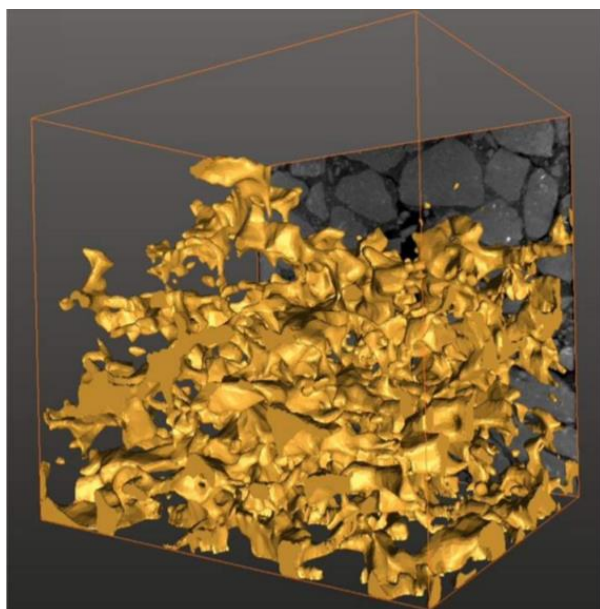


Röntgenundersökning av bullerreducerande beläggningar



**Roger Nilsson,
Skanska Sverige AB**

Datum

2020-04-08

Författare

Roger Nilsson - Skanska

Skanska Sverige AB

Månskärsvägen 10A

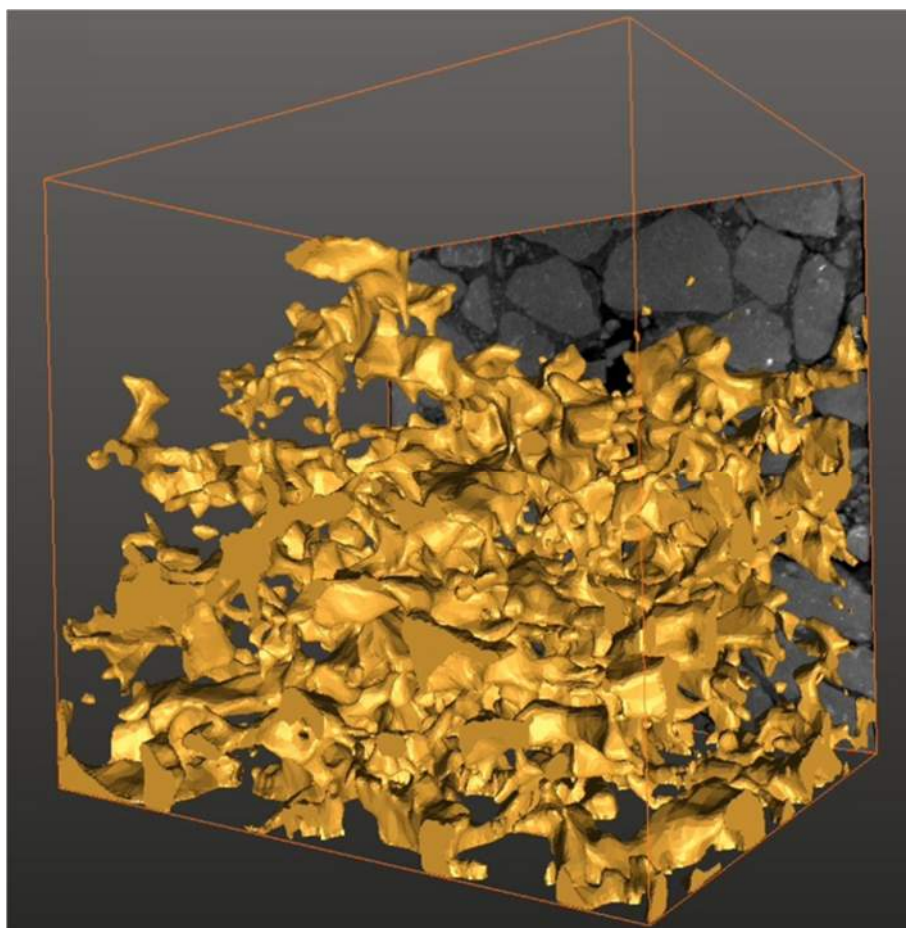
141 75 Stockholm

Tel: 010-448 78 76

Beteckning

12669

Röntgenundersökning av bullerreducerande beläggningar.



Innehållsförteckning

Förord.....	2
Sammanfattning	3
1 Inledning.....	5
1.1 Bakgrund.....	5
1.2 Igensättning av porstruktur	6
1.3 Syfte och mål.....	7
2 Datatomografi och digital bildanalys	8
2.1 Datatomografiteknik	9
2.2 Tomografidata	12
2.3 Digital bildbehandling och analys	13
2.4 NSI X5000 systemet vid KTH.....	14
3 Analys och Resultat	20
3.1 Rengöring av bullerreducerande beläggningar	20
3.2 Provsröcka E4 Huskvarna.....	24
3.3 Analys av porositet	27
4 Slutsatser	34
Referenser.....	35
Bilagor:.....	36

Förord

Föreliggande rapport sammanfattar resultaten från ett branschgemensamt projekt där rengöringseffekten av bullerreducerande beläggningar har utvärderats med CT-skanning (datortomografi). Provkroppar från bullerreducerande beläggningar har analyserats före och efter högtrycksrengöring inklusive vacuumsugning med VÄGREN.

VÄGREN är en av Skanska speciellt utvecklad rengöringsutrustning för bullerreducerande beläggningar där igensatta porer högtryckstvättas och lösgjorda föroreningar sugs upp i en och samma process.

CT-scanning har utförts vid KTH med en avancerad industritomograf, NSI X5000, som integrerar röntgenbestrålning, bilddetektering med en kraftfull beräkningsdator för numerisk bildbehandling. Den dominerande fördelen med CT-scanning är möjligheten att "se in" i studerat material så att den inre strukturen kan studeras och analyseras utan att ingående material eller porstruktur påverkas. Denna undersökningsmetod medför att kunskap om igensättningsgrad samt effekt av högtrycks- och vacuumrengöring inuti beläggningar kan erhållas vilket tidigare inte varit möjligt. Eftersom analysen icke är förstörande kan samma provkroppar återanvändas vid andra eller kompletterande undersökningar.

Undersökningarna har utförts vid Skanska Teknik – Vägtekniskt Centrum samt KTH. Projektledare har varit Roger Nilsson som har varit med vid mätningar och analyser.

Projektet har haft en referensgrupp med representanter från Trafikverket, NCC, KTH, VTI samt Skanska. Referensgruppen har till stor del bestått av personer involverade i föregående SBUF-projekt, 11640 "Bullerdämpande beläggningar – utvärdering och uppföljning av provsträckor på E4 och E18" samt SBUF-projekt, 12020 & 12395 "Funktionell rengöring av bullerreducerande beläggningar - etapp 1 & 2".

Referensgrupp för diskussioner och granskning har varit: Torbjörn Jacobsson (Trafikverket), Jonas Ekblad (NCC), Mats Gustavsson (VTI), Johan Hugolf (Skanska Industrial Solution) samt Dennis Jelagen (KTH).

Projektet har huvudsakligen finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Trafikverket och Skanska. Projektet har varit en del i att utveckla bullerreducerande beläggningar samt utvärdera rengöringsmetoder för att vidmakthålla de bullerreducerande egenskaperna.

Resultaten från projektet har presenterats vid Asfaltdagarna, Transportform samt utländska konferenser. Till projektet har även ett examensarbete varit knutet.

Ett varmt tack för stort engagemang till alla involverade i projektet.

Roger Nilsson

Stockholm, april 2020

Sammanfattning

Syftet med projektet är att med hjälp av röntgenundersökning, CT-skanning, studera den inre porstrukturen hos asfaltprovkroppar tagna från en provsträcka bestående av bullerreducerandebeläggningar på E4:an utanför Huskvarna.

Det finns ett stort intresse för bullerreducerande beläggningar som reducerar bullret vid källan, dvs buller som genereras mellan däck och vägbana. Denna typ av buller har blivit allt mer relevant då buller från motorer minskar med ökat antal elfordon ute på vägarna.

Den bullerreducerande förmågan beror främst på beläggningsens porstruktur samt textur. Dessvärre minskar den procentuella andelen hålrum med tiden, det är främst partiklar och vägdamm som fastnar i porstrukturen och medverkar till igensättning av det kommuniserande hålrummet. Denna igensättning accelereras i de nordiska länderna på grund av frekvent användande av dubbdäck som river upp partiklar och vägdamm. För att minska dubbdäcksslitaget används ofta beläggningar med större maximal stenstorlek, vilka dock ökar däck/vägbane buller. En annan faktor som kan bidra till minskat hålrum är relaterat till efterpackning av beläggningsen. Faktum att bullerreducerande beläggningar i förhållande till mer traditionella beläggningstyper (exv. ABT/ABS mm.) försämras i förtid (kortare teknisk- och akustisklivslängd). Vidare kräver dessa beläggningstyper generellt mer underhåll (tex. rengöring) vilket motverkar en bredare användning.

Ovannämnda problem belyser vikten att förstå till vilken grad igensättningsprocessen av beläggningsens porstruktur kan minimeras samt återställas med riktade underhållsåtgärder. För att förbättra den akustiska livslängden har olika typer av rengöringsutrustningar utvecklats. Utvärderingen från dessa tester har inte varit entydiga, vilket har lett till att effekterna av rengöring har ifrågasatts. Det finns således ett behov av att kunna utvärdera porstrukturen före och efter rengöring.

Föreliggande rapport har jämfört borrhärdor från en tvålayersbullerreducerande beläggning på E4 utanför Huskvarna, med syftet att utföra en djupanalys av borrhärdornas porstruktur. Skanskas egenutvecklade underhållsfordon, VÄGREN (VR), optimerad för nordiska förhållanden användes för att rengöra en sträcka på ca 100 m av E4:an. Borrhärdorna togs upp mellan hjulspår före och efter rengöringen. Provkropparna analyserades med en högupplöst röntgendatortomograf (CT-skanning) för att skapa CT-bilder. Bilderna erhållna från datortomografen bearbetades till 3D-bilder med bildanalysprogrammet, Avizo®Fire.

Porositeten som funktion av beläggningsdjup har studerats för att analysera effekten av den valda rengöringsmetoden. Resultaten visar att:

- CT-skanning ger en ny samt djupare insikt om hur och var en öppen beläggning sätts igen.
- Analyserade provkroppar indikerar en god djupverkande effekt av rengöringen.
- Skanskas rengöringsfordon VÄGREN återställde en del av ursprunglig porstruktur på samtliganivåer för de tvättade provkropparna. Andel kommuniserande hålrum ökade med ca 10 % efter rengöring.

- Analyserade provkroppar visar på att en effektiv rengöring kan återställa en stor del av porositeten.
- Inga synliga skador på den rengjorda sträckan orsakade av VÄGREN har noterats.
- Kunskap erhållen från denna studie kan bidra till en ökad förståelse om mer optimal användande av bullerreducerande beläggningar för nordiskt klimat. Dock behövs det mer forskning för att fastställa effektiviteten av rengöringsmetoden och hur den påverkar den tekniska samt akustiska livslängden.
- Långtidseffekter och långtidsuppföljning (effekt av rengöring, frekvens av tvättning) bör studeras vidare.
- Bullerreducerandebeläggningar bör tvättas regelbundet och proaktivt innan portsystemet sätts igen.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Miljöpåverkan har blivit ett allt större problem i samhället. Buller- och partikelemissioner är inte bara ett stort miljö- och hälsoproblem utan påverkar också möjligheten att bygga ut infrastrukturen samt bostäder. I Sverige bedöms drygt 2 miljoner människor vara utsatta för trafikbuller som överskrider riksdagens riktvärden för ekvivalenta ljudnivåer [1]. Hur många som påverkas av partiklar är inte känt.

Resultat från mätstationer på bland annat Hornsgatan och Sveavägen visar en generellt nedåtgående trend av PM₁₀ och PM_{2.5}. halterna på grund av åtgärder som t.ex. dubbdäcksförbud samt regelbunden renspolning av gatorna.

Om inte nivåerna hålls under kravnivåer hotar EU med höga viten i mångmiljonklassen. Flera forskningsstudier visar på samband mellan exponering av buller- och partikelemissioner samt förtidiga dödsfall per år. Minst 300 för tidiga dödsfall per år inträffar i Sverige till följd av buller från vägtrafik [2], och årliga antalet dödsfall till följd av luftföroreningarna uppskattas till 7600 för 2015 [3].

Det finns därför ett stort behov av att kvantifiera kvalitativa åtgärder för att reducera miljöeffekter som buller- och partikelpåverkan.

Under de senaste åren har en allt större uppmärksamhet riktats mot att reducera buller direkt vid källan, dvs. i kontaktytan mellan däck och vägbeläggning. Nyutvecklade beläggningar för nordiska förhållanden har visat sig att ge bättre bullerreduktion samt betydligt bättre livslängd än tidigare försök.

Inom ramen för ett SBUF-projekt 11640, "Bullerdämpande beläggning – Utvärdering & uppföljning av provsträckor på E4 & E18" har denna typ av beläggningar utvärderats och testats för att öka kunskapen inom området samt att de på sikt skall leda till förbättrade möjligheter att utvärdera och prediktera studerade beläggnings typers bullerreducerande egenskaper samt hur dessa skall, produceras, underhållas och återtinnas. I ett annat SBUF- projekt, 12020 samt 12395, "Effektiv rengöring av bullerreducerande beläggningar", etapp I och II, har olika rengöringsutrustningar utvärderats. Preliminära resultat visar att effektiv rengöring kan uppnås genom regelbunden högtryckstvättning med kombinerad dammsugning. En helt ny patenterad rengöringsutrustning har utvecklats av Skanska och kallas VÄGREN. Denna utrustning har stor potential att bibehålla den akustiska livslängden. Vidare har utrustningen visat sig att kraftigt reducera partikelhalten (PM₁₀) på rengjorda ytor i en jämförelse med andra rengöringsutrustningar på Barkarby flygfält [4].

Kunskap om rengöring av bullerreducerande beläggningar är mycket begränsade för svenska förhållanden. I många länder utförs renspolning regelbundet men ingen bulleruppföljning eller partikelmätning utförs vilket innebär att det finns begränsad kunskap om dess effektivitet samt långtidseffekter. Denna kunskapsbrist försvårar bredare implementering av bullerreducerande beläggningar. Vidare försvåras införande av funktionella krav på rengöring vid upphandling av bullerreducerande beläggningar.

Det finns därför ett stort behov och potential för att öka kunskapsnivån inom det aktuella området för både beställare, konsulter och entreprenörer genom att utveckla funktionella parametrar vid rengöring av bullerreducerande beläggningar.

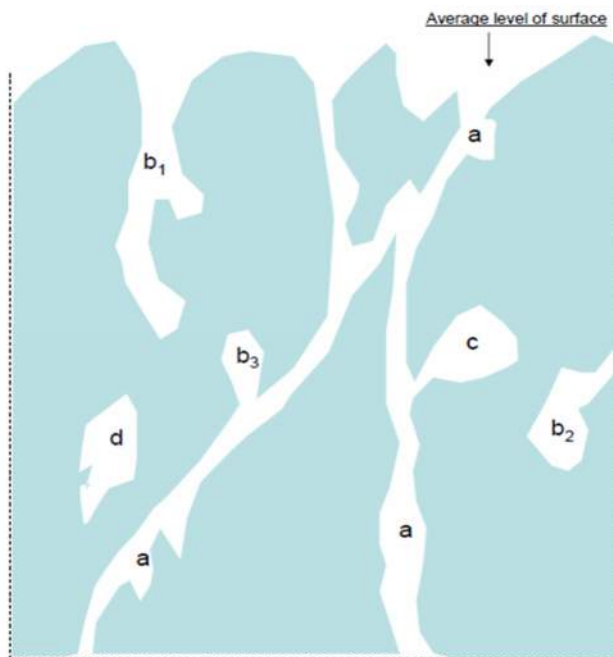
På sikt bidrar detta till en kunskapsuppbyggnad i hela branschen om hur bullerdämpande beläggningar skall underhållas samt vilka krav som skall ställas på dem. I förlängningen bidrar detta projekt till en bättre bullermiljö för alla.

1.2 Igensättning av porstruktur

Bullerreducerandebeläggningar kan karakteriseras som ett heterogent material som består av mastix (bindemedel och filler), ballast samt hålrum. Beläggningen funktionella egenskaper styrs av stenmaterial, bitumen samt hålrummets distribution i materialet. Stenmaterialet och mastixen påverkar främst den strukturella hållfastheten och materialets hållbarhet. Hålrum och porstrukturen påverkar bl.a. fuktkänslighet samt potentiell bullerreduktion (igensättning av porstruktur). Vid låga temperaturer och snabb belastning uppvisar materialet elastiska egenskaper. Vid höga temperaturer och långsam belastning, uppvisar materialet mer visko-elastiska-plastiska egenskaper varvid materialet blir mer benäget för permanenta deformationer. Under trafikbelastning kan det ske en omlagring av asfaltsbeläggningen inre struktur beroende på belastningens storlek och varaktighet. Denna omlagring kan påverka beläggningens porstruktur. En annan faktor som kan påverka porstrukturen är igensättning av porerna med partiklar och vägdamm.

Beläggningens inre struktur är svårt att karakterisera på grund av korngraderingen, orientering och antal kontaktpunkter mellan ingående stenar, egenskaper för kontaktytan mellan ballast och bitumen, samt hålrummet/porstrukturen.

I Figur 1 illustreras en fiktiv asfaltbeläggning med sex olika typer av hålrum identifieras (a, b1, b2, b3, c samt d). Summan av samtliga sex hålrumstyper kan definieras som beläggningens totala hålrum. Med avseende på bullerreduktion och permeabilitet är det främst de kommunicerande hålrummen som är viktiga (dvs. typ a, b3, och c). Figur 1 tydliggör varför bullerreduktionen samt permeabiliteten påverkas när porstrukturen sätts igen. I denna studie analyseras och utvärderas det totala- samt de kommunicerande hålrummen.



Figur 1. Schematisk illustration av sex olika hålrumstyper i en fiktiv beläggning [5].

Bullerreducerandebeläggningar karakteriseras av hög porositet/hålrum vilket ger en god bullerreduktion. Beläggningen kan bestå av ett eller två lager med hålrum upp mot 25-30%. Om porstrukturer sätts igen minskar den dränerande förmågan samt den bullerreducerande effekten.

1.3 Syfte och mål

Projektets övergripande syfte är att öka kunskapen om hur bullerreducerande beläggningar sätts igen av vägpartiklar samt hur effektiv rengöring påverkar buller och partikelemissioner.

Målet har varit att testa och utföra rengöring av bullerreducerande beläggningar i fält och labb med potentiella rengöringsutrustningar. Borrkärnor har tagits upp från sträckor med tvålayersbullerreducerande beläggningar på E4 förbi Huskvarna. Borrkärnorna har analyseras visuellt samt med hjälp av datortomografi. Med datortomografi ges möjlighet att "se in" i provkropparna utan att förstöra eller påverka provkropparna. Detta medför att porstruktur samt igensatta porer kan lokaliseras och analyseras.

Syftet med projektet är vidare att öka kunskapen inom det aktuella området genom bullermätningar före och efter rengöring. Analys av borrkärnor med hjälp av datortomografi. Syftet är vidare att kunskaperna på sikt skall leda till förbättrade möjligheter att utvärdera utförda rengöringsmetoder. Kunskap om akustisk livslängd kommer att bidra till att ekonomiska aspekter kommer att kunna beaktas.

Projektet förväntas öka kunskapen om de faktorer som bidrar till effektiv rengöring samt med vilken frekvens de bör utföras. Arbetet förväntas också att bidra med kunskapsuppbyggnad för utvecklande av framtida funktionskrav att tillämpa i kommande regelverk och kvalitetssystem.

2 Datatomografi och digital bildanalys

I detta avsnitt diskuteras datortomografi som en potentiell metod för undersökning av porstrukturen (hålrummet) genom att studera sammansättning och uppbyggnad hos upptagna asfaltprovkroppar.

Datortomografi, oftast förkortat DT alternativt CT (X-ray computed tomography), eller skiktröntgen, är en icke förstörande observationsteknik som används för att visualisera det inre av solida föremål (exv. metall, stenar, trä, betong samt asfaltbeläggningar). Syftet med CT-scanning är att erhålla digital information om objektets interna struktur på en mikroskopisk detaljnivå. Datortomografi är en särskild form av röntgen som skapar mycket detaljerade bilder (s.k. CT-bilder).

En CT-bild kallas även skiva. Varje skiva har sin tillhörande tjocklek och utgör därför en volym. CT-bilder representeras med volymelement (voxels) till skillnad från tvådimensionella bildelement (pixels).

Den stora användbarheten hos röntgenstrålningen inom medicinsk och annan diagnostik beror på dess förmåga att tränga igenom föremål som är ogenomträngliga för vanligt ljus och att denna förmåga uppvisar mycket stora variationer för olika slag av material. Figur 2 visar ett exempel på en sjukhustomografi.

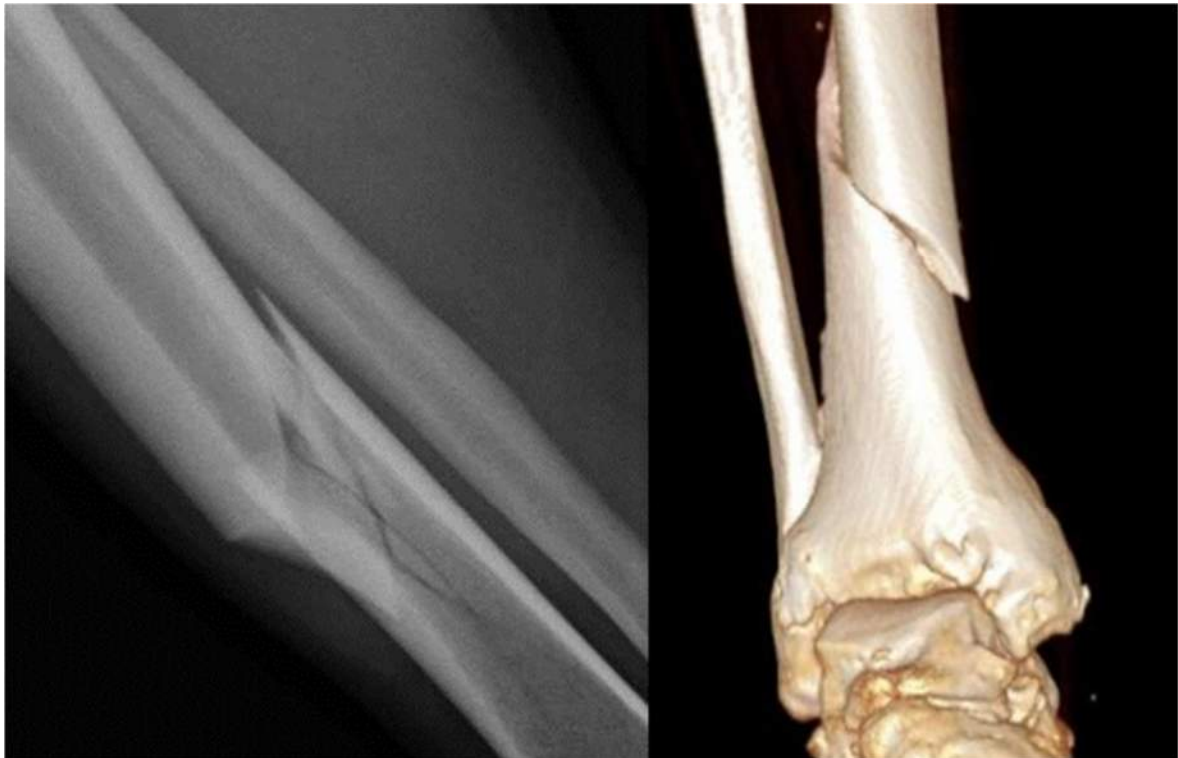


Figur 2. Exempel på modern sjukhustomografi (Bild: Karolinska universitetssjukhuset.)

Datortomografi är en vidareutveckling av den vanliga röntgenapparaten (slätröntgen) och är en uppskattad undersökningsmetod på moderna sjukhus. Inom medicinsk diagnostik används datortomografi för att avbilda patienten i tre dimensioner (3D), istället för som vid slätröntgen erhålla en tvådimensionell (2D) bild där täthetskillnaderna har överlagrats och därmed inte kan särskiljas. I Figur 3 illustreras skillnaden mellan en 2- och 3-dimensionell bild av ett benbrott. Det är onekligen så att 3D bilden ger betydligt tydligare samt vidare information om frakturen. En annan fördel är att 3D modellen går att rotera så att skadan kan studeras från olika vinklar.

Under de senare decennierna har utrustningen och analysverktygen förfinats för att runt 1980-talet utvecklas för industriellt bruk vilket bidrog till att göra tekniken mer tillgänglig inom andra områden, som till exempel materialforskning. Sedan 2011 finns en toppmodern X5000-CT skanner på KTH, se Figur 4.

Innan dessa industritomografer blev tillgängliga fick de första CT-skanningar av asfaltkroppar utfördes på sjukhus i mån av tid när utrustningen var ledig.



Figur 3. Jämförelse mellan 2D och 3D återgivningar av röntgenfotograferad benfraktur

2.1 Datatomografiteknik

I det följande ges en kortfattad sammanfattning av tomografitekniken och dess grundläggande principer [6-8].

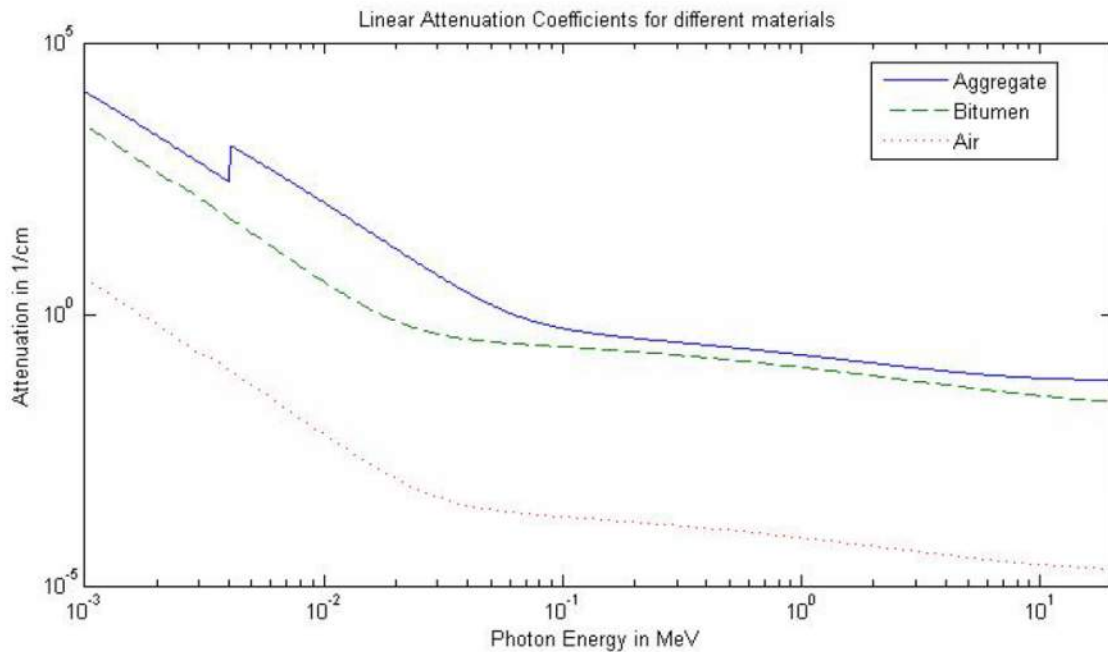
Datortomografisystem kan kategoriseras efter användning inom medicin och industritillämpningar. System för medicinsk tillämpning används för att återge bilder av mjuka vävnader och ben för diagnos och prognos. Utveckling av medicinska sjukhustomografisystem har också lett fram framväxt av system för användning inom industrin. Specialbyggda högupplösta industritomografer skiljer sig från konventionella sjukhustomografer främst genom att röntgenstrålning med högre energi och mer genomslagskraft kan användas varvid detaljer med till någon tiondels mikrometer i storlek kan återges, även när föremål av material med hög densitet studeras. Industriella CT-system används i dag inom olika fält och discipliner, såsom geovetenskap, konstruktionsteknik och materialkunskap mm.



Figur 4. Datortomografiutrustning, NSI X5000 på KTH.

Kvaliteten på den skannade bilden är ett mått på signal/brus förhållandet, skivtjockleken samt kontrastupplösning. Dessa egenskaper beror på typ av strålningskälla, storlek på röntgendetektorn samt på skanningskonfigurationen. De variabler som avgör hur effektiv en röntgenkälla kommer att vara för en viss uppgift är storleken på fokallängd, spektrum av röntgenenergier som genereras samt röntgenintensiteten. Förmågan hos röntgenstrålarna att särskilja mellan olika material beror på deras respektive linjära attenueringskoefficienter (materialets förmåga till attenuering/absorption/dämpning av strålningen). De studerade materialens uppskattade koefficienter kan användas för att bestämma den energinivå som kommer att vara mest lämplig vid aktuell CT-skanning. Den linjära attenueringsefficienten för en materialvolym anger hur kraftfullt materialet absorberar eller sprider ljus vid en viss våglängd per massenhet.

Diagrammet i Figur 5 visar exempel på linjära attenueringskoefficienter som funktion av röntgenstråleenergi för ingående beståndsdelar i beläggingsmaterial (ballast, bitumen och hålrum). Det framgår att de linjära koefficienterna för ballast och bitumen är olika men uppvisar konvergerande trend för energiintensiteter lägre än 200 kV, för att bli parallella med konstant trend för högre intensitet. En god åtskillnad mellan ballast och asfaltmastix kan således erhållas när asfaltmaterial skannas med energinivåer under 200 kV. Detta är fallet för relativt små provkroppar, men högre energinivåer krävs för att tränga igenom provkroppar större än ca 80 mm. I den slutliga CT-bilden kommer materialet med den högsta attenueringskoefficienten, det vill säga ballast, att representeras av ljusa gråskalor medan materialet med den lägsta koefficienten, det vill säga hålrum, kommer att visas som mörka gråskalor. Asfaltmastix kommer att visas som gråskalor mellan de två ytterligheterna.



Figur 5. Linjära attenueringskoefficienter för ingående beläggningsmaterial [8].

Attenueringskoefficienten är en storhet inom matematiska beräkningar av hur mycket strålningen dämpas beroende på material den åker genom och hur tjockt det är.

Röntgenstrålarna attenueras, det vill säga försvagas, i olika grad beroende på vilken typ av material de passerar igenom. Material med hög densitet försvagar röntgenstrålningens intensitet mer än material med låg densitet. Den information som registreras dator bearbetas och omvandlas till en tvådimensionell bild som visas på en datorskärm. Många tvådimensionella bilder kan i sin tur sammanfogas i datorn till tredimensionella volymer, vilket möjliggör att fritt rotera den tredimensionella bilden och därigenom se hur den avbildade materialet från olika vinklar.

Eftersom skillnaden i μ minskar med ökande energi på röntgenstrålningen, kommer faktorer som påverkar fördelningen av röntgenstrålningens energi även att påverka kontrasten. Medelenergin på röntgenstrålningen ökar med ökande spänning (kV) i röntgenröret varför kontrasten minskar med ökande rörspänning. En ökning av tilläggsfiltreringen, dvs. av tjockleken av det aluminium- eller kopparfilter som finns i bländarhuset, ökar medelenergin på strålningen som lämnar röntgenröret och kontrasten minskar något.

2.2 Tomografidata

Vid tomografiundersökning av ett material beror kvalitén på förvärvande data på hur respektive steg i undersökningen genomförs och anpassas till aktuell provkroppsgeometri samt materialtyp. En typisk tomografiundersökning består av följande sekvens [6]:

- Provberedning
- Kalibrering
- Datainsamling
- Rekonstruktion

Före en CT-skanning bereds provkropparna för att säkerställa att dessa passar inuti utrustningens synfält och att de inte rör sig under skanningen. Eftersom hela skanningsfältet är en cylinder, det vill säga en stapel av cirkulära fält, är den mest effektiva provkroppsgeometrin vid skanningen en cylinder.

Kalibreringar är nödvändiga för att fastställa egenskaperna hos röntgensignalen som de läses av detektorerna under de givna skanningsförhållandena, samt för att minska geometriska oklarheter. De två huvudsakliga signalkalibreringar som genomförs är "offset" och "förstärkning", vilka styr detektoravläsningarna då röntgenstrålningen är avslagen respektive påslagen med olika valda energinivåer.

De viktigaste variablerna vid CT-skanning är antalet genomlysningar och tiden för datainsamling för varje sådan. Antalet genomlysningar som vanligtvis används varierar från 600 till 3600 eller mer, och representerar vardera ett rotationsintervall lika med 3608 dividerat med det totala antalet genomlysningar. Rådata lagras i matrisform så att varje rad innehåller en enda uppsättning detektoravläsningar för en genomlysning medan tiden går från topp till botten. Denna bild kallas sinogram eftersom varje punkt i det skannade objektet motsvarar en sinuskurva.

Rekonstruktion är den matematiska process där sinogram omvandlas till tvådimensionella skiktbilder. Den mest utbredda rekonstruktionstekniken kallas filtrerad återprojektion, där data först faltas med ett filter varefter varje vy successivt läggs ovanpå ett fyrkantigt rutnät orienterat i en vinkel som motsvarar dess förvärvsvinkel. Under återbyggnaden omvandlas rådata i sinogram till CT-nummer eller CT-värden som vardera tillhör ett område som bestäms av datorsystemet. De flesta medicinska och äldre industriella system använder en 12-bitars skala, där 4096 datavärden är möjliga, medan nyare system använder 16-bitars skala vilket gör det möjligt för värden att variera från 0 till 65535. För de flesta industriella skannrar överensstämmer dessa värden med gråskalan i de bildfiler som skapas eller exporteras av systemen. Även om CT-värden bör kopplas linjärt till den effektiva attenueringskoefficienten för materialet i varje voxel är den absoluta korrespondens godtyckligt. Industriella CT system kalibreras ibland så att luften ges ett värde av 0, vatten värdet 1000 och aluminium 2700, så att CT-numren approximativt motsvarar materialets densitet.

En typisk sekvens för efterbehandling innefattar fyra huvudsteg; brusreducering, korrigering, materialfördelning, kvantitativ analys och volymuppdelning. I syfte att kvantitativt kunna karakterisera provkroppens inre struktur kan till exempel följande parametrar bestämmas; ballastgradering och orientering, fördelning och geometri hos kontaktzoner mellan ballaststenar, variation i fördelning av bindemedel samt luftporers fördelning över djupet.

2.3 Digital bildbehandling och analys

I den digitala bilddetektorn separeras bilddetektionen, dvs. uppsamlandet av bilddata direkt vid exponeringen, från bildpresentationen vilket möjliggör att båda funktionerna (detektion och presentation) kan optimeras separat. Detta är inte möjligt vid analog skärmfilmradiografi eftersom filmen fyller båda dessa funktioner. Bildbehandling är nödvändig med digitala bilddetektorer eftersom råbilden från detektorn skiljer sig från en konventionell filmbild. Viss typ av bildbehandling sker automatiskt innan bilden presenteras på modaliteten och det finns alltså egentligen ingen 'obehandlad' digital röntgenbild. Vanliga typer av bildbehandling omfattar:

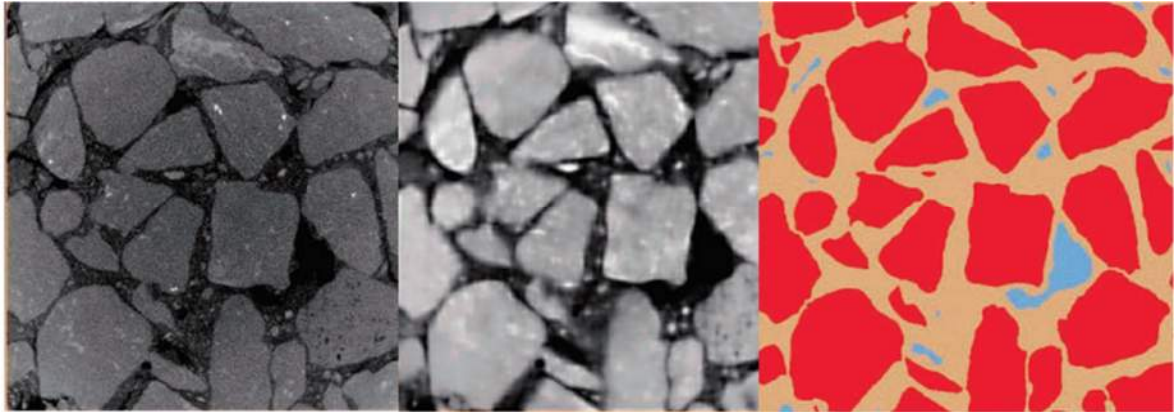
- generella gråskaleförändringar,
- förändringar av skärpan och detaljkontrasten samt
- reducering av bruset.

Bildbehandling gör att för frågeställningen relevant och viktig bildinformation kan framhävas. Den kan därför skräddarsys till frågeställningens behov. Vissa bildbehandlingsprogram förstärker t.ex. kontrasten av små strukturer utan att för den skull öka kontrasten av strukturer som redan är kontrastrika. Detta medför att kontrasten blir oberoende av intensiteten av strålningen vid detektorn; till skillnad från t.ex. analog skärmfilmradiografi.

Bildbehandling innebär här huvudsakligen redigering och förbättring av digitala bilder med syfte att förbättra deras kvalitet eller för att extrahera relevant information. Olika tekniker kan användas och valet av lämplig teknik eller metod beror på tillämpningen. Allmän bildbehandlingsteknik för bildförbättring inkluderar kontrastförbättring, filtrering, erosion och dilation, bakgrundskorrektion, etc. Andra bildbehandlingstekniker så som tröskling, kantdetektering och vattendelare används för segmentering och separation av objekt. Figur 6 visar en röntgen CT-bild (vänster) innan efterbearbetning, där betydande densitetsvariation inom fasen (stenar och mastix) kan observeras, tillsammans med bildbrus och så kallad "beam hardening". För att åstadkomma den korrigerade bilden (mitten) i Figur 6 har följande metoder använts:

- Histogramutjämning för att förbättra kontrasten
- Brusreducering med medianfilter och kantbevarande utjämningsfilter
- Korrigering av "beam hardening" baserat på bakgrunds- och fältkorrigering

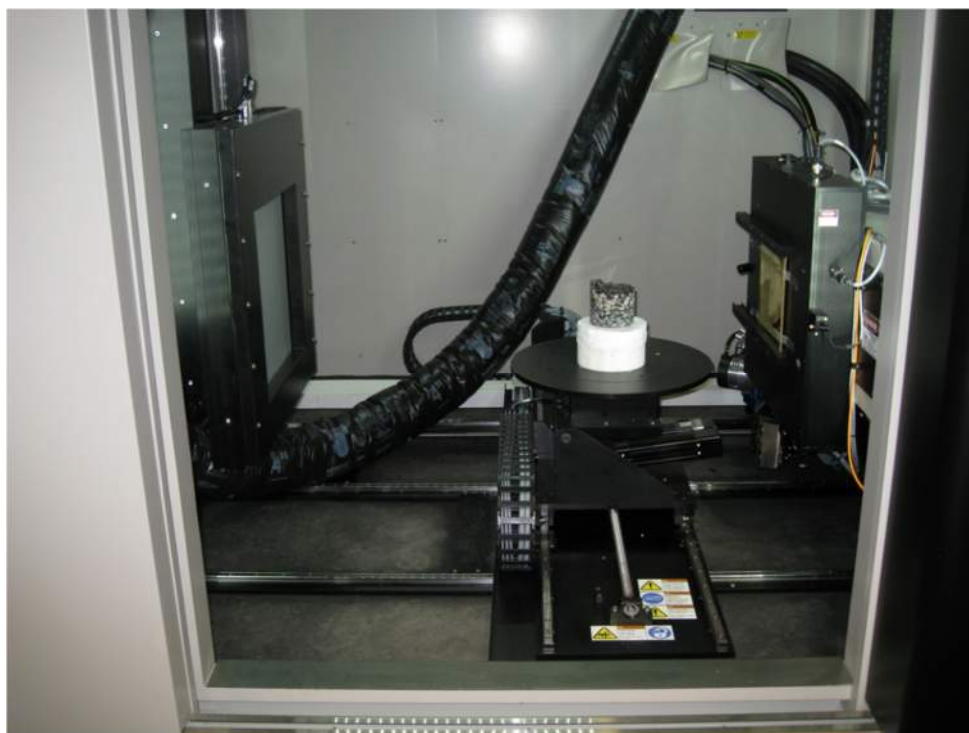
Den segmenterade bilden (höger) i Figur 6 visar identifierade faser, det vill säga luftporer och stenar, erhållna med tröskelbaserad segmentering. Bindemedlet definierades här som skillnaden mellan total volym, stenar och luftporer. Ballaststenar identifierades och separerades baserat på en avståndsoversikt med vattendelare/segmentering och genom att stenar mindre än 2.34 mm filtreras bort och ersätts med mastix.



Figur 6. Exempel på CT bild av asfalt före/efter korrigering [8].

2.4 NSI X5000 systemet vid KTH

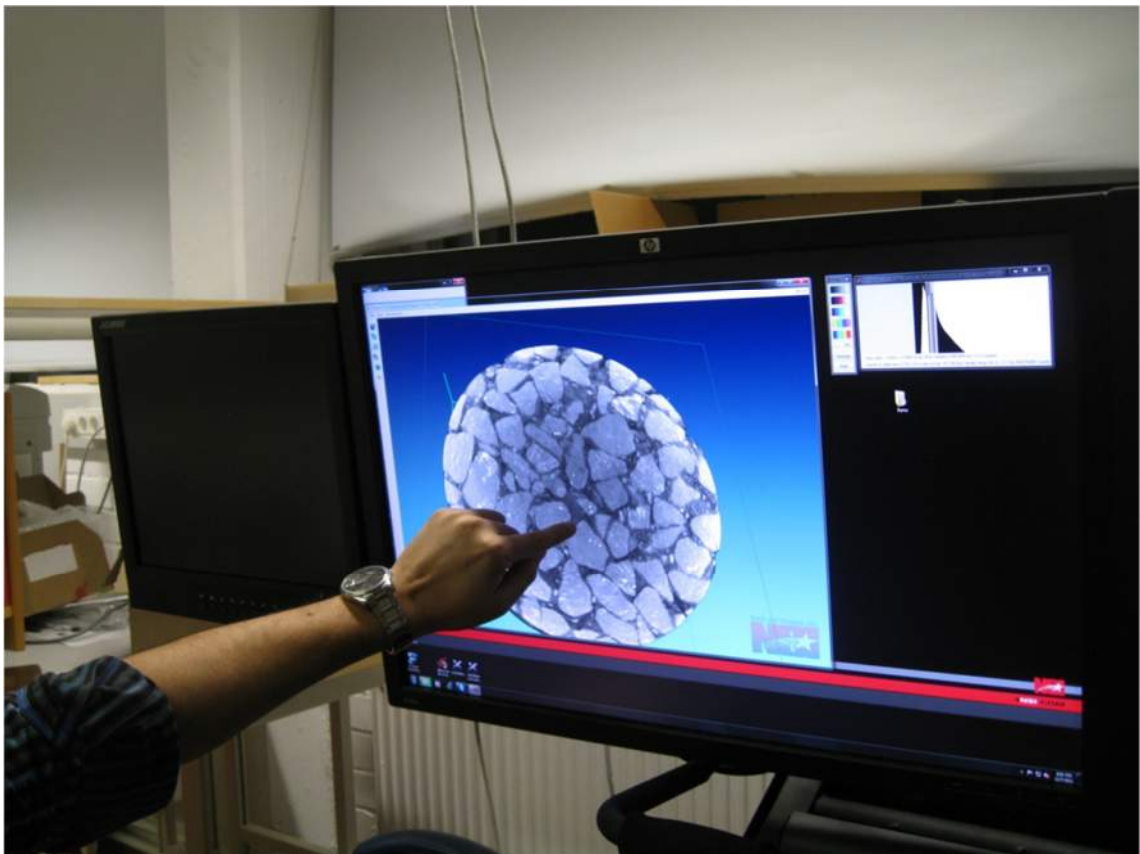
Den tomografiapparat som finns på KTH är av typen NSI X5000. Systemet består av ett NSI strålningsavskärmat hölje och en NSI X500 sexaxlig komponentmanipulator med en högupplösning digital röntgen och CT-teknik, se Figur 4 och 7-9. För CT kalibrering, rekonstruktion och 3D realtids visualisering används programmet Efx CT, med analysverktyg i samma gränssnitt. Beroende på provkroppens storlek, graden av geometrisk förstoring och den strålningskälla som används kan tomografidata med voxelstorlekar ned till 5 μm erhållas.



Figur 7. NSI X500 på KTH.



Figur 8. NSI X500 på KTH.



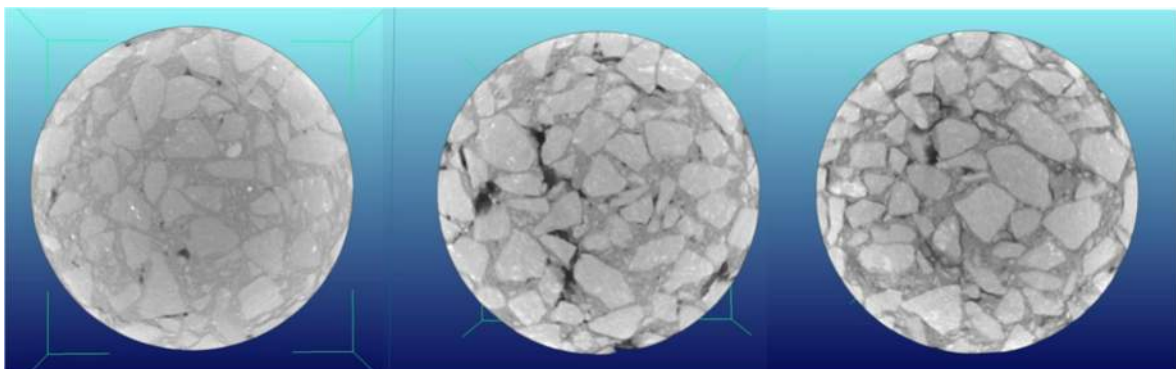
Figur 9. NSI X500 på KTH.

En högupplösnings *Amorphous Silicon* digital detektor (200 nm pixel pitch) ingår, tillsammans med en NSI X-view EFX-DR arbetsstation. Till detta avbildningssystem hör också ett NSI 225 kV mikrofokus röntgenrör med 5 μm brännvidd och ett NSI 450 kV HP röntgenrör med 400 μm brännvidd. I systemet ingår även ett MTS Model 870 lastcell för en enaxiell belastning med maximalt 100 kN kraft och en 150 mm sänkning. Integrerat finns också en EGNU12-6CWL platinum temperaturkammare som möjliggör provning inom temperaturintervall från -20 °C till +80 °C. Figur 10 visar en provkropp av asfalt före testning.

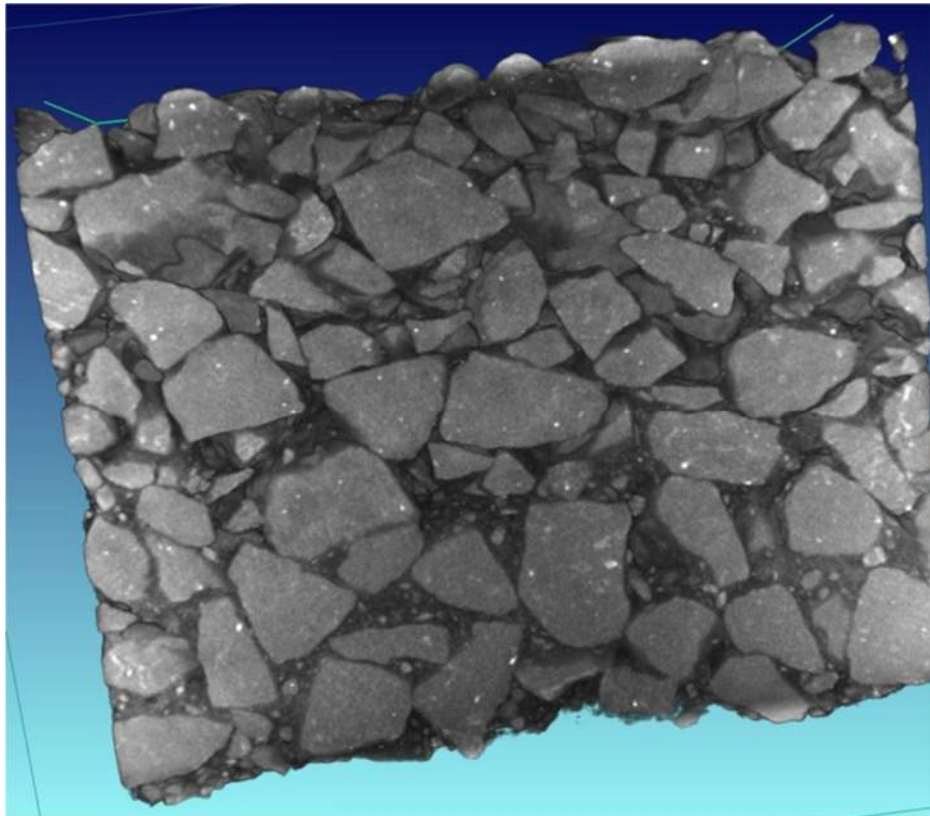


Figur 10. Exempel på asfaltprovkropp före testning.

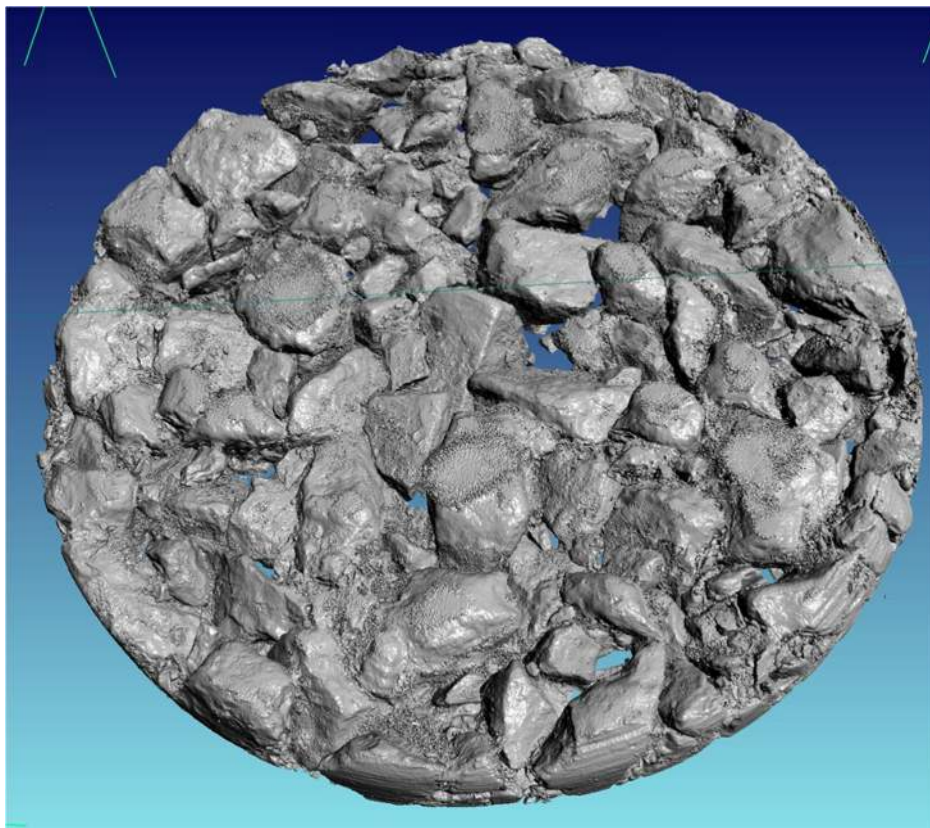
I Figur 11 och 12 illustrerar CT-bilder av ett asfaltmaterial i genomskärning. Stenmaterial, hålrum samt mastix kan enkelt urskiljas. Figur 13 visar en detaljerad 3D-bild av provkroppens överyta.



Figur 11. Exempel på CT-bild av horisontellt tvärsnitt av asfaltprovkropp.

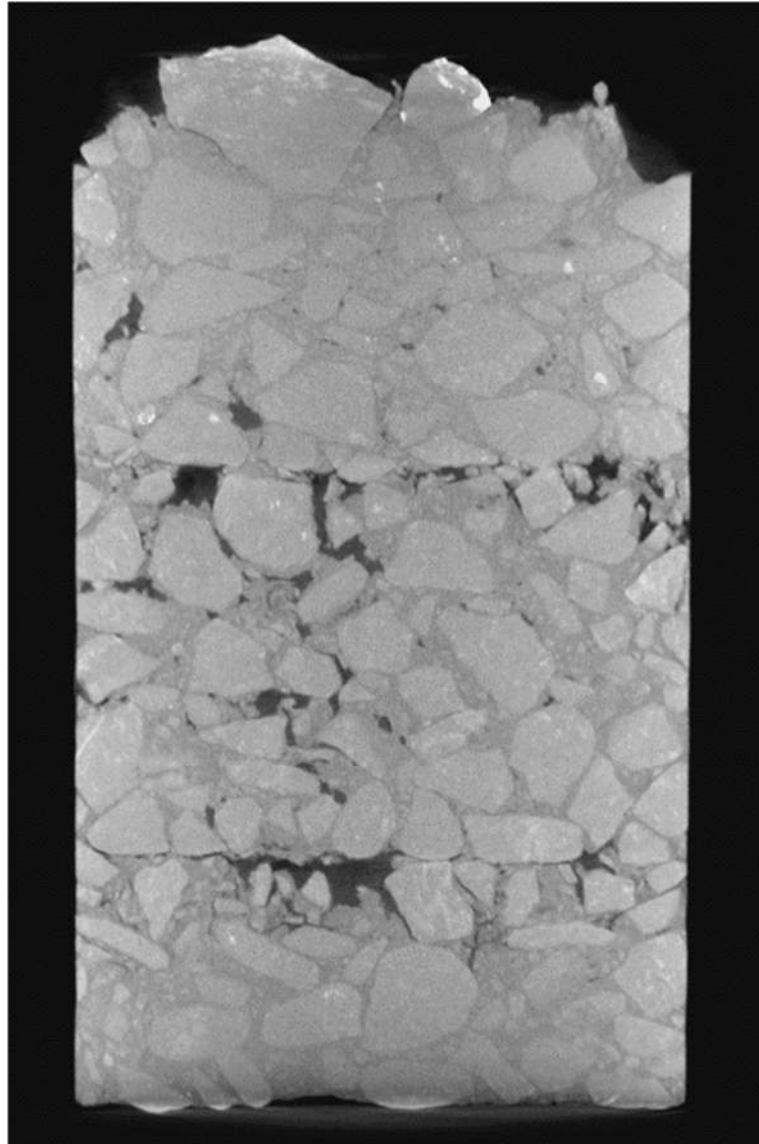


Figur 12. Exempel på CT-bild av vertikalt tvärsnitt av asfaltprovkropp.



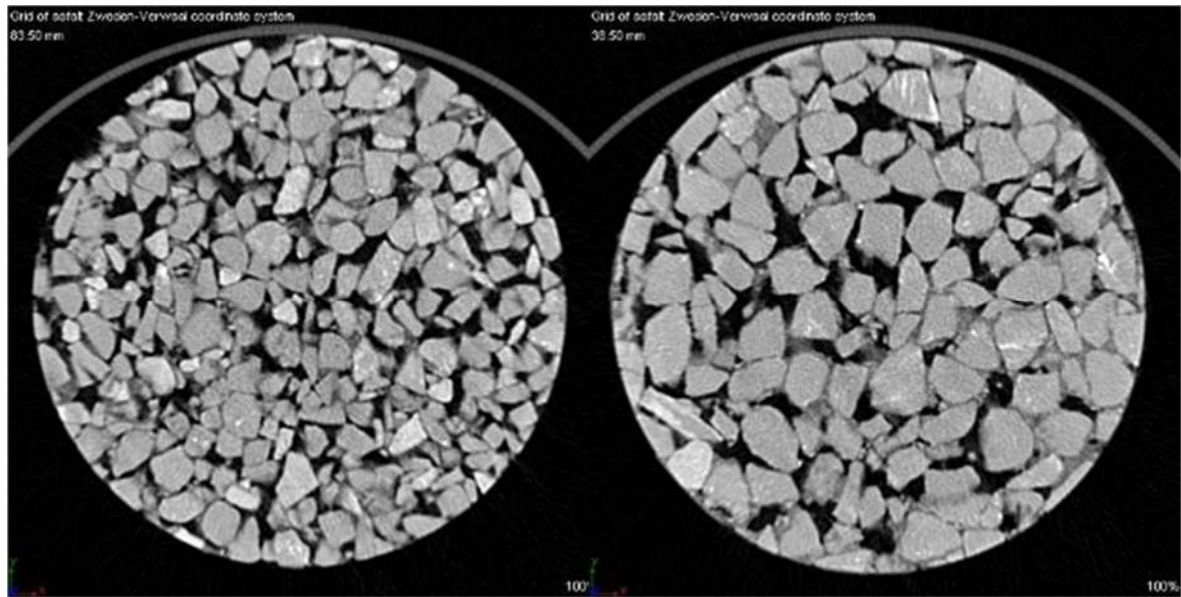
Figur 13. Exempel på 3D-bild av överytan av en asfaltprovkropp.

Det är tydligt att CT-skanning möjliggör att studera den inre strukturen hos ett asfaltmaterial vilket inte är möjligt med traditionella metoder. Figur 14 visar ett tvärsnitt i borrhäla genom tre olika beläggningsskikt. Det framgår tydligt att hålrummet i gränssnittet mellan beläggningsskikten signifikant är högre jämfört med de andra delarna.



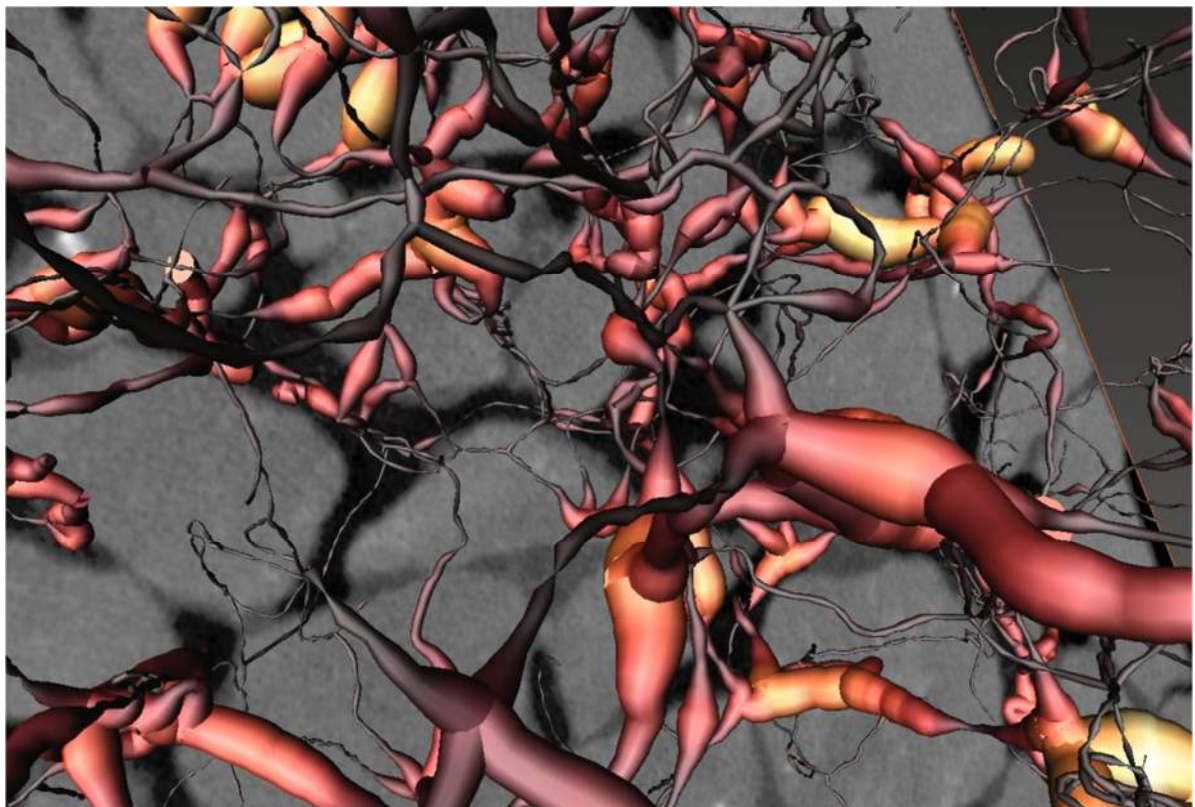
Figur 14. Exempel på CT-bild av tvärsnitt genom tre beläggningsskikt.

Figur 15 visar CT-bilder av de olika lagren i en två-lagers bullerreducerande beläggning. Bilden till vänster visar toppen med stenmax 11 mm och högra bilden visar botten lagret med stenmax 16 mm.



Figur 15. CT-bild av övre (11 mm) samt undre lager (16 mm).

I den digitala världen kan olika 3D-bilder skapas och analyseras. Figur 16 visar en modellerad 3D-struktur av porsystemet i en bullerreducerande beläggning.



Figur 16. 3D CT-bild av porstruktur i en bullerreducerande beläggning.

3 Analys och Resultat

3.1 Rengöring av bullerreducerande beläggningar

En ny bullerreducerande beläggning är både dränerande och tyst. Figur 17 visar en ny beläggning med öppen porstruktur (vänster) samt en beläggning med igensatta porer (höger). Beläggningen till höger förväntas inte att ha någon dränerande egenskap samt bullerreduktion. Den akustiska livslängden kan antas vara förbrukad.

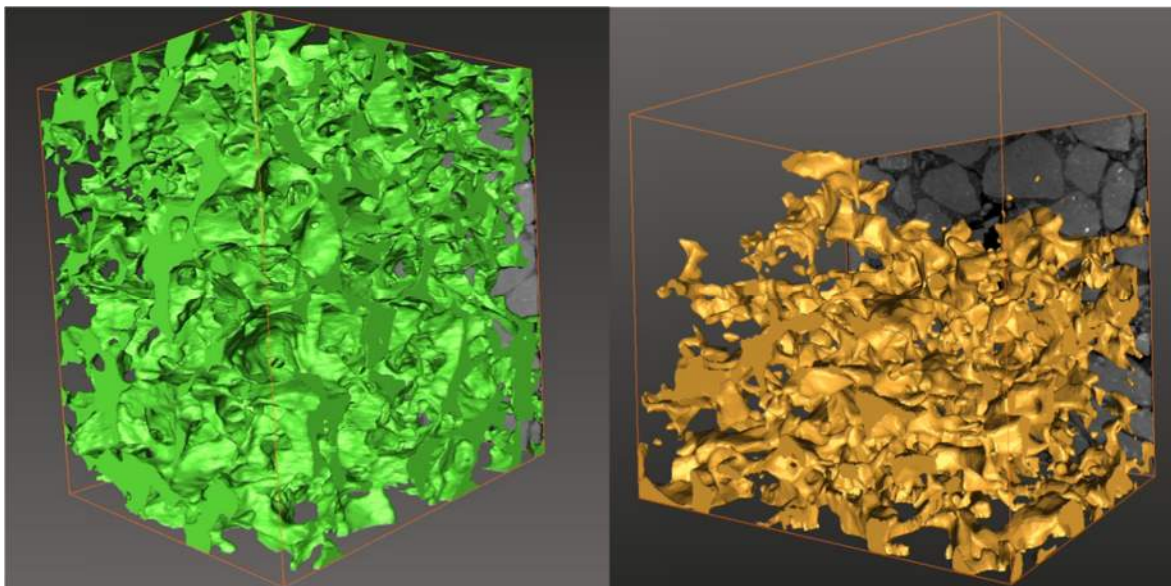


Figur 17. Öppen (vänster) samt igensatt (höger) beläggning.

I Figur 18 ges exempel på effekten av tvättning med VÄGREN. Den högra delen av bilden visar den initiala beläggningssytan före rengöring (igensatt). Den vänstra delen visar hur porstrukturen har förbättrats genom rengöring. Figur 19 illustrerar det kommuniserande hålrummet i en helt ny beläggning, öppen porstruktur (vänster) samt igensatt porstruktur, övre lagret, (höger). I den högre figuren syns att det bara är det översta lagret som är igensatt.

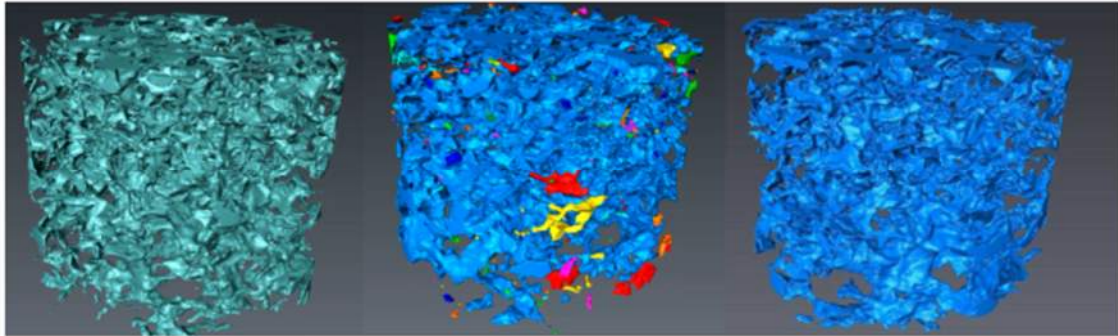


Figur 18. Exempel på effekt av rengöring med VÄGREN.



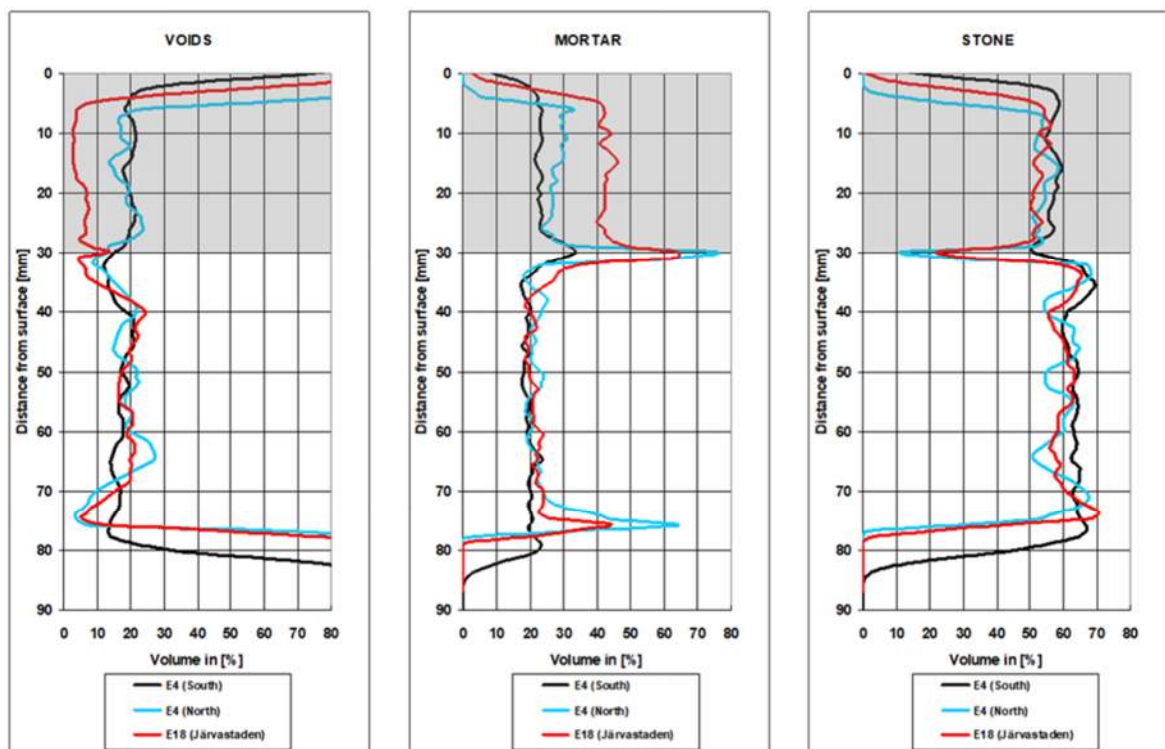
Figur 19. 3D-illustration av porositeten i en asfaltprovkropp (öppen/igensatt).

Olika typer av hålrum, definierat enligt Figur 1, kan illustreras som i Figur 20.



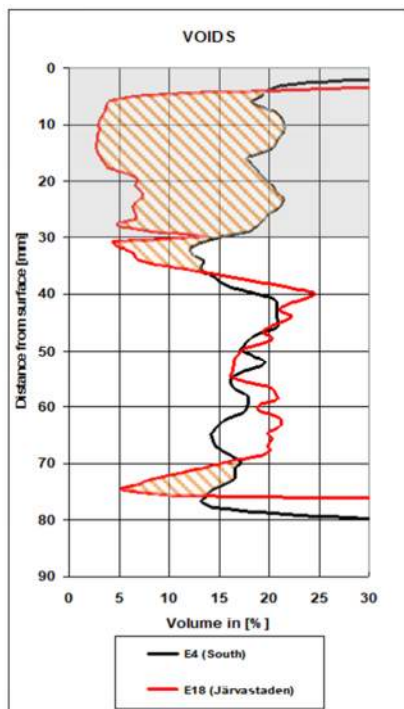
Figur 20. 3D-illustration av total, uppdelad samt kommuniserande hålrum.

Ett annat sätt att redovisa de ingående materialens fördelning på djupet. Den vänstra bilden visar hålrummets fördelning över provkroppens djup. Det går att urskilja att det översta lagret för E18 Järvastaden är igensatt (ca 5 %) medan de andra beläggningssmaterialen har ett hålrum runt 20 % för både övre- samt undre lager.



Figur 21. Fördelning av hålrum, mastix och stenmaterial på djupet.

Figur 22 illustrerar effekten av rengöring för ett igensatt material. Skillnaden mellan de två olika provkropparna är mellan 15-20 % hålrum. Det går även att se att det är främst det övre lagret som är igensatt även om en viss ackumulation av igensatta porer i botten (ca 7.5 cm under beläggnings överyta).

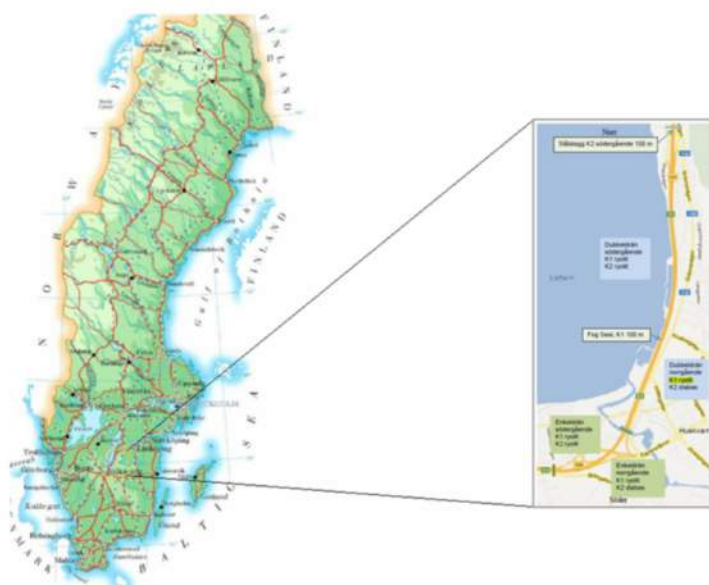


Figur 22. Jämförelse mellan öppen och igensatt asfaltmaterial.

Det är tydligt att CT-skanning är en kraftfull metod att utvärdera porstrukturen i ett asfaltmaterial.

3.2 Provsträcka E4 Huskvarna

I denna studie har borrhärdar från E4, Huskvarna, analyserats. Figur 23 ger en översikt av E4 förbi Huskvarna. På en del av sträckan lade Svevia en två-lagers bullerreducerande beläggning 2010.



Figur 23. Översikt över E4 förbi Huskvarna. i en asfaltprovkropp.

Våren 2011 (efter den första vintern) erhöles borrhärdar från E4 Huskvarna. Vid borrhningen användes inte vatten utan luft som kylmedium för att inte påverka porstrukturen. Totalt borrhades 24 stycken kärnor (80mm i diameter och 100mm i höjd). Tre kärnor från K1 i norrgående riktning valdes för CT-skanning eftersom några ytor hade använts för att testa olika förseglingsmetoder. Provkropparna märktes och skickades till KTH för analys.

Sommaren 2014 borrhades Svevia ytterligare sex nya borrhärdar med borrhutrustning monterad i en släpvagn. I samband med borrhningen utförde Skanska rengöring med VÄGREN på en intilliggande yta (ca 100m i K1:an norrgående riktning). Tre borrhärdar togs ut på den initiala beläggningen samt tre togs från den tvättade ytan.

Totalt sex prov borrhades och fördes till KTH för analys. Prov 1B, 2A, 2B tillsammans med de sex nya proverna, 1BC, 2BC, 3BC samt S1, S2 och S3, undersöktes och analyserades med KTH industri tomografiutrustning, NSI, X5000.

Figur 24 och 25 visar borrhning 2011 samt 2014. "014 utfördes borrhning före rengöring (FR) samt efter rengöring (ER).



Figur 24. Borrning av provkroppar 2011.



Figur 25. Borrning av provkroppar 2014 (före och efter rengöring).

Figur 26-28 redovisar uppborrade kärnor för CT-scanning på KTH. Samtliga kärnor borrades mellan hjulspår och består av två lager asfalt, med 11 mm stenmax i översta lagret samt 16 mm stenmax i understa lagret.



Figur 26. Borrkärnor från 2011.



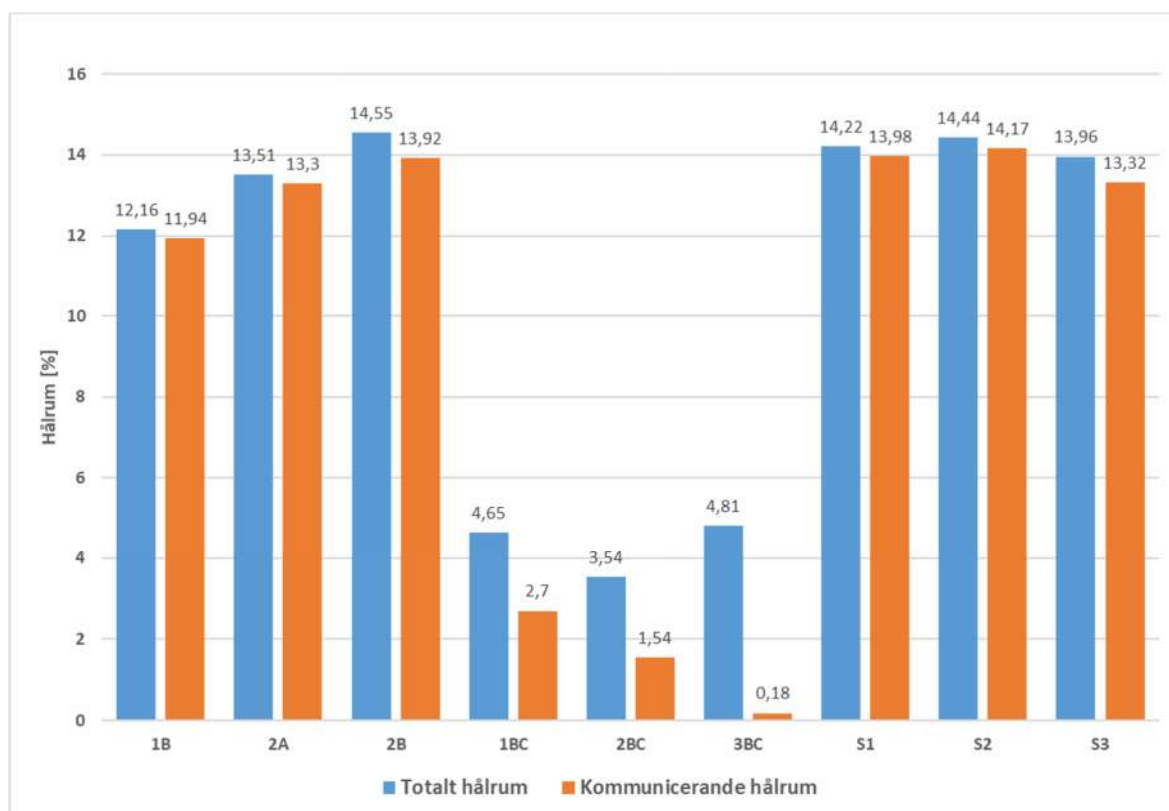
Figur 26. Borrkärnor från 2014, före rengöring.



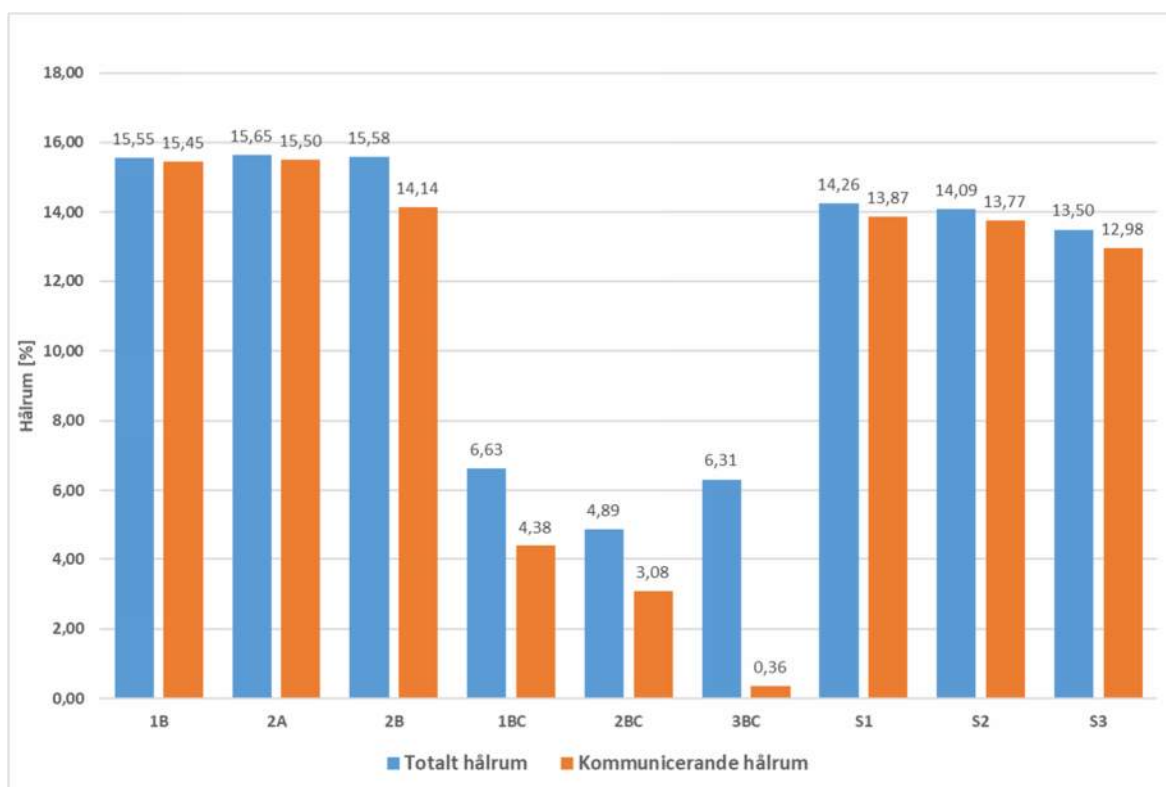
Figur 28. Borrkärnor från 2014, efter rengöring.

3.3 Analys av porositet

Figur 29 visar medelvärden för det totala- samt den kommuniserande porvolymen för samtliga provkroppar (övre samt undre lager). Det är tydligt att porvolymen varierar mellan provkropparna från 2011 (1B/2A/2B) samt provkroppar från 2014, före (1BC/2BC/3BC) respektive efter rengöring (S1/S2/S3). Provsträckan, E4-Huskvarna utfördes 2010 varför provkropparna upptagna 2011 har trafikerats under cirka ett år inklusive en vinter period. Beläggningen kan därför antas ha utsatts för begynnande igensättning av porstrukturen vilket sannolikt resulterar i något lägre hålrum är ursprunglig ny beläggning från 2010. Det syns tydligt att beläggningen har tappat ca 10 % av hålrummet mellan 2011 och 2014. Effekten av tvättningen är synbar, en stor ökning av hålrummet kan noteras. Effekten av tvättningen med VÄGREN är signifikant.



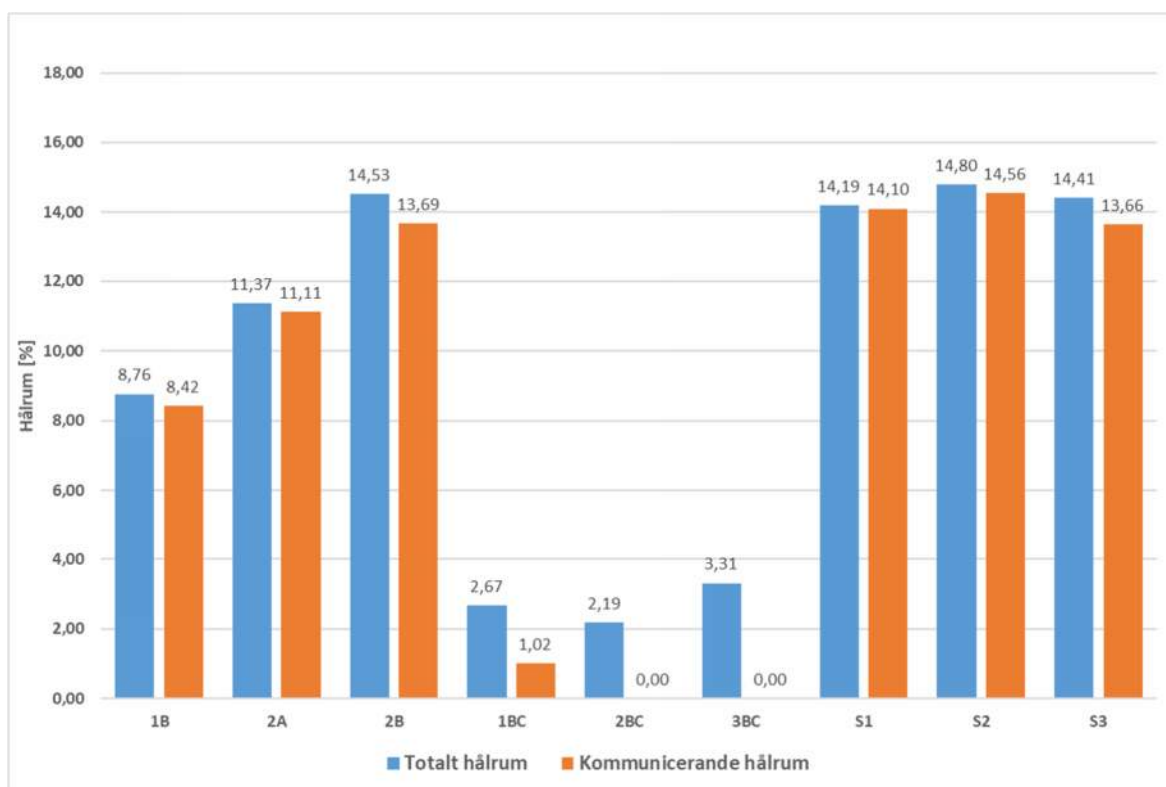
Figur 29. Totalt samt kommuniserande hålrum (medel för övre och undre lager).



Figur 30. Totalt samt kommuniserande hålrum (övre lager).

Figur 30 redovisar medelvärden för det totala- samt den kommuniserande porvolymen för samtliga provkroppar (övre lagret). Det är tydligt att variationen är mindre för det övre lagret. Samma tydliga trend avseende igensättning mellan 2011 och 2014 samt den signifikanta ökningen av hålrummet efter tvättning kan noteras.

Slutligen redovisas trenden för det undre lagret i Figur 31. Trenden är lika tydlig även om det finns en lite större variation mellan de olika borrhämnarna. Det ges även att det undre lagret har lite större igensättning än det övre lagret. Detta är speciellt tydligt 2014 före rengöring då delar av det undre lagret är mer eller mindre helt igensatt.

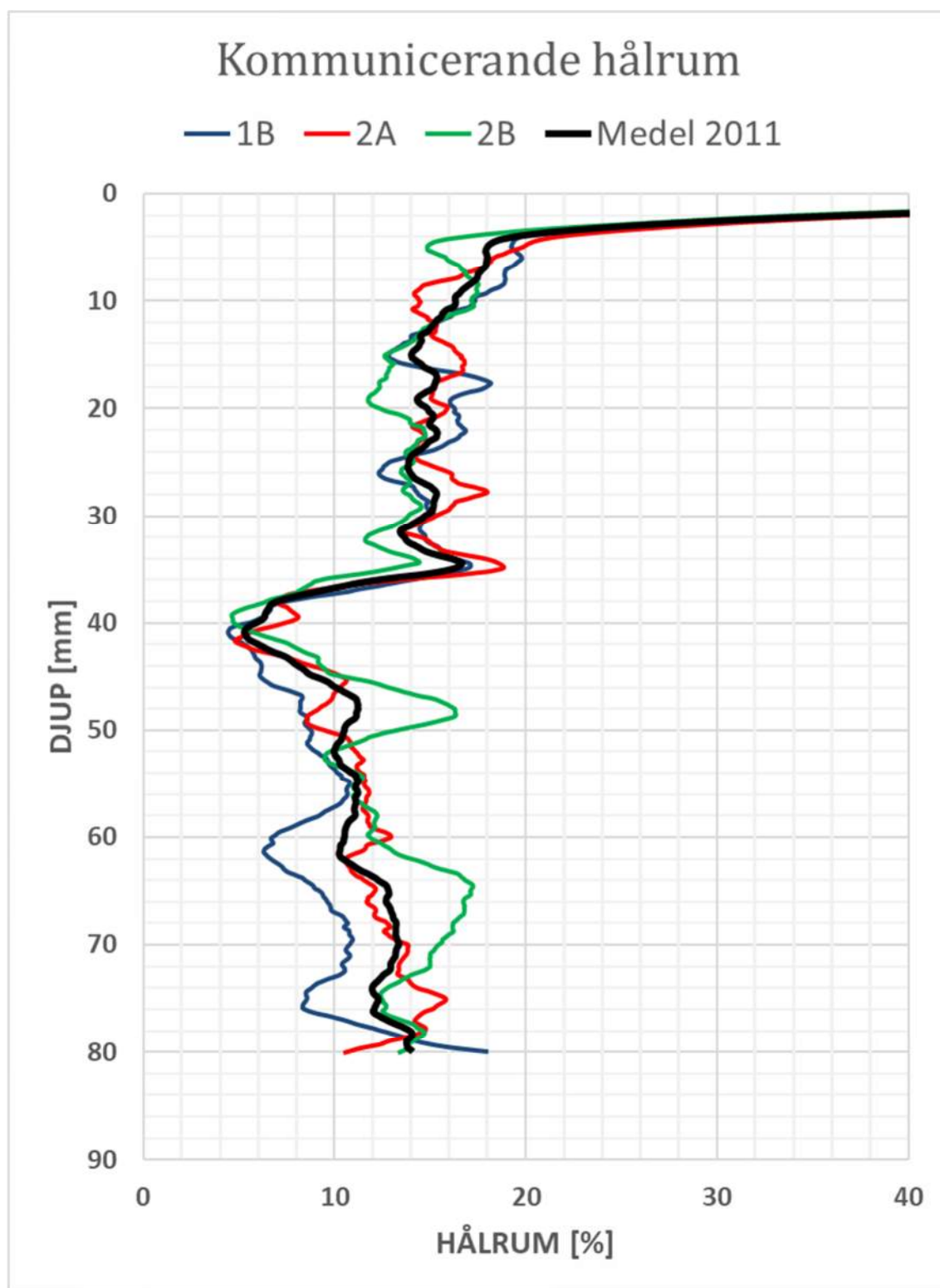


Figur 31. Totalt samt kommuniserande hålrum (undre lager).

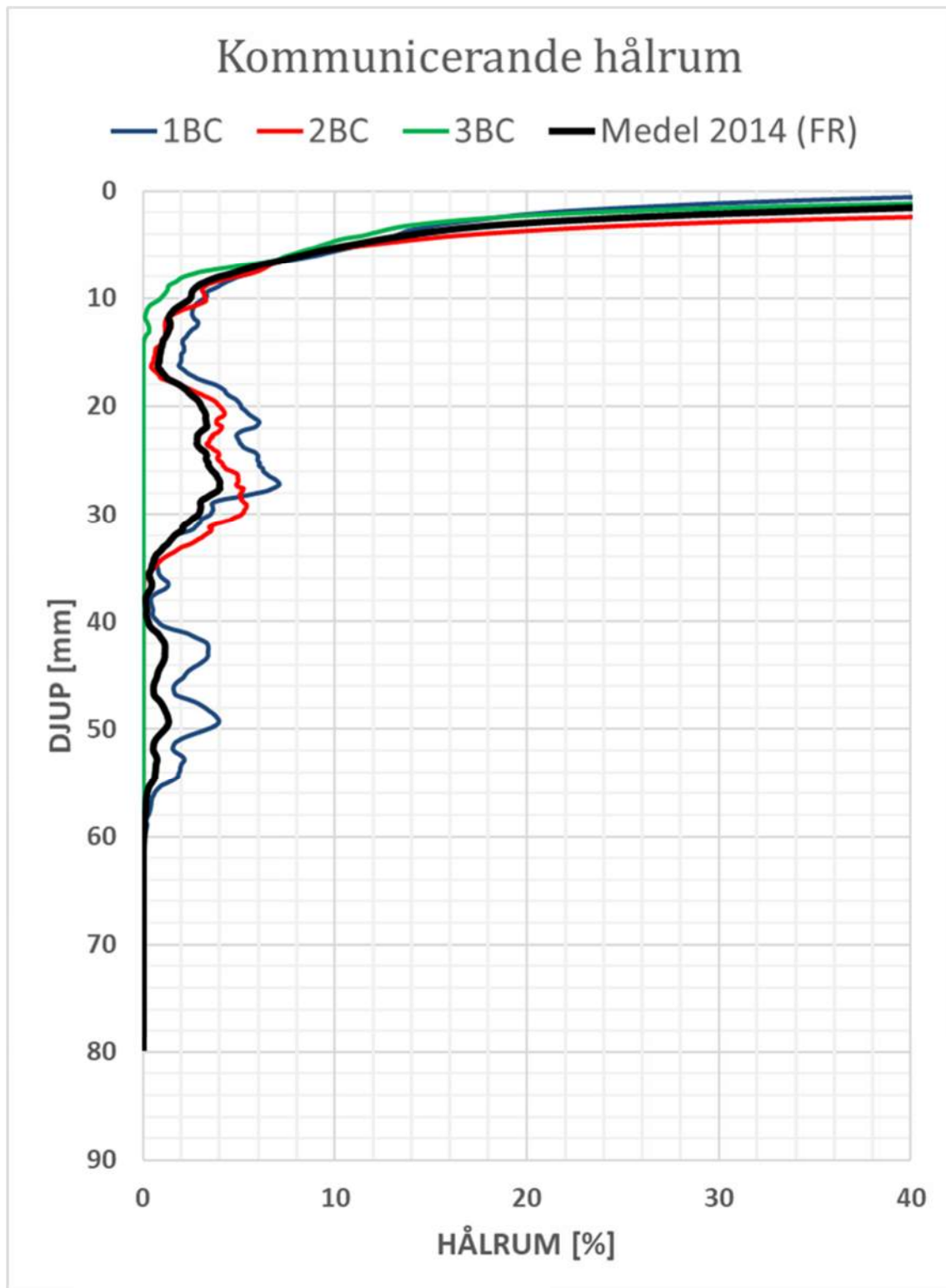
Det totala hålrummet är alltid större än den kommuniserande porstrukturen vilket är logiskt. Ett högt värde på hålrummet samt en liten skillnad mellan det totala- samt det kommuniserande hålrummet indikerar att beläggningen har god permeabilitet (dränerande) samt bullerreducerande egenskaper. I Figur 32 ges att medelvärdet för det totala hålrummet för provkropparna från 2011 ligger runt 13.41 % och det kommuniserande hålrummet på ca 13.05 %. Detta pekar på att beläggningen har goda akustiska- samt dränerande egenskaper. Om vi istället ser på resultaten från 2014 (före rengöring) så ligger medelvärdet för det totala hålrummet på ca 4.36 % och det kommuniserande hålrummet på 1.47 %, se Figur 33. Detta indikerar på att beläggningen har långtgående igensättning av porstrukturen. Denna igensättning syns även på beläggningens yta. När beläggningens hålrum har reducerats från ca 13 till 1.5 % kan ingen större bullerreduktion eller dräneringsförmåga förväntas.

Om vi tittar på hålrummet för provkropparna efter högtrycksspuling med vacuumsugning med VÄGREN, 2014, ser vi att det totala hålrummet ökat till ca 14.21 % och det kommuniserande till ca 13.82 %, se Figur 34. Denna ökning är i paritet med upp mätt hålrum från 2011 då beläggningen var nästan ny. Det lite högre hålrummet efter rengöring 2014 kan förklaras av naturlig variation av hålrummet i beläggningen samt att en del av igensättningen tolkas som bitumen. Resultaten visar dock att igensättning av porstrukturen är en kontinuerlig process för Svenska förhållanden där framförallt dubbdäcken river upp partiklar och vägdamm som täpper till porstrukturen i beläggningen. Andra källor av föroreningar som kan bidra till igensättning av porstrukturen kan härledas till slitage av gummidäck och bromsar. Vidare kan salt, sandning mm. bidra till igensättningen. Det har även noterats att olika typer av organiskt material kan täppa till porer i beläggningen som t.ex. löv, frukt, torv, gräs etc.

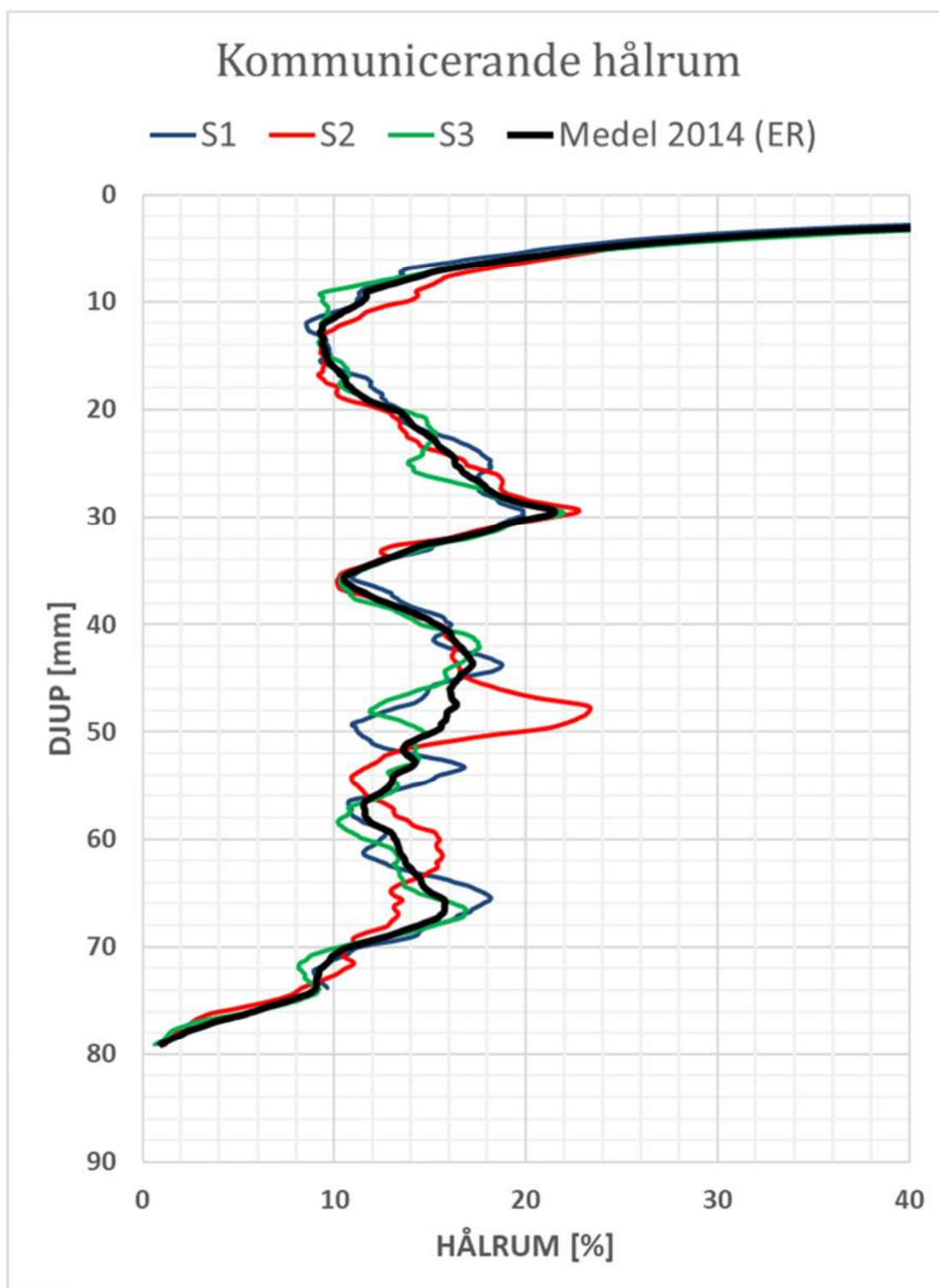
Hur som helst, vid CT-scanning erhålls inte bara medelvärden av hålrummet utan även var igensättningen sker samt rengöringens djupverkan.



Figur 32. Totalt- samt kommunicerande hålrum (2011).

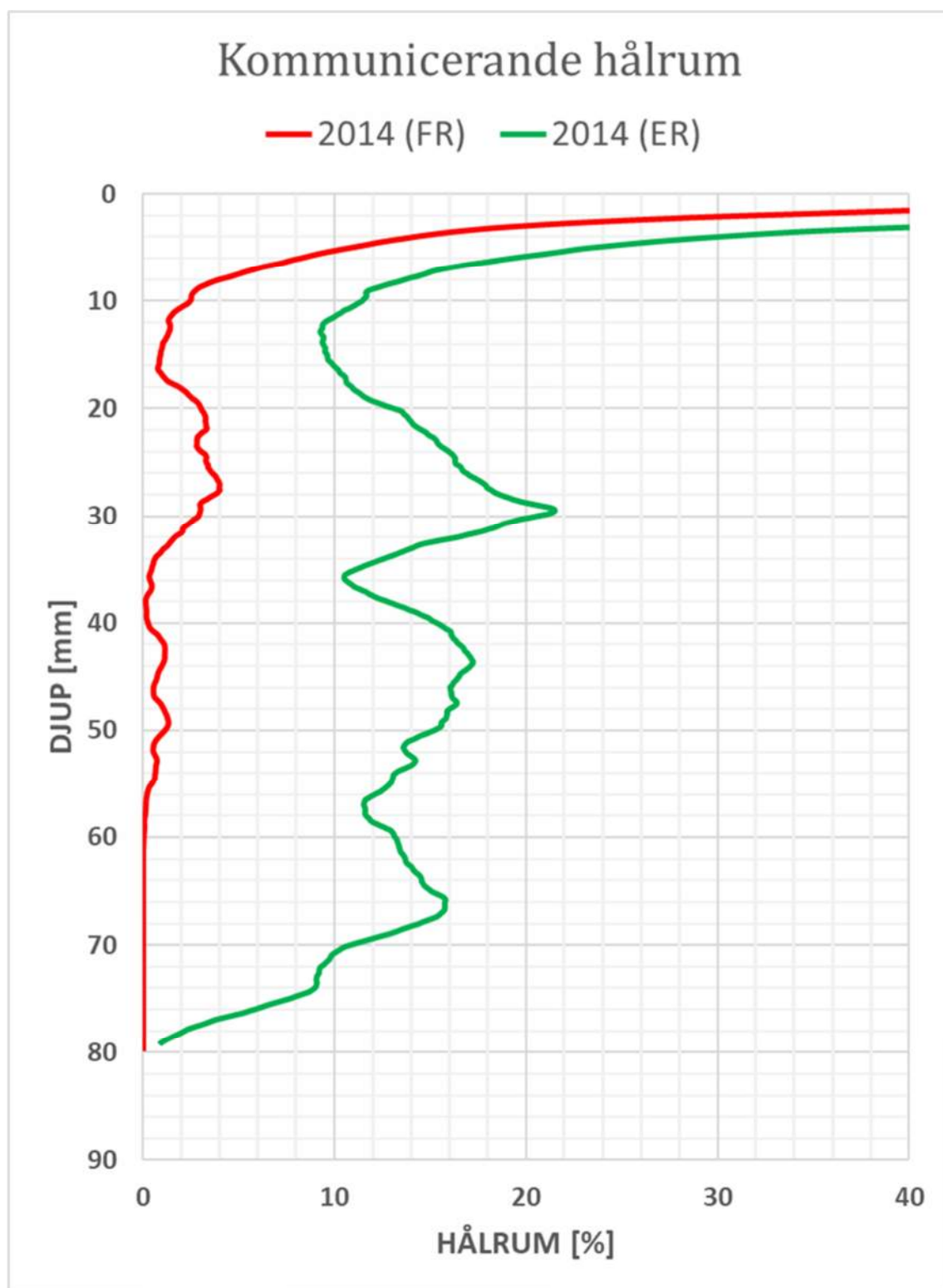


Figur 33. Totalt- samt kommunicerande hålrum (2014 före rengöring).



Figur 34. Totalt- samt kommunicerande hålrum (2014 efter rengöring).

Figur 35 illustrerar skillnaden mellan 2014 (FR) samt 2014 (ER). Det syns tydligt VÄGREN signifikant ökar det kommunicerande hålrummet. Vidare syns även en signifikant djupverkande rengöring med VÄGREN. Det är inte bara det översta lagret som ökar hålrummet utan även det undre lagret ökar porositeten. Detta är mycket lovande då effekten av rengöringen ökar den akustiska livslängden. För mer kompletta och detaljerade resultat hänvisas till bilagan.



Figur 35. Kommunicerande medelhålrums för 2014 (Före respektive Efter rengöring).

4 Slutsatser

Projektets övergripande syfte har varit att öka kunskapen om hur bullerreducerande beläggningar sätts igen av vägpartiklar samt hur effektiv rengöring kan användas för att förbättra porstrukturen och förbättra bullerreduktionen över tid. Genom att partiklar och vägdamm reduceras efter rengöring finns potential att både minska buller- och partikelemissioner. Igensättning av porstrukturen har undersökts genom datortomografi av nio stycken borrhärdar med varierande igensättningsgrad och ålder (2011 och 2014. Tre borrhärdar erhålls ett halvår efter utläggning (2011) inkl. en vinterperiod. Dessa borrhärdar antas representera en relativt opåverkad porstruktur efter första vintern efter utläggning. Vidare erhöles sex borrhärdar från 2014 där tre var naturligt igensatta av trafiken och de andra tre efter rengöring med VÄGREN ute på vägen. Samtliga borrhärdar tog från närliggande ytor mitt mellan hjulspåren.

För att studera porstrukturen för testade borrhärdar har en datortomografiskanning utförts så att det kommuniserande hålrummet kunnat kvantifieras. Resultatet från denna studie gör gällande att det finns en stor potential och värde att underhålla bullerreducerande beläggningar. Från utförda analyser har följande slutsatser dragits:

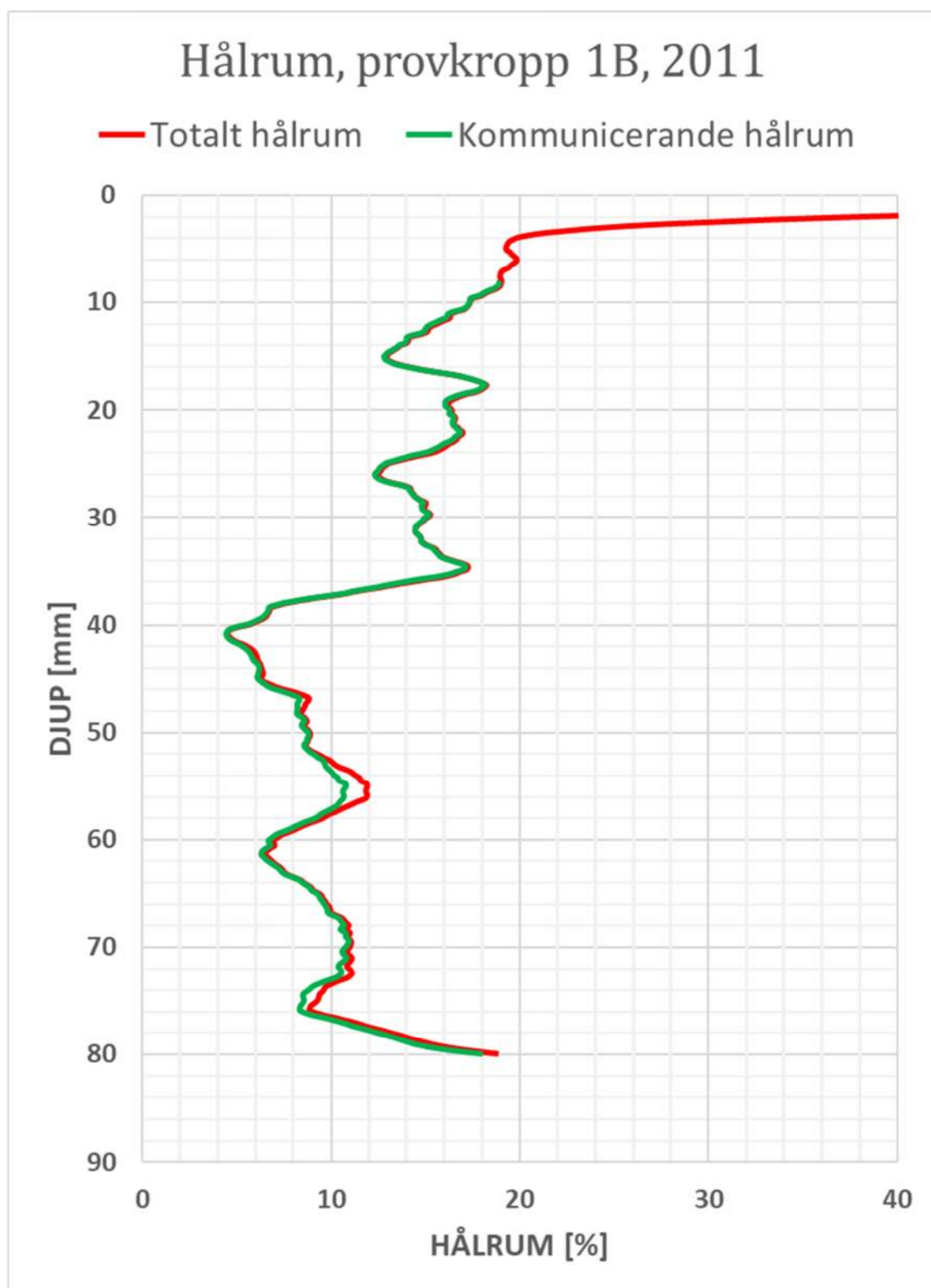
- CT-skanning tillsammans med bildanalys är ett kvalitativt och kraftfullt verktyg för att analysera porstrukturen hos bullerreducerande beläggningar.
- Från tomografiundersökningen ges tydligt hur porstrukturen sätts igen av partiklar och vägdamm.
- Vidare har visats att en passage av VÄGREN med högtrycksrengöring med tillhörande vakuumsug signifikant ökar det kommuniserande hålrummet.
- Borrhärdarna från 2011 har ett kommuniserande medelhålrum på ca 13%, (övre lager ca 15% samt ca 11% för det undre lagret.
- Borrhärdarna från 2014 (före rengöring) har ett kommuniserande medelhålrum på ca 1.5%, (övre lager ca 2.6% samt ca 0.3% för det undre lagret. Det är tydligt att hålrummet i porstrukturen har minskat med drygt 10% mellan 2011 och 2014.
- Resultatet efter rengöring med VÄGREN visar att hålrummet ökat till ca 14% för både övre och undre lagret. Detta är en signifikant ökning och i paritet med hålrummet från 2011.
- Eftersom borrhärdarna togs mitt mellan hjulspår antas att ingen effekt av omlagring i materialet.
- Visuellt studie av tvättad del av beläggning indikerar att effektiv rengöring minskar mängden partiklar i porstrukturen.
- Datatomografiundersökningen bekräftar att effektiv rengöring kan öka hålrummet i porstrukturen i både övre och undre lagret.
- Effekten av det ökande hålrummet kunde inte relateras till ökad bullerreduktion. Resultat från bullermätningen visade på -0.7 dB till +0.7 dB. Orsaken till detta kan bero på att bullermätningen inte mätte bullret mellan hjulspåren samt att den tvättade ytan var för kort. Vidare hade ytan förseglats under 2013 vilket kan ha påverkat resultatet.

Referenser

1. Rapport God bebyggd miljö, Boverket, april 2003, <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2003/buller.pdf>
2. Trafikverket, Hälsopåverkan, 2020, <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/buller-och-vibrationer---for-dig-i-branschen/Halsopaverkan/>
3. Quantification of population exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ and estimated health impacts, IVL Swedish Environmental Research Institute, 2018, <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1242584/FULLTEXT01.pdf>
4. Mats Gustavsson, Utvärdering av städmaskiners förmåga att minska PM₁₀-halter, VTI rapport 707, 2011, <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:670595/FULLTEXT01.pdf>
5. Lefebvre G. Porous asphalt. Technical report, 1993.
6. Ketcham, R. A. and Carlson, W. D., (2001). Acquisition, optimization and interpretation of x-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. Comput. Geosci., 27(4):381–400, 2001.
7. Fuad Ahmed, Porous asphalt clogging performance under Swedish condition, Degree project, KTH, 2015.
8. Onifade, 2013, <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:670595/FULLTEXT01.pdf>
9. Carsten B. Nielsen. Clogging of porous pavement-assessment of test sections. Technical report, Hedehusene, Denmark, 2007.

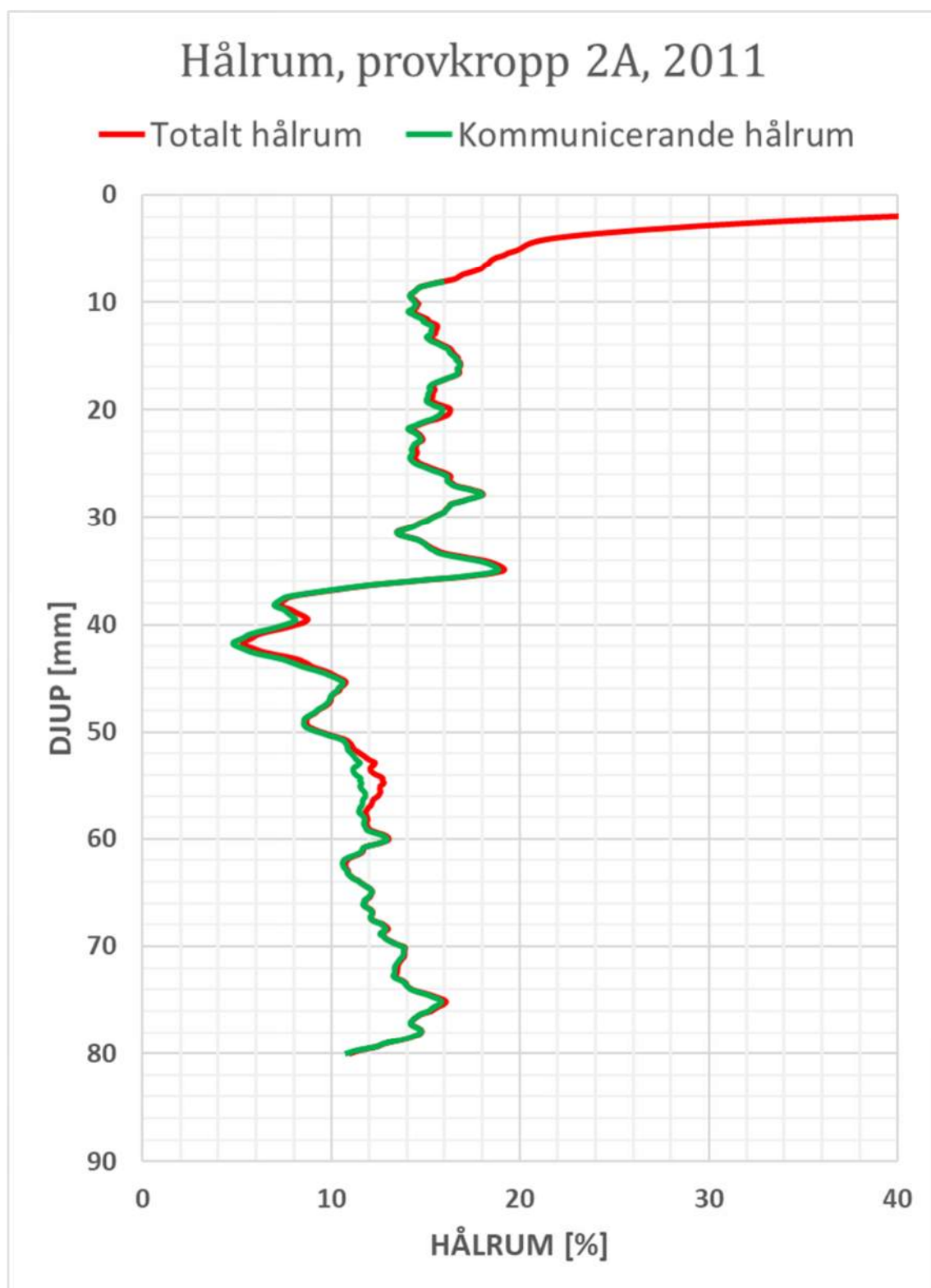
Bilagor:

- B1-B9: Totalt samt kommunicerande hålrum, provkroppar 1B-S3
- B10-B12: Kommunicerande medelhållrum, provkroppar 2011, 2014 (FR/ER)
- B13: Kommunicerande medelhållrum 2011 samt 2014 (före rengöring).
- B14: Kommunicerande medelhållrum 2011 samt 2014 (efter rengöring).
- B15: Kommunicerande medelhållrum 2014 före och efter rengöring).



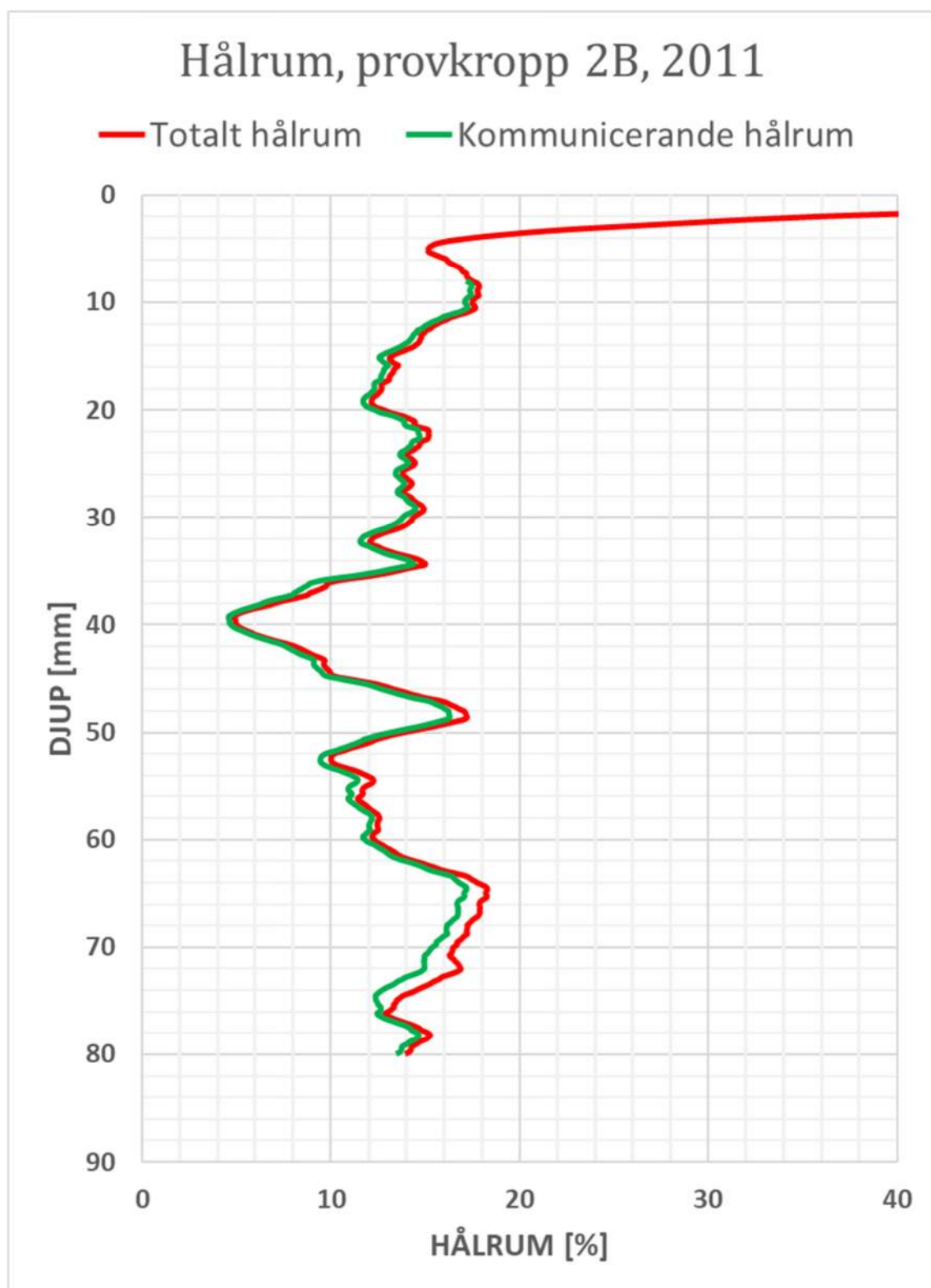
Provkropp 1B	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	12.16%	15.55%	8.76%
Kommuniserande hålrum	11.94%	15.45%	8.42%

B1. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 1B.



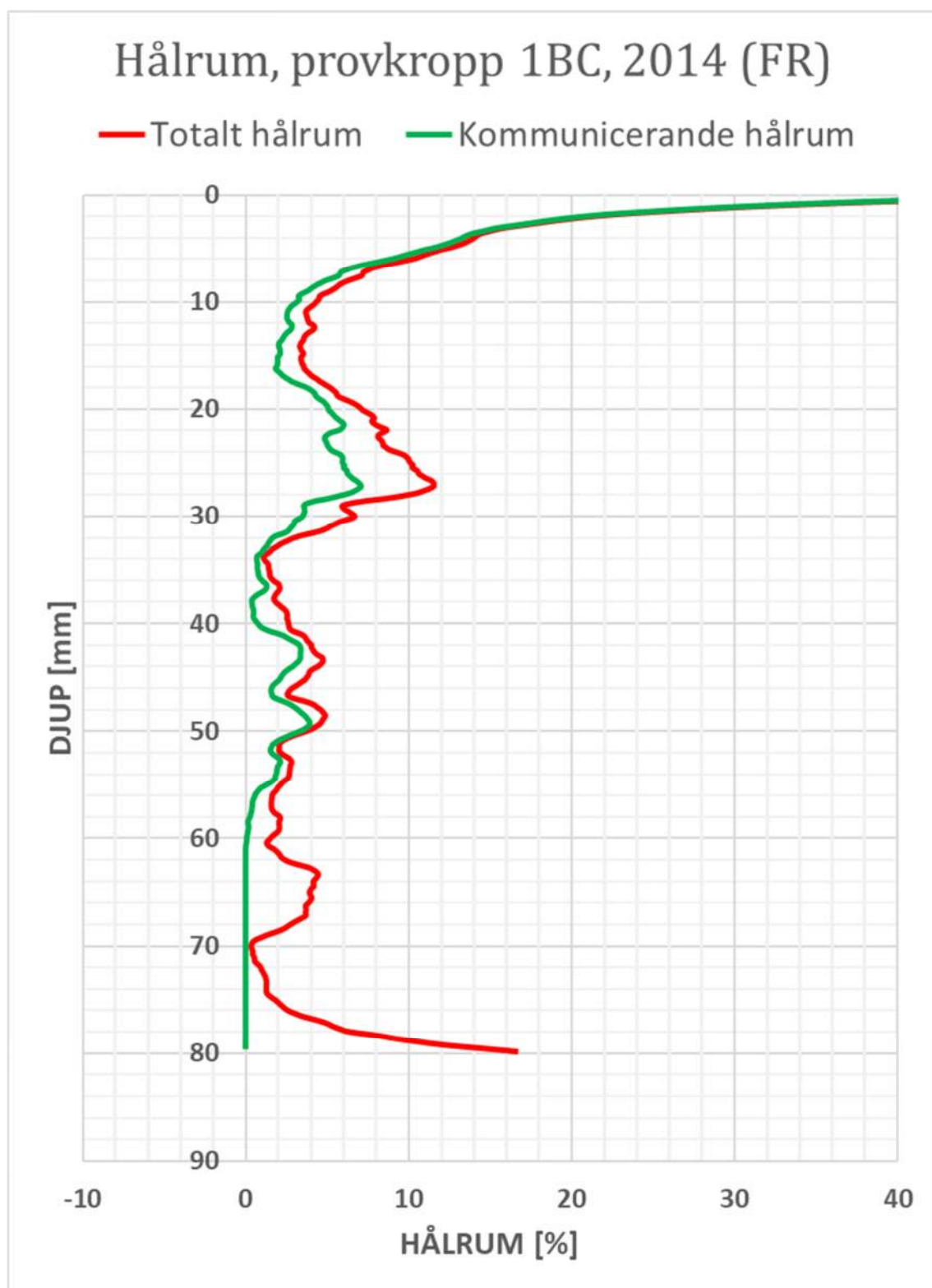
Provkropp 2A	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	13.51%	15.65%	11.37%
Kommuniserande hålrum	13.30%	15.50%	11.11%

B2. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 2A.



Provkropp 2B	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	14.55%	14.58%	14.53%
Kommuniserande hålrum	13.92%	14.14%	13.69%

B3. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 2B.

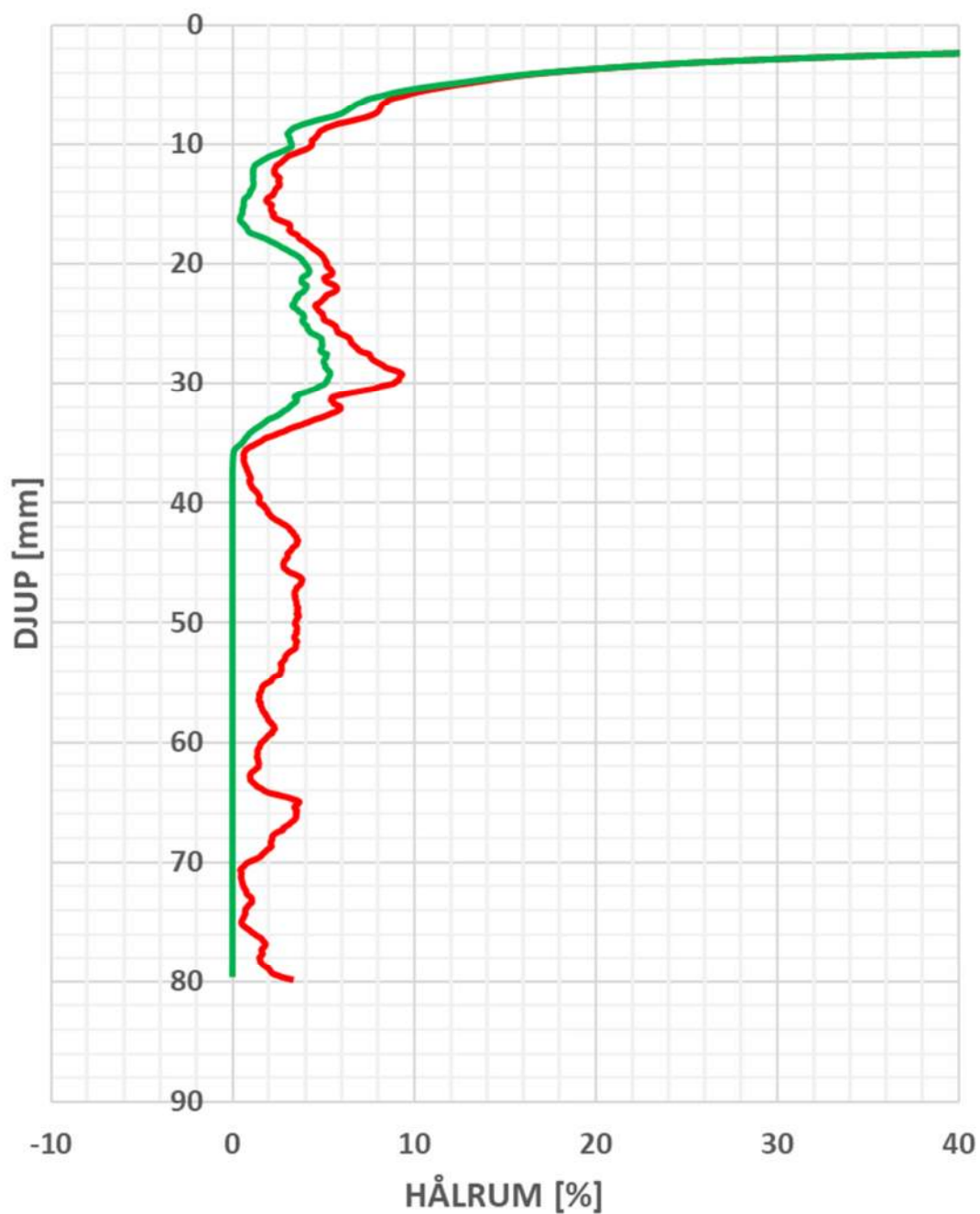


Provkropp 1BC	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	4.65%	6.63%	2.67%
Kommunicerande hålrum	2.70%	4.38%	1.02%

B4. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 1BC.

Hålrum, provkropp 2BC, 2014 (FR)

— Totalt hålrum — Kommuniserande hålrum

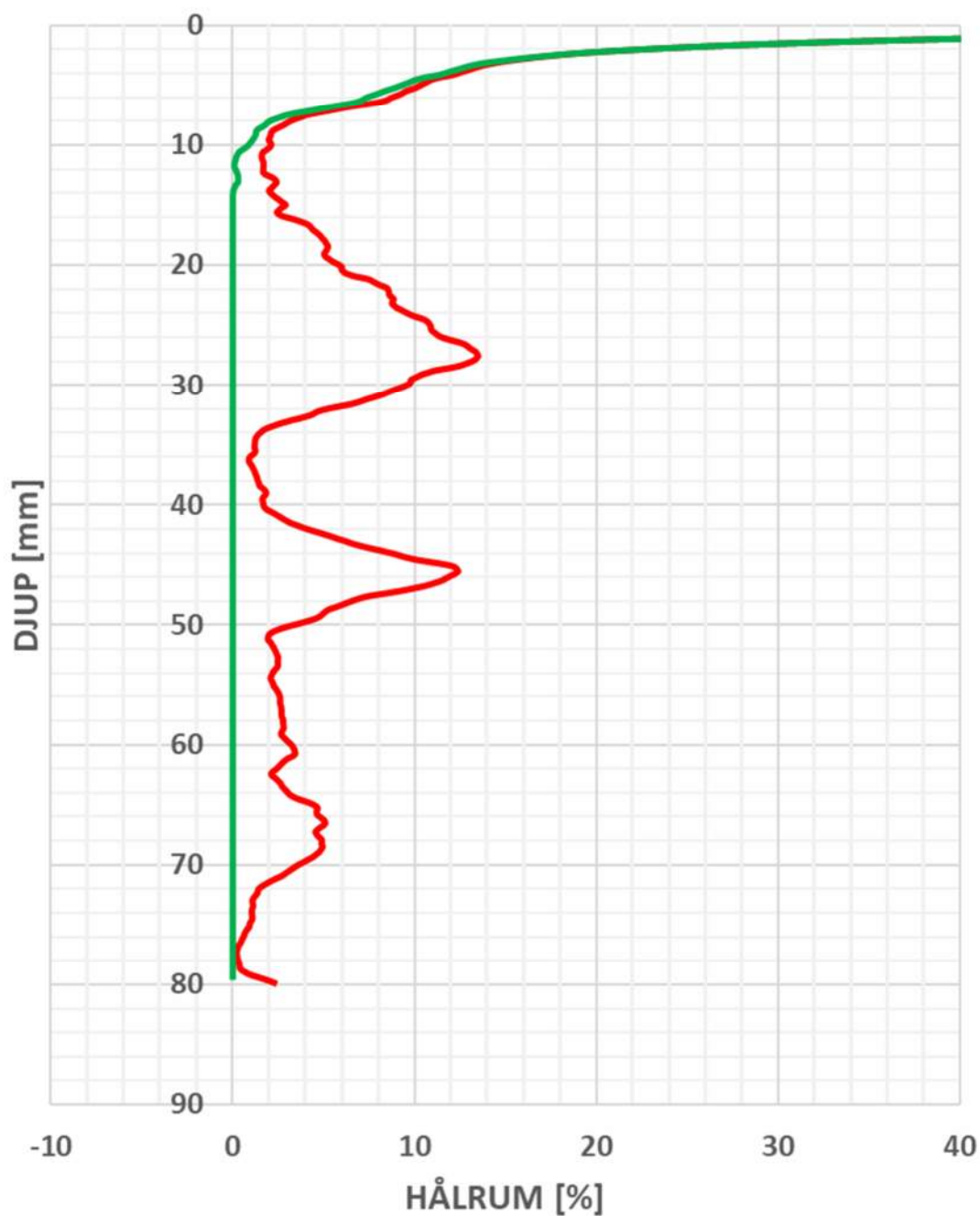


Provkropp 2BC	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	3.54%	4.89%	2.19%
Kommuniserande hålrum	1.54%	3.08%	0.0%

B5. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 2BC.

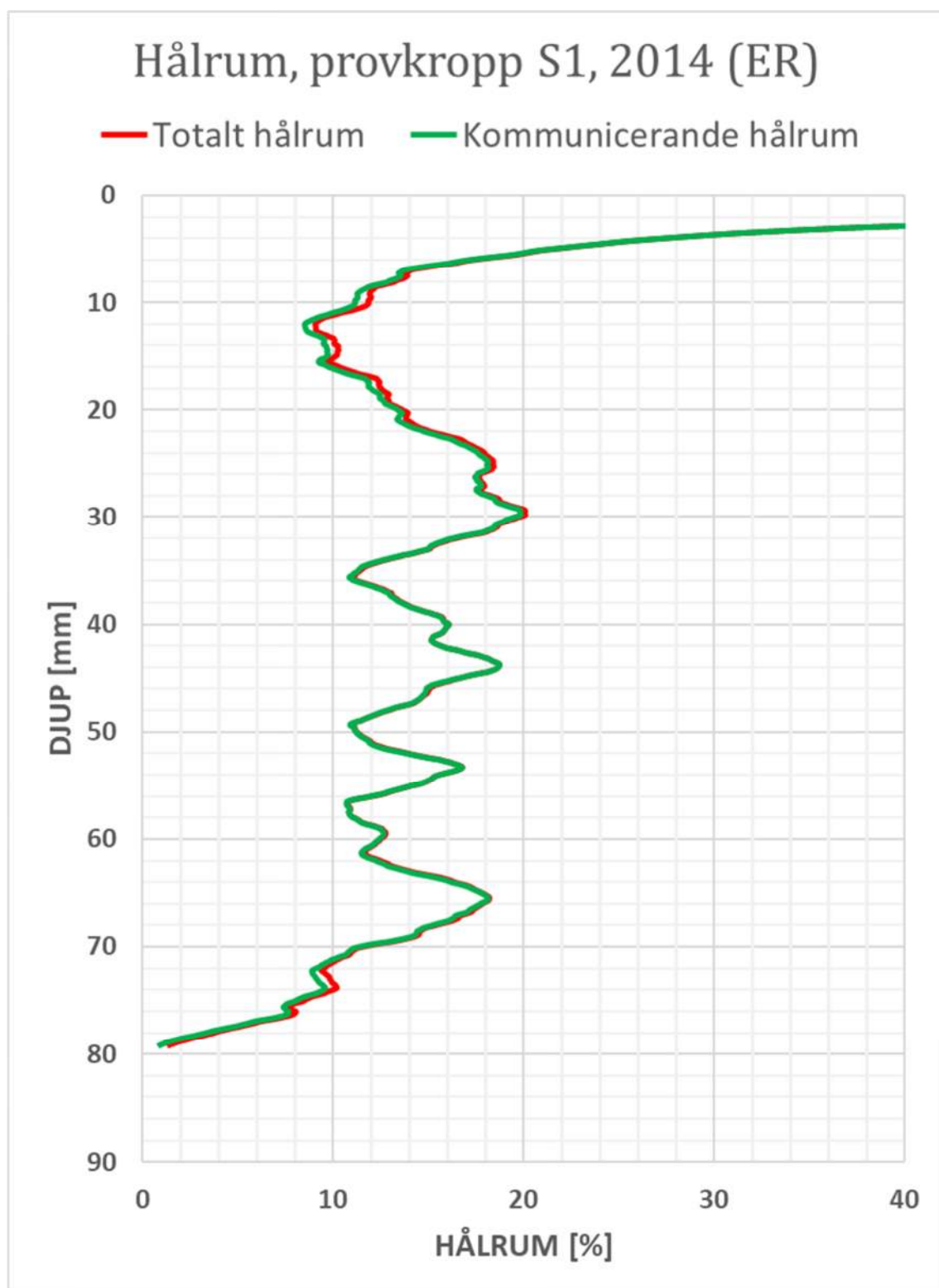
Hålrum, provkropp 3BC, 2014 (FR)

— Totalt hålrum — Kommuniserande hålrum



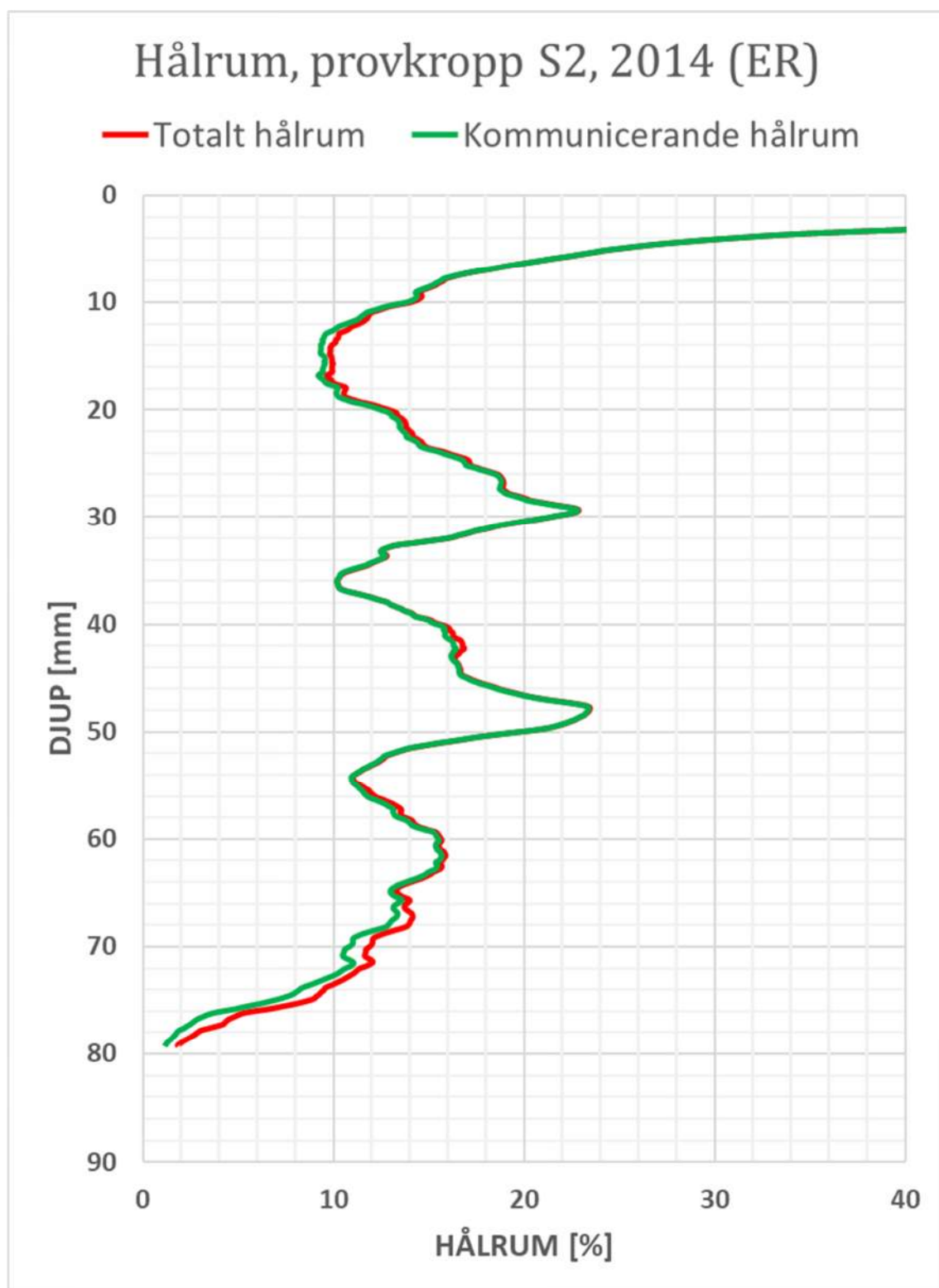
Provkropp 3BC	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	4.81%	6.31%	3.31%
Kommunicerande hålrum	0.18%	0.36%	0.00%

B6. Totalt samt kommuniserande hålrum, provkropp 3BC.



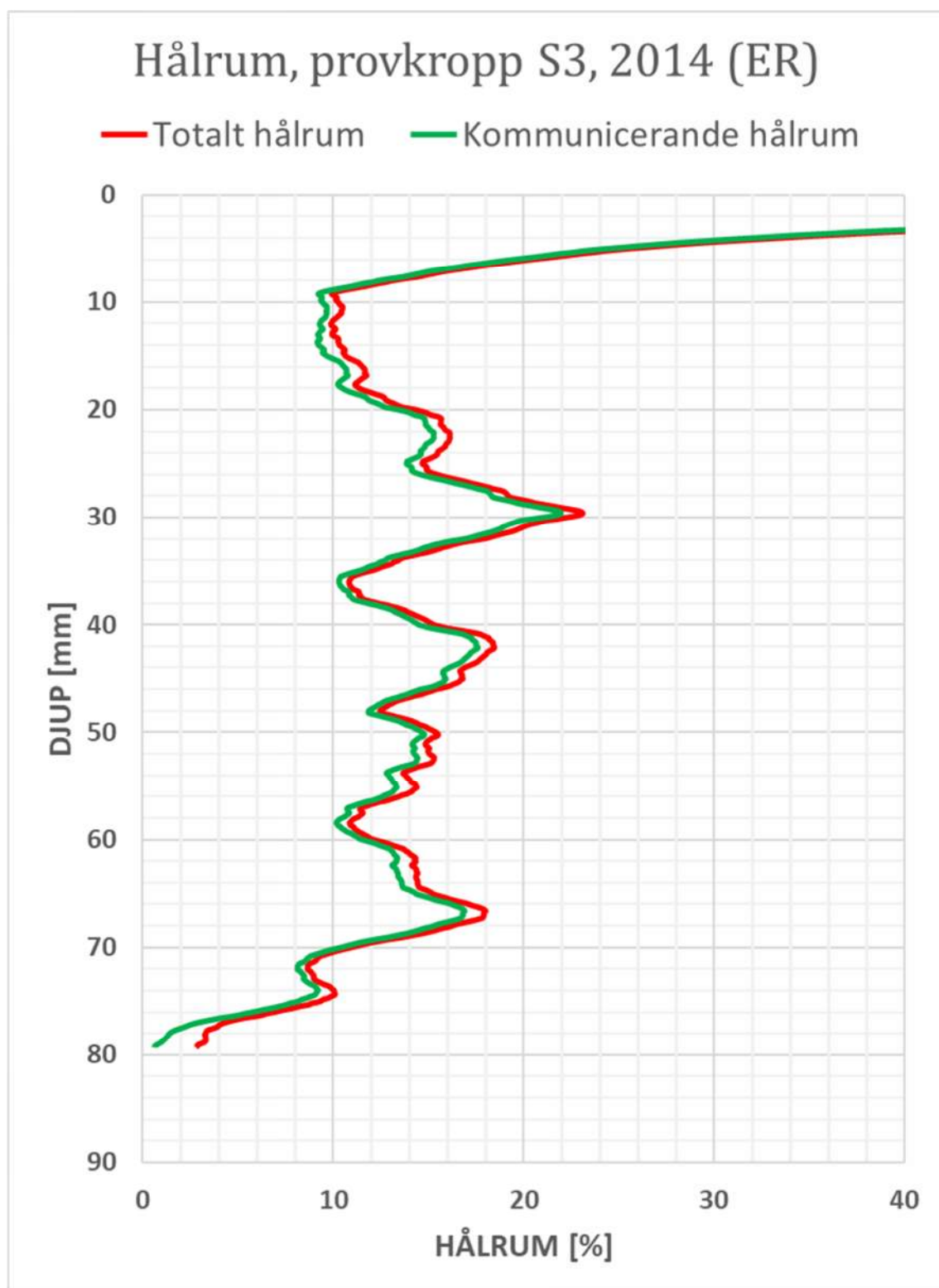
Provkropp S1	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	14.22%	14.26%	14.19%
Kommuniserande hålrum	13.98%	13.87%	14.10%

B7. Totalt samt kommuniserande, hålrum provkropp S1.



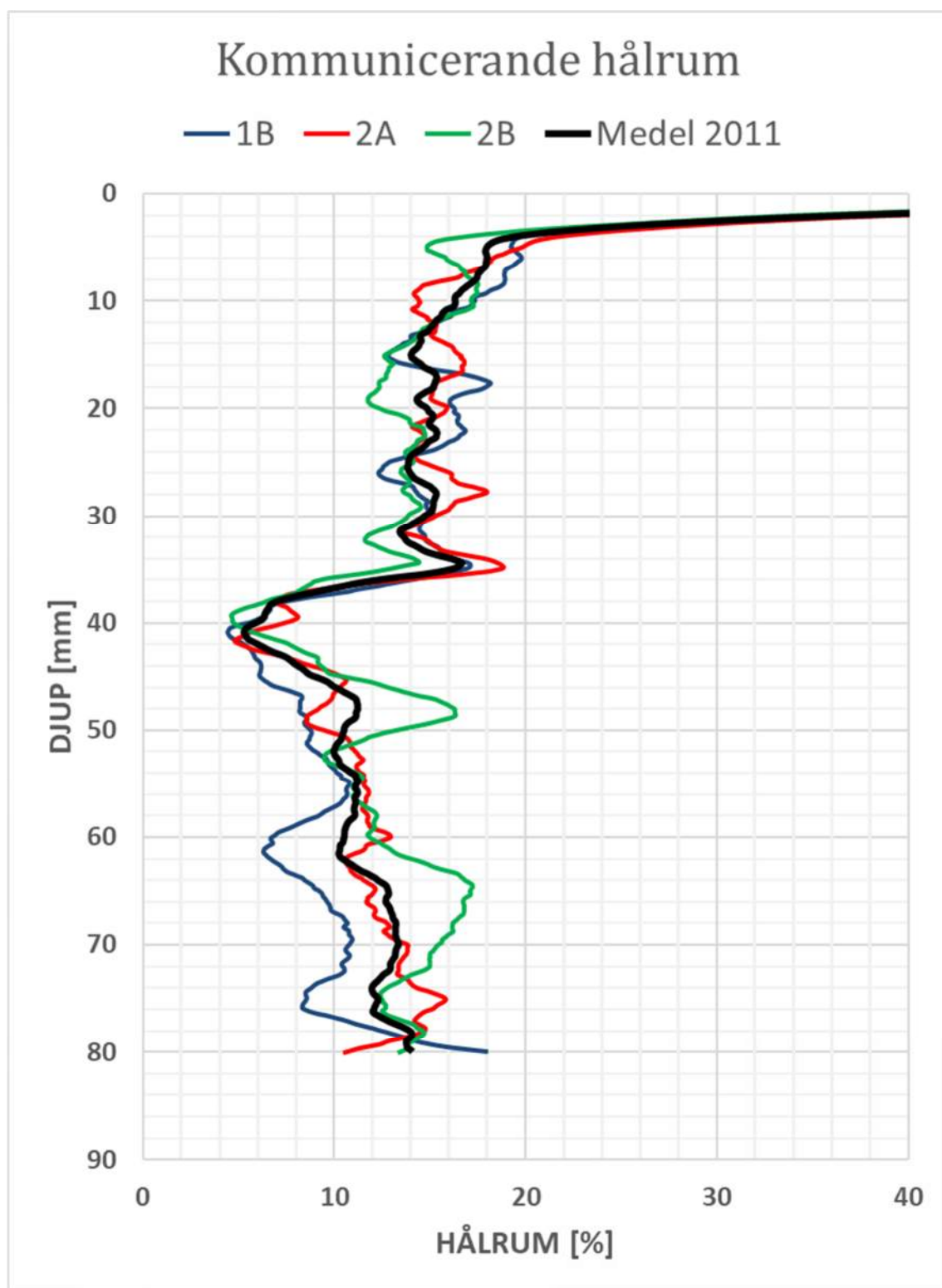
Provkropp S2	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	14.44%	14.09%	14.80%
Kommuniserande hålrum	14.17%	13.77%	14.56%

B8. Totalt samt kommuniserande, hålrum provkropp S2.



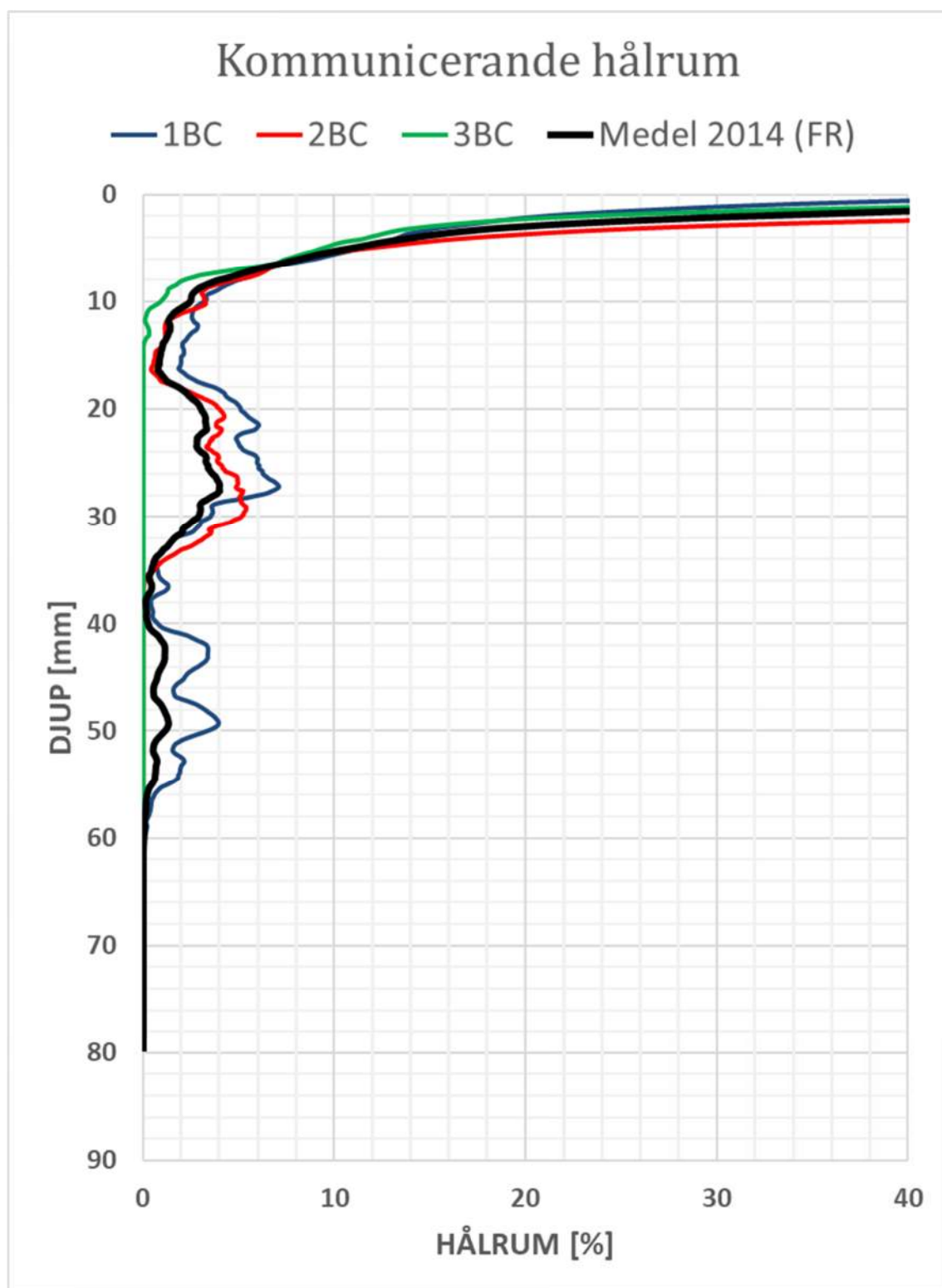
Provkropp S3	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	13.96%	13.50%	14.41%
Kommuniserande hålrum	13.32%	12.98%	13.66%

B9. Totalt samt kommuniserande, hålrum provkropp S3.



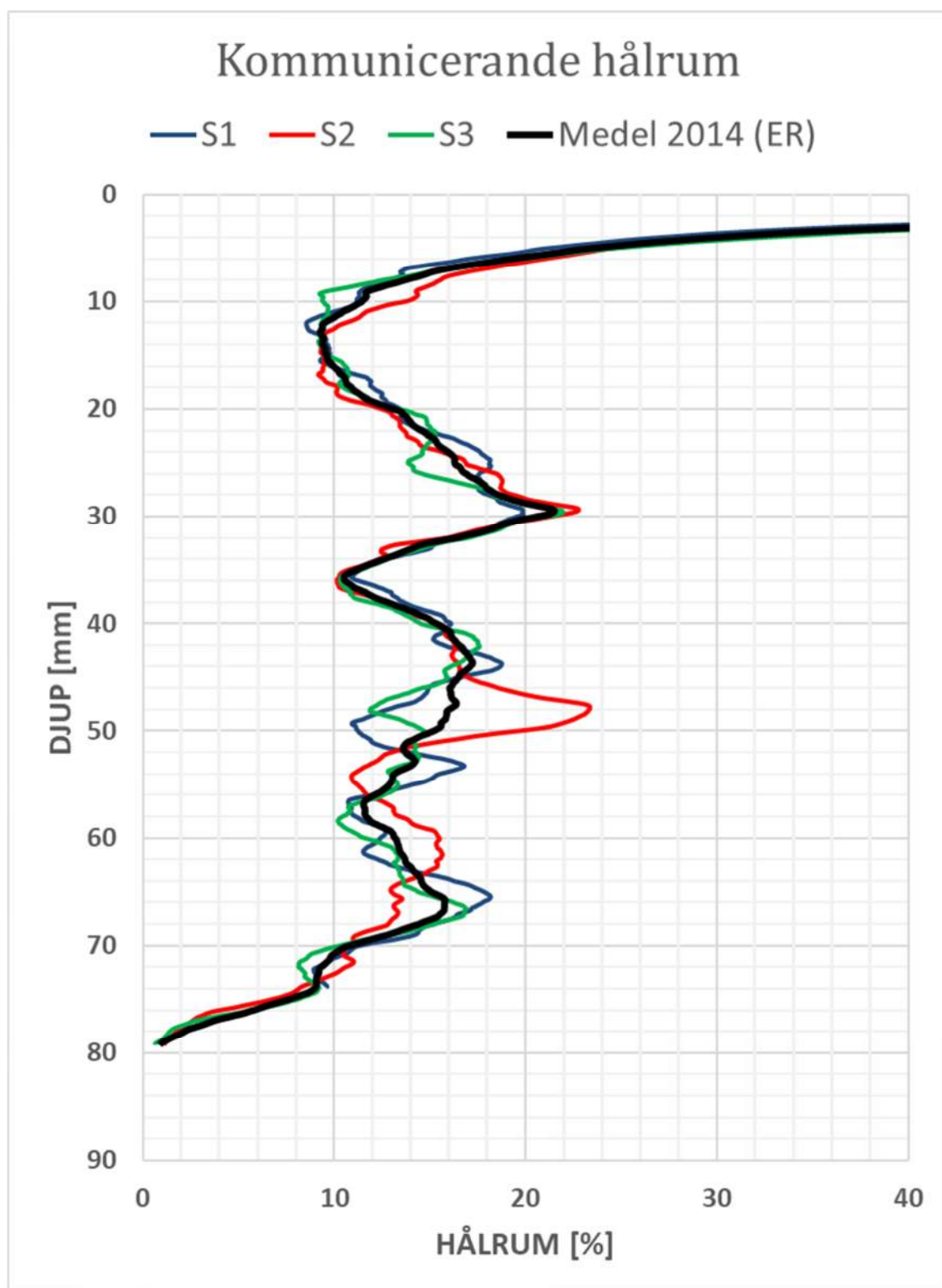
Provkroppar 2011	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	13.41%	15.26%	11.55%
Kommunicerande hålrum	13.05%	15.03%	11.07%

B10. Totalt samt kommunicerande medelhålrum, provkropp 1B, 2A, 2B.



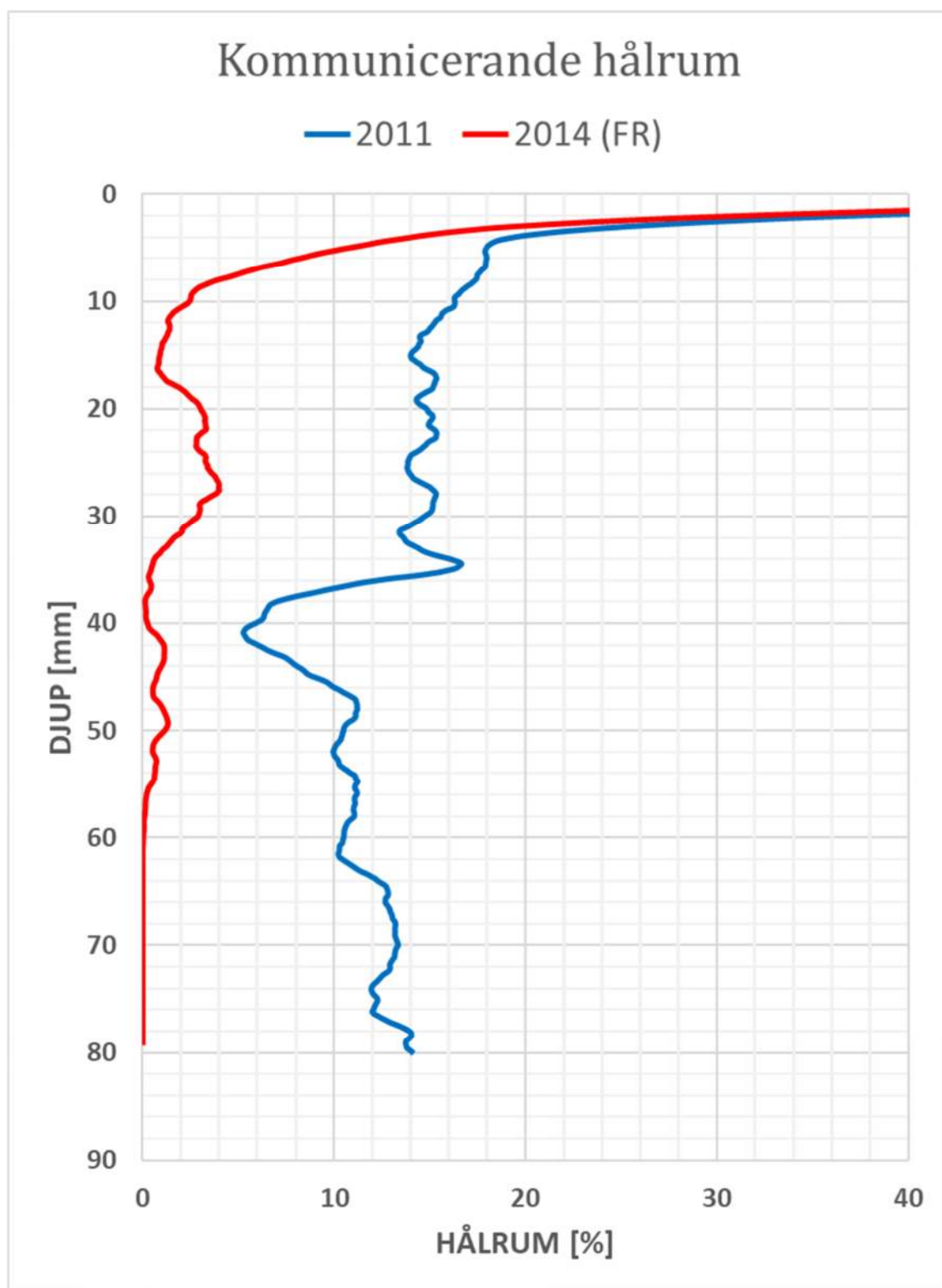
Provkroppar 2014 (FR)	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	4.36%	5.94%	2.72%
Kommunicerande hålrum	1.47%	2.61%	0.34%

B11. Kommunicerande medelhålrum, provkropp 1BC, 2BC, 3BC.



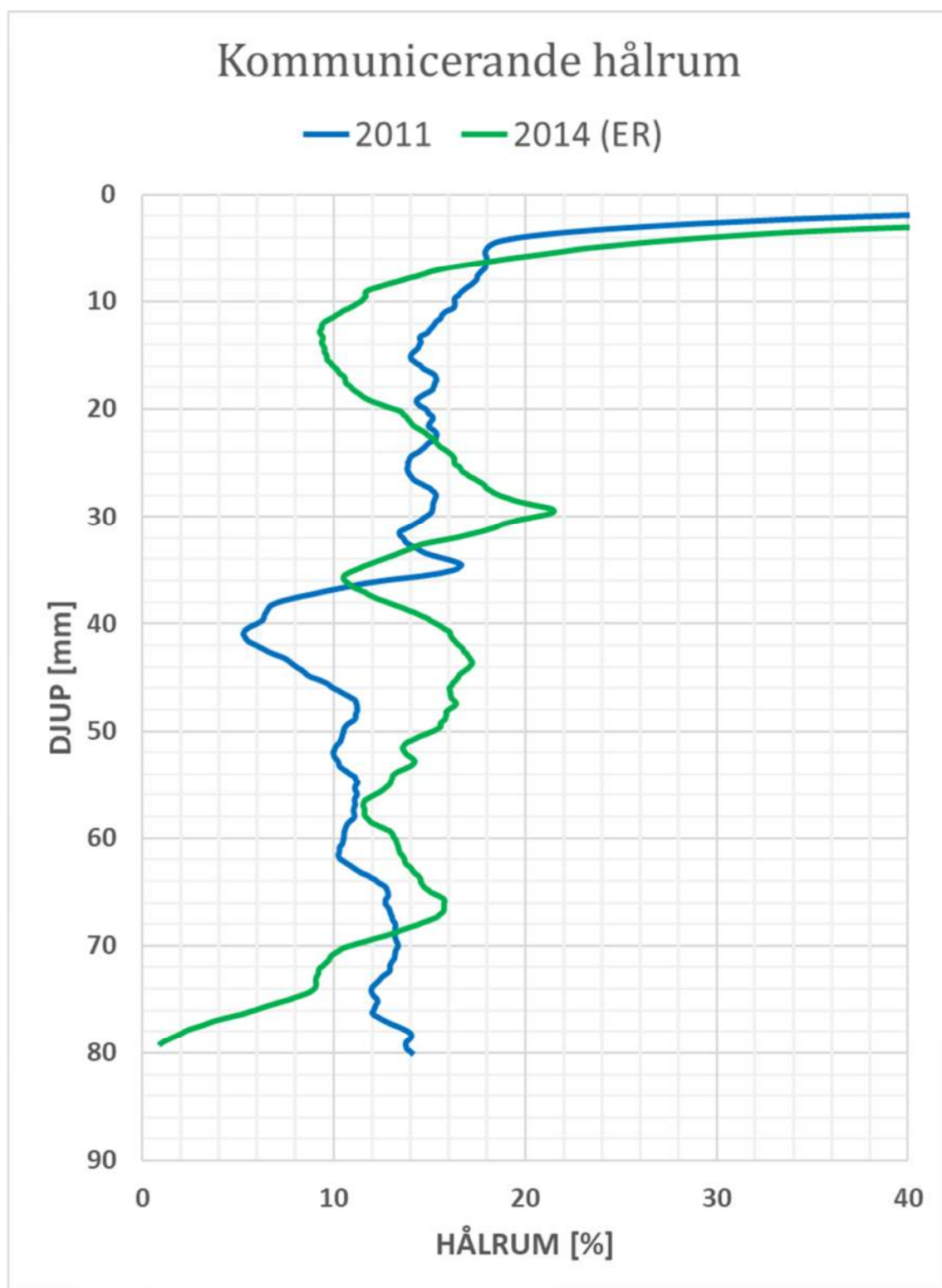
Provkroppar 2014 (ER)	Medel	Övre lager	Botten lager
Totalt hålrum	14.21%	13.95%	14.47%
Kommunicerande hålrum	13.82%	13.54%	14.11%

B12. Kommunicerande medelhålrum, provkropp S1, S2, S3.



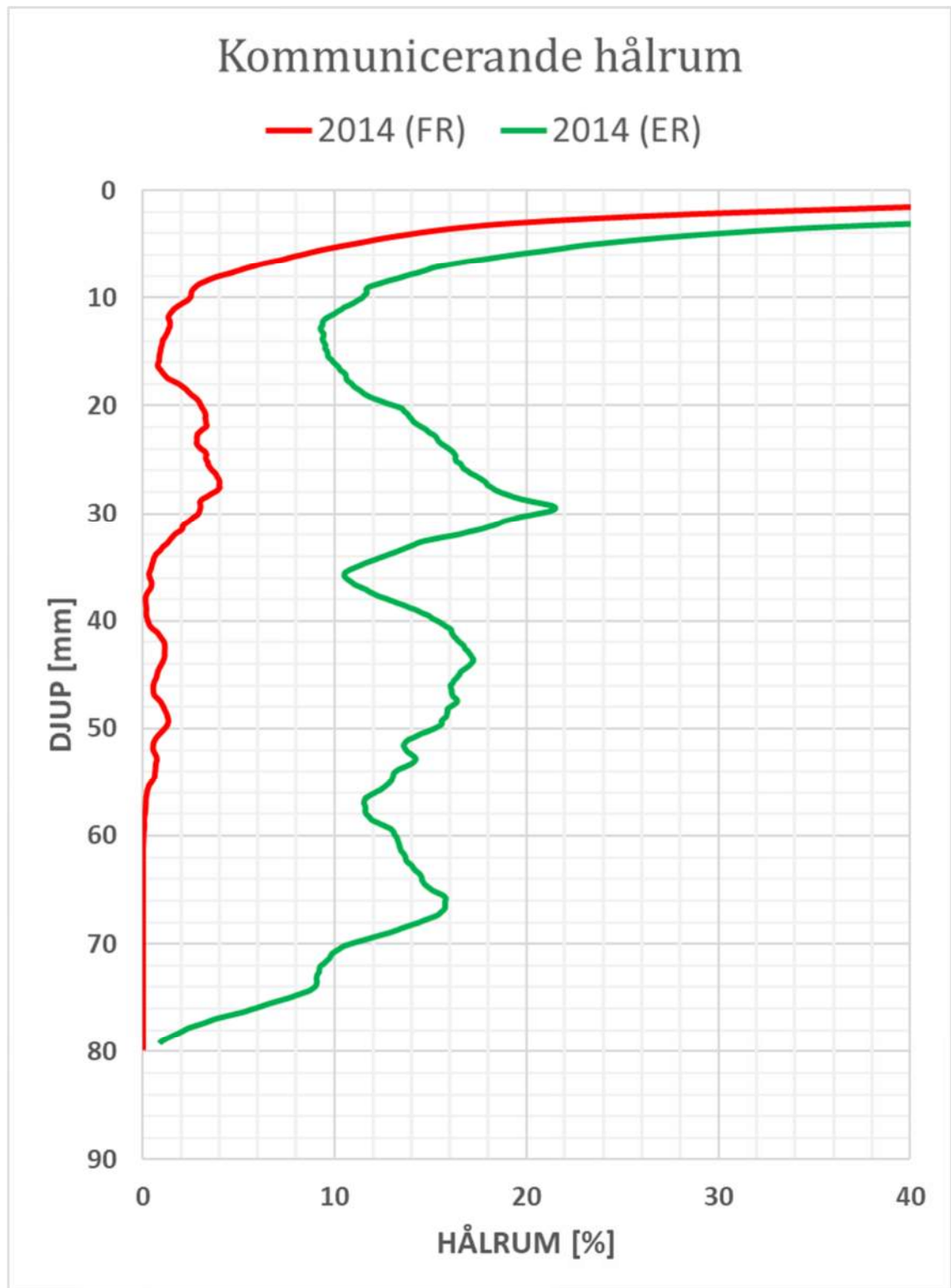
Kommunicerande hålrum	Medel	Övre lager	Botten lager
2011	13.05%	15.03%	11.07%
2014 (Före rengöring)	1.47%	2.61%	0.34%

B13. Kommunicerande medelhålrums 2011 samt 2014 (före rengöring).



Kommunicerande hålrum	Medel	Övre lager	Botten lager
2011	13.05%	15.03%	11.07%
2014 (Efter rengöring)	13.82%	13.54%	14.11%

B14. Kommunicerande medelhålrums 2011 samt 2014 (efter rengöring).



Kommunicerande hålrum	Medel	Övre lager	Botten lager
2014 (Före rengöring)	1.47%	2.61%	0.34%
2014 (Efter rengöring)	13.82%	13.54%	14.11%

B15. Kommunicerande medelhålrums 2014 (före och efter rengöring).