

Hydrauliska filler som beständighetsförbättrare i asfalt

Jonas Ekblad
Robert Lundström
Erik Simonsen

Samarbetsprojekt mellan:
Cementa AB
NCC Roads

NCC Rapport 2010-01
SBUF projekt 12095
MinBaS projekt 2.2: 2



FÖRORD

Detta projekt har initierats och bedrivits i samarbete mellan NCC Roads och Cementa AB. Utöver de deltagande företagen har även Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och utvecklingsprogrammet Mineral-Ballast-Sten (MinBaS II), bidragit till finansieringen.

De laborativa delarna av undersökningen har i huvudsak utförts vid NCC:s laboratorium i Upplands Väsby och där i synnerhet Thomas Åström som tackas för noggrant, intresserat och skickligt arbete.

Arbetet har varit organiserat i en arbetsgrupp bestående av:

- Jonas Ekblad NCC Roads
- Robert Lundström NCC Roads
- Erik Simonsen Cementa AB

och en styrgrupp där även följande medlemmar ingått:

- Staffan Hjertström Cementa AB
- Sven-Erik Johansson Cementa AB
- Nils Ulmgren NCC Roads

Till detta kommer även en av SBUF utsedd representant som inledningsvis var Erik Malmqvist, Skanska, som i den avslutande delen av projektet ersattes av Kenneth Olsson, likaledes från Skanska.

Robert Lundström
Upplands Väsby

Sammanfattning

Vattens nedbrytande inverkan på asfalt har studerats åtminstone sedan 1930-talet men fortfarande är fenomenets grundläggande mekanismer inte kända i detalj. Problemen reduceras dock normalt genom att asfalten tillverkas med tillsatser som t.ex. aminer, kalk och cement.

Denna undersökning studerar inverkan av olika typer av cement och filterkalk som är en biprodukt vid cementframställning. Cementtyperna skiljer sig främst med avseende på kornstorleksfördelning. Beständighetsprovningen har utförts enligt vändskakmetoden. Utöver detta har eventuell förstyvande inverkan av hydrauliska filler undersökts genom mätning av viskositet på filler-bitumenblandningar samt lågtemperaturbrott (enl. TSRST) på beläggning.

Resultaten visar en väsentlig minskning av nötning efter vändskakprovning för samtliga cementtyper och ett av filterkalken upp till 1 vikt-% av ersatt mängd av total mängd stenmaterial. Tillsatsmängder utöver detta medför ingen signifikant ytterligare förbättring. De olika cementtyperna visar sinsemellan mycket snarlika resultat. Vad avser förstyvande inverkan uppmättes ingen egentlig skillnad mot referensblandning vare sig avseende viskositet eller lågtemperaturbrott.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	4
2. TIDIGARE ERFARENHETER	5
3. METODER OCH PROVNINGAR	9
3.1. MATERIAL	9
3.2. METODER OCH PROVER	12
3.2.1. Vändskakmetoden.....	13
3.2.2. TSRST.....	15
3.2.3. Viskositet.....	16
3.2.4. Hålrum enligt Rigden.....	18
3.2.5. Sammanfattning av provningar.....	18
4. RESULTAT OCH ANALYS	19
4.1. BESTÄNDIGHET	19
4.2. FÖRSTYVANDE INVERKAN	21
4.2.1. Viskositet.....	21
4.2.2. TSRST.....	25
5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER	27
6. REFERENSER	31

1. INLEDNING

Denna undersökning behandlar det synbarligen eviga problemet med nedsatt beständighet hos asfaltbeläggning orsakad av vatten; i en inledande kommentar noterar Proudly (1959) reducerad livslängd hos vissa asfaltbeläggningar och konstaterar att de grundläggande orsakerna inte är kända och senare, i en liknande introduktion till en rapport från NCHRP (Epps m.fl., 2000), dras slutsatsen att insatserna under det mycket ambitiösa forskningsprogrammet SHRP (Strategic Highway Research Program) endast rönt begränsad framgång avseende grundläggande kunskap om mekanismerna bakom beständighetsproblem.

För en betydande del av vägnätet är asfaltbeläggningsens beständighet en begränsande faktor för dess tekniska livslängd; det är snarare miljön och klimatet än trafiklast som bryter ned vägen. Även om det i de flesta fall säkerligen är en kombination där brister i beständighet accelereras av trafik. För samhället i stort finns en stor besparingspotential i en generell beständighetsförbättring. Exempelvis uppskattas det att varje procent förlängd livslängd av det nordiska vägnätet innebär en besparing på ungefär 80 miljoner kronor per år (Nordisk Industrifond, 2004).

En stor del av beständighetsproblemen kan relateras till påverkan av vatten, vilket kan visa sig som brister i gränssnittet mellan sten och bitumen eller nedsatt kohesion hos det sammanhållande bindemedlet (eller mastixen, dvs. bitumen med finmaterial). Skadorna yttrar sig ofta som sten- och materialsläpp vilket i förlängningen kan leda till större skador. Avgörande för asfalts vattenkänslighet är egenskaperna hos kombinationen sten och bitumen. Sannolikt är mycket av problematiken relaterad till ytegenskaper hos de ingående materialen och till gränssnittet dem emellan. Beständighetsproblem har överlag visat sig vara mycket svåra att prediktera utifrån de egenskaper som normalt mäts för bergmaterial och bitumen. Till yttermera visar den samlade forskningen inga tydliga mönster även om mer forskningsorienterade mätmetoder används. Möjligen förstärks beständighetsproblemen även av en trend mot grövre och öppnare massatyper och en ökad variation i använda bitumens egenskaper. Asfaltproduktion är i regel starkt erfarenhetsbaserad; man vet vilka bitumen- och stenmaterialkombinationer som fungerar och vilka brister man eventuellt har att hantera. Ändras något av de ingående materialen faller denna erfarenhetsrymd med till synes svårförklarliga skador som följd.

För att förbättra beständigheten för problematiska kombinationer av bindemedel och stenmaterial används vidhäftningsbefrämjande tillsatser, främst aminer, hydratkalk (släckt kalk) och portlandcement. I allmänhet har tidigare undersökningar påvisat positiv effekt, vad avser vattenkänslighet, av tillsats av portlandcement. I dessa undersökningar har i regel Byggcement, normalt vid en och samma koncentration, utvärderats. Denna undersökning avser att fördjupa kunskapen om effekten av olika typer portlandcement samt s.k. filterkalk eller CKD (cement kiln dust). Cementsorterna skiljer sig främst avseende kornstorleksfördelning medan CKD är delvis en annan

materialtyp med större andel kalksten och bränd kalk. Undersökningen omfattar även varierade relativa andelar tillsatsmedel.

Med filler avses material (eller enskild fraktion) som huvudsakligen innehåller partiklar mindre än 63 µm. Att olika fillertyper ger upphov till olika reologiska effekter hos den varma massan är ett från praktiken väl känt fenomen. Detta är även väl dokumenterat av bl.a. Rigden (1947), Heukelom (1965), Anani och Al-Abdul-Wahhab (1982), och Kandhal m.fl. (1998). Fillrets förstyvande inverkan på filler-bitumenblandningarna beror av en mängd faktorer och egenskaper hos såväl filler som bindemedel. De grundläggande mekanismerna bakom förstyvningen är inte i detalj kända och är troligen en komplex samverkan mellan kemiska och fysikaliska effekter. I många fall har tillsatsmedel av portlandcementtyp medfört en förstyvande effekt, vilket eventuellt kan påverka såväl massans läggbarhet som beläggningsens lågtemperaturegenskaper negativt. En upplevd effekt är att vissa filler gör massan mer trögflytande och därmed svårare att hantera vid läggning. Den förstyvande effekten undersöks genom mätning av viskositet hos filler-bitumenblandningar. För att bedöma eventuell inverkan av förstyvande filler på beläggningsens lågtemperaturegenskaper bestäms brottemperaturen enligt TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test).

Sammanfattningsvis var undersökningens övergripande syfte att undersöka och kvantifiera inverkan av olika typer och halter av vidhäftningsförbättrande mineraliska filler på beständighet hos asfaltmastix, mätt enligt vändskakmetoden. Hypotesen var att beständigheten påverkas av det aktiva fillrets kornstorleksfördelning. Samtidigt undersöks eventuella negativa konsekvenser i form av förstyvning vid läggning och försämrad hållfasthet vid låga temperaturer.

2. TIDIGARE ERFARENHETER

Som redan nämnts är beständighetsproblem näppeligen något nytt utan ett problem som personer inom såväl produktion som FoU kontinuerligt konfronteras med. Detta har resulterat i mängder av publicerade undersökningar på olika nivåer. Samtidigt har problemets komplexitet medfört att det varit svårt att utifrån gjorda undersökningar dra grundläggande generella slutsatser med följd att en stor andel av publicerade rapporter varit av problemlösande och beskrivande karaktär, dvs. snarare än att försöka hitta grundläggande orsak-verkanssamband har man redovisat relativa effekter av förändring av olika parametrar. I många fall har olika kombinationer av stenmaterial, bindemedel och vidhäftningsförbättrande tillsatser undersökts. Sammantaget ger detta att litteraturen förvisso är omfattande men att det är svårt att kortfattat generalisera erhållna resultat. Målsättningen med litteraturöversikten i denna rapport är endast att ge en översiktlig, något problematiserad, bild av tidigare erfarenheter med tyngdpunkt på användning av portlandcement. Översikten avses också ge en orientering över användning av filterkalk (CKD).

Beläggningsskador som beror av nedsatt beständighet kan yttra sig på ett flertal sätt, bl.a. genom sprickbildning, ökat spår djup, stensläpp och bruksförluster. Litteraturen skiljer i regel mellan adhesiva respektive kohesiva skademekanismer. Skador uppträder som s.k. stripping i gränssnittet sten/bindemedel och koheshionsförlust, i massa och bindemedel, vilket medför mekanisk försvagning som i förlängningen ger upphov till skador i beläggnings. I många fall är det inte möjligt att särskilja dessa mekanismer utan de skall snarast ses som ett försök till någon typ av systematisering. Till detta kommer även belastning orsakad av trafik och övrigt klimat.

Ansatser till mer fundamental beskrivning av de ingående materialens egenskaper och samverkan har hittills endast rönt begränsad framgång, vilket indikeras i litteratur- och erfarenhetsgenomgångar av t.ex. Rice (1959), Bagampadde m.fl. (2004) och Caro m.fl. (2008a, 2008b). Beständighetsproblematiken avsattes även betydande resurser under SHRP (Strategic Highway Research Program), dels för att hitta och beskriva de fundamentala fysikaliska/kemiska mekanismer som påverkar beläggnings (bristande) fysiska uppträdande i fält, dels också för att utveckla mätmetoder som med större skärpa kan prediktera framtida egenskaper för verklig beläggning. Enligt Epps m.fl. (2000) rönne detta forskningsprojekt endast mycket begränsad framgång och en slutsats var att ingen metod föreföll ge högre förklaringsgrad än den Lottman-liknande metod man redan använde.

Nedbrytningsmekanismens komplexitet återspeglas även i den uppsjö av olika provmetoder och procedurer som återfinns i litteraturen. Bagampadde m.fl. (2004) anger 38 olika metoder och Caro m.fl. (2008b) 35 stycken. Metoderna varierar från visuella bedömningar till tämligen invecklade mekaniska provningar. Trots den rika floran av procedurer fortsätter metoder att utvecklas, t.ex. Birgisson m.fl. (2004), Chen och Huang (2008) och Airey m.fl. (2007). En nackdel med i stort sett samtliga dessa provmetoder är att de inte ger någon möjlighet att på ett tillförlitligt sätt prediktera tidsförloppet, dvs. beläggnings nedbrytningshastighet. Metoderna ger normalt endast information i termer av godkänt/icke godkänt. Tidsskalan fångas snarast implicit i ställda kravnivåer, vilka dock även beror på trafikmängder och vägens viktighetsnivå. Försök att utifrån några mätbara egenskaper hos de ingående materialen, sten och bitumen, prediktera vattnets inverkan på de mekaniska egenskaperna har visat sig vara svårt och i vissa fall leda till mycket komplicerade (numeriska) modeller (t.ex. Kringos m.fl. 2008a, 2008b) vars praktiska tillämpbarhet är oprövad och begränsad.

De flesta av de i praktiken använda metoderna består i princip av två faser: provkropparna genomgår någon typ av hydraulisk konditionering, som kan inkludera frys/tö och salt, efter vilken man bestämmer någon mekanisk egenskap eventuellt i relation till torrt lagrade prover. Den kanske mest kända brukar benämnas Lottman-metoden (Lottman, 1982). Denna metod, eller snarlika varianter, återfinns i många publikationer även om metoder baserade på samma tankegångar återfinns i undersökningar åtminstone sedan 1930-talet (Goetz, 1959). Lottmans metod innebär att tre grupper laborietillverkade provkroppar utsätts för olika behandlingar: (1)

torrlagring, (2) vattenmätning under vakuum och (3) vattenmätning under vakuum följt av frysning och vattenlagring vid förhöjd temperatur. Efter konditionering bestäms provkropparnas indirekta draghållfasthet som kan föregås av bestämning av styvhetsmodul. Sedan beräknas kvoterna för hållfastheterna, eller styvhetsmodul, efter de olika konditioneringarna.

För att i praktiken förbättra vattenkänsliga asfaltmassor tillsätter man olika vidhäftningsförbättrande medel. Vanliga tillsatser är aminer, kalk och portlandcement. I en omfattande studie inventerade Hicks (1991) vidhäftningsförbättrare som används, eller föreskrivs, i USA:s olika delstater. Sammanfattningsvis konstaterade Hicks att vattenrelaterad beläggningsskada är ett allmänt förekommande problem men att omfattningen begränsas av förbättrad förprovning och användning av additiv. I drygt 60 % av de svarande staterna används någon typ av additiv: 58 % av dessa använde amin, 18 % kalk och 8 % portlandcement. De svarande staterna ombads även bedöma effektiviteten hos använda additiv. Kalk bedömdes som mycket effektivt och därefter portlandcement. För aminer var erfarenheten blandad, i vissa fall bedömdes det som mycket effektivt men i andra fall endast synnerligen marginellt förbättrande jämfört med massor utan tillsats. Vad avser mineraliska filler har de flesta studier som publicerats använt kalk (i huvudsak släckt kalk) som vidhäftningsförbättrare. Schmidt (1974) redovisar försök med tillsats av 1,3 % cement och släckt kalk i såväl varmassor som emulsionsmassor. En slutsats i Schmidts artikel är att skada, mätt som reducerad resilientmodul efter vattenkonditionering och frys/tö-cykler, är avsevärt lägre för massor med tillsatt cement eller släckt kalk, vilket gäller för både varmassor och emulsionsmassor. I en omfattande studie undersökte Jimenez (1990) inverkan av 5 olika tillsatser för 3 olika stenmaterial mätt med 3 olika metoder. Dessutom studerades inverkan av packningsmetod och olika hålrumshalter. Använda tillsatser var bl.a. portlandcement och kalk (men även silan och amin). Den omfattande provmatrisen möjliggjorde en mängd analyser men tydliga slutsatser var effekten av hålrumshalt och portlandcements förbättrande inverkan vad avser indirekt draghållfasthet efter vattenlagring. Jimenez använde huvudsakligen 1,5 % tillsats av mineraliskt filler. Portlandcement har även använts för att förbehandla stenmaterialets ytor främst med syfte att förbättra de mekaniska egenskaperna men detta har även en beständighetsförbättrande effekt (t.ex. Guirguis m.fl. 1982; Bayomy, 1992). Andelen tillsatt cement beror på aktuell kornstorleksfördelning men är i dessa fall regel ganska hög, typiskt kring 5 % och högre.

Hydrauliskt aktiva filler har också använts för att förbättra beständigheten hos emulsionsmassor. Niazi och Jalili (2009) undersökte bl.a. beständigheten, bestämd som kvoten av indirekt draghållfasthet för vattenkonditionerade och torrlagrade prov, för laboratorietillverkade prov med tillsats av portlandcement och släckt kalk. I deras undersökning förbättrades beständigheten avsevärt och de drar slutsatsen att portlandcement är att föredra baserat på erhållna resultat och hanteringsmässiga aspekter. Emulsionsmassor har även studerats i Sverige av bl.a. Jacobson (2003) som

redovisar resultat från en 3-årig uppföljning av emulsionsmassor som användes för stabilisering. Vad avser beständigheten mot vatten, mätt som vattenkänslighet (vidhäftningstal), noteras en initial förbättring med tillsats av cement. Denna förbättring klingar snabbt av och efter ett, eller ett par år, är vattenkänsligheten i paritet med referensbeläggningen utan cementtillsats. Malmqvist (2006) redovisar mätningar av vattenkänslighet för kalla massor med tillsats av cement där en viss förbättring med försiktighet kan skönjas.

Vad avser uppföljningar av verkligt utfall på vägar eller fältförsök är publikationerna färre. I en sammanfattning av kunskapsläget (state-of-the-art) drar Bagampadde m.fl. (2004) slutsatsen att endast ett fåtal fältförsök har utförts eller dokumenterats där portlandcement använts i beständighetsförbättrande syfte; detta i motsats till kalk som använts i större utsträckning. I Sverige har dock en del försök genomförts och redovisats. Beständigheten hos provkroppar av asfaltgrus (ag) undersöktes av Isacson (1990). Isaccsons undersökning omfattade prov borrhade på väg och separat laboratorietillverkade provkroppar. Använda tillsatser var portlandcement och Wetfix. För prover borrhade i fält erhöles inte helt tydliga resultat men med en viss indikation på förbättrad vidhäftning med tillsats av portlandcement. För de laboratorietillverkade provkropparna redovisar Isacson signifikant förbättring med tillsats av portlandcement jämfört med såväl referens (utan tillsats) som tillsats av Wetfix. Malmqvist och Olsson (2004) redovisar en uppföljning under 9 år och visar att tillsats av portlandcement eller Merit (baserat på masugnsslagg) ger förbättrad draghållfasthet jämfört med referens utan tillsats, under hela den undersökta perioden. Resultat från en långtidsuppföljning, redovisad av Malmqvist och Jansson (2008), visar ingen tydlig påverkan av vidhäfningsförbättrande tillsatser vad avser vattenkänslighet på borrhade provkroppar, bestämt som kvoten av indirekt draghållfasthet för konditionerade resp. torra provkroppar. De studerade tillsatser av cement, släckt kalk och amin (Wetfix) i samband med läggning och sedan efter 3 resp. 6 år. För de platser där samtliga additiv användes finns det ingen statistiskt signifikant skillnad mellan referenssträckor och sträckor med tillsatser (vår beräkning). Inledande försök med bestämning av vidhäftning mellan ballast och bitumen (enligt rullflaskemetoden) visade signifikant förbättring med tillsats av Wetfix, medan övriga skillnader kan förklaras med slumpfel. Malmqvist och Jansson påpekar vikten av låg hålrums halt för god beständighet. I deras undersökning var uppmätta hålrums halter relativt låga för samtliga sträckor vilket troligen bidrar till att skillnaden mellan sträckorna är liten. Allmänt är hålrums halten av stor vikt även om det inte går att entydigt belägga utifrån deras undersökning.

Sin huvudsakliga användning inom vägbyggnad har, enligt publicerade undersökningar, CKD fått som bindemedel vid jordstabilisering, antingen för kvittblivning eller som hydrauliskt bindemedel, eventuellt som ersättning för portlandcement och kalk. Ett flertal rapporter som beskriver användning av CKD för stabilisering har publicerats t.ex. Collins och Emery (1983), Baghdadi m.fl. (1995) och, Si och Herrera (2007). Miller och Azad (2000) konstaterar att den en-axiella tryckhållfastheten för jord kan höjas

väsentligt med inblandning av CKD, och för plastiska jordar kan plasticitetsindex sänkas. I litteraturen förekommer det mycket få redovisningar av CKD i asfalt. Siddique (2006) nämner endast två lokalt publicerade rapporter från 1980-talet. Taha m.fl. (2002) fann att stora delar av fillerdelen kunde ersättas med CKD med bibehållen kvalitet på beläggningen (Marshallproportionering). Utgångspunkten i deras undersökning var troligen kvittblivning av ett CKD-överskott snarare än ett additiv för att förbättra asfaltens egenskaper. De redovisar inga resultat, annat än hållrumshalter, som kan vara till ledning för att bedöma beständigheten. Detta samtidigt som de använt avsevärt högre halter (5 vikt-% av massan) än vad som använts i denna undersökning. I något fall (Taha, 2007) har CKD använts för att stabilisera återvunnet asfaltgranulat som bärlager.

3. METODER OCH PROVNINGAR

3.1. MATERIAL

Filterkalk är den svenska benämningen på CKD, Cement Kiln Dust, och LKD, Lime Kiln Dust, vilka båda genereras vid produktion av cement resp. kalk. Filterkalk utgörs av det damm som uppkommer vid olika delar av bränningsprocessen och som samlas i anläggningens filterutrustningar. Andelen CKD vid cementframställning kan vara ganska stor. Collins och Emery (1983) anger att 10-20 % av inmatad mängd uppsamlas som damm vid någon del av processen. I regel återförs dock en stor mängd, eller allt, av detta till processen. Sammansättningen av filterkalk beror av en mängd faktorer som: råmaterial, processtyp, bränsle, filterutrustning och var i processen dammet är uppsamlat. Detta gör det svårt att tala om CKD som något enhetligt material eftersom inomvariationen är avsevärd. De varierar såväl i kornstorleksfördelning som kemisk sammansättning. I regel är CKD en blandning av: opåverkat råmaterial, delvis kalcinerat material och klinker, fri kalk och alkalisalter. Vid cementproduktion är i regel målsättningen att uppsamlat damm återförs tillverkningsprocessen så att inget nettoöverskott uppstår. Under vissa betingelser är detta dock inte möjligt utan ett överskott uppkommer. Det kan även vara så att för vissa ändamål är CKD en önskvärd produkt som kan ha direkt avsättning. Uppkomna överskott har provats i en mängd olika sammanhang varav de med störst avsättning är (EPA, 1993):

- avfalls- och avloppsbehandling
- jordbruk (jordförbättringsmedel)
- filler i olika material (cement, asfalt, glas)
- jordstabilisering vid vägbyggnad.

Vad avser användning inom vägbyggnad har det främsta användningsområdet varit som medel för jordstabilisering, tillsammans med, eller i stället för portlandcement och kalk.

I denna undersökning har två olika CKD-typer använts, med olika ursprung och sammansättning.

Stenmaterialet som användes som basmaterial och referens i denna undersökning kommer från Skärlunda (Östergötland) och är en folierad medelkornig granit med kvarts, K-fältspat och plagioklas som huvudsakliga beståndsdelar. Fyllosilikater utgör ung. 10 % baserat på punkträkning: 4 % muskovit, 3 % biotit och 2,5 % klorit. I en tidigare undersökning (Ekblad och Isacsson, 2008) uppmättes antalet fria glimmerpartiklar i den krossade fraktionen 0,125-0,25 mm till 12 % (bestämt enligt VVMB 613).

Den huvudsakliga experimentplanen var 2-faktoriell med tillsatstyp och halt som oberoende variabler. I undersökningen användes 3 olika cementtyper och 2 olika filterkalk. De mineraliska tillsatsmedlen, deras förkortade namn och huvudsaklig råvarukälla (täkt) sammanfattas i tabell 1. Täkternas numrering anger endast samhörighet mellan fillertyperna som har sitt ursprung från sammanlagt tre olika platser i Sverige.

Tabell 1. Hydrauliska filler, förkortning och råmaterialets ursprung

Filler	Förkortning	Ursprung
Byggcement std	B	1
Snabbhårdnande cement	SH	1
Microfine 20	MF	2
Filterkalk 1	CKD-1	3
Filterkalk 2	CKD-2	2

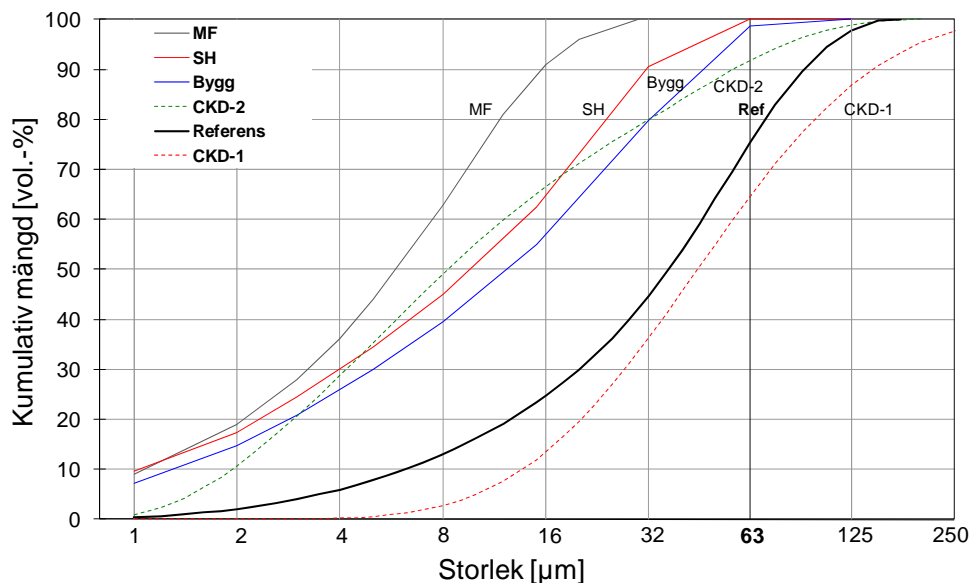
Tabell 2 sammanfattar materialens kemiska sammansättning och figur 1 åskådliggör samtliga fillers kornstorleksfördelning. Karakteristiska data för resp. kornstorleksfördelning visas även i tabell 3.

Tabell 2. Kemisk sammansättning av hydrauliskt filler (vikt-%)

	B	SH	MF	CKD-1	CKD-2
CaO	61*	63*	63*	62*	46*
SiO ₂	19	19	19	19	12
Al ₂ O ₃	4,9	5,2	3,6	3,7	2,8
Fe ₂ O ₃	2,8	2,9	2,7	2,1	3,5
SO ₃	3,6	3,6	3,3	5,2	0,5
* Aktivt CaO:	8,0	9,0	21,6	34,8	2,6

Byggcement och Snabbhårdnande cement (B resp. SH) uppvisar snarlik kemisk sammansättning vilket är förväntat då de producerats vid samma anläggning; skillnaden

dem emellan avser främst kornstorleksfördelningen. Microfine (MF) har något lägre halt aluminiumoxider jämfört med de båda andra cementtyperna och i nivå med filterkalken. De båda filterkalken avviker från cement främst vad avser andelen CaO: CKD-1 har hög andel aktivt CaO, ungefär hälften utgörs av aktivt CaO, medan CKD-2 har lägre totalandel CaO jämfört med samtliga övriga tillsatsmedel.



Figur 1. Kornstorleksfördelningar för tillsatta fyller (laserdiffraktion).

Kornstorleksfördelningarna i figur 1 är uppmätta med laserdiffraktion. Vid beräkningen av partikelstorleksfördelningen görs bl.a. antagandet att partiklarna är sfäriska och algoritmen beräknar en fördelning som ger samma optiska uppträdande som vore partiklarna sfäriska. Dessutom ges fördelningen som andel av volym. Detta gör att fördelningarna inte är direkt jämförbara med den typ av fördelningar som är praxis inom vägteknik som baseras på viktsandelar sorterade med kvadratiska öppningar; dels sorterar kvadratiska öppningar på partikelns mitre dimension, till skillnad från laserdiffraktion som beräknar en sfärisk partikel med en tvärsnittsarea motsvarande den verkliga partikelns medeltvärsnittsarea, dels uppstår det en skillnad mellan andelar baserade på volym resp. vikt om inte partiklarna har samma densitet.

I denna undersökning är det skillnader i kornstorleksfördelning mellan de olika fillertyperna. Det tydligaste är att referensen och CKD-1 är något förskjutna mot större partiklar jämfört med de övriga. De tre cementtyperna ordnas enligt förväntat mönster med Microfine 20 (MF) som den finaste och Byggcement (B) som den med störst partiklar.

Fördelningarna i figur 1 kan sammanfattas i beskrivande beräknade parametrar. Tillsammans med uppmätt korndensitet och hålrumstal enligt Rigden (se avsnitt 3.2.4) ges D_{10} dvs. den partikelstorleken som 10 % av partiklarna är mindre än (jämför 10-percentil), och D_{90} (90 % < D_{90}), i tabell 3. Huvuddelen av materialet (80 %) befinner

sig inom de gränser som ges av D_{10} och D_{90} . Beräkningen av partiklarnas medelstorlek baseras på uppmätt fördelning medan D_{10} och D_{90} baseras på passade fördelningar.

Tabell 3. Egenskaper för de olika fillertyperna

Filler	Medelstorlek (vol.) [μm]	D_{10} [μm]	D_{90} [μm]	Korndensitet* [kg/m^3]	Hålrumsstal enl. Rigden [vol.-%]
ref	47	7	100	2400	31
B	25	1	50	2740	30
SH	19	1	37	2760	32
MF	9	1	16	2710	35
CKD-1	70	13	144	2560	50
CKD-2	21	2	57	2450	35

*SS-EN 1097-7. Bestämning av korndensitet hos filler - Pyknometermetod

CKD-1 särskiljer sig med ett avsevärt högre Rigdenhålrums än de övriga. Korndensiteten är något högre för cementen jämfört med de övriga. En gruppindelning baserad på de tre parametrar som beskriver fördelningen, bekräftar det visuella intrycket av figur 1, referensen och CKD-1 bildar en grupp, och cementen och CKD-2 en annan.

Bindemedlet tillhandahölls av Nynas AB och var Laguna 70/100 från Venezuela. De grundläggande egenskaperna sammanfattas i tabell 4. Bindemedlets syratals har bestämts i en tidigare undersökning (Bagampadde och Isacsson, 2006) där samma bindemedelstyp användes.

Tabell 4. Bindemedlets egenskaper

Penetration vid 25 °C [dmm]	Mjukpunkt K&R [°C]	Dyn. visk. vid 135 °C [mPas]	Syratal* [mg KOH/g]
77	45,0	370	3,6

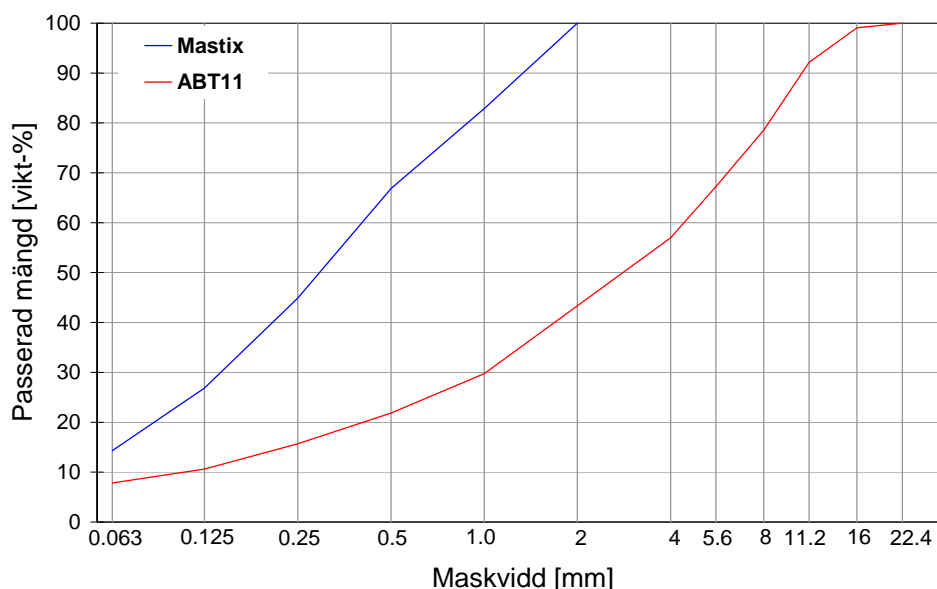
* enl. ASTM D664: Bagampadde och Isacsson (2006)

3.2. METODER OCH PROVER

Projektet omfattar huvudsakligen laboratorieprovning enligt vändskakmetoden: bestämning av vattenkänslighet på finbruksdelen (eller mastix). Denna metod har tidigare utvärderats och använts i ett flertal SBUF-projekt (t.ex. Ulmgren, 2002; Ulmgren m.fl., 2003; Ulmgren och Segerpalm, 2005). Provningsen kompletteras med mätningar av de olika tillsatsernas förstyvande effekt genom bestämning av skenbar dynamisk viskositet hos filler-bitumenblandningar och TSRST på asfaltprovkroppar.

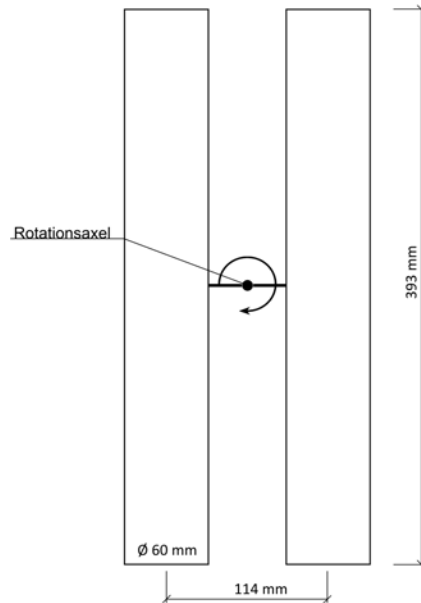
3.2.1. VÄNDSKAKMETODEN

Enligt vändskakmetoden tillverkas provkroppar som sedan vattenlagras och utsätts för nötning. Mastixproven tillverkas av material med största stenstorlek 2 mm och kornstorleksfördelning enligt figur 2.



Figur 2. Kornstorleksfördelning för mastix och asfaltmassa.

Den nominella bindemedelshalten var i denna undersökning 6,7 % av total vikt. Nedan ges en kortfattad beskrivning av metoden. Stenmaterial och bitumen blandas vid 150 °C varefter 40 g mastix packas i en form med diametern 30 mm. Provet packas med en stämpel, över hela överytan, med en hastighet av 20 mm/min. När belastningen uppgår till 10 kN avbryts nedtryckningen och uppnådd provhöjd hålls under något tiotal sekunder varpå stämpeln avlastas. Slutlig provstorlek är cylindrar med 30 mm diameter och ungefärlig höjd på 27 mm. Provkropparnas skrymdensitet bestäms enligt SS-EN 12697-6 (vägning under vatten) och volymen baseras på mätning enligt SS-EN 12697-29 (geometrisk mätning med skjutmått). Proverna konditioneras sedan under vatten vid 25 °C under 3 timmar varav 2,5 timmar vid ett absoluttryck på 6,7 kPa. Efter konditioneringen vattenlagras provkropparna vid 40 °C under 48 h för att sedan vägas och volymsbestämmas. Provkropparna trumlas sedan enskilt i vattenfyllda rör med dimensioner enligt figur 3.



Figur 3. Schematisk beskrivning av vändskakustrustning.

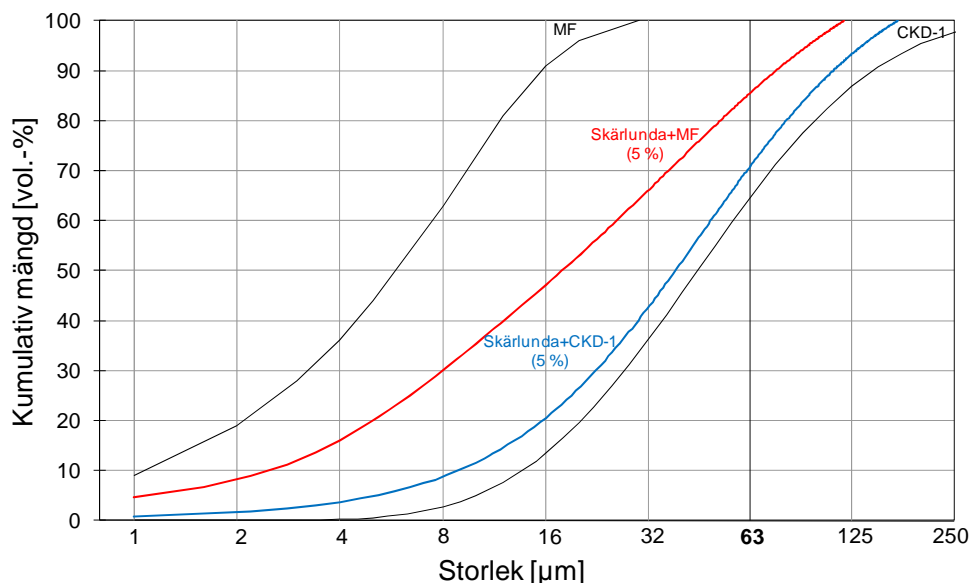
Rören roteras 3600 varv med hastigheten 20 varv/min vid rumstemperatur. Efter denna nötning sköljs och vägs provkropparna. Baserat på mätningarna beräknas sedan svällning (S) som volymsförändring under vattenlagring och nötning (N) som viktsförändring efter nötning enligt:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \quad 1$$

$$N = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \quad 2$$

där V_1 och V_2 är volym efter tillverkning respektive vattenlagring, och m_2 och m_3 är vikt efter vattenlagring respektive nötning. För varje blandning provades 4 provkroppar för vilka medelvärden av svällning och nötning beräknas.

Inblandning av hydrauliskt filler gjordes som relativ andel av total mängd stenmaterial vid 5 nivåer: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 och 5,0 vikt-%. Fillerdelen utgjorde således en blandning av egenfiller (Skärlunda) och hydrauliskt filler. Av mastixens kornstorleksfördelning utgör 14,3 vikt-% filler. Vid maximal inblandning av hydrauliskt filler (5 vikt-% av stenmängden) blir förhållandet mellan hydrauliskt filler och egenfiller 5/14,3 dvs. 35 vikt-% av fillerdelen utgörs av hydrauliskt filler (se även avsnitt 3.2.3). Detta medför att för de enskilda blandningarna blir skillnaden i fillerdelens kornstorleksfördelning mindre än de skillnader som finns mellan rena fillerfraktioner (jämför figur 1). Figur 4 visar de nominella kornstorleksfördelningarna med störst inbördes skillnad, blandningar med 5 vikt-% av Microfine 20 respektive CKD-1. För jämförelse visas även fördelningarna för motsvarande hydrauliskt filler.



Figur 4. Kornstorleksfördelning för de blandningar med störst skillnad: 5 vikt-% Microfine 20 och 5 vikt-% CKD-1. Övriga blandningar ryms mellan dessa.

Ett sammanfattande mått för de enskilda kornstorleksfördelningar ges i tabell 5 där partiklarnas medelstorlek (baserat på volym) redovisas.

Tabell 5. Fillerdelens medelstorlek för de olika blandningarna (volym) [μm]

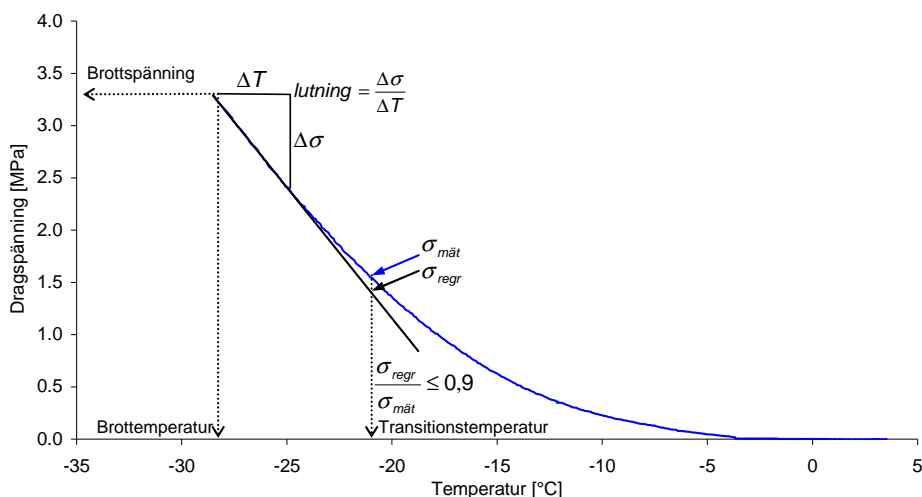
Andel tillsats	B	SH	MF	CKD-1	CKD-2
0,5	44	44	43	45	44
1,0	43	43	42	46	43
1,5	42	42	40	46	42
2,5	40	39	37	47	41
5,0	36	34	29	47	36

Den största skillnaden finns mellan Microfine (MF) och CKD-1 vid 5 vikt-% inblandning: 29 resp. 47 μm .

3.2.2. TSRST

Bedömningen avseende eventuell inverkan av förstyvande filler på beläggnings sprickbenägenhet vid låg temperatur baseras på mätningar av köldbrottstemperatur med s.k. TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test), vilket har utförts vid Kungliga Tekniska Högskolan, avdelningen för väg- och banteknik. Metodiken baseras på AASHTO TP10 (1993). Principen vid denna provning är att asfaltprovets längd hålls konstant under kontinuerlig nedkylning varvid de uppkommande termiska dragspänningarna så småningom leder till brott. De huvudsakliga parametrar som bestäms är brotttemperatur, brottspänning och kurvans lutning vid brott. Definitioner av

dessa visas i figur 5: lutningen beräknas med linjär regression på kurvans sista 50 punkter (indikerat i figur 5) och transitionstemperaturen bestäms som vid den temperatur där kvoten mellan regressionslinjens värde och uppmätt spänning understiger 0,9.



Figur 5. Typiskt resultat från provning enl. TSRST samt definition av bestämda parametrar.

Massatypen för TSRST-provning var ABT 11 med kornstorleksfördelning enligt figur 2 och bindemedelshalten 6,2 vikt-%. Utöver referensblandning med bara Skärlundamaterial användes två nivåer av andel hydrauliskt fyller:

- 1,0 vikt-%
- 2,5 vikt-%

av den totala stenmängden. Provningens geometrin var kvadratiska balkar med sidan 35 mm och längden 140 mm. Balkarna sågades ur gyatoriskt packade provkroppar med diameter 150 mm och ungefärlig höjd 100 mm. Massan blandades och packades vid 150 °C. Det statiska trycket vid packning var 600 kPa och den gyatoriska vinkeln 2°. Packningen fortgick tills önskat hålrum (3 vol.-%) uppnåddes. TSRST-mätningen påbörjades vid 2 °C varefter temperaturen sänks med 10 °C per timme tills dragbrott uppträder. För samtliga blandningar provades två balkar.

3.2.3. VISKOSITET

Provningen omfattade även mätningar av förstyvande effekt av de olika fillertyperna genom bestämning av skenbar viskositet med rotationsviskosimeter (s.k. Brookfield). Denna typ av viskositetsbestämning för fyller-bitumenblandningar har använts i tidigare undersökningar t.ex. Rigden (1947), Shashidhar och Romero (1998), Grabowski och Wilanowicz (2008), och Horak och Mukandila (2008). Vid mätning med rotationsviskosimeter bör det material man provar vara vätskeliknande, det skall ha en

inre sammanhängande struktur som inte bryts ned av den skjuvning provet utsätts för. En avgörande faktor för att filler-bitumenblandningarna skall vara tillräckligt vätskelika är andelen filler i förhållande till bitumen. Baserat på tidigare litteratur rekommenderar Chen m.fl. (2008) att filler/bitumen-kvoten baserad på volym, bör vara lägre än 28 % vid reologisk provning av bitumenmastix. Horak och Mukandila (2008) visade stora effekter på blandningarnas styvhet vid kvoter över 1:1, vilket i vissa fall medförde att provningen inte kunde utföras. Mätningarna i denna undersökning utfördes på filler-bitumenblandningar med viktsförhållandet 1:2 dvs. en del filler på 2 delar bitumen, vilket ger en volymkvot på knappt 20 %. Fillerdelen utgjordes av blandningar av egenfiller (Skärlunda) och hydrauliskt filler med samma blandningsförhållande som för enbart fillerdelen av mastixproven. Tillsatsmängd för mastixproven anges som andel av totala mängden stenmaterial, vilket medför att i fillerdelen, som utgör ca. 14,3 vikt-% av totalmängden (50 g av 350 g), blir andelen tillsatt filler relativt andelen egenfiller högre: om tillsatsfillrets andel av totala stenmaterials mängden är 1 vikt-% blir dess andel av fillerdelen 350/50 gånger högre, dvs. 7 % av fillerdelen utgörs av tillsatt hydrauliskt filler. Tabell 6 sammanfattar andelar tillsatt filler i mastixproven i vändskakmetoden resp. deras motsvarande andel i filler-bitumenblandningarna för viskositetsbestämning. Mätningar genomfördes även på filler-bitumenblandningar där fillerdelen bestod enbart av egenfiller eller de hydrauliskt aktiva fillertyperna.

Tabell 6. Andelar tillsatt hydrauliskt filler av total mängd stenmaterial för vändskakprovning och motsvarande viskositetsprovning [vikt-%]

Mastixblandningar (Vändskak)	Filler/bitumen (Brookfield)
0,5	3,5
1,0	7,0
1,5	10,5
2,5	17,5
5,0	35,0

Blandningarna tillverkades vid 150 °C. Invägd mängd fillerblandning blandas manuellt i 30 g varmt bitumen: blandningen varmhålls därefter i 30 minuter varefter den ånyo omsorgsfullt blandas: provet tillåts sedan svalna för att inför viskositetsprovningen värmas till 150 °C under 30 min, innan provcylindrarna fylls. Provingarna genomfördes vid 3 olika temperaturer och för varje temperatur vid en konstant skjuvhastighet (se tabell 7). För samtliga blandningar genomfördes dubblerad mätning.

Tabell 7. Provningsbetingelser vid viskositetsprovning

Temperatur [°C]	Skjuvhastighet [s ⁻¹]
80	0,34
100	1,36
120	6,80

3.2.4. HÅLRUM ENLIGT RIGDEN

Hålrums halten i packat filler (Rigdenhålrums) bestämdes enligt SS-EN 1097-4 (2008). Rigdenhålrums har länge varit en metod för att karaktärisera filler och kan betraktas som ett något sammanfattande mått som påverkas av bl.a. partiklarnas storleksfördelning, maximala storlek, form och ytegenskaper. Dessa egenskaper är i regel både svåra att stringent definiera och att sedan mäta, varför Rigdenhålrums utgör ett praktiskt lättbestämt mått med i många fall hög förklaringsgrad. Denna metod innebär i korthet att 10 g filler packas med en fallande vikt i en form varefter provets volym bestäms. Baserat på packad provvolym och materialets korndensitet bestäms hålrums halten som andel av provets totala volym.

3.2.5. SAMMANFATTNING AV PROVNINGAR

I tabell 8 sammanfattas provade blandningar beskrivna i föregående avsnitt.

Tabell 8. Sammanfattning av provade blandningar: andelar tillsatt hydrauliskt filler av total mängd stenmaterial [vikt-%]

Vändskak mastix <2 mm	TSRST ABT 11	Viskositet filler/bitumen 1:2	Rigdenhålrums filler
0	0	0	0
0,5		3,5	3,5
1,0	1,0	7,0	7,0
1,5		10,5	10,5
2,5	2,5	17,5	17,5
5,0		35,0	35,0
		(100)	(100)

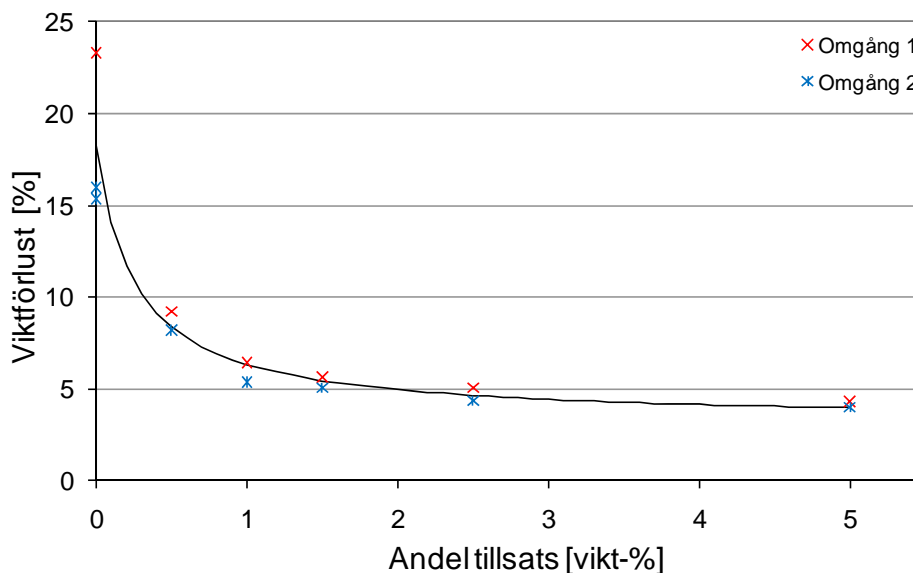
Provningar genomfördes för samtliga hydrauliska filler och två upprepningar för varje mätmetod. Viskositet för filler-bitumenblandningar och Rigdenhålrums för filler uppmättes även för de enskilda hydrauliska fillertyperna även om dessa blandningar inte ingick i det huvudsakliga provschemat för vändskakprovningarna.

4. RESULTAT OCH ANALYS

I följande avsnitt redovisas erhållna resultat uppdelat efter mätningar av beständighet och förstyvande inverkan. I de statistiska analyserna är nollhypotesen (H_0) i samtliga fall att ingen skillnad mellan medelvärden föreligger. Vald signifikansnivån (α) är 5 % dvs. vi förkastar nollhypotesen om $p < 0,05$ och konstaterar att det föreligger skillnad.

4.1. BESTÄNDIGHET

Vattenkänslighet mättes med vändskakmetoden. Efter provkroppstillverkning och vattenkonditionering trumlas provkropparna och mängden bortnött material bestäms. I denna undersökning varierades andelen tillsatt hydrauliskt filler. Ett exempel på erhållna resultat för blandningar med Byggcement visas i figur 6.

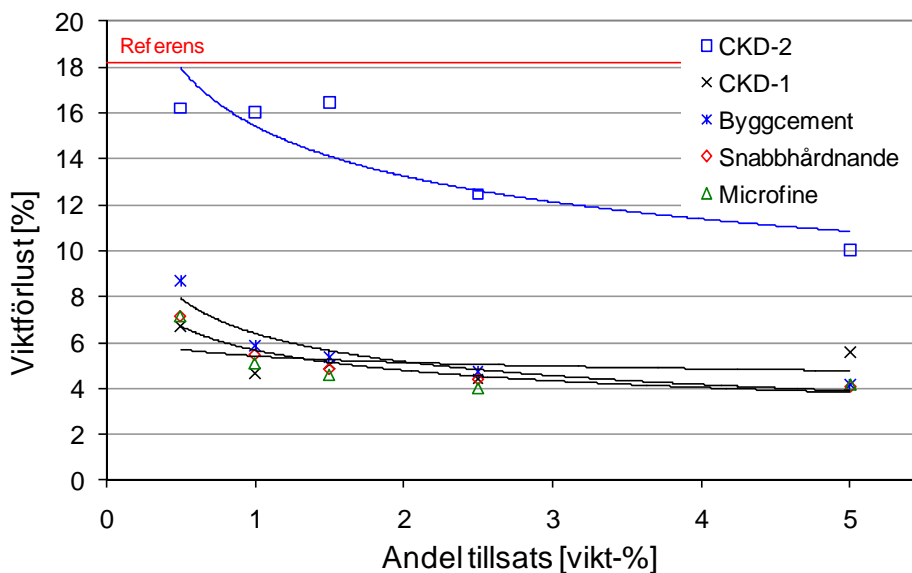


Figur 6. Viktförlust efter vändskak för blandningar med Byggcement (B).

Det är uppenbart att förbättringen är stor redan vid låga tillsatsandelar för att sedan klinga av vid halter över 1-1,5 %. Överlag gäller att vändskakprovningen är under statistisk kontroll, dvs. repeterbarheten är i nivå med den angivna i metoden och det går inte att identifiera resultat som avviker.

Vid provning av vattenkänslighet är provens hålrums halt av stor betydelse. Medelvärdet för samtliga prov i denna undersökning var 14,3 vol.-%, vilket är att betrakta som tämligen normalt för vändskakprovning, eventuellt marginellt lägre. Det går att urskilja ett mönster i hålrums halten som funktion av inblandningsandel liknande det som uppmättes för filler-bitumenblandningarnas förstyvning (se figur 11). För CKD-1 stiger såväl viskositet som hålrums halt något vid ökad andel och för övriga är de oförändrade eller sjunkande. Vad avser hålrums halten är förändringen dock liten i absoluta tal.

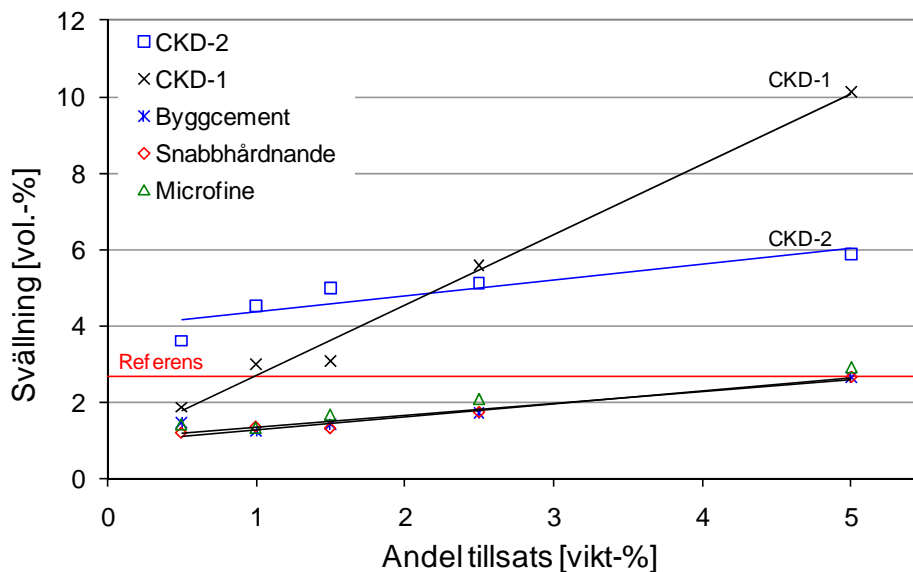
Resultat av de vändskakprovningarna sammanfattas i figur 7. I denna figur finns även referensens (0 % inblandning) inlagd för jämförelse. För att underlätta bedömningen av andelens inverkan har de enskilda fillrens resultat även passats med en potensfunktion.



Figur 7. Nötning för de olika blandningarna (medelvärden).

Det omedelbara intrycket är att viktörlusten reduceras avsevärt med tillsats av hydrauliskt filler. För CKD-2 är inverkan något mindre än för de övriga som sinsemellan är mycket lika. För att mer i detalj analysera effekterna utfördes en statistisk analys. Då det bedömdes att sambandet inte kan beskrivas med något enkelt linjärt samband (linjär regression) eller kan transformeras, genomfördes en variansanalys med tillsats och andel som huvudeffekter. Med hänsyn till variationen i hålrums halt infördes denna inledningsvis som kovariat. Efter en full-faktoriell variansanalys kunde det konstateras att varken samverkans effekten mellan filler och andel, eller hålrumshalten är signifikant varför modellen reducerades till huvudeffekterna, fillertyp och inblandningsandel. Resultatet av denna analys visar att jämfört med referensen ger samtliga filler lägre nötning. Intrycket av figur 7 bekräftas, CKD-2 ger något mindre sänkning än de övriga som inte statistiskt går att särskilja. För gruppen bestående av cementen och CKD-1 är nötningssänksningen signifikant upp till och med 1 vikt-%. Andelsökning utöver denna nivå leder inte till lägre nötning och skillnaderna kan förklaras med slumpfel. För CKD-2 kan inte någon motsvarande gräns påvisas utan blandningen med 5 % ger den lägsta nötningen.

Vid mätning enligt vändskakmetoden bestäms även svällningen dvs. provkropparnas volymsökning under vattenkonditionering. Dessa resultat sammanfattas i figur 8.



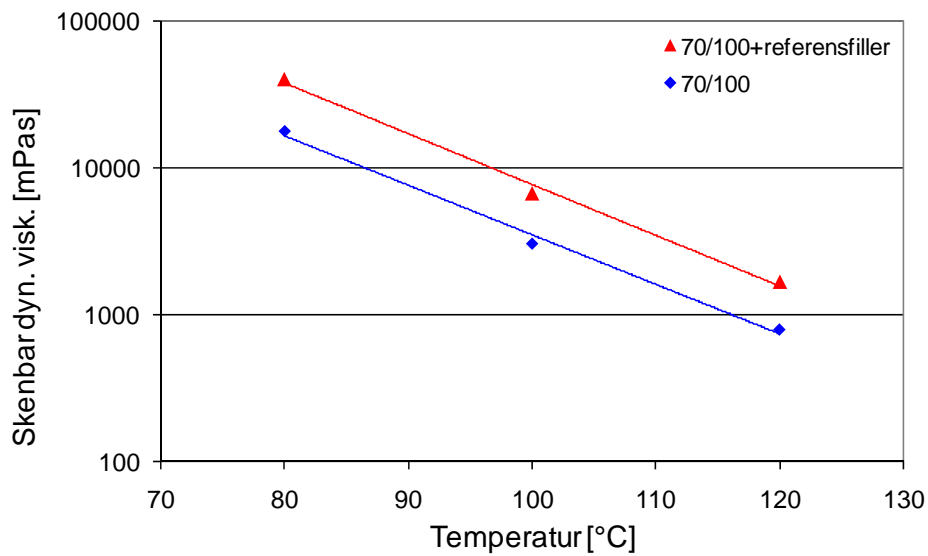
Figur 8. Svällning för de olika blandningarna efter vattenkonditionering (medelvärden).

I undersökt område är svällningen ökande med ökande andel tillsatt hydrauliskt filler för samtliga fillertyper. Det är tydligt att cementen grupperar sig under svällningen för referensen och att de båda CKD-typerna har högre svällning, i synnerhet CKD-1 vid högre andelar. Det kan noteras att CKD-1 ger hög svällning men nötning i nivå med cementen. En jämförelse av svällning vid 1 % utbytt filler, dvs. den nivå över vilken ingen sänkning i nötning kan påvisas, visar att CKD-2 har signifikant högre svällning än de övriga och att Byggcement ger lägre svällning än referensen och de båda filterkalken.

4.2. FÖRSTYVANDE INVERKAN

4.2.1. VISKOSITET

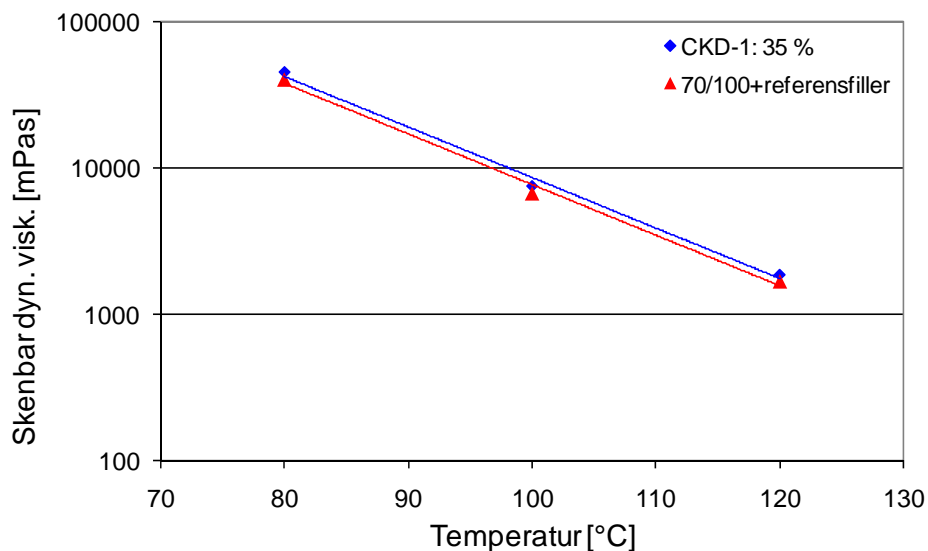
Vid inblandning av hydraulisk filler kan en oönskad effekt vara att massan upplevs något styvare vid normala blandnings- och läggningstemperaturer. I denna undersökning har denna effekt studerats genom viskositetsmätningar av filler-bitumenblandningar. Partiklar i en vätska innebär en ökad viskositet för blandningen. Figur 9 visar denna effekt vid inblandning av egenfiller i bindemedlet.



Figur 9. Skenbar dynamisk viskositet vid olika temperaturer för bindemedel 70/100 och för fillerblandningen med referensmaterial (Skärlunda).

För utspädda enkla vätskor är förstyvningen en funktion av volymsandel fasta partiklar och den ursprungliga vätskans viskositet. Denna förenklade modell är i många fall giltig för koncentrationer under 10 vol.-%. För högre inblandningsandelar blir modellerna i regel avsevärt mer komplicerade. Fillerblandningen, i figur 9, har förstyvats mellan 2,3 (80 °C) och 2,1 (120 °C) gånger.

Figur 10 visar jämförelse mellan referensblandningen och den blandning som uppvisade störst förstyvning, CKD-1 med motsvarande 5 vikt-% inblandning av aktivt filler.



Figur 10. Skenbar dynamisk viskositet vid olika temperaturer för fillerblandningar med referensmaterial samt inblandning av motsvarande 5 vikt-% CKD-1.

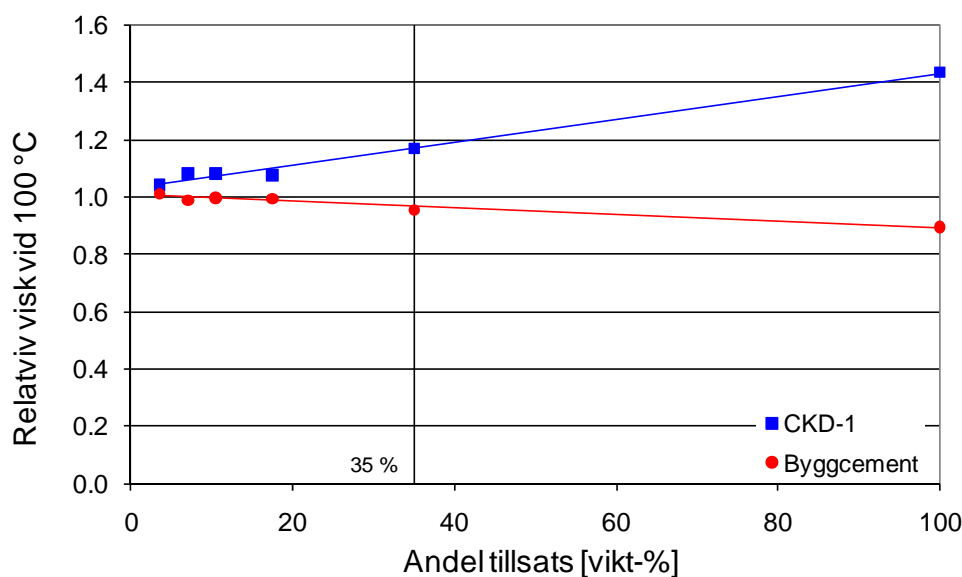
Skillnaden mellan referensblandningen och den blandning med högst förstyvning är relativt liten. Blandningen med CKD-1 har ca. 15 % högre viskositet än referensblandningen.

För en bredare jämförelse av förstyvande effekt sammanfattar tabell 9 beräknad relativ viskositet vid 100 °C. Jämförelsen baseras på viskositeten för referensblandningen (70/100+referensfiller).

Tabell 9. Relativ dynamisk viskositet vid 100 °C för resp. tillsatsmedel och tillsatsandel: relativt referensblandning (medelvärden)

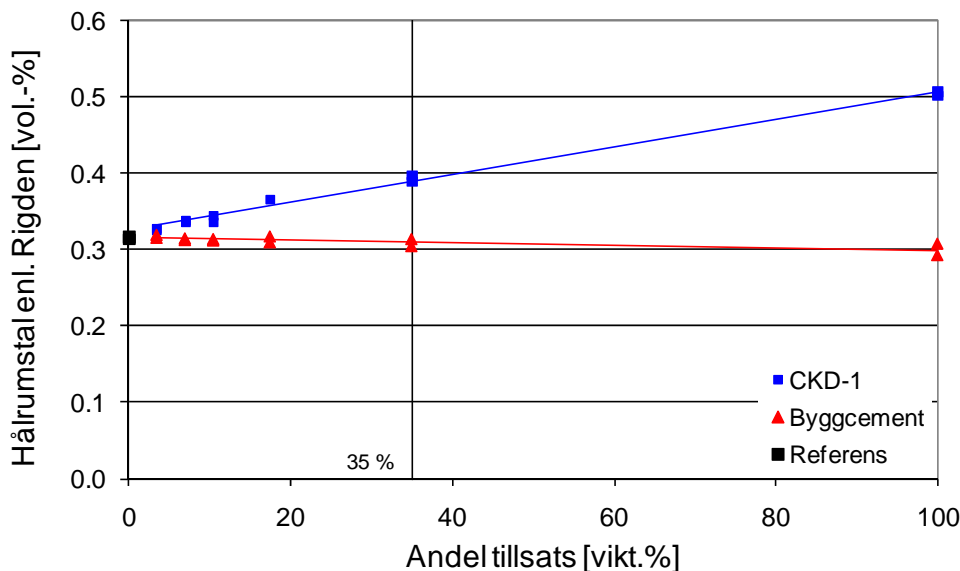
Andel [vikt-%]	B	SH	MF	CKD-1	CKD-2
3,5	1,01	0,99	1,02	1,04	1,08
7,0	0,99	0,98	1,03	1,08	1,08
10,5	1,00	1,03	1,02	1,08	1,06
17,5	0,99	0,98	0,98	1,08	1,10
35,0	0,95	0,95	0,99	1,17	1,12
(100)	0,90	0,93	0,97	1,43	1,02

Det finns inget generellt mönster för viskositeten som funktion av andel tillsats. En linjär regression av viskositeten som funktion av tillsatsandelen ger signifikant påverkan för Byggcement där viskositeten sjunker med ökad tillsats, samt för CKD-1 där viskositeten ökar (se figur 11). För de övriga fillertyperna kan förändringarna förklaras med slumpfel. Detta gäller även om analysen begränsas till att omfatta beständighetsundersökningens egentliga provområde, 0,5-35 vikt-% tillsats.



Figur 11. Relativ dynamisk viskositet vid 100 °C som funktion av tillsatsandel (relativt referensblandning dvs. 0 % tillsats).

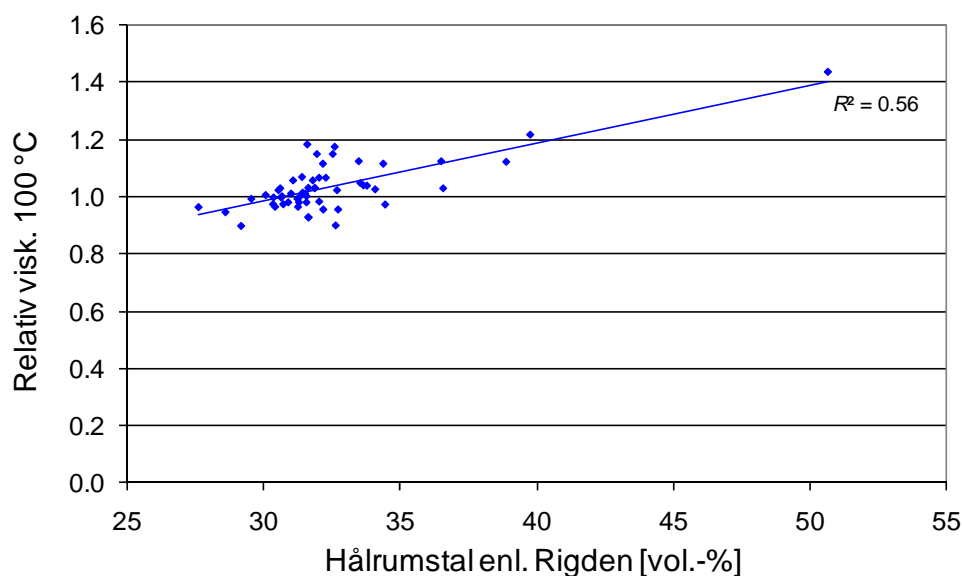
För de två tillsatsmedel som visas i figur 11 är det tydligt att den relativa viskositeten påverkas av ökad andel hydrauliskt filler: för Byggcement sjunker viskositeten medan den stiger för CKD-1. I detta sammanhang är det intressant att jämföra uppmätt viskositet med Rigdenhållrummet hos motsvarande fillerblandningar. För dessa två filler visas i figur 12, hållrumstal enligt Rigden som funktion av andel hydrauliskt filler.



Figur 12. Hållrumstal enligt Rigden vid olika andelar tillsats för CKD-1 och Byggcement. Som jämförelse visas även referens.

Vid en jämförelse mellan figur 11 och figur 12 är det tydligt att det finns ett liknande samband mellan andel hydrauliskt filler och, i det första fallet viskositet och i det andra Rigdenhållrum. För CKD-1 ökar såväl viskositeten som Rigdenhållrummet med ökad andel ersatt filler, medan mönstret är det motsatta för Byggcement. I figur 13 redovisas blandningarnas relativa viskositet (jämfört med referensblandningen) som funktion av Rigdenhållrummet för samtliga mätta blandningar.

Inverkan (lutningen i figur 13) är signifikant men förklaringsgraden måttlig, 56 %. Det är uppenbart att punkten vid hållrumstal 50, ser ut att starkt påverka det linjära sambandet, men slutsatserna påverkas inte i någon större omfattning av denna punkt.



Figur 13. Relativ viskositet vid 100 °C som funktion av hålrumsstal enligt Rigden. (relativt referensblandning dvs. 0 % tillsats)

För att undersöka vilken parameter som bäst beskriver filler-bitumenblandningarnas förstuvning genomfördes en multipel stegvis linjär regression (stepwise) med relativ viskositet som beroende variabel och de parametrar i tabell 3 som beskriver kornstorleksfördelningen hos använda filler som oberoende variabler. Ingående parametrar var:

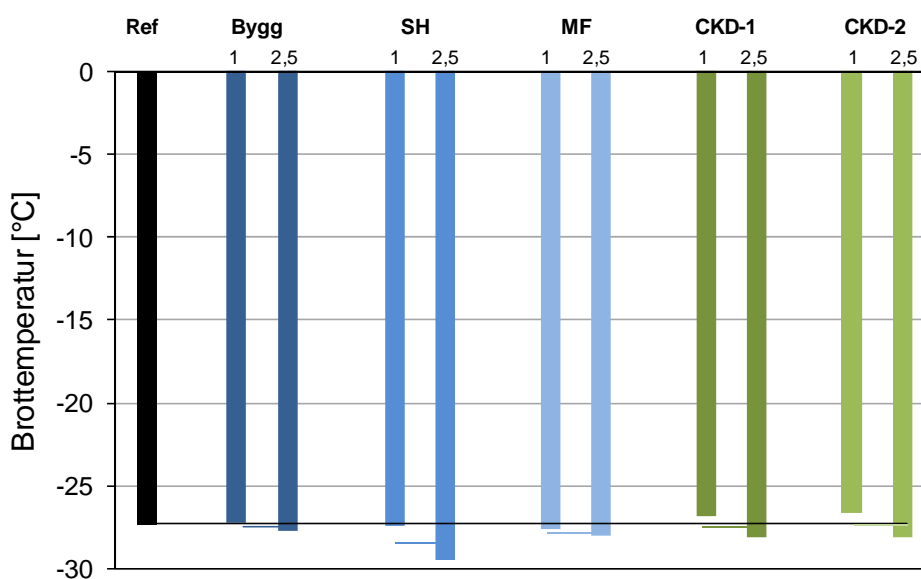
- medelstorlek
- fördelningens bredd, beräknad som $D_{90}-D_{10}$
- andel tillsats som volymsandel, baserat på korndensiteten och viktsandel
- Rigdenhålrumsrummet.

Resultatet av regressionen visar att Rigdenhålrumsrummet tillsammans med volymsandel är de parametrar som signifikant bidrar till att förklara uppmätta viskositetsskillnader. Av dessa två har Rigdenhålrumsrummet en förklaringsgrad kring 57 % och volymsandelen knappt 7 %. I denna undersökning är således Rigdenhålrumsrummet den parameter som bäst beskriver viskositetsskillnader för filler-bitumenblandningarna.

4.2.2. TSRST

En oönskad effekt av förstuvning orsakad av tillsatt filler kan vara ökad risk för sprickbildning vid låga temperaturer. I denna undersökning bestämdes köldbrottstemperaturen enligt TSRST.

Den huvudsakliga parametern som bestäms vid denna provning är brottemperatur. Resultaten från genomförda provningar sammanfattas i figur 14.



Figur 14. Medelvärden av brottemperatur för resp. provserie. Inlagda linjer avser medelvärde för resp. fillertyp jämfört med den heldragna svarta linjen som motsvarar referensen.

Vad avser brottemperatur för de olika blandningarna är skillnaderna små och inte statistiskt signifikanta (se nedan). För samtliga blandningar med hydrauliskt filler ger inblandningsandelen 2,5 vikt-% en något lägre brottemperatur jämfört med samma fillertyp med 1 vikt-% inblandning. Inverkan av inblandningsandelen är dock inte i något fall statistiskt signifikant utan kan förklaras med slumpfel (linjär regression med Referens som 0 % inblandning). En fullständig sammanfattning av beräknade parametrar från TSRST ges i tabell 10.

Tabell 10. Resultat från provning enligt TSRST, medelvärden av två prover

		Brottemperatur [°C]	Brottspänning [MPa]	Lutning vid brott [MPa/K]	Transitions-temp. [°C]
Ref		-27,3	2,9	0,19	-17,3
B	1	-27,3	3,2	0,24	-18,4
	2,5	-27,8	2,8	0,22	-19,1
SH	1	-27,5	2,6	0,18	-18,0
	2,5	-29,5	3,5	0,22	-18,6
MF	1	-27,6	2,8	0,21	-20,2
	2,5	-28,0	2,7	0,20	-20,8
CKD-1	1	-26,8	2,8	0,21	-18,2
	2,5	-28,1	3,0	0,21	-19,3
CKD-2	1	-26,7	3,3	0,23	-18,2
	2,5	-28,1	3,3	0,25	-18,8

Resultaten i tabell 10 analyserades med variansanalys i två steg. För att undersöka om det förelåg någon skillnad i hålrums halt mellan de olika blandningarna genomfördes en envägs variansanalys med hålrums halt som beroende variabel och blandning som faktor, vilket gav signifikanta skillnader mellan några grupper ($p < 0,00$): blandningen med 1 % CKD-2 hade något lägre hålrums halt jämfört med några av de andra blandningarna. Detta medförde att resultaten i tabell 10 analyserades med en tvåvägs variansanalys med kovariat, eller störvariabel, (ANCOVA) där fillertyp och halt är huvudeffekter och hålrums halten kovariat. Vid dessa analyser provades även om det förelåg någon signifikant samverkans effekt mellan fillertyp och halt, dvs. om någon fillertyp ger en effekt på TSRST-egenskaper som är skild från de övriga fillertypernas. Resultatet av den statistiska analysen visar att den enda signifikanta faktorn är en svag effekt av hålrums halt vad avser brottemperatur. Normalt är brottemperaturen inte beroende av hålrums halt men i dessa undersökningar ger, något förvånande kanske, en ökad hålrums halt sänkt brottemperatur. Medelvärdet för hålrums halt var 3,5 vol.-% (max. 4,8; min. 1,6 vol.-%). Samtliga andra uppmätta skillnader för brottemperatur, brottspänning, lutning vid brott och transitionstemperatur, kan förklaras med slumpfel.

I en tidigare undersökning, Jansson och Malmqvist (2003), observerade författarna ingen tydlig försämring av brottemperatur med TSRST vid tillsats av cement eller kalk, jämfört med referensen. De mätte brottemperatur före och efter laboratorieåldring av TSRST-provkroppar. Vid en djupare analys av deras resultat (vår beräkning) finner man att före åldringsproceduren uppvisar blandningarna med cement något högre brottemperatur än motsvarande referens och inblandning av kalk. Efter åldring är förhållandet det motsatta, cementinblandade massor har något lägre brottemperatur än de övriga. Skillnaden efter blandning är dock inte statistiskt signifikant.

5. DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Att vatten har en negativ inverkan på vägkonstruktioners bärighet och livslängd torde vara obestridligt. Vid vägbyggande läggs stor vikt vid att leda bort och förhindra vatten från väggropp och terrass. Detta görs genom val av väglinje, konstruktion, dränering och lämpliga materialtyper. För asfaltlager gäller i regel att de skall vara täta: dels för att leda bort vatten, dels för att själva vara beständiga. Skador på asfalt som beror på bristande mekanisk tålighet efter påverkan av vatten (och trafik) är vanliga och har säkerligen alltid utgjort ett problem för väghållare. Att aktivt och förutsägbart motverka nedsatt beständighet skulle säkerligen underlättas av en grundläggande förståelse av hur de ingående materialen, bitumen, sten och asfalt, transporterar och påverkas av vatten. Trots stora insatser under lång tid är det teoretiska fundamentet uppenbart bristfälligt; någon tydlig konsensus om påverkande mekanismer finns inte annat än i generella termer som att det beror av bristande adhesion eller kohesion. För att exemplifiera problematiken kan det konstateras att samstämmigheten är stor kring vikten av låga hålrums halter. Dock ger den totala mängden hålrums halt inte alltid en entydig bild utan

beständigheten påverkas även troligen av hålrummets rumsliga fördelning, vilken kan skilja mellan asfalttyper.

Trots detta är beständigheten ett problem som i mångt och mycket går att bemästra baserat på erfarenhet av använda materialkombinationer och inte minst genom att använda tillsatser av något slag. Hydrauliskt aktiva filler, främst kalk och cement, har använts framgångsrikt under lång tid. Vad avser cement har främst Byggcement eller någon annan typ av standardcement använts. Hypotesen i denna undersökning var att cementens effektivitet delvis var avhängig partiklarnas storleksfördelning; en effektivare förbättring kunde erhållas genom att använda mer finkorniga cementtyper. Resultaten bekräftar dock inte detta utan förbättringen avseende nötning mätt enligt vändskakmetoden är närmast identisk för de använda cementtyperna, dvs. till synes oberoende av storleksfördelningen. Det är i detta sammanhang viktigt att komma ihåg att det sätt på vilket vändskakprovet utfördes i detta projekt reducerar en viktig dimension i beständighetsproblematiken, nämligen restfukt under tillverkning. Det ingående stenmaterialet i denna undersökning var i det närmaste helt torrt, vilket sällan eller aldrig är fallet vid asfaltproduktion i verk. Det är dessutom möjligt att detta är av större vikt vid användande av hydrauliskt aktiva mineraliska filler. Trots denna begränsning genomfördes provningen på torra material då bedömningen var att införandet av vatten (eller fukt) i någon del av provkroppstillverkningen skulle innebära metodproblem och drastiskt minska undersökningens jämförbarhet med tidigare provningar och erfarenheter. En ytterligare faktor som skiljer de laboratorietillverkade proven från normal verksproduktion är blandningsförfarandet, där såväl blandningsordningen som graden av tvångsblandning skiljer. Vid tillverkning av vändskakprover blandas först stenmaterialet varefter bitumen tillförs och blandningen utförs för hand. Detta skall jämföras med verksblandning där blandningsordningen kan skilja och kanske framförallt en högre grad av tvångsblandning erhålls. Blandningstiden är dock i regel kortare vid verksblandning jämfört med handblandningen. En möjlig mekanism är att de finare cementtyperna kan vara svårare att fullständigt dispergera i mastixen; de mindre partiklarna binder vid varandra hårdare än blandningsförfarandet förmår dela, och uppträder därmed som vore de större partiklar. Detta är uppenbarligen en mekanism som är svår att studera och erhålla resultat ger egentligen inget stöd för endera förhållandet: dispergering eller agglomerering. Det är dock möjligt att dessa effekter förekommer på en skala som en ökad grad av tvångsblandning, på det sätt det sker i en normal blandare, skulle kunna påverkas av.

Som tidigare nämnts görs en generell uppdelning av den mekaniska försvagningen i adhesions- respektive kohesionsförlust. Adhensionsförlust lokaliserar försvagningen mer uttalat till gränssnittet sten-bitumen medan kohesionsförlust avser nedsatt hållbarhet av de bindande delarna i asfalt, dvs. bitumen och de finare partiklarna (mastix). Denna uppdelning skall snarast ses som beskrivande och i själva verket finns det inget sätt att strikt särskilja dem åt. Verklig nedbrytning är säkerligen en icke-skarp blandning av adhesions- och kohesionsförlust och beroende av aktuell materialtyp och

klimatbelastning. Tidigare publicerade erfarenheter (Ulmgren m.fl., 2003) av vändskakmetoden har inte visat någon samstämmighet mellan nötning efter vändskak och vattenkänslighet för asfalt bestämd som nedsatt hållfasthet för asfaltprovkoppar efter vattenkonditionering. Detta är kanske inte heller att förvänta då fördelningen mellan adhesions- och kohesionsförluster skiljer sig mellan metoderna. En möjlig förklaring är att vändskakmetoden är mer förskjuten mot kohesionsförluster jämfört med brotthållfasthetsprovning av asfalt. Metoderna är snarast kompletterande mer än var för sig heltäckande. Denna undersökning har endast studerat inverkan mätt med vändskakmetoden, vilket då ger en bild av cementens inverkan. Det är även så att för i stort sett samtliga metoder för att bestämma asfalts beständighet är det empiriska stödet i form av fältuppföljningar bristfälligt. Detta gäller även i hög grad för vändskakprovningar, i synnerhet vad avser uppmätt svällning. Generellt uppfattas en hög grad av svällning som potentiellt negativt men det saknas erfarenhet för att konkretisera detta i termer av absolutnivåer. För ett av filterkalken var nöttingsresistensen i paritet med cementens men svällningen var avsevärt högre. Det är inte uppenbart hur detta skall tolkas men svällningen påkallar försiktighet vid analysen.

Farhågan att hydrauliska filler ger en förstyvande effekt på massan och beläggnings kunde inte bekräftas i denna undersökning. Under tillverkning och läggning av asfalt medför en eventuell förstyvning att massan blir hanteringsmässigt svårare att arbeta med. Främst blir massans läggbarhet sämre. Läggbarhet i sig är ett något diffust och i regel subjektivt mått som inte låter sig lätt och entydigt definieras eller bestämmas. I denna undersökning valdes därför en indirekt bestämning, viskositet hos filler-bitumenblandningar. Detta under antagandet att filler-bitumenblandningens egenskaper har ett avgörande inflytande på massans läggbarhet, under i övrigt samma förhållanden dvs. stenmaterial, kornstorleksfördelning, bindemedelshalt och temperatur. Visserligen konstaterades en förstyvande effekt vad avser viskositet för ett av filterkalken (CKD-1). Effekten är statistiskt påvisbar men dess storlek liten. Den maximala förstyvning som uppmättes skulle motsvara en temperatursänkning på knappt 3 °C, vilket i sammanhanget snarast är att betrakta som försumbart. För cementen minskade snarare viskositeten vid ökad inblandningsandel. Generellt påverkas viskositeten hos blandningar av vätskor och fasta partiklar av volymsandelar, partiklarnas storlek och fördelning: förstyvning ges av ökad volymsandel fasta partiklar, mindre partiklar och blandningar av partikelstorlekar (snarare än ensartad partikelstorlek). Detta är endast en tumregelmässig beskrivning och egenskaperna kan samvariera och interagera. För resultat erhållna i denna undersökning är det svårt att hitta generella mönster avseende kornstorleksfördelningens egenskaper och viskositet, och förstyvningen förklaras bäst av Rigdenhållrummet. Ingen av de parametrar som använts för att beskriva fillrens kornstorleksfördelning ger lika hög förklaringsgrad. Detta innebär att om referensfillret skulle ha ett annat Rigdenhållrum skulle inverkan av tillsatt hydrauliskt filler eventuellt bli annorlunda. Utfallet beror på om Rigdenhållrummet är högre eller lägre jämfört med tillsatta beständighetsförbättrande filler. I denna undersökning var Rigdenhållrummet för referensfillret i samma storleksordning som för cementen och ett av filterkalken.

Avseende förstyvning vid låg temperatur innebär det en ökad risk för sprickor som induceras av termiska spänningar som inte relaxeras. Den parameter som främst används för att utvärdera TSRST-provning är brottemperatur. I denna undersökning kunde ingen skillnad mellan de olika blandningarna påvisas. Vad avser de övriga parametrarna (brottspänning, lutning vid brott och transitionstemperatur) är deras innebörd mer oklar och erfarenheten av uppmätta värden väsentligt mindre men det kan konstateras att analysen av dessa parametrar bidrar till att förstärka bilden av att asfaltblandningarna inte påverkas av tillsatt hydrauliskt filler avseende lågtemperaturregenskaper.

Baserat på resultat erhållna i denna undersökning kan följande slutsatser dras:

- Litteraturen är omfattande men saknar konsensus om fundamentala mekanismer.
- Beständigheten bestämd som nötning enligt vändskakmetoden förbättras genom tillsats av hydrauliskt aktivt filler. Detta gäller för såväl cementen som filterkalken.
- Samtliga cementtyper och ett av filterkalken visar i det närmaste samma resultat avseende nötning vid halter upp till 5 vikt-% ersatt filler.
- Tillsatsandelar över 1-1,5 vikt-% bidrar inte till minskad nötning.
- Ingen, eller endast mycket svag, förstyvande inverkan mätt som viskositetsförändring hos filler-bitumenblandningar uppmättes.
- Ingen skillnad avseende lågtemperaturbrott mätt enligt TSRST mellan de olika blandningarna, kunde konstateras.

6. REFERENSER

- AASHTO Designation TP10. 1993. *Standard test method for thermal stress restrained specimen tensile strength*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Anani, B.A. och Al-Abdul-Wahhab, H.I. 1982. Effects of baghouse fines and mineral fillers on properties of asphalt mixes. *Transportation Research Record* 843: 57-64.
- Airey, G.D. Collop, A.C. Zoorob, S.E. och Elliott, R.C. 2007. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials* 22(11): 2015-2024.
- Bagampadde U, och Isacson U. 2006. Characterization of chemical reactivity of liquid antistripping additives using potentiometric titration and FTIR Spectroscopy. *Energy & Fuels* 20 (5): 2174-2180.
- Bagampadde, U. Isacson, U. och Kiggundu, B.M. 2004. Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes- State of the art. *Road Materials and Pavement Design* 5(1): 7-43.
- Baghdadi, Z.A. Fatani, M.N. och Sabban, N.A. 1995. Soil modification by cement kiln dust. *Journal of Materials in Civil Engineering* 7(4): 218-222.
- Bayomy, F.M. 1992. Development and analysis of cement-coated aggregates for asphalt mixtures. In: *Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance*. Ed: Meininger, R.C. ASTM STP 1147:19-34.
- Birgisson, B. Roque, R. och Page, G.C. 2004. Performance-based fracture criterion for evaluation of moisture susceptibility in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record* 1891: 55-61.
- Caro, S. Masad, E. Bhasin, A. och Little D.N. 2008a. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering* 9(2): 81-98.
- Caro, S. Masad, E. Bhasin, A. och Little D.N. 2008b. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 2: characterisation and modelling. *International Journal of Pavement Engineering* 9(2): 99-114.
- Chen, X. och Huang, B. 2008. Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests. *Construction and Building Materials* 22: 1950-1962.
- Chen, J-S. Kuo, P-H. Lin, P-S. Huang, C-C. och Lin, K-Y. 2008. Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler. *Materials and Structures* 41: 1015-1024.

- Collins, R.J. Emery, och John, J. 1983. *Kiln dust-fly ash systems for highway bases and subbases*. FHWA/RD-82/167. Federal Highway Administration.
- Ekblad, J. och Isacson, U. 2008. Influence of water and mica content on resilient properties of coarse granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 9(3): 215-227.
- EPA. 1993. *Report to Congress (1993) – Cement Kiln Dust Waste*. U.S. EPA530-R-94-001. US Environmental Protection Agency.
- Epps, J.A. Sebaaly, P.E. Penaranda, J. Maher, M.R. McCann, M.B. och Hand, A.J. 2000. *Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix design*. National Cooperative Highway Research Program Report 444. National Academy Press.
- Goetz, W.H. 1959. Methods of testing for water resistance of bituminous paving mixtures. In: *Symposium of water on bituminous paving mixtures*. ASTM Special Technical Publication No. 240: 84-96.
- Grabowski, W. och Wilanowicz, J. 2008. The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics. *Materials and Structures* 41: 793-804.
- Guirguis, H.R. Daoud, O.E.K. och Hamdani, S.K. 1982. Asphalt concrete mixtures made with cement-coated aggregates. *Transportation Research Record* 843. 80-85.
- Heukelom, W. 1965. The role of filler in bituminous mixes. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 34: 396-429.
- Hicks, R. G. 1991. *Moisture damage in asphalt concrete*. National Cooperative Highway Research Synthesis 175. National Academy Press.
- Horak, E. och Mukandila, E.M. 2008. Exploratory use of Rigden voids as design criteria for the design of sand treated with emulsion. *Road Materials and Pavement Design* 9(3): 525-535.
- Isacson, U. 1990. *Portlandcement som vidhäftningsbefrämjande medel i asfaltgrus*. Tekniska Högskolan i Luleå, avd för Gatuteknik Rapport 2 1990.
- Jacobson, T. 2003. *Stabilisering med emulsion och kombinationen av emulsion + cement*. VTI Notat 59. Väg- och transportforskningsinstitutet.
- Jansson, L. och Malmqvist, E. 2003. *Tillsatsmedel och bindemedels inverkan på lågtemperaturregenskaper hos en beläggning*. Rapport 11057. Svenska Byggbranschens Utvecklings-fond (SBUF).
- Jimenez, R.A. 1990. Methods and treatments to control debonding. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 59: 93-137.

- Kandhal, P.S. Lynn, C.Y. och Parker, F. 1998. Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures. *Transportation Research Record* 1638: 101-110.
- Kringos, N. Scarpas, T. Kasbergen, C. och Selvadurai 2008a. Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 1: governing processes and formulations. *International Journal of Pavement Engineering* 9(2): 115-128.
- Kringos, N. Scarpas, A. Copeland, A. Youtcheff, J. 2008b. Modelling of combined physical–mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes Part 2: moisture susceptibility parameters. *International Journal of Pavement Engineering* 9(2): 129-151.
- Lottman, R.L. 1982. Laboratory test method for predicting moisture-induced damage to asphalt concrete. *Transportation Research Record* 843: 88-95.
- Malmqvist, E. 2006. *Beständiga kalla och halvvarma beläggningar*. Rapport projekt 11435. Svenska Byggbranschens Utvecklings-fond (SBUF).
- Malmqvist, E. och Jansson, L. 2008. *Beständiga beläggningar. Delrapport etapp 3*. Rapport projekt 11856. Svenska Byggbranschens Utvecklings-fond (SBUF).
- Malmqvist, E. och Olsson, K. 2004. *Långtidsuppföljning av beläggningar med Merit och cement som vidhäftningsbefrämjande medel*. Rapport projekt 11390. Svenska Byggbranschens Utvecklings-fond (SBUF).
- Miller, G.A. och Azad, S. 2000. Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. *Construction and Building Materials* 14: 89-97.
- Niazi, Y. och Jalili, M. 2009. Effect of portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials* 23: 1338-1343.
- Nordisk Industrifond. 2004. *Beständighet hos asfaltbeläggningar; State of the art*. Projekt nr: 03014, VTI 60761. Väg- och transportforskningsinstitutet.
- Proudley, C.E. 1959. Introduction. In: *Symposium of water on bituminous paving mixtures*. ASTM Special Technical Publication No. 240: 1-2.
- Rice, J.M. 1959. Relationship of aggregate characteristics to the effect of water on bituminous paving mixtures. In: *Symposium of water on bituminous paving mixtures*. ASTM Special Technical Publication No. 240: 17-33.
- Rigden, P.J. 1947. The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics. *Journal of the Society of Chemical Industry* 66: 299-309.

- Schmidt, R.J. 1974. Effect of temperature, freeze-thaw, and various moisture conditions on the resilient modulus of asphalt-treated mixes. *Transportation Research Record* 515: 27-39.
- Shashidhar, N. och Romero, P. 1998. Factors affecting the stiffening potential of mineral fillers. *Transportation Research Record* 1638: 94-100.
- Si, Z. och Herrera, C.H. 2007. Laboratory and field evaluation of base stabilization using cement kiln dust. *Transportation Research Record* 1989: 42-49.
- Siddique, R. 2006. Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete an overview. *Resources, Conservation and Recycling* 48: 315-338.
- SS-EN 1097-4. 2008. *Bestämning av hålrums halt hos torrt packad filler (Rigden)*. SIS, Swedish Standards Institute.
- SS-EN 1097-4. 2008. *Bestämning av korndensitet hos filler - Pyknometermetod*. SIS, Swedish Standards Institute.
- SS-EN 12697-6. 2007. *Bestämning av skrymdensitet hos asfaltprovkroppar*. SIS, Swedish Standards Institute.
- SS-EN 12697-29. 2003. *Bestämning av asfaltprovkroppars mått*. SIS, Swedish Standards Institute.
- Taha, R. 2007. Evaluation of Cement Kiln Dust-Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases. *Transportation Research Record* 1819B: 11-17.
- Taha, R. Al-Rawas, A. Al-Harthy, A. och Qatan, A. 2002. Use of cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14(4): 338-343.
- Ulmgren, N. 2002. *Finmaterialdelens betydelse för beständigheten hos asfaltbeläggningar*. Rapport projekt 11077. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).
- Ulmgren, N., Kullander, B. och Åström, T. 2003. *Finmaterialdelens betydelse för beständigheten hos asfaltbeläggningar. Jämförelse mellan Vändskakapparat och ITSR-kvot enligt FAS metod 446*. Rapport projekt 11229. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).
- Ulmgren, N. och Segerpalm, J. 2005. *Finmaterialdelens betydelse för beständigheten hos asfaltbeläggningar. Etapp 3, validering av metod*. Rapport projekt 11321. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).
- VVMB 613. 2001. *Bestämning av glimmerhalt i materialets finfraktion*. VV Publ. nr 2001:100. Vägverket.