

Vidhäftningsegenskaper i asfaltsbeläggningar

Karaktärisering av delmaterial



Åsa Laurell Lyne och Jan Trägårdh

2018-06-01

FÖRORD

Ett stort tack riktas till Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond och Trafikverket som tillsammans bidragit till den huvudsakliga finansieringen av detta projekt.

Följande personer har medverkat och bidragit till projektet i referens- och arbetsgrupper:

- Peab – Mats Wendel
- Skanska – Kenneth Olsson
- NCC – Jonas Ekblad
- Trafikverket – Torsten Nordgren
- Nynäs – Sven Fahlström, Xiaohu Lu, Hilde Soenen
- CBI – Åsa Laurell Lyne
- KTH – Nathaniel Taylor
- SU - Zoltan Bacsik

SBUF-studien 13191 är uppdelad i tre faser (Etapp A, Etapp B och Etapp C). Denna rapport inkluderar resultat från Del A och Del B enligt ansökan.

Karaktäriseringen av materialen har utförts på följande företag, institut, högskola och universitet:

- Nynäs – infraröd spektroskopi, FTIR-ATR (Etapp A)
- KTH - permitivitet, Dielektrisk förlustvinkel (Etapp A)
- SU - Specifik area och porstorlek, BET (Etapp A)
- CBI - Tunnslipspreparering och petrografisk analys, risk för alkalisilikareaktioner (ASR), Partikelstorleksfördelning, Kornstorleksfördelning (Etapp B)

I Etapp C planeras olika försök med rullflaska och vändskak.

Åsa Laurell Lyne och Jan Trägårdh

Stockholm, 2018-06-01

SAMMANFATTNING

Vidhäftningsskador hos asfalt i form av avskalning av bitumen från ballast kan uppkomma genom att vatten tränger undan bindemedlet från ballastytan. Vidhäftningen, interaktionen, mellan bitumen och stenmaterial beror på kemisk attraktion och fysisk kontaktyta. Projektet går ut på att undersöka vilka egenskaper som särskiljer olika materials påverkan på vidhäftningsegenskaper genom att samla in stenmaterial med stor naturlig variation sinsemellan som finns på marknaden idag. Bitumen har ett internationellt ursprung, där endast en del av dessa finns på svenska marknaden idag.

Bitumen och ballast har karakteriserats. Permittivitet, ytenergier och funktionella grupper har fastställts på bindemedlen. Mineralinnehåll, bergart, känslighet för ASR, specifika ytor och porstorlekar bestämdes på ballasten.

Bitumen med penetrationstal 20/30, 50/70, 70/100 och 160/220 och åtta vanligt förekommande ballastmaterial samt kalksten och slagg är inkluderade i denna studie.

Undersökningen har visat att:

- Man kan dela upp bitumenmaterialet i två olika grupper med avseende på dielektrisk förlustvinkel, ytenergi och förekomst av aromatiska kolväten. Det har inte gått att påvisa några signifikanta variationer i dielektricitetskonstanten mellan olika bitumenmaterial.
- Slagg och kalk har flera gånger så stor specifik yta som ballastmaterialen från täkterna inklusive kvartsiten. Dessa resultat kan förklaras med att ytstrukturen hos slagg och kalk är annorlunda än den för ballastmaterialen och kvartsiten. Ett av ballastmaterialen visade en avvikande specifik yta hos finpartiklarna vid en jämförelse med övriga ballastmaterial.

För att kunna korrelera resultaten i denna rapport mot idag tillgängliga metoder för att mäta vidhäftningsegenskaper hos asfaltmassa föreslås att även etapp C genomförs.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	4
2. SYFTE OCH ANGRÄNSNINGAR	5
3. METODIK	5
3.1 Material	5
3.2 Metoder för att karaktärisera bitumen	5
3.3 Metoder för att karaktärisera stenmaterial	7
4. RESULTAT	9
4.1 Bitumen	9
4.2 Stenmaterial	12
5. SLUTSATSER	17
6. DISKUSSION	21
7. FÖRSLAG TILL FORTSATT UNDERSÖKNING	24
8. REFERENSER	24

1. Inledning

I närvaro av vatten är en av mekanismerna för nedbrytning av asfalt att bindemedlet inte längre vidhäftar till ballastens ytor. Detta kan exempelvis leda till att asfaltmaterialets beständighet minskar samt att stenar släpper från asfaltbeläggningens över- och undersida.

Både bindemedlet och ballastmaterialets egenskaper har avgörande betydelse för vägbeläggningens hållbarhet och vidhäftningen mellan materialen. Dålig vidhäftning orsakas av kemiska och fysikaliska parametrar i gränssytan mellan ballast och bindemedel och syftet med nuvarande undersökning har varit att karaktärisera några av dessa parametrar. Som exempel kan nämnas att ballastmaterialets ytstruktur och porositet sannolikt har en betydelse.

Asfaltbeläggningens beständighet beror inte endast på egenskaper hos ballast och bindemedel utan också på under vilka förutsättningar asfaltsmassan tillverkats som exempelvis tillverkningsstemperatur, packning, ballastens renhet och fukthalt.

Bitumen är ett komplext material som består av en blandning av kolväten med raka eller förgrenade kedjor och aromater innehållande olika antal ringar.

Ballastens yta är heterogen och beror dels på ingående mineralsammansättning och bildningsätt och dels på kornform och ytstruktur (rå- respektive slät yta).

Problem med vidhäftning har studerats sedan asfaltbeläggningar började användas. I Sverige började man undersöka denna problematik 1935 på dåvarande Statens Väginstitut (v. Matern och Hallberg 1935).

Sedan den Europeiska bitumenspecifikationen (EN12591:2009) började gälla 2010 är det inte längre möjligt att ställa specifika nationella krav på bindemedlet i Sverige. Detta har lett till ett ökat utbud av bitumen från råolja med varierande ursprung. Dåvarande Vägverket initierade därför tillsammans med Skanska (Olsson m.fl., 2010) en studie där 7 olika bitumenleverantörer deltog i ett fullskaleprojekt där penetrationsbitumen 70/100 upphandlades enligt den nya Europaspecifikationen. Jämförande laboratorieundersökningar utfördes på bindemedelsprover och massaprover.

För att studera hur vatten påverkar vidhäftningen i asfalt initierades ett doktorandprojekt 2009 på KTH som samfinansierades av SBUF och BVFF/Trafikverket (Lyne 2014). Nuvarande SBUF-projekt är en fortsättning på detta projekt som fokuserar på praktisk tillämpning av genomfört arbete.

2. Syfte och avgränsningar

Syftet med undersökningen är att hitta särskiljande egenskaper som förutsäger vidhäftningsegenskaper vid produktion av asfaltbeläggningar. Detta genom att:

- Karaktärisera bindemedel och stenmaterial med avseende på materialens adhesiva egenskaper. Olika ytkemiska och ytfysikaliska parametrar analyserades som kan ha betydelse för vidhäftningen.
- Karaktärisera stenmaterial med avseende på deras struktur. Stenmaterialens mineral- och bergartsinnhåll, struktur och kornfördelning undersöktes, parametrar som kan ha betydelse för vidhäftningen mot bitumen.

Rapporten omfattar 10 ballastmaterial och 14 bindemedel med penetrationstal 20/30, 50/70, 70/100 och 160/220 studerades.

3. Metodik

3.1 Material

Bitumen

Bindemedel har i denna studie kontrollerats mot specifikationen för kvalitet 20/30, 50/70, 70/100 och 160/220 enligt kraven i EN-12591:2009.

Nynäs har levererat 3 prover med kvalitet 20/30, två prover med kvalitet 50/70, och två prover med kvalitet 160/220. Trafikverket har levererat 7 prover med kvalitet 70/100.

Stenmaterial

Stenmaterial har tagits fram i diskussion med entreprenörer och Trafikverket. 7 vanligt förekommande ballastmaterial har valts ut av Peab, Skanska och NCC. Därtill tillkommer ytterligare 3 ballastmaterial: kvartsit, kalksten och slagg.

3.2 Metoder för att karaktärisera bitumens potentiellt påverkande vidhäftningsegenskaper

Penetrationstal

Penetrationstal används för att karaktärisera bitumens konsistens/hårdhet och är det tal som används i specifikationer för att skilja olika sorter åt där t.ex. 50/70 är ett tillåtet intervall tillsammans med andra egenskaper. Penetrationstalet definieras efter hur djupt en 100 g nål sjunker ner i bindemedlet vid 25°C och uttrycks i tiondels millimeter.

Kontaktvinkel och ytenergi

Kontaktvinkelmätning med ”Sessile drop metoden” baseras på att en vätskedroppe med känd ytenergi placeras på en fast yta. Kontaktvinkeln mäts mellan droppen och den fasta ytan. Vätskan som används kallas för sondvätska och minst två sondvätskor fordras för att bestämma polär ytenergi respektive opolär ytenergi.

Enligt Fowkes (1962) och Owen-Wendts teorier (1969) är den totala energin vid en yta summan av bidrag från de intermolekylära opolära och polära krafterna vid ytan. Den polära komponenten består av summan av de polära interaktionerna dipol, induktion och vätebindning och den opolära komponenten består av dispersionsinteraktioner. Dimensionen för ytenergi är energi/ytenhet = $J/m^2 = Nm/m^2 = N/m$.

FTIR-ATR

FTIR-ATR är en infraröd spektroskopiteknik. Denna teknik används för att identifiera de kemiska bindningar som finns i molekyler. Ett infrarött spektrum skapas som är ett spektrogram med infraröd ljusabsorbans (eller transmittans) på den vertikala axeln och bindningarnas respons som frekvens eller motsvarande våglängd på den horisontella axeln. Varje bindemedel producerar ett unikt infrarött spektrum beroende på vilka molekyler som ingår. I denna studie har de funktionella aromatiska grupperna samt karbonyl- och sulfoxidgrupperna i bitumen identifierats. De olika molekyलगrupperna har en kombination av bindningar som sätts i svängning och som karaktäriserar gruppen. Spektrogrammet som visar absorbanstoppar för olika bindningstyper och antal vid en viss våglängd utgör därmed ett fingeravtryck av en molekyl- eller molekyलगrupp.

Permittivitet

Dielektricitetskonstant och förlustvinkel

Dielektricitetskonstanten används för att beskriva hur ett material polariseras i förhållande till det pålagda fältet. Den har en reell och en imaginär del. Den reella delen används till att beskriva materialets förmåga att lagra energi genom polarisation och den imaginära delen beskriver de förluster hos det elektriska fältet som uppstår.

Tangens för den dielektriska förlustvinkeln definieras som förhållandet mellan den imaginära och den reella delen. Det genomsnittliga värdet på tangens för dielektrisk förlustvinkel är medelvärdet av uppmätta värden vid 0,01, 0,1, 1, 10, 100 och 1000 Hz.

Dielektricitetskonstanten och tangens för den dielektriska förlustvinkeln fastställdes med hjälp av en IDAX-300 isolerings diagnostisk analysator från Megger. Det är en lågfrekvent impedansanalysator där mätningar utförs i frekvensområdet 0,01 Hz till 1000 Hz. Den totala ytan av elektroden genom vilken strömmarna mäts var $41,8 \text{ cm}^2$ och avståndet mellan elektroderna var ca 10 mm för bindemedel A-G (paralleldiskmetoden). För bindemedel 6, 7, 8, 18, 19, 25 och 26 var avståndet mellan elektroderna 2 mm (oljemetoden).

3.3 Metoder för att karaktärisera stenmaterial med avseende på vidhäftningsegenskaper

Kornstorleksfördelning

Bestämning av kornstorleksfördelning utfördes i enlighet med FAS Metod 221-02 genom siktanalys med kvadratiska siktar.

Partikelstorleksfördelning

Partikelstorleksfördelningen mättes upp med hjälp av laserdiffraktion, Malvern Mastersizer 3000 på fraktionen 0.125-0.250 mm och på bottenfraktionen < 0.063 mm.

Specifik yta: Brunauer–Emmet–Teller (BET)

BET är en metod som används för att uppskatta specifika ytan hos ett pulvermaterial. Analysen är baserad på adsorption av gas på ytor. Desorptionsisotermer dokumenteras med hjälp av en ASAP2020-volymetrisk adsorptionsanalysator. I denna studie användes kvävgas som adsorbatgas. Mängden kväve som adsorberades vid ett givet tryck möjliggör beräkning av specifika ytor och totala porvolym från data som registreras i tryckintervallet $P/P_0=0.05-1.00$. P är adsorbatgasens partiella ångtryck vid jämvikt i pascal vid 77,4 K och P_0 är adsorbatgasens mättade ångtryck i pascal. Före mätning behandlas provet under 4 timmar under vakuumbetingelser ($<10^{-5}$ Torr) vid temperaturen 130 °C.

Petrografisk analys

Tunnslip tillverkades för varje stenmaterial med fraktionerna 0,125–0,250 mm respektive 1-2 mm. Det innebär att både enskilda mineralpartiklar och bergartskorn, som är ett aggregat av mineralkorn bestämdes och kvantifierades. Fraktionerna gjöts in i rör med epoxi. Rören sågades och stenmaterialet i form av skikt limmades fast på provglas. Därefter slipades och polerades proverna till en tjocklek av ca 30 µm.

Kvantifiering av mineral utfördes med hjälp av punkträkning i ett planpolariserande ljusmikroskop. För varje prov räknades andelen mineral och bergartskorn i tunnslipen och sammanställdes som procent av totalen. Minst 500 punkter bestämdes för att erhålla en statistiskt representativ fördelning mellan olika mineral och bergarter. Bergarter och mineral bestämdes i 1-2 mm-fraktionen och enbart mineral i 0,125–0,250-fraktionen.

Den petrografiska analysen baseras på följande standarder:

- SS-EN 932-3 Ballast – Generella egenskaper, Del 3: Petrografisk beskrivning, förenklad metod (ackrediterad)
- SS-EN 134 50 Makadamballast för järnväg och svenska tillägget BVS 585,52
- RILEM recommended test method AAR-1, Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method (prepared by Sims and Nixon).

Antalet alkalisilikareaktiva korn bedömdes samtidigt som petrografiska analysen utfördes. Bedömningen utfördes enligt Rilem AAR-1 som är en metod som identifierar och bestämmer

mängden av mineral- och bergartstyper i ett ballastprov med avseende på alkalisilikareaktiviteten i betong.

Alkalisilikareaktioner (ASR) uppstår om ballastmaterialet innehåller alkalilösligt silika (SiO_2) eller silikat (finkornig mikrokristallin SiO_4) och om ballastmaterialet kommer i kontakt med en alkalisk vattenlösning, d.v.s. en lösning som innehåller Na^+ , K^+ , OH^- joner. Denna reaktion sker vanligtvis i cementbaserade material eftersom det här finns tillgång till en koncentrerad alkalisk lösning.

4. Resultat

4.1 Bitumen

Kontaktvinkel

Kontaktvinkelmätningar har utförts på bindemedel med penetrationstal 70/100. Förenklat kan man beskriva att det är den vinkel som bildas mellan ytan och droppen och som i sin tur beror på ytans hydrofoba och hydrofila egenskaper. En hög kontaktvinkel innebär hydrofoba egenskaper, d.v.s. repellerande krafter mellan materialyta och vätska.

Den icke-polära kontaktvinkeln varierade mellan 51,8° och 66,6°, dvs. 14,8° (se **tabell 1**). Den polära kontaktvinkeln varierade mellan 100,9 och 103,8, d.v.s. med ett spann på 2,9°.

Den opolära ytenergin varierade mellan 23,8 och 33,1 mJ/m², och den polära ytenergin varierade mellan 0,3 och 0,7 mJ/m². Det kunde konstateras att skillnaden mellan proverna finns till största delen i den opolära ytenergin och i mindre utsträckning också i den polära energin (se **tabell 2**). Resultaten i **tabell 2** visar att bindemedel A, B och C har en mindre andel opolär ytenergi av den totala ytenergin än vad bindemedel D, E, F och G har. **Tabell 1** visar också att bindemedel A, B, C har en högre polär kontaktvinkel än E, F, G där bindemedel D är ett mellanting.

Resultaten från bestämningar av kontaktvinklar och ytenergier för bindemedel med penetrationstal 70/100 kan således delas in i två grupper. Man kan urskilja en grupp med lägre opolär ytenergi och högre polär kontaktvinkel (grupp 1) och en grupp med högre opolär ytenergi och lägre kontaktvinkel (grupp 2). Skillnaden mellan grupperna framstår något tydligare när förhållandet mellan de opolära och polära delarna anges för ytenergin, d.v.s. kvoten. Gruppindelningen med avseende på ytenergi och kontaktvinkel visas i **tabell 3**.

Tabell 1. Resultat från kontaktvinkelmätningarna.

Bindemedel	Kontaktvinkel [°]	
	Opolär (dispersion)	Polär (dipol, vätebindning)
A	103,3	66,6
B	103,6	65,5
C	100,9	64,0
D	103,8	60,6
E	101,0	52,5
F	100,5	51,8
G	102,6	57,4

Tabell 2. Resultat från bestämning av ytenergin ($X \pm s$). Mätvärdet för prov A är osäkert.

Bindemedel	Ytenergi, mJ/m ²	
	Opolär	Polär
A	23,8 ± 5,54	0,7 ± 0,58
B	24,6 ± 0,32	0,6 ± 0,09
C	25,0 ± 0,53	0,9 ± 0,29
D	28,0 ± 0,09	0,3 ± 0,04
E	32,7 ± 0,40	0,3 ± 0,07
F	33,1 ± 1,13	0,3 ± 0,17
G	29,9 ± 0,78	0,3 ± 0,18

Tabell 3. Förhållandet (kvoten) mellan de opolära och polära delarna för ytenergin samt kontaktvinkeln för bindemedel med penetrationstalet 70/100.

Bindemedel	Grupp	Opolär/polär ytenergi	Polär kontaktvinkel [°]
A	1	34	66,6
B	1	41	65,5
C	1	28	64,0
D	2	93	60,6
E	2	109	52,5
F	2	110	51,8
G	2	100	57,4

FTIR-ATR

För bindemedel med penetrationstal 70/100 har infraröd spektroskopi använts för att identifiera karbonylgrupper, aromatiska grupper och grupper med svavel, se **tabell 4**.

Aromatiska grupper (C=C) dominerar för bindemedel i grupp 2, dvs. bindemedel D, E, F och G.

Tabell 4. IR absorptionsvärden uppmätta på bitumen (Lu, 2016).

Bindemedel	C=O	Aromatiska C=C	S=O
A	ND	1,18	0,92
B	0,07	1,01	1,15
C	0,11	1,10	1,01
D	0,12	1,93	0,83
E	0,11	1,23	1,11
F	0,41	1,40	0,73
G	0,43	1,39	1,16

Permittivitet

Dielektricitetskonstant och förlustvinkel

Tangens för dielektriska förlustvinkeln har mätts på bindemedel med penetrationstal 70/100. För bindemedel med penetrationstal 20/30, 50/70 och 160/220 har både tangens för dielektrisk förlustvinkel och dielektricitetskonstanten mätts (se **tabell 5** och **tabell 6**). Det rekommenderas

att mätningar av dielektricitetskonstanten för penetrationstal 70/100 kompletterar en eventuell fortsättning av projektet.

Mätvärden för dielektricitetskonstanten vid olika temperaturer redovisas i nedanstående **tabell 5**. Resultaten visar att samtliga bindemedel hade dielektricitetsvärden i paritet med opolära kolväten, d.v.s. bitumen med låg polär ytenergi (Lyne 2014). För vanligt förekommande temperaturer (-10 – +30 °C) var variationen för dielektricitetskonstanten mycket liten (2,7–2,9).

Tabell 5. Dielektricitetskonstant uppmätt vid 1000 Hz.

Bindemedel	Penetrations-tal	ϵ' [1000 Hz]						
		-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
6	20/30	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9
7	20/30	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9
8	20/30	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9
18	50/70	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9
19	50/70	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0
25	160/220	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0
26	160/220						3,0	3,0

Resultaten i nedansående **tabell 6** visar att bitumen med lågt penetrationstal hade en låg genomsnittlig tangens för dielektrisk förlustvinkel och bitumen med ett högt penetrationstal hade ett högt värde på tangens för dielektriska förlustvinkeln.

Tabell 6. Genomsnittligt värde för tangens för dielektriska förlustvinkeln vid 20 °C för bindemedel med olika penetrationstal.

Bindemedel	Penetrationstal, kvalitetskategori	Penetrationstal, individuellt uppmätta värden	Genomsnittligt värde på tangens för dielektrisk förlustvinkel vid 20 °C
6	20/30	20	0,019
7	20/30	25	0,019
8	20/30	27	0,022
18	50/70	64	0,028
19	50/70	67	0,025
A	70/100	71	0,031
B	70/100	83	0,031
C	70/100	83	0,028
D	70/100	72	0,036
E	70/100	83	0,030
F	70/100	80	0,038
G	70/100	84	0,040
25	160/220	187	0,058
26	160/220	190	0,043

4.2 Stenmaterial

Kornstorleksfördelning

Finfraktionen fördelades till olika definierade fraktioner med hjälp av siktar.

Partikelstorleksfördelning

Partikelstorleksfördelningen är uppmätt med hjälp av laser på 0.125-0.250 mm fraktionen och på bottenkornfraktionen, d.v.s. på < 0.063 mm-fraktionen. Mätningarna visar att i en och samma fraktion är kornstorleken på de olika ballasttyperna mycket lika, se nedanstående **tabell 7** och **tabell 8**.

D_x beskriver andelen korn som har en diameter mindre än x på en kumulativ kornstorlekskurva. I **tabell 7** nedan, så har till exempel 10 % av kornen en diameter mindre än ca 133 µm, eller omvänt uttryckt, vid frekvensen 10 % så har materialet kornstorleken 133 µm.

Tabell 7. Partikelstorleksfördelning uppmätt med laser på fraktionen 0.125-0.250 mm.

Prov	D _x (10%) µm	D _x (50%) µm	D _x (90%) µm
Prov 1	130	215	323
Prov 2	137	235	360
Prov 3	137	235	360
Prov 4	129	232	365
Prov 5	134	234	362
Prov 6	133	233	362
Prov 7	132	233	363
Kalk	133	233	362
Kvartsit	133	233	363
Slagg	133	233	363

Tabell 8. Partikelstorleksfördelning uppmätt med laser på kornstorlek < 0,0625 mm.

Prov	D _x (10%) µm	D _x (50%) µm	D _x (90%) µm
Prov 1	6	36	74
Prov 2	7	40	79
Prov 3	5	35	75
Prov 4	6	38	78
Prov 5	6	35	72
Prov 6	5	34	77
Prov 7	5	35	76

Specifik yta: Brunauer–Emmett–Teller (BET)

BET-mätningar på 0,125–0,250-kornfraktionen visar hur den specifika ytan (m²/kg) och porstorleken (Å) varierar mellan proven hos fraktionen (se **tabell 9**). Tabellen visar att slagg och kalk har flera gånger så stor specifik yta som övriga material.

BET-mätningar har utförts för att bedöma ballastmaterialens ytstruktur (ytråhet), kornform och porositet.

Specifika ytan och porstorleken hos provet kommer att påverka behovet av bindemedel och vidhäftningsmedel.

Tabell 9. Specifika ytan och porstorleken uppmätta på mineralkorn i fraktionen 0,125–0,250 mm.

Provet 0.125-0.250 mm	BET, specifik yta (m ² /kg)	Porstorlek (Å)	Porstorlek (Å)
Prov 1	0,35	158,7	63,0
Prov 2 – mätning 1	1,19	91,6	49,0
Prov 2 – mätning 2	1,08	94,2	49,4
Prov 3	0,50	142,0	56,3
Prov 4	0,36	170,6	61,2
Prov 5	0,45	145,8	60,0
Prov 6	0,49	142,7	58,9
Prov 7	0,39	155,0	61,1
Kvartsit	0,37	155,0	61,1
Kalk – mätning 1	2,26	155,0	61,1
Kalk – mätning 2	2,13	98,4	66,1
Tvättad kalk	2,11	104,7	66,7
Slagg	1,98	117,7	63,2
Tvättad slagg	2,12	115,4	61,0

Petrografisk analys

En petrografisk analys har utförts för att bestämma bergart- och mineralinnehåll hos de 10 stenmaterialen. I den här studien har även stenmaterialen bedömts utifrån dess potentiella alkalisilikareaktivitet (ASR) i cementbaserade material. Bedömningen gjordes enligt en metodik som utarbetats för betong (Rilem I). För att ASR skall kunna utvecklas fordras, förutom reaktiv ballast, tillgång till en viss koncentration av alkalier i lösning (Na⁺, K⁺). Undersökningen grundas på en okulär utvärdering med hjälp av tunnslip i ett polarisationsmikroskop.

Den petrografiska analysen har utförts på fraktionerna 0,125–0,250 mm och 1-2 mm. I den finare fraktionen bedöms mineralinnehållet och i den grövre fraktionen bergartsinnehållet.

Fig. 1 a och b visar skillnaden mellan mineralkorn och bergartskorn. Ytegenskaperna hos mineralkornen i 0,125–0,250 mm fraktionen kommer att påverka vidhäftningen mot bitumen och i 1-2 mm fraktionen kommer mineralens genomsnittliga egenskaper i bergartskornen att påverka vidhäftningen. Fördelningen mellan mineralkorn och bergartskorn kan variera beroende på råmateriallets (bergartens) kornstorlek. Det medför att ovan fraktioner kan innehålla både mineral- och bergartskorn.

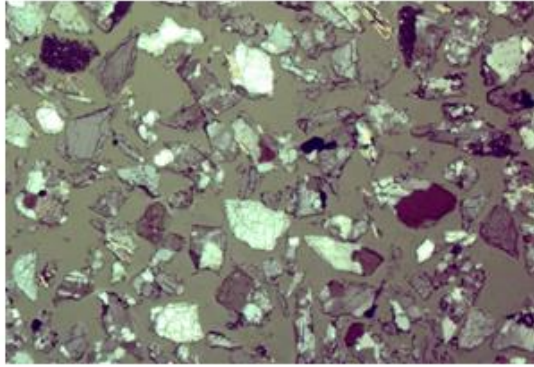
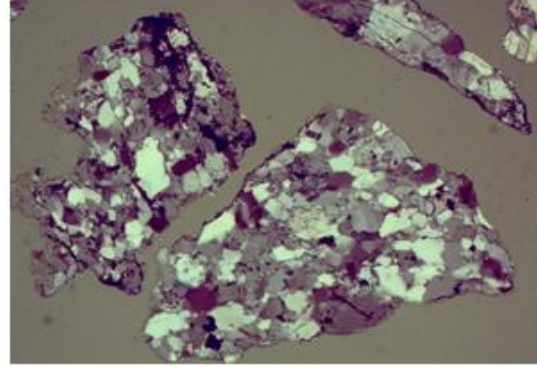


Fig. 1. a) Fria mineral från kvartsit.
fraktion 0,125–0,250 mm.



b) Mineralaggregat från kvartsit.
fraktion 1–2 mm.

Kvantifiering av mineraler och bergarter

0,125–0,250 mm fraktionen (dominerad av mineralkorn)

De viktigaste resultaten från analysen var (se **tabell 10**):

- Kvartshalten i proverna varierar mellan 26 % och 65 %.
- Andelen fältspat varierar mellan 19 och 46 % %. Prov 3 och Prov 5 har båda en hög halt av fältspat.
- Glimmerhalten varierar mellan 2 och 22 %.
- Endast provet Prov 4 innehåller en större mängd amfibol.
- Kraftig sericitisering förekommer i prov 5 som innehåller 10 % sericit och i prov 2 som innehåller 7,5 % sericit. Sericitisering har observerats i mindre utsträckning i proverna 1, 6 och i 7. Sericit är ett glimmermineral i fältspat där mineralet förekommer som en omvandling av fältspaten. Förekomsten innebär att fältspaten kan vittra lättare.

Tabell 10. Resultat från petrografisk analys av kornfraktionen 0,125–0,250 mm (vol. %).

0,125–0,250 mm	Prov 1	Prov 2	Prov 3	Prov 4	Prov 5	Prov 6	Prov 7	Prov 8
Kvarts	65	47	26	14	38	54	58	59
Fältspat	19	28	47 (>40)	30	46 (>40)	26	26	29
Muskovit (glimmer)								1,9
Biotit (glimmer)	15	15	22	20	5	14	10	
Sericit i fältspat	2	7,3			10	2,5	0,4	
Amfibol			2 (<5)	28 (>10)				
Zirkon				1				
Ilmenit			1	4				4
Opak		3	2	1	1	3	5	3
Kalcit								3

1-2 mm fraktionen

Fraktionen 1-2 mm är huvudsakligen uppbyggd av bergartskorn. Kvarts- och fältspatsinnehållen skiljer sig därmed åt från de som rapporterats för 0,125-0,250-fraktionen (**tabell 11**).

De viktigaste resultaten från analysen var:

- Fri kvarts varierar mellan 7 % och 18 %.
- Fri fältspat varierar mellan 11 och 20 %.
- Seriticerad fältspat finns i proverna 1, 2, 5, 6 och 7. Seriticerad fältspat har en något högre porositet. Proverna 2, 3, 6 och 7 innehåller biotit. Den procentuella andelen varierar mellan 2 och 5 %.
- Prov 5 innehåller 6 % kloritiserad biotit. Det innebär att biotiten omvandlas till det mjukare mineralet klorit.
- Provet 4 innehåller 20 % amfibol. Även amfibol är ett mjukare mineral än t.ex. kvarts och fältspat.
- Prov 4, 6 och 7 innehåller 23 till 50 % av bergarten amfibolitgnejs.

Biotit, kloritiserad: Kloritiserad biotit är delvis omvandlad till ett nytt mjukare skiktssilikat, klorit. Man kan beteckna det som en kemisk vittringsprocess.

Fältspat, seriticerad: Sericit är ett lermineral (finkornig glimmer) som förekommer i omvandlad kalifältspat och har vanligtvis bildats genom kemisk vittring av fältspaten.

Amfibol: Amfibol är ett stängligt mineral som ofta omvandlas bl.a. till klorit.

Tektonit: Tektonit avser metamorfa bergarter som utsatts för tektonisk deformation. Ofta är tektoniter gnejsiga bergarter. De bildas i rörelse- och deformationszoner, omvandlingen går att upptäcka på mineralens orientering.

Potentiellt alkalisilikareaktiva bergarter och mineral

En bedömning av potentiellt alkalisilikareaktiva bergarter och mineral hos de olika proverna visade att kvartsiten ansågs vara 100 % potentiellt reaktiv eftersom samtliga korn bestod av mer eller mindre deformerad kvarts. Tre andra prover bedömdes ha en hög procentuell andel potentiellt alkalisilikareaktiva korn i materialet ca 14 - 20 % av kornen (prov 2, 4, och 7).

Tabell 11. Resultat från petrografisk analys av kornfraktionen 1 – 2 mm (vol.-% av prov)

1-2 mm	Prov 1	Prov 2	Prov 3	Prov 4	Prov 5	Prov 6	Prov 7	Prov 8
Kvarts	7	7	18	7	14	7	6	100
Biotit		2	4			5	5	
Biotit med klorit					6			
Fältspat	18	14	26	15	14	20	11	
Fältspat med sericit	8	13			20	20	13	
Tourmalin + Opaka		5						
Amfibol (Hbl)				20				
Amfibol gnejs				50		25	23	
Gnejs			3	18		27	36	
Granit			49		46			
Gnejsgranit	60	59						
Tektonit	7						6	
Bergart	granitisk	granitisk	granitisk	intermediär	granitisk	intermediär	granitisk	granitisk
Bedömning av andel korn i ballasten som är potentiellt ASR känslig i betong (%)	0	20	0	15	0	4	14	100

5. Slutsatser

Föreliggande undersökning omfattar främst mätningar på ytkemiska- och ytfysikaliska parametrar hos några utvalda bindemedel och bergmaterial. Mätningarna gjordes i olika omgångar med olika materialuttag, vilket har medfört att samma parametrar inte har mättes för alla bindemedel. Det motiverar kompletteringar i fortsatta undersökningar. De mätningar som i första hand bör kompletteras för att erhålla en representativ bild är opolär- och polär ytenergi för bindemedel med penetrationstal 20/30, 50/70, 160/220 och för samma bindemedel FTIR-analyser med avseende på förekomsten av aromatiska kolvätegrupper med C=C bindningar. Resultat från en sådan undersökning skulle kunna verifiera eller förkasta indelningen av bindemedlen i två grupper.

De bindemedel som undersöktes i första omgången hade samma penetrationstal, 70/100, medan bindemedlen som undersöktes i andra omgången hade olika penetrationstal, 20/30, 50/70, 160/220.

För bindemedel med samma penetrationstal kan följande slutsatser dras:

- Parametrarna opolär ytenergi och polär kontaktvinkel delar upp bindemedlen i två olika grupper där prov A, B, C bildar grupp 1 och bindemedlen D, E, F, G bildar grupp 2 (**tabell 12** och **fig. 2**). För att erhålla ett tillräckligt statistiskt underlag för att verifiera sambandet bör fler mätvärden komplettera underlaget. Underlaget har också en viss spridning (standardavvikelse) som tillför en viss osäkerhet.
- Förekomsten av aromatiska kolvätegrupper med C=C bindningar skilde sig också åt mellan grupperna (**tabell 12** och **fig. 3**). Andelen aromatiska kolväten i bitumen var större i grupp 2.
- Följande parametrar visade ingen signifikant skillnad mellan grupp 1 och 2: opolär kontaktvinkel och dielektricitetskonstant. FTIR-analysen visade att förekomsten av karbonylgrupper med C=O bindningar och kolväten med S=O bindningar förekom i samma utsträckning i båda grupperna.

Tabell 12. Uppdelningen i grupp 1 och 2 för bindemedel med penetrationstal 70/100.

Binde- medel	Grupp	Opolär/Polär ytenergi	Polär kontaktvinkel	Tangens för dielektrisk förlustvinkel	Aromatisk kolvätegrupp C=C (FTIR) λ
A	1	34	66.6	0.031	1.18
B	1	41	65.5	0.031	1.01
C	1	28	64.0	0.028	1.10
D	2	93	60.6	0.036	1.93
E	2	109	52.5	0.030	1.23
F	2	110	51.8	0.038	1.40
G	2	100	57.4	0.040	1.39

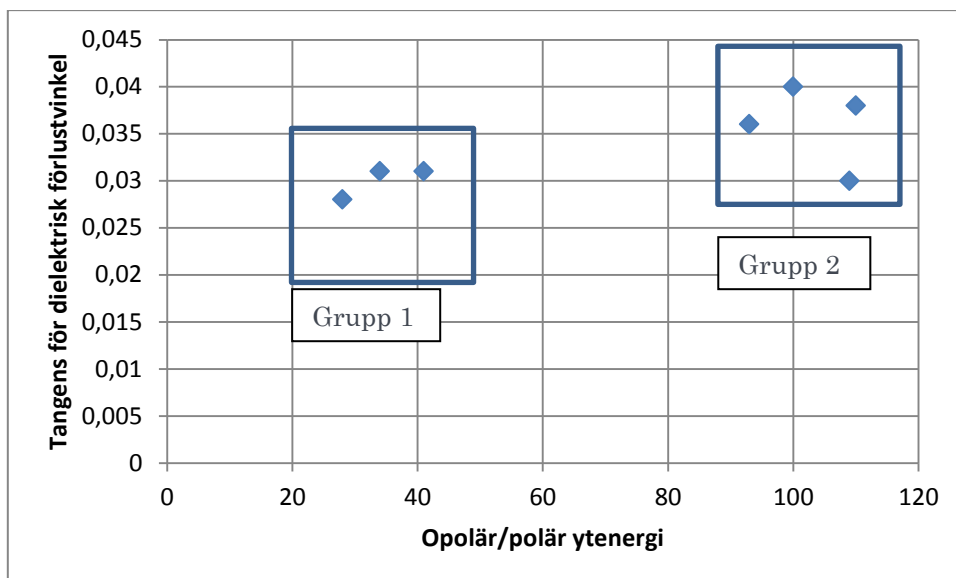


Fig. 2. Bindemedlens gruppering med avseende på kvoten opolär/polär ytenergi. Skillnader i tangens för dielektrisk förlustvinkel är liten.

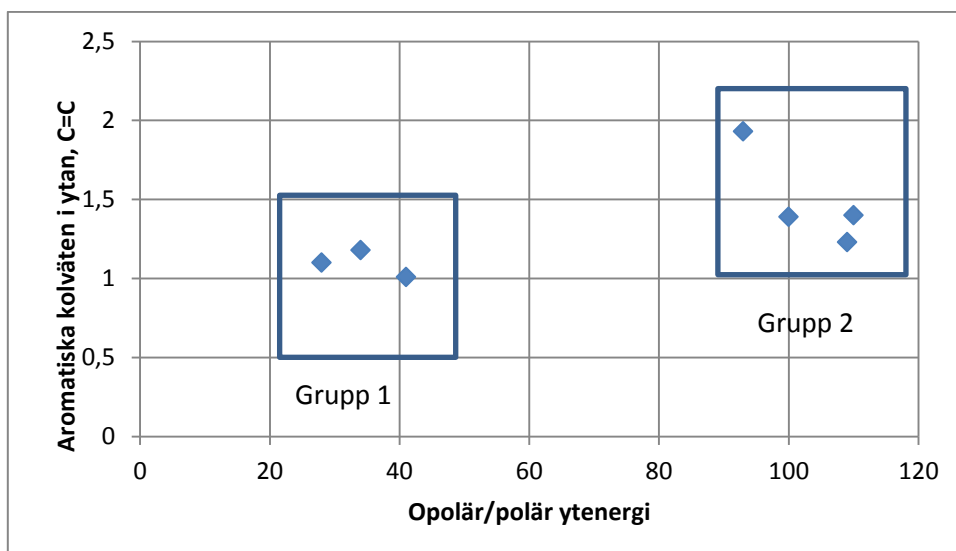


Fig. 3. Bindemedlens gruppering med avseende på kvoten opolär/polär ytenergi. Skillnader i förekomsten av aromatiska kolväten med C=C bindningar är osäker.

Från undersökningen av bindemedel med olika penetrationstal (inklusive 70/100) kan följande slutsatser dras:

- Med utgångspunkt från det mätunderlag som undersökningen ger finns ett tydligt samband mellan tangens för den dielektriska förlustvinkeln och penetrationstalet för bitumen (**fig. 4 a och b**).
- Dielektricitetskonstanten varierade inte med penetrationstalet i normala temperaturintervall (-10°C - + 30 °C).

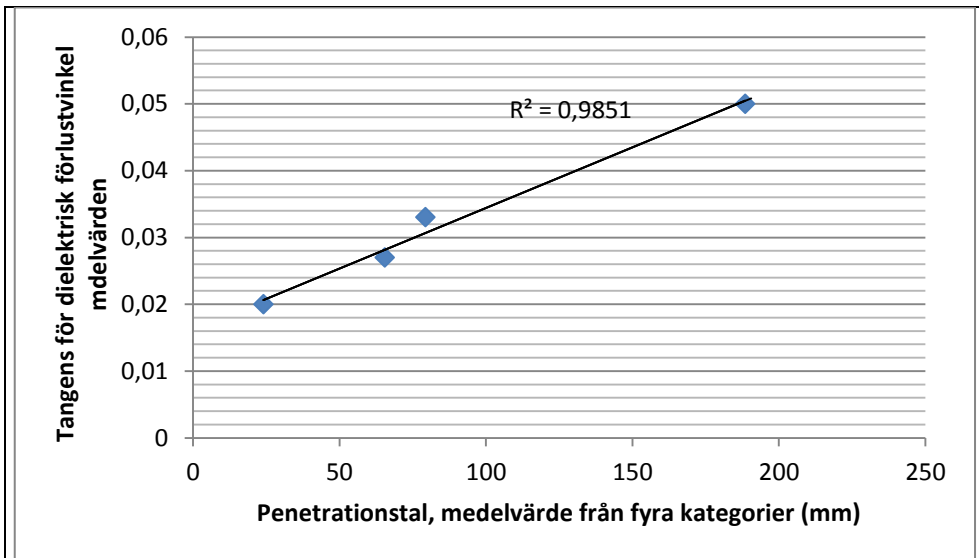


Fig. 4 a. Sambandet mellan medelvärden från mätningar av penetrationstal från 4 kategorier och tangens för dielektrisk förlustvinkel. Linjär regression.

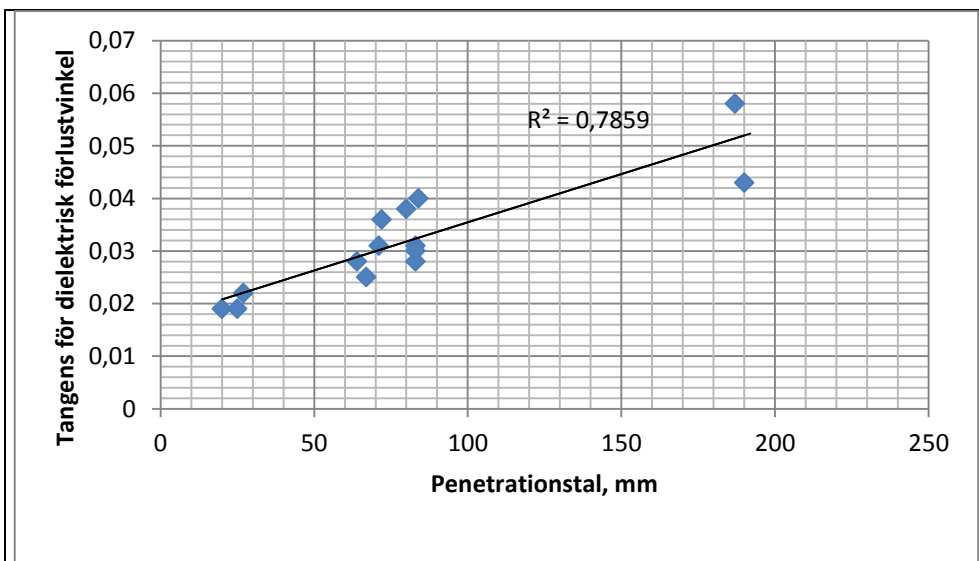


Fig. 4 b. Samma som **fig. a**, men visar upmätta värden.

Stenmaterial

Materialkaraktäristik för mineral- och bergartskorn i proverna utfördes med hjälp av lasersiktning (0,125-250 mm och < 0,0065 mm), specifik yta, BET (< 0,0625 och 0,125–0,250 mm) och petrografisk analys (0,125–0,250 och 1-2 mm).

Lasersiktningen på finfraktionerna visade att de olika stenmaterialen har ungefär samma kornstorleksfördelning. Det medför att i en jämförelse mellan provens specifika yta < 0,250 mm

kan man utesluta variationer i kornstorlek som förklaring. Istället kan variationerna förklaras med skillnader i kornens ytegenskaper som t.ex. ytstruktur, kornform och porositet.

Eftersom de undersökta mineral och bergartskornen från ballasttäckerna erfarenhetsmässigt har en låg vattenabsorptionsförmåga (< 1 vikt%) och därmed liten öppen porositet (bortsett från kalk- och slaggproverna), är de mest sannolika utslagsgivande faktorerna för materialen från ballasttäckerna kornform och ytstruktur.

Av proverna från olika ballasttäckter var det bara prov 2 som visade en avvikande och högre specifik yta hos finpartiklarna.

Den petrografiska analysen visade att bergarterna från ballasttäckerna varierade från granitisk sammansättning till amfibolrika intermediära sammansättningar. Det medför att mineralfördelningen också varierar, vilket kan få betydelse för asfaltbelägningens vidhäftningsegenskaper. Biotithalten varierade till exempel mellan 5 och 22 %, kvartshalten mellan 14 och 65 % och sericitiserad fältspat mellan 0 och 10 %.

6. Diskussion

Bitumen

Undersökningen har visat att man kan dela upp bitumenmaterialet i två olika grupper med avseende på dielektrisk förlustvinkel, ytenergi och förekomst av aromatiska kolväten. Parametrarnas betydelse för vidhäftningen och möjliga orsaker till detta har diskuterats i litteraturen (Hallberg 1939, Hefer och Little 2005, Little och Bhasin 2006, Linhjell med flera 2007). Föreliggande undersökning visade att bitumen kunde delas in i en grupp med högre andel opolär ytenergi och en annan grupp med lägre andel opolär ytenergi. Det finns därför förutsättning att grupp 2, som har en högre andel opolär ytenergi och därmed enligt litteraturen potentiellt vattenavstötande egenskaper, skulle kunna ha bättre vidhäftningsegenskaper jämfört med grupp 1.

Metodiken för att mäta ytenergi i laboratoriet medför emellertid att den är uppmätt på bitumenytan mot luft och inte mellan stenmaterial och bitumen i bulkmaterialet. Dielektricitetskonstanten är i motsats till ytenergin uppmätt i bulkmaterialet och den varierade mycket litet. Variationen var mellan 2.7–2.8 kHz vid -20 °C, 2.8–2.9 vid +20 °C och 2.9–3.0 vid +40 °C, alltså ett variationsspann på ca 1000 Hz vid de olika temperaturerna. Dessa värden kan jämföras med dielektricitetskonstantvärden rapporterade i litteraturen. Read och Whiteoak (2003) fann att dielektricitetskonstanten för ett bitumen avsedd för vägändamål var ca 2,7 vid +25 °C och ca 3,0 vid +100 °C. Värdena uppmätta i denna studie är således i paritet med värdena uppmätta av Read och Whiteoak (2003).

Hallberg (1939) fann att ”Bindemedlets viskositet inverkar på vidhäftningen på sådant sätt, att segflytande bindemedel undandrivs långsammare än lättflytande”. Det medför att penetrationstalet kan ha betydelse för vidhäftningen.

Stenmaterial

Det anses svårare för vattnet att driva bort bindemedlet från en porös, »rå» yta än från en glatt, »glasig» yta (Hallberg 1939). Hos de undersökta ballastmaterialen fanns både mineral och bergarter med glasiga ytor och rå, porös yta. Exempel på mineral med glasiga, glansiga och feta ytor är kvarts, fältspat och glimmermineral. Exempel på mineral med rå yta och som är relativt mjuka är amfibol och klorit. Resultaten från den petrografiska analysen visade att ballastmaterialen bestod av varierande halter av dessa mineral. Det finns anledning att tro att den ytstruktur och konform som ges av de ingående mineralen i olika bergartskorn påverkar vidhäftningsförmågan mot bitumen i finfraktionen. Bergarterna i de grövre fraktionerna varierar med avseende på ytstruktur, porositet, flisighet, kantighet och stänglighet. Exempel på flisiga bergarter i undersökningen är amfibolgnejs och gnejsgranit.

Som en jämförelse kan nämnas att ovan nämnda egenskaper hos stenmaterialet anses påverka vidhäftningen och därmed hållfastheten hos betong. Speciellt ytstrukturen anses ha betydelse för samverkan mellan cementpasta och stenmaterial och ytor med viss råhet är mer gynnsamma än helt släta ytor (Statens Vattenfallsverk, 1972 och Betonghandboken, material, 1990). **Fig. 5 och 6** visar den variation i ytstruktur som förekommer hos olika stenmaterial.

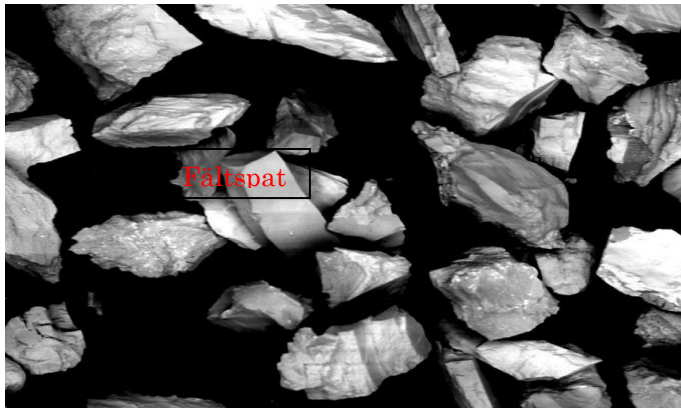
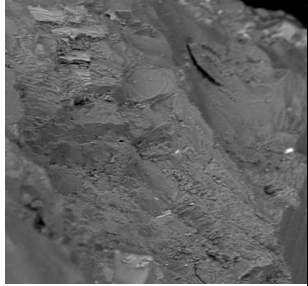
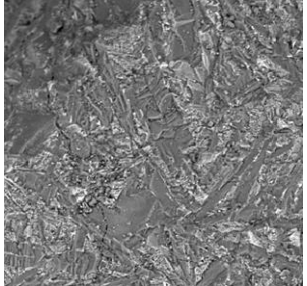
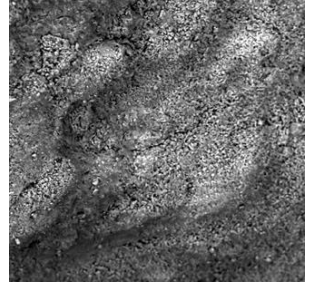
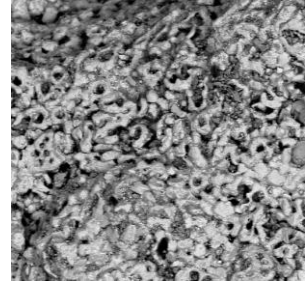


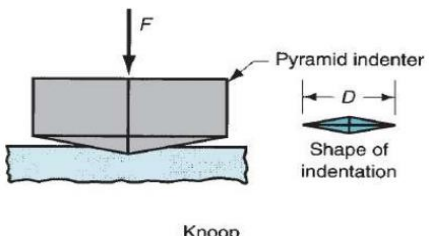
Fig. 5. Tunnslip från stenmaterial i undersökningen. Observera de släta ytorna hos fältspatkornet i mitten av bilden jämfört med övriga korn.

Undersökningen visade att slagg och kalk har flera gånger så stor specifik yta som ballastmaterialen från täkterna inklusive kvartsiten. Dessa resultat kan förklaras med att ytstrukturen hos slagg och kalk är annorlunda än den för ballastmaterialen och kvartsiten. Slagg har exempelvis stora runda porer som uppstått vid tillverkningen, och kalken har en porös yttextur, typisk för vissa kalkmaterial (**fig. 6**).

			
6 b. Prov 1	6 b. Prov 2	6 c.	6 d.
Granit (370 ggr.)	Granit (590 ggr.)	Kalk (480 ggr.)	Slagg (340 ggr.)
Kvarts, fältspat, glimmer			
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>↑ Bättre</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: 80%;"> <p>relief på ytan, t. ex.: kalcit, amfibol, slagg</p> </div> <div style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"> <p>glatt, musslig yta, t. ex.: glimmer, fältspat, kvarts</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>↓ Sämre</p> </div> </div> <p>Den fysiska kontaktytans inverkan på vidhäftningen.</p>			

Med tanke på att ovan nämnda ytegenskaper hos stenmaterialen, d.v.s. glasiga, glansiga och släta ytor, kan spela en roll för vidhäftningen mellan bitumen, mineral och bergartskorn, så är det möjligt att det kan finnas ett samband mellan ytornas hårdhet och vidhäftningen. En glasig yta är ofta en hård yta men man skall vara observant på att sambandet inte alltid finns eftersom ytans beskaffenhet också beror på kristallografin hos mineralet. Moh's hårdhetsskala (**tabell 13**) visar olika mineralytors motstånd mot repning. De mineral som finns i **tabell 10 och 11** och som är bergartsbildande i svensk berggrund ingår i tabellen. Som jämförelse har Knoop's hårdhetsskala, som visar motståndet mot intryck, tagits med. Den ger ett absolut värde (kg/mm^2) i motsats till Moh's skala som är relativ utan numeriska värden.

Tabell 13. Moh's och Knoop's hårdhetsskala som visar mineralen motstånd mot repning respektive den kraft som erfordras för ett visst intryck av en pyramidformad diamant.

Bergartsbildande mineral I tabell 10 och 11.	Moh's relativa hårdhetsskala, repning av yta	Knoop's hårdhet Stämpling/intryck (kg/mm^2)
Muskovit (glimmer)	2-2,5	50-100
Biotit (glimmer)	2-3	100-200
Klorit	2-3	100-200
Kalcit, kalksten	3	200
Amfibol, amfibolitgnejs	5-6	500-600
Pyroxen	6	600
Fältspat (alkalifältspat)	6	600
Hematit, magnetit	5,5-6	
Pyrit	6-6,5	
Fältspat (plagioklas)	6-6,5	600-700
Kvarts	7	800-1000
Diamant	10	8000
		

Som kan ses i **tabell 13**, så varierar mineralytornas hårdhet för de vanligaste mineralen i svensk berggrund från 2,5-7. De mjukaste mineralen är skikt-silikaten glimmer och klorit medan kvarts och fältspat med glasiga och glansiga ytor är hårdast och motstår repning bäst (glas placeras vid 6 på hårdhetsskalan).

Ett av granitproverna avvek från övriga ballastmaterial och det var prov 2. En möjlig förklaring till detta kan vara den relativt stora mängd biotit och sericitiserad fältspat som finns i provet, där sericiten som sitter bunden i fältspaten, frigörs i de allra finaste fraktionerna. För att utreda sericitens eventuella betydelse närmare måste en utökad mängd ballastmaterial undersökas med avseende på mineralinnehåll och specifik yta.

7. Förslag till fortsatta undersökningar

Med avseende på resultaten från Etapp A och B kan man inom Etapp C undersöka:

- Om bitumen i grupp 1 och grupp 2 kan korreleras med resultat från rullflaska och vändskak. Utöka det statistiska underlaget för att verifiera sambandet.
- Studera inverkan av vidhäftningsmedel på resultat från rullflaska och vändskak. Det bör undersökas om vidhäftningsmedel har olika påverkan på grupp 1 och grupp 2. Har t ex den mindre hydrofoba grupp 1 större behov av vidhäftningsmedel?
- Finns det en separation i två grupper med avseende på opolär/polär ytenergi för bindemedel med andra penetrationstal än 70/100. Kompletteringar och utökad statistiskt underlag behövs.
- Undersöka hur vittringsbenägna olika mineral och bergarter är i vägmiljöer, dvs. vintertid med dubbdäck och saltning. Mineralet fältspat är till exempel mer vittringsbenägen än andra mineral, vilket kan ha betydelse för vidhäftningsegenskaperna.

8. Referenser

Aziz, D.A.A., Aly, M.H., Salem, I, A., and Abead, S.A. 2015. Effect of Air Plast Furnace Slag and Alumina Content on Dielectric Porperties and Physical Properties of Porcelain Insulator. *Physics and materials Chemistry*. Vol. 3, No. 2, 30-35.

Daniels, D.J. (1996). *Surface-penetrating radar, Sonar, Navigations and Avionics*. Series 6. London: The Institute of Electrical Engineers. P. 320.

EN-12591:2009 Bitumen och bituminösa bindemedel – Specifikationer för beläggningsbitumen

FAS Metod 221-02 Stenmaterial Bestämning av kornstorleksfördelning genom siktningsanalys

Fowkes, F.M. (1962). Determination of interfacial tension, contact angels and dispersion forces in surface by assuming additivity of intermolecular interactions in surfaces. *Journal of Physical Chemistry*, 66(2)382.

Hallberg, S. (1939). Faktorer, som inverka på bituminösa beläggnings vattenbeständighet. *Meddelande 60, Statens Väginstitut*.

Hefer, A. och Little, D. 2005. Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond. *Transportation Research Board. Research Report ICAR - 505-1*.

Linhjell, D., Lundgaard, L., and Gäfvert, U. (2007). Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation* 14(1): 156.

Little, D.N. och Bhasin, A. (2006). Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement. *Transportation Research Board. Contractor's Final Report for NCHRP Project 9-37*.

Lu, X. 2016. IR-adsorbansmätningar.

Lyne, Å. (2014). A Fundamental Adhesion Model. Doctoral Thesis. KTH Royal Institute of Technology.

Maeda, I. 1990. Dielectric anisotropy of rocks due to aligned cracks. Journal of the Faculty of Science. Hokkaido University. Series 7. Geophysics, 8(5): 479-484.

v. Matern, N. och Hallberg, S. (1935). Enkla bituminösa vägbeläggningar på grusvägar. Low Cost Bituminous Roads. Meddelande 89. Statens Väginstitut.

Olsson, K., Krona, N., och Nordgren, T. 2010. Asfaltbeläggningar med bindemedel av olika ursprung. SBUF-rapport 12091.

Owens, D.K., Wendt, R.C. (1969). Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of Applied Polymer Science (13):1741-1747.

Read, J. och Whiteoak, D. (2003) . The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition. Thomas Telford Publishing. London.

Slichter, L.B., och Telkes, M. (1942). Electrical properties of rocks and minerals. GeoScienceWorld. DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE36-p299>.

Statens Vattenfallsverk, Vattenfalls betonghandbok. Stockholm 1972. Se även Svensk Byggtjänst, Betonghandboken, material, del 1. Stockholm 2017.

Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E. 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press. Second Edition. P. 291.

Sims and Nixon, Materials and structures, Vol 36, 2003, pp 480-496.