

GEORADARMÄTNING AV ASFALTBELÄGGNINGARS EGENSKAPER



Eric Gardner

Gustav Tennby

2019-02-14

Ett **SBUF**-projekt

Datum
2019-02-14

Författare
Eric Gardner
Gustav Tennby

Skanska Sverige AB
Teknik - Väg och Asfalt
PL 6185
424 57 Gunnilse
Tel: 010-44 84 311
Fax: 031-94 33 35

Beteckning
ID: 13513

GEORADARMÄTNING AV ASFALTBELÄGGNINGARS EGENSKAPER



SKANSKA

Skanska Teknik - Vägtekniskt centrum

Georadarmätningar av asfaltbeläggnings egenskaper

Eric Gardner

Gustav Tennby

SBUF Rapport 13513

Skanska Sverige AB

Teknik - Vägtekniskt centrum (VTC)

PL 6185

424 57 Gunnilse

Innehållsförteckning

FÖRORD	1
SAMMANFATTNING	3
SUMMARY	4
1 INTRODUKTION	5
2 SYFTE OCH MÅLSÄTTNING	6
2.1 SYFTE	6
2.2 MÅLSÄTTNING.....	6
3 METOD OCH MATERIAL	7
3.1 PROVNINGSPRINCIP	7
3.2 UTRUSTNING	7
3.3 INSAMLING AV DATA	7
3.3.1 Val av mätobjekt.....	8
3.4 BERÄKNINGSMODELLER.....	8
3.5 SYSTEMJÄMFÖRELSE	9
3.6 ARBETSMILJÖRISKER.....	9
4 RESULTAT OCH DISKUSSION	10
4.1 MÄTRESULTAT AV OLIKA MASSATYPER	10
4.2 FELKÄLLOR	13
4.3 PROVFÖRFARANDE	14
4.4 SYSTEMJÄMFÖRELSE.....	15
4.4.1 Systemjämförelse med Finland.....	15
4.4.2 Objekt 4:2018 och 12:2018.....	19
4.5 JÄMFÖRELSE MOT VÄRMEKAMERA.....	22
4.6 BEDÖMNINGSMODELL	24
4.6.1 Bedömning av hålrum	24
4.6.2 Bedömning av homogenitet	24
4.7 STRYKNING AV PROVER.....	25
5 SLUTSATSER	26
6 FRAMTIDA ARBETE.....	28
7 REFERENSER	29
8 BILAGOR.....	30

Bilaga 1. Sammanställning av mätdata

Bilaga 2: Sammanställning av jämförelse av georadarsystem

Förord

Detta projekt har genomförts i samarbete mellan Trafikverket, Swedavia AB, Skanska Sverige AB, PEAB asfalt AB, NCC Industry AB, SVEVIA AB, och ÅF industry AB. I jämförande studier mellan olika utrustningar har Ramböll Sverige AB, Roadscanners Sverige AB, och Statens Vegvesen Norge deltagit.

Inom ramen för detta projekt har även en jämförande studie utförts i Finland med aktivt stöd av Finska Trafikledsverket (Väylävirasto).

Bidrag för projektets genomförande har kommit från Trafikverket, SBUF, Swedavia, och deltagande entreprenadbolag.

Vi tackar alla deltagande parter för den support och engagemang som vi fått under projektets gång.

Styr- och Referensgrupp

Torsten Nordgren – Projektledare Trafikverket
Gustav Tennby – Trafikverket
Jan Englund – Projektledare SBUF-projekt Skanska Sverige AB
Eric Gardner – Skanska Sverige AB
Magnus Nilson - ÅF Infrastructure AB
Jonathan Bergman - Swedavia AB
Lars Jansson – PEAB Asfalt AB
Khalid Kader – NCC Industry AB
Niklas Larsson – SVEVIA AB

Arbetsgruppen

Eric Gardner – Skanska Sverige AB
Magnus Nilson – ÅF Infrastructure AB
Torsten Nordgren – Trafikverket
Gustav Tennby - Trafikverket

Eric Gardner & Gustav Tennby, 2019-02-14

Skanska Sverige AB, Teknik - Vägtekniskt centrum

Sammanfattning

Trafikverket upphandlar årligen asfaltbeläggningar för 3-4 miljarder kronor vilket förutsätter att beläggningsarbeten utförs med rätt kvalitet för att beläggningen skall kunna ha en lång livslängd med god kvalitet. Men den kvalitetskontroll som utförs idag, en stickprovsbaserad kontroll med upptagande av borrhärdar som enbart säkerställer bara en bråkdel av hela beläggningsytan, är inte tillräcklig. Försök har gjorts tidigare kring att utveckla en oförstörande mätmetod med radioaktiv isotopkälla, som visade sig vara lovande men säkerhetsriskerna begränsade användandet. På senare år har Ground penetrating radar (GPR) -tekniken utvecklats till ny utrustning som kan användas som en heltäckande kvalitetskontrollmetod som Trafikverket har gjort en förstudie på. Med denna anpassade GPR-teknik som använder sig av 3 kanaler är det möjligt att få en heltäckande bild av hur beläggningsarbetet är gjort. Då det finns ett branschgemensamt intresse att ha en oförstörande metod samt få en heltäckande bild av hur arbetet har utförts är det av intresse att revidera Trafikverkets nuvarande metodbeskrivning som täcker användandet anpassad GPR-utrustning.

Men för att kunna få en heltäckande bild hur arbetet är utfört måste GPR utrustningens mätresultat, permittivitet, kalibreras mot en borrhärd som tas upp från där en stillastående punktmätning har gjorts, som sedan hålrum analyseras i laboratorium. Med den korrelationen av permittivitet mot hålrum kan den uppmätta permittiviteten interpoleras till ett beräknat hålrum över hela mätsträckan. De kalibreringsprover som samlats in från de objekt som har mätts på under säsongen uppvisar unika nivåer av permittivitet, därför kräver varje massa sina egna kalibreringsprover. Teoretiskt borde kalibrering kunna utföras på specialtillverkade asfaltplattor av samma massa, men detta har inte ingått i projektets studie.

Utläsning av permittivitet ur rådata kan för flera GPR-system kräva yrkesspecifik kunskap. Redovisning av mätdata bör därför ske i form av permittivitet och de hålrumshalter som beräknas utifrån de kalibreringsprover som tagits.

Provning har utförts med ett antal olika GPR-system i syfte att se om dessa ger jämförbara resultat. Två provobjekt valdes för detta ändamål, på vilka distansmätningar utfördes med samtliga system på utvalda sträckor. Samtliga system mätte även in nio punkter på varje objekt, för att kalibrera utrustningarna mot hålrum. Det preliminära resultatet visar på att olika system mäter med varierande nivåer av permittivitet, men att de kan upptäcka samma förändringar längs med mätsträckorna.

Vid jämförelse med GPR-mätning mot värmekameradata, på de objekt där denna typ av data finns tillgänglig, visar det på ett visst samband mellan värmekameran och GPR. Där läggningstemperaturen minskar ökar hålrummet samt att GPR-tekniken kan uppvisa svagheter på vissa områden där värmekameran inte ger något utslag.

GPR-tekniken har potential att bli en kvalitetskontrollmetod avseende packning och homogenitetskontroll av utfört beläggningsarbete. Med de kriterierna kring hålrum i beläggning Trafikverket har etablerat kan bedömning av packning utföras med anpassad GPR-teknik. Men det material som har erhållits av arbetet 2018 räcker inte för att revidera nuvarande metodbeskrivning, utan ytterligare arbete krävs. Det krävs också ytterligare arbete kring hur bedömning av homogenitet skall göras, som planeras att utföras under 2019.

Summary

Swedish Transport Administration purchases pavement for 3-4 billion Swedish crowns which requires that the pavement is performed with good quality so that the pavement will be able to have a long life-span with good quality. The current quality control, which is a sample-based control with test-cores that only ensure a fraction of the paved surface, is not enough. Trials were made to evaluate a non-destructive method with a radioactive isotope source, which seemed promising but was very limited due to the security risks. Recently the Ground penetrating radar (GPR) – technology developed new equipment that can be used as a method for full coverage, which Swedish Transport Administration have a pilot study on. With this adapted GPR-technology that uses 3 channels it is possible to acquire a full coverage on how the pavement were performed. As there is an interest in the line of business, to have a non-destructive measurement method as well to get a full coverage of the pavement there is a reason to revise Swedish Transport Administration's current method description about the use of GPR-measurements.

To be able to acquire a full coverage of how the work have been performed the result of the GPR-equipment, permittivity, has to be calibrated against a test-core from where a stationary reading have been, that is then analysed in a laboratory to acquire the air void content. With a correlation between the permittivity and the air void content the measured permittivity can be interpolated to a calculated air void content over the full measurement. The test-cores that have been collected from all measured objects during the project all have unique permittivity-levels therefore, each mass requires its own series of test-cores to be calibrated to. In theory it should be possible that the calibration is performed on custom asphalt tiles made from the same mass, but this was not included in this project study.

Reading permittivity values from raw-data can require professional-specific knowledge for several GPR-systems. Therefore, presentation should be done in form of measured permittivity and the calculated air void content from the calibration from test-cores.

Testing have been done with several different GPR-systems in purpose to see if these different systems give comparable results. Two objects were chosen for this purpose, on which distance measurements were performed with all systems on selected routes. All systems also measured nine stationary readings on both objects, that later could be used to calibrate the systems against air void content. The preliminary result indicate the different systems measure with varying permittivity-levels, but it is possible that the different systems can detect the same variation along the survey.

When comparing a GPR-survey with thermal-camera data, where this data is available, there is a certain relationship between GPR and thermal-camera. Where the working temperature decreases the air void content increases and the GPR-technology can detect weaknesses where the thermal-camera does not show any indication of weakness.

The GPR-technology have potential to be a quality control method regarding packing and homogeneity control of performed pavement job. With the established air void content criteria the Swedish Transport Administration, evaluation of packing can be done with GPR-technology. But the material that have been acquired during the project, is not enough to be able to revise the current method-description and further study is required. It is also required to study how the assessment of homogeneity shall be done, which is planned to do during 2019.

1 Introduktion

Trafikverket upphandlar årligen asfaltbeläggningar till ett värde av 3 – 4 miljarder för underhåll och nybyggnation av vägar. Att säkerställa att upphandlade beläggningar utförs med rätt kvalitet är en förutsättning för lång livslängd. Det förs en ständig debatt om att homogena beläggningar är högst väsentligt för att säkerställa god kvalitet. Det har skett en utveckling på maskinsidan som medför att homogeniteten i utfört asfaltlager har förbättrats. Utveckling inom kontrollsidan ligger något efter, och branschen jobbar fortfarande med kontrollsystem som bygger på stickprov av det utförda arbetet. Branschen har under flera år efterfrågat system för kvalitetskontroll och redovisning som ger en mer heltäckande bild av utfört beläggningslager, och där man objektivt även kan värdera homogeniteten. Ett förbättrat kontrollsystem leder med största sannolikhet till en förlängning av livslängden, som medför en betydande besparing där ett års ökad livslängd motsvarar i princip vad underhållet kostar under ett år.

Inom asfaltbranschen har bestämmandet av hålrums halt (indirekt packning) i en asfaltsbeläggning länge använts som ett viktigt kriterium för att bestämma kvaliteten på en utförd beläggning. Borrkärnorna från beläggningsytan speglar endast en mycket liten del av den yta som kontrolleras. Standard för provtagning för arbeten beställda av Trafikverket är att fyra stycken prover med en diameter på 10 cm tas ut på varannan yta av 3000 m², vilket motsvarar en bråkdel procent (0,00026 %) av ytan. Men att i efterhand gå ut på ett beläggningsobjekt och ta upp borrkärnor är ett arbetsmoment som är relativt kostsamt samt är förenat med stora risker avseende arbetsmiljö och trafiksäkerhet. Årligen förekommer det mer eller mindre allvarliga incidenter med trafikanterna.

Såväl beställare (Trafikverket och Swedavia) och utförande beläggningsentreprenörer har ett intresse av att hitta nya system för kvalitetsvärdering av utfört beläggningsarbete, om möjligt i direkt anslutning till utförandet när det är ett avstängt arbetsområde. Om man kan ha ett system som även kan användas på icke avstängd väg i samma hastighet som trafikflödet, öppnas helt nya möjligheter. Det man vill uppnå är en mer heltäckande och rättvisande redovisning av utfört arbete, genom användning av en objektiv oförstörande mätning som mäter så stor del av ytan som möjligt.

Det finns idag system som bygger på att man i produktionsledet säkerställer förutsättningarna t.ex. användning av värmekamera. Det finns även nya mätmetoder där man kan få indikering av variationer i beläggningslagrets textur som indirekt kan användas för bestämning av beläggningsens homogenitet, men kräver att man mäter efter viss tids trafikering av vägytan (textur med laserbil). Med denna teknik får man dock inte med någon dokumentation av utfört packningsarbete.

Man har tidigare gjort försök för att hitta provningsmetoder som inte kräver omfattande borrhning, och som kan ge en bättre bild över utfört beläggningslager i sin helhet. Test med rullande densitetsmätningar med radioaktiv isotopkälla (DOR) visade sig lovande men säkerhetsriskerna begränsade användandet.

I vår omvärld sker en kontinuerlig utveckling och utvärdering av nya mätmetoder. Under de senaste åren har det skett omfattande försök med bland annat olika typer av utrustning som är baserade på principen med georadar. Vintern/våren 2016 presenterades en nyutvecklad typ av georadarutrustning speciellt framtagen för att indirekt kunna mäta packning (hålrums halt) på enskilt utfört asfaltlager. Genom att mäta i flera mätlinjer kan även data bearbetas och man kan få en uppfattning om hur homogen beläggningslagret är. Under åren 2016 och 2017 drev

Trafikverket en förstudie som ett internt utvecklingsprojekt med syfte att undersöka om aktuell utrustning och system möjligen kan användas för kontroll av utfört beläggningsslager (Gardner & Nilson, 2017, Trafikverket, 2018). De resultat som kom fram enligt förstudien indikerade klart att man bör gå vidare med tekniken baserad på georadar för kontroll av utfört beläggningsslager. Om man ska få en uppfattning om packningsarbetet behöver man kalibrera det mätresultat man erhåller mot ett begränsat antal borrhärdar för att kunna indikera nivå av hålrums halt. I en framtid kan med största sannolikhet en databas byggas upp med typvärden för olika beläggningstyper så att man på sikt helt kommer från upptagning av borrhärdar. I förstudien som Trafikverket drev har man undersökt vilka de påverkande faktorerna är och eventuella störningar som kan påverka erhållet mätresultat. Det finns ett stort intresse från branschen att tillsammans med Trafikverket och andra beställare gå vidare och jobba med den nya tekniken för produktionsstyrning och kvalitetssäkring av utfört beläggningsslager.

Trafikverket har under året 2018 ytterligare byggt upp erfarenhet kring tekniken och påbörjat framtagningen av en första utgåva av standardmall för bearbetning av data och rapportering från denna typ av mätningar.

2 Syfte och målsättning

2.1 Syfte

Projektet ämnar bygga upp erfarenhet kring metoden med georadar, för att kunna implementera detta som en metod för såväl kvalitets dokumentation och produktionsstyrning av utförandet av asfaltsbeläggningar. Att använda metoden som komplement för dagens metoder, eller med tillräcklig erfarenhet möjligtvis helt kunna ersätta borrhärdning. Både beställare och entreprenörer kan dra nytta av en mer rättvis bedömning av utfört arbete.

Att ta fram en standard för bedömning av mätresultat som är oberoende av egenskaper hos en specifik tillverkarens mätinstrument. Att ta fram ett standardiserat dataformat, med specifikationer för filformat, samt hur data skall struktureras i dessa filer, och vilka dataposter som skall finnas med.

Ta fram ett förslag (underlag) över hur mätningarna ska rapporteras, gällande vilken data som skall finnas med både gällande mätdata och metadata kring objektet, utrustningen och omständigheterna vid mättillfället.

Säkerställa att metodbeskrivningen kan hantera både mätning i direkt anslutning till utförandet, och användas som kontroll av färdigt lager i efterhand. Samt vid behov kunna genomföra mätningar i hastigheter som medför att vägen inte behöver stängas av eller att trafikflödet begränsas.

Ta fram ett underlag avseende förutsättningar för användning i skarpt läge för ett antal försöksobjekt 2019.

2.2 Målsättning

Trafikverket skall tillsammans med beläggningsslagningens aktörer uppdatera befintlig provningsmetod och redovisningssystem samt revidering av regelverk avseende beläggningar, för framtida användning i kommande kontrakt.

Genom användning av ny och anpassad teknik baserad på georadar som medför att man på sikt kan minska eller helt ta bort upptagning av borrhärdar för att säkerställa kvaliteten och homogenitet på utfört beläggningslager.

Minska andelen av systematiska fel som leder till förkortad livslängd av utfört beläggningslager.

3 Metod och material

3.1 Provningsprincip

För att få en heltäckande bild av beläggningsytan med hjälp av GPR behövs flera mätlinjer i varje beläggningsdrag. Varje mätning under säsongen 2018 utfördes med en uppsättning av tre antenner, en i mitten av beläggningsdraget och två i position motsvarande hjulspåren. Vid vissa objekt med breda beläggningsdrag som inte var körfältsindelade, gjordes en mätsträcka med tre mätlinjer till i motsatt riktning för att få en mer heltäckande bild. Hastigheten på mätningarna gjordes främst i gång-hastighet upp till 10 km/h. På ett par objekt gjordes provmätningar med systemet monterat på en mätbil, dessa mätningar gjordes i varierande hastigheter i spannet 30 - 70 km/h.

3.2 Utrustning

En georadar från leverantören GSSI av variant Pave Scan RDM med tre kanaler på en frekvens på 2,5 GHz, med en inbyggd distansgivare har använts under samtliga fältmätningar. Pave Scan RDM kalibrerades mot luft och en metallplåt inför varje mätning för att den relativa permittiviteten skulle bli korrekt. Systemet är utrustat med en GPS av modell Garmin Glo Portable GPS med en precision på $\pm 3\text{m}$. En elektrisk fältgräsklippare med klippaggregatet borttaget har använts på vissa objekt för att skjuta utrustningen istället för handkraft. Denna kan nå en maxhastighet av strax under 10 km/h.

För mätningar av temperatur på proverna har en Testo infraröd termometer använts. I syfte att utvärdera om vatten kan upptäckas innan mätningen i ytan har en Gann Hydromette UNI 1 införskaffats.

Fältförsök gjordes med tre olika georadar utrustningar utöver Pave Scan RDM, dessa specificeras under kapitel 3.5 Systemjämförelser.

3.3 Insamling av data

Insamling av borrhärdar för att kalibrera permittiviteten mot hålrum har skett genom att mäta en sträcka för att täcka hela det förväntade spannet av permittivitetsvärdet över samtliga objekt. Därefter har punkter markerats för vart borrhärdar skulle tas och en stillastående punktmätning har gjorts för att få ett representativt permittivitetsvärde. Vid punktmätningen togs temperatur av asfalten med en IR-temperaturmätare samt H₂O mättes för att kunna se om det finns samband mellan de olika parametrarna. Utförandet av borrhärdarna har gjorts av utförande beläggningsentreprenör och borrhärdarna skickades sedan till ett laboratorium för hålrumsanalys.

Minst 6 stycken borrhärdar har tagits på varje beläggningsobjekt, och borrhärdarna har tagits med en diameter på 150 mm. För att välja ut var de 6 stycken borrhärdar skall tas ifrån har vi använt konsekvent samma metod på alla objekt. Att först mäta in en sträcka på ca 100m för att

se hur den relativa permittiviteten varierar för objektet. Därefter analyseras sträckan för att identifiera max- och minimumvärden för intervallet och värden mellan. Till sist skall de värden som bedömts visa hela intervallet mätas in och markeras. På samtliga borrhärdar har vattenmetoden använts som bestämning av skrymdensitet av provkroppen, men på vissa extra intressanta objekt har även skrymdensiteten bestämts med skjutmått och med vakuumförslutning.

3.3.1 Val av mätobjekt

Ett antal olika objekt har valts ut under säsongen 2018 för mätningar i syfte att undersöka teknikens lämplighet. Samtliga deltagande entreprenörer samt Swedavia har tillfrågats efter pågående beläggningsprojekt under säsongen 2018 som skulle vara intressanta att mäta på. Efter att ett antal projekt identifierades så valdes ett antal ut, med prioritet för objekt med utmärkande omständigheter som ansågs vara extra intressanta. Detta inkluderar objekt med värmekamera mätningar i syfte att jämföra dessa. Förändringen i mätresultat över tid har ett objekt valts ut för att undersöka, mätningar gjordes där sommaren 2017 i direkt samband med läggning, och igen sommaren 2018. Ett antal objekt med provsträckor med varierande massa typer till exempel olika grader av återvinningsmassa eller halt av polymerer. Slutligen fick urvalet förändras under projektets gång beroende på ändringar i tidplanerna för beläggningsarbetena samt väderförhållanden.

En mätning valdes att göra på ett objekt av intresse. Det var på ett objekt med slaggåtervinning inblandat i asfalten, vilket var av intresse bättre förstå inverkan av förändringar i massans komposition och dess förhållande till mätresultatet. Det fanns hypoteser om att även en liten procentuell andel av stålslagg i massan skulle påverka den relativa permittiviteten för den enskilda asfaltmixen väldigt tydligt, om det skulle vara möjligt att mäta.

3.4 Beräkningsmodeller

För att räkna ut den relativa permittiviteten på en asfaltbeläggning använder sig Pave Scan RDM av ytrelektionsmetoden för varje antenn (1). Vilket baseras på amplituden av en utsänd radarsignal (A_0) som jämförs mot den signal som erhållits från kalibrering mot en stålplatta (A_i), av Pave Scan RDM eller andra GPR-system.

$$\epsilon_r = \left(\frac{1 + \left(\frac{A_0}{A_i}\right)}{1 - \left(\frac{A_0}{A_i}\right)} \right)^2 \text{ där } \begin{cases} \epsilon_r = \text{Relativ permittivitet} \\ A_0 = \text{Signalreflektion från asfalt} \\ A_i = \text{Signalreflektion från stålplatta} \end{cases} \quad (1)$$

För att beräkna fram hålrummet från den uppmätta permittiviteten behövs det först göras en korrelation mellan hålrum och permittivitet från de stillastående punktmätningarna och hålrumsanalys. För detta ändamål har en specialdesignad Excel-mall tagits fram som beräknar om den uppmätta permittiviteten till hålrum med hjälp av korrelationskurvan mellan hålrum och permittivitet, som är framtagen med en standard exponentiell regressionsberäkning (2).

$$y = Ae^{(Bx)} \text{ där } \begin{cases} A = \text{Variabel beroende på kurvans ekvation} \\ B = \text{Variabel beroende på kurvans ekvation} \\ e = \text{Matematisk konstant} \\ y = \text{Beräknat hålrum} \\ x = \text{Uppmätt permittivitet} \end{cases} \quad (2)$$

Varav determinationskoefficienten R^2 tas fram för kurvan som anger hur stor del av variation av variabel i Y-led kan förklaras av variation av variabel i X-led. Därefter beräknas ett medelvärde av n antal, vanligtvis 6-7 uppmätta permittivitetvärden över 1 meter, till hålrum.

Vid mätning i motsatt riktning på de beläggningsdragen som inte var körfältsindelade, vändes mätningen manuellt innan bearbetning så att alla mätningar visas åt samma riktning.

3.5 Systemjämförelse

Ett samarbete med finska Trafikledsverket inleddes i augusti 2018 där gemensamma tester kunde utföras på samma beläggningsprojekt. Detta gav ett unikt tillfälle att pröva Pave Scan RDM med 3 antenner på 2,5 GHz mot andra kvalitetssäkrande system, så som värmekamera och ett annat GPR system, SIR-20 med en 1 GHz antenn. Även olika metoder för att bestämma skrymdensitet genomfördes för att se vad som ger bäst korrelation mellan permittivitet och hålrum.

Ytterligare ett samarbete med Statens Vegvesen Norge, Roadscanners Finland och Ramböll Sverige samordnades i september 2018 för att ha en systemjämförelse för att identifiera och hitta skillnader och likheter mellan olika GPR system vid två olika objekt, objekt 4 och objekt 12. De olika systemen som användes för jämförelsen var Pave Scan RDM, en GSSI SIR-30 med en luftburen antenn på 1,0 GHz, en GSSI SIR-30 med en luftburen antenn på 2,0 GHz och en IDS RIS Hi-pave med en luftburen antenn på 1,0 GHz. Denna jämförande studie tillät en temporär montering på bil och därmed högre mät hastigheter. De jämförande mätningarna på objekt 4 gjordes på morgonen i en hastighet på 60 km/h och på kvällen i en hastighet på 30 km/h för att se om fart påverkar mätresultatet. Nio stycken punktmätningar och borrhänsor togs på kvällen och skickades sedan till Skanska VTC Väst för analys.

Objekt 12 var ett avstängt vägarbetsområde där möjligheterna var större. På objekt 12 testades olika hastigheter och ett flertal mätsträckor utfördes för att få ett bra urval av data att jämföra. 1 mätlinje i både höger och vänster hjulspår samt 1 mätlinje mellan. Även på objekt 12 gjordes nio stycken punktmätningar, och borrhänsor togs upp i dessa punkter som skickades till Skanska VTC Väst för analys.

I syfte att undersöka jämförbarheten mellan de olika systemen jämförs de värden som är uppmätta på de två serierna om nio prover. I serien borrhänsor från objekt 12 har även hålrumshalten provats på det undrelagret i syfte att se om en mer lågfrekvent antenn har större influens från detta lager. Dessa resultat kan även jämföras mellan olika system av samma tillverkare i olika frekvens, i detta fall två olika SIR 30 system med antenner med en frekvens på 1,0 respektive 2,0 GHz. Utöver detta även en jämförelse mellan SIR 30 systemet med 1,0 GHz antenn och IDS systemet med en antenn på samma frekvens.

3.6 Arbetsmiljörisker

Elektromagnetisk strålningens koppling till långtidsskador är i dagsläget inte helt uppkälat än trots ett antal studier utförda inom området. Fastställt är dock att elektromagnetisk strålning mellan 100 kHz och 300 GHz kan inducera ström, samt orsaka uppvärmning av kroppsvävnad. Vid höga absorptionsnivåer kan brännskador uppkomma (Daniels, 2009). Brännskador, och andra akuta skador uppkommer vid frekvenser över 10 GHz då dessa inte penetrerar kroppen

som vågor av lägre frekvens. Det krävs även en energitäthet på 1000 W/m² eller mer för att dessa skador skall uppstå (WHO, 2017).

Då mätningarna delvis genomfördes på trafikerad väg behövdes en TA-plan för de objekten, samt att boka ett tungt-skydd för att skydda mätoperatörerna och trafiken för att minimera olycksrisken. Mätoperatörerna har även haft på sig personlig skyddsklädsel under arbetet.

4 Resultat och diskussion

4.1 Mätresultat av olika massatyper

Under beläggningssäsongen 2018 har mätningar utförts på 10 objekt, både omfattande beläggningsobjekt och mindre beläggningar. Instrumentet har rullat en total sträcka på drygt 17 mil under hela beläggningssäsongen från april till och med oktober 2018. De olika massorna som testades under beläggningssäsongen 2018 var ABS 16 70/100, ABS 16 70/100 Ryolit, AB 16 (finsk beteckning), AG 22 70/100, ABT 22 70/100, Viacogrip 11 EAF Viacobit 85 (Slagg), Constrada TKB 16 Nypol 67, ABTs 16 PG 76-28, ABTs 16 PG 76-28 5,8 %, ABTs 16 PG 76-28 6 % och ABTs 16 70/100 5,8 %.

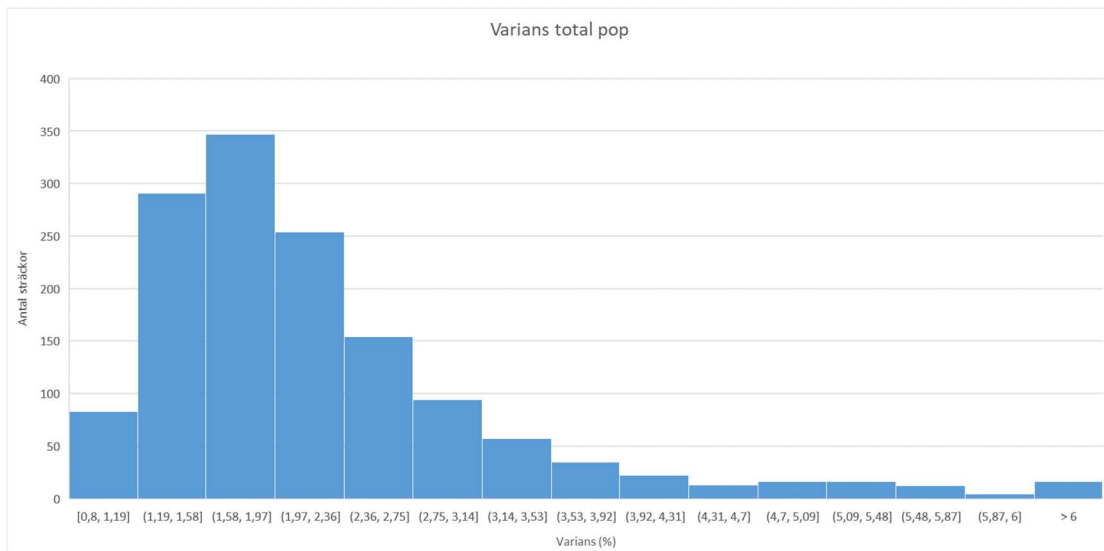
Då asfalt består av olika halter bindemedel och olika stenmaterial leder det till att varje beläggning är unik. Detta gör att varje asfaltbeläggning har sin egen nivå av permittivitet och ingen meningsfull data erhålls ifrån att jämföra olika absolut nivåer av permittivitet. Variansen ger då istället ett standardiserat värde på graden av homogenitet i populationen (Fig. 1).

Mätresultaten som vi har erhållit från alla mätningar under 2018 har gett oss mycket erfarenhet kring användandet av GPR-tekniken avseende packnings- och homogenitetskontroll av beläggningar. Vissa objekt har vi även kunnat mäta på ett år efter beläggningen för att kunna se inverkan av efterpackning. Med årets mätresultat har vi kunnat arbeta med framtagandet av databearbetningsmetoder och preliminära slutrapportmallar samt att kunna fundera kring vilka förändringar som behövs eller om det är metoder som behöver läggas till i kommande arbete för att förbättra erhållet resultatet.

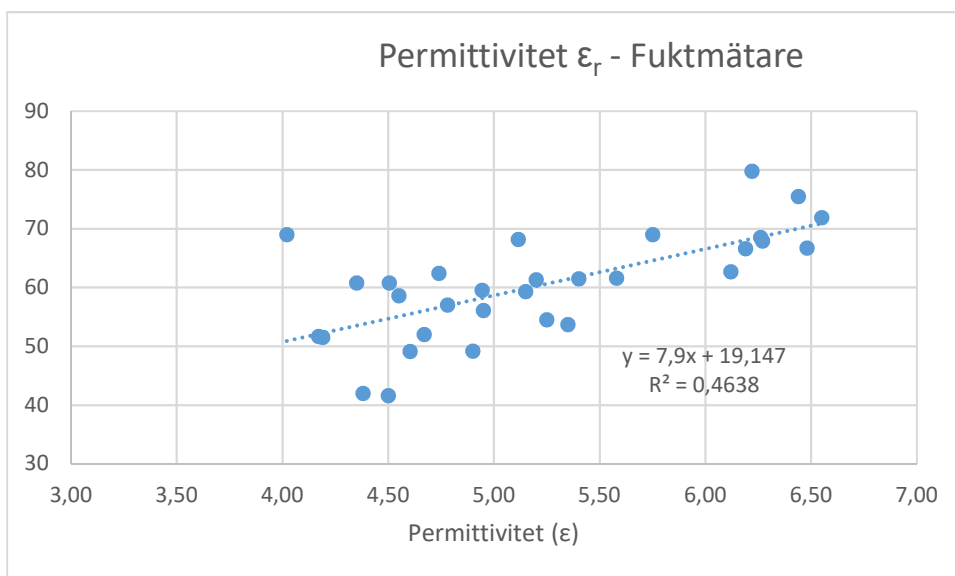
Flera av de objekt som har mätts på under säsongen 2018 kommer inte att behandlas lika ingående som de objekt som har mest intressanta resultat för studien. Flera av objekten har också mätts för att lära sig arbeta med GPR-tekniken avseende packnings- och homogenitetskontroll och att bygga erfarenhet.

Resultatet på provpunkterna mätta med Pave Scan RDM och UNI 1 (Fig. 2). Dessa visar på ett klart samband mellan de båda instrumenten. Då fuktmätaren likt georadar system ökar dess mätvärde vid ökad fukthalt ger inte detta instrument någon antydning till förändring i fukthalt. För detta skulle krävas ett referensvärde för asfalten, som skulle kunna fås fram genom mätning på garanterat torr provkropp. Närmare studier skulle behövas för att verifiera att tekniken fungerar som indikator på att det finns fukt i aktuell beläggning.

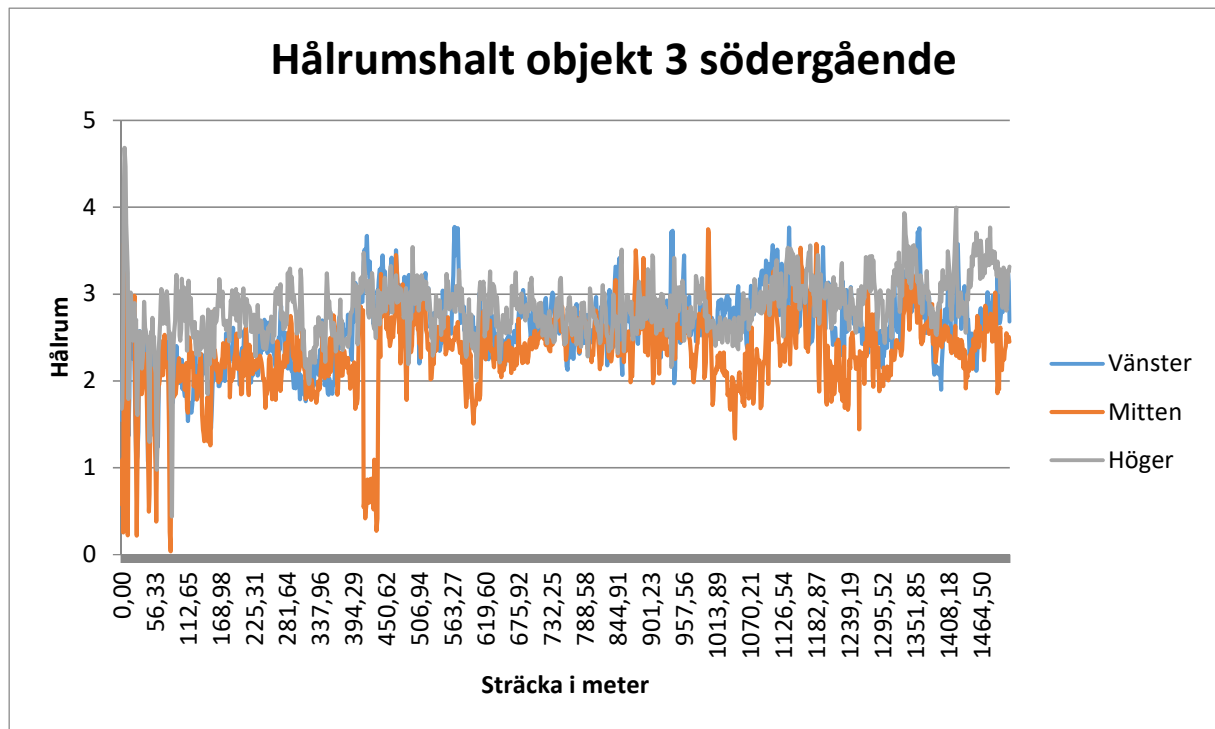
Vid läggning av södergående riktning för objekt 3 användes ett roterande tråg för omblandning av massan i läggaren (Fig. 3), men i norrgående riktning användes ej denna utrustning (Fig. 4). Detta syns tydligt i differensen i tvärled, där den norrgående mätningen påvisar en stor avvikelse på vänstersidan av draget, denna beräknas ligga på 3,2 % hålrumshalt mot 2,5 % i center. På den södergående kan detta jämföras mot 2,6 % vänster och 2,3 % center. Detta kan reflekteras i hur det val av utrustning som används vid beläggning kan påverka resultatet.



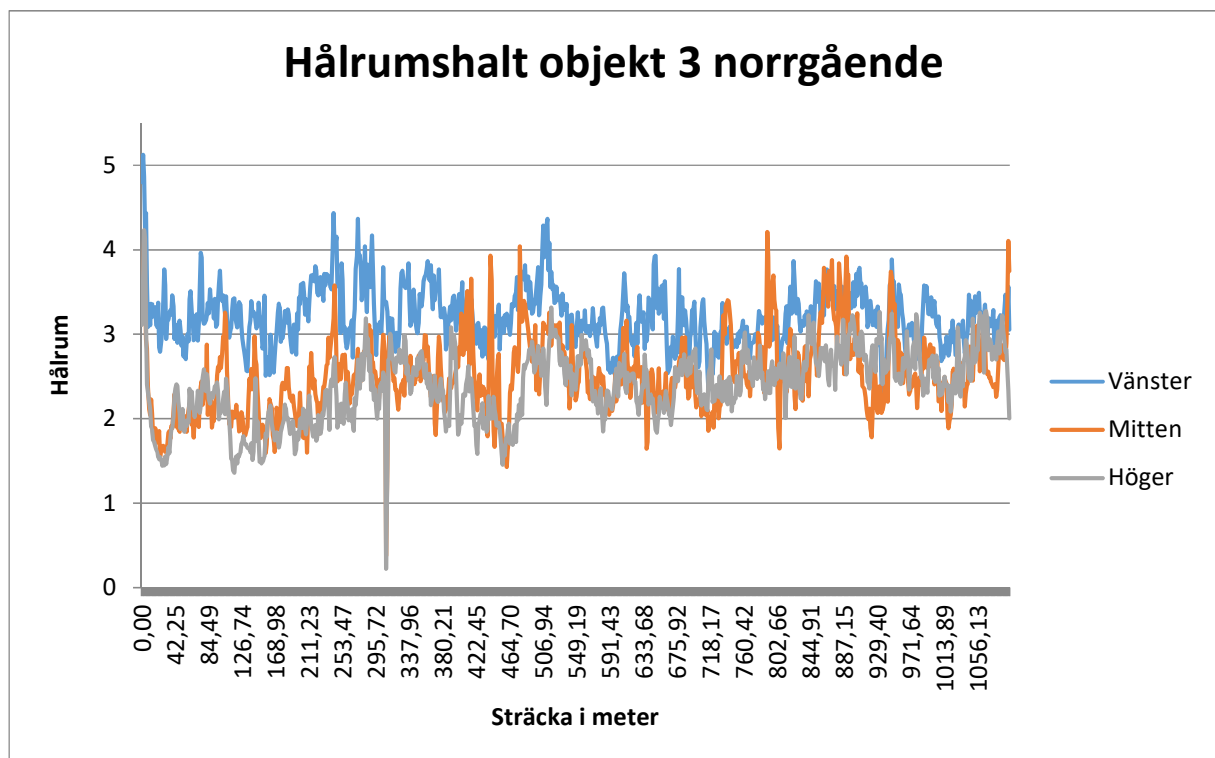
Figur 1 Varians på permittivitet på samtliga uppmätta 100 meters sträckor från säsongen 2018.



Figur 2 Korrelation mellan uppmätt permittivitet och fuktmätning på punktmätningar från objekt under 2018. Y-axeln är dimensionslös.

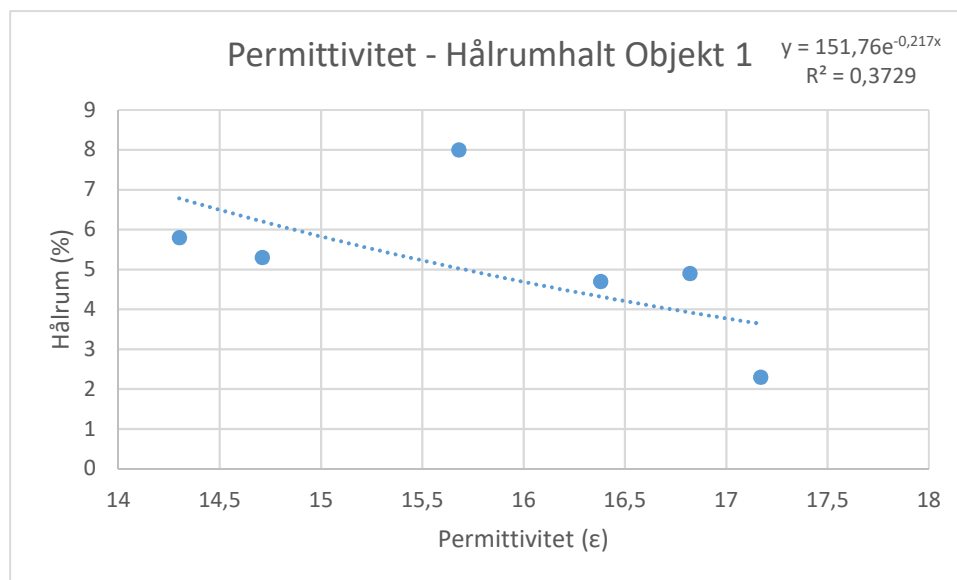


Figur 3 Uppmätt hålrums halt för objekt 3 i södergående riktning med ett roterande tråg. I början av grafen syns en tydlig influens av vatten från upptagning av borrhärlor.



Figur 4 Uppmätt hålrums halt för objekt 3 i norrgående riktning utan användandet av ett roterande tråg.

Mätningarna som utfördes på objekt 1 (Fig. 5), vilket är ett objekt där asfalt med inblandning av slaggrester från stålproduktion använts. På denna massa med slaggrester ligger permittivitetsvärdet cirka tre gånger högre än för vad som normalt uppmäts för en konventionell asfaltsbeläggning. Den beräknade korrelationen mellan permittivitet och hålrums halt baserat på de sex proverna som togs ger ett R^2 på 0,3729. Resultatet ligger i linjer med vad som förväntades.



Figur 5 Korrelation mellan permittivitet och hålrum för objekt 1 med stålslagg.

4.2 Felkällor

Att vatten påverkar radarsignalen är ett faktum. Därför är det önskvärt med en tydlig metod för att säkerställa att vatten inte finns i beläggningen då en mätning med GPR-teknik inleds. Vi har påbörjat arbete kring hur säkerställandet att det inte finns vatten i beläggningen skall gå till, men ytterligare utförliga studier behövs. Det kan vara möjligt att utveckling av tekniken skulle kunna ge möjligheten att genom signaltolkning filtrera ut inverkan från vatten i resultatet, men det är inget som finns tillgängligt i dagsläget.

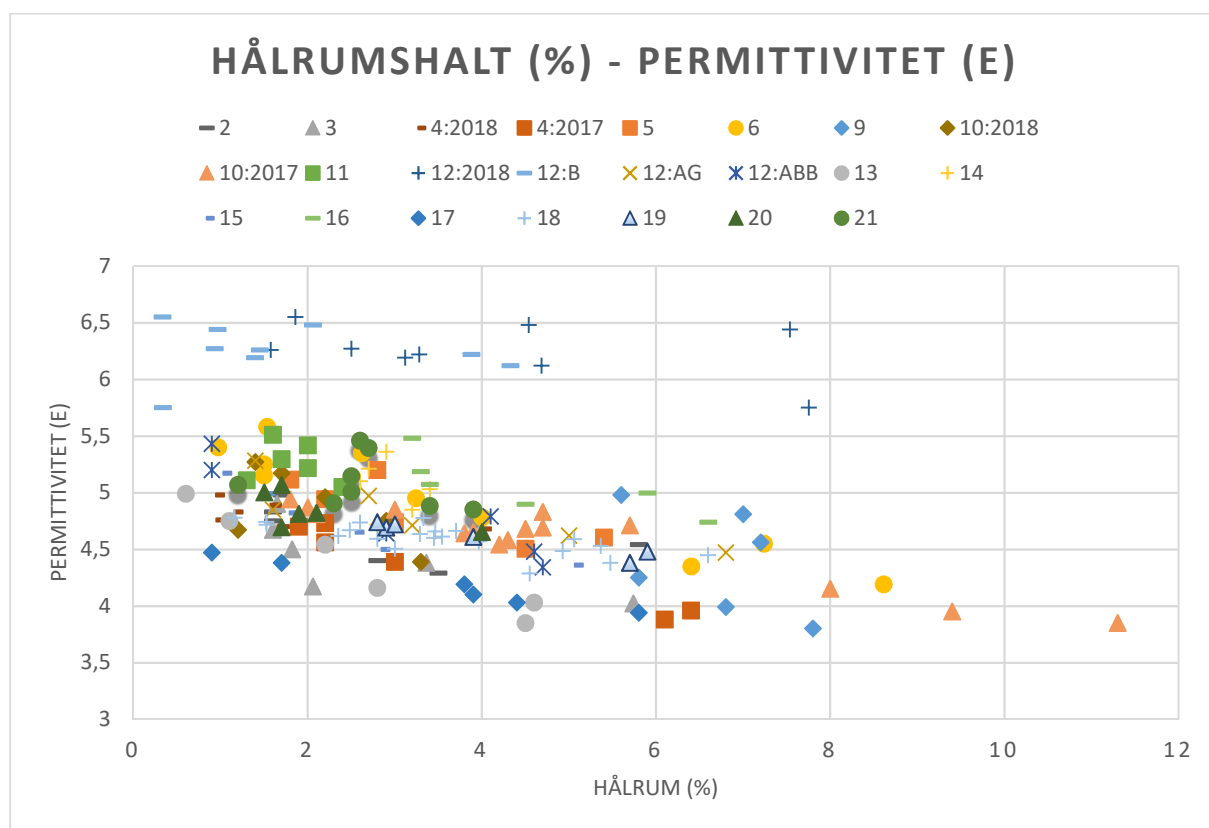
Material med mycket stor differens i permittivitetsvärde mellan toppskiktet och underliggande lager kan eventuellt ha en inverkan på mätresultatet även från större djup än vad som är normalt vid två skikt med relativt lika värden. Ett exempel på detta skulle vara då det finns metallobjekt under asfalten jämfört mot två lager asfalt. System med lägre frekvens har en större risk att få denna influens från undre lagret vid ett givet djup.

Ett system som framförs i högre hastigheter än vad som är specificerat som högsta möjliga hastighet löper en risk att systemet inte klarar av att göra tillräckligt många mätningar per meter för att möta det krav man ställer på utrustningen.

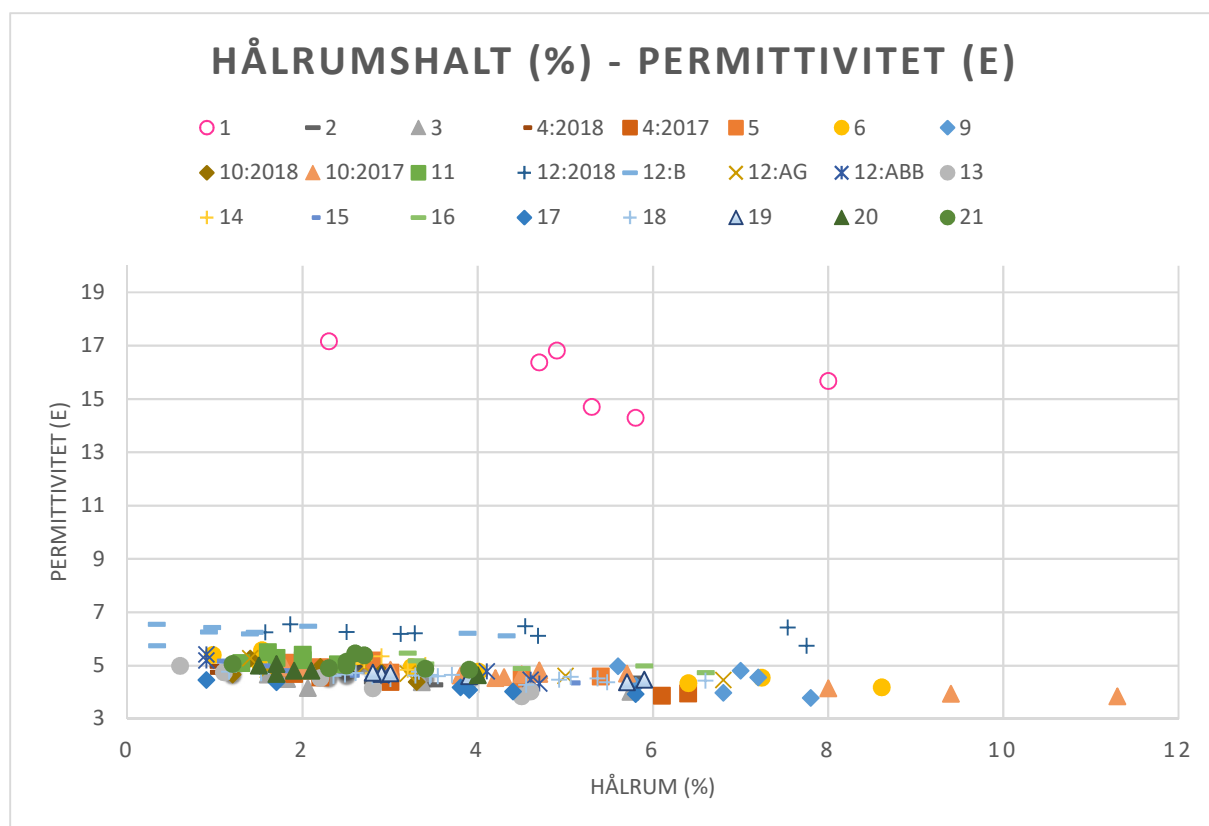
4.3 Provförfarande

För att mätresultat skall vara konsekventa och användbara för kvalitetsbedömning av asfaltbeläggning krävs att ett antal olika parametrar kring mätningen och hur den rapporteras standardiseras. Tid efter slutfört arbete till det att mätningar utförs är mycket viktigt i fall ytan trafikeras, då efterpackning av trafiklast ger en klar förändring i mätresultatet. Delar av det beläggningsarbete som utfördes på objekt 4 i Örebro juli 2017 mättes med Pave Scan RDM systemet i samband med utförandet. I september 2018 mättes hela sträckan igen, och en ny serie kalibreringskärnor samlades in för analys.

Under 2017 och 2018 har totalt 205 borrkärnor samlats in för analys av hålrumhalt i förhållande till uppmätt permittivitet med Pave Scan RDM systemet för kalibrering av mätdata. Sett över hela populationen av prover exklusive på objekt 1 där det syns en svag korrelation, men precisionen är betydligt lägre än för individuella serier (Fig. 6 – 7).



Figur 6 Alla tagna borrkärnor från 2017 och 2018 med undantaget av objekt 1.



Figur 7 Alla tagna borrkärnor från 2017 och 2018 där objekt 1 är inkluderat.

4.4 Systemjämförelser

Alla metoder för att bestämma skrymdensitet visar en god korrelation mellan permittivitet och hålrum och skiljer sig inte mycket. Detta stärker metoden med att korrelera permittiviteten mot hålrum oavsett vilken metod för att bestämma skrymdensitet som används. Men då det finns en skillnad mellan 100mm och 150mm borrkärnor rekommenderas 150mm borrkärnor att användas.

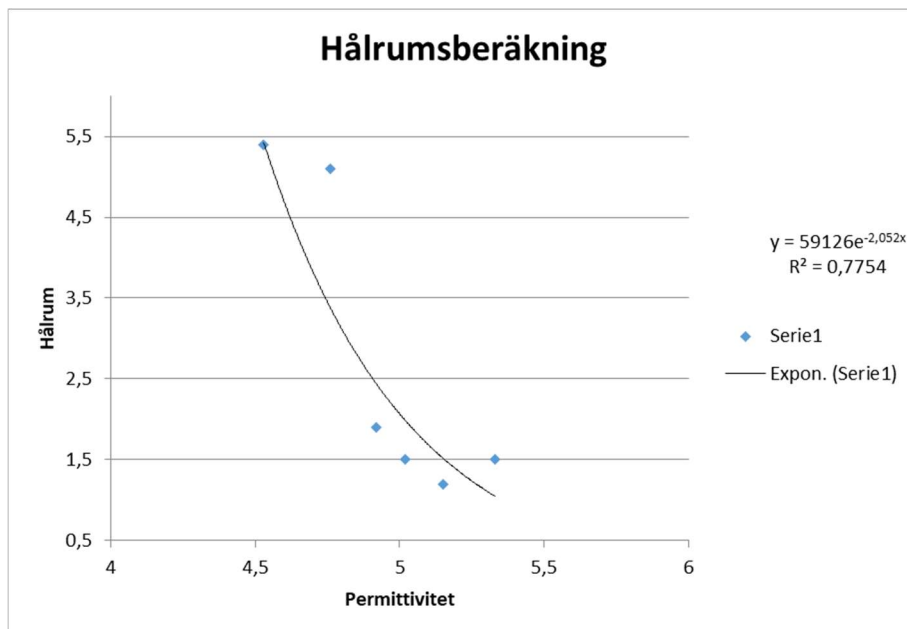
4.4.1 Systemjämförelse med Finland

Vid system- och metodjämförelsen från Finland korrelerades flera borrkärnor med flera metoder. Både borrkärnor med 100mm diameter och 150mm diameter analyserades och korrelerades mellan permittivitet och hålrum för att se vad som ger det bästa resultatet (Tabell 1 - 2). Redan vid jämförelse mellan 100mm och 150mm borrkärnor finns det en skillnad i korrelation. $R^2 = 0,775$ för 100mm borrkärnorna medan 150mm borrkärnorna med samma metod får en $R^2 = 0,852$ (Fig. 8 - 9). Vid ytterligare jämförelse mellan de olika skrymdensitetsmetoderna finns det en liten skillnad vid korrelationen (Fig. 9 - 11). Den bästa korrelationen mellan permittivitet och hålrum fås av vakuutförslutning (SS-EN 12697-6:C Bulk Density – Sealed Specimen) som har en $R^2 = 0,8776$. Den näst bästa korrelationen gavs av bestämning av skrymdensitet med vatten (SS-EN 12697-6:B Bulk Density – Saturated Surface) med en $R^2 = 0,852$. Den metod som gav minst bra korrelation var bestämning av skrymdensitet med skjutmått (SS-EN 12697-6:D Bulk Density by dimensions) med en $R^2 = 0,8379$.

Vid jämförelse mellan permittiviteten av en 1,0 GHz SIR-20 utrustning mot en Pave Scan RDM på 2,5 GHz, så är det en medelförskjutning på ~0,3 i permittivitet mellan de två utrustningarna där Pave Scan RDM har ett högre permittivitetsvärde.

Tabell 1 Uppmätt permittivitet och hålrums på borrkärnor med en diameter på 100mm. Prov C1 användes inte då det gick sönder vid provtagning.

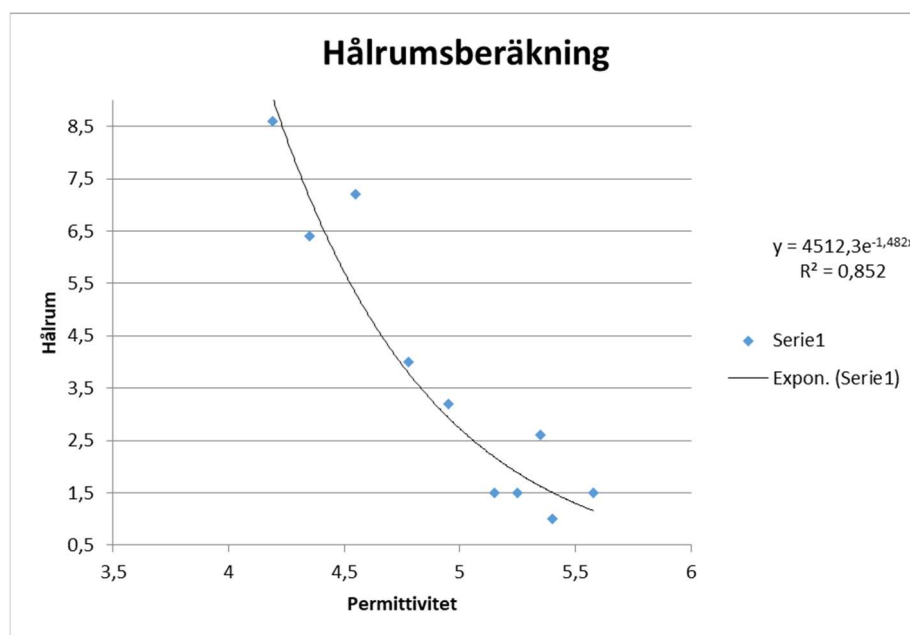
Prov-markering	Permittivitet (ϵ_r)	Hålrums (Volym %)
C1	5,24	X
C2	4,53	5,4
C3	4,76	5,1
C4	5,02	1,5
C5	5,15	1,2
C6	4,92	1,9
C7	5,33	1,5



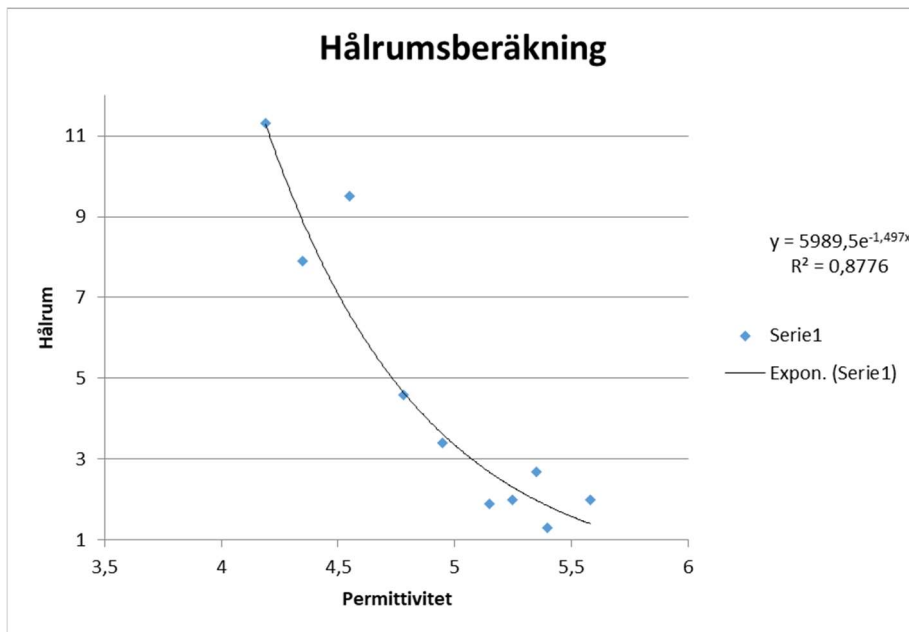
Figur 8 Korrelationskurva mellan permittivitet och hålrums med vatten SS-EN 12697-6:B som skrymdensitetsmetod med 100mm borrkärnor.

Tabell 2 Uppmätt permittivitet och hålrums på 150mm borrkärnor beroende på skrymdensitetsmetod. *A - Vatten, *B - Vakuumsförslutning, *C - Skjutmått.

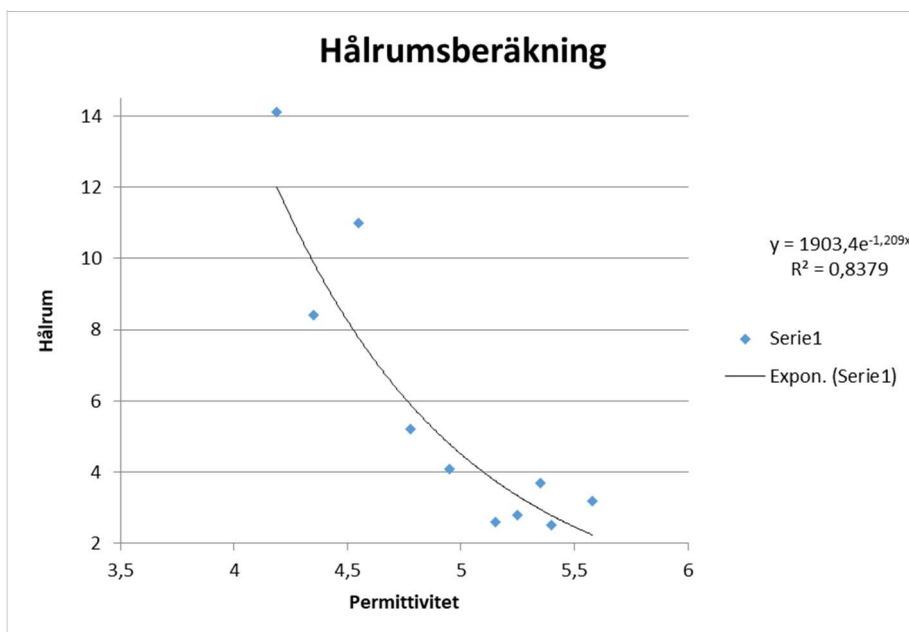
Prov- markering	Permittivitet (ϵ_r)	Hålrums *A (Volym %)	Hålrums *B (Volym %)	Hålrums *C (Volym %)
B1	4,35	6,4	7,9	8,4
B2	4,19	8,6	11,3	14,1
B3	4,95	3,2	3,4	4,1
B4	5,15	1,5	1,9	2,6
B5	5,25	1,5	2,0	2,8
B6	4,55	7,2	9,5	11
B7	5,40	1,0	1,3	2,5
B8	5,58	1,5	2,0	3,2
B9	4,78	4,0	4,6	5,2
B10	5,35	2,6	2,7	3,7



Figur 9 Korrelation mellan permittivitet och hålrums med vatten, SS-EN 12697-6:B som skrymdensitetsmetod (*A) med 150mm borrkärnor.



Figur 11 Korrelation mellan permittivitet och hålrums med vakuumförslutning, SS-EN 12697-6:C som skrymdensitetsmetod (*B) med 150mm borrhärnor.



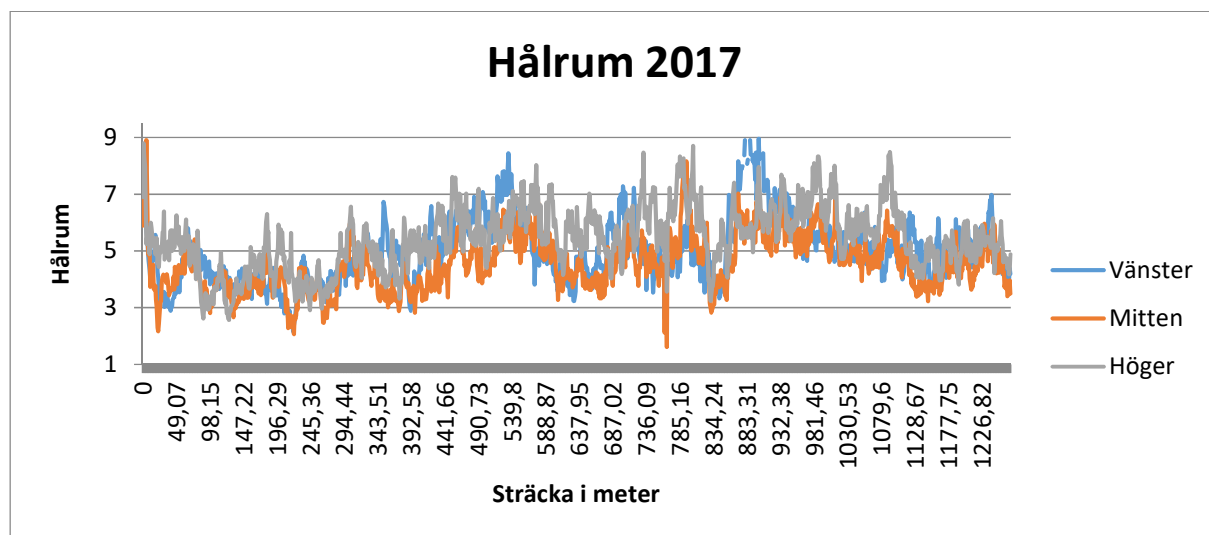
Figur 10 Korrelation mellan permittivitet och hålrums med skjutmått, SS-EN 12697-6:D som skrymdensitetsmetod (*C) med 150mm borrhärnor.

4.4.2 Objekt 4:2018 och 12:2018

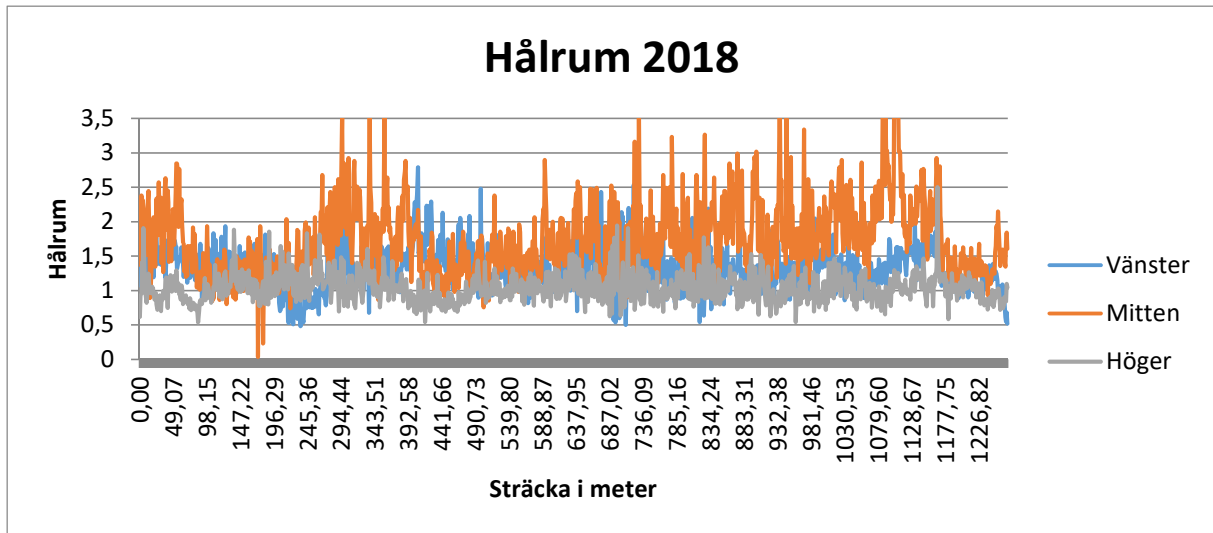
Från den data från objekt 4:2018 och objekt 12:2018 gjordes en jämförelse mellan Pave Scan RDM systemet med IDS systemet på 1,0 GHz. Vid ett av objekten sågs att Pave Scan RDM påvisade ett konstant högre värde än IDS systemet, och ett lägre värde på det andra objektet.

De borrhörnorna som togs vid mätning av objekt 12:2018 så delades de upp i en övre halva och en undre halva av totala borrhörnans höjd. Detta för att kunna studera om ett undre lager kan ha influens vid korrelationen av prover vid mätning med en lägre frekvens. När den undre halvan av proverna viktades in mer i korrelationen mellan permittivitet och hålrums för punkterna från Objekt 12:2018, får IDS RIS Hi-pave en bättre korrelation vid en 30 % viktning av den undre delen av borrhörnen än vad de system som har en högre frekvens, så som Pave Scan RDM får där endast 5 % gav en minimal förbättring. En anmärkning kring detta är att R^2 värdet hade en svag korrelation inledningsvis, vilket gör att förbättringen kan vara felvisande. Detta kan betyda att en lägre frekvens på ett GPR system har betydligt större påverkan från undre lager än vad ett system högre frekvens har. Detta kan antyda att de lägre frekvenserna inte mäter på endast utfört belägninglager vilket kan resultera i en icke-representativ mätning.

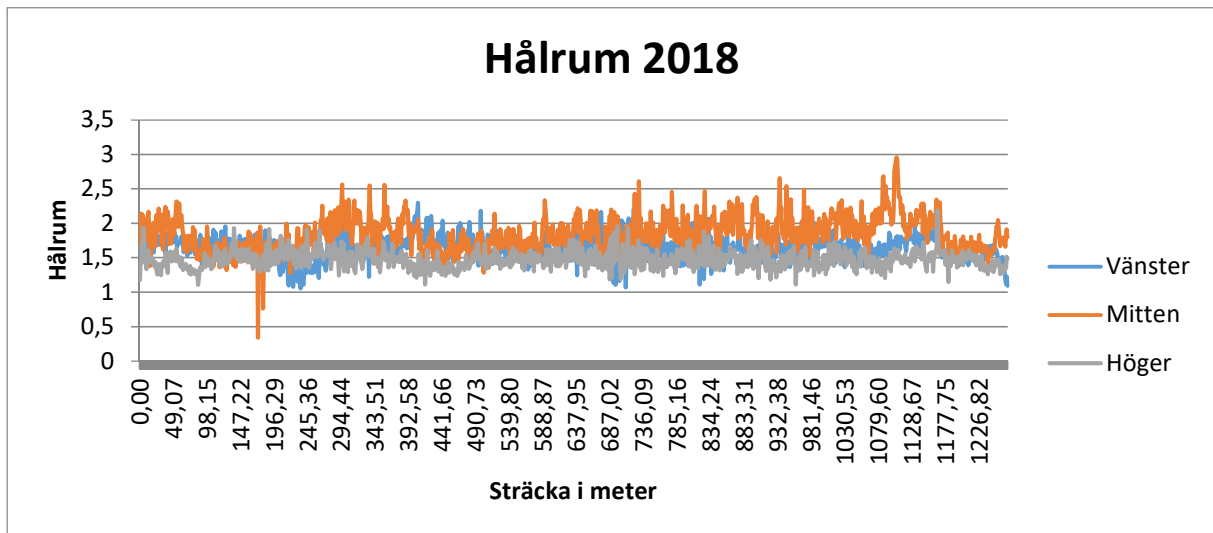
Om man vid jämförande av mätningarna från objekt 4:2017 och objekt 4:2018 gör antagandet att man kan använda samma kalibreringsdata från objekt 4:2017 (Fig. 12) då massan, och därför förhållandet hålrums halt till permittivitet är oförändrat, kan man se att efterkompaktion har haft en märkbar påverkan på hålrums halten (Fig. 13). Även med en kalibrering med samma prover som togs vid mätning av objekt 4:2018 (Fig. 14) syns en klar minskning i hålrums halten som orsakats av höjningen av belägningens permittivitet.



Figur 12 Det beräknade hålrummet från mätningen av Objekt 4:2017.



Figur 13 Det beräknade hålrummet från samma delsträcka på objekt 4:2018, beräknat efter samma kalibreringsprov som användes för objekt 4:2017.

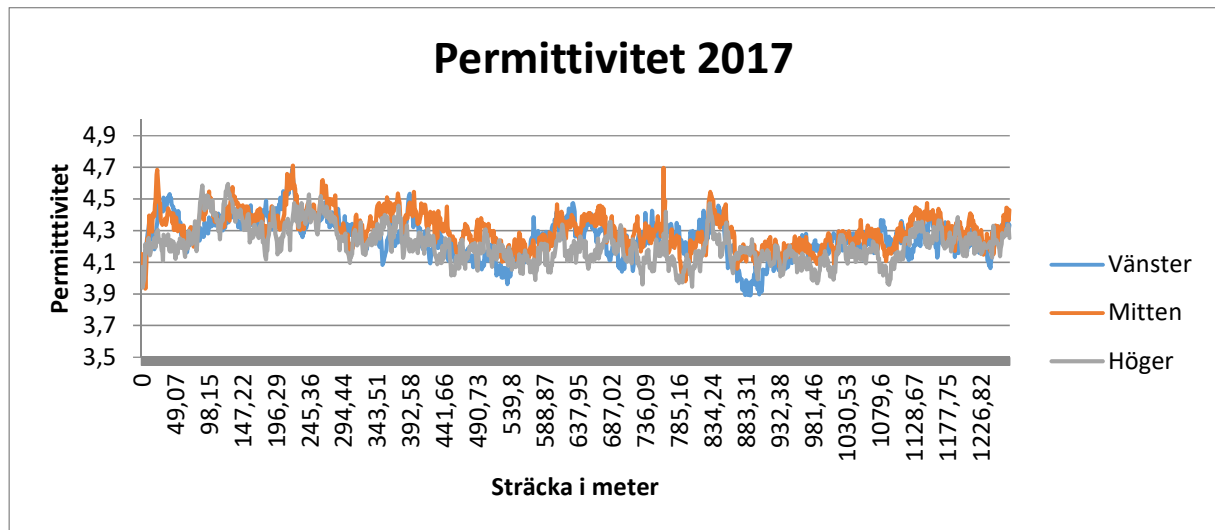


Figur 14 Det beräknade hålrummet från samma delsträcka beräknat efter nya kalibreringsprov tagna för objekt 4:2018.

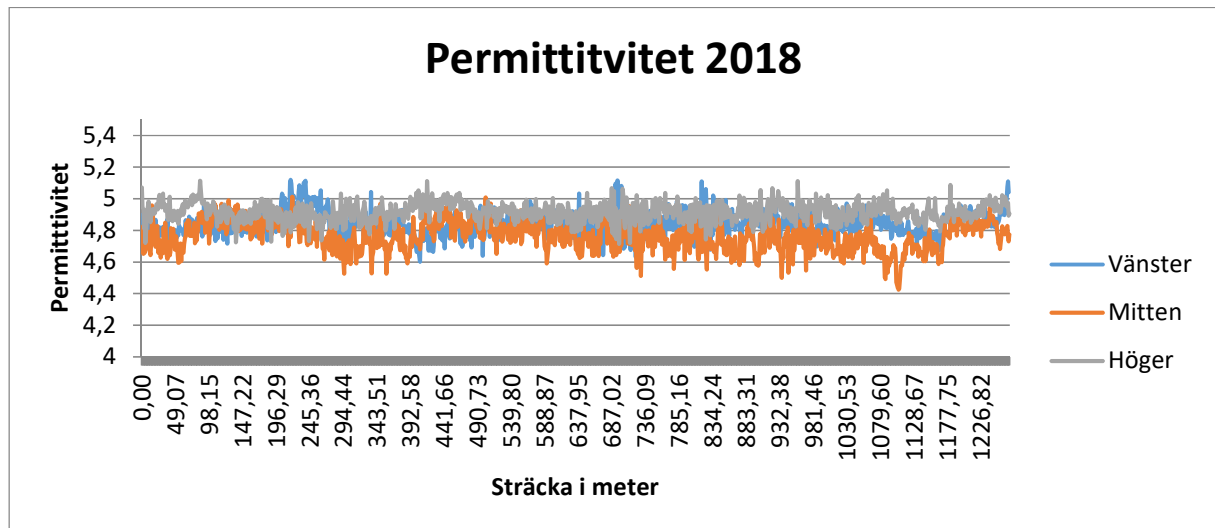
Mätningen av objekt 4:2018 påvisar en mer homogen yta sett till varje mätlinjes längd, men i tvärläng har differensen ökat, speciellt i avseende till skillnad mellan mittlinjen och de två linjerna som mättes i hjulspåren, vilket kan antyda till spår-bildning. I snitt ligger permittiviteten för centerantennen på 0,09 lägre än höger, och 0,05 lägre än vänsterantennen vid mätning av objekt 4:2017 (Tabell 3, Fig. 15). Från mätningen av objekt 4:2018 är permittiviteten för centerantennen istället 0,15 lägre än högerantennen, och 0,11 lägre än vänsterantennen Fig. 16).

Tabell 3 Visar medelvärde över hela mätsträckan med dess standardavvikelse för de olika antennerna.

År	Medel ϵ V	Medel ϵ C	Medel ϵ H	Std V	Std C	Std H
2017	4,25	4,30	4,21	0,14	0,13	0,13
2018	4,85	4,76	4,91	0,08	0,10	0,06



Figur 15 Den uppmätta permittiviteten från mätningen av objekt 4:2017.



Figur 16 Den uppmätta permittiviteten från samma delsträcka från mätningen av objekt 4:2018.

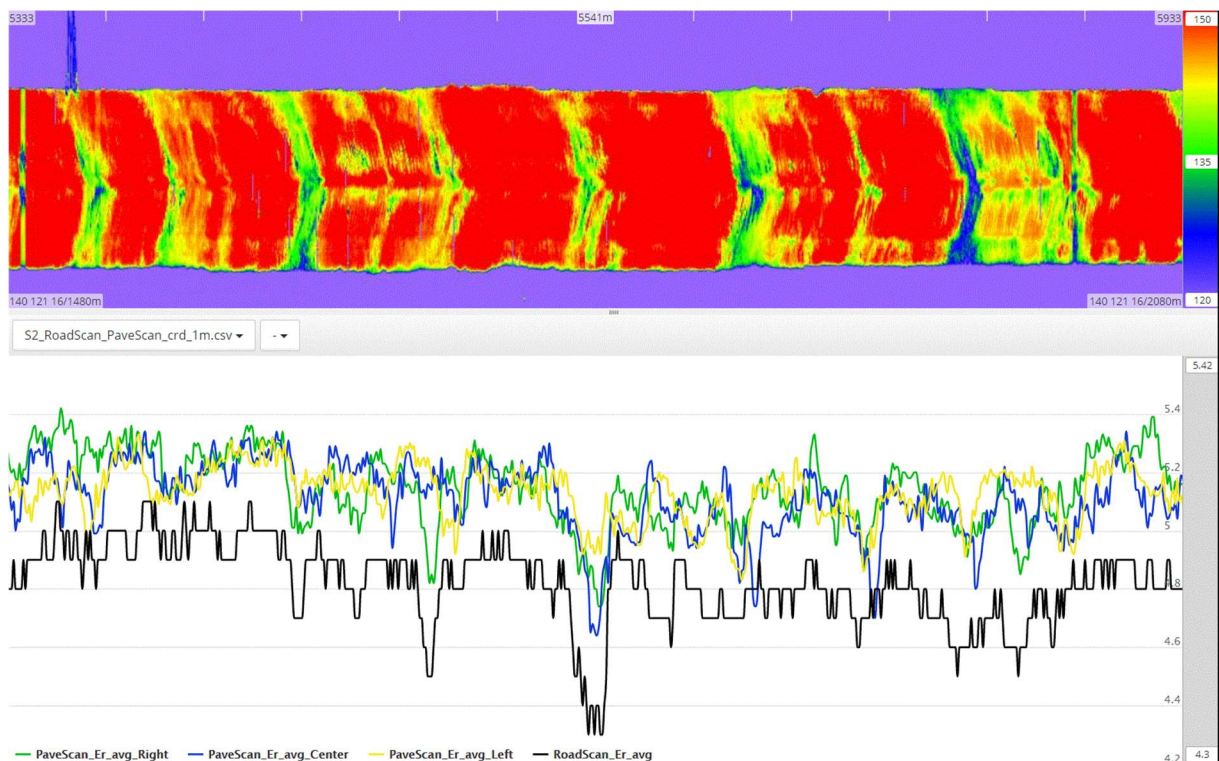
Den utförliga analysen av olika mätsystem håller på att utföras av extern part och denna rapport kommer uppdateras med en separat bilaga avseende denna studie.

4.5 Jämförelse mot värmekamera

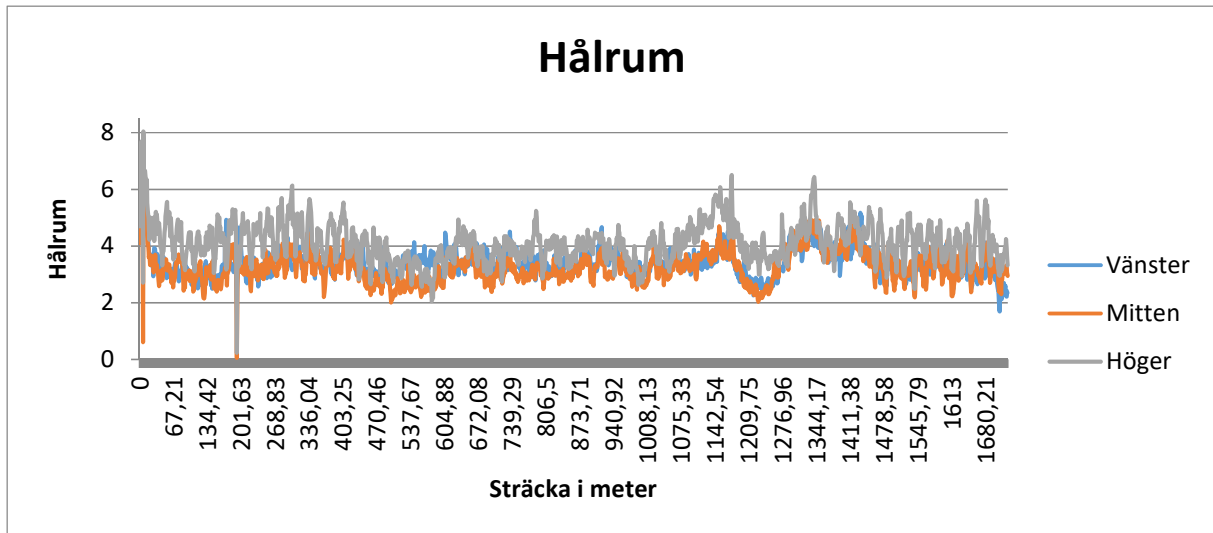
Jämförande mätningar mellan Värmekamera och Pave Scan RDM indikerar att det finns ett samband mellan hålrums halt och temperatur vid utförande. Där värmekamerasystemet indikerar låga läggningstemperaturer och längre stopp indikerar även Pave Scan RDM konsekvent lägre permittivitetsvärde. Det finns även ett samband mellan det dielektriska värdet och 1,0 GHz antennen. Däremot ger det inte lika tydliga utslag som en 2,5 GHz antenn i tvärlängd då den inte mäter flera linjer samtidigt (Fig. 17).

Pave Scan RDM-systemet indikerar även lägre permittivitetsvärde under vissa segment där läggningstemperaturen hade en acceptabel nivå. Under utförandet av beläggningen var det problematik med asfaltläggarna och längre läggningsslop behövdes, vilket följs av lägre permittivitetsvärden. Detta tror vi beror på att vältar inte har kunnat komma på de segmenten närmast läggaren medan beläggningen svalnar och därmed inte kunnat packa beläggningen ordentligt.

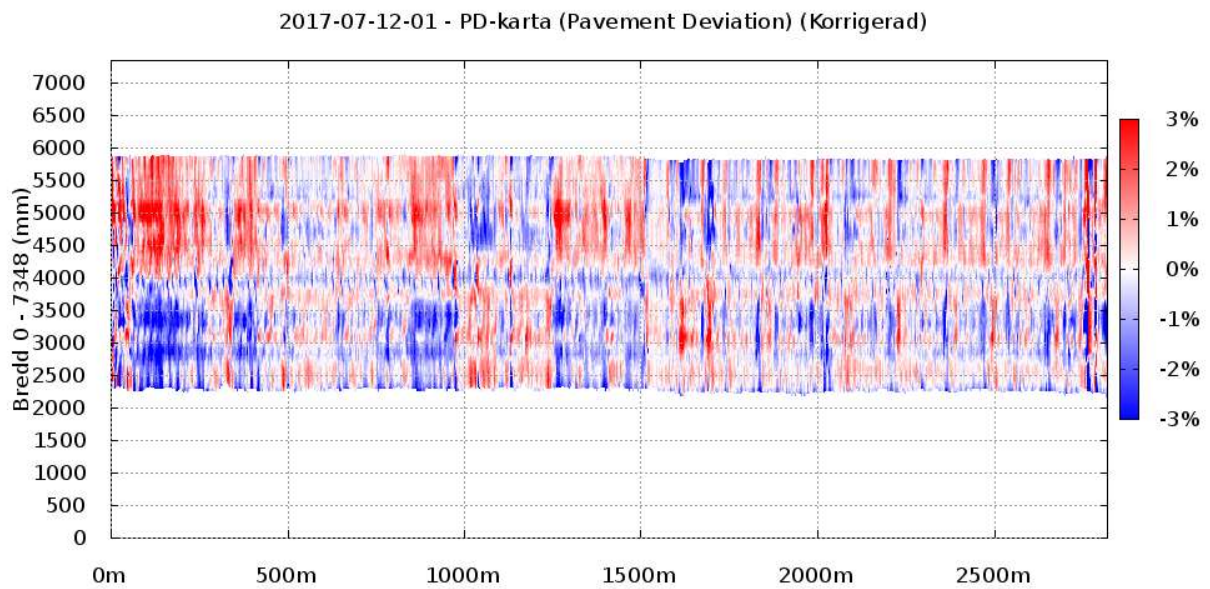
Resultat från PDI-data, Pavement Deviation Index som visar avvikelser i läggningstemperatur från medelvärdet, mätt i samband med värmekameramätningar (Fig. 18 – 20) som visar ett visst samband mellan läggningstemperatur och hålrums från georadarmätningen, där man kan se att det finns ett samband av temperatur samt hålrums i de första ~500m i höger mätlinje.



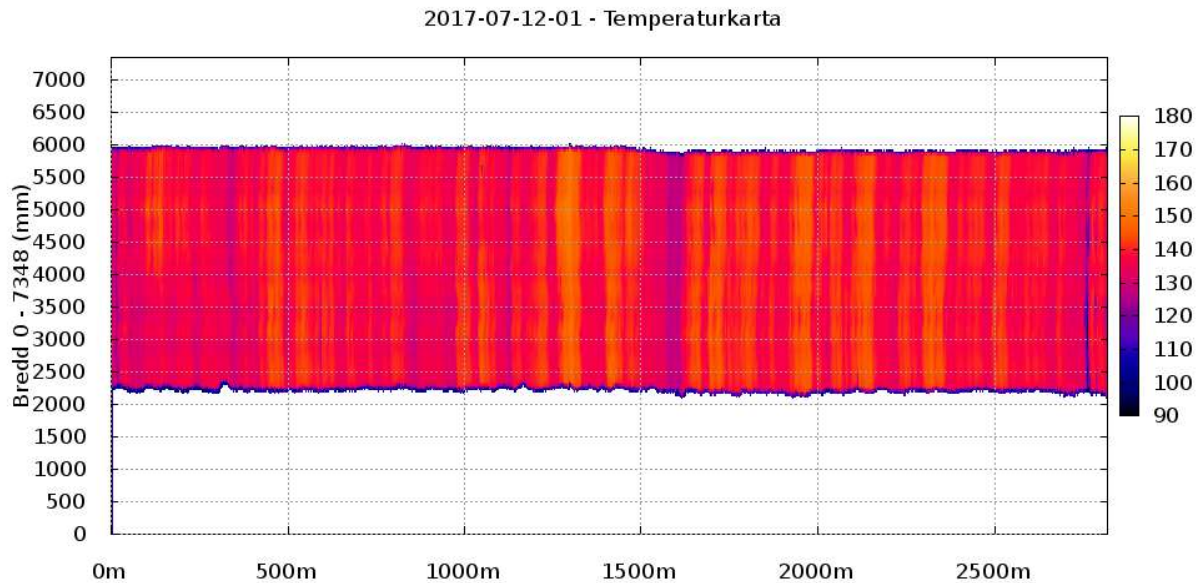
Figur 17 Data från värmekamera jämfört med Pave Scan RDM 2,5 GHz (gul, blå och grön) och en 1 GHz antenn (svart).



Figur 18 Beräknad hålrumshalt från objekt 4:2017



Figur 19 PDI-data från samma sträcka i objekt 4:2017, med samma startpunkt men med större total sträckning.



Figur 20 Temperaturmätning med värmekamera, samma sträcka om föregående två diagram.

4.6 Bedömningsmodell

Alla mätningar som gjorts under 2018 har delats upp i 100m sträckor för att enkelt få en översikt om hur resultatet varierar i både permittivitet och beräknade hålrumshalter utifrån de kalibreringsprover som samlats in.

Tankar kring hur bedömning skall göras samt extremvärden och ytor med undermåligt hålrum och, eller undermålig homogenitet har diskuterats. Ytterligare studier och försök kring hur extremvärden skall hanteras kommer att göras 2019.

4.6.1 Bedömning av hålrum

Utifrån det resultat som har erhållits från 2018 års mätningar med GPR-teknik kan vi göra bedömningen att de kriterier kring hålrum som Trafikverket (Trafikverket, 2017) har upprättat går att arbeta utifrån. Beroende på den massatypen som används för beläggningen så kan de krav vara mellan 1 % till 8 %. Men med 2019 års arbete kan de potentiella objekten användas för att justera de antal mätvärden som kan tillåtas ligga utanför dessa spann på ett objekt. Detta för att metoden skall vara i linje med hålrumshalt-provning med borrhov vid en given andel underkänd yta enligt dessa kriterier.

Korrelationen mellan permittivitet och hålrumshalt varierar mellan olika objekt då varje massa har unika egenskaper och unik permittivitet-nivå. Detta kräver en serie prover för kalibrering av utrustningen gjord på objektet, alternativt på ett annat objekt tillverkad av samma massa.

4.6.2 Bedömning av homogenitet

Vi har idag ej tillräckligt stort underlag för att utvärdera kontroll av homogenitet på utförd beläggning med GPR-teknik. Olika möjligheter behöver utvärderas.

En hypotes om hur bedömningen skall ske är att analysera delsträckor och hela uppmätt sträcka statistiskt för att kunna göra bedömningen om sträckan är homogen eller ej. Vi har idag preliminära kriterier avseende homogenitet i längdled på slitlager. Däremot behövs

ytterligare arbete kring de högst preliminära kriterierna för att kunna bedöma andra lager än slitlager.

4.7 Strykning av prover

Ett av de större problem för att praktiskt tolka den data som samlats in på beläggningsobjekt har varit de fall när ett prov har avvikit från den förväntade korrelationen mellan permittivitet och hålrumshalt. Vanligtvis är dessa prover inom vad som kan anses normal spann för både permittivitet och hålrumshalt vilket gör det orimligt att stryka provet på denna grund. Istället får en multivariat statistisk bedömningsmodell användas för eventuell strykning som tar hänsyn till ett provs avvikande värde i båda variablerna. Ett exempel på lämplig metod skulle vara att använda sig av Mahalanobis avstånd eller annan lämplig metod, för att avgöra om en datapunkt kan rimligen anses vara en del av populationen eller om den är avvikande ("Mahalanobis Distance: Simple Definition, Examples - Statistics How To", 2017).

5 Slutsatser

En homogen beläggning packad till rätt nivå visar uppföljningar och erfarenheten att man producerar en beläggning med jämn och hög kvalitet. Fortsatt utveckling och analys av GPR-tekniken behövs för att säkerställa att man producerar en beläggning som är homogen, och packad till rätt nivå.

Med det resultat som vi har erhållit från årets projekt har fler frågor kring GPR-tekniken dykt upp som behöver fokuseras på innan vi reviderar Trafikverkets nuvarande metodbeskrivning för mätning med georadarutrustning (TDOK 2014:0150, Trafikverket, 2014). Dessa frågor ämnar vi fortsätta att arbeta med under 2019.

Ett av de större målen med att införa GPR-teknik i avseende på packnings- och homogenitetskontroll är att minska den andel borrhärdar som tas upp för att säkerställa kvaliteten och homogenitet av utfört beläggningslager. Med GPR-teknik kan den andel borrhärdar som tas upp minskas, men fortfarande krävs ett visst antal borrhärdar från varje objekt då varje asfaltmassa har unika egenskaper för att kunna beräkna hålrum. Dessa prover behöver inte nödvändigtvis komma från objektet i fråga, det kan istället tas från en provyta tillverkad av samma massa. Teoretiskt kan provplattor tillverkas i laboratorium och användas för kalibrering som ett alternativ till borrning på någon lagd yta.

Eftersom vi vet att inverkan av vatten påverkar mätresultatet högst väsentligt, är vår rekommendation idag att mätning med GPR utförs om möjligt i direkt anslutning till pågående arbete. Vid mätning i efterhand, måste man säkerställa genom separat provtagning att aktuell beläggning inte innehåller fukt.

På grund av den inverkan som efterpackning av trafik bör mätningar med georadar för bedömning av asfaltskvalitet utföras innan objektet öppnas för trafik eller inom en kort tid därefter. Utförs den senare är den inte längre konsekvent gentemot övriga resultat baserade på georadar eller gällande metoder för kvalitetsbedömning.

En fråga som diskuterats under projektet har varit vilken metod för bestämning av hålrumshalten i asfaltsprovkroppar ger den bästa korrelationen. Resultaten från användning av bestämmande av skrymdensiteten med skjutmått, vattenbad och vakuumförsegling ger likartade resultat, den främsta skillnaden är den nivå av hålrumhalt som beräknas utifrån den data. För att få ett jämförbart resultat bör samma metod för beräkning som dagens provning av hålrumshalt användas.

Systemets frekvens förefaller ha en tydlig inverkan på mätresultatet. Denna skillnad uppträder som en förskjutning av permittivitetsvärdet, och vid normalisering av data sin en funktion av syns genomgående att alla fyra systemen som användes i försöket följer samma genomgående trend. Enstaka värden avviker från övriga, men det är rimligt att värdena avviker något beroende på att mätbilarna ej kan framföras med perfekt precision. Proverna visar även de på en konsekvent differens mellan systemen som motsvarar den som syns i provsträckorna. Differensen är inte konsekvent högre eller lägre mellan två system och mellan två olika beläggningar. Den tycks istället kunna variera mellan att så att på vissa massor får den ena utrustningen ett högre permittivitetsvärde och tvärtom på andra. Detta kan rimligen bero av att olika material har olika responskurvor till olika frekvenser av elektromagnetisk strålning.

Korrelationen mellan hålrumshalt på slaggasfalten var lägre än vad vi har sett i snitt, men vi har även haft objekt där vi med konventionell asfalt har fått betydligt sämre korrelation. Ofta kan en eller ett par avvikande prover slänga av en korrelation. Något som styrker behovet av en metod för statistisk strykning av extremvärden baserad på förhållanden mellan permittivitet och hålrumshalt, snarare än om det rör sig om ett extremvärde i ett avseende. Detta då ett högt hålrum, eller en högt permittivitet är relativt frekvent förekommande, men i kombination bör dessa ej existera. Även om korrelationen var något svag i detta fall, kan det inte uteslutas att metoden är lämplig för. Strykningen av det avvikande provet vilket ökade R^2 till över 0,5 stärker antagandet att metoden kan tillämpas på materialet.

För att utvärdera homogenitet är det viktigt att hela läggningsbredden mäts, om enskilt beläggningsdrag är bredare än ett körfält så krävs fler mätningar för utvärdering av homogeniteten.

De hålrumshaltkriterier som finns idag utgör en bra grund att arbeta mot med georadar, men med en kritisk skillnad. Antalet prover som är möjligt att göra med en georadar utrustning är flera storleksordningar större än vid provning med borrhning, vilket gör att ett underkännande vid ett enstaka värde skulle innebära att även ytor med mycket god kvalitet skulle sannolikt kunna underkännas. En rättvis bedömning behöver en grund i en statistisk jämförelse mellan dagens provresultat godkännande grad och ett provs sannolikhet att vara godkänt givet att metoden för slumpmässigt urval används korrekt.

Det är orimligt att beställaren skall kunna inneha kompetens för att utläsa ur rådata de värden som är nödvändiga för en utvärdering av ett objekt. För att den data som mäts in skall kunna användas som en metod för bedömning av beläggnings kvaliteten behövs det att den rådata från signalerna beräknas om till ett permittivitetsvärde. Detta behöver kompletteras med identifierande data, i form av en relativ position i en distansangivning och absolut position i form av en GPS koordinat. Meta data bör även finnas för tid och datum, objekt namn, körfält, mätriktning, bredd på drag, massatyp, lager, och eventuellt även för väderförhållanden med mera. Detta bör redovisas i en textfil, till exempel formatet .CSV.

6 Framtida arbete

Vi har påbörjat det arbete kring att sätta upp preliminära kriterier avseende homogenitet i längdled för slitlager. Däremot har vi idag inte tillräckligt med underlag för att påbörja arbete kring de preliminära kriterierna för mätning i tvärled, mätning av tjocklek eller mätningar på andra lager än slitlager. Då mätning med GPR-teknik ger en stor mängd data, är det oundvikligt att extremvärden erhålls. Därför är det viktigt att vi i framtiden vet hur dessa extremvärden skall hanteras korrekt i bedömningsmodellen.

Vi har fört samtal med Norska Statens Vegvesen och Finska Trafikledsverket och har påbörjat ett samarbete av införandet av GPR-teknik avseende packning- och homogenitetskontroll i beläggningsbranschen under 2019. Tillsammans skall vi arbeta fram ett gemensamt synsätt och gemensam metod på GPR-tekniken för de tre länderna avseende användandet av GPR-teknik som kan användas oberoende entreprenör och mätning.

För att arbeta med GPR tekniken under 2019 i skarpt läge, har Trafikverket tagit fram förslag för krav på objekt som kan utvärderas med GPR. Trafikverket har även säkerställt resurser för fortsatt arbete 2019 men det krävs även insatser från övriga aktörer i branschen för att möjliggöra ett uppdaterat regelverk runt GPR mätningar avseende packningskontroll och homogenitetskontroll i kommande kontrakt.

Dessa preliminära krav på objekt innefattar:

- Minimum yta på 30 000 m², jämntjockt beläggningslager av slitlager (ej TSK-beläggning), bindlager eller bundet bärlager. Varje utfört lager skall mätas med GPR-teknik (det går inte att mäta flera lager samtidigt).
- Om möjligt, skall objekt väljas där det ingår homogenitetsmätning med mät-bil, alternativt värmekamera.
- Hela valt beläggningsobjekt skall mätas med GPR-teknik inom 14 dagar efter färdigställande.
- Mätningarna skall ske med 3 mätlinjer, varav 1 mätlinje i både höger och vänster hjulspår samt 1 mätlinje mellan hjulspåren.
- Vid läggning av bredare läggingsdrag (bredare än 5,5m) skall hela läggingsbredden mätas med flera mätlinjer i samma riktning.
- För kalibrering mot hålrum skall 9st punktmätningar och borrhningar (150 mm Ø) per beläggningstyp, samt analys av hålrumshalt på uppborrade hålrumskärnor.
- Borrhning av varannan del-yta om 3 000 m² utgår.

Inför mätningar 2019 skall särskild arbetsberedning som tydligt anger vilka förutsättningarna skall vara på de aktuella mätobjekten.

Utöver piloterna som skall utföras under säsongen 2019 så ämnar vi även att ta fram en statistiskt korrekt metod för att stärka vår strykning av avvikande punkter i korrelationen.

Vi behöver även jämföra två GPR-system av samma modell med samma antenn för att säkerställa att instrumenten mäter på samma dielektriska nivå och erhåller samma resultat.

I fortsatt arbete ingår att ta fram ett fastställt förfarande för att säkerställa att använd utrustning inte har någon direkt spridning (drift) av mätsignalen över tid, samt enbart mäter på det översta lagret utan influens från underliggande material. Block med konstant permittivitet behövs för att kontrollera detta.

Då inget direkt hinder förekommer för fordonsmontering är det om önskvärt genomförbart. Värt att beakta vid montering av bil är att precisionen som kan fås vid gång inte är lika enkelt uppnådd, speciellt om fordonet framförs i en hastighet högre än vad som systemet klarar av. En specialanpassad bil med monteringsplats för antennerna fram, och med en kompatibel distansgivare kopplat till ett av hjulen, och korrekt kalibrerat skulle vara nödvändigt för att använda systemet på ett fordon.

7 Referenser

Daniels, D. (2009) Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Amsterdam. Elsevier Science. Hämtad från

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444533487000041> 2018-12-21.

Gardner, E., & Nilson, M. (2017). *Möjligheter med Georadarteknik (GPR) för kvalitetssäkring av packningsarbeten vid beläggning och anläggningsarbete*. Chalmers Tekniska Högskola. Hämtad från

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/252718/252718.pdf>

Mahalanobis Distance: Simple Definition, Examples - Statistics How To. (2017). Hämtad från <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/mahalanobis-distance/> 2018-12-21.

Trafikverket. (2014). *Utförandekontroll med georadar (TDOK 2014:0150)*. Hämtad från <https://trafikverket.ineko.se/se/tv12221> 2019-01-07.

Trafikverket. (2017). *Bitumenbunda lager (TDOK 2013:0529)*. Hämtad från <https://trafikverket.ineko.se/se/trvkb-10-bitumenbundna-lager> 2019-01-31.

Trafikverket. (2018). *Förstudie utvärdering av utrustning för heltäckande packningskontroll och homogenitet vid utförandet av asfaltbeläggningar*. Hämtad från https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/44140/Ineko.Product.RelatedFiles/2018_092_forstudie_utvardering_av_utrustning_for_heltackande_packningskontroll_och_homogenitet_vid_utforandet_av_asfaltbelagningar.pdf

World Health Organization (2017). Electromagnetic fields and public health: radars and human health. Hämtad från <http://www.who.int/pehemf/publications/facts/fs226/en/> 2018-12-21.

8 Bilagor

Bilaga 1: Sammanställning av mätdata

Bilaga 2: Sammanställning av jämförelse av georadarsystem