy and W. V. Ping, "An evaluation of effectiveness of antistripping additives in protecting asphalt mixtures from moisture damage", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 60, pp.230-263, 1991
[51] T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327-341, 1982
[52] G. W. Maupin Jr, Effectiveness of Antistripping Additives in the Field, Report VTRC 96-R5, Charlottesville (Virginia, USA): Virginia Transportation Research Council, 1995 (http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/96-r5.pdf)
[53] M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Effect of lime on asphalt concrete performance", Proc. American Soc. Civil Engineers Materials Congress, pp.921-930, August 1990
[54] P. E. Sebaaly, E. Hitti and D. Weitzel, "Effectiveness of lime in hot-mix asphalt pavements", Transportation Research Record 1832, pp.34-41, 2003
[55] P. Jaskuła, "The effectiveness of hydrated lime as asphalt concrete additive", Foundations of Civil and Environmental Engineering 10, pp.99-109, 2007 (http://www.ikb.poznan.pl/fcee/2007.10/full/fcee_2007-10_099-109_the_effectiveness_of_hydrated_lime.pdf)
[56] T. Aschenbrener and N. Far, Influence of Compaction temperature and Anti-Stripping Treatment on the Results from the Hamburg Wheel-Tracking Device, Report CDOT/DTD/R-94-9, Denver (Colorado, USA): Colorado Department of Transportation, 1994
[57] L. N. Mohammad, S. Saadeh, M. Kabir and A. Othman, "Mechanistic properties of hot mix asphalt mixtures containing hydrated lime", Transportation Research Record 2051, pp. 49-63, 2008

[58] R. Maldonado and D. Fee, "Bitumen modification with polyphosphoric acid", Proc. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-020, 2008
[59] R. P. Izzo and M. Tahmoressi, "Use of the Hamburg wheel--tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt", Transportation Research Record 1681, pp. 76-85, 1999
[60] Y.-R. Kim, J. Sudo Lutif, A. Bhasin and D. N. Little, "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing", J. Materials Civil Engineering 20(10), pp.659-667, 2008
[61] K. Pickering, P. E. Sebaaly, M. Stroup-Gardiner and J. A. Epps, "Evaluation of New generation of antistripping additives", Transportation Research Record 1342, pp.26-34, 1992
[62] M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluating the performance of lime in hot-mix asphalt mixtures", Proc. American Soc Civil Engineers Meeting on Airfield and Highway Pavements, pp.614-624, 2006
[63] P. Jaskuła and J. Judycki, "Evaluation of effectiveness of hydrated lime additive in protecting asphalt concrete against water and frost", Proc. 6th Int. Conf. on Environmental Engineering, Vilnius, May 2005
[64] P. E. Sebaaly, D. N. Little, E. Y. Hajj and A. Bhasin, "Impact of lime and liquid antistrip agents on properties of Idaho hot-mix asphalt mixture", Transportation Research Record 1998, pp.65-67, 2007
[65] S. C. Huang, R. E. Robertson, J. F. Branthaver and J. C. Petersen, "Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage", J. Materials in Civil Engineering 17(6), pp.711-718, 2005
[66] T. W. Kennedy, N. Turnham, J. A. Epps, C. W. Smoot, F. M. Young, J. W. Button and C. D. Zeigler, "Evaluation of methods for field applications of lime to asphalt concrete mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 52, pp.508–534, 1983
[67] T. W. Kennedy, F. L. Roberts and K. W. Lee, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 51, pp.327–341, 1982
[68] B. Brûlé, F. Le Bourlot et B. Simaillaud, « Enrobés drainants: Optimisation de la composition des liants et des mastics », Proc. 5th Eurobitume Congress, Stockholm, paper 3.20, pp.591-595, June 1993
[69] P. C. Hopman, Hydroxide in Filler, Netherlands Pavement Consulting Report n°97316, Utrecht (The Netherlands): Netherlands Pavement Consulting, 1998
[70] C. V. Chachas, W. J. Liddle, D. E. Peterson and M. L. Wiley, Use of hydrated lime in bituminous mixtures to decrease hardening of the asphalt cement, Report PB 213 170, Salt Lake City (Utah, USA): Utah State Highway Department, 1971
[71] L. Johansson, Bitumen ageing and hydrated lime, Ph. D Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden); 1998
[72] H. Plancher, E. L. Green and J. C. Petersen, "Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime – a mechanistic study", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 45, pp.1-24, 1976
[73] A. Verhasselt, F. Verhelst, A. Sainton, « Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée », Proc. 19ème Congrès Belge de la Route, Genval, Sept. 2001
[74] A. Verhasselt and D. Puiatti, "Effect of hydrated lime on ageing behaviour of bituminous mastics", Proc. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, paper 108, pp.746-756, 2004
[75] M. L. Wisneski, J. L. Chaffin, R. R. Davison, J. A. Bullin and C. J. Glover, "Use of lime in recycling asphalt", Transportation Research Record 1535, pp.117-123, 1996
[76] L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "A study of rheological properties of lime treated paving asphalts aged at 60°C in a pressure aging vessel", Fuel Science Technology Int. 13(10), pp.1317-1343, 1995
[77] S.-C. Huang, J. C. Petersen, R. E. Robertson and J. F. Branthaver, "Effect of hydratem lime on long-term oxidative aging characteristics of asphalt", Transportation Research Report 1810, pp.17-24, 2002
[78] A. C. Edler, M. M. Hattingh, V. P. Servas and C. P. Marais, "Use of aging tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 54, pp.118-139, 1985
[79] J. W. H. Oliver, "Results of road trials of two asphalt antioxidants", Transportation Research Record 1488, pp.96-102, 1995
[80] L. S. Johansson, J. F. Branthaver and R. E. Robertson, "The influence of metal-containing compounds on enhancement and inhibition of asphalt oxidation", Fuel Science Technology Int. 14(8), pp.1143-1159, 1996
[81] D. Lesueur and D. N. Little, "Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen", Transportation Research Record 1661, pp.93-105, 1999
[82] R. Miro Recasens, A. Martinez, F. Perez Jimenez and H. Bianchetto, "Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures", Transportation Research Record 1901, pp.10-17, 2005
[83] Y. Decoene, "Enrobés bitumineux perméables, expériences récentes belges", La Technique Routière 2, pp.20-40, 1983
[84] B. Bruce, "Asphalt as a variable – Big Timber test sections", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 56, pp.688-710, 1987
[85] K. Schellenberg und M. Schneider, "Verbesserung von Asphalteigenschaften durch Zugabe von Kalkhydrat – Paxisversuche", Strasse und Autobahn 3, pp.136-141, 2004
[86] D. Sewing, „Verbesserung von Asphaltbelägen mit Kalkhydrat: Neue Ergebnisse aus dem Glarnerland", Strasse und Verkehr 5, pp.19-22, May 2006
[87] D. Sewing, „Aktuelle Untersuchungen zur Verbesserung von Asphalt mit Kalkhydrat", Strasse und Verkehr 3, pp.31-33, March 2008
[88] H. D. Bianchetto y A. I. Asurmendi, "Influencia de la temperatura de fabricación y del contenido de cal en el envejecimiento de mezclas bituminosas: Un caso real", Carreteras 16, pp.54-64, 2008
[89] D. G. Tunnicliff, "Binding effect of mineral filler", Proc Association Asphalt Paving Technologists 36 pp.114–154, 1967

[90] Y.-R. Kim, D. N. Little, I. Song, "Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental characteristics", Transportation Research Record 1832, pp.1-8, 2003
[91] Y.-R. Kim and D. N. Little, "Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics", J. Materials in Civil Engineering 16(2), pp.122-132, 2004
[92] European Committee for Standardization, EN 12591: Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2009
[93] W. Heukelom and P. W. O. Wijga, "Viscosity of dispersions as governed by concentration and rate of shear", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 40, pp.418–435, 1971
[94] D. Lesueur, D. L. Dekker and J.-P. Planche, "Comparison of carbon black from pyrolized tires to other fillers as asphalt rheology modifiers", Transportation Research Record 1515, pp.47–55, 1995
[95] D. Lesueur, "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", Advances Colloid Interface Science 145, pp.42-82, 2009
[96] L. S. Johansson and U. Isacsson, "Effect of filler on low temperature physical hardening of bitumen", Construction Building Materials 12 pp.463-470, 1998
[97] J. P. Wortelboer, H. J. Hoppen, G. Ramond and M. Pastor, "Rheological properties of bitumen/filler mixtures", Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 4.079, 1996
[98] P. C. Hopman, A. Vanelstraete, A. Verhasselt and D. Walter, "Effects of hydrated lime on the behaviour of mastics and on their construction ageing", Proc. 5th Int. Conf. on Durable and Safe Road Pavements, Kielce, vol. 1, pp.59-68, May 1999
[99] M. J. Khattak and V. Kyatham, "Viscoelastic behavior of hydrated lime-modified asphalt matrix and hot-mix asphalt under moisture damage conditions", Transportation Research Record 2057, pp.64-74, 2008
[100] J. Piłat, P. Radziszewski and M. Kalabińska, "The analysis of visco-elastic properties of mineral-asphalt mixes with lime and rubber powder", Proc. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, vol.1, paper 0036, pp.648-654, 2000
[101] S. Timoshenko, Strength of Materials, 2 vol., 3rd edition, Malabar (Florida, USA): Krieger Publishing Company, 1976
[102] L. Francken Ed., Bituminous Binders and Mixes, RILEM report 17, London (UK): E & FN Spon, 1998
[103] European Committee for Standardization, EN 12697-26: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 26: Stiffness, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2004
[104] M. W. Witczak and J. Bari, Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures, Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University, 2004 (http://www.lime.org/Publications/MstrCurve.pdf)
[105] J. Bari and M. W. Witczak, "Evaluation of the Effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt: Use with the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", Transportation Research Record 1929, pp.10-19, 2005
[106] F. T. Sacramento Aragao, Y.-R. Kim and J. Lee, Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska, Report to NDOR Research Project Number P579, Lincoln (Nebraska, USA): University of Nebraska Lincoln, 2008 (http://www.nlc.state.ne.us/epubs/R6000/B276-2008.pdf)
[107] M. Ghouse Baig and H. I. Al-Abdul Wahhab, "Mechanistic evaluation of hedmanite and lime modified asphalt concrete mixtures", J. Materials in Civil Engineering 10(3), pp.153-160, 1998
[108] L. N. Mohammad, C. Abadie, R. Gokmen and A. J. Puppala, "Mechanistic evaluation of hydrated lime in hot-mix asphalt mixtures", Transportation Research Record 1723, pp.26-36, 2000
[109] C. Berthelot, A. Anthony and C. Raducanu, "Mechanistic characterization of antistripping additives in Saskatchewan asphalt mixes", Proc. Annual Conf. Transportation Association Canada, Calgary, Sept. 2005
[110] J. F. Huang, S. P. Wu, L. Pan and Y. Xiao, "Effects of hydrated lime on the dynamic properties of gneiss asphalt mixtures", Proc. 2nd Int. Conf. on Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM), Huangshan (China), pp.1057-1060, 2008
[111] B. Vural Kok and M. Yilmaz, "The effect of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt", Construction Building Materials 23, pp.1999-2006, 2009
[112] R. A. Jimenez, "Methods and treatments to control debonding", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 59, pp.94–137, 1990
[113] P.E. Sebaaly, E. Hajj and E. Berger, "Impact of Lime and Liquid Antistrip on Moisture Sensitivity of HMA Mixtures", Proc. Int. Conf. on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens (Greece), pp. 651-661, June 2007
[114] M. Ameri and M. Aboutalebi Esfahani, "Evaluation and performance of hydrated lime and limestone powder in porous asphalt", Road Materials Pavement Design 9(4), pp.651-664, 2008
[115] C. Gorkem and B. Sengoz, "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", Construction Building Materials 23, pp.2227-2236, 2009
[116] J. B. Sousa, J. Craus and C. L. Monismith, Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, SHRP Report A/IR 91-104, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1991 (http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-318.pdf)
[117] M. Ould-Henia, M. Rodriguez et A.-G. Dumont, Élaboration d'une Méthode Prédictive de l'Orniérage des Revêtements Bitumineux, Lausanne (Switzerland): Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004 (http://infoscience.epfl.ch/record/116262/files/1081-1998-074-Rap-final.pdf)
[118] European Committee for Standardization, EN 12697-22: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 22: Wheel Tracking, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2003

[119] O. K. Kim, C. A. Bell and R. G. Hicks, "The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures", ASTM Special Technical Publication 899, Philadelphia (Pennsylvania, USA): American Soci ety for Testing and Materials, pp.51-72, 1985

[120] American Association of State Highway Officials, AASHO Road Test Report 5, Highway Research Board Special Report 61E, Publication 954, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1962

[121] LCPC-SETRA, French Design Manuel for Pavement Structures, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997

[122] FEHRL-ELLPAG, Making Best Use of Long-Life Pavements in Europe – Phase 1: A Guide to the Use of Long-Life Fully-Flexible Pavements, Brussels (Belgium): Forum of European National Highway Research Laboratories, 2004

[123] European Committee for Standardization, EN 12697-24: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 24: Resistance to Fatigue, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2004

[124] S. Raghava Chari and K . A. Jacob, "Influence of lime and stone dust fillers on fatigue properties of bituminous concrete mixes", Highway Research Bulletin 23, pp.19-32, 1984

[125] Groupe National Bitume, Etude de la Fissuration par le Haut des Bétons Bitumineux, Rapport de Recherche CR22, Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999

[126] B. Ferne, "Long-life pavements: a European study by ELLPAG", Int. J. Pavement Engineering 7, pp.91-100, 2006

[127] University of California at Berkeley, Oregon State University and Austin Research Engineers, Accelerated Performance--Related Tests for Asphalt Aggregate Mixes and Their Use in Mix Design and Analysis Systems, SHRP Report A-417, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1994 (http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-417.pdf)

[128] R. Blab und B. Hofko, Eignung von mit Kalkhydrat und polymermodifiziertem Bindemittel hergestelltem Asphaltmischgut für hoch belastete Verkehrsflächen, Report for Project 0727E, Wien (Austria): Technische Universität Wien, 2008

[129] PIARC (World Road Association), Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumens with Additives in Road Pavements, Routes/Roads 303, 1999 (also available from Paris (France): Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) [130]

[131] M. Buchta und C. Kunesch, "Asphaltmodifizierung mit Kalkhydrat - Ergebnisse aus der Praxis", Gestrata Journal 111, pp.7-12, 2005 (http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_111.pdf)

[132] C. Kunesch und S. Neumann, "Kalkhydrat – Mischgut für das hochrangige Strassennetz", Gestrata Journal 126, pp.20-24, 2009 (http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_126.pdf)

[133] G. Orange, D. Dupuis, J.-V. Martin, F. Farcas, C. Such and B. Marcant, "Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties–microstructure relationship", Proc. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, vol.1, pp.733-745, 2004

[134] T. S. Arnold, S. P. Needham and J. Youtcheff, "The Use of Phosphoric Acid as a Modifier for Hot Mix Asphalt", Proc. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, paper 09-1564, 2009

[135] G. Baumgardner, J.-V. Martin, R. B. Powell and P. Turner, "Polyphosphoric acid and styrene-butadiene-styrene block copolymer modified asphalt: Evaluation of paved section at the NCAT test track built in 2000 and 2003", Proc. 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, paper 401-029, 2008

[136] W. Ricardo De Grande, A. Paula Furlan, A. Carlos Gigante, L. M. Gutierrez Klinsky and G. T. Pessa Fabbri, "Efeitos da cal hidratada e do acido polifosforico na suscetibilidade termica de misturas asfalticas densas", Proc. 23rd Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes Congress, paper AC381, 2009

[137] K. Stuart, Moisture Damage in Asphalt Mixtures – A State--of-the-Art Report, Report FHWA-RD-90-019, MacLean (Virginia, USA): Federal Highway Administration, 1990 (http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013679.pdf)

[138] C. W. Curtis, K. Ensley and J. Epps, Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions including Adhesion and Absorption, SHRP Report A-341, Washington (District of Columbia, USA): National Research Council, 1993 (http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-341.pdf)

[139] I. Ishai and J. Craus, "Effect of the filler on aggregate--bitumen adhesion properties in bituminous mixtures", Proc. Association Asphalt Paving Technologists 43, pp.228–258, 1977

[140] J. Gallego Medina, "Efectos del hidrato de cal como aditivo de mezclas bituminosas", Carreteras 123, pp.68-80, 2002

[141] J. Blazek, G. Sebor, D. Maxa, M. Ajib and H. Paniagua, "Effect of hydrated lime addition on properties of asphalt", Petroleum and Coal, 42(1), pp.41-45, 2000

[142] U. Bagampadde, U. Isacsson and B. M. Kiggundu, "Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes", Road Mater Pavement Design 5, pp.7–43, 2004

[143] D. N. Little, Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Dubuque (Iowa, USA): Kendall/Hunt Publishing Company, 1995

[144] F. Durrieu, « Influence des produits polaires des bitumes routiers sur leurs propriétés interfaciales ». Bull Liaison Lab Ponts Chaussées, Spécial V, pp.37-43, 1977

[145] National Lime Association, How to Add Hydrated Lime to Asphalt – An Overview of Current Methods, Arlington (Virginia, USA): National Lime Association, 2003 (http://www.lime.org/howtoadd.pdf)

[146] J. W. Button, "Maximizing the Beneficial Effects of Lime in Asphalt Paving Mixtures", ASTM STP 899 pp.134-146, 1984

[147] M. McCann and P. E. Sebaaly, "Evaluation of Moisture Sensitivity and Performance of Lime in Hot-Mix Asphalt: Resilient Modulus, Tensile Strength, and Simple Shear Tests", Transportation Research Record 1832 pp.9-16, 2003

[148] A. L. Bock, D. Hartmann, J. Budny, L. P. Specht e J. A. P. Ceratti, „Estudio laboratoria sobre os efeitos de diferentes formas de adiçao de cal a concreto asfaltico", Teoria e Pratica na Engenharia Civil 14, pp.59-69, 2009

[149] M. I. Al-Jarallah and K. W. Lee, "Evaluation of hydrated lime as an antistripping additive for asphalt mixtures", J. Eng. Sci. King Saud Univ. 13(1) pp.65-83, 1987
[150] Transportation Research Board , Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar - San Diego February 2003, Miscellaneous Report, Washington (District of Columbia, USA): Transportation Research Board, 2003
[151] F. Mücke und F. Stolz, „Möglichkeit zur verbesserung von Asphalteigenschaften", Asphalt, Heft 7, 2004
[152] G. Bordonado, « Une expérience d'enrobés drainants sur l'autoroute A1 », Revue Générale des Routes et Aérodromes 625, pp.47-50, décembre 1985
[153] A. Sainton, « Les aspects techniques des enrobés drainants au bitume caoutchouc Flexochape – Procédé Drainochape », Revue Générale des Routes et Aérodromes 618, pp.67-70, avril 1985
[154] J. T. Van der Zwan, T. Goeman, H. J. A. J. Gruis, J. H. Swart and R. H. Oldenburger, "Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: State of the art review", Transportation Research Record 1265, pp.95-110, 1990
[155] H.-M. Schiffner, "Test method for determining hydrated lime in asphalt", Cement-Lime-Gypsum International 56(6), pp.76-82, 2003
[156] Technische Prüfvorshriften für Gesteinskörnungen im Strassenbau, Teil 3.9, Bestimmung des Calciumhydroxidgehaltes in Mischfüllern, Ausgabe 2008
[157] European Committee for Standardization, EN 12697-1: Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 1: Soluble Binder Content, Brussels (Belgium): European Committee for Standardization, 2005
[158] T. S. Arnold, J. Rozario and J. Youtcheff, "New lime test for hot mix asphalt unveiled", Public Roads 70(5), March/April 2007
[159] T. S. Arnold, M. Rozario-Ranasinghe and J. Youtcheff, "Determination of lime in hot mix asphalt", Transportation Research Record 1962, pp.113-120, 2006

EuLA

Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego
www.wapno-info.pl

Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego
ul. Toruńska 5, 30-056 Kraków, Poland
Tel. +48 12 626 18 76, Fax +48 12 626 28 87
info@wapno-info.pl, www.wapno-info.pl

EuLA - European Lime Association
Rue des Deux Eglises 26, B-1000 Brussels, Belgium
Tel. +32 2 210 44 10, Fax +32 2 210 44 29
info@eula.eu, www.eula.eu