



KTH Arkitektur och  
Samhällsbyggnad

# **EN FUNDAMENTAL VIDHÄFTNINGSMODEL FÖR ASFALT**

**ÅSA LAURELL LYNE**

Summering av doktorsavhandling

Stockholm, Sverige 2014

## **Förord**

Denna doktorsavhandling är baserad på forskning utförd under åren 2009 – 2014 vid avdelningen för Väg- och banteknik, institutionen för Transportvetenskap, KTH Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm.

Det främsta syftet med denna avhandling var att leverera en praktisk tillämpbar förståelse för hur bitumen vidhäftar till sten, med och utan tillsats av Portlandcement, samt föreslå en ny testmetod för prediktering av vidhäftning mellan bitumen och sten.

Jag vill börja med att uttrycka min tacksamhet till min huvudhandledare professor Björn Birgisson för att initiera detta projekt, ge mig en meningsfull utmaning, för hans stora stöd, värdefulla synpunkter, aldrig sinande tålamod och för att uppmuntra mig att välja ett icke-traditionellt tillvägagångssätt inom ett välstuderat område.

Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och BVFF via Trafikverket tackas innerligt för deras ekonomiska stöd. Särskilt tack till Mats Wendel på Trafikverket och Kenneth Olsson via Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).

Jag är också uppriktigt tacksam för den vägledning jag fått av Måns Collin och Per Redelius. Tack till Thorsten Nordgren på Trafikverket för tillhandahållande av bitumenprover och till Måns Collin för tillhandahållande av stenprover.

Tack till Agneta Arnius för hennes vänliga stöd och tack till alla andra anställda och doktorander som jag träffat genom mina doktorandstudier.

Det experimentella arbetet utfördes vid avdelningen för Väg- och banteknik, vid avdelningen för Yt- och korrosionsvetenskap, vid institutionen för Elektroteknik och vid SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (YKI). Många tack till alla medförfattare som jag haft möjlighet att arbeta med.

Sist, dock inte minst, vill jag tacka min man Professor Bruce Lyne för hans kärlek och stöd, samt korrekturläsning, och mina barn Lauren Lyne och Hallsten Lyne för att förstå min upptagenhet med att reda ut mysterierna kring vidhäftningen mellan bitumen och sten.

## A. SYFTE

### ***Vad projektet går ut på, själva målsättningen för arbetet:***

Målsättningen med denna studie är att introducera ett praktisk(t) och användbar(t) koncept/modell för utvärdering av vidhäftning mellan bitumen och stenmaterial som kan ligga till grund för val av ingående komponenter i asfalt vid anläggning av vägar. Konceptet/modellen är baserad på fundamentala materialegenskaper hos ingående komponenter i asfalt.

### ***Projektets anknytning till SBUF:s mål och inriktning:***

Avsikten med denna studie är att presentera ett koncept som baseras på fundamental växelverkan för förklaring av vidhäftning och vattenkänslighet hos asfalt. Många mineral- och stenegenskaper är tillgängliga på internet. Det gör det möjligt att på en teoretisk nivå beräkna vidhäftning mellan bitumen och sten. Kan man förstå hur ingående material påverkar egenskaperna i färdig asfalt kan också bättre affärsmässiga förutsättningar skapas för vägentreprenörer, vägkonsulter, installatörer och Trafikverket.

### ***Avgränsningar – vad är det egentligen man vill undersöka:***

Detta projektförslag fokuserar på mineralers och stenars ytenergi samt dielektriska egenskaper för utvärdering av asfaltens vidhäftning och vattenkänslighet. Specifika syften är att:

*Artikel I:* Utvärdera i vilken omfattning Hamaker's konstant i enlighet med Lifshitz teori kan användas för att beräkna van der Waals interaktion och dess samband med stripping.

*Artikel II:* Undersöka variationen i den dispersiva komponenten hos mineraler via deras brytningsindex baserade på mineraldata.

*Artikel III:* Kvantifiera bitumen och stenars brytningsindex och deras samband med vidhäftningen mellan bitumen och sten samt kohesionen hos bitumen.

*Artikel IV:* Kvantifiera topografiska morfologier.

*Artikel V:* Undersöka bakomliggande mekanismer för uppkomsten av bin på ytan av uppvärmt bitumen.

*Artikel VI:* Presentera hur dielektrisk spektroskopi kan användas för att förutspå vidhäftningen mellan bitumen och sten. Dielektrisk spektroskopi är baserad på materialegenskaperna dielektrisk konstant och brytningsindex.

*Artikel VII:* Introducera en indikator för att förutspå polarisabilitet och därmed bitumens vidhäftningspotential/förmåga.

## **B. Vetenskapligt bidrag**

Tydliggörande av grundprinciperna för vidhäftning mellan bitumen och sten, och fastställande av val av komponenter till asfalt för ökad beständighet i närvaro av vatten.

- Mineralers elementära/grundläggande sammansättning och effekt på brytningsindex och dispersiva vidhäftning till bitumen.
- Bitumens sammansättning och effekt på brytningsindex och därmed dispersiva interaktion, samt effekt på dielektricitetskonstant och polär interaktion.
- Interaktionen mellan kvarts och bitumen.
- Effekten av Portland cement och inverkan på vidhäftningen mellan bitumen och sten.

Fasseparationens och exudationens inverkan på ytenergier uppmätta på bitumen.

Mekanism för hur bin formas på ytan av uppvärmt bitumen.

Introducering av potentiell indikator för att förutspå polarisabilitet och därmed vidhäftningspotential hos bitumen.

## **C. Forskningsmetodik**

I den första delen inhämtades bakgrundsinformation från litteraturen relaterad till målet och syftet med denna avhandling. Ett väsentligt antal litteraturöversikter beskriver vidhäftningen mellan bitumen och sten och dess fenomen (*Isacsson 1976; Stuart 1990; Bagampadde et al. 2004; Hefer and Little 2005*).

I den andra delen användes Hamaker's konstant för att utvärdera potential för bedömning av van der Waals interaktioner mellan bitumen och sten/mineraler. Utvärderingen omfattar användbarheten av Hamaker's konstant som ett redskap för att förutsäga prestanda hos stenar och mineraler och deras motstånd till stripping.

I den tredje delen användes brytningsindex för att uppskatta mineralers dispersiva vidhäftningskomponent.

I den fjärde delen användes ellipsometri för att mäta brytningsindex på bitumen och stenar. Stenars brytningsindex är genomsnittsvärdet av ingående mineralers brytningsindex och beror på specifika element i mineralerna. Bitumenets brytningsindex är på samma sätt genomsnittsvärdet av ingående komponenter.

I den femte delen användes atomkraftsmikroskopi för att kvantifiera topografiska morfologier på ytan av uppvärmt bitumen. Efter det att bitumen blivit upphettat och därefter nedkyllt kan för vissa bitumen ett ytfenomen påvisas. Detta ytfenomen brukar refereras till vad morfologierna liknar, dvs bin. Bin är ett fenomen som skapas vid fasseparation, där faserna har olika styvheter och olika termiska expansionskoefficienter som resulterar i skiljaktig krympning under nedkylning, och alternerande högre och lägre band i den topografiska ytan.

I den sjätte delen identifierades hinder för mätning av ytenergi hos bitumen och därmed dess vidhäftningsförmåga. Om bitumen fas-separerar och mätningarna är endast utförda på ytan, kommer inte mätningarna att ge representativa värden för bitumenvolymens energi, d.v.s. den energi som orsakar fundamental växelverkan mellan mineraler och stenar och som leder till vidhäftning.

I den sjunde delen predikterades de bitumenkomponenter som är förväntade att migrera till luftgränsytan och de bitumenkomponenter som är förväntade att migrera till glasgränsytan alternativt till sten-/mineralgränsytan. Predikteringen är baserad på dielektrisk spektroskopisk respons hos ingående materialkomponenter, återspeglade i deras dielektriska konstanter och brytningsindex.

I den åttonde delen, har vidhäftningen mellan bitumen – sten/mineraler och vidhäftningen mellan bitumen-Portland cement-sten diskuterats. Diskussionen är baserad på fundamental växelverkan som är baserad på dielektrisk spektroskopisk respons hos ingående materialkomponenter. Mätningarna är utförda vid två dominanta frekvenser och representeras av dielektrisk konstant och brytningsindex.

I den nionde delen har dielektrisk tangent-förlustvinkel i frekvensområdet 0.01 till 1 Hz introducerats som en potentiell indikator för bitumens polariserbarhet och därmed vidhäftningsförmåga/potential.

## **D. Publikationer**

Denna avhandling är baserad på följande bifogade artiklar, refererade till genom deras romerska nummer.

- Artikel I:* Lyne, Å.L., Birgisson, B., and Redelius, P. (2010). Interaction Forces Between Mineral Aggregates and Bitumen Calculated using the Hamaker Constant. *Road Materials and Pavement Design, EATA*, 305-323.
- Artikel II:* Lyne, Å.L., Redelius, P., Collin, M., and Birgisson, B. (2013). Characterization of Stripping Properties of Stone Material in Asphalt. *Materials and Structures* 46:47–61.
- Artikel III:* Lyne, Å.L., Krivosheeva, O., Birgisson, B. (2013). Adhesion Between Bitumen and Aggregate: Implementation of Spectroscopic Ellipsometry Characterization and Estimation of Hamaker's Constant. *Materials and Structures* 46:1737–1745.
- Artikel IV:* Lyne, Å.L., Wallqvist, V., and Birgisson, B. (2013). Adhesive Surface Characteristics of Bitumen Binders Investigated by Atomic Force Microscopy. *Fuel* 113: 248-256.
- Artikel V:* Lyne, Å.L., Wallqvist, V., Rutland, M., Claesson, P., and Birgisson, B. (2013). Surface Wrinkling: The Phenomenon Causing Bees in Bitumen. *Journal of Materials Science* 48: 6970-6976.
- Artikel VI:* Lyne, Å.L., Collin, M., and Birgisson, B. (2014). Obstacles to Measuring Bitumen Surface Energy as it Pertains to Adhesion in Asphalt. *Submitted to Journal of Materials Science*.
- Artikel VII:* Lyne, Å.L., Taylor, N., Jaeverberg, N., Edin, H. and Birgisson, B. (2014). Low Frequency Dielectric Spectroscopy of Bitumen Binders. *Submitted to Fuel*.

## E. Genomförande

*Artikel I:* Interaction Forces Between Mineral Aggregates and Bitumen Calculated Using the Hamaker Constant

I denna artikel introducerades Hamaker's konstant enligt Lifshitz (*Israelachwili 1991*) för att beskriva och beräkna van der Waals interaktion och dess förhållande till stripping. Beräkningar av Hamaker's konstant är baserade på ett materialens dielektriska konstant och brytningsindex (se *Ekvation 1*).

$$A = A_1 + A_2 = \frac{3kT}{4} \left( \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right) \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \right) + \frac{3h\nu}{8\sqrt{2}} \frac{(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{\sqrt{n_1^2 + n_3^2} \sqrt{n_2^2 + n_3^2} \left( \sqrt{n_1^2 + n_3^2} + \sqrt{n_2^2 + n_3^2} \right)} \quad (1)$$

Där  $\varepsilon_i$  är dielektricitetskonstanten för material/medium  $i$  och  $n$  är brytningsindex för material/medium  $i$ .  $h$  är Planck's konstant ( $=6.6261 \cdot 10^{-34}$  Js),  $k$  är Boltzmann konstant ( $=1.3807 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $T$  är den absoluta temperaturen och  $\nu$  är den huvudsakliga *absorptionsfrekvenen*, normalt runt  $3 \cdot 10^{15}$  s<sup>-1</sup>.

Bitumen, mineralers och stenars dielektriska egenskaper insamlades från olika källor och är summerade i en förkortad version, se *Tabell 1*.

*Tabell 1* Dielektriska egenskaper (referenser, se *Artikel I*).

Material	Dielektricitetskonstant, $\varepsilon$	Brytningsindex, $n$
Bitumen	2.6	$n=1.58$
Luft	1	$n=1$
Vatten	80	$n=1.33$
Basalt	8	$n=1.62-1.74$
Granit	5	$n=1.45, 1.56$ (olika graniter)
Kalkspat	7.8-8.2	$n=1.49-1.66$
Kvarts	4.2-5	$n=1.55$

Hamaker's konstant för ett antal olika mineraler och stenar har rangordnats enligt deras maximala värde och är baserade på deras högsta brytningsindexvärde. Mineraler och stenar med optisk dubbelbrytning har mer än ett brytningsindexvärde. Hamaker's konstantvärden har jämförts med 'motstånd till stripping'-prestanda enligt *Cordon (1979)*. Prestanda för stenar och mineraler korrelerar väl med Hamaker's konstant där 'motstånd till stripping'-data är tillgänglig.

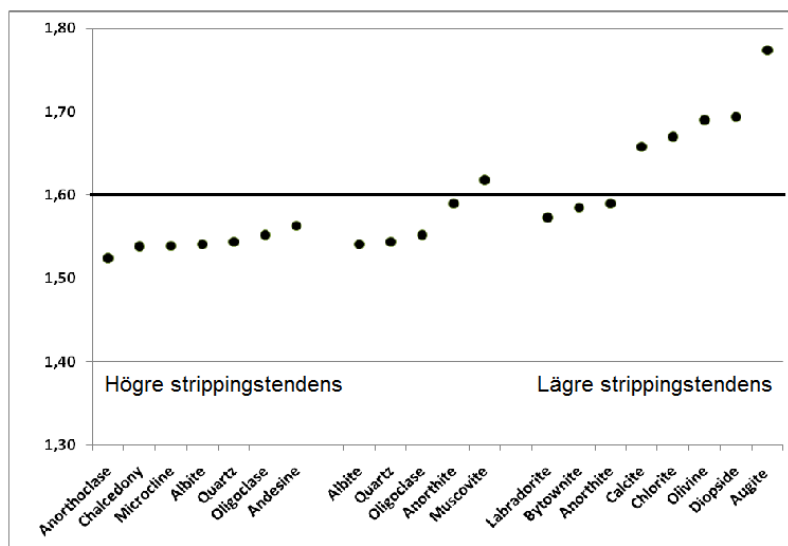
Tabell 2 Hamaker's konstant, beräknad av författarna och baserad på *Ekvation 1* enligt *Israelachvili (1991)* samt motstånd till stripping enligt *Cordon (1979)*.

	Hamakers konstant $A_{total} (\cdot 10^{-20} \text{ J})$	Motstånd till stripping Cordon (1979)
<b>Basalt</b>	11.06	Lägre strippingstendens
<b>Kalksten (Dolomit)</b>	10.33	Lägre strippingstendens
<b>Kalksten (Kalcit)</b>	10.07	Lägre strippingstendens
<b>Granit (Kaolinit)</b>	8.88	Högre strippingstendens
<b>Kvarts</b>	8.74	Högre strippingstendens (kvartsit)
<b>Albit</b>	8.56	---
<b>Microcline</b>	8.54	---
<b>Granit ( Endelite, Allophane, Hyalite)</b>	7.33-8.42	Högre strippingstendens

Artikel II: *Characterization of Stripping Properties of Stone Mineral in Asphalt*

Brytningsindex för ett antal olika mineraler och stenar har inhämtats från litteraturen och rangordnats enligt deras maximala värde. Mineraler och stenar med optisk dubbelbrytning har mer än ett brytningsindexvärde. Studien är fokuserad på den dispersiva delen av Hamaker's konstant. Brytningsindexvärden har jämförts med 'motstånd till stripping'-prestanda enligt *Stuart (1990)*. Mineraler med ett brytningsindexvärde högre än 1.6 indikerar en lägre stripping-tendens och ett brytningsindexvärde lägre än 1.6 indikerar en högre stripping-tendens, se *Figur 1*.

Brytningsindex



Figur 1 Mineralers tendens till stripping (*Stuart 1990*).



Brytningsindex för specifika mineraler har summerats. Mineraler som innehåller alkalimetaller tenderar att ha ett lägre brytningsindex. Mineraler med ett högre alkalimetall-innehåll tenderar att vara delvis vattenlösliga.

Mineraler som innehåller övergångsmetaller tenderar att ha högre brytningsindex. Järn är ett exempel på en övergångsmetall. Detsamma gäller för mineraler som innehåller jordalkalimetaller. Kalcium och magnesium är exempel på jordalkalimetaller. Närvaron av övergångsmetaller kommer också att påverka dielektricitetskonstanten vilket är ett mått på dess polarisabilitet och polaritet.

*Artikel III: Adhesion Between Bitumen and Aggregate: Implementation of Spectroscopic Ellipsometry Characterization and Estimation of Hamaker's Constant*

Brytningsindex uppmättes i denna studie på 70/100 penetrationsbitumen samt på typiska stenar som används i asfaltslagret, se *Tabell 3*. Brytningsindex uppmättes på sju bitumenprover och tre stenar med hjälp av ellipsometri. Studien är fokuserad på den dispersiva delen av Hamaker's konstant. Två typer av granit samt en diabas studerades. Varje sten innehöll flera typer av mineraler. Huvudmineralerna i graniten från Taivassalo är: pottaska, fältspat, kvarts, plagioklas, och biotit. Huvudmineralerna i diabasen från Varpaisjärvi är: amfibol, plagioklas och pyroxen. Varje mineral har specifikt brytningsindex. Bland de mineraler som är inkluderade i stenarna som studerats här har pyroxen det högsta brytningsindexet. En observation är uppvisandet av en stor spridning i brytningsindex bland mineralerna i denna studie.

*Tabell 3* Brytningsindex för tre olika stenar och sju 70/100 penetrationsbitumen.

<b>Material</b>	<b>Brytningsindex</b>
70/100 penetrationsbitumen – prov a till g	<b>1.550 – 1.595</b>
<b>Sten 1</b>	
Diabas (V)	1.712
<b>Sten 2</b>	
Granit (T) – rosa korn	1.570
Granit (T) – svarta korn	1.542
<b>Sten 3</b>	
Granit (K)	1.544

*Artikel IV: Adhesive Surface Characteristics of Bitumen Binders Investigated by Atomic Force Microscopy*

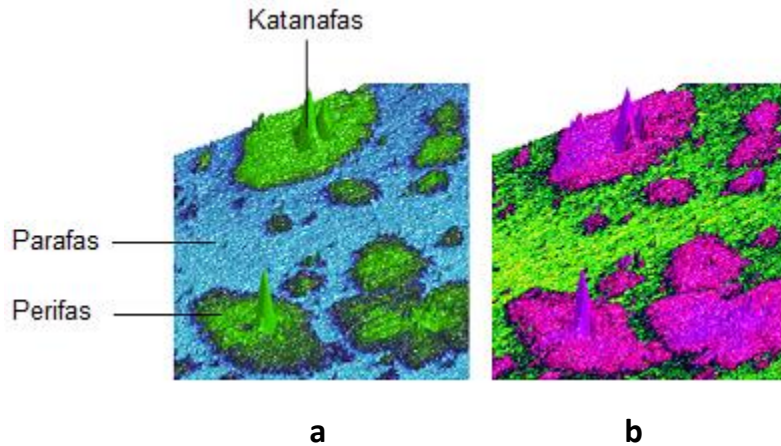
I denna studie undersöktes mikrofasseparerad topografisk morfologi, elasticitetsmodul och vidhäftning med hjälp av AFM QNM atomkraftmikroskopi på 70/100 penetrationsbitumen. AFM QNM är en ytkraftkartläggningsteknik som mäter parametrar som topografi, vidhäftning och elasticitetsmodul på en och samma gång.

AFM QNM har ytterligare kapacitet. Instrumentet erhåller information om parametrar som topografi, vidhäftning och elasticitetsmodul i en och samma punkt. Resultaten kan presenteras individuellt eller i kombination med varandra. Vidhäftning alternativt elasticitetsmodul kan presenteras tillsammans med den topografiska informationen, se *Figur 2*.

*Figur 2a* visar en topografisk bild överlagd med vidhäftningsinformation, och *Figur 2b* visar en topografisk bild överlagd med elasticitetsmodulsinformation för bitumenprov 'e' med vaxinnehåll 1.9 %, och brytningsindex 1.579.

Vidhäftningskrafter uppmätta i regionen intill bina (peri-fasen) och i bi-fasen (katana-fasen) är lägre än vidhäftningskrafter uppmätta i den släta matrisen (para-fasen). Likaledes kan det observeras att elasticitetsmodulen i regionen intill bina (peri-fasen) och i bi-fasen är högre än elasticitetsmodulen som är uppmätt i den släta matrisfasen.

Dessa elasticitetsmodulsresultat motsäger resultaten som presenterats av *Dourado et al. (2011)* som mätte lokal styvhetsvariation via indentation på 50/70 penetrationsbitumen där en lägre elasticitetsmodul uppmätts på bina än på matrisfasen. Skillnaderna i resultat kan möjligen förklaras med att ett 50/70 penetrationsbitumen är hårdare än ett 70/100 penetrationsbitumen. En annan förklaring kan vara temperaturen. Om bina innehåller vax, och temperaturen på bindemedlet höjs, kan binas elasticitetsmodul plötsligt bli lägre än matrisens elasticitetsmodul.



**Figur 2** Prov 'e' uppmätt med topografisk kartläggning (AFM QNM).  
**a:** 3D topografisk information överlagd med vidhäftningsinformation.  
**b:** 3D topografisk information överlagd med elasticitetsmodulsinformation.

*Artikel V: Surface Wrinkling: The Phenomenon Causing Bees in Bitumen*

I denna artikel har bakomliggande mekanismer för uppkomsten av bin på ytan av uppvärmt bitumen undersökts. AFM QNM användes för att undersöka mikrostrukturen på ytan av typiska bitumenprover.

Typiska periodiska topografiska kännetecken som påminner om bi-strukturer (or katana-fas) och är omgivna av en upplöst fas samt en slät matris kan ses i *Figur 3a och b*. De topografiskt högre och lägre banden som bildar bin fortsätter från bina ut och genom peri-fasen. Denna fortsättning av band kan ses i *Figur 4b*. Det föreslås här att bina (katana-fasen) och peri-fasen består av en enda fas. I denna artikel kallas den gemensamma fasen för bilaminat-fasen.

Det föreslås dessutom att bilaminat-fasen är separerad från volymen/bulken och är transporterad till bitumenytan i kontakt med luft precis som choklad ibland blommar på chokladytan eftersom kakao-fettet separerar och migrerar till ytan. Detta kan upplevas som en vit dimma (*Longchamp och Hartel 2004*).

Vad är anledningen till att bilaminat-fasen ser ut som bin?

Ett antal själv-organiserade gestaltningar finns i naturen, från organisering av molekylstrukturer till organisering av kluster i galaxer. Självorganisation är normalt initierat av inre variationer.

En sorts själv-organisation som beror på inre variationer är den spontana utformningen av i hög grad ordnade ytskrynklor (*Chung et al. 2011*). Dessa ytskrynklor förorsakas normalt av termisk förkortning, eller av att fukt- eller vatten lämnar materialet och därmed förorsakar krympning, eller av mekanisk sammantryckning. Ytskrynklor är resultatet av balansen mellan den energi som behövs för att böja det styvare bilaminatet och den energi som behövs för att deformera den mjukare matrisen.

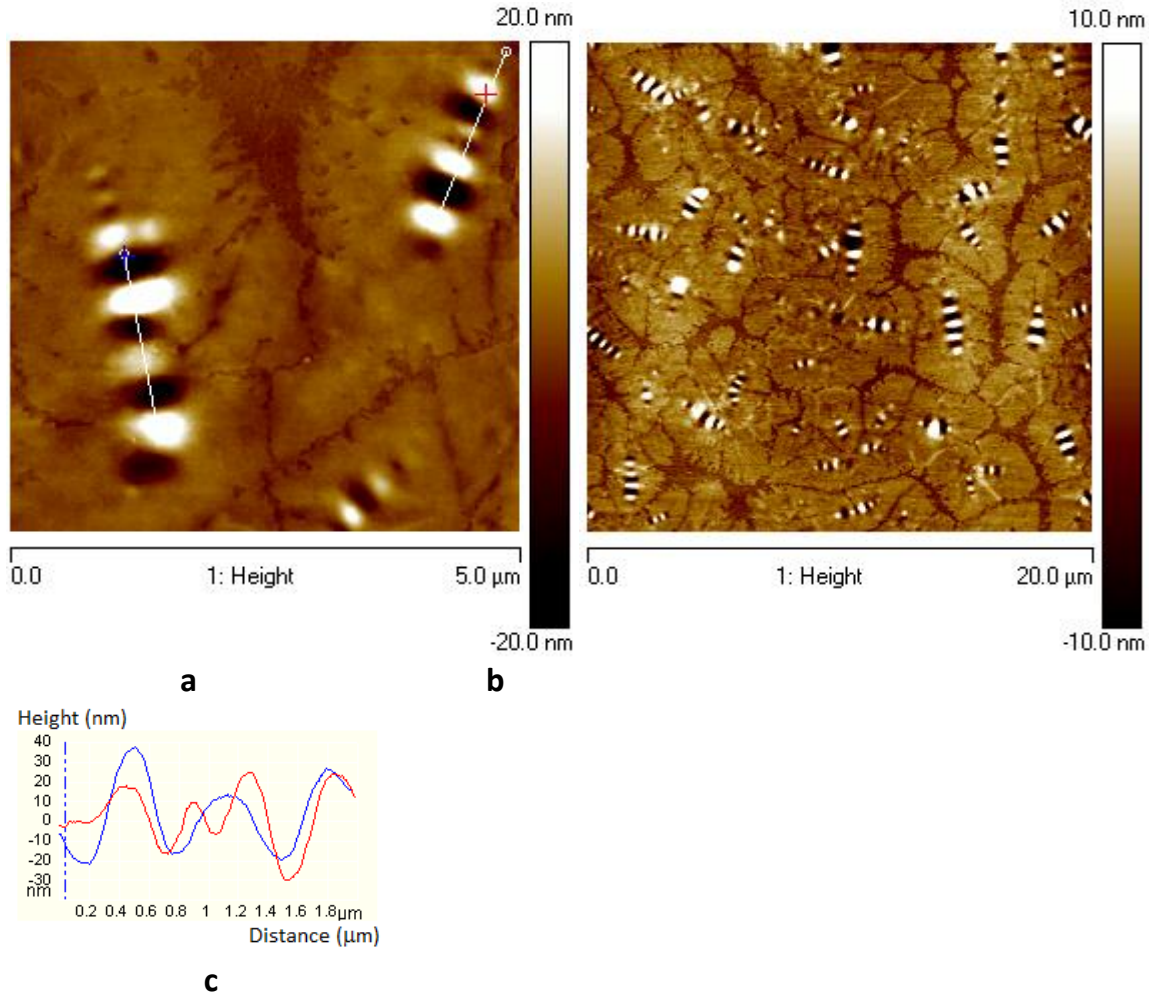
Överväg att bilaminatet består av ett relativt tunt material som vilar på en mindre styv matris (se *Figur 4*). Instabilitet av typen buckling av det tunna ytmaterialet kan då förekomma om bi-laminatet är utsatt för kompressionsbelastning, som till exempel under nedkylning av bitumen efter uppvärmning. Det tunna bilaminatet kommer då att buckla med väldefinierade våglängder och amplituder.

Amplituden kan bestämmas med hjälp av ytskrynklorernas våglängder och från materialegenskaper hos bilaminat-fasen och matris-fasen (*Meredith et al. 2002*). Genom observation av typiska bin på ytan av bitumen (som i *Figur 3*), antas att vågformen av det bucklade bi-laminatet är sinusformad,  $(1 - \nu_m^2) \sim (1 - \nu_l^2)$ . Därmed kan den kritiska våglängden bestämmas enligt *Ekvation 2*:

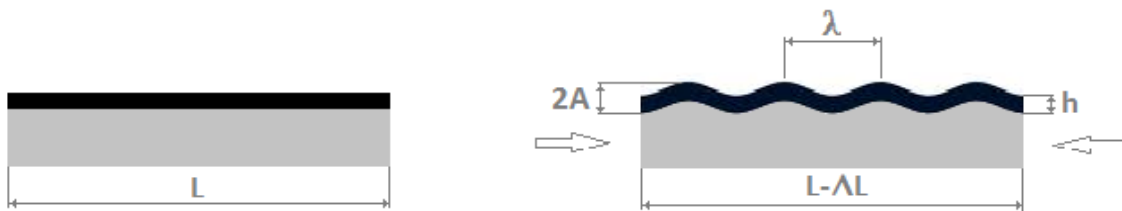
$$\lambda = 2\pi h \left[ \frac{(1-\nu_m^2)E_l}{3(1-\nu_l^2)E_m} \right]^{1/3} \sim 2\pi h \left[ \frac{E_l}{3E_m} \right]^{1/3} \quad (2)$$

Där  $h$  är bilaminatets tjocklek,  $\nu$  är Poisson's ratio,  $E$  är Young's modul, och bokstäverna  $l$  och  $m$  betecknar bilaminat-fasen och matris-fasen.

Endast en mindre skillnad kan upptäckas mellan bilaminat-fasens Young's modul och matris-fasens Young's modul. Bilaminatfasens Young's modul är systematiskt marginellt något styvare än matris-fasen.



**Figur 3** AFM QNM topografi-bilder för 70/100 penetrationsbitumen.  
 a.  $x=5.0 \mu\text{m}$   $y=5.0 \mu\text{m}$   $z=0.04 \mu\text{m}$   
 b.  $x=20.0 \mu\text{m}$   $y=20.0 \mu\text{m}$   $z=0.02 \mu\text{m}$   
 c. Karakteristiska höjdlinjer (profiler av två bin).



**Figur 4** Schematiskt bild av ytskrynklor, adapterad bild från Chung et al. (2011).

*Artikel VI: Obstacles to Measuring Bitumen Surface Energy as it Pertains to Adhesion in Asphalt*

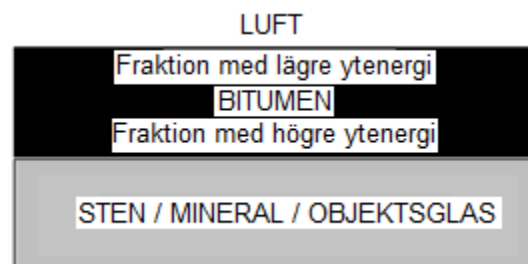
Penetrationsbitumen har bestrukits på objektsglas och därefter har ytenergikomponenter fastställts på bitumen genom kontaktvinkelmätningar med sessile-drop instrument.

I denna artikel har ytenergikomponenter för penetrationsbitumen blivit jämförda med ytenergikomponenter för olika lösningsmedel (probe liquids). Denna jämförelse visar på att uppmätta ytenergier för penetrationsbitumen i kontakt med luft har blivit uppmätta på den vax-separerade fasen i stället för på volymsfasen.

Sessile-drop-metoden är en teknik som fastställer fasta materials och vätskors energier på ytan (ytenergier). Om bitumen fas-separerar och mätningarna endast har utförts på ytan, kommer inte dessa mätningar att ge representativa värden för bitumenproduktens volymsenergi.

Baserat på materialkomponenternas dielektrisk spektroskopisk respons, reflekterade av deras dielektriska konstanter och brytningsindex, har det här diskuterats vilka bitumenkomponenter som förväntas migrera till bitumenytan i kontakt med luft samt bitumenytan som är i kontakt med objektsglas, se *Figur 5*.

Efter det att ett objektsglas blivit nedsänkt i upphettat bitumen och bitumenmaterialet kylts ned, kommer molekylerna att omstruktureras för att motarbeta den entropiska tendensen att uppnå oordning. Alla system strävar efter att uppnå lägre energi och när bitumen fas-separerar, kommer fraktionen med den lägsta ytenergin att migrera ut från övrig bulkvolym och röra sig mot bitumenytan som är i kontakt med luft.



*Figur 5* Bitumenfraktioner i kontakt med luft eller sten/mineral/objektsglas.

## Artikel VII: *Low Frequency Dielectric Spectroscopy of Bitumen Binders*

Målet med denna artikel är att undersöka vidhäftningen hos icke åldrad penetrationsbitumen med hjälp av permittivitetsanalys.

I en nyligen genomförd studie undersöktes med hjälp av rullflaskmetoden yttäckning som ett mått på bitumens vidhäftningsförmåga. Procent area på kvartsstenen som är täckt med bitumen bestämdes efter 24 timmars omrörning i vatten (*Olsson et al. 2010*). Yttäckningen var i princip obefintlig utan någon tillsats av vidhäftningsmedel till bitumen-aggregatblandningen. Portland cement tillsattes därefter till bitumen-aggregatblandningen för att förbättra yttäckningen (dvs. vidhäftningen). Yttäckning uppmättes vid två olika laboratorier, Lab A och Lab B.

Yttäckningen ökade med tillsats av Portland cement, men i olika grad för olika bindemedel. Det var möjligt att få en god linjär anpassning mellan den genomsnittliga tangenten för den dielektriska förlustvinkeln i frekvensområdet 0.01 till 1 Hz och yttäckningen med hjälp av rullflaskmetoden (determinationskoefficient 0.89 för Lab A och 0.86 för Lab B). Bitumen som har en högre genomsnittlig förlusttangent i frekvensområdet 0.01 till 1 Hz ger högre yttäckning.

Utan tillsats av Portland cement till ytan av kvartsaggregatet är bitumen i direkt kontakt med kvartsaggregat (se *Figur 6*). Med tillsats av Portland cement till kvartsaggregat placeras ett mellanliggande skikt mellan bitumen och kvartsaggregatet.

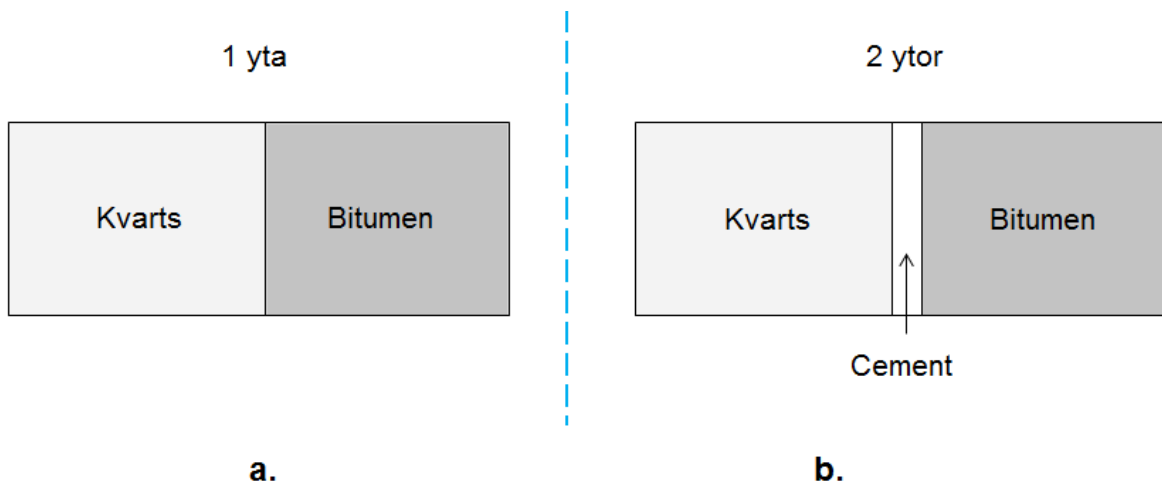
Kvarts har ett lågt brytningsindex på 1.55 och en låg dielektricitetskonstant på 4.2. Från dessa värden kan man dra slutsatsen att i jämförelse med andra mineraler har ren kvarts både en låg dispersiv och en låg total polarisering.

Typisk Portland cement innehåller 63 % kalciumoxid, 1.5 % magnesiumoxid och 3 procent järnoxid (*Neville och Brooks 1987*). MgO har ett högt brytningsindex på 1.74 och en hög dielektrisk konstant på 9.90, CaO har ett högt brytningsindex på 1.84 och en hög dielektrisk konstant på 11.95, och järnoxider har ännu högre brytningsindex på 2.11-2.73 som beror på järnoxidtyp och ännu högre dielektriska konstanter på 20.6-31.4 (även beroende av järnoxidtyp) (*WebMineral 2014*).

MgO, CaO och järnoxider har alla höga brytningsindex som visar på deras höga grad av London dispersiv polariserbarhet. Alla oxider har också höga dielektriska konstanter, speciellt järnoxider, och därmed höga grader av total polariserbarhet. Portland cement är ett material som starkt bidrar till Debye och Keesom interaktioner. Den högre yttäckningsgraden som uppnås med tillsats av Portland cement på ytan av

kvartsaggregaten kan förklaras av att MgO, CaO och järnoxider som jämfört med kvarts har högre London dispersiv interaktion och högre Debye och Keesom interaktioner. Det är känt att när Portland cement tillsätts till ytan av kvartsaggregat vidhäftar bitumen bättre till stenytan.

Den dielektriska konstanten av järnoxider är så hög som vissa polära föreningar och lösningsmedel såsom aceton (20.7) och etanol (24.3). Reaktiviteten av järnoxider kan därmed bidra med bindningsenergi (bindningsförmåga) mellan aggregat och bitumen.



Figur 6

a. Interaktionen mellan kvarts-bitumen.

b. Interaktionen mellan kvarts-Portland cement och Portland cement-bitumen.



## F. Bibliography

- Anderson, E. W. a. M., D.W. (1958). "The dielectric constant and loss of polypropylene." Journal of Polymer Science 31(122): 241-242.
- Applequist, J. (1993). 'Atom charge transfer in molecular polarizabilities: application of the Olson-Sundberg model to aliphatic and aromatic hydrocarbons.' Journal of Physical Chemistry 97(22): 6016-6023.
- Arvidsson, H. and Loores, K.-J. (2008). 'Inverkan av köld och vatten på glimmerhaltiga bärlag.' VTI notat 2-2008. [www.vti.se/publikationer](http://www.vti.se/publikationer).
- Bagampadde, U., Isacson, U. and 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.
- Bagampadde, U. (2005). "Investigations on moisture damage-related behaviour of bituminous materials." Doctoral Thesis in Highway Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Bagampadde, U., Isacson, U. and Kiggundu, B.M. (2006). 'Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures.' The International Journal of Pavement Engineering 6, 4, 229-239.
- Bahramian, A. (2012). 'Evaluating surface energy components of asphalt binders using Wilhelmy plate and sessile drop techniques.' Master's thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Binning, G., Quate, C. F. and Gerber, C. (1986). 'Atomic Force Microscopy.' Physical Review Letters 56(9): 930-933.
- Britannica (2014). 'Dielectrics'. Retrieved 2014-01-09.
- Buckley, J. S. (1996). 'Microscopic Investigation of the Onset of Asphaltene Precipitation.' Fuel Science and Technology International 14: 55-74.
- Buckley, J. S., Hirasaki, G.J., Liu, Y., Von Drasek, S., Wang, J-X., and Gill, B.S (1998). 'Asphaltene precipitation and solvent properties of crude oils.' Petroleum Science and Technology. 16 3-4: 251-285.
- Carambassis, A., Jonker, L. C., Attard, P. and Rutland, M.W. (1998). 'Forces measured between hydrophobic surfaces due to a submicroscopic bridging bubble.' Physical Review Letters 80(24): 5357-5360.
- Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V., and Varadan, V.K. (2004). 'Microwave electronics: measurement and materials characterization.' John Wiley and Sons.
- Chisholm, Hugh, Ed (1911). 'Petrology.' Encyclopedia Britannica. Eleventh edition. Cambridge University Press.
- Chow, R. S., Tse, D.L., Takamura, K. (2004). 'The conductivity and dielectric behaviour of solutions of bitumen in toluene.' Canadian Journal of Chemical Engineering 82: 840-845.

Chung, J. Y., Nolte, A.J., and Stafford, C.M. (2011). 'Surface wrinkling: A Versatile Platform for Measuring Thin-Film Properties.' Advanced Materials 23: 349-368.

Cordon, W.A. (1979). 'Properties, Evaluation, and Control of Engineering Materials.' McGraw-Hill, N.Y.

Csgnetwork (2014). <http://www.csgnetwork.com/dieconstantstable.html> 2014-05-14.

Dahlenborg, H., MiA., Bergenståhl, B. and Kalnin, D.J.E. (2011). 'Investigation of chocolate surfaces using profilometry and low vacuum scanning electron microscopy.' Journal of the American Oil Chemists Society 88: 773-783.

de Moraes, M. B., Pereira, R.B., Simao, R.A., and Leite, L.F.M. (2010). 'High temperature AFM study of CAP 30/45 pen grade bitumen.' Journal of Microscopy. 239(1): 46-53.

Derjaguin, B. V., Muller, V.M., and Toporov, Yu.P. (1975). 'Effect of contact deformations on the adhesion of particles.' Journal of Colloid and Interface Science 53(2): 314-326.

Dourado, E. R., Simao, R.A., and Leite, L.F.M (2011). 'Mechanical properties of asphalt binders evaluated by atomic force microscopy.' Journal of Microscopy 245: 118-119.

Ensley, E.K. (1975). 'Multilayer Adsorption with Molecular Orientation of Asphalt on Mineral Aggregate and Other Substrates.' Journal of Applied Chemistry and Biotechnology, 25, 671-682.

Ensley, E.K., Petersen, J.C. and Robertson, R.E. (1984). 'Asphalt-Aggregate Bonding Energy Measurements by Microcalorimetric Methods.' Thermochemica Acta, 77, 95-107.

Fantner, G. E., Oroudjev, E., Schitter, G., Golde, L.S., Turner, P., Finch, M.M., Turner, P., Gutschmann, T., Morse, D.e., Hansma, H., and Hansma, P.K. (2006). 'Sacrificial bonds and hidden length: unraveling molecular mesostructures in tough materials.' Biophysical Journal 15: 1411-1418.

Fowkes, F.M., (1962). 'Determination of Interfacial Tensions, Contact Angles and Dispersion Forces in Surfaces by Assuming Additivity of Intermolecular Interactions in Surfaces.' Journal of Physical Chemistry, 66(2)382.

Fromm, H.J. (1974). 'The mechanics of asphalt stripping from aggregate surfaces.' Ontario Ministry of Transportation and Communication. Research Rapport 190.

Ghosh, V., Ziegler, G.R., and Anantheswaran, R.C. (2002). 'Fat, moisture, and ethanol migration through chocolates and confectionary coating.' Critical Reviews in Food Science and Nutrition 42: 583-626.

Goual, L., and Firoozabadi, A. (2002). "Measuring asphaltenes and resins, and dipole moment in petroleum fluids." AIChE Journal 48(11): 2646-2663.

Hamaker, H. C. (1937). 'The London-van der Waals Attraction Between Spherical Particles.' Physica 4(10): 1058-1072.

Handbook of Mineralogy (2011). [Electronic]. Available: <http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=alpha> [2011-03-08].

- Havriliak, S. a. N., S. (1967). "A complex plane representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers. ." In Polymers. Elsevier 8: 161-210.
- Hefer, A., and Little, D.N (2005). 'Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. International Center for Aggregates Research.' Research Report ICAR-505-1.
- Hough, D. B., and White, L. R (1980). 'The calculation of Hamaker constants from Lifshitz theory with applications to wetting phenomena.' Advances in Colloid and Interface Science 14: 3-41.
- Höboda, P. (1998). 'Vattenkänslighet hos asfaltbeläggning. En litteraturutredning.' (In Swedish). National Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden. VTI Internal Rapport No. 35.
- Höboda, P. and Thorèn, H. (1975). 'Berggrundens vägbyggnadstekniska egenskaper.' (In Swedish). National Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden. VTI Internal Rapport No. 221.
- Iler R.K., (1979). The chemistry of silica. Wiley, New York. P. 623-729.
- Isacsson, U. (1976). 'Vidhäftning i bituminösa beläggningar. En litteraturutredning.' (In Swedish). National Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden. VTI Internal Rapport No. 6.
- Israelachvili, J. (1991). 'Intermolecular and Surface Forces.' Academic Press. Second Edition.
- Jamieson, I.L., Moulthrop, J.S. and Jones, D.R. (1995). 'SHRP Results on Binder-Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping.' Asphalt Yearbook 1995, 17-21. 26 Road Materials and Pavement Design. Volume 11 Special Issue. P. 305-323.
- Jaspersen, S. N., and Schnatterly, S. E (1969). 'An Improved Method for High Reflectivity Ellipsometry Based on a New Polarization Modulation Technique.' The Review of Scientific Instruments 40(6): 761-767.
- Jones, D.R. (1992). 'Understanding How the Origin and Composition of Paving-Grade Asphalt Cements Affect their Performance.' SHRP, Asphalt Research Tech. Univ. of Texas at Austin, Texas. Memo. No. 4.
- Jones, D.R. IV. (1993). 'SHRP Material Reference Library: Asphalt Cements: A concise Data Compilation.' SHRP-A-645, National Research Council, Washington DC.
- Hansson, P. M., Swerin, A., Schoelkopf, J., Gane, P.A.C., and Thormann, E. (2012). 'Influence of Surface Topography on the Interactions between Nanostructured Hydrophobic Surfaces.' Langmuir 28: 8026-8034.
- Hough, D. B., and White, L. R (1980). 'The calculation of Hamaker constants from Lifshitz theory with applications to wetting phenomena.' Advances in Colloid and Interface Science 14: 3-41.
- Huang, Y. H., Ed. (2004). 'Pavement Analysis and Design.' Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson Prentice Hall.
- Hutter, L. J., and Bechhoefer, J. (1993). 'Calibration of atomic force microscope tips.' Review of scientific instruments 64(7): 1868-1873.

- Kané, M., Djabourov, M., Volle, J.-L., Lechaire, J.-P., and Frebourg, G. (2003). 'Morphology of paraffincrystals in waxycrudeoils cooled in quiescent conditions and under flow.' Fuel 82.(2.): 127-135.
- King, C. J. (2013). Separation processes.
- Kim, Y.-H., Hwang, M.S., and Kim, H.J. (2001). 'Infrared spectroscopy study of low-dielectric-constant fluorine-incorporated and carbon-incorporated silicon oxide films.' Journal of Applied Physics 90(7): 3367-3370. .
- Kück, S., Werheit, H. Madelung, O. (Ed.) (2000). 'Non-Tetrahedrally Bonded Binary Compounds II, Landolt-Börnstein - Group III Condensed Matter.' Volume 41D.
- Kokosa, J. M., Przyjazny, A., Jeannot, M.A. (2009). "Solvent Microextraction Theory and Practice".
- Lanza, V. L. a. H., D.B. (1958). "The density of the dielectric constant of polyethylene." Journal of Polymer Science 28(118): 622-625
- Lifshitz, E. M. (1956). 'The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids.' Soviet Physics JTP 2: 73-83.
- Linhjell, D., Lundgaard, L. and Gäfvert, U. (2007). 'Dielectric Responce of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging.' IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 14(1): 156-169.
- Little, D. N., and Bhasin, A (2006). 'Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavement.' Contractor's Final Report for NCHRP Project 9-37.
- Loeber, L., Sutton, O., Morel, J., Valleton, J.-M., Muller, G (1996). 'New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy.' Journal of Microscopy 182(1): 32-39.
- Longchamp, P. and R. W. Hartel (2004). 'Fat bloom in chocolate and compound coatings.' European Journal of Lipid Science and Technology 106: 241-274.
- Lu, X., and Redelius, P. (2006). 'Compositional and Structural Characterization of Waxes Isolated from Bitumens.' Energy and Fuels. 20: 653-660.
- Lu, X., and Redelius, P. (2007). 'Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance.' Construction and Building Materials. 21(11): 1961-1970.
- Lu, X., Kalman, B., and Redelius, P (2008). 'A new test method for determination of wax content in crude oils, residues and bitumens.' Fuel 87: 1543-1551.
- Lu, X., Langton, M., Olofsson, P., and Redelius, P. (2005). 'Wax morphology in bitumen.' Journal of Materials Science 40: 1893-1900.
- Lyne, Å. L., Birgisson, B., and Redelius, R. Volume Special Issue (2010). "Interaction forces between mineral aggregates and bitumen calculated using the Hamaker constant." Road Materials and Pavement Design 11 (Special Issue): 305-323.

- Lyne, Å. L., Collin, M., and Birgisson, B (2014a). "Obstacles to measuring bitumen surface chemistry as it pertains to adhesion in asphalt." Submitted to Journal of Materials Science.
- Lyne, Å. L., Krivosheeva, O., and Birgisson, B. (2013b). "Adhesion between bitumen and aggregate - Implementation of spectroscopic ellipsometry characterisation and estimation of Hamaker's constant." Materials and Structures 46: 1737-1745.
- Lyne, Å. L., Redelius, P., Collin, P. and Birgisson, B. (2013a). "Characterization of stripping properties of stone material in asphalt." Materials and Structures 46: 47-61.
- Lyne, Å. L., Taylor, N., Jaeverberg, N., Edin, H. and Birgisson, B. (2014b). "Low frequency dielectric spectroscopy of bitumen binders." Submitted to Fuel.
- Lyne, Å. L., Wallqvist, V., and Birgisson, B (2013c). "Adhesive surface characteristics of bitumen binders investigated by Atomic Force Microscopy." Fuel 113: 248-256.
- Lyne, Å. L., Wallqvist, V., Rutland, M.W., Claesson, P., and Birgisson, B. (2013d). "Surface wrinkling: the phenomenon causing bees in bitumen." Journal of Materials Science 48(20): 6970-6976.
- Mack, C. (1941). 'Study of bituminous mixtures on road-testing machines.' Journal of the Society of Chemical Industry Vol. 60, Issue 5, May.
- Macro (2014). <http://macro.lsu.edu/howto/solvents/THF.htm> Retrieved 2014-01-27.
- Majidzadeh, K. and Brovold, F.N. (1968). 'Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures.' Highway Research Board, Special Report 98.
- Maruska, H. P., and Rao, B.M.L. (1987). 'The role of polar species in aggregation of asphaltenes.' Fuel Science and Technology International 5(2): 119.
- Masson, J.-F., Leblond, V. and Margeson, J. (2006). 'Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy.' Journal of Microscopy 221: 17-29.
- Masson, J. F., Leblond, V., Margeson, J., and Bundalo-Perc, S. (2007). 'Low temperature bitumen stiffness and viscous paraffinic nano and micro size domains by cryogenic AFM and PDM.' Journal of Microscopy. 227(3): 191-202.
- Meredith, J. C., Karim, A., and Amis, E.J. (2002). 'Combinatorial methods for investigations in polymer materials science.' Material Research Society Bulletin 27: 330-335.
- Microcat, C. (2014). <http://www.microkat.gr/msdspd90-99/Cyclohexylamine.htm> Retrieved 2014-01-27.
- Microcat, C. (2014). <http://www.microkat.gr/msdspd90-99/Cyclohexanone.htm> 2014-01-27.
- Microcat, E. (2014). <http://www.microcat.gr/msdspd90-99/Ethylbenzene.htm>. Retrieved 2014-01-27.
- Miquel, M. E., Carli, S., Couzens, P.J., Wille, H.J., and Hall, L.D. (2001). 'Kinetics of the migration of lipids in composite chocolate measured by magnetic resonance imaging.' Food Research International 34: 773-781.

- Mitchell, D. L., Speight, G (1973). 'The solubility of asphaltenes in hydrocarbon solvents.' Fuel 52(4): 149-152.
- Muller, V. M., Derjaguin, B.V., and Toporov, Yu.P. (1983). 'On two methods of calculation of the force of sticking of an elastic sphere to a rigid plane.' Colloids and Surfaces 7(3): 251-259.
- Musser, B. J., and Kilpatrick, P. K. (1998). 'Molecular characterization of wax isolated from a variety of crude oils.' Energy and Fuels 12: 715-725.
- Naderi, A., Iruthayaraj, J., Vareikis, A., Makuska, R., Claesson, PM (2007). 'Surface properties of bottle-brush polyelectrolytes on mica: effects of side chain and charge densities.' Langmuir 23(24): 12222-12232.
- Narayanamurti, V., Störmer, H.L., Chin, M.A., Gossard, A.C., Wiegmann, W (1976). 'Selective Transmission of High-Frequency Phonons by a Superlattice: The "Dielectric" Phonon Filter' Physical Review Letters 43(27): 2012-2016.
- Neville, A. M., and Brooks, J.J. (1987). 'Concrete Technology.' Second Edition.
- Nickel, E.H. (1995). '[The definition of a mineral](#).' The Canadian Mineralogist 33 (3): 689-690.
- Olsson, K., Krona, N., and Nordgren, T (2010). 'Asphalt concrete test sections containing bitumen of different origins.' SBUF report 12091.
- Oudin, J. L. (1970). 'Analyse Géochimique de la Matière Organique Extraite des Roches Sédimentaires I. Composés Extractibles au Chloroforme.' Rev. Ins. Fr. Pét. 25 (1): 4.
- Owens, D. K., and Wendt, R.C. (1969). 'Estimation of the surface free energy of polymers.' Journal of Applied Polymer Science(13): 1741-1747.
- Parsegian, V.A. (2006). 'van der Waals forces. A handbook for Biologists, Chemists, Engineers.' and Physicists, Cambridge University Press, First edition, 2006.
- Pauli, A. T., Grimes, R.W. Beemer, A.G., Turner, T.F. and Brandhaver, J.F (2011). 'Morphology of asphalts, asphalt fractions and model wax-doped asphalts studied by atomic force microscopy.' International Journal of Pavement Engineering 12: 291-309.
- Peltonen, P. (1992). 'Road aggregate choice based on silicate quality and bitumen adhesion.' Journal of Transportation Engineering, Vol. 118, No. 1.
- Penzen, S., and Speight, J.G. (1974). 'Electrical conductivities of bitumen fractions in non-aqueous solvents.' Fuel 53: 192-197.
- Pittenger, B., Erina, N., and Su, C. (2010) 'Quantitative Mechanical Property Mapping at the Nanoscale with PeakForce QNM'. Veeco Instruments Inc.
- Plancher, H., Dorrence, S.M., and Petersen, J.C (1977). "Identification of chemical types in asphalts strongly adsorbed at the asphalt-aggregate interface and their relative displacement by water." Proc. Association of Asphalt Paving Technologists 46: 151-175.
- Pople, S. and Williams, M. (2002). 'Science to GCSE.' Oxford University Press. Second edition.
- Rabuffi, M. a. P., G. (2002). "Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors " IEEE Transactions on plasma science 30(5): 1939-1942.

- Rafoeg (2014). [http://www.rafoeg.de/20.../20\\_Daten/dielectric\\_chart.pdf](http://www.rafoeg.de/20.../20_Daten/dielectric_chart.pdf) Retrieved 2014-01-27.
- Rao, K. S., and Rao, K.V. (1968). 'Dielectric Dispersion and its Temperature Variation in Calcite Single Crystals.' Zeitschrift fir Physik 216: 300--306.
- Read, J., and Whiteoak, D. (2003). Fifth edition. The Shell Bitumen Handbook.
- Redelius, P.G. (2000). 'Solubility Parameters and Bitumen.' Fuel 79, 27-35.
- Redelius, P., Lu, X., and Isacsson, U. (2002). 'Non-Classical Wax in Bitumen.' Road Materials and Pavement Design. 3(1): 7-21.
- Redelius, P. G. (2006). 'The structure of asphaltenes in bitumen.' Road Material and Pavement Design (Special Issue ): 143 - 162.
- Saether, E. (1948). 'Om vedheftning mellom bituminöse bindemidler og steinmaterialer.' Meddelelser fra Vegdirektören, Nr. 1.
- Schmets, A., Kringos, N., Pauli, T., Redelius, P. and Scarpas, T. (2010). 'On the existence of wax-induced phase separation in bitumen.' International Journal of Pavement Engineering 11(6): 555-563.
- Smith, B. L., Schaffer, T.E., Viani, M., Thompson, J.B., Frederick, N.A., Kindt, J., Belcher, A., Stucky, G.D., Morse, D.E., and Hansma, P.K. (1999). 'Molecular mechanistic origin of the toughness of natural adhesives, fibres and composites' Nature 399(761-763).
- Stafford, C. M., Harrison, C., Beers, K.L., Karim, A., Amis, E.J., VanLandingham, M.R., Kim, H.C., Volksen, W., Miller, R.D., and Simonyi, E.E. (2004). 'A buckling-based metrology for measuring the elastic moduli of polymeric thin films.' Nature Materials: 545-550.
- Stuart, K.D. (1990). 'Moisture damage in asphalt mixtures – A state-of-the-art report.' Report No. FHWA-RD-90-019., Federal Highway Administration, Washington, D.C. (March 1990).
- Subramanian, M. A., Shannon, R.D., Chai, B.H.T., Abraham, M.M., and M.C. Wintergill, M.C. (1989). 'Dielectric constants of BeO, MgO, and CaO using the two-terminal method.' Phys Chem Minerals 16: 741-746.
- Taylor, S. D., Czarnecki, J., and Masliyah, J (2001). 'Refractive index measurements of diluted bitumen solutions.' Fuel 80(14): 2013-2018.
- Telford, W. M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E. (1990). 'Applied Geophysics'. Cambridge University Press. Second Edition. P. 291.
- Thompson, J. B., Kindt, J. H., Drake, B., Hansma, H.G., Morse, D.E., and Hansma, P.K. (2001). 'Bone indentation recovery time correlates with bond reforming time.' Letters to Nature 414: 773-776.
- Thormann, E., Mizuno, H., Jansson, K., Hedin, N., Fernandez, M.S., Arias, J.L., Rutland, M.W., Pai, R.K., and Bergström, L. (2012). 'Embedded proteins and sacrificial bonds provide the strong adhesive properties of gastroliths.' Nanoscale 4: 3910-3916.

- van Oss, C.J., Chaudbury, M.K., and Good, R.J. (1988). 'Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems.' Chemical Reviews Vol. 88. No. 6. P. 927-941.
- Vrålstad, H., Spets, Ö., Lesaint, C., Lundgaard, L., Sjöblom, J. (2009). 'Dielectric properties of crude oil components.' Energy Fuels 23: 5596-5602.
- Vuorinen, M. (1999). 'A new ultrasonic method for measuring stripping resistance of bitumen on aggregate.' Licentiate Thesis, Helsinki University of Technology.
- Wallqvist, V., Claesson, P. M., Swering, A., Schoelkopf, J., Gane, P.A.C. (2006). 'Interaction forces between talc and hydrophobic particles probed by AFM.' Colloids and Surfaces A: Physiochemical and Engineering Aspects 277: 183-190.
- Wallqvist, V., Claesson, P. M., Swerin, A., Schoelkopf, J., and Gane, P.A.C. (2007). 'Interaction forces between talc and pitch probed by atomic force microscopy.' Langmuir 23(8): 4248-4256.
- Wallqvist, V., Claesson, P. M., Swerin, A., Schoelkopf, J., and Gane, P.A.C. (2009A). 'Influence of wetting and dispersing agents on the interaction between talc and hydrophobic particles.' Langmuir 25(12): 6909-6915.
- Wallqvist, V., Claesson, P. M., Swerin, A., Östlund, C., Schoelkopf, J., and Gane, P.A.C. (2009B). 'Influence of surface topography on adhesive and long-range capillary forces between hydrophobic surfaces in water.' Langmuir 25(16): 9197-9207.
- Web Mineral (2011). [Electronic]. Available: <http://webmineral.com/chemical.shtml> [2011-03-08].
- Wiehe, I. A. (1996). 'Two-dimensional solubility parameter mapping of heavy oils.' Fuel Science and Technology International 14(1, 2): 289-312.
- Wikipedia (2014). <http://www.wikipedia.org/wiki>. Retrieved 2014-2001-2027.
- Zenkiewicz, M. (2007). 'Methods for the calculation of surface free energy of solids.' Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 24(1): 137-145.