

Ett **SBUF**-projekt

Datum
2020-05-15

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: 13703

MÄTNING MED ANPASSAD GEORADARTEKNIK FÖR KONTROLL AV PACKNING OCH HOMOGENITET VID UTFÖRANDET AV ASFALTBELÄGGNINGAR DEL 2



Mätning med anpassad georadarteknik för kontroll av packning och homogenitet vid utförandet av asfaltbeläggningar Del 2

SBUF-projekt 13703

Measurements using specialized ground penetrating radar technology for the evaluation of asphalt pavements part 2

Eric Gardner

Gustav Tennby

SBUF Rapport 13513

Skanska Sverige AB

Teknik - Vägtekniskt centrum (VTC)

PL 6185

424 57 Gunnilse

Innehåll

Förord	1
1 Sammanfattning	3
1.1 Bakgrund	3
1.2 Syfte.....	4
1.3 Mål.....	4
2 Metod	4
2.1 Praktisk kunskap.....	4
2.2 Utrustningsjämförelse	5
2.3 Omvärldsbevakning.....	6
2.4 Underlag för upphandling	6
3 Resultat	6
3.1 Utrustningsjämförelse	6
3.2 Alternativ kalibreringsmetod	16
3.3 Jämförelse av två kalibreringar	17
3.4 Upphandlingsunderlag	17
3.5 Mätmetod.....	19
4 Slutsats	19
5 Fortsattarbete	21
6 Källor	22
7 Bilagor	22

Förord

Detta projekt har genomförts i samarbete mellan Trafikverket, Swedavia AB, Skanska Sverige AB, PEAB asfalt AB, NCC Industry AB och SVEVIA AB.

Inom ramen för detta projekt har även ett aktivt samarbete med utbyte av information och kunskap med Finska Trafikledsverket (Väylävirasto) och Norska Statens Vegvesen. Statens Vegvesen ställde dessutom upp och deltog i delmomentet 2018 där vi jämförde olika georadarsystem mot varandra.

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 – Skanska Sverige AB

Eric Gardner – Projektledare SBUF-projekt Skanska Sverige 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

Torsten Nordgren – Trafikverket

Gustav Tennby - Trafikverket

Eric Gardner & Gustav Tennby, 2019-05-15

Skanska Sverige AB, Teknik - Vägtekniskt centrum

1 Sammanfattning

Projektet bygger på en vidareutveckling utav SBUF-projekt 13153 - Georadarmätning av asfaltbelägningars egenskaper där mycket praktisk kunskap inskaffades kring hur georadar fungerar, och visades vara ett potentiellt användbart verktyg för att utvärdera asfaltsbelägningar. Det om sänkades, och var det huvudsakliga målet med detta projekt var att ta fram ett underlag som skulle definiera hur utrustningen skulle användas praktiskt, och hur resultatet skulle bedömas.

Identifierande av felkällor blev delvis avklarat, där främst vatten var det största problemet att hantera då ingen säker metod kunde hittas för att säkerställa vatten som inte var beroende av att materialets parametrar redan var kända i förväg.

Jämförelse mellan utrustningar visar på resultat som stämmer överens med teorin, att inom det spannet av variation av frekvens som förekommer inom utrustning för mätning på asfaltsytor så är värdeförändringen orsakad av frekvensskillnaden försumbar. Den skillnad som syns i praktiken på belägningar bör alltså vara primärt orsakade utav hur det enskilda systemet tolkar signalen.

Utvärderingen av den alternativa metoden för att kalibrera hålrums halt utifrån gyrokompakterade pucker visade ett dåligt resultat där något konsekvent samband mellan fältvärden och labbvärden kunde ses. Metoden är under utveckling och skulle eventuellt kunna bli ett verktyg i framtiden, men är inte lämplig att använda i dagsläget.

Projektet har lyckats med sitt huvudsakliga mål att skapa ett underlag som kan användas för praktiskanvändning av tekniken i ett kontraktssammanhang. Justeringar kan komma att behövas göra i framtiden utifrån de andra förutsättningar som kommer att komma att upptäckas under de annorlunda förhållanden som råder under praktiskt användande jämfört mot ett utvecklingsprojekt.

1.1 Bakgrund

Baserat på det utkast till slutrapport av projektet 2018 behövs ett fortsatt arbete för att utveckla och implementera Georadar-tekniken i framtida beläggningsarbeten.

Även om vi idag har lagt ner mycket resurser och arbete med att utreda potentialen av GPR-teknik för packnings- och homogenitetskontroll av asfaltsbelägningar, så har vi idag inte tillräckligt med underlag för att sätta upp kriterier avseende homogenitet (variation i såväl längd- som tvärlängd). Beträffande hålrumsgränser som idag finns i regelverket är vår bedömning att de i princip fungerar med ny teknik, men fortsatt arbete behövs för att kunna använda ny teknik för ekonomisk reglering. Baserat på att vi går ifrån punktprovning till mer heltäckande provning.

För att arbeta med georadar-tekniken under 2020 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 georadarmätningar avseende packningskontroll och homogenitetskontroll i kommande kontrakt.

Vi har fört samtal med Norska Statens Vägvesen och Finska Trafikledsverket och har påbörjat ett samarbete av införandet av GPR-teknik för packning- och homogenitetskontroll i beläggningsbranschen under 2019. Tillsammans ska vi arbeta fram ett gemensamt synsätt och gemensam metod för de tre länderna avseende användandet av GPR-teknik.

1.2 Syfte

Syftet med studien under 2019 har varit att jämföra flera utrustningar, både från samma leverantör och en andra leverantör för att undersöka precisionen i utrustningar.

Fortsatt med mätningar för att bygga mer intresse från branschen och säkerställa att georadartekniken är praktiskt funktionell och försvarbar ekonomiskt. Även för att samla in data så att gränsvärden kan börja ställas upp för kravkriterier vid georadarmätning.

Fortsatt bearbetning med hur georadar ska implementeras vid upphandling av kontrakt för beläggning.

Fortsätta arbeta gemensamt med nordiska trafikmyndigheter för att gemensamt ta fram ett synsätt som kan användas i Norden för förbättrad kvalitetskontroll. Se över metod för en ny metodbeskrivning kring användandet av georadar för homogenitetskontroll.

1.3 Mål

Att till beläggningssäsongen 2020 ha en uppdaterad metodbeskrivning med preliminära kravkriterier avseende packning och homogenitet, till en nivå som kan anses rättvisande. Trafikverket önskar kunna upphandla ett begränsat antal beläggningsobjekt som utvärderas enbart med anpassad georadar-teknik för packning- och homogenitetskontroll, vilket gör att en kunskap om tekniken är nödvändig hos entreprenörerna om man ska kunna delta i upphandling av kontrakten med rimliga förutsättningar gällande anbud och utförande av mätningar.

Att noggrant ha undersökt georadar-tekniken som potentiell metod avseende packning och om den kan praktiskt användas i produktion på ett ekonomiskt försvarbart sätt.

Undersöka inverkan av felkällor och mätdjup.

Undersöka repeterbarheten på mätningar mellan två eller fler Georadarsystem av samma modell.

Anordna ett seminarium för entreprenörer och beställare samt övriga intressenter om GPR-teknik inför beläggningssäsong 2019.

2 Metod

2.1 Praktisk kunskap

En Georadar av modell PaveScan RDM (PaveScan) hyrdes in under fyra månader, med vilket deltagande företag fick en månad var att provköra och utvärdera utrustningen samt för spridande av praktiskt och teoretisk kunskap. Dessa fick välja ut lämpliga objekt och utföra mätningar med utrustningen på egen hand.

2.2 Utrustningsjämförelse

En Georadar prototyp kallad Pavement Density Profiler (PDP) som är under utveckling av det Kanadensiska företaget Sensors and Software lånades in under säsongen 2019 i utbyte mot att tillverkaren fick ta del av mätdata. Ett antal mätningar utfördes under säsongen från juli till och med november för att jämföra på flera olika massatyper med jämförelse mot en georadar av typ PaveScan RDM. Mätresultatet jämfördes även mot hålrumshalten på borrhov.

Provning utfördes på ordinarie beläggningar. Vid beläggningsarbeten på en landingsbana jämfördes även tre olika PaveScan RDM system tillsammans med PDP på två fräslådor, en AG för bärlagret, och en ABB för bindlagret. På de båda lådorna markerades linjer med bestämda start och stoppunkter, dessa kördes sedan över av alla fyra system med kontinuerliga mätningar. I varje låda valdes dessutom nio stycken punkter ut för stationär provning. Dessa punkter markerades, varefter varje system utförde två stationära mätningar på varje punkt i en minut styck.

Båda utrustningarna (Pave scan RDM och PDP) togs även till en testbana, som tillhandahålls av Destia Oy i Finland, för referensmätning av olika georadarmätningar. Testbanan består av sex stycken plattor av material av känd permittivitet. Av dessa sex stycken var två av HDPE plast, två av basalt, och två av granit. Tjockleken på dessa plattor var 50mm och 150mm. Utrustningarna placerades centralt på varje platta, och en statisk mätning utfördes i en minut, detta upprepades tre gånger per platta och per utrustning.

Den systemjämförelse som utfördes 2018 gjorde med fyra olika mätsystem. Dessa var en SIR-20 på 1 GHz, en SIR-30 på 2 GHz, en IDS HI-PAVE på 1 GHz, samt en Pavescan RDM på 2,5 GHz. Två objekt valdes för jämförelsen, en som varit trafikerad i ett år, och den andra var ett investeringsobjekt med helt ny beläggning som inte hade öppnats för trafik. På varje objekt valdes 9 platser för jämförande mätning mellan systemen. Dessa markerades ut, därefter centerades varje system över punkterna och utförde en statisk mätning på punkten i en minut. Efter mätningarna var slutförda borrades dessa upp och togs med till labb för bestämning av kompaktdensitet och skrymdensitet med skjutmått, vatten och försegling. En rullande mätning utfördes även på varje objekt, där varje system kördes på en sträcka med bestämd start och slutpunkt, och antennerna ställdes in för att ligga i samma spår.

För provning av kalibrering från prover i labb användes en ny utrustning utvecklad av GSSI specifikt för ändamålet där två block av acetalplast användes med dimensionerna 3,85x15,5x15,5 cm. Samt en 2 mm tjock stålplåt med samma dimensioner. Enligt tillverkaren skall mjukvaran kompensera för skillnaden i egenskaper mellan luft och plasten, hur den gör det är inte känt för oss men kan antas baseras på systemkalibreringen under uppstart. Efter start samlas referensvärden in liksom vid ordinarie kalibrering, där två plastblock staplade på antennen motsvarar luft, och ett block med plåten på motsvarar plåten. Därefter placeras en kärna åt gången centrerat på antennen med ett av plastblocken liggandes mellan för att mäta ytreflekationen. En andra mätning görs därefter i samma konfiguration med tillägget att plåten placeras på kärnan, och värdet på permittiviteten beräknas utifrån tiden från utskickad signal till reflektionen mottags. Dessa metoder refereras till som ytrefleksions- respektive bulkmetoden härfter. Dessa metoder har provats på både serier av borrhov som har tagits i fält där mätvärde labb mot fält jämförs, men även på provkroppar som har tillverkats genom gyrokompaktering.

2.3 Omvärldsbevakning

I projektets gång har en del varit att omvärldsbevaka vad som tas fram och utvecklas vid användning av GPR för mätning på asfalt. Federal Highway Administration har tagit fram en metodbeskrivning, AASHTO PP 98-19, som går att beställa, som föreskriver antennverifikation och mätförande som har varit grundande material till viss del för den tekniska rapport som Trafikverket har tagit fram (Trafikverket, 2019).

Som del i projektet för 2019 var att jämföra olika utrustningar som mäter och visar dielektricitet direkt och jämföra mellan varandra. Det finns upp till fem leverantörer av denna typ av GPR på marknaden som kan användas för GPR mätning för att utvärdera egenskaperna av asfalt.

Under en workshop på TRB 2020 presenterades flera nya uppgraderingar till de GPR system som finns på marknaden allt eftersom vad kritiken har önskat. Även flera tankar kring vad känsliga faktorer är vid GPR mätning och hur man kan tackla fuktproblemet som präglat GPR mätning som kommer att fortsätta arbetas med under kommande år (Federal Highway Administration, 2020).

2.4 Underlag för upphandling

Ett preliminärt upphandlingsunderlag togs fram under hösten 2019 av Trafikverket för upphandling av belägningsarbeten där konventionell borrning skulle bytas ut mot georadarmätningar istället. Denna tog projektets styrgrupp del av och lämnade feedback i två omgångar för att hjälpa till att skapa samsyn mellan Trafikverket och entreprenörer på hur mätningarna ska bedömas med tanke på den eventuella övergången från stickprovning till heltäckande provning. Ett beräkningsverktyg skrevs i Visual Basic för att beräkna mängden avvikande mätvärden i ett set med mätdata, samt för att beräkna summan av dessa, den största avvikande ytan, samt för att visualisera detta.

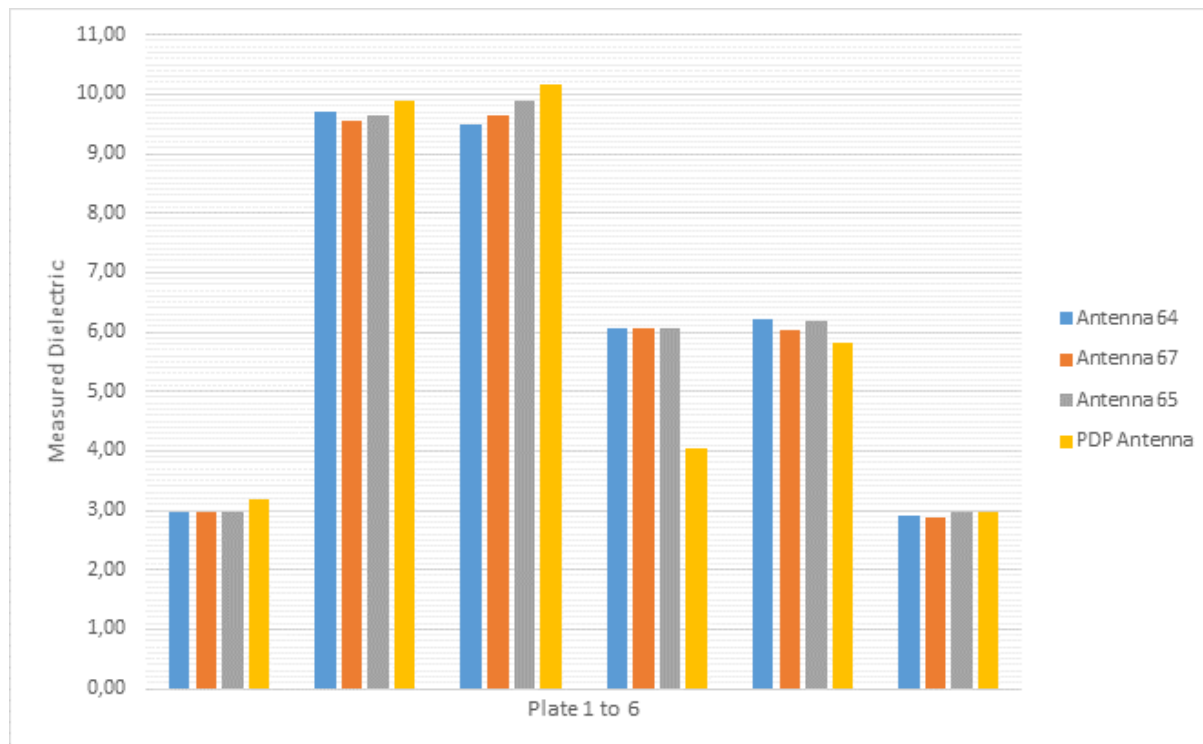
3 Resultat

3.1 Utrustningsjämförelse

Provningsen på landningsbanan visade på en systematisk förskjutning i mätvärde mellan systemen över en hel yta, men vid jämförelse mellan de två olika ytornas mätresultat syns att differensen i mätvärde inte är konsekvent mellan systemen på olika material. Detta syns på både linjemätningar, samt på de punktmätningar som utfördes.

Vid jämförelse mellan PDP och PaveScan på den Finska georadartestbanan visade fem av de sex plattorna på ett närmast identiskt mätvärde mellan systemen. Den fjärde var en av de två granitskivorna, vilket påvisade märkbar skillnad i resultatet mellan systemen, där PDP systemet avvek kraftigt från det förväntade värdet. Denna platta var för materialet relativt tunn, endast 50mm i tjocklek, och det förefaller att PDP systemets mätvärde stördes av reflektionen vid lagerövergången från graniten till det underliggande gruslagret. Dessa resultat visar på en annan bild av inverkan på mätresultatet beroende på antennen och signalfrekvens än tidigare visat i fältmätningarna, där syntes istället en relativt jämn förskjutning av mätvärdet konstant över hela den uppmätta ytan. Resultaten från den Finska testbanan tyder då på att denna skillnad kan vara orsakad av att systemet felaktigt tolkar signalen och på så sätt får inverkan i mätresultatet av underliggande material. Ser man till resultatet som Jaseleskis och Han (Jaseleskis & Han, 1999) kom fram till när de provade förändring i permittivitet som en funktion av förändring i frekvens så borde inverkan av förändring av frekvens vara försumbar inom det spannet som är frågan om i detta fall.

Resultatet för samtliga antenner och PDP låg inom de gränsvärden som Destia Oy satt upp för avvikelse från det kända värdet för att ett system skall vara godkänt för användning i Finland enligt deras tekniska krav. Undantaget var platta 4 där PDP systemet inte klarade kravet.

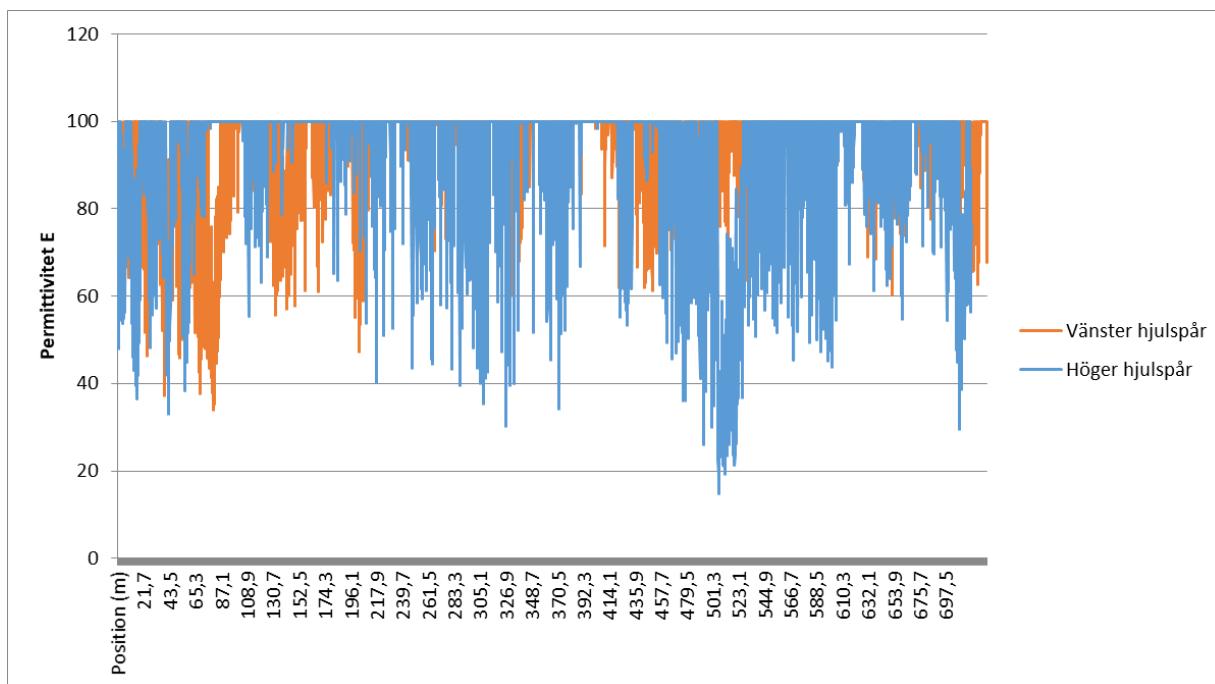


Figur 1 Jämförelse mellan PDP och 3 stycken Pavescan antenner på sex stycken plattor med känt värde

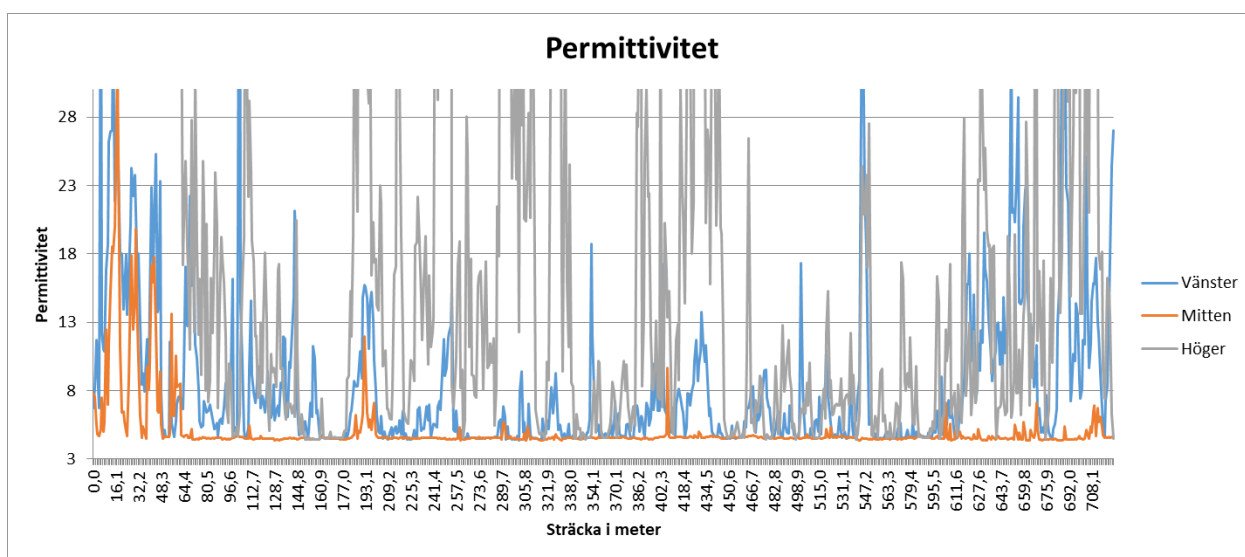
PDP systemet utvecklades aktivt under projektets gång, och mjukvaran uppdaterades flera gånger för att lägga till nya eller förbättra existerande funktioner. Dessvärre skedde ett fel med en av mjukvaruuppdateringarna av PDP systemet vilket ledde till att det fick returneras till Kanada för reparation av tillverkaren, varvid mycket tid försvann, och systemet kunde inte prövas till den grad som hade önskats.

För jämförelse mellan tre system av samma modell kan systematiska skillnader identifieras mellan olika system en dag, men denna tycks inte vara konsekvent mellan tillfällena.

Vid mätning på bindlager som lades med kolfiberarmering blev signalen från PDP tydligt influerad av kolfiberarmeringen och inget aktuellt permittivitetsvärde kunde utläsas. Likaså var det problem med att utläsa permittivitetsvärde utifrån Pavescan på samma lager, som var känt sen innan. Skillnaden mellan PDP och Pavescan var att PDP hade mycket större influens av kolfiberarmering än vad Pavescan hade (Figur 2). Även när slitlagret lades ovanpå bindlagret på samma objekt var det bitvis inverkan från kolfiberarmeringen på PDP signalen som gör det svårt att utläsa permittivitetsvärde från de sträckor som påverkades (Figur 3). Detta skedde inte med Pavescan och permittiviteten kunde utläsas utan någon störning från underliggande armering.

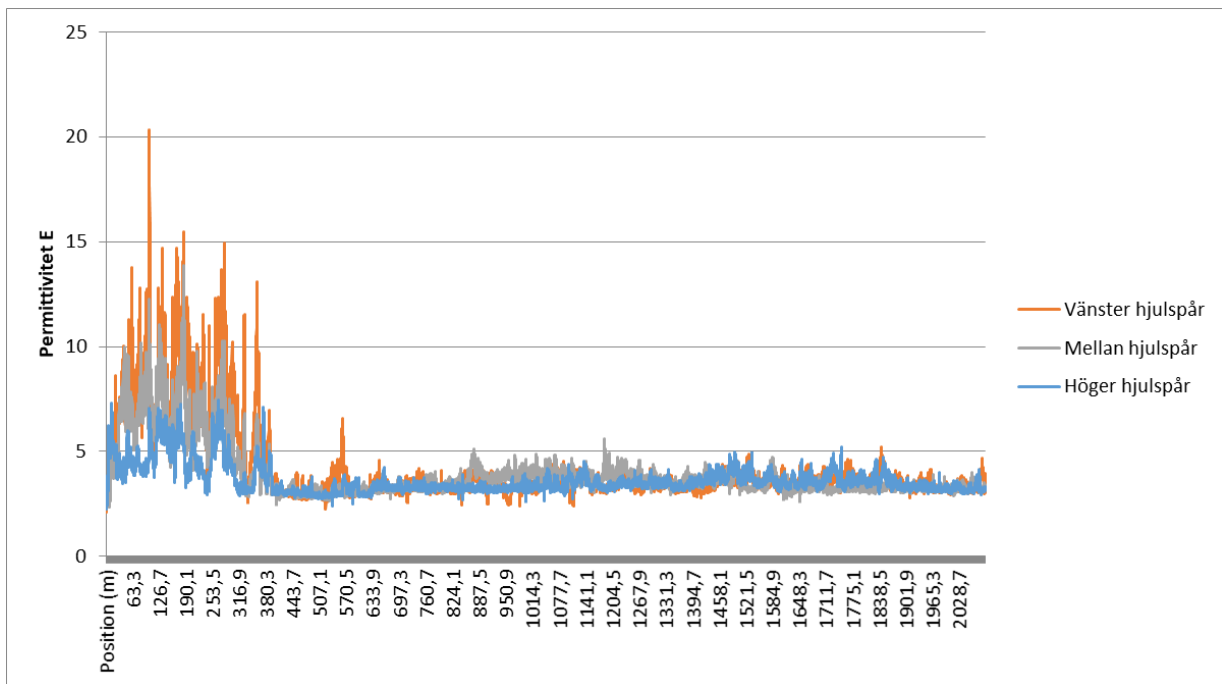


Figur 2 Mätsträcka med PDP på Abb lager som tydligt påverkas av kolfiberarmering.

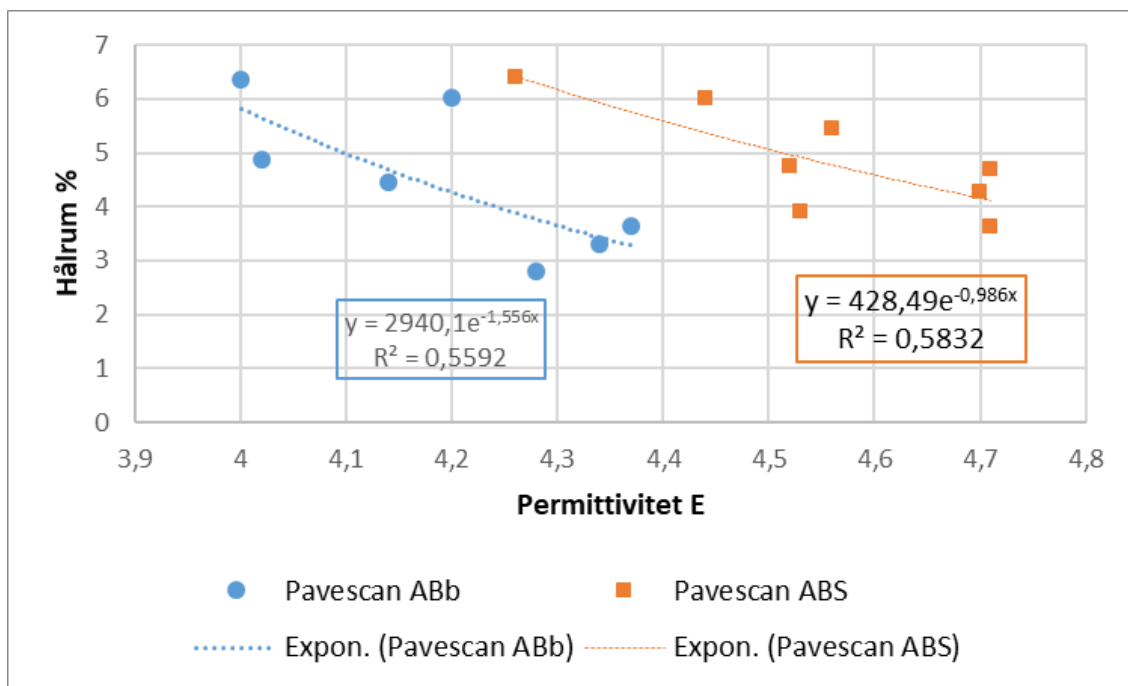


Figur 3 Mätsträcka med Pavescan på Abb lager som också påverkas av kolfiberarmering men inte lika mycket.

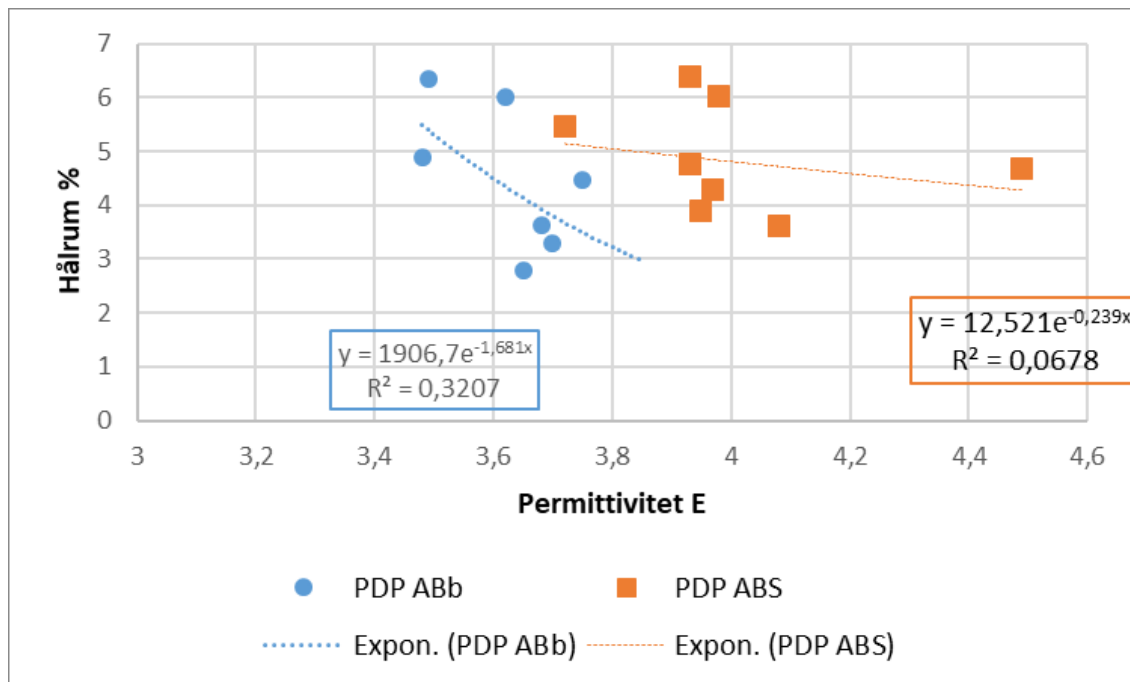
PDP testades även att kalibrera permittivitet mot hålrum med det mätförfarande som har använts och beskrivits i SBUF-projektet 2018 (Gardner & Tennby, 2019) vid två tillfällen på olika asfaltmassor, en Abb och en ABS massa. Resultatet från denna kalibrering av permittivitet mot hålrum var att det inte finns en korrelation eller var en väldigt svag korrelation med mätvärdet från PDP med ett R^2 på 0,3207 respektive 0,0678. Dessutom var inte korrelationen av permittivitet mot hålrum tydlig med Pavescan heller, men korrelationen var bättre med ett R^2 på 0,559 respektive 0,583 (Figur 5 & 6).



Figur 4 Mätsträcka med PDP på ABS där delvis påverkan av kolfiberarmering som ligger under ABb finns.

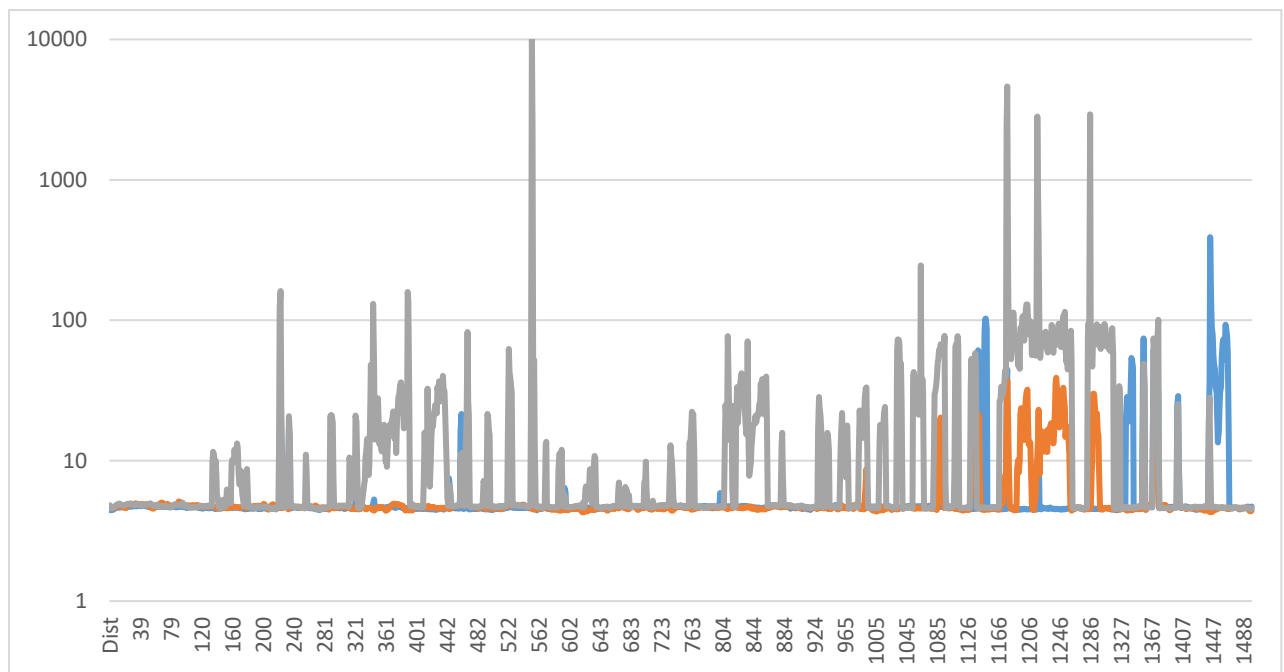


Figur 5 Korrelation av hårlum mot permittivitet med Pavescan RDM

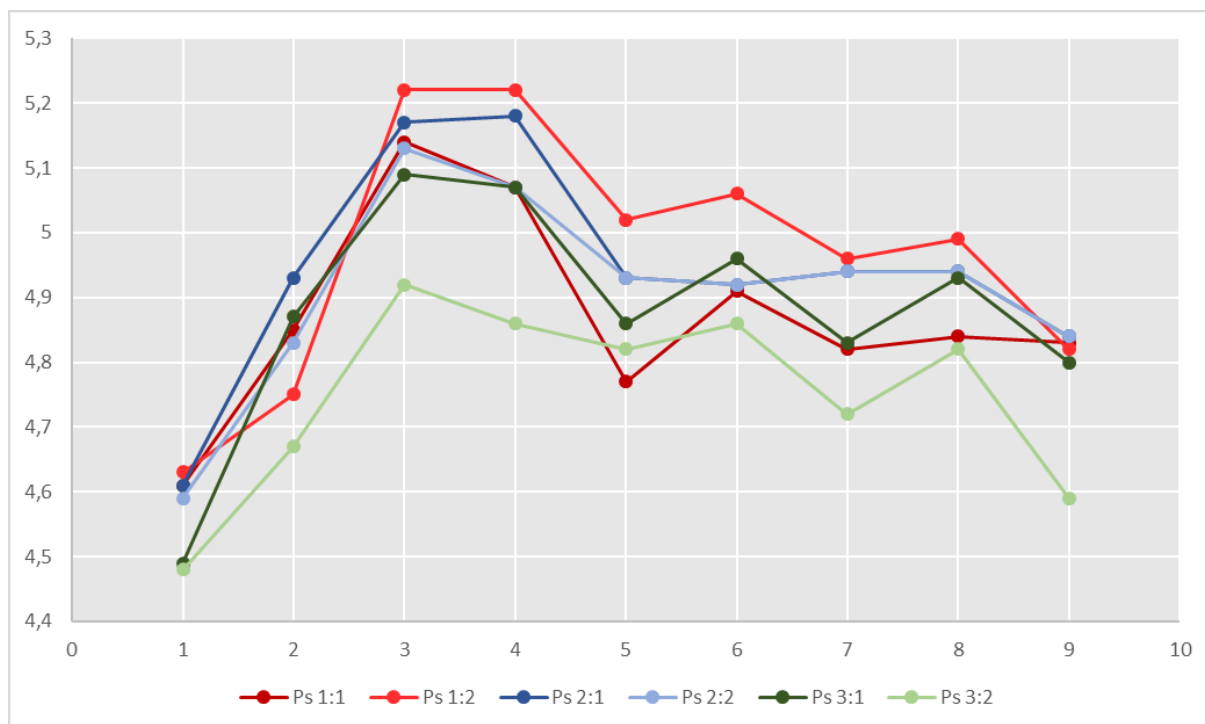


Figur 6 Korrelation av hålrum mot permittivitet med PDP som jämförs mot figur 2.

Fler objekt har mätts med kolfiberarmering. Nedan exempel är från en landningsbana där kolfiberarmering användes i mindre lokala partier under det nya slitlagret, i syfte att förstärka de partier där det fanns sprickor i den äldre underliggande beläggningen. På de områden där det fanns kolfiber syntes ett mycket tydligt utslag på mätvärdet, med de högsta uppmätta värdena på över 10 000.

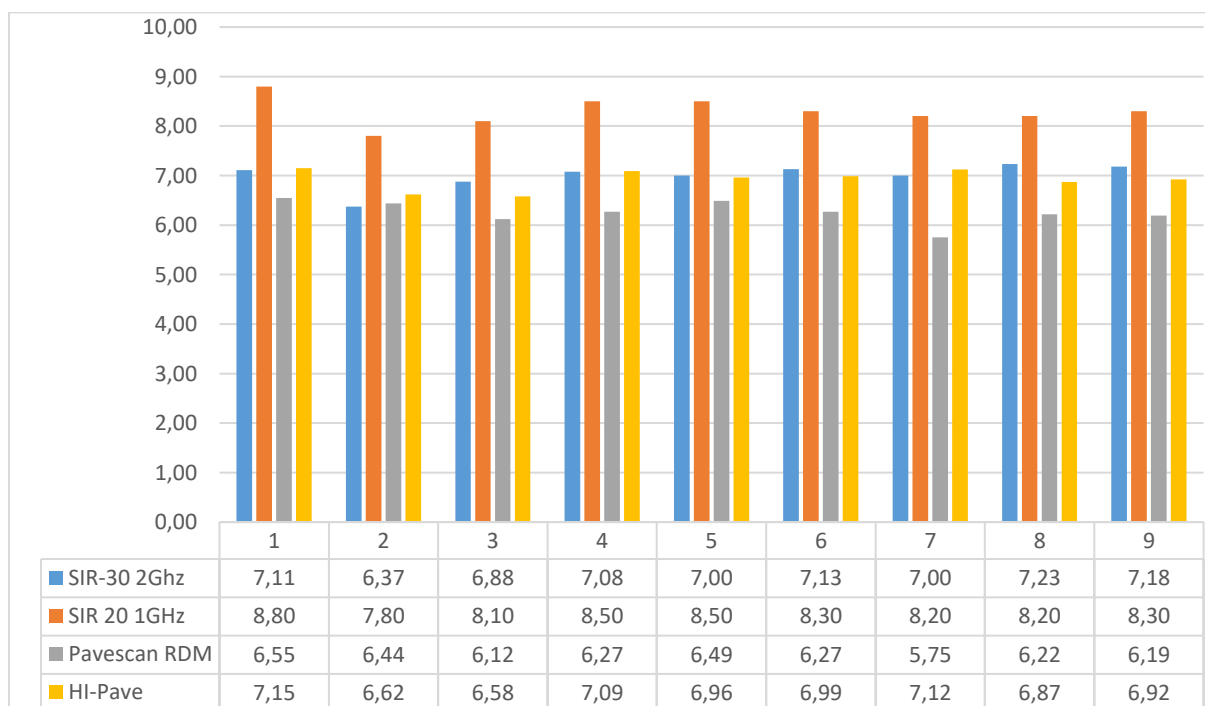


Figur 7 Permittivitet från sträcka som är delvis kolfiberarmerad med Pavescan RDM

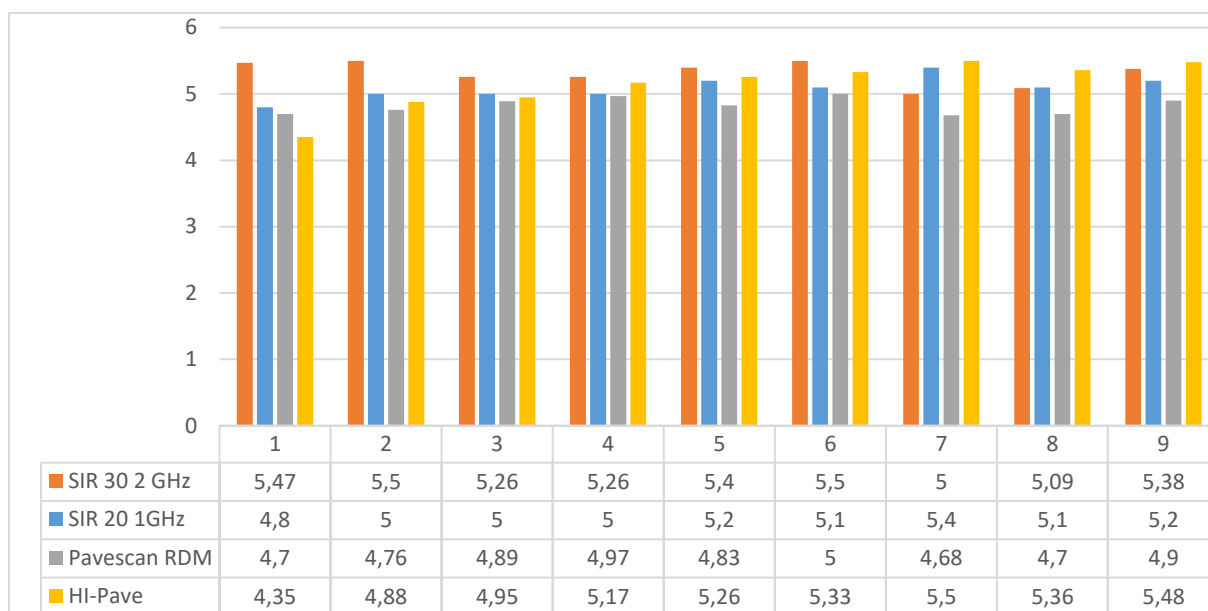


Figur 8 Mätningar på 9 stycken punkter med tre olika system, två serier för varje system utförda på två olika dagar.

Utifrån de mätningar som utfördes med 3 olika Pavescan RDM uppmättes följande resultat. Mellan två mätningar på samma punkt, samma dag med samma utrustning ser vi en maximal skillnad mellan två upprepade mätningar på samma punkt på 0,11, minsta på 0,00, medel 0,016 och standardavvikelse på 0,02. Sett över två dagar blir denna istället 0,027, 0,00, 0,09 respektive 0,08. Vid jämförelse mellan alla 3 system, och då även 3 olika operatörer vilket kan påverka hur systemet positioneras över punkten då syns en större variation på maximalt delta på 0,11, minsta på 0,01, medel på 0,02 och standardavvikelse på 0,02.



Figur 9 Mätningar på 9 punkter, objekt 3.



Figur 10 Mätningar på 9 punkter, 4

Genomgående nivåskillnader syns mellan de olika systemen på de olika belägningarna, men samma nivåförskjutningar syns inte när de två objekten jämförs. Samma trend visas också på de sträckor som mätts upp. Mellan de individuella mätningarna syns däremot ingen klar korrelation, eller mellan mätningar och med hållrumshalt eller densitet.

Märkning	tjocklek	Vatten skrym	Hållrum %	Corelok skrym	Hållrum %	Skjutmått skrym	Hållrum %	Kompakt
E1	65	2,641	1,9	2,630	2,3	2,584	4,0	2,691
E2	76	2,515	7,5	2,463	9,4	2,425	10,8	2,720
E3	75	2,563	4,7	2,520	6,3	2,486	7,5	2,689
E4	69	2,627	1,6	2,609	2,2	2,591	2,9	2,669
E5	68	2,587	4,5	2,548	6,0	2,522	6,9	2,710
E6	68	2,611	2,5	2,581	3,6	2,559	4,4	2,678
E7	69	2,511	7,8	2,506	7,9	2,471	9,2	2,722
E8	59	2,596	3,3	2,578	3,9	2,540	5,4	2,684
E9	65	2,609	3,1	2,585	4,0	2,554	5,2	2,693

Figur 11 Borrprover objekt 3

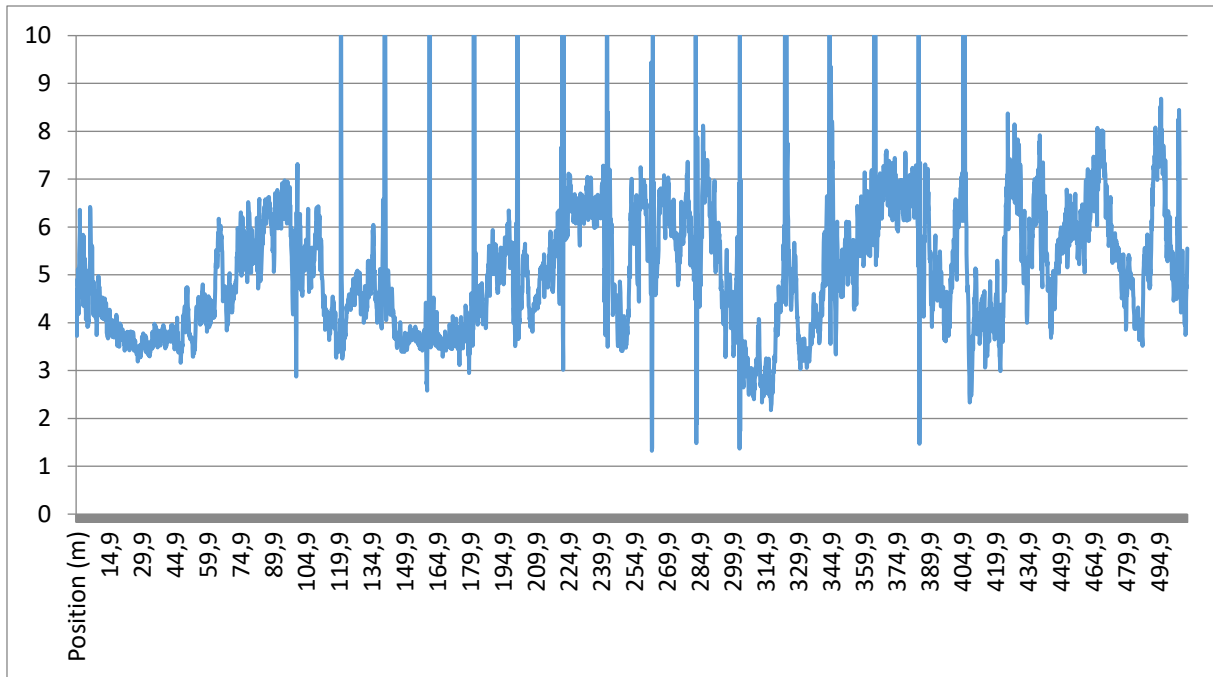
Märkning	tjocklek	Vatten skrym	Hållrum %	Corelok skrym	Hållrum %	Skjutmått skrym	Hållrum %	Kompakt
Ö-1	36	2,379	1,7	2,357	2,6	2,315	4,3	2,419
Ö-2	31	2,397	1,0	2,382	1,6	2,322	4,0	2,420
Ö-3	37	2,395	1,6	2,372	2,5	2,293	5,8	2,434
Ö-4	37	2,403	0,9	2,392	1,4	2,349	3,2	2,426
Ö-5	39	2,387	1,2	2,369	1,9	2,311	4,3	2,415
Ö-6	37	2,401	0,5	2,397	0,7	2,322	3,8	2,414
Ö-7	39	2,346	4,0	2,314	5,3	2,251	7,9	2,444
Ö-8	32	2,383	1,7	2,364	2,5	2,283	5,8	2,424
Ö-9	34	2,378	1,6	2,375	1,7	2,293	5,1	2,416

Figur 12 Borrprover objekt 4

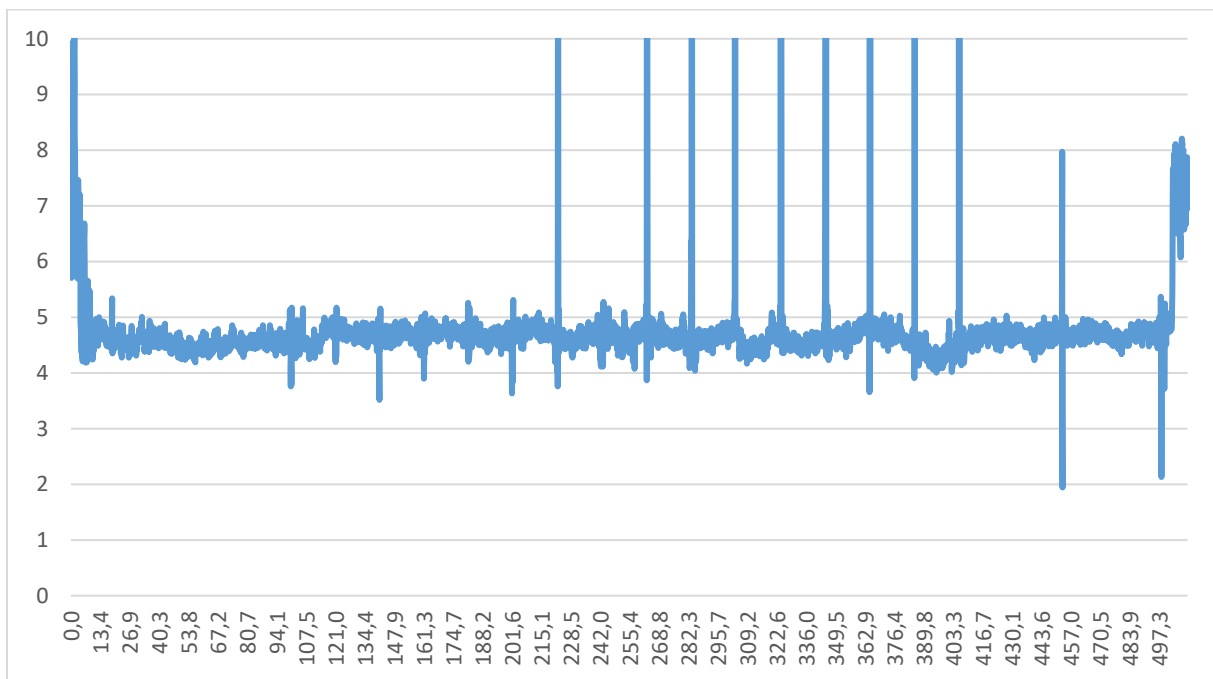
	SIR-30	SIR-20	Pavescan RDM	HI-Pave
Örebro	0,548	0,183	0,497	0,013
Hova	0,395	0,542	0,161	0,250

Fig 13 Korrelation för exponentiell regression mellan permittiviteten och hållrumshalt beräknad utifrån skrymdensiteten bestämd med vatten. Rödmarkerade avser serier där förhållandet mellan permittiviteten och hållrumshalt är det omvända gentemot det teoretiskt förväntade.

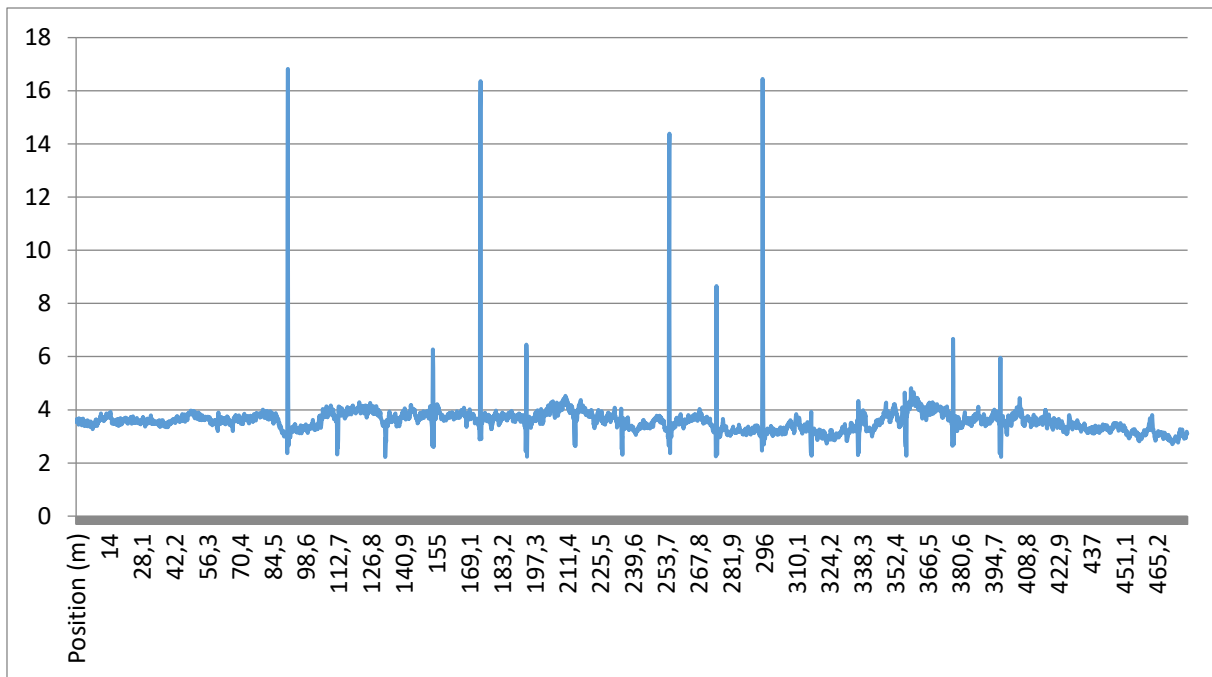
Korrelationen mellan systemen och borrproven var överlag dålig med ett högsta R^2 värde på 0,548 och lägsta 0,013, dessutom var det två fall (rödmarkerade) där förhållandet var omvänt mot det förväntade, dvs. hållrumshalten beräknas öka med ökad permittivitet. Vilken metod som användes för att bestämma skrymdensiteten på borrproverna hade en endast marginell inverkan på korrelationen mellan hållrumshalten och permittiviteten. Den observerade förändringen var enbart en systematisk förskjutning av skrymdensiteten mellan olika metoder, och därmed också hållrumshalten.



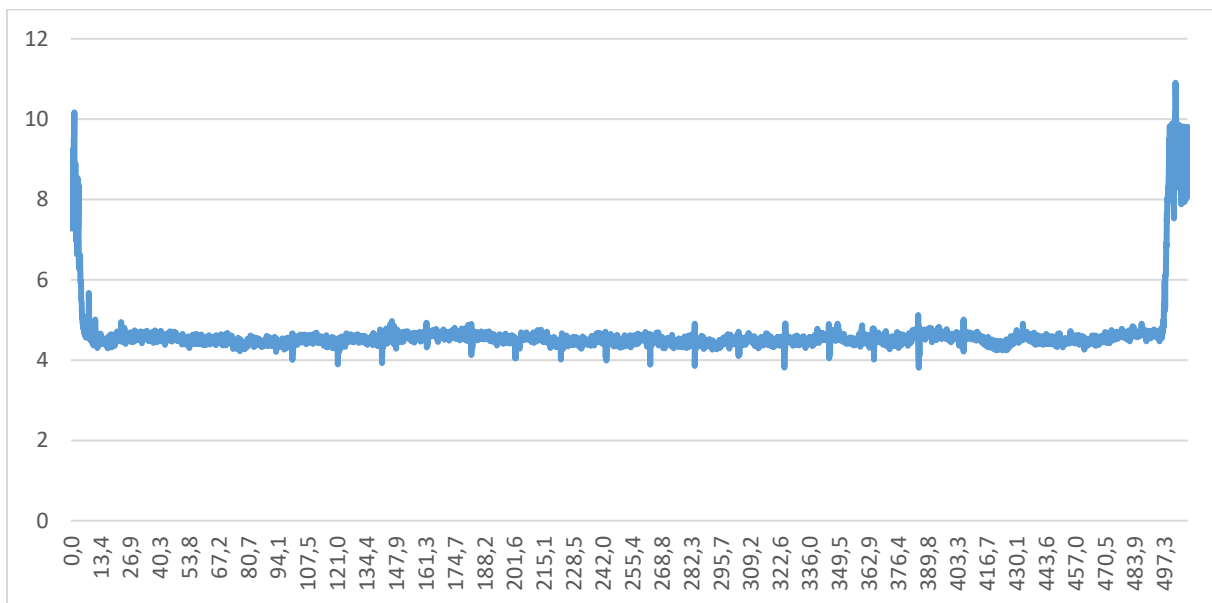
Figur 14 Permittivitet objekt 5 bindlager linje 1 PDP



Figur 15 Bindlager linje 1 pavescan objekt 5



Figur 16 Slitlager objekt 5 Linje 23 PDP

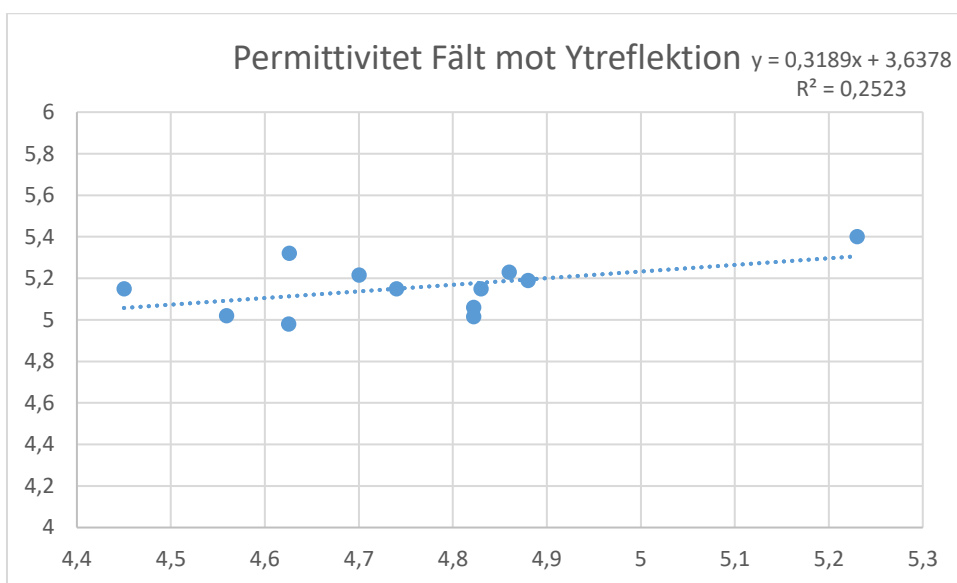


Figur 17 Slitlager Objekt 5 linje 23 Pavescan

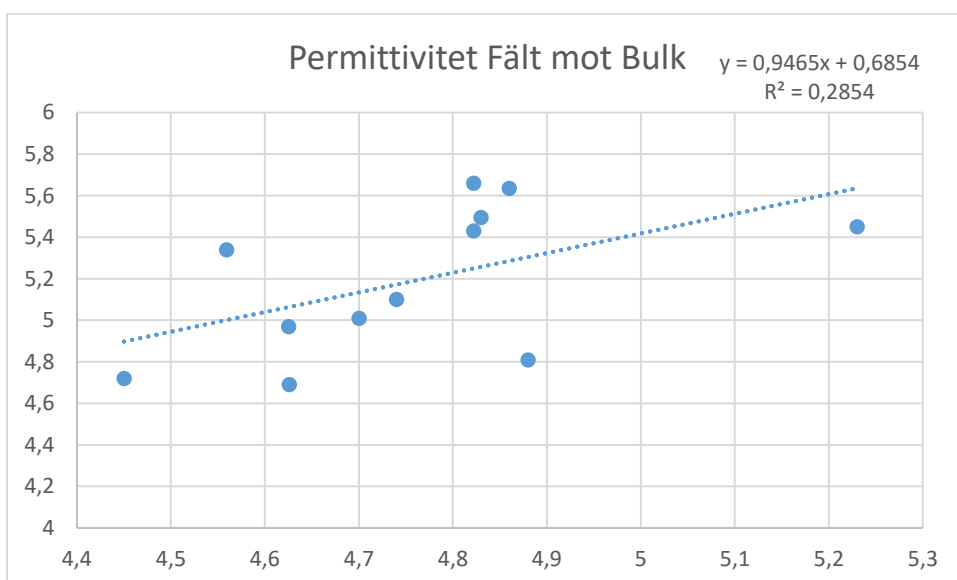
Båda systemen störs av skarvarna till viss del, speciellt vid mätningen av bindlagret. Vid dessa mätningarna så var vissa av skarvarna helt exponerade på grund av det fränsningsarbete som hade utförts. Båda utrustningarna plockar upp störningar även från övertäckta skarvar, men detta sker med större frekvens på PDP systemet. Vid de mätningar som utfördes på slitlagret så var inga skarvar exponerade. Även vid dessa mätningar så syns störningar regelbundet vid skarvarna i konstruktionen, men är för samtliga skarvar med Pavescan och 50 % med PDP syns istället en negativ spik nedåt.

3.2 Alternativ kalibreringsmetod

Ett antal serier provkroppar provades i labb enligt Hoegh, Roger, Dai och Zegeye Teshale (Hoegh, Roberts, Dai, & Zegeye Teshale, 2019), både insamlade i fält och gyrokompakterade. De som togs i fält var hämtade från objekt nummer 2. För de som mäts i fält så väl som labb syns ingen tydlig korrelationen. De två olika labbmetoderna ger däremot en god korrelation själv till hålrumsalten. Ytreflektionsmetoden har genomgående en större variation mellan mätningarna än vad bulkmetoden har. Från serie Hagfors som mättes två gånger med ytreflektion och två gånger med bulk varierade värdet från mätning ett till två för bulk med 0,011 i snitt med en standardavvikelse på 0,058, motsvarande för ytreflektionen var ett snitt på 0,314 och standardavvikelse på 0,203.



Figur 18 Permittivitet uppmät i fält på borrhärdar mot motsvarande värde med ytreflektionsmetoden i lab



Figur 19 Permittivitet uppmät i fält på borrhärdar mot motsvarande värde med bulkmetoden i lab

Korrelationen var låg med både ytreflektionsmetoden och bulkmetoden jämfört med de värden som observerats i fält för samma borrhärdar, R^2 på 0,252 för ytreflektion och 0,285 för bulk med en linjär

modell. Det var även en mycket dålig korrelation mellan hålrums halt och permittivitet mät enligt konventionell fältmetod.

Vid labbmätning på gyrotorisktpackade provpuckar istället för kärnor tagna från fält observerades en betydligt bättre korrelation mot hålrums halt, men fältvärden saknas då inga tillverkades av samma massa för jämförelse för att undersöka om det finns ett samband mellan metoderna.

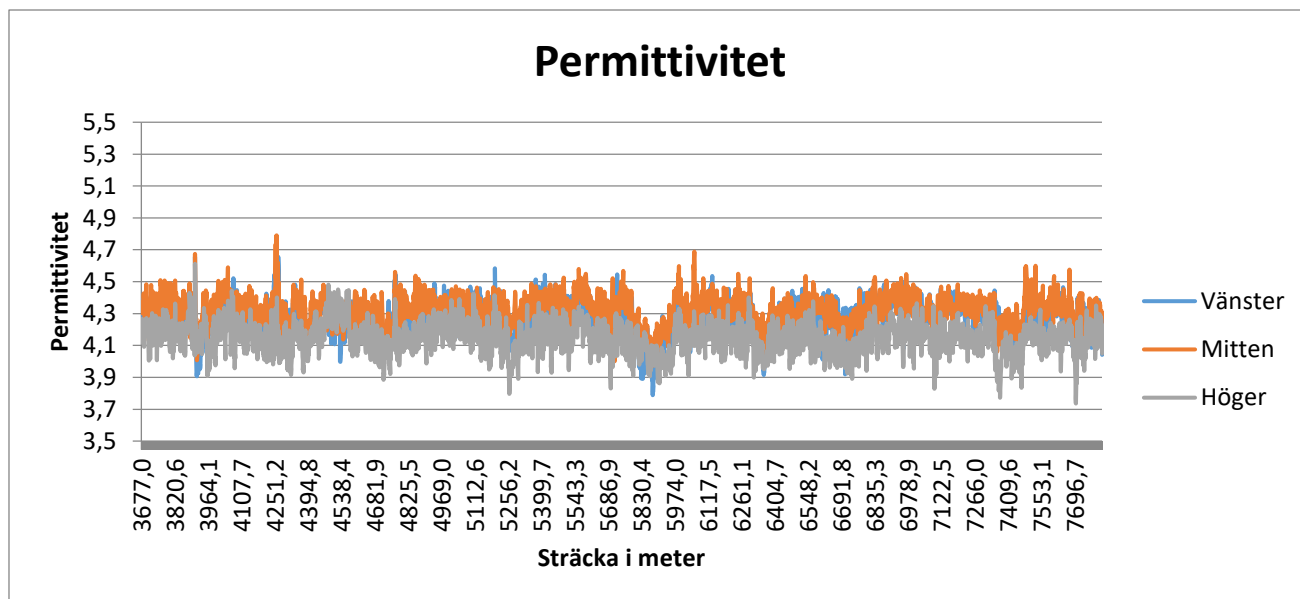
3.3 Jämförelse av två kalibreringar

Två serier av borrhörprover togs på ett objekt av två olika operatörer, med samma utrustning. Fem punkter valdes ut vid varje tillfälle, vilka mätes på med georadar, för att sedan borrhöras och analyseras för hålrums halt i lab. Båda serierna uppvisade en mycket god korrelation med en R^2 på 0,860 respektive 0,975 för serie 1 respektive 2. Efter inmätning av varje kalibreringsserie gjordes distansmätningar på en förbestämd sträcka om 3 km. Vid beräkning av hålrums halt från dessa kalibreringar ses en mycket liknande nivå på

3.4 Upphandlingsunderlag

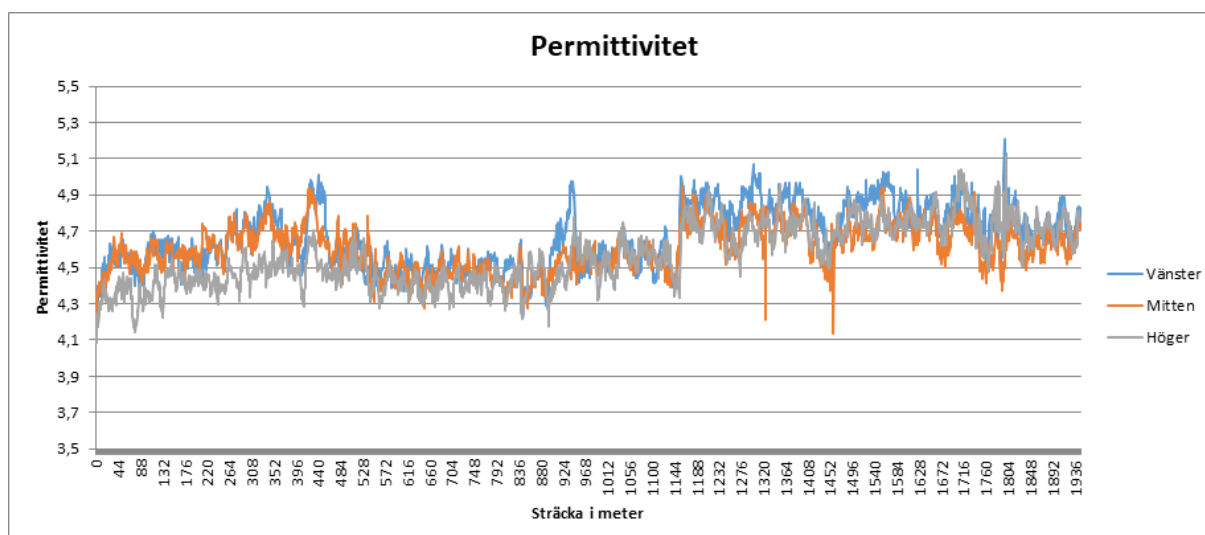
Efter två remisser godtogs ett slutgiltigt underlag för teknisk rapport med mätförfarande och utvärdering för pilotprojekt med georadarmätningar under 2020. Vid diskussion om de tidigare versionerna ansågs de största problemen vara att den föreslagna modellen för utvärdering var det svårt, om inte omöjligt att kvantifiera kostnader för beräkning utav anbud. Mycket tid lades därför på att specificera dels hur beräkningen av eventuella ekonomiska justeringar, samt hur den kontrollborring som fortfarande skulle förekomma skulle utföras.

Efter utvärdering av data visar sig en kalibrering mellan permittivitet och hålrums halt vara ibland svårt att framställa till en tillfredställande nivå, speciellt när asfalten är mycket homogen. Förslaget ändrades då till en ren studie av variationen av permittivitet för att bedöma asfaltens kvalitet. Då variationsgraden är proportionerlig mot de ingående materialens mätvärde och andelen luft, kan detta anses vara ett mått som är proportionerligt på de flesta beläggningstyper oberoende av ingående material. I det underlag som används 2020 används en definition om avvikelse från 10% från medelvärdet som ett avvikande värde. Medelvärdet beräknas med eventuella extremvärden exkluderade, då till exempel metaller eller vatten på ytan skulle helt förskjuta medelvärdet från det verkliga för asfalten.



Figur 20 E4 Tysberga(tagbort), exempel på mätdata som var mycket homogen men borrhov visade på högt hårum.

En fråga som hade diskuterats mycket under projektet var om det var möjligt att lägga asfalt som var mycket homogen, men ändå hade ett högt hålrumsvärde. Data från <lägg till> visar på att så verkar vara fallet, vilket ledde till införandet av kravet av att oberoende mätresultat ta två stycken borrhov för att säkerhetsställa att medelnivån på hålrummet ligger inom rätt intervall även på mycket homogena beläggningar. Om avvikande ytor finns med höga eller låga värden ska proverna tas i dessa, saknas avvikande höga eller låga ytor tas dessa prov slumpmässigt istället tas någonstans i den belagda ytan.



Figur 21 Väg(?) Växjö, exempel på inverkan på mätvärde beroende på förändring i receptet

Denna metod minskar ytterligare mängden borrhov som behövdes tas, då kalibreringen alltid skulle kräva minst sex stycken för att bli tillförlitlig, vilket kan på mindre beläggningsobjekt bli fler än vad som hade tagits normalt. Det finns visserligen möjlighet att återanvända kalibreringsdata mellan beläggningar av samma massa, men sker någon förändring i receptet så behövs en ny kalibrering utföras för att kunna bestämma hålrums halt. Vid repeterade justeringar av asfaltsreceptet, skulle antalet borrhov potentiellt bli mycket om man önskar bibehålla precisionen på beräkningen av hålrums halt.

3.5 Mätmetod

Ingen metod att utvärdera vattenhalt i beläggning har funnits, utvärdering av instrument för mätning av fukthalt av de typer som har provat har varit beroende av att operatören känner till materialets typvärde. Då typvärdet varierar med asfaltens ingående material, samt med packningen så blir instrumentet oanvändbart vid de tillfällen då ett instrument behövs, det vill säga då ytan har torkat efter regn men det är osäkert om fukt finns kvar. Undantaget är om ett riktvärde för en torr yta av materialet är känt, men detta skulle lika gärna kunna uppnås med bättre precision genom att känna till motsvarande värde för en georadarmätning. En metod som används i dagsläget är att täcka över en bit av beläggningen med plast och observera om någon kondens observeras på plasten. Metoden bedöms ha två problem, dels är den beroende av att det är solsken av tillräckligt stark intensitet vid mättillfället för att förånga kvarvarande fukt, och även bedömningen av resultatet saknar en objektiv metod, och är helt beroende på godtycklig tolkning.

Utifrån mätdata som samlats in på ytor under upptorkning så förfaller inte en yta behöva vara absolut torr för att kunna utvärderas. Enligt de kriterier som skulle användas i beläggningsupphandling 2020 där variationen i mätresultatet används som bedömningsunderlag skulle en mindre mängd fukt inte göra någon större skillnad. Vid den förslagna kravgränsen på 10% förändrades andelen underkänd yta från 2,79% till 2,58% i det östgående körfältet, och i det västgående var motsvarande förändring 2,61% till 2,47%.

4 Slutsats

Vid jämförelsen mellan olika system 2018 var det mycket dålig korrelation mellan borrhörens och systemen på båda ytorna, och mellan de olika systemen. Troligen är detta åtminstone delvis orsakat av svårigheten att positionera en antenn som är monterad på ett fordon över en bestämd punkt med diameter 150mm. Detta gäller speciellt för HI-Pave och Pavescan systemen som var monterade baktill på respektive fordon. Det är även okänt till vilken grad de olika systemen potentiellt påverkas av reflektionen mellan slitlagret och nästa lager i sitt mätvärde, undantaget Pavescan där metoden för att hitta ytlagrets reflektion är känd och inte skall få någon influens om slitlagret är minst 19 mm tjockt givet att underliggande lager har en permittivitet som överstiger 8, vilket inget material som normalt förekommer i asfaltsammanhang bör ha, med undantag för metaller i tex. brokonstruktioner och kolfiberarmering. Jämför man med mätningarna som utfördes i Finland på deras testbana med plattor med kända material där mycket lika resultat uppvisades av båda systemen så stärks tanken att variationen kan till stor del bero på influens från underliggande lager på vissa system kombinerat med positionerings svårigheter. Vidare visar de mätningar som gjordes i Marieholmstunneln att olika system är olika känsliga för material under ytskiktet. Samma sak visas även på mätningar som utfördes på kolfiberarmerade sträckor. Tar man i åtanke vad Jaselskis och Han kom fram till med avseende på förhållandet mellan permittivitet och frekvens och som syns tydligt på resultatet på den finska testbanan, så är det troligast att avvikelserna i mätvärde från de jämförande mätningarna 2018 beror på att ytreflektionen från störs delvis av reflektionen från lagret under på flera system. Hade det varit enbart problem med positionering som var orsaken så borde detta rimligen resulterat i att den tydliga systematiska skillnaden saknades. Dessutom då penetrationsdjupet för samtliga använda frekvenser skall vara större än vad som konventionellt läggs i ett asfaltslager så skall detta

inte ha någon inverkan på om resultatet blir korrekt eller inte. Det är alltså rimligen tolkningen av signalen som ligger till grund för om ett mätvärde är korrekt eller inte. När det störande materialet låg på tillräckligt stort djup så förändrades störningen från ett kraftigt förhöjt värde till ett som var något lägre, men ändå inom det rimliga spannet för vad som kan förväntas vid en mätning på asfalt. Detta stället till ett problem då det blir betydligt svårare att filtrera ut dessa värden. Rimligen bör varje enskild utrustningsmodell studeras enskilt med mätningar med olika tjocka asfalter ovan det störande materialet för att empiriskt finna vid vilket djup man kan vara säker på ingen inverkan från dessa.

Med tanke på den variation som sågs mellan de tre Pavescan systemen så är resultaten jämförbara, men den skillnad som finns bör inte försummas, och deras resultat utvärderas individuellt, ett objekt bör alltså mätas i sin helhet med ett enda system för ett få ett så korrekt bedömningsunderlag som möjligt. Ett problem som tydligt identifierades under arbetets gång var svårigheten att positionera systemen på samma position vid upprepade tillfällen, någon form av system för att sikta in antennen över en punkt skulle troligen förbättra repeterbarheten märkbart. Variationen mellan olika dagar är inte oväsentlig heller, en huvudsaklig möjlig faktor till detta identifierades, regn under natten mellan de två mätdagarna är troligen den största faktorn till den uppmätta skillnaden. Speciellt när man tar hänsyn till att mätningar utförda samma dag visade på låg variation, det vara bara vid jämförande mellan alla mätningar över två dagar som differensen ökade tydligt. För att kunna utvärdera en yta så korrekt som möjligt bör alltså en yta som skall bedömas med georadar mätas in vid ett tillfälle, alternativt att man om möjligt ser till att det är konsekvent samma förhållanden gällande fukt vid mätningarna. Om det noteras någon större variation i förutsättningarna bör beräkningen för variation i ytan för bedömning av kvaliteten delas upp så att ett gemensamt medelvärde för hela ytan inte används då det skulle ge ett missvisande värde att jämföra mot. Samma princip gäller även i de fall receptet ändras under ett pågående projekt bör de olika delarealerna med olika recept bedömas var för sig. Detta gäller både för bedömning baserad på variationen i mätvärdet, och för bedömning baserad på omräkning till hålrum baserat på borrhov.

Inget direkt samband tycks finnas mellan labbmetoden för mätning av permittivitet och de värden som uppmäts i fält. Ytreflektionsmetoden baserar sig på samma metod som används i fält och borde därför rimligen ge bättre korrelation, men det tycks inte finnas någon tydlig skillnad mellan de båda metoderna. Metoden tycks dock ge ett bra resultat för korrelation med hålrumshalt på egenhand, men om det inte kan räknas om till motsvarande värde observerat i fält ger det ingen användbar information. Vidareutveckling av metoden, speciellt i syfte att hitta ett sätt att räkna om resultatet till motsvarande fältvärden skulle däremot kunna göra den mycket användbar, då borrhov för hålrumshalt skulle potentiellt helt kunna elimineras. Dessvärre saknas någon metod för detta i dagsläget, och de dåliga korrelationer som ficks från de försök som gjorts gav ingen hjälp för att ta fram en sådan.

Influens av de underliggande materialen tycks vara främst påverkat av hur ett system behandlar signalen för att identifiera vilken del av den reflekterade signalen utgör ytreflektionen. I de fall detta bestämmas genom att anta att den största toppen på kurvan utgör denna reflektion så kan ett underliggande material med starkt avvikande egenskaper identifieras som ytlagret. Dessa värden är generellt så pass extreme att filtrera ut dessa är mycket simpelt, exempelvis från figur 7 där kolfiber ger ett maxvärde på över 10 000. Värre är det då influensen är från material med liknande egenskaper till exempel ett underliggande asfaltslager eller ett obundet bärlager, då det kan bli mycket svårt att utvärdera om det finns någon influens eller om det är ytans sanna värde som visas.

Bedömning av kvalitet utifrån variationen i det observerade mätvärdet från ytan tycks vara betydligt mindre beroende av fukthalten i beläggningen. Då kvaliteten bedöms sämre om det finns fukt kvar i

beläggningen blir det mindre viktigt att kunna hitta mätmetod med objektiva kriterier för att bedöma att en yta är tillräckligt torr för att utföra mätningar på då det ligger i utförarens intresse att så är fallet. Att bedöma på detta sätt underlättar även tidsmässigt planeringen av mätarbetet då det inte blir lika tidskritiskt, om mätningar alltid skulle behövas utföras i direktanslutning med utförande av beläggningsarbete skulle det av logistiska själv behövas väldigt många utrustningar för att kunna klara av detta. Då dessa typiskt ligger beroende något på modell prismässigt i storleksordningen några hundra tusen skulle det bli mycket svårt för en entreprenör att ekonomiskt kunna ta kostnaden för detta. Det finns visserligen en faktor från efterkompaktering från trafiken som påverkar mätresultatet som konstaterades i förra delen i projektet där en vägsträcka mättes två gånger, direkt i samband med utförande, och igen ett år senare. Däremot är denna så pass liten att över den förslagna tiden på två veckor så bör denna effekt vara försumbar. Vid eventuell efterkompaktering skulle det med den förslagna utvärderingsmetoden att ge ett bättre resultat så nära in på utfört arbete som möjligt, detta då den mittlinje som mäts inte kommer att påverkas i samma grad av kompakteringen som mätlinjerna i hjulspåren vilket kommer att leda till större variation i mätresultatet desto längre tid löper mellan läggning och mätning. Även denna del leder till en situation när det är av mindre vikt att etablera hårda kravgränser på mätningen då det är även här i utförarens intresse att göra mätningen så snart efter beläggningsarbetets utförande som möjligt, vilket också get det mest representativa mätresultatet.

Det underlag som Trafikverket arbetat fram för upphandlingar av beläggningar 2020 gjordes ett antal ändringar i under projektets gång. För styrgruppen i detta projekt lades fokus på behovet av att kvantifiera ingående bedömningsparametrar, och att justera sådana krav som skulle göra det ekonomiskt oförsvarligt att använda metoden. Det slutgiltiga underlaget inför upphandling 2020 som färdigställdes under november 2019 efter diskussioner mellan Trafikverket och entreprenörer ansågs vara tillfredställande av båda parter. Utifrån den förmåga tekniken har att kunna mäta in mycket stora, i princip heltäckande areal så för att använda teknikens primära styrka används en utvärderingsmetod som baseras på homogeniteten i beläggningen istället för att titta på exakta hålrumshaltsnivåer. Under 2020 när detta används i ett kontrakt med ekonomiska följder kommer det säkerligen att upptäckas brister i detta underlag som inte rimligen kunde förutspås under förstudiearbetet. I syfte att fortsätta utvecklingen skulle det kunna vara av intresse att genomföra någon form utav uppföljningsprojekt i slutet av året för att dokumentera och förstå förbättringar till dessa brister som kommer att upptäckas, för att se till att denna teknik skulle kunna bli ett användbart verktyg i framtiden för reducerad borrning och förbättrad arbetsmiljö.

5 Fortsatt arbete

Metoden kommer att under 2020 användas på ett antal beläggningsobjekt upphandlade utav trafikverket. Att tekniken fungerar är i dagsläget väl etablerat, men frågor kvarstår i exakt på vilken nivå bedömningskriterierna borde ligga och i själva kontraktet gällande detaljer så som hur situationen hanteras vid långvarigt regn, eller hur detta kan påverka behovet av avstängningstid på nattarbeten. Baserat på detta kan det vara en god idé att göra en uppföljning av årets arbete för att undersöka hur tekniken möts i branschen när det börjar användas i kontrakt.

Vidare utveckling av tekniken med avseende på hur man kan kalibrera in hålrumshalt mot gyrate prover är även det ett område av intresse att undersöka, med detta skulle man potentiellt få fram hålrumshalten på beläggningar, utan att behöva exponera sig för de risker som gjorde att man 2020 valde att frångå att hålsrumshalts bedömning, och att i stället enbart titta på variationen. Detta

skulle även göra bedömning utifrån hållrumshalt intressantare då mycket av problematiken kring att hitta bra korrelation på homogena ytor försvinner. Även problemet att behöva gå ut i fält och borra fler prover om den första serien inte ger tillräckligt god korrelation för att kunna användas som bedömningsunderlag.

Enskilda utrustningar behöver provas separat då i dagsläget saknas strikta tekniska krav på utrustningen. Verifikations arbete behövs istället med praktiska mätningar för att se till att en specifik utrustning är tillräckligt precis. Den metod som utvecklas i USA med utvärdering utav mätvärdets stabilitet över tid, samt med den Finska modellen med testbana skulle kunna vara ett spår att gå på.

6 Källor

Federal Highway Administration. (den 15 01 2020). Asphalt Mixture Compaction Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR) Dielectric Profiling Systems (DPS). USA.

Gardner, E., & Tennby, G. (2019). *Georadarmätningar av asfaltbelägningars egenskaper*. SBUF.

Hoegh, K., Roberts, R., Dai, S., & Zegeye Teshale, E. (2019). *Toward Core-Free Pavement Compaction Evaluation: An Innovative Method RElating Asphalt Permittivity to Density*. Geosciences.

Jaseleskis, E., & Han, H. (1999). *Roller mountable asphalt pavement quality indicator*. Iowa: Transport Research Board.

Trafikverket. (12 2019). *Teknisk Rapport Inklusiv Mätförfarande 2020*. Göteborg.

7 Bilagor

Bilaga 1: Utvärdering av mätobjekt utifrån föreslagna kriterier

Bilaga 2: Teknisk rapport inklusive mätförfarande 2020

Bilaga 3: Exempel på avvikande parti från utförda georadarmätningar

Bilaga 4: Pilotprojekt georadarteknik 2020

Bilaga 1

Analys av föreslagna kravgränser utifrån ett antal uppmätta objekt

Objekt 1

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
1 C				
Sandsjöbacka				
Kravgräns				
Drag				
K1				
K2				
K2 D2				
K1 D2				

Objekt 2

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
1				
Hagfors (störningar från kolfiber)				
Kravgräns				
Drag				
1				

Objekt 3

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K2N				
K2S				
Kravgräns				
Drag				
K1				

Objekt 4

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1				

Objekt 5

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1				

Objekt 6

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
1				

Objekt 7 (slagg asfalt)

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1 N				
K1 S				
Kravgräns				
Drag				
K2 Bindlager				
K1 Bindlager				
K1 AG N				
K1 AG S				
ABB standard				
ABB RC				
ABB RC PMB				

Objekt 9

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1 O1				
K1 O2				
K1 V1				
K1 V2				

Objekt 10

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1 del 2				
K1 Del 1				
K1 Del 3				
K1 Del 4				

Objekt 11

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
K1 N				
K2 S				
Kravgräns				
Drag				
4 Ost				
10 ost				
10 väst				
11 ost				

Objekt 13

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
1				

Objekt 14

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
E 1 N				
E 2 N				
E 1 S				
E 2 S				

Objekt 15

Objekt	7%	10%	12%	15%
Objekt	7%	10%	12%	15%
Kravgräns				
Drag				
ABB k1 med kolfiber				
ABB 001				
ABB 002				
ABB mot 001				
K2 ABB 001				
K1 ABS med 001				
K1 ABS med 002				
K2 ABS 001				

**Teknisk rapport avseende erfarenheter
kring georadarmätningar inklusive
mätförfarande för implementeringsprojekt
2020.**

Version 2.0

november 2019

Denna rapport är framtagen inom ramen för det utvecklingsprojekt mellan Trafikverket och SBUF/beläggningsbranschen som är pågående för utvärdering av georadar tekniken. Denna rapport kommer att användas för implementering avseende homogenitetskontroll av nyproducerade asfaltsbeläggningar med georadartechnik.

Ett samarbete mellan Trafikverket Sverige, Statens Vegvesen Norge och Trafikledsverket Finland pågår också för att bygga kunskap och erfarenhet kring tekniken. Erfarenheter kring tekniken i de olika länderna kommer att arbetas in i en framtida metodbeskrivning. Vi följer även den utveckling som sker i vår omvärld, bland annat USA, genom att ta del av erfarenheter och synpunkter från internationella användargrupper.

Denna rapport baseras på tidigare erfarenhet med luftburna georadarsystem som är bilmonterade eller vagnmonterade och använder sig av en distansangivare för att skicka pulser. Att mäta med georadar fungerar inte på TSK-beläggningar eller andra typer av beläggningar som innehåller vatten eller fukt vid tillverkning av asfaltmassan.

Erfarenheterna från projektet visar att georadartechniken mycket väl identifierar variationer i beläggningar, både tvärled och längdled. När det gäller att korrelera resultat av hålrumshalt på upptagna borrhärdar mot uppmätt permittivitet på beläggningen visar det sig att det finns en viss osäkerhet och spridning i korrelation.

Arbete kring korrelation mellan hålrum och dielektriska värden behöver fortsättas att utvecklas och studeras närmare. Detta arbete ligger utanför denna rapport.

Denna rapport är gemensamt framtagen av:

Torsten Nordgren, Trafikverket UHvätv – Ansvarig projektledare för Trafikverkets utvecklingsprojekt.

Gustav Tennby, Trafikverket UHvätv – Ansvarig mättekniker Trafikverket, för fältarbete.

Eric Gardner, Skanska Sverige – Ansvarig projektledare SBUF projekt samt övriga deltagare från branschen i projektets styr- och referensgrupp

Innehåll

1. Teknisk bakgrund georadar	1
1.1 Grundläggande teori	1
1.2 Djuppenetration och upplösning.....	2
1.3 Ytreflektionsmetoden	2
2. Utrustning.....	3
2.1 Komponenter i mätsystem.....	3
2.2 Krav på utrustning	3
2.3 Validering av mätutrustning	3
2.3.1.1 Kortsiktig dielektrisk stabilitet	4
2.3.1.2 Drift	4
2.3.1.3 Långsiktig dielektrisk stabilitet	4
2.3.1.4 Dielektrisk stabilitet av antenn	4
2.3.2 Fältkalibrering av mätutrustning	4
2.4 Säkerställande av pulsgivare.....	5
2.5 Säkerställande av mät-djup.....	5
3. Beställning av mätning	5
4. Planering av mätning	6
4.1 Påverkan på mätresultat	6
4.2 Omfattning av mätning	6
4.2.1 Permittivitetsmätning (Dielektricitet)	6
4.3 Längdmätning och positionsinsamling	7
5. Fältarbete, generella föreskrifter.....	7
6. Homogenitet	7
7. Redovisning av mätresultat och rapport	7
7.1 Filtrering (borttagning av extremdata)	8
Bilaga 1. Bedömning av korrelation mellan permittivitet och hålrums halt.....	10
Mätning av hålrums halt.....	10
Bilaga 2.	12

1. Teknisk bakgrund georadar

Georadar är en metod som baseras på den fysikaliska princip att olika material reagerar olika då det utsätts för elektromagnetiska vågor. Genom att sända ut en signal i ett givet frekvensband och registrera den del som reflekteras tillbaka till antennen kan man genom signalbearbetning kan man få fram troliga egenskaper hos det påverkade materialet.

I början av 1980-talet genomfördes de första testerna med georadar inom vägapplikationer i Sverige och andra nordiska länder, och under de följande årtiondena utvecklades tekniken till en välkänd och etablerad metod för att undersöka och kartlägga vägar och dess konstruktion. Idag används tekniken över hela världen, och i flera länder är det en normerad standardmetod vid vägprojektering och utvärdering av utförda entreprenader.

Georadarteknikens största fördelar är att det är en i huvudsak kontaktlös icke-förstörande metod som ger en kontinuerlig information, till skillnad från punktvisa undersökningar som till exempel provtagning där en punkt ofta måste representera stora områden med okända variationer. Till skillnad från dagens stick-provs kontroll som enbart mäter en bråkdel av procent av beläggningsytan, kan man med georadar mäta över väsentligt större yta och få en bättre helhetsbild av utfört arbete.

Georadar är en metod med hög repeterbarhet i mätningen, som med rätt bearbetad och tolkad data ger en objektiv bild av variationerna i en utförd asfaltbeläggning.

Denna rapport syftar till att likrikta den utförandekontroll med georadar som genomförs på nylagda asfaltbeläggningar. Det är viktigt att all kontroll utförs på ett för alla parter transparent och liktydigt vis, oavsett vem som utför kontrollen.

1.1 Grundläggande teori

Vetenskapen kring hur ett medium påverkas av elektromagnetiska vågor är relativt komplex, och flera olika egenskaper och effekter måste tas i beaktande vid studier av detta fenomen. Normalt utnyttjar man inom georadarmätningar frekvenser mellan 30-3000 MHz, och detta gör att man kan förenkla teorin något och vanligtvis bortse från effekter som till exempel frekvensberoende och energiförluster på grund av friktion. Inom det utnyttjade frekvensområdet kan elektromagnetiska vågor fortplanta sig i ett medium med relativt låg elektrisk konduktivitet, och utbredningshastigheten är huvudsakligen en funktion av mediets permittivitet. En förutsättning för detta är dock att materialet inte är nämnvärt magnetiskt. För svenska förhållanden är detta mycket sällan en faktor att beakta, förutom i specialfallet då slagg från metallåtervinning används som vägmaterial.

Ett materials permittivitet beskriver dess förmåga att polariseras i ett elektriskt fält. Permittiviteten, vanligtvis kallat den dielektriska konstanten eller kapacitiviteten, anger ett materials förmåga att lagra spänning och förmågan att isolera mot elektriskt flöde. I det följande kommer termen permittivitet att användas för att beskriva de relativa dielektriska egenskaperna. Permittiviteten (ϵ_r) hos ett material anges vanligtvis i relation till permittiviteten i vakuum enligt ekvation 1.1.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \text{ där } \begin{cases} \epsilon = \text{Mediets permittivitet} \\ \epsilon_0 = \text{Permittivitet i vakuum } (8,854 \cdot 10^{-12} F/m) \end{cases} \quad (1.1)$$

Ett materials relativa permittivitet, ϵ_r , är mycket centralt inom georadarteori och är som kan härledas av formeln ovan dimensionslös. Nedanstående tabell kan ge en indikering på permittiviteten för några vanligt förekommande material.

Material	Permittivitet, ϵ_r
Luft	1
PEHD	2,3
Bitumen	2,5 – 3,5
Is	4
Asfaltsbeläggningar	3 - 8
Bergmaterial	5 – 7
Nytt bär- /förstärkningslager	6 – 9
Betong	8 – 10
Morän	8 – 18
Vatten	81
Metaller	>32 000

Ett mediums relativa permittivitet är beroende på vilka material som det består av och deras volymetriska proportioner. Då bergmaterial har en permittivitet som är nästan tio gånger högre än luft, och vatten nästan tio gånger högre än bergmaterial, är det uppenbart att hålrumshalt och vattenmättnadsgrad är mycket avgörande för den slutgiltiga permittiviteten hos ett naturligt förekommande vägmateriäl.

En annan fysikalisk storhet som spelar en viss roll är mediets konduktivitet, som är ett mått på förmågan att transportera en elektrisk laddning. Hög konduktivitet leder till en ökad dämpning av den elektromagnetiska vågen, vilket gör att djuppenetrationen i undersökningen minskar. Tillfällen då detta är aktuellt är till exempel vid förekomst av kolfiber, vägsalt och slaggprodukter vilket kan ge missvisande resultat som stör utvärderingen.

1.2 Djuppenetration och upplösning

Hur djupt en radarsignal kan penetrera i ett material beror främst på antennens centralfrekvens och den motsvarande våglängden hos radarpulsen. Penetrationsdjupet minskar med ökad frekvens hos antennen, och vid material med högre permittivitet. Den vertikala upplösningen (h) hos en radarsignal kan uppskattas som:

$$h = \frac{\tau \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \text{ där } \begin{cases} \tau = \text{pulsens vågbredd} \\ c = \text{ljusets hastighet i vakuum (0,3 m/ns)} \end{cases} \quad (1.2)$$

1.3 Ytreflektionsmetoden

Med ytreflektionsmetoden kan man med hjälp av ett luftkopplat radarsystem med hornantenn bestämma permittiviteten på det översta lagret i en väg. Detta är möjligt genom att relatera den uppmätta amplituden i radarsignalen mot amplituden hos en total reflektion. Den totala reflektionen skapas genom att med samma utrustning och vid samma tillfälle göra en statisk mätning mot en metallplåt.

Permittiviteten (ϵ_a) för lagret beräknas enligt:

$$\epsilon_a = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_i}}{1 - \frac{A_0}{A_i}} \right) \text{ där } \begin{cases} A_0 = \text{Amplitud, aktuellt lager} \\ A_i = \text{Amplitud, plåtmätning} \end{cases} \quad (1.3)$$

2. Utrustning

Det finns flera olika tillverkare av georadarutrustningar, och den största skillnaden ligger i utbudet av antenner och hur de är avsedda att användas. Ska hålrumshalt på beläggning eller permittivitet hos olika lager bestämmas måste en luftkopplad antenn av horn typ användas.

I ett luftkopplat system monteras antennerna fritt hängande en bit över vägytan, och höjden kan tillåtas variera under mätningen utan att det påverkar resultatet. Fördelarna med luftkopplade antenner är att det är enklare att hålla hög mät hastighet och deras egenskap att inte påverkas av förändringar längs vägen.

2.1 Komponenter i mätsystem

Ett mätsystem för georadar är ofta sammansatt av flera olika delar, och kan integreras med andra komponenter. Ifall utrustningen är monterad på en bil, ska all extern utrustning på bilen ska monteras så att den inte utgör en trafikfara eller riskerar att lossna under färd.

Följande är minimikrav som ska uppfyllas för att systemet ska kunna användas i enlighet med denna rapport oavsett bilmontering eller inte:

- Radarsystem med antenn/antennerna med en centralfrekvens ≥ 1 GHz och < 3 GHz.
- Hjälpulsgivare (DMI).
- GPS-mottagare som kontinuerligt loggar koordinater.

2.2 Krav på utrustning

All radarutrustning som säljs i Europa måste vara godkända av European Telecommunications Standards Institute (ETSI), och samtlig utrustning som används ska klara ytterligare krav ställda av Electronic Communications Committee (ECC).

Vidare är det mätleverantören själv som ska genomföra periodisk kontroll och kalibrering av utrustningen. En fullständig genomgång av de parametrar som beskrivs inom denna rapport ska göras minst en gång innan mätsäsongen börjar (Beläggningssäsongen). Intyg/rapport av denna systemverifiering ska finnas och kunna presenteras i samband med mätning i fält.

2.3 Validering av mätutrustning

Inför varje mätsäsong varje år, ska utrustningen om består av flera antenner valideras så att alla antenner mäter samma resultat utan att ha för mycket differens. Detta krävs för att resultatet av GPR-utrustningen baseras enbart på den uppmätta permittiviteten, av den anledningen är det av fördel att ha ett material där dielektriska konstanten är känd och stabil (t.ex. PEHD) när validering av mätresultatet för varje antenn ska göras.

Den tid som valideringen utförs under bör jämföras mot den tid som en större beläggning tar att färdigställa, t.ex. 10 data-set per antenn som avses att användas i fält som görs under en period av 14 dagar, med minst 5 enskilda tillfällen.

2.3.1.1 Kortsiktig dielektrisk stabilitet

Den kortsiktiga dielektriska stabiliteten behöver valideras för att validera utrustningens förmåga att hitta lokala förändringar av packningsgrad vid en typisk kvalitetskontroll. Den kortsiktiga perioden avser en statistisk mätning ca 4 sekunder som resulterar i 60 scans. Därefter beräknas den kortsiktiga stabiliteten med ekvation 2.1. Där differensen av permittiviteten inte får överstiga max 0,06.

$$KDS = eK_{max} - eK_{min} \quad (2.1)$$

Där eK_{max} avser det högsta uppmätta dielektriska värdet och eK_{min} avser det lägsta uppmätta dielektriska värdet av 50 scans, där man bortser från de 10 första scans i serien.

2.3.1.2 Drift

Då driften avser att validera variansen av den uppmätta dielektriciteten över en längre period, t.ex. en mätning i skarpt läge så ska detta test pågå kontinuerligt med en statistisk mätning på minst 20 minuter, vilket motsvarar ca 18 000 scans per serie. Därefter beräknas medelvärdet på de 100 första och de 100 sista dielektriska värdena som variansen sedan beräknas med ekvation 2.2 där ett GPR-system ska vara tillräckligt konstant utan mycket drift vid beräkning av permittivitet. Differensen av drift får inte överstiga 0,08.

$$D = eD_{max} - eD_{min} \quad (2.2)$$

Där eD_{Max} avser medelvärdet för de 1000 första av dielektriska värdet under 20 min och eD_{min} avser medelvärdet för de 1000 sista dielektriska värdet under 20 min. Är serien under 5000 värden räcker det med medelvärde för 100 första och 100 sista.

2.3.1.3 Långsiktig dielektrisk stabilitet

Den långsiktiga dielektriska stabiliteten ska motsvara stabiliteten mellan georadar och dess flera kalibreringar under en längre period. Detta testas genom att mäta med en 30 sekunder lång statistisk mätning, ca 450 scans per serie. Därefter räknas medianen ut för varje mätning och differensen mellan högsta uppmätta medianen och lägsta uppmätta medianen räknas ut.

En maxgräns i differens är 0,08 mellan alla data-set.

$$LDS = eL_{max} - eL_{min} \quad (2.3)$$

Där eL_{max} avser den högsta beräknade medianen och eL_{min} avser den lägsta beräknade medianen ur varje data-set.

2.3.1.4 Dielektrisk stabilitet av antenn

Om fler antenner än en antenn, planeras att användas under mätning med GPR-utrustning så ska även variansen mellan antennerna kontrolleras så att de mäter likvärdigt samt att utrustningen enbart mäter packningsgraden och inte antennens egenskap. Testet genomförs genom att mäta på en referens-platta ca 10 sekunder lång statistisk mätning med ca 150 scans för varje antenn. Därefter beräknas medianen för varje mätning. En maxgräns på differens mellan antennerna är 0,08. Detta ökar säkerheten av resultaten från mätningar.

$$DSA = eA_{max} - eA_{min} \quad (2.4)$$

Där eA_{max} avser den högsta beräknade medianen och eA_{min} avser den lägsta beräknade medianen för alla antenner.

2.3.2 Fältkalibrering av mätutrustning

Inför varje mätning av objekt ska utrustningen kalibreras enligt tillverkarens rekommendationer. Detta för att utrustningen ska kunna beräkna fram dielektriska värden

med ytrelektionsmetoden och att ta hänsyn till de variationer som kan finnas i miljön. Denna process kan ingå i utrustningens programvara och krävs att den genomförs efter uppstart av utrustning innan mätning.

För att verifiera att utrustningen fungerar som den ska, rekommenderas en mätning på referens-platta med känd dielektricitet. Beroende på typ av utrustning väljer man lämpliga dimensioner. Ett exempel på ett homogent material med känd permittivitet är en plast av typ PEHD (Polyetylen High Density).

I detta steg är det viktigt att kalibreringen utförs på ett konsekvent och noggrant sätt för att minska osäkerheter i mätresultat.

För att kontrollera att fältkalibreringen av GPR-utrustningen har utförts korrekt rekommenderas en testmätning utföras ifall utrustningen använder sig av mer än en antenn. Denna kontroll ska se till att fältkalibreringen är korrekt genomförd och ger korrekt mätresultat.

Exempel: En mätning ska genomföras med 3 er. Positionen på antennerna har 60cm mellanrum. 5 linjer märks ut med ett mellanrum på 60cm (beroende på vad avståndet mellan antennerna kommer vara för mätningen) på minst 5m längd på en ny beläggning. Därefter görs 5 testmätningar där centerantennen mäter linje 1-5. Med de testmätningarna beräknas sedan differensen ut mellan respektive antenner (Mätning 2-4). Är differensen ≤ 0.12 är kalibreringen bra genomförd. Är Differensen > 0.12 ska kalibreringen genomföras igen. Illustration av detta framgår av bilaga 1.

En korrektionsfaktor kan tas fram så att erhållet resultat är likställt så att alla antenner visar likvärdigt resultat för varje enskilt objekt med hjälp av denna fält-verifikation.

2.4 Säkerställande av pulsgivare.

Längdmätningen enligt hjulpulsgivaren ska kalibreras minst en gång före mätsäsongen för att garantera en korrekt längdmätning. Kontrollmätning av längdangivning rekommenderas minst en gång varje månad under mätsäsong.

2.5 Säkerställande av mät-djup

Det är upp till enskild mätoperatör att verifiera att erhållet permittivetsvärde enbart representerar aktuellt belägningslager. Metod och rapport ska presenteras i samband med redovisning av resultat av utförd mätning.

3. Beställning av mätning

Vid genomförande av georadarmätning är det viktigt att i ett tidigt skede fastställa vissa grundläggande förutsättningar, då val gjorda redan innan mätningen kan påverka möjligheterna att nå önskat resultat. I ett minimum ska en beställning innehålla följande:

- Objektets namn med angivande av län, vägnummer och körfält.
- Start och stopp enligt löpande längd enligt NVDB alternativt koordinater enligt Sweref 99 TM.
- Tidplan för mätning och leverans med angivande av planerat färdigställdedatum för objektet.

4. Planering av mätning

4.1 Påverkan på mätresultat

För att uppnå bästa kvalitet på mätningarna ska kontrollmätningen ske i direkt anslutning till produktionen av aktuell beläggning. Detta sker vanligtvis under perioden april - oktober, och det finns ett par faktorer som är viktiga att beakta i samband med detta som kan påverka kvaliteten.

En IR-termometer är rekommenderat att använda för att säkerställa att yttemperaturen på beläggningen är under 60°C. Om utrustningen är monterad på ett fordon så ska det säkerställas att fordonet inte gör några synliga spår i beläggningen.

Då utrustningen är känslig mot regn och mätresultatet påverkas av vatten i beläggningen kan mätningar inte göras under, efter regnfall och mätningen får då skjutas på till vägytan har torkat helt.

I fallstudier och utredningar kan mätning göras upp till 2 veckor i efterhand efter aktuell beläggning är utförd. Mätning i efterhand förutsätter dock torr beläggning och minimal trafikering av beläggningssytan.

4.2 Omfattning av mätning

Omfattningen på mätningen ska alltid anpassas så att resultatet ger en heltäckande representation av det undersökta objektet. Nedan angivna antal mätlinjer ska ses som ett minsta antal.

4.2.1 Permittivitetsmätning (Dielektricitet)

Minsta rekommenderade antalet mätlinjer är tre per 4,5m läggingsbredd. Om beläggingsbredden är mellan 4,5m och 6m ska beläggningen mätas med 6 stycken mätlinjer och beläggningar med en bredd över 6m ska mätas med minst 9 stycken mätlinjer, som är fördelade över beläggningsdragets bredd. Om avvikande konstruktion eller förfarande har använts i till exempel vägrenar bör även dessa undersökas med separata mätlinjer. Mätlinjerna i läggingsdragen förläggs till förväntade placeringar av höger och vänster hjulspår och en mellan höger och vänster i respektive riktning. Rekommenderat minsta avstånd mellan respektive mätlinje är $\geq 0,6\text{m}$.

Antennerna på mätutrustningen ska inte placeras närmare beläggingsdragets kant än 0,5m. Önskar man få en indikering av ytan utanför 50 cm ska det verifieras med separat mätning och resultaten ska redovisas separat.

Vid georadarmätning av långsgående fog(skarv) ska en antenn användas som placeras mitt över långsgående fog som sedan redovisas separat.

Om värmekamera används kan det vara aktuellt att jämföra beläggningstemperatur mot permittivitet för utvärdering om det finns en korrelation mellan metoderna.

4.3 Längdmätning och positionsinsamling

Fundamentalt för all typ av mätning på väg är att kunna referera insamlad data till övriga mätningar och verkligheten. All insamlad data ska positionsbestämmas med både längdmätning och koordinater.

5. Fältarbete, generella föreskrifter

All personal som utför mätning ska ha dokumenterad utbildning enligt de krav som beställaren har för arbete på väg. Aktsamhet ska iakttas då mätsystemet framförs i trafik, och mätningen ska genomföras på så sätt att trafiksäkerheten inte äventyras. Beroende på val av utrustning och dess maximala mät hastighet kan det bli aktuellt med tungt skydd.

Innan mätning är det rekommenderat att se till att det finns en godkänd TA-plan.

Vid mätning i samband med produktion ska yttemperaturen på beläggningen vara lägre än 60°C. Mätning i dimma och hög luftfuktighet kan eventuellt påverka mätresultatet och bör i största möjliga utsträckning undvikas. Mätning rekommenderas inte att utföras då luft- eller beläggningstemperaturen är lägre än 1 °C.

Vid mätning ska insamlingen ske med ett minsta antal scans/meter av 10.

Mätning ska genomföras på helt torr vägbana, och avbrytas vid eventuellt regnfall då det påverkar mätningen och riskerar att permanent skada utrustningen. Vid mätning ska även ytan vara fri från främmande föremål som kan påverka mätresultatet så som, jord, stenar eller byggrester.

Av erfarenhet så beror upptorkning av vatten och fukt på beläggningar på såväl väderförutsättningar som trafik. En indikering på om det finns fukt i beläggningen är om man har mätt på aktuell beläggning innan regnstopp och jämföra permittivitetsvärden mot samma mätlinje efter regnstoppet. Är permittivitetsvärdet högre efter regnstoppet är det en indikering om att det finns fukt i aktuell beläggning och fortsatt mätning ska inte genomföras.

6. Homogenitet

Beläggningens homogenitet (variation) bedöms utifrån erhållna resultat avseende permittivitet. Objektet bedöms som helhet och delsträckor om 100m. Bedömning baseras på skillnad av uppmätt permittivitetsvärde mellan mätlinjer och spridningsbild i längdled. Det finns idag inte tillräckligt med underlag för att sätta fasta kravgränser avseende bedömning av homogenitet till säsong 2020. Ett särskilt dokument kommer att tas fram som hjälpmedel avseende preliminär bedömning av homogenitet inför mätsäsong 2020.

7. Redovisning av mätresultat och rapport

Om entreprenör mäter själv, eller via konsult, ska exportfil från utrustning överlämnas till utpekad person hos beställaren digitalt (.csv/.txt/.xlsx) senast dagen efter mätning för att ge möjlighet för beställaren att göra egen bedömning av resultaten.

Redovisning av mätningen sker genom att från de uppmätta scans/meter skapa medelvärden för en meter. Standardavvikelsen, permittiviteten och dess medelvärde beräknas över både hela uppmätta sträckan för varje mätlinje och uppdelat i delsträckor om 100m för varje mätlinje för fortsatt utvärdering.

7.1 Filtrering (borttagning av extremdata)

Det finns störningsfaktorer så som vatten, brunnar/brunnslock som ger avvikande mätresultat uppåt som nedåt. För att detta inte ska påverka medelvärdesberäkning och standardavvikelsen ska dessa tas bort i beräkning för bedömning av homogenitet, men ska finnas kvar i rådata från mätutrustningen. Enligt samlade erfarenheter av svenska asfaltbeläggningar varierar permittivitetsvärdet mellan 3,5 och 7,5, mätvärden utanför det här intervallet bör betraktas som störningar i mätning och ska tas bort. Antalet borttagna mätvärden ska anges i rapport.

Redovisning av mätresultat kan ske i den framtagna Excel-mallen i tidigare projekt som tillhandahålles av Trafikverket.

Leverans och redovisning av resultaten ska ske på ett sätt så att det är tydligt och enkelt att utläsa om ett objekt är godkänt eller underkänt. Följande minimum-krav ska alltid uppfyllas:

- Skriftlig rapport där det framgår:
 - Beskrivning av objektet med namn, län, vägnummer, start/stopp enligt löpande längd enligt NVDB, koordinater, tid av utförandet, mätlängd, och eventuella avvikelser från dessa. Koordinater ska redovisas i Sweref 99 TM.
 - Datum för mätning, väderleksförhållanden och vilken typ av utrustning som använts (med serienummer).
 - Beställarens och utförarens organisation i uppdraget.
 - Alla mätvärden som är underlag för beräkning av medelvärde på 100m sträckor och hela objektet med särskilt angivande av medelvärde och standardavvikelse.
 - Antalet bortfiltrerade mätvärden med orsak till varför det är borttaget.
 - Sammanfattning av mätoperatörens bedömning av resultatet med angivande av vilken homogenitetsnivå objektet ligger i.
 - Totalt antal 100m sträckor och angivet hur många som ligger i respektive bedömningsnivå av homogenitet.
 - Eventuella avvikelser.
 - Övriga noteringar.
 - Tolkad mätdata avseende värden på permittiviteten, både i en graf eller annan visuell bild och ett bearbetningsbart format för detaljstudie av mätresultat.

Det är utförarens ansvar att arkivera skalad och tolkad data i originalformat enligt Trafikverkets regler och anvisningar.

Bilaga 1. Bedömning av korrelation mellan permittivitet och hålrums halt.

Mätning av hålrums halt

Med hjälp av georadar är det möjligt att bestämma hålrums halten hos en asfaltbeläggning. Hålrums halten i beläggningen är beroende av proportionerna mellan luft, som har låg permittivitet, och volymandelen bitumen och stenmaterial som har högre permittivitet. Genom att mäta den sammansatta permittiviteten och känna till egenskaperna för de ingående materialen kan hålrums halten bestämmas.

Fortsatt arbete behövs för att undersöka och fastställa korrelation mellan permittivitet och hålrums halt borrhärdar. Eventuellt laboratorie-tillverkade provkroppar till olika hålrums halt. För eventuell provning av laboratorie-tillverkade provkroppar behöver man ta ut minst 50kg asfaltsmassa av aktuell typ. För att kunna bestämma permittivitet på laboratorie-tillverkade provkroppar behövs det en diameter om minst 150mm och om möjligt med motsvarande tjocklek som beläggningen läggs med i fält. Permittivitet på laboratorie-tillverkade provkroppar utförs enligt utrustningsleverantörens specifikationer eller metodföresättningar.

Referensprover från fält.

För att bestämma kalibreringskonstanten som används i beräkningen av hålrums halten måste referensprover tas ut. För varje enskilt beläggningsslag ska minst nio provkroppar med en diameter av 150mm tas och analyseras. Provkropparna väljs ut baserat på uppmätta permittivitetvärden för enskilt beläggningsslag, och placeras i områden där permittiviteten inte varierar mer än $\pm 0,1$ över en sträcka på ca 0,5m, vid större variationer ska en ny punkt väljas. Om systemet innehåller hjälpmedel för att hitta lämpliga kalibreringspunkter av låga, mellan och höga permittivitetvärden kan det med fördel användas.

Om möjligt är det önskvärt att vid provtagning även ta med minst 50mm av underliggande beläggningsslag för specialstudier i utvecklingssyfte.

Vid mätning av längsgående fog ska separata provkroppar tas för möjliggöra jämförelse mot hålrums halt enligt ovanstående. *Då den längsgående fogen normalt är "limmad" och har en annan nivå av permittivitetvärde krävs det en separat jämförelse för fogen.*

Provplatserna ska märkas ut med sprayfärg och dokumenteras med koordinater. Även temperatur ska mätas med IR-termometer och om möjligt även fuktindikering. Särskild aktsamhet ska tas för utförande provtagare att borrhärnan tas från mitten av markerad punkt och inte utanför markeringarna.

Skrymdensitet ska bestämmas enligt SS-EN för aktuellt beläggningsslag utifrån förväntad nivå av hålrums halt.

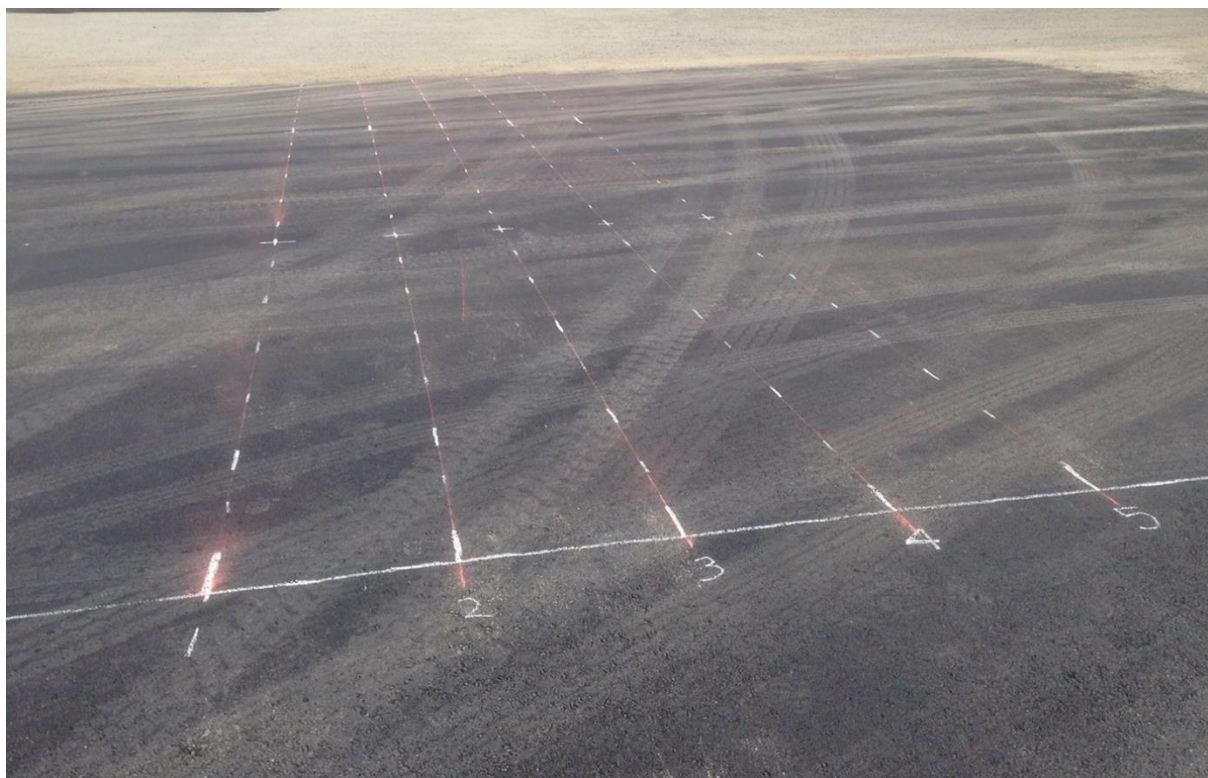
Kompaktdensiteten ska bestämmas för respektive borrhärna enligt SS-EN 12697-5. Hålrums halten för respektive borrhärna ska beräknas enligt SS-EN 12697-8.

När borrhärnorna har tagits och analyserats för hålrums ska en kalibreringskurva beräknas med permittivitet mot hålrums halt. En ekvation baserat på exponentiell regressionskurva beräknas och permittivitetvärdena kan räknas om till hålrums halt. Om R^2 för kurvan är $\geq 0,8$

är bedömningen att det finns ett samband mellan permittivitetsvärde och hålrumshalt och den uppmätta permittiviteten kan beräknas om till ett hålrum för hela mätobjektet. Är $R^2 < 0,8$ ska en särskild bedömning göras om orsak till detta och eventuell strykning av något extremdata baserat på statistisk metod. Det kan också vara aktuellt att göra förnyad kalibreringsmätning och upptagande av nya provkroppar.

Är $R^2 < 0,8$ är det osäkert att göra en bedömning av hålrumshalt men då kan variationerna i uppmätt permittivitet användas för bedömning av homogeniteten i aktuellt beläggningslager. Tidigare erfarenhet vid låga korrelationer har visat på relativt liten amplitud av permittivitetsvärdena vilket leder till att det är mer slumpen som avgör vilken nivå av hålrum som erhålls vid beräkning mot hålrumshalt.

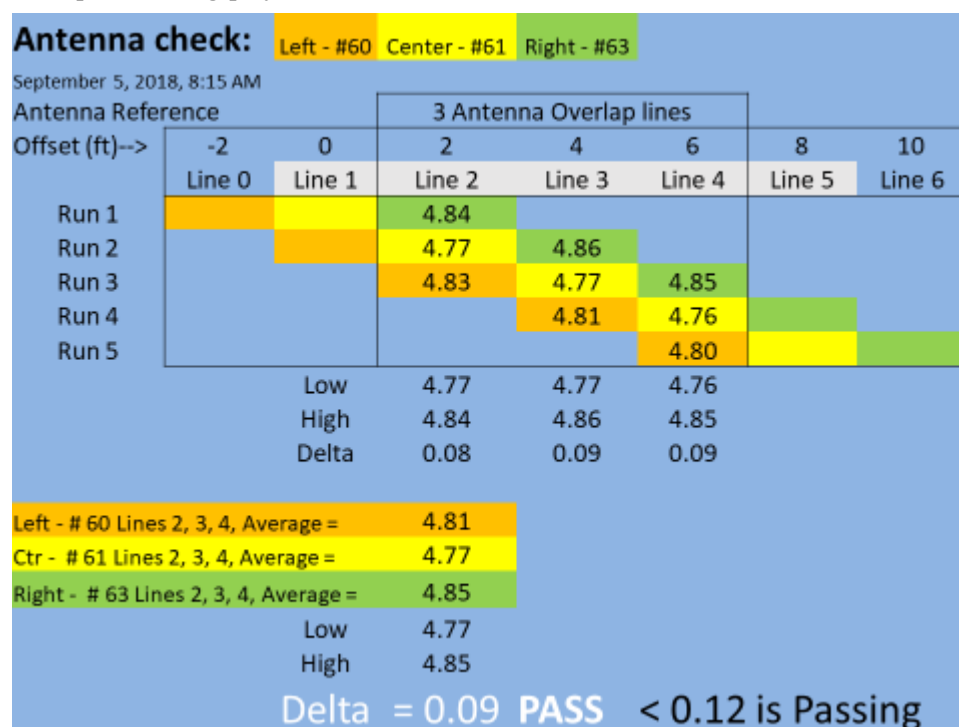
Bilaga 2.



Exempel antennverifikation i fält. Bild: Richard Giessel.

DATE	ANTENNA CHECK (LEFT REFERENCE)				
72	3 ANTENNA OVERLAP				
LATERAL BESET (FT)	0'	2'	4'	6'	8'
LINE #	1	2	3	4	5
RUN 1					
RUN 2					
RUN 3					
RUN 4					
RUN 5					
RUN	LT (#60)	C (#61)	RT (#63)		
1					
2					
3					
4					
5					
AVE					
Δ					
PASS/FAIL					
LOCATION:					

Exempel på arbetsblad för antennverifikation i fält. Bild: Richard Giessel.



Räkne-exempel på antenverifikation i fält. Bild: Richard Giessel.

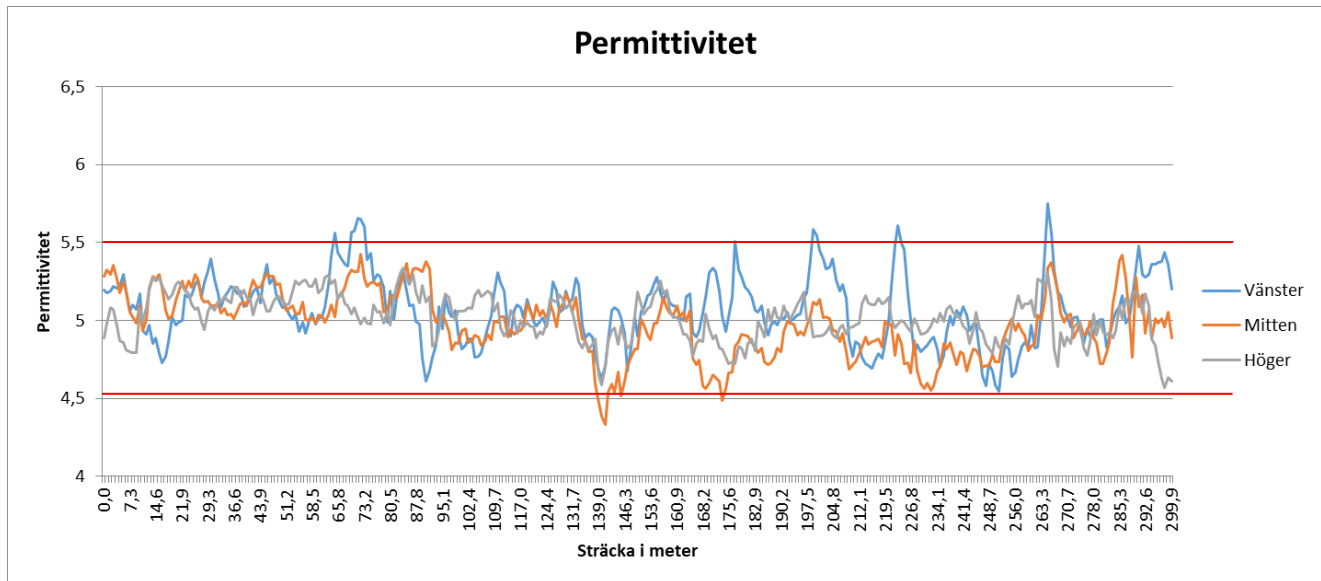
Exempel på avvikande parti från utförda georadarmätningar.

Detta dokument är framtaget som hjälpmedel för att tolka resultat av georadarmätning avseende framförallt avvikande partier, för val av borrhållpunkter för hålrumskontroll.

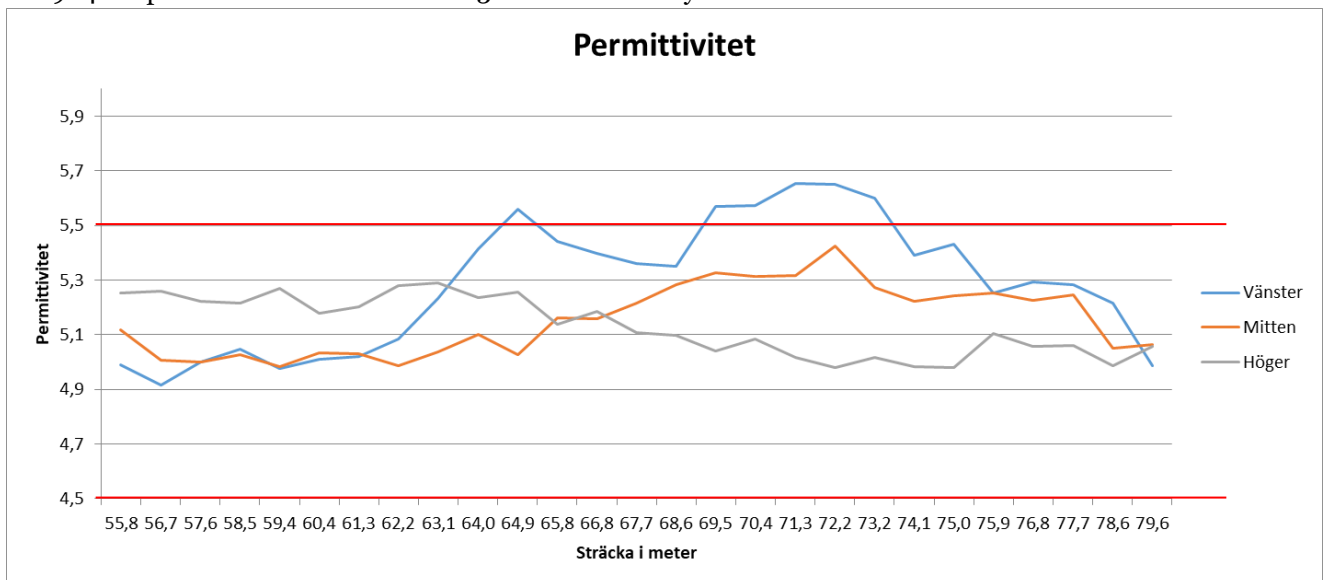
Tabell 1 Förklaring av specifika termer

Permittivitet (Dielektricitet)	Hur ett elektriskt fält påverkar och påverkas av ett elektriskt isolerande material. Nivån av permittivitet är beroende på sammansättningen av materialet. För asfaltbeläggningar är det främst bindemedelshalt, typ av stenmaterial och hålrumshalt som påverkar nivån.
Amplitud	Spridning i mätvärden mellan max. och min. värde.
Låg permittivitet	Indikation av höga hålrum.
Hög permittivitet	Indikation av låga hålrum.

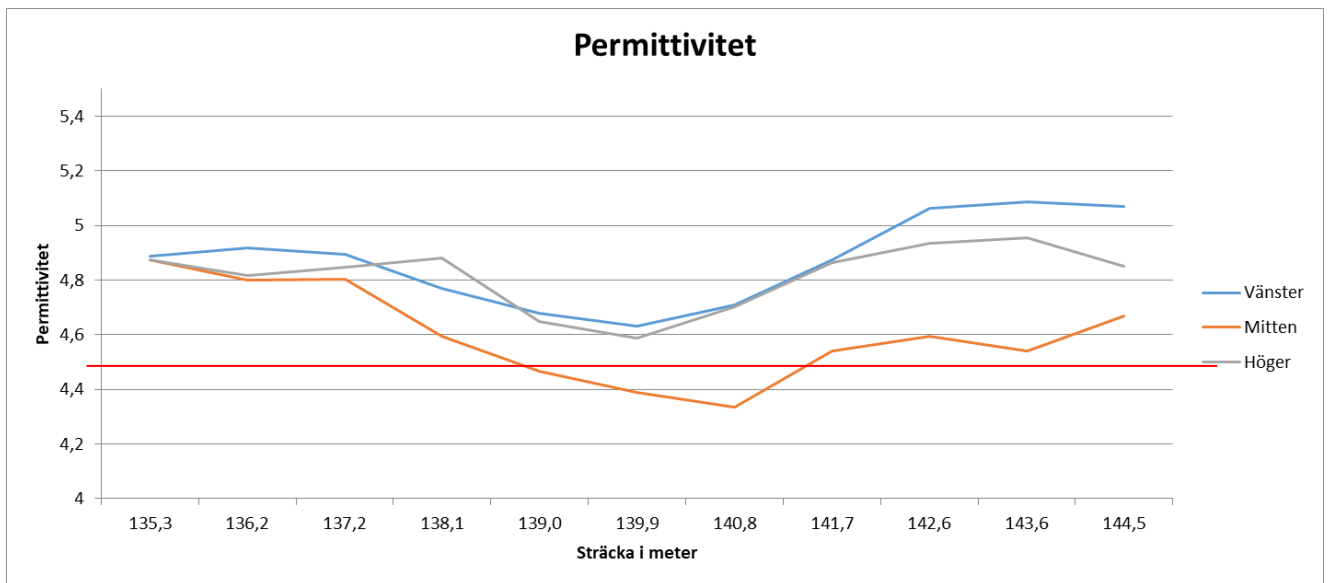
Nedan visas typexempel avseende en utförd mätning.



I grafen ovan syns en uppmätt sträcka som är 300m lång med en bredd på 4,5m som har, enligt våra erfarenheter, relativt stor variation i permittivitet med en amplitud som är >1,0. Beläggningar som uppvisar små variationer har en amplitud som är $\approx 0,5-0,6$. De röda strecken markerar på vilken nivå av permittivitet som överstiger $\pm 10\%$ från det uppmätta medelvärdet för alla mätlinjer d.v.s. 4,5 och 5,5. Det motsvarar 299 st punkter av 9846 st punkter vilket motsvarar ca 3 % av den mätta ytan.



För att hitta borrhöjningar zoomar vi in i det område som har största avvikelse uppåt och det innebär mellan 69 – 74m från start, i position för vänster antenn (vänster hjulspår). Det betyder att denna yta är tillräckligt stor för att betraktas som en avvikande yta där borrhöjning ska tas p.g.a. längden är lika med eller större än 5,0m.



Vid det avvikande området nedåt som är mindre än 4,5, mellan 139 – 141m från start i position för mitten antennen, är inte området tillräckligt stort för att varken ta borrrprov eller bedömas som avvikande parti nedåt för att ytan är mindre eller lika med 2,0m.

Det betyder att för detta objekt så ska ett borrrprov tas i området 69-74m från start i position för vänster antenn och ett borrrprov ska tas i slumpad yta någonstans över hela objektets yta.

Mätt yta motsvarar ca 450m² av totala utförda 1350m² (300m * 1,5m, varje mätlinje har en bredd på 0,5m). Av den totala uppmätta ytan av 450m² är 2,5m² utanför 10 % gränsvärde i permittivitet (längden för varje avvikande yta * bredden av mätlinjen, 5m*0,5m), alltså över 5,5 och under 4,5. Det motsvarar 0,5 % av total uppmätt yta som är underlag för eventuellt vite vid avvikande hålrumshalt.

Tabell 2 Exempel på andel avvikande mätpunkter från olika mätobjekt baserat på ±10 % avvikelser från medelvärdet.

	Antal mätpunkter	Underkända mätpunkter	Andel underkända mätpunkter
Objekt 1	417858	3981	0,9 %
Objekt 2	78576	30	0,04 %
Objekt 3	382845	2355	0,6 %
Objekt 4	15000	8	0,05 %
Objekt 5	89547	2266	2,5 %

Ovanstående tabell visar på totala andelen avvikelser såväl uppåt som nedåt från mätta objekt som visat sig ha såväl små variationer som stora variationer. I antalet underkända mätpunkter ingår delar som är kortare än 2m, skulle dessa filtreras bort skulle andelen underkända mätpunkter minska. Som framgår av tabellen är totala andelen underkända ytor låg, till mycket låg.

Vår erfarenhet kring georadarmätning är att objekten inte har avvikelser av den dignitet att de i större omfattning inte faller utanför de kriterier som är uppsatta i dokumentet för pilotmätningar 2020.



Homogenitetskontroll av nyproducerade asfaltsbeläggningar med Georadarteknik. Implementeringsprojekt 2020.

Sammanfattning och bakgrund.

Trafikverket har sedan beläggningssäsongen 2016 drivit ett utvecklingsprojekt där man undersökt möjligheten att med georadarteknik studera variation i packning och homogenitet i nya asfaltsbeläggningar. Från 2017 har projektet drivits gemensamt med beläggningsbranschen som ett kombinerat Trafikverket/SBUF projekt. Från 2019 gick projektet in i en ny fas där såväl Trafikverket och entreprenörerna utfört egna mätningar med ett flertal utrustningar. Erfarenheterna från projektet visar att georadartekniken mycket väl identifierar variationer i beläggningar, både tvärled och längdled.

När det gäller att korrelera resultat av hålrums halt på upptagna borrhärdar mot uppmätt permittivitet på beläggningen har det visat sig att det finns en viss osäkerhet och spridning i korrelation.

Men tekniken är så pass intressant att vi gemensamt bedömt att den kan användas i ett begränsat antal projekt med fokus på studier av homogenitet, d.v.s. variationer i mätvärdet permittivitet (dielektricitet). Nivån av permittivitet är beroende på sammansättningen av materialet. För asfaltsbeläggningar är det främst bindemedelshalt, typ av stenmaterial och hålrums halt som påverkar nivån.

Med georadarmätning får man en mer objektiv och rättvisande bedömning av utfört beläggningsarbete avseende variationer i såväl sammansättning och packningsarbete. Målsättningen med att gå över till ny teknik med georadar är att skapa förutsättningar att minimera antalet borrhärdar som tas upp. Men för att kunna säkerställa att utförd beläggning uppnår förväntad kvalitet krävs fortfarande borrhärdar för analys av hålrums halt.

Vi rekommenderar vid val av pilotobjekt för 2020 att man inte väljer objekt där det ingår borrhärdar för andra parametrar än hålrums halt.

Om objektet innehåller provning av funktionella egenskaper ska detta utföras på laboratorietillverkade provkroppar packade till 98 % ± 0,5 % av receptvärdet. Detta kan vara marshallstampade, gyrotoriskt packade eller borrhärdar från plattor. Tillverknings sätt ska ske enligt överenskommelse mellan entreprenör och beställare.

Baserat på tidigare erhållna erfarenheter föreslås nedanstående för utvärdering av tekniken i lämpliga pilotprojekt 2020.

Rekommendationer för val av pilotobjekt 2020

- Heltäckande beläggningsåtgärd på minst ca 2km längd. Alternativt mer än 750m per skift heltäckande beläggningsåtgärd vid nattarbete eller i storstad.
- Lämpliga beläggningstyper för mätning är jämntjockt slitlager alternativt jämntjockt bindlager och eventuellt bundet bärlager.
- Alla massatyper med nominell tjocklek om minst ca 30mm kan utvärderas dock inte TSK-beläggningar eller andra beläggningstyper som kan innehålla fukt eller vatten samt asfaltmassor som är tillverkade med stålslagg. Beläggningar som utförs med kolfiber/stålarmering är inte lämpliga pilotobjekt för mätning 2020.
- Utvalt beläggningsobjekt för georadarmätning ska framgå av MF.

Mätförfarande för permittivitet (homogenitet) pilotprojekt 2020.

- Mätning ska ske enligt föreskriven teknisk rapport avseende erfarenheter kring georadar inklusive mätförfarande för implementeringsprojekt daterad november 2019.
- Utrustningskrav framgår av föreskriven teknisk rapport avseende erfarenheter kring georadar inklusive mätförfarande för implementeringsprojekt daterad november 2019.
- Mätning ska utföras i anslutning till produktionen inom 5 arbetsdagar på torr yta med en ytemperatur under 60 °C, om möjligt innan ytan trafikeras.
- Ansvarig för mätningen är beläggningsentreprenören med egen eller hyrd utrustning. Kostnaden för mätning ska ingå i kontraktssumman. Trafikverket kan i ett antal projekt göra jämförande mätning med egen utrustning som bekostas av Trafikverket.
- Mätning från beläggningsobjektet ska redovisas så att uppmätt permittivitet redovisas som ett medelvärde om 1 meter i längdled/mätlinje. För beläggningar med läggningsbredd <4,5m ska mätas med tre mätlinjer (höger-, vänster hjulspår och mitt-i-mellan). Beläggningsdrag mellan 4,5m och 6m ska mätas med minst 6 mätlinjer och beläggningsdrag över 6m ska mätas med minst 9 mätlinjer, fördelade över beläggningsdragets bredd.
- Mätutrustningens digitala rådata (.csv/.txt/.xlsx) från utförd mätning ska överlämnas till beställarens utsedda person senast dagen efter utförd mätning.
- Vid användandet av georadarteknik ska hela objektets längd mätas. Objektet delas in i delytor för varje 10 000m alternativt 45 000m²

Bedömning av mätresultat av homogenitet.

Beläggningsens homogenitet (variation) bedöms utifrån erhållna resultat avseende permittivitet. Objektet bedöms som helhet och delsträckor om 100m. Bedömning baseras på skillnad av uppmätt permittivetsvärde mellan mätlinjer och spridningsbild i längdled. Det finns idag inte tillräckligt med underlag för att sätta fasta kravgränser avseende bedömning av homogenitet till säsong 2020. Ett särskilt dokument kommer att tas fram som hjälpmedel avseende preliminär bedömning av homogenitet inför mätsäsong 2020.

Bedömning av packningsarbete (hålrumshalt).

Om mer än 90 % av hela delsträckans med en längd upp till 10 000m alternativt 45 000m² mäts med georadar, utgår regelmässig hålrumskontroll enligt TDOK 2013:0529 Bitumenbundna lager om varannan eller var tredje delyta på 3000m². För objekt längre än 10 000m påbörjas en ny delsträcka upp till 20 000m o.s.v. För att kontrollera att objektet har rätt kvalitet enligt Trafikverkets regelverk (TDOK 2013:0529 Bitumenbundna lager) ska ett begränsat antal borrhärdar tas upp för kontroll av hålrumshalt. Vid bedömning av resultat hålrumskontroll ska medelvärde av såväl A- och B- prov beräknas.

Om georadarmätningen visar på små variationer i permittivitet som inte överstiger ± 10 % från objektets uppmätta medelvärde från alla mätlinjer, så ska borrhning ske i två slumpvis utvalda punkter över hela ytan med ett A- och B-prov.

Om georadarmätningen visar på variationer i permittivitet större än ± 10 % från objektets uppmätta medelvärde från alla mätlinjer riktas hålrumskontrollen till de ytor med största area som avviker uppåt respektive nedåt.

Om enbart avvikelse finns åt ett håll så riktas provtagning mot största yta med avvikelse samt en slumpad yta över hela objektet.

För att få en uppfattning av hålrumshalten i övriga ytor rekommenderas att man tar upp prov från sektion som ligger i närheten av uppmätt medelvärde av permittivitet, om denna provning ska ske ska det framgå av förfrågningsunderlaget.

Partier kortare än 5,0 meter betraktas inte som ett avvikande parti där borrhning kan ske, men räknas in totala ytan som bedöms avvikande om den sammanlagda längden är mer än 2,0 meter. Om det inte finns partier som är längre än 5,0 meter betraktas objektet att det inte har några avvikande partier för hålrumskontroll. D.v.s. objektet betraktas ha små variationer i permittivitet som inte överstiger ± 10 % från objektets uppmätta medelvärde från alla mätlinjer och borrhning slumpas till två punkter över hela ytan.

Provtagning av borrhärdar.

Val av provtagningsplats utförs av entreprenör som baseras på utvärdering av erhållna mätresultat i direkt anslutning till mätningen. Val av provtagningsplats ska dokumenteras skriftligen med anledning till vald provplats.

Provkroppar ska inte tas upp närmare än 50 cm från skarv eller beläggningsskant. Om borrhning inte får ske i hjulspår ska detta framgå av förfrågningsunderlaget. Upptagning av provkroppar får inte ske på broar.

Det rekommenderas att en statisk mätning av permittiviteten görs på den punkt som ska borrh, om det är praktiskt genomförbart.

Bedömning av resultat hålrumshalt borrhärdar.

Resultat av hålrumshalt borrhärdar från respektive yta som provas bedöms mot beläggningstypens normala kravgränser enligt TDOK 2013:0529 Bitumenbundna lager. Om såväl avvikande partier uppåt som nedåt uppfyller ställda krav anses hela beläggningsojektet vara godkänt avseende hålrumshalt.

Om avvikande parti inte uppfyller kravnivån för aktuell beläggning ska särskild utredning i samråd mellan beställare och entreprenör göras för att säkerställa att objektet som helhet uppfyller ställda krav.

Om ett objekt utan avvikande ytor avseende permittivitet inte uppfyller ställda krav så rekommenderas en särskild utredning mellan beställare och entreprenör för att säkerställa omfattningen av avvikande hålrumshalt t.ex. provtagning på delytor om 3000m².

Ekonomisk reglering

Homogenitet.

Idag har vi inte tillräckligt underlag för att göra ekonomisk reglering avseende homogenitet.

Avvikande hålrumshalt utanför gällande gränsvärden enligt TDOK 2013:0529.

Nedanstående avdragsregler avseende hålrumshalt gäller för pilotprojekt 2020 som mäts med georadarteknik.

Vid avrundnings av resultat ska avrundningsregel B enligt SS 01 41 41 användas.

Det beräknade medelvärdet av A- och B-prov ska användas för bestämning av värdeminskningens storlek.

Ytan av avvikande partier uppåt respektive nedåt gällande permittivitet summeras så att en total yta med uppåt respektive nedåt av hela objektet beräknas.

Uttaget prov representerar totala ytan av avvikande parti uppåt respektive nedåt, d.v.s. summan av alla avvikande delytor uppåt respektive nedåt beräknas. Avvikande yta uppåt respektive nedåt bedöms var för sig.

En mätlinje motsvarar 0,5m beläggning i bredd när storlek på area beräknas.

Värdeminskningsavdrag om 10 % av á-priset utgår för storleken av beräknad avvikande yta inom området 0,5-2,0 % avseende hålrumshalt. Avvikelser större än 2 % betraktas inte som mindre avvikelser utan hanteras som väsentligt fel.