

IMPLEMENTERING AV SEISMISKA YTVÅGSMÄTNINGAR PÅ VÄGBELÄGGNINGAR



Henrik Bjurström, VTI

Anders Gudmarsson, Peab Asfalt AB

Josefin Starkhammar, LTH

Nils Rydén, LTH/Peab

2022-04-11

FÖRORD

Detta projekt har gemensamt genomförts av Peab Asfalt AB, VTI och LTH. Ett stort tack riktas till Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Bana Väg För Framtiden (BVFF) för finansieringen av projektet. Projektet har drivits och genomförts av följande arbetsgrupp:

Henrik Bjurström	VTI
Anders Gudmarsson	Peab Asfalt AB
Josefin Starkhammar	LTH
Nils Rydén	LTH/Peab

Datansamlingsutrustningen är designad och byggd av Josefin Starkhammar och Nils Rydén vid LTH.

Magnus Nilsson vid Trafikverket har samlat in och analyserat data med PaveScan RDM i samband med mätningar på E22.

Henrik Bjurström

Stockholm, april 2022.

SAMMANFATTNING

Inom detta projekt har en ny metod för oförstörande profilerande mätningar av styvhetsmodulen på beläggningar demonstrerats och utvärderats på två kontrollerade vägsträckor. Resultaten visar att det nu är möjligt att mäta upp beläggningsens styvhetsmodul och aktuell temperatur, vid en kontrollerad frekvens och töjningsnivå, genom rullande mätningar i trafik. Värdet av denna nya möjlighet är att heltäckande profilerande kvalitetskontroll av både nya och gamla vägar kan göras säkrare, från en vanlig bil, samt mer kostnadseffektivt genom att avspärrningar och stillastående provtagning kan undvikas eller minimeras. För en given beläggningstjocklek är styvhetsmodulen den viktigaste materialegenskapen i bundna asfaltlager och den egenskap som används som indata för att dimensionera beläggningsens livslängd och underhållsbehov.

Metoden bygger på kontaktlösa seismiska ytvågsmätningar med hjälp av mikrofoner. Uppmätt ytvågshastighet räknas om till dynamisk styvhetsmodul med hjälp av fundamentala viskoelastiska samband. Uppmätt ytvågshastighet och dynamisk styvhetsmodul har jämförts med konventionella stillastående mätningar och provning av borrhärdor i laboratorium. Resultaten visar på en god överensstämmelse trots delvis okända temperaturprofiler i beläggningsen. Rullande seismiska ytvågsmätningar har utförts i uppemot 50 km/h och ca 6 000 mätningar har samlats in på ungefär samma tid som en stillastående konventionell seismisk ytvågsmätning kräver.

Inom detta projekt har endast ytvågshastigheten och styvhetsmodulen analyserats och jämförts med referensmätningar. Det finns dock potential att utveckla den automatiska analysen av rådata så att också beläggningsens tjocklek och den viskösa delen av beläggningsens styvhetsmodul kan utvärderas.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	4
1.1	BAKGRUND	4
1.2	MÅL OCH SYFTE	5
1.3	AVGRÄNSNINGAR	5
2	FÄLTMÄTNINGAR	5
2.1	MÄTUTRUSTNING	6
2.2	DATABEARBETNING	7
2.3	RIKSVÄG 40	8
2.4	E22	14
3	LABBMÄTNINGAR	21
3.1	METOD	21
3.2	PROVKROPPAR – RIKSVÄG 40	21
3.3	PROVKROPPAR – E22	23
4	JÄMFÖRANDE RESULTAT	26
4.1	RIKSVÄG 40	26
4.2	E22	27
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	30
	REFERENSER	32

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Flexibla vägöverbyggnader konstrueras med ett eller ofta flera bitumenbundna lager ovanpå en uppsättning obundna lager. Dessa lagrets styvhetsmoduler, tjocklekar samt Poissons tal är indata vid vägdimensionering och fundamentala egenskaper för konstruktionens bärförmåga och livslängd. Kraven på den färdiga vägen utgår dock inte ifrån dessa parametrar utan oftast ifrån att tillräcklig tjocklek samt hålrums halt (densitet) har uppnåtts i enstaka provpunkter. För att kontrollera beläggningsarbetets utförande är det viktigt med en kostnadseffektiv och tillförlitlig kvalitetskontroll som speglar en representativ del av beläggningen. Utvärdering av det bundna asfaltlagret genomförs vanligtvis genom att borrhärdar tagna ur vägen utvärderas i laboratoriemiljö. Där undersöks hålrums halt som ses som en indikator på hur väl packningsarbetet utförts, samt lagrets tjocklek. Någon utvärdering av lagrets styvhet genomförs dock i regel inte eftersom detta traditionellt varit dyrt och komplicerat. Det finns ännu idag ingen enkel/billig metod som används rutinmässigt där styvhetsmodulen på de bundna lagren kan mätas upp kontinuerligt längs med hela vägen vid en kontrollerad töjningsnivå, frekvens och känd temperatur oberoende av underliggande lagrets styvhet.

Ett alternativ är att som i denna studie utvärdera asfaltens egenskaper genom oförstörande provning. En vanligt förekommande oförstörande provningsmetod för att uppskatta styvheten på en överbyggnad med flera asfaltlager är fallvikt. Utifrån deflektionsdata från en tung last kan styvhetsmoduler och tjocklekar för vägkonstruktionens olika lager uppskattas. Utvärdering av moduler och tjocklekar ger en direkt koppling mot de ingångsvärden som används i konstruktionsberäkningen för väggroppen. Fallviktmätningar är vanligt förekommande men förhållandevis långsamma och kostsamma att utföra, vilket medför att endast ett fåtal punkter testas och att resten av vägen förutsätts ha liknande egenskaper. En stor fördel med tunga fallviktmätningar är att de kan ses som en verklig provbelastning av hela vägöverbyggnaden vid en belastningsnivå som motsvarar en dimensionerande standardaxel. Tunna och styva lager har dock visats sig vara svårare att utvärdera med fallvikten än tjockare och mindre styva till följd av de töjningsnivåer och utvärderingsteknik som är förknippade med testmetoden, vilket innebär att osäkerheterna blir större för de bundna lagren jämfört med de obundna. Utveckling av rullande fallviktmätningar med tung instrumenterad lastbil (s.k. Traffic Speed Deflectometer, *TSD*) har pågått länge och har nu börjat användas i flera länder (Zofka et al. 2017).

Styvhet kan också utvärderas med oförstörande seismiska ytvågsmätningar. Dessa baseras på att hastigheten hos seismiska ytvågor, genererade med någon typ av slagkälla, uppmäts mellan två eller flera sensorer. Vilken hastighet olika typer av seismiska vågor har är materialegenskaper som är specifika för det studerade materialet och kan räknas om till styvhetsmoduler baserat på grundläggande elasticitetsteori. Metoden för ytvågsmätningar på vägar började utvecklas på 1990-talet i USA (Nazarian et al. 1999) och har sedan dess utvecklats med fler (Ryden 2004) och kontaktlösa (Bjurström 2017) sensorer. Under de senaste åren har kontaktlösa mätningar från bil utvecklats vilket gör det möjligt att utföra arbetsmiljömässigt säkrare och effektivare profilerande mätningar i trafik utan att stänga av vägen (Ryden et al. 2018; Ryden et al. 2019). Parallellt med utvecklingen av fältmätningar har också seismiska mätningar på borrhärdar och provkroppar i laboratorium utvecklats (Nazarian et al. 1999; Gudmarsson 2014). Tidigare jämförelser mellan seismiska mätningar i fält och laboratorium samt konventionell provning av dynamisk styvhetsmodul har visat på god överensstämmelse (Gudmarsson 2014; Bjurström 2017). I denna rapport redovisas nya resultat där rullande ytvågsmätningar har gjorts med den senaste versionen av mätsystemet längs längre teststräckor och i högre fart jämfört med tidigare.

1.2 Mål och syfte

Syftet med föreliggande rapport är att utvärdera den senaste tekniken för rullande seismiska ytvågmätningar på vägar. Resultatet från mätningar i högre hastigheter och längs längre provsträckor jämförs med konventionell provning för att kunna komma närmare en implementering av metoden för effektivare och säkrare kvalitetskontroll av både gamla och nya vägar.

1.3 Avgränsningar

Mätningarna som genomförts inom ramen för projektet är mycket omfattande jämfört med vad som tidigare varit möjligt utifrån att all datainsamlingsutrustning kan monteras på en bil och tester genomförs i hastigheter uppemot 50 km/h. Antalet objekt som undersökts i detta projekt är dock begränsat med tanke på mängderna data som samlas in vid varje tillfälle.

Fältmätningarna analyseras med avseende på våghastighet vilket betyder att asfaltens elastiska egenskaper bestäms. Genom att studera dämpningen av vågor skulle materialets viskösa komponenter också kunna bestämmas men det ligger utanför ramen för detta projekt. Beläggningens tjocklek har inte heller utvärderats inom detta projekt på grund av omfattningen på mängden data som samlats in. Det finns dock möjlighet att utvärdera tjocklek och den viskösa delen av styvhetsmodulen utifrån data som samlats in inom detta projekt.

2 FÄLTMÄTNINGAR

Rullande ytvågmätningar har utförts vid två olika tillfällen: på riksväg 40 utanför Ulricehamn och på nybyggda E22 utanför Tollarp. Det testade avsnittet på riksväg 40 byggdes 2015 och mätningarna utfördes 2021-04-14 så vägen var väl insliten vid testtillfället och hade varit i bruk under dryga fem år. E22 utanför Tollarp var vid mättillfället helt nybyggd och inte öppnad för trafik. De seismiska ytvågmätningarna utfördes på plats 2020-09-16.

Vid små töjningar kan asfalt ses som ett linjärviskoelastiskt material. Data som samlas in i fält analyseras med avseende på våghastighet och resultaten är alltså att betrakta som den elastiska delen av den komplexa dynamiska styvhetsmodulen (E-modul). För att även karaktärisera materialets viskösa egenskaper kan ytvågornas dämpning analyseras men det ligger utanför avgränsningarna för projektet.

Resultaten från fältmätningarna redovisas i form av Rayleighvågshastighet, V_R . Rayleighvågen är en form av ytvåg som enkelt genereras genom en impuls vertikalt applicerad på vägbeläggningen och innehåller således mycket av energin från impulsen. Formen på Rayleighvågen gör att vägytan i huvudsak rör sig vertikalt vilket gör insamlingen av signalen relativt enkel och effektiv. Rayleighvågshastigheten är något långsammare (en faktor ca 0,93) än skjuvvågshastigheten (V_S) och förhåller sig till V_S genom Ekv. 1:

$$V_R = V_S \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad \text{Ekv. 1}$$

där ν är materialets tvärkontraktionstal (Poissons tal). Vidare förhåller sig E-modulen till materialets skjuvvågshastighet genom Ekv. 2, där ρ är materialets densitet ($\rho V_S^2 = G$ skjuvmodulen).

$$E = 2\rho V_S^2(1 + \nu) \quad \text{Ekv. 2}$$

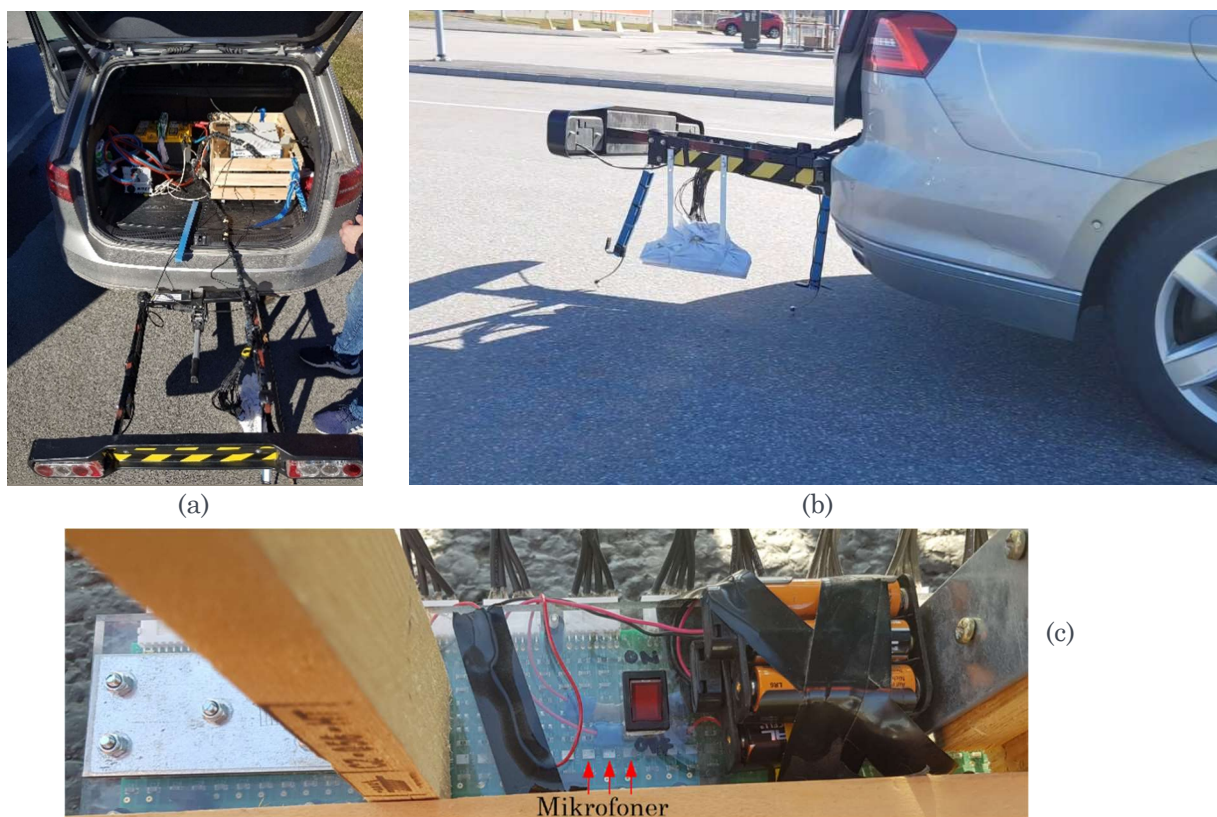
Med en uppmätt Rayleighvågshastighet kan alltså E-modulen räknas fram med hjälp av Ekv. 1 och 2 när materialets densitet och tvärkontraktionstal är kända eller kan uppskattas. E-modulen förhåller sig då till Rayleighvågshastigheten genom Ekv. 3.

$$E = V_R^2 \frac{2\rho(1 + \nu)^3}{(0,87 + 1,12\nu)^2} \quad \text{Ekv. 3}$$

2.1 Mätutrustning

Ett datainsamlingssystem baserat på mikroelektromekaniska sensorer (MEMS), för rullande insamling av ytvågsdata konstruerades vid LTH/KTH inom forskargruppen för detta projekt under 2015–2016. Insamlingssystemet bestod av 48 MEMS-mikrofoner monterade på rad med en centimeters mellanrum. Detta var det första datainsamlingssystemet i sitt slag som konstruerats i syfte att användas vid rullande ytvågsmätningar och beskrivs i detalj av Bjurström et al. (2016).

Inom ett föregående projekt 2016–2019 (Trafikverket/VINNOVA 2016-03302) utvecklades det MEMS-baserade systemet vidare (Ryden et al. 2018; Ryden et al. 2019). Den nya utrustningen bygger på samma princip som det tidigare men förbättringar har gjorts med nya slagkällor, nya mikrofoner, GPS, temperaturmätning och nytt datainsamlingsprogram. Denna utveckling har gjort det möjligt att montera utrustningen på dragkroken till en bil för automatisk datainsamling i högre hastigheter, se Figur 1.



Figur 1. Senaste versionen av mätsystemet för kontaktlösa ytvågsmätningar från bil. Figuren visar (a) batteri och datainsamlingssystem inlastade i bilen, (b) mikrofonarrayen täckt av tyg för att skydda mikrofonerna samt de två studsande källorna (bultar i plaststripes) och (c) mikrofonarrayen i närbild där de sitter monterade på kretskort

Den nya datainsamlingsutrustningen består av en datainsamlingsenhet, två slagkällor för att generera ytvågor, samt en mikrofonenhet där 48 MEMS-mikrofoner har monterats på rad (array) med 7,5 mm mellanrum. Syftet med två olika källor är att få fler mätpunkter per meter samt att kunna medelvärdesbilda eventuella systematiska fel i uppmätt seismisk hastighet från mätningar i olika riktningar längs mikrofonarrayen. Utvärderingen av ytvågshastigheten (V_R) i asfalten sker under antagandet att mikrofonarrayen är parallell med vägytan, att alla mikrofoner sitter på samma avstånd från vägytan. En liten avvikelse där mikrofonarrayen inte är helt parallell med vägbeläggningen, eller en ojämnhet i vägbanan, kan påverka den utvärderade hastigheten betydligt (Bjurström & Ryden 2015). Varje slagkälla utgörs idag av en bult som skruvats fast i en grov plaststripe och monterats på datainsamlingsutrustningen. Bulten ligger an mot marken när bilen står stilla men studsar fram spontant när bilen är i rullning och skapar ca två slag (mätningar) per meter. Observera att mätpunkterna inte är helt jämnt fördelade längs mätsträckan utan hamnar där dom hamnar, i och med att slagen från källorna genereras genom studsar och alltså inte styrs på något sätt ifrån mätsystemet.

Tillsammans med datainsamlingsutrustningen har en GPS och en IR-sensor för temperaturmätning installerats för att vid varje enskild mätning få tillhörande GPS-position samt yttemperatur på vägbeläggningen. Alla mätningar är synkroniserade i tid men GPS och temperatur uppdateras bara en gång per sekund medan flera ytvågsmätningar per sekund är möjligt. Ytvågsmätningarna registreras samtidigt på 48 synkroniserade kanaler med en samplingshastighet på 200 kHz under 2,5 ms. Om flera ytvågsmätningar samlas in under samma sekund används linjär interpolation för att varje mätning ska få en unik GPS position och temperatur.

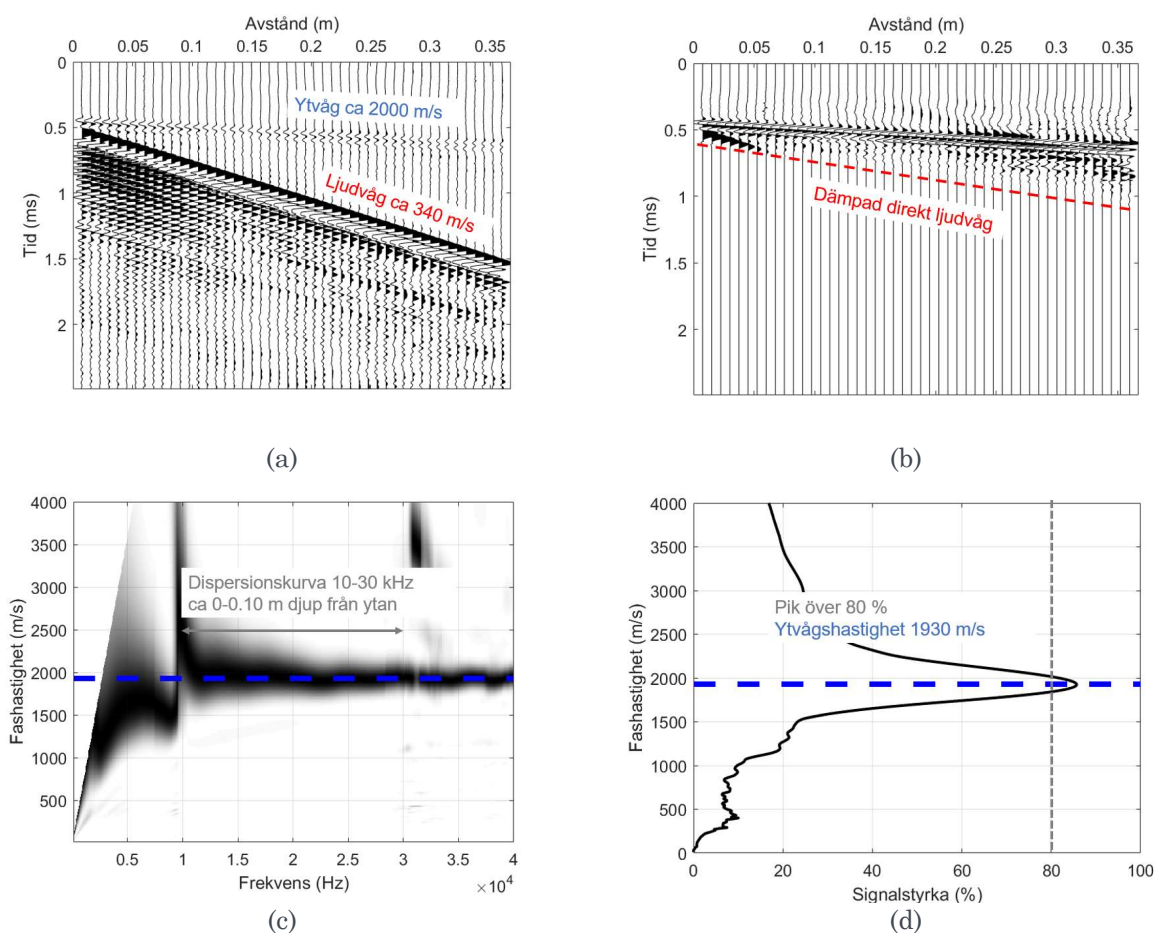
2.2 Databearbetning

Ett insamlat dataset från Rv 40 har här valts för att illustrera den automatiska databearbetning som använts för alla kontaktlösa ytvågsmätningar i detta projekt. Varje individuell mätning resulterar i signaler från samtliga 48 mikrofoner där varje signals amplitud plottas över tid vertikalt i exemplet i Figur 2(a) (rådata). Den direkta ljudvåg som genereras när slagkällan slår i marken och propagerar raka vägen genom luften till mikrofonerna, dominerar amplituden i Figur 2(a). Denna ljudvåg har en känd hastighet (ljudhastigheten i luft) och hanteras som brus eftersom den inte tillför någon information om vägen. För att ta bort detta brus dämpas signalerna efter det röda strecket i Figur 2(b) innan alla signaler transformeras till frekvens-fashastighetsdomän i Figur 2(c). I Figur 2c motsvarar svarta delar vågor med hög amplitud (ytvågens dispersionskurva). Slutligen identifieras V_R som fashastigheten hos den icke-dispersiva delen av dispersionskurvan i spannet 10–30 kHz i Figur 2(c) (blå streckad linje). Den svarta kurvan i Figur 2(d) motsvarar en summering av alla amplituder i Figur 2(c) inom det utvalda frekvensområdet. Piken på den summerade kurvan används för att identifiera V_R om signalstyrkan (piken) ligger över 80%. Signal/brus-kriteriet används för att filtrera bort mätningar som bara innehåller brus utan någon tydlig dispersionskurva.

Rayleighvågen påverkar materialet endast ner till ett begränsat djup. Vilket djup detta är beror på vilket frekvensområde som studeras men en vanlig tumregel brukar vara halva den studerade våglängden. Den analyserade ytvågshastigheten kan alltså sägas vara representativ och spegla materialegenskaperna ner till ett djup om halva våglängden ifrån vägytan. Som exempel valdes frekvensområdet 10–30 kHz från mätningarna på Rv 40 för att analysera den raka delen av dispersionskurvan. Medelhastigheten över detta frekvensområde utvärderas automatiskt för varje mätning enligt metoden i Figur 2. Det studerade frekvensområdet motsvarar våglängder i spannet 0,07–0,20 m, vilket betyder att Rayleighvågen och därmed mätningarnas resultat kan sägas motsvara materialets egenskaper från ytan ner till 0,10 m i asfaltlagren. Resultaten är därför representativa för ett medelvärde av styvheten i de två översta bundna asfaltlagren (se Figur 3 och

Figur 11). Alla resultat plottas som V_R eftersom det är den ytvågshastighet i asfalten som mäts upp med mikrofonerna. Om densitet och tvärkontraktionstal i asfalten till exempel antas vara 2400 kg/m^3 respektive $0,30$ kan styvhetsmodulen enkelt beräknas med Ekv. 3 och i stället skrivs $E=7251 \cdot V_R^2$ vid 20 kHz och aktuell temperatur. Observera att E-modulen är proportionell mot ytvågshastigheten i kvadrat och att ytvågshastigheten kan variera betydligt mer än tvärkontraktionstalet och densiteten. På riksväg 40 mättes till exempel ytvågshastigheter i spannet $1400\text{--}2100 \text{ m/s}$ (plus/minus 20% variation) medan densitet och tvärkontraktionstal från 30 borrkärnor bara varierade med mindre än plus/minus 3 %.

Det ska påpekas att analysen av insamlade data sker automatiskt med gränsvärdet på 80% signalstyrka vilket ger ett visst bortfall i datapunkter på grund av misslyckade mätningar (triggers). Det sker alltså ingen handpåläggning i analysen av data för enskilda mätningar utan när inställningar gjorts så analyseras alla data på samma sätt. Det är denna automatiska dataanalys som möjliggör kontinuerlig heltäckande kvalitetskontroll innehållande tusentals mätningar som presenteras i denna rapport.

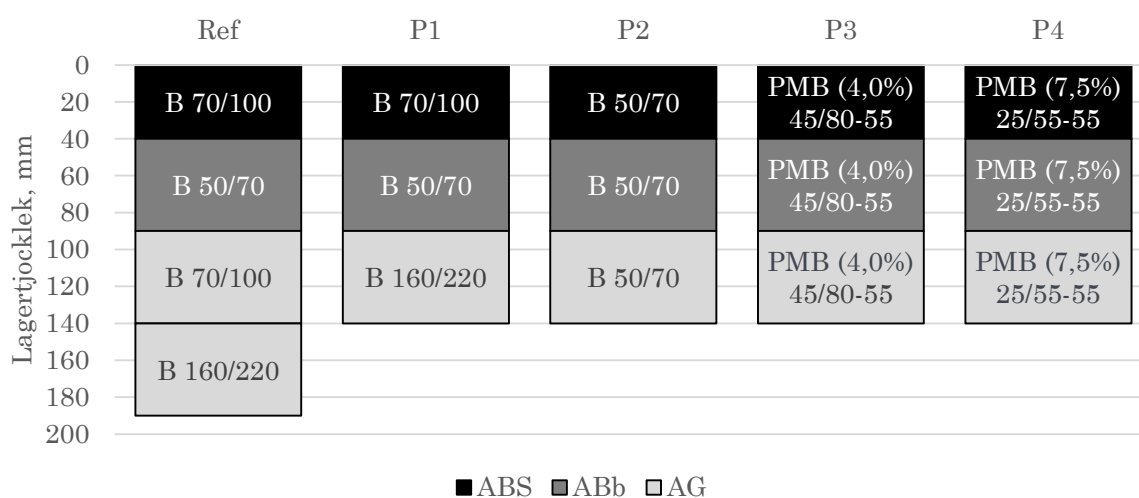


Figur 2. Automatisk databehandling sker i fyra steg. I figuren visas (a) rådata i tidsdomän, (b) fönstrad data med dämpad ljudvåg direkt från slagkällan genom luften, (c) fönstrad data i frekvens-fashastighetsdomän där svart indikerar vågor med hög amplitud, (d) summering i frekvensdomän (10–30 kHz) och identifiering av pik över 80% signalstyrka. Piken (maximum) motsvarar den konstanta fashastigheten vid över 10 kHz och har också markerats i (c).

2.3 Riksväg 40

Rullande ytvågsmätningar utfördes på provsträckan på riksväg 40 utanför Ulricehamn 2021-04-14. Den två kilometer långa provsträckan ligger mellan Ulricehamnsmotet och Hössnamotet i östlig

riktning (mot Jönköping) och består av en 500 m lång referenssträcka följt av fyra provsektioner om 375 m vardera, P1–P4. Referenssektionen är uppbyggd av två bundna bärlager, ett bindlager och ett slitlager med en total tjocklek på 19 cm. Bituminet som använts i slitlagret är en omodifierad 70/100 (undre/övre penetrationsvärde). Sektion P1 byggdes på samma sätt som referenssektionen men med ett bärlager mindre så att den totala tjockleken på de bundna lagren är 14 cm. Sektionerna P2–P4 byggdes upp med samma lagertjocklekar som P1 fastän slitlagret fick olika bitumen i varje sektion; sektion P2 har ett styvare omodifierat 50/70, P3 4% polymermodifierad bitumen (PMB) och P4 7,5% PMB. Även i de undre lagren skiljer sig bitumenkvaliteterna åt mellan de olika sektionerna. Procentsatserna i PMB avser mängden inblandade polymerer i bituminet. Penetrationsgraden för bituminet i P3 och P4 är 45/80 respektive 25/55. Största stenstorlek är 16 mm för samtliga slitlager samt 22 mm för alla bind- och bärlager. Uppbyggnaden för samtliga sektioner samt all ingående bitumen framgår av Figur 3.



Figur 3. Uppbyggnaden av provsträckan bestående av en referenssektion (Ref) samt provsektionerna P1–P4. Alla lagrens ingående bitumen är angivna i respektive lager där B indikerar konventionellt penetrationsbitumen och PMB polymermodifierat bitumen.

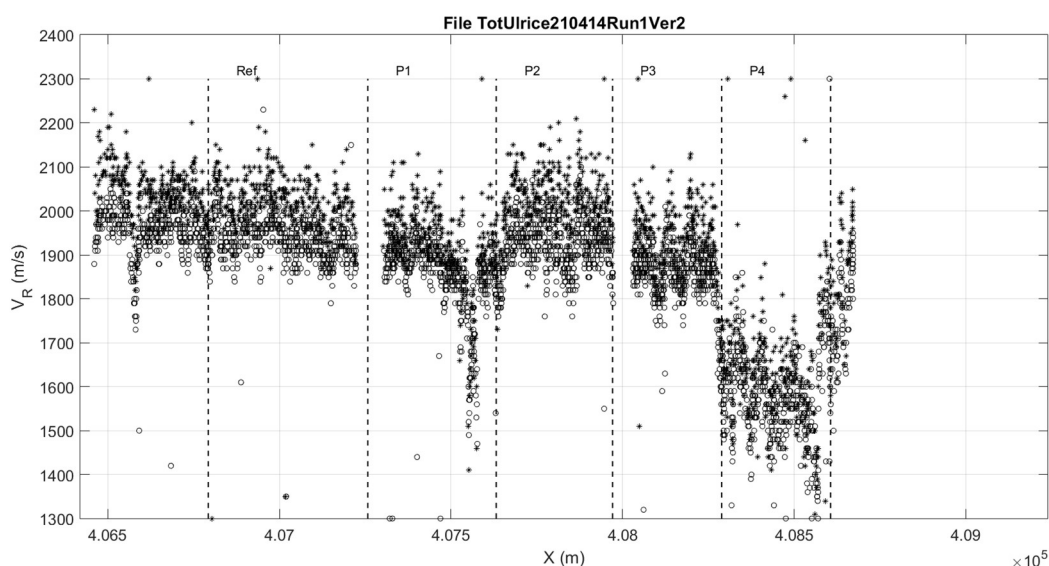
Samtliga mätningar utfördes under knappt två timmar på förmiddagen där temperaturen enligt bilens termometer startade på +2,0°C vid den första mätningen och gradvis steg upp till +6,5°C vid den sista. Vädret var soligt och klart och vinden måttlig.

Totalt utfördes sju olika mätningar (körningar) längs hela provsträckan i höger körfält (K1) från väst till öst. De tre första mätningarna gjordes i ca 25 km/h med två slagkällor, en framför mikrofonerna och en bakom mikrofonerna. Resterande fyra mätningar (mätning 4–7) gjordes med enbart en källa framför mikrofonerna med successivt ökande mätthastighet, enligt Tabell 1. Alla mätningar har en eller två mindre luckor på ca 60 m där det fattas data på grund av att mätsystemet måste spara undan data till hårddisken efter 1900 mätpunkter. Eftersom vägen var öppen för trafik under mätningarna var det inte möjligt att stanna bilen vid dessa ”andningspauser” för mätsystemet. Mätningarna vid de olika körningarna över sträckan startades dock avsiktligt vid olika startpunkter för att minimera risken att dessa glapp i data skulle ske i samma sektioner vid alla körningar.

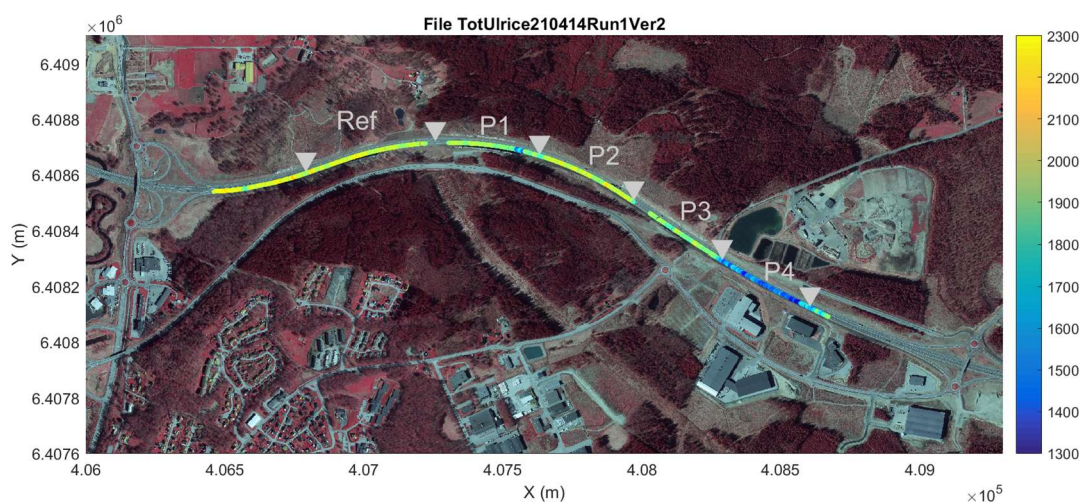
Tabell 1. Rullande seismiska mätningar längs provsträckan på Rv 40.

Mätning	Mätthastighet, km/h	Yttemperatur median, °C	Källor	Mätpunkter, antal	Tidpunkt, start - stop
1	25	6,5	Fram/Bak	5700	10:21 - 10:26
2	25	7,8	Fram/Bak	5700	10:39 - 10:45
3	25	9,4	Fram/Bak	5700	10:58 - 11:04
4	25	10,0	Fram	3800	11:15 - 11:20
5	25	11,9	Fram	3500	11:37 - 11:44
6	35	12,4	Fram	2800	11:53 - 11:59
7	45	12,9	Fram	2800	12:06 - 12:10

Figur 4 nedan visar uppmätt ytvågshastighet (V_R) i m/s från den första mätningen som funktion av uppmätt X-koordinat (SWEREF99 TM). Figuren visar resultat från både den främre källan (cirkel) och den bakre källan (asterisk). Resultaten från de olika källorna är relativt samlade med en liten tendens till en något lägre hastighet från den främre källan vilket betyder att mikrofonerna har en liten lutning framåt mot bilen. Lokala medelvärden av resultat från både den främre och bakre källan förväntas vara opåverkade av mikrofonernas eventuella lutning mot vägen (Bjurström & Ryden 2015). Skillnaden i uppmätt hastighet från den främre och bakre källan bidrar också till en något högre spridning där V_R varierar lokalt med ca ± 100 m/s. I några sektioner syns dock en systematisk variation med mindre spridning och P2 och P4 visar generellt högre respektive lägre uppmätt hastighet. Figur 5 visar också data från den första mätningen men bara från den främre källan och som funktion av V_R (färgskala) och både X och Y från uppmätta GPS-positioner. Observera att V_R plottats som funktion av horisontell X-koordinat i Figur 4 och inte sektion längs vägsträckan. Detta innebär att mätpunkterna är något "ihoptryckta" där vägsträckningen inte är helt horisontell (P2-P4). X-koordinaten används för att kunna jämföra (synkronisera) olika körningar och mätningar utan eventuella fel vid omräkningen från GPS-koordinater till sektionsnummer.

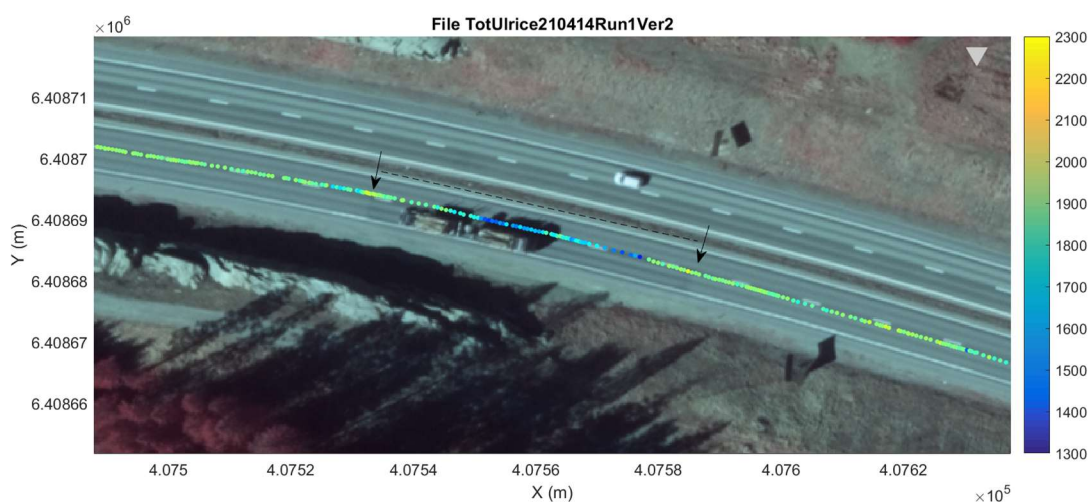


Figur 4. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) som funktion av X-koordinat från GPS. Cirklar representerar resultat från den främre källan och asterisker resultat från den bakre källan.



Figur 5. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) från den första mätomgången och den främre källan som funktion av X- och Y-koordinater från GPS.

I Figur 6 nedan visas en förstorad del av den första mätningen runt X-koordinat 407560 m där en lokalt lägre ytvågshastighet (styvhet) kan observeras. Längs sträckan som markeras innanför pilarna i figuren syns också en avvikande färg i vägbanan på kartbilden vilket antyder en skarv i det översta asftaglaget. Detta område har tidigare varit utsatt för en skada och har lagts om, därav skarvarna i vägbeläggningen. Ytvågsmätningarna visar på en tydlig avvikelse i mitten på det markerade området.

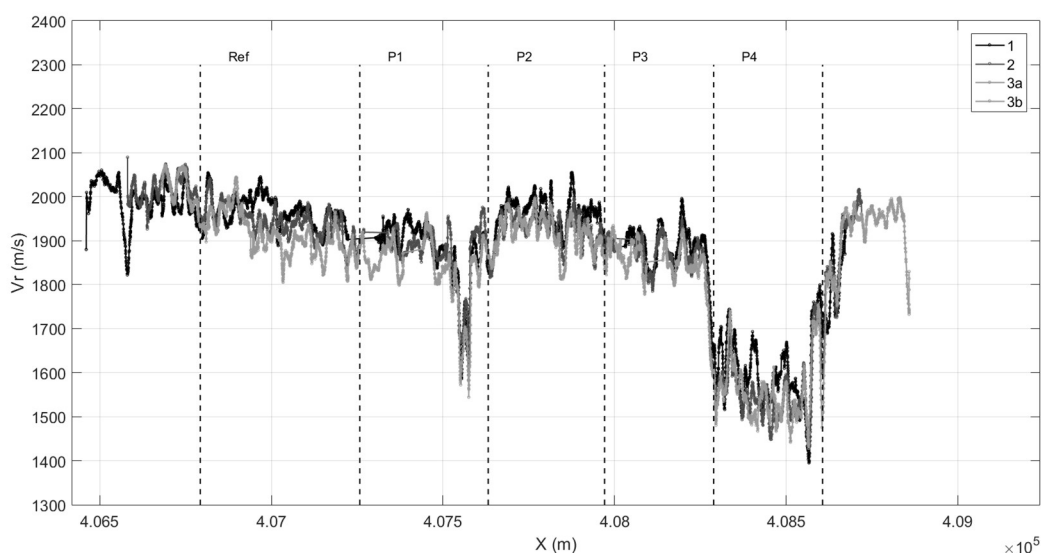


Figur 6. Förstorad del i slutet på P1 med en lokalt lägre hastighet (mjukare asfalt) från den första mätningen och den främre källan som funktion av X- och Y-koordinater från GPS.

För att studera repeterbarheten i resultaten från upprepade mätningar har de tre första körningarna plottats i Figur 7 nedan. I denna figur representerar varje punkt ett glidande

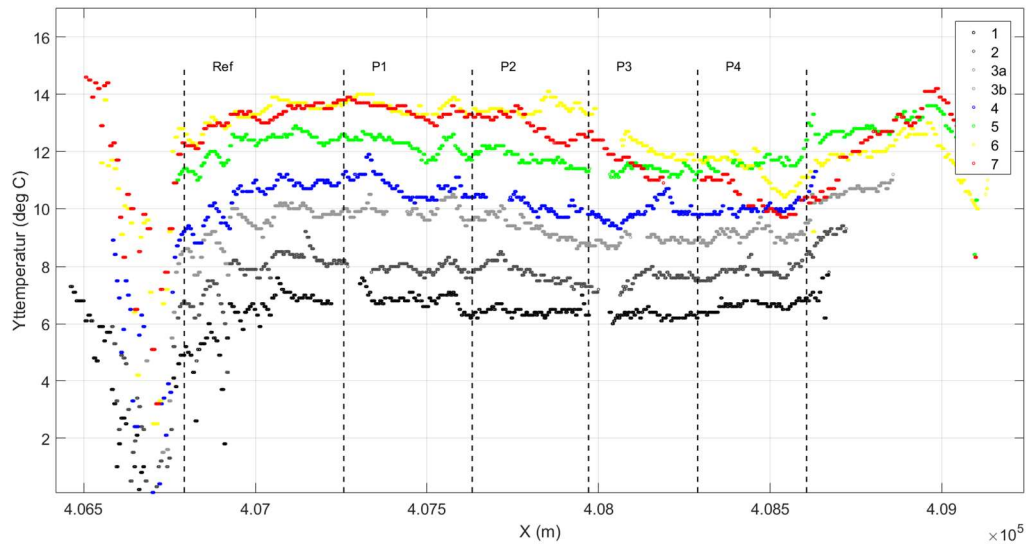
medelvärde över 20 mätpunkter. Värt att poängtera är att resultatet från en mätning representerar materialegenskaperna över den linje där mikrofonarrayen befinner sig vid tiden för mätningen. Detta innebär att den profil som visar utvärderad ytvågshastighet representerar just den mätta linjen och för att teoretiskt få samma resultat vid kommande mätningar så måste mätbilen köras i exakt samma läge i vägens tvärriktning. De tre mätningarna har också utförts vid olika tider mellan kl. 10:21 och kl. 11:04 under starkt solsken vilket värmt upp vägytan från ca 6,5° till 9,4°C (Tabell 1 och Figur 8). Det är alltså inte realistiskt att förvänta sig identiska resultat vid upprepade mätomgångar. Mätomgång 3 blev lagrad i två delar i datorn och är därför plottade som 3a och 3b i flera kommande figurer men representerar alltså en och samma körning.

De flesta sektioner visar dock en bra repeterbarhet och alla mätningar visar en tydligt lägre hastighet lokalt i P1 (runt X=407560) och i P4. Det finns också en antydning till repeterbara oscillationer i några delar (till exempel i P3) där hastigheten varierar cykliskt med dalar och toppar med ca 60–70 m avstånd mellan topparna.



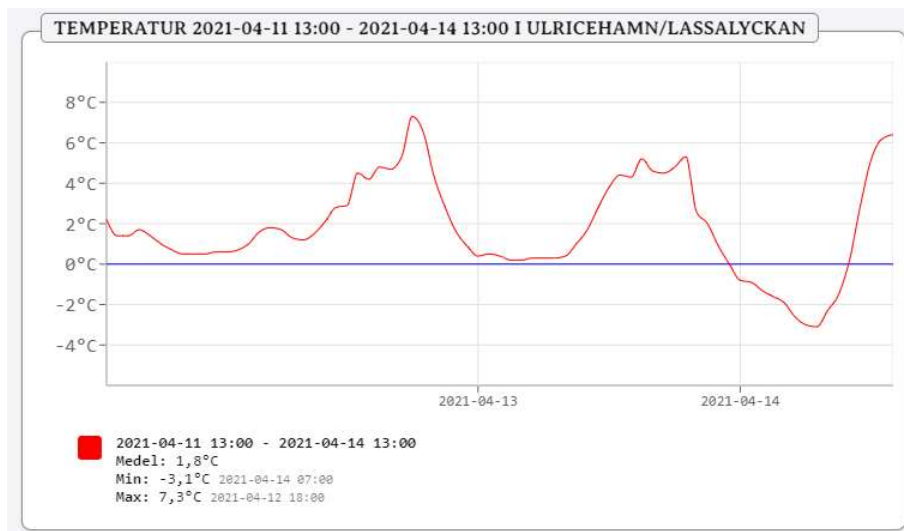
Figur 7. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) från de tre första mätningarna som funktion av X-koordinat från GPS. Alla punkter representerar ett medelvärde av de närmaste 20 punkterna från båda källor. Mätomgång 3 har i lagringen blivit uppdelad i två delar, därav är de plottade som 3a och 3b, men de representerar alltså en och samma körning.

Figur 8 visar uppmätta temperaturer från vägytan från alla sju körningar. Det är tydligt att vägytan har värmts upp under förmiddagen på grund av starkt solsken. Den första delen innan referenssektionen visar generellt låga temperaturer vilket troligen beror på att denna del låg i mer skugga under förmiddagen.



Figur 8. Uppmätt temperatur på vägytan från alla sju mätningarna som funktion av X-koordinat från GPS.

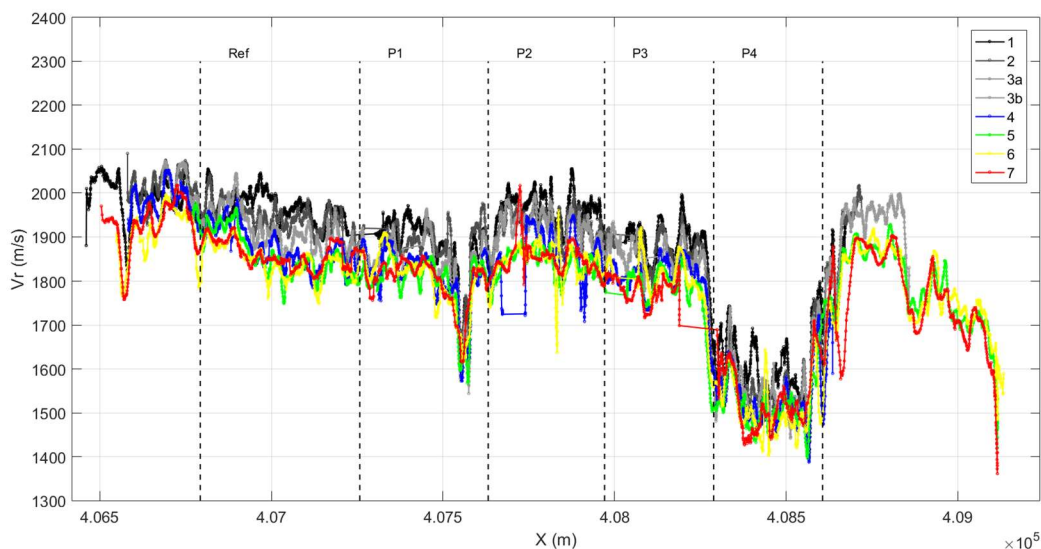
Temperaturdata har även hämtats från websidan www.temperatur.nu och visas i Figur 9. Figuren visar lufttemperaturen från närmaste väderrapportör under 72 timmar innan mätning. Temperaturen har på förmiddagen för mätningen stigit ca. 10 grader fram till lunch vilket orsakar en temperaturgradient i asfalten. För att få en representativ temperatur över det djup som påverkas av ytvågen och som i sin tur påverkar mätningen, skulle temperaturgradienten behöva bestämmas. Detta ligger dock utanför ramen för detta specifika projekt.



Figur 9. Lufttemperaturen i området för mätningen under 72 timmar fram till att mätningarna avslutades.

Figur 10 visar utvärderade ytvågshastigheter från alla sju mätningar. Observera att de tre första mätningarna innehåller ungefär dubbelt så många mätpunkter (Tabell 1) på grund av att båda källorna användes här. Mätning 4–7 innehåller mindre data på grund av att endast en källa

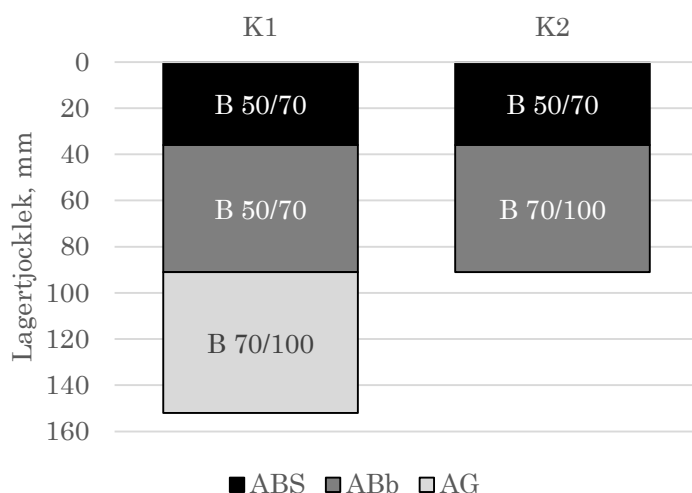
användes under dessa mätningar. Mätning 6 och 7 utfördes i högre hastighet, 35 respektive 45 km/h, men visar också på bra repeterbarhet jämfört med övriga mätningar. En tendens till succesivt lägre och lägre ytvågshastigheter (styvhet) kan också observeras från mätning 4 till 7. Detta kan sannolikt relateras till den succesivt ökande temperaturen i vägytan (se Figur 8 ovan).



Figur 10. Uppmätt ytvågshastighet (V_r) från alla sju mätningar som funktion av X-koordinat från GPS. Alla punkter representerar ett medelvärde av de närmaste 20 punkterna från båda källor.

2.4 E22

Seismiska ytvågsmätningar genomfördes på en nybyggd del av E22 utanför Tollarp i Skåne 2020-09-16. Vägen är tvåfilig motorväg där uppbyggnaden i höger körfält (K1) och omkörningsfil (K2) skiljer sig åt något. Som slitlager ligger 36 mm ABS 16 med konventionellt penetrationsbitumen 50/70. Slitlagret skiljer sig dock mellan de två filerna genom att en hårdare sten (lägre kulkvarnsvärde) lagts i K1. Bindlagret är 55 mm tjockt i båda körfält, max. stenstorlek är 22 mm och bituminet är 50/70 i K1 och ett mjukare 70/100 i K2. Under slitlagret ligger i K1 även ett bundet bärlager, 61 mm AG 22 med bitumen 70/100. Vägens uppbyggnad och de bundna lagrens tjocklekar framgår av Figur 11. Total tjocklek för samtliga bundna lager är således 152 mm i K1 och 91 mm i K2.



Figur 11. Uppbyggnad av de bundna lagren i den testade delen av E22. Lagrens bitumen framgår i figuren där B indikerar konventionellt penetrationsbitumen.

Rullande seismiska mätningar utfördes längs testsräckan på E22 ca kl. 11–12 i soligt och klart väder. Lufttemperaturen var ca +19° C medan asfaltytans yttemperatur var upp mot 30° C. Totalt utfördes nio olika mätningar (körningar) i den norra delen av vägen som leder västerut, enligt Tabell 2. Mätningarna gjordes längs en ca 260 m lång provsträcka i både K1 och K2. Denna del av E22 var ännu ej öppnad för trafik vilket gjorde det möjligt att också köra mot färdriktningen och därmed mäta i både höger och vänster hjulspår i respektive körfält. Alla mätningar gjordes i ca 25 km/h med två källor, en framför mikrofonerna och en bakom mikrofonerna.

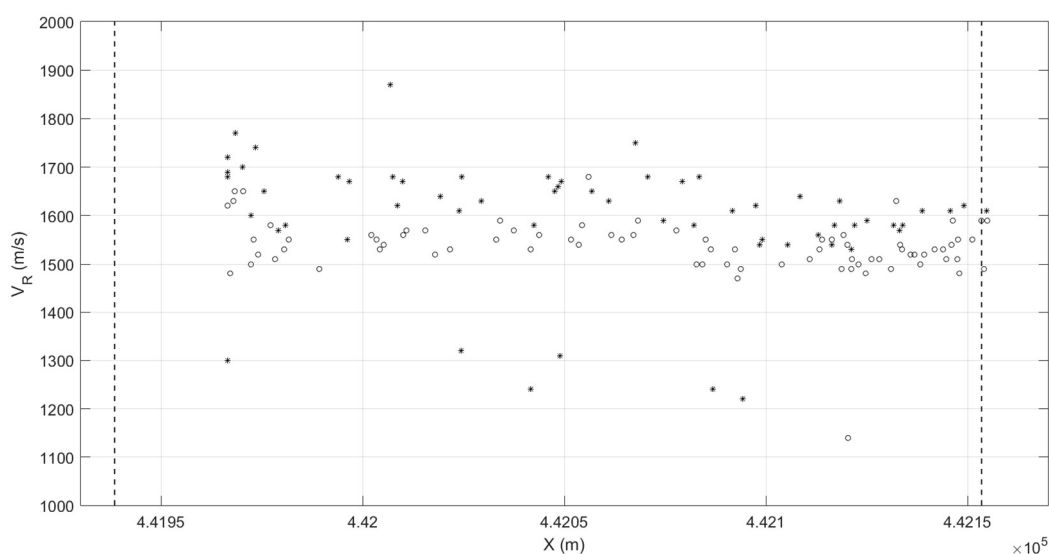
Alla körningar har ca 1 mätning per meter längs provsträckan. Observera att mätpunkterna inte är helt jämnt fördelade längs mätsträckan utan hamnar där dom hamnar beroende på hur källan studsar i vägtytan. På grund av den relativt höga yttemperaturen och källornas upphängning vid mättillfället dämpades de seismiska källorna förhållandevis mycket vilket ledde till ganska svaga signaler i alla mätningar från E22.

Tabell 2. Rullande seismiska mätningar längs provsträckan på E22.

Mätning	Mätthastighet (km/h)	Yttemperatur median (grader C)	Körfält /hjulspår	Källor	Mätpunkter (antal)	Tidpunkt (start)
1	17	27.9	K1/höger	Fram/Bak	100	11:13
2	28	28.5	K1/höger	Fram/Bak	200	11:36
3	28	29.4	K1/vänster	Fram/Bak	200	11:39
4	28	28.9	K1/höger	Fram/Bak	200	11:46
5	28	30.1	K1/vänster	Fram/Bak	200	11:48
6	24	29.5	K2/höger	Fram/Bak	200	11:54
7	23	30.3	K2/vänster	Fram/Bak	86	12:00
8	26	30.6	K2/höger	Fram/Bak	124	12:06
9	26	31.0	K2/vänster	Fram/Bak	86	12:09

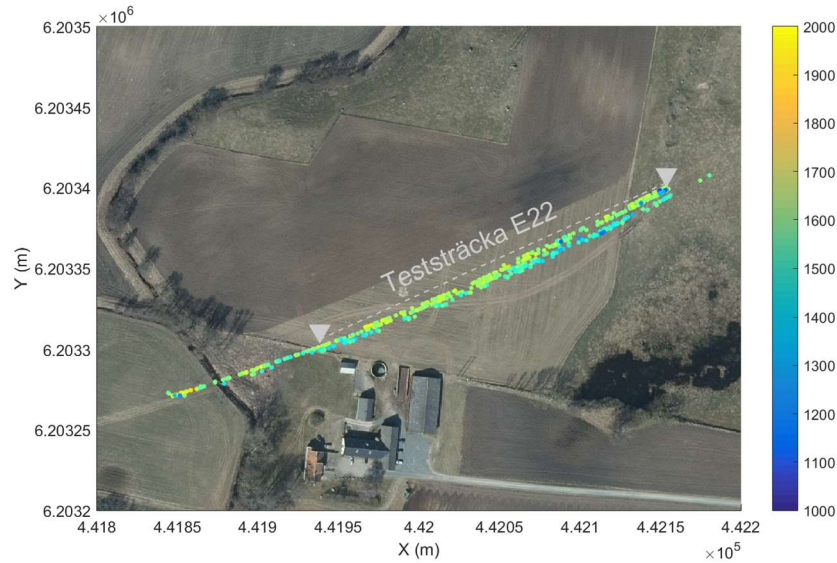
Figur 12 nedan visar uppmätt ytvågshastighet (V_R) i m/s från den andra mätningen i K1 (höger hjulspår) som funktion av uppmätt X-koordinat (SWEREF99 TM). Observera att V_R plottats som funktion av horisontell X-koordinat och inte sektion längs vägsträckan. Detta innebär att mätvärden är något "ihoptryckta" där vägsträckningen inte är helt horisontell. X-koordinaten används för att

kunna jämföra (synkronisera) olika körningar och mätningar utan eventuella fel vid omräkningen från GPS-koordinater till sektionsnummer. Figuren visar resultat från både den främre källan (cirkel) och den bakre källan (asterisk). Resultaten från de olika källorna är relativt samlade med en liten tendens till en något lägre hastighet från den främre källan vilket betyder att mikrofonerna har en liten lutning framåt mot bilen. Lokala medelvärden (ca 1600 m/s) av resultat från både den främre och bakre källan förväntas vara opåverkade av mikrofonernas eventuella lutning mot vägen. Några enstaka mätningar visar betydligt lägre hastighet (ca 1300 m/s) vilket kan förklaras av dåligt signal/brus-förhållande (signal-to-noise ratio) och dessa värden kan förkastas. Alla mätningar utvärderas automatiskt med samma inställningar vilket gör att även enstaka mätningar som triggats av brus kan förekomma.



Figur 12. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) som funktion av X-koordinat från GPS. Cirkelar representerar resultat från den främre källan och asterisker resultat från den bakre källan. Streckade linjer markerar början och slutet på teststräckan.

Figur 13 visar alla data från samtliga nio mätningar men bara från den främre källan och som funktion av V_R (färgskala) och både X och Y från uppmätta GPS positioner. Observera att vägen inte syns på flygfotot eftersom den inte var byggd vid tidpunkten för fotot.

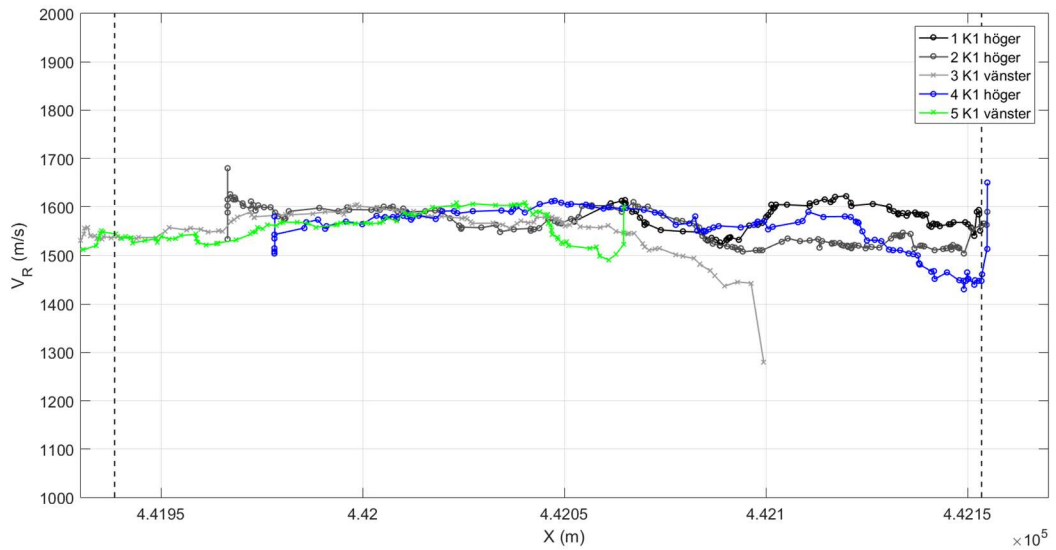


Figur 13. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) från alla nio mätningar och den främre källan som funktion av X- och Y-koordinater från GPS. Trianglar markerar början och slutet på teststräckan. Vägen syns ej på grund av att den är helt nybyggd och inte finns med på detta flygfoto.

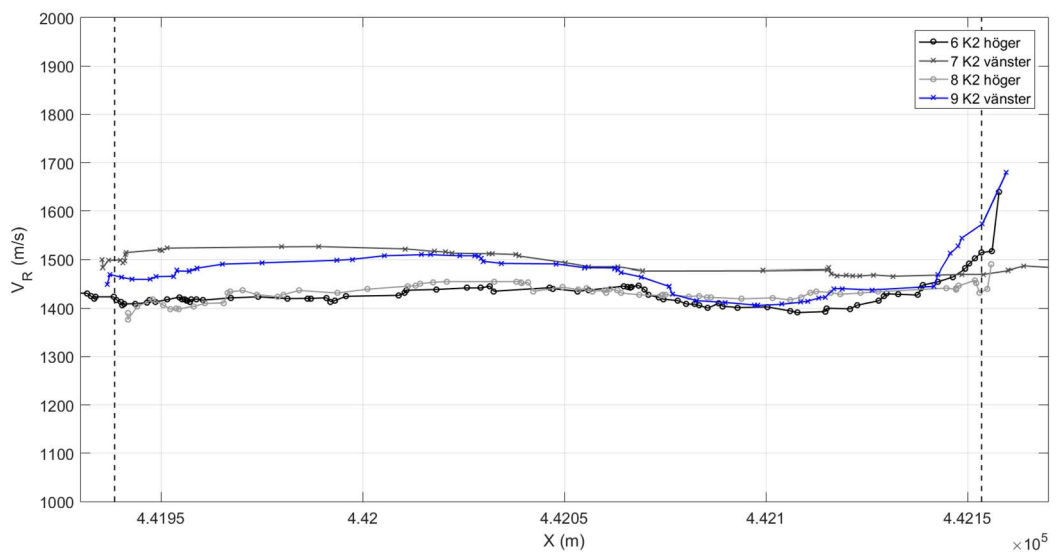
För att studera repeterbarheten i resultaten från upprepade mätningar har samtliga 5 körningar i K1 plottats i Figur 14 nedan. I denna figur representerar varje punkt ett glidande medelvärde över 20 mätpunkter. Data med låg signal (brus) har filterats bort med ett signal/brus-kriterium på 0,8 i frekvensdomän. Observera också att mätningarna görs i en tunn linje längs mikrofonarrayen vilket innebär att bilen måste köra i exakt samma hjulspår varje gång för att mäta i exakt samma linje. Resultaten förväntas därför skilja något litet mellan mätomgångarna. Mätningarna har också utförts vid olika tider mellan kl. 11:13 och kl. 11:48 under starkt solsken vilket värmt upp vägytan från ca 28° till 30° C (Tabell 2 och Figur 16).

Resultaten visar inga större spridningar med en ytvågshastighet i spannet 1500–1600 m/s. Den östra (högra) delen av provsträckan visar dock lite mer variation mellan de olika mätningarna.

Figur 15 visar motsvarande resultat för mätning 6–9 i K2. Här syns en något lägre hastighet (1400–1500 m/s) jämfört med K1. Resultaten antyder också en viss skillnad mellan höger och vänster hjulspår. Observera dock att mätning 7 innehåller förhållandevis lite data med tillräcklig signalstyrka. I Figur 14 och Figur 15 uppvisar resultaten avvikande värden i ändarna av mätomgångarna där kurvorna plötsligt sticker i väg. Dessa avvikelser beror dock på det glidande medelvärdesbildningen över 20 mätpunkter (beskrivet ovan) och bör bortses ifrån.

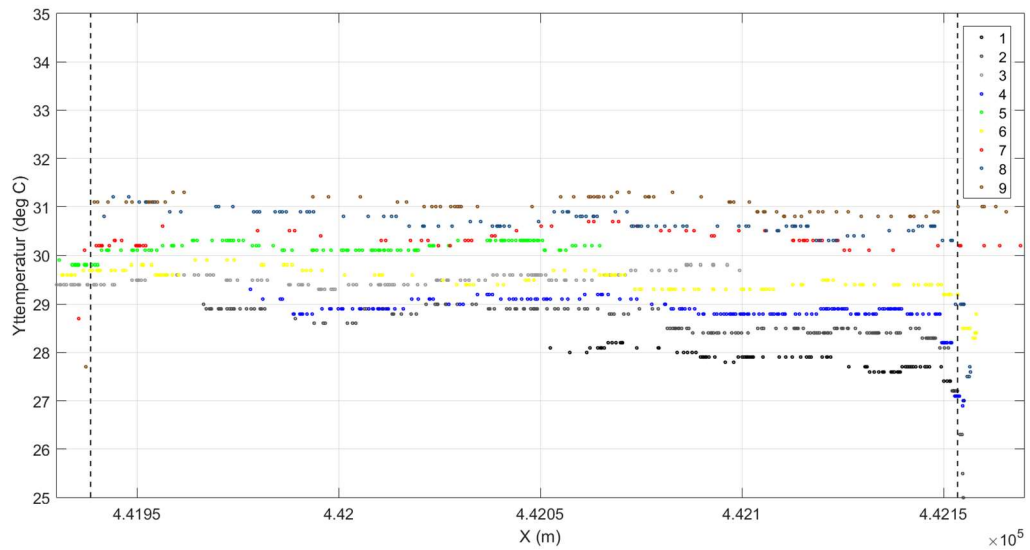


Figur 14. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) från alla fem mätningar i K1 som funktion av X-koordinat från GPS. Alla punkter representerar ett medelvärde av de närmaste 20 punkterna från båda källorna.



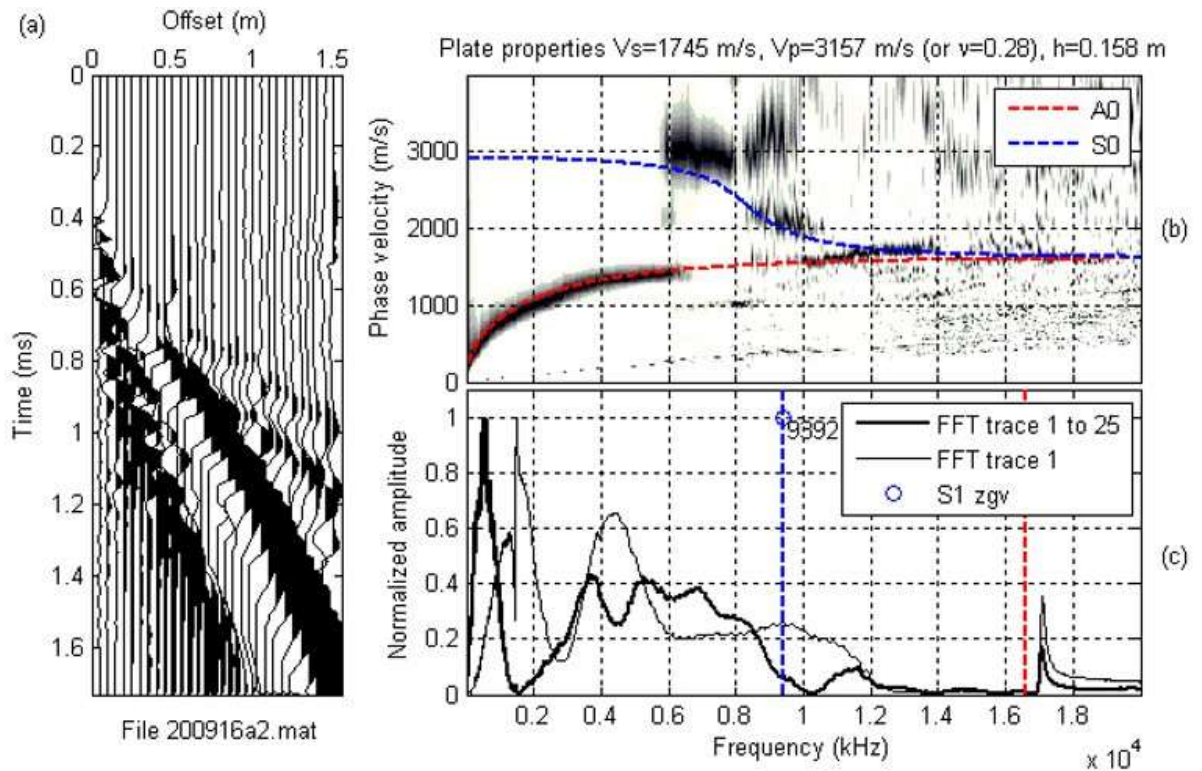
Figur 15. Uppmätt ytvågshastighet (V_R) från samtliga fyra mätningar i K2 som funktion av X-koordinat från GPS. Alla punkter representerar ett medelvärde av de närmaste 20 punkterna från båda källorna.

Figur 16 visar uppmätta temperaturer från vägytan från samtliga nio körningar. Figuren visar att vägytan har värmts upp från redan höga temperaturer under tiden för mätningarna på grund av starkt solsken.



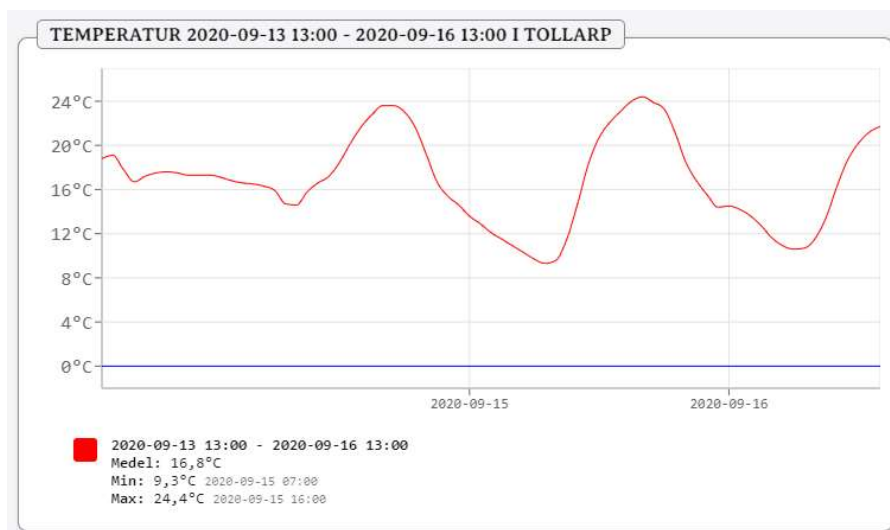
Figur 16. Uppmätt temperatur i vägytan från alla nio mätningarna som funktion av X-koordinat från GPS.

Även stationära seismiska ytvågsmätningar genomfördes på E22. Data samlades in med mätsystemet som använts för rullande mätningar. Resultat från dessa mätningar återges i kapitel 4.2. För att få jämförande mätningar ifrån ytterligare en mätmetod/-utrustning samlades också seismiska data in med en accelerometer som fästes i vägbanan. Signalerna till dessa mätningar genererades med en hammare på en rad förutbestämda avstånd från accelerometern. Principen för att samla in och analysera data på detta sätt beskrivs av Ryden et al. (2002). På E22 samlades 30 signaler in i steg om fem centimeter för att skapa ett dataset över 1,5 meter. Insamlade data analyserades på plats med hjälp av en mjukvara speciellt designad för att karaktärisera det undersökta materialet avseende kompressions- och skjuvvågshastighet, lagertjocklek samt tvärkontraktionstal. En skärmdump från programvaran visas i Figur 17. Insamlade data visas i tidsdomän samt transformerat till frekvens/fas hastighet i Figur 17a resp b precis som i analysen från de rullande testerna (se Figur 2a och c). Figur 17c visar data i frekvensdomän som används för att kontrollera signalens frekvensinnehåll samt bestämma lagrets tjocklek.



Figur 17. Insamlade referensdata med accelerometer illustrerade i a) tidsdomän, c) frekvensdomän och b) som dispersionskurvor i MASW-analys.

Temperaturdata har hämtats från websidan www.temperatur.nu och visas i Figur 18. Figuren visar att temperaturen under 72 timmar innan mätning varierat relativt mycket, mellan 9,3 och 24,4°C, och att asfalten således bör ha en temperaturgradient. Temperaturavläsningarna i samband med mätningarna visar dessutom på ännu högre temperaturer på vägens yta.



Figur 18. Lufttemperatur 72 timmar innan mätning på E22.

3 LABBMÄTNINGAR

3.1 Metod

Beläggningsens komplexa styvhetsmodul har utvärderats i labb genom att utföra modalanalys på borrhärdar (Gudmarsson 2014). Metoden möjliggör bestämning av den komplexa styvhetsens masterkurvor, dvs. styvhetsmodulen som funktion av temperatur och belastningsfrekvens. Genom att bestämma masterkurvor kan laboriemätningarna jämföras mot de seismiska ytvågmätningarna vid motsvarande temperaturer och belastningsfrekvenser som rådde under fältmätningarna. Styvhetsmodulen på asfaltprovkroppar som bestämts genom modalanalys överensstämmer mycket väl med konventionell cyklisk drag- och tryckprovning (Gudmarsson et al. 2014, Gudmarsson et al. 2015, Gudmarsson et al. 2019).

3.2 Provkroppar – Riksväg 40

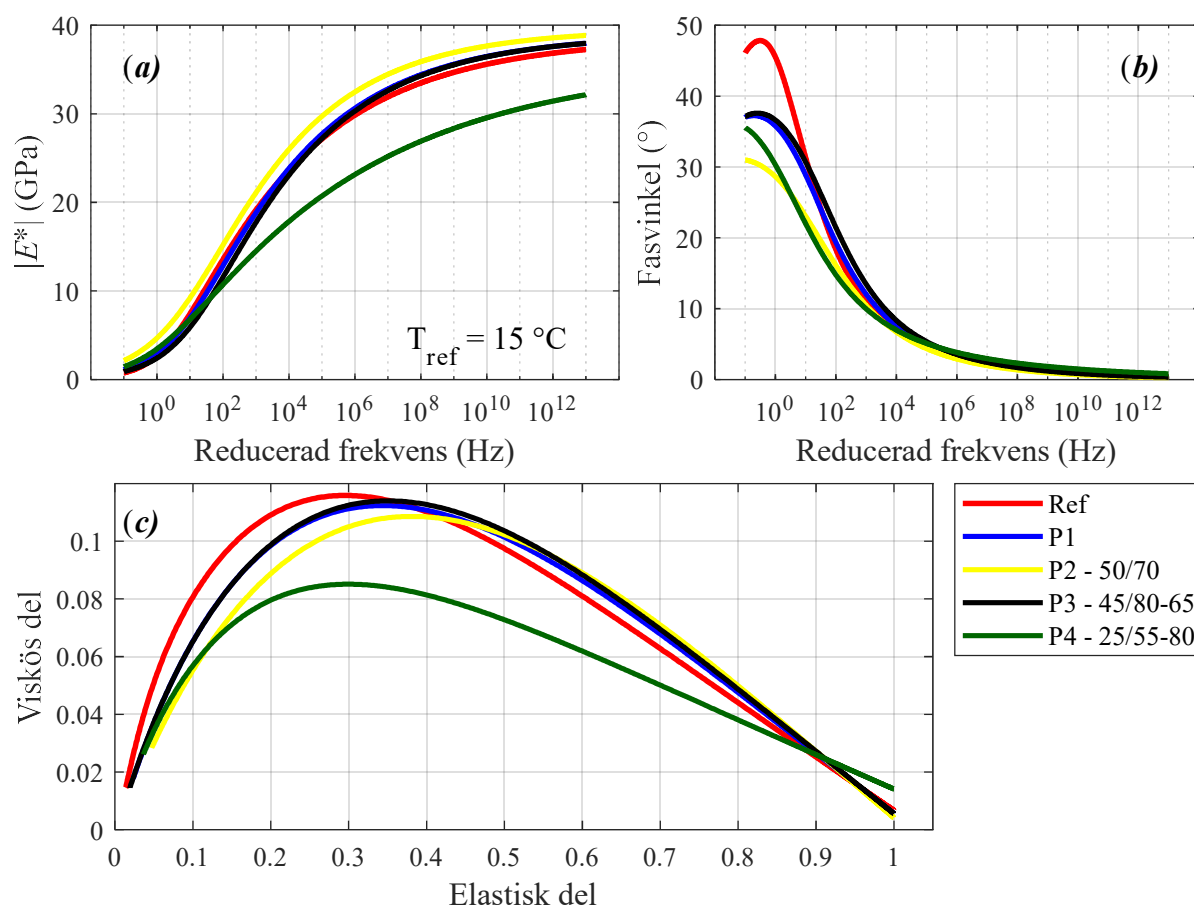
Två provkroppar borrhades från tre olika punkter ifrån vardera sektion (Ref, P1, P2, P3 och P4). Två provkroppar, en från referenssträckan och en från P1, där skillnaden i tjocklek för de bundna lagren mellan sträckorna framgår, visas i Figur 19. Totalt mättes styvhetsmodulen genom modalanalys på trettio provkroppar vid fyra olika temperaturer (-20, 0, 20 och 30 °C). Mätningarna utfördes i longitudinell riktning på hela borrhärdan som inkluderar tre olika beläggningslager (ABS, ABb och AG). Den beräknade E-modulen kan alltså sägas vara en sammanvägd modul för de utvärderade materialen.



Figur 19. Två provkroppar uppborrade ur Rv 40, den vänstra från referenssträckan och den högra från P1. Tjockleken är ca 190 mm på referenssträckan och 140 mm på P1–P4. Båda provkroppar är vända upp och ner (slitlagret nedåt) i fotot.

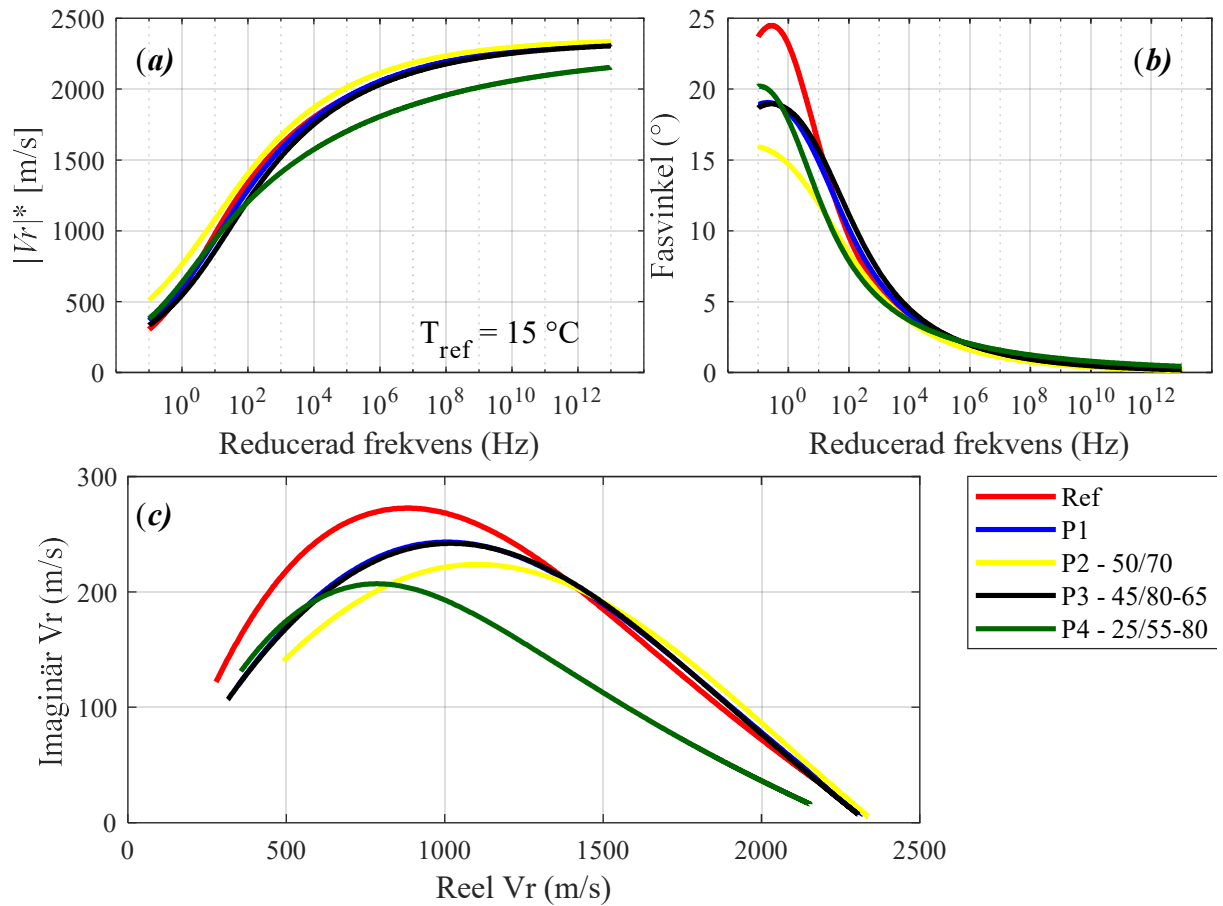
I Figur 20 presenteras den komplexa styvhetsmodulen från provkroppar som borrhades upp i augusti 2021. Till skillnad från referenssträckan och P1 består P2, P3 och P4 av samma bindemedel genom hela den bundna delen av konstruktionen. I Figur 20 presenteras medelvärdet av de sex provkropparna från respektive sträcka. Skillnaderna mellan de sex provkropparna från respektive sträcka var mycket små. P4 utmärker sig markant från övriga beläggningar genom en tydligt lägre dynamisk styvhetsmodul (se Figur 20a) för belastningsfrekvenser från ca 100 Hz och uppåt. Vid belastningsfrekvenser lägre än 100 Hz är den dynamiska styvhetsmodulen av P4 i nivå med övriga beläggningstyper. Notera att 0,1 Hz är den lägsta frekvensen som den komplexa modulen har bestämts för genom modalanalys. Provkropparna från P2 med det styvaste

penetrationsklassificerade bindemedlet 50/70 resulterade i den högsta dynamiska styvhetsmodulen över hela frekvensområdet.



Figur 20. Komplexa masterkurvor för de fem testade sträckorna på Rv 40.

För att masterkurvorna direkt ska spegla övriga resultat har de räknats om för att visa Rayleighvågshastighet över ett brett frekvensområde vid en bestämd referenstemperatur. Dessa masterkurvor räknades fram med hjälp av Ekv. 1–2 och visas i Figur 21.



Figur 21. Komplexa masterkurvor för de fem testade sträckorna på Rv 40, framtagna för Rayleighvågshastighet i stället för E-modul.

3.3 Provkroppar – E22

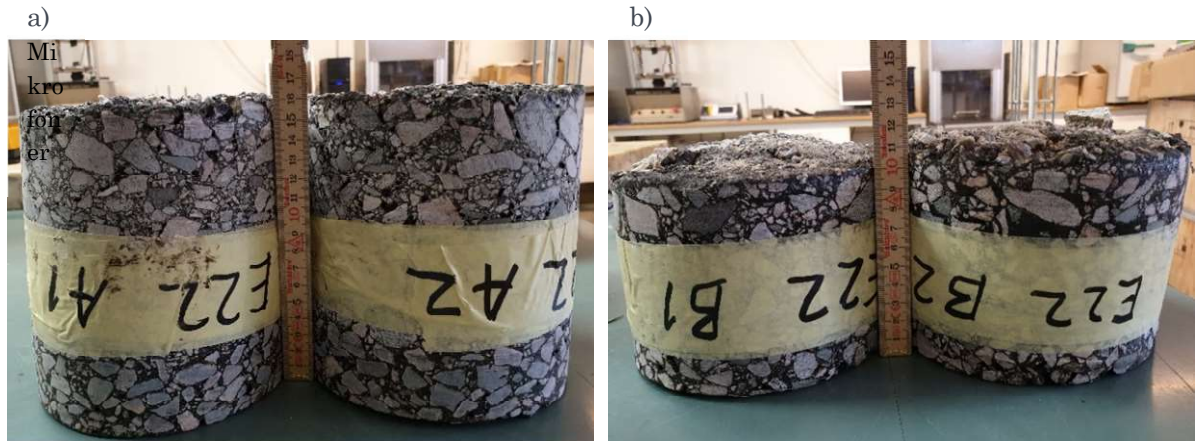
Två provkroppar borrades upp från körfält 1 (K1) och två provkroppar borrades upp från körfält 2 (K2). Borrningen utfördes i ytvågseismikens mätlinje, i vilken både rullande mätningar utfördes samt den stationära ytvågsseismiken, beskrivet i kapitel 2.4. Figur 22 visar med cirklar de positioner där borrning skedde i K1 (punkt A). Den horisontella linjen som korsar den vänstra cirkeln är mikrofonarrayens position vid de stationära ytvågsseismiska mätningarna. På samma plats utfördes mätningarna med hammare och accelerometer samt rullande mätningar.



Figur 22. Borrkärnornas position i mätlinjen för de stationära ytvågsmätningarna

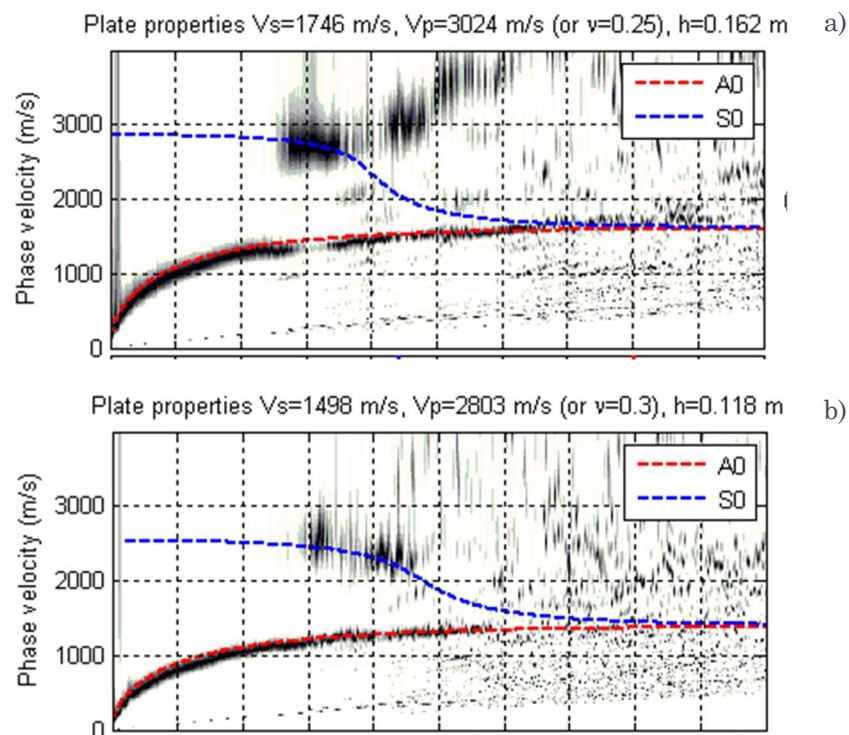
Styvhetsmätningar genom modalanalys genomfördes i ett klimatskåp vid följande temperaturer: -20, -10, 0, 10, 20, 25 och 30 °C. Mätningar utfördes i longitudinell riktning på hela provkroppen vilket alltså inkluderar samtliga beläggningsslager. K1 består av beläggningsslagrena ABS, ABb samt AG medan K2 består av ABS och ABb. En genomsnittlig beläggningstjocklek över mätlinjen utvärderades också genom stationära ytvågsmätningar (Ryden 2004).

Borrkärnornas tjocklek visas i Figur 23 där beläggningstjockleken i K1 var ca 16 cm och i K2 varierade tjockleken på provkropparna mellan 10 och 12 cm.



Figur 23. Två borrkärnor från (a) K1 (tjocklek ≈ 160 mm) och två borrkärnor från (b) K2 (tjocklek ≈ 100 – 120 cm) på E22.

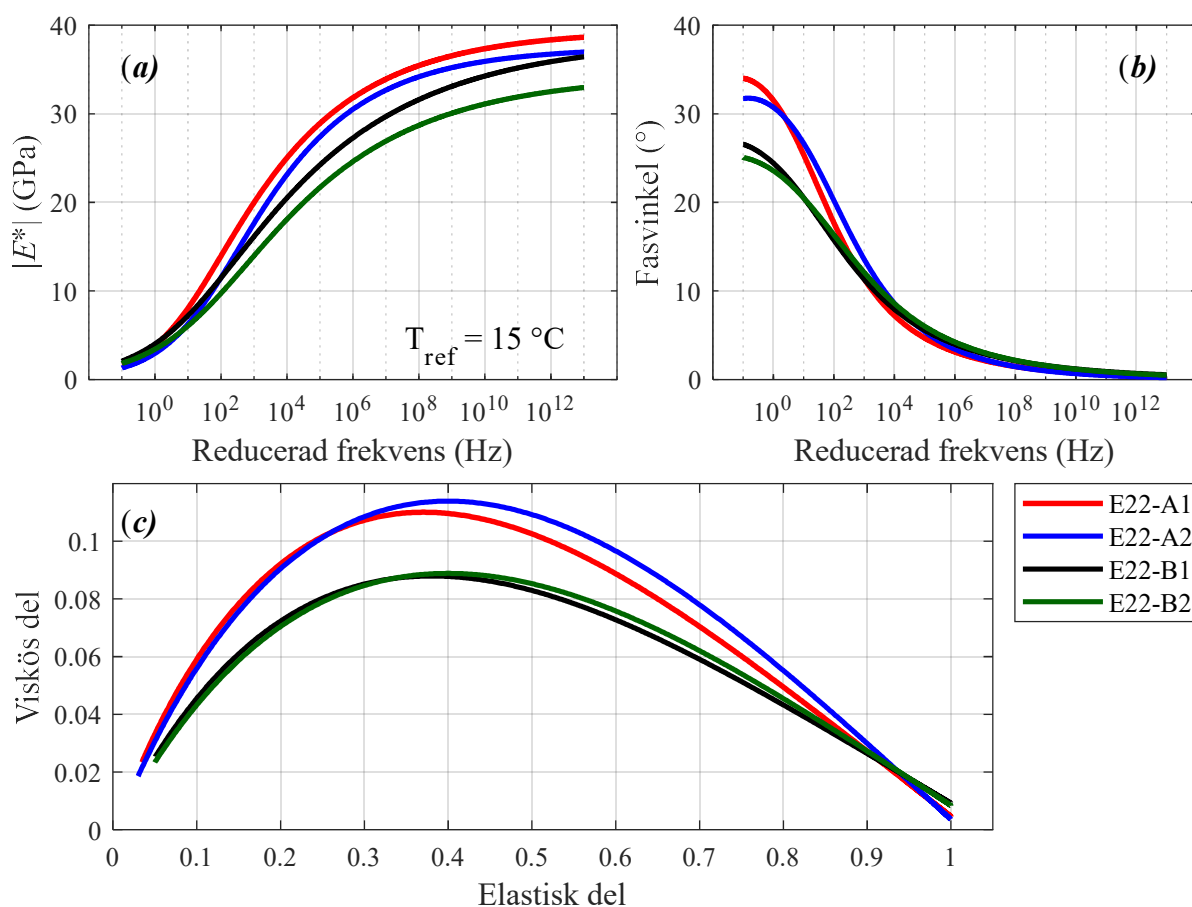
Analysen av ytvågsmätningarna resulterade i en tjocklek på 16,2 cm i körfält 1 (se Figur 24a) och en tjocklek på 11,8 cm i körfält 2 (se Figur 24b). Den utvärderade beläggningstjockleken från ytvågsmätningarna representerar en genomsnittlig tjocklek över mätlinjens längd (1,5 m).



Figur 24. Beräknad och uppmätt fashastighet från stationära seismiska ytvågsmätningar a) K1 och b) K2.

Masterkurvorna av borrkärnornas komplexa styvhetsmodul som bestämts genom modalanalys visas i Figur 25. Styvhetsmodulens masterkurvor av provkropparna från K1 (A1 och A2) och K2 (B1 och B2) skiljer sig genom att provkropparna B1 och B2 har lägre fasvinkel vid låga frekvenser. Detta beror sannolikt på avsaknaden av bundet bärlager i K2. Bundna bärlager innehåller relativt mjuka

bitumen som bidrar till en högre viskös modul. Skillnaden i beläggningstjocklek mellan K1 och K2 skulle också kunna vara en förklaring till lägre viskös modul i den tunnare beläggningen.



Figur 25. Komplexa masterkurvor framtagna från provkroppar från K1 (A1 och A2) och K2 (B1 och B2).

4 JÄMFÖRANDE RESULTAT

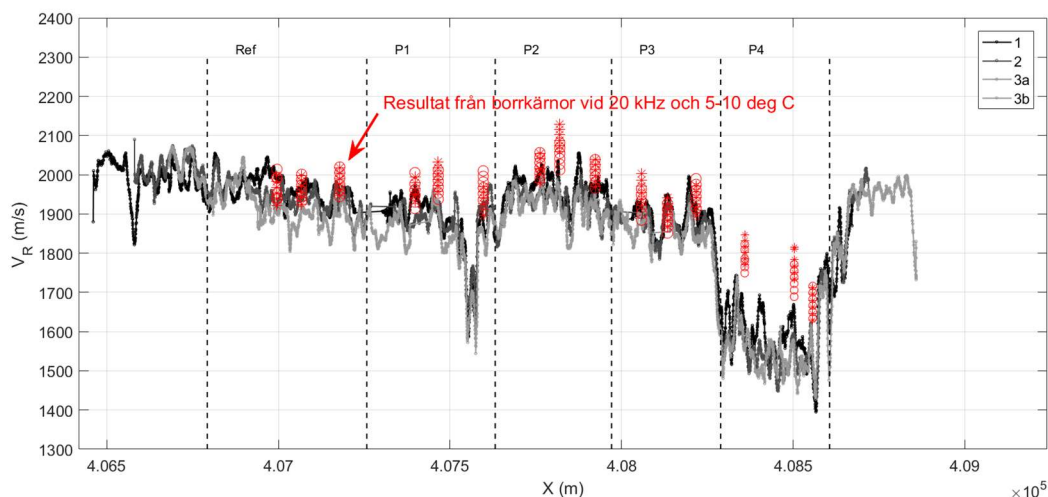
De stillastående ytvågsmätningarna och labbmätningarna ovan har gjorts för att kunna jämföra resultaten från de nya rullande profilerande ytvågsmätningarna med jämförbara referensdata. På E22 gjordes också mätningar av beläggningens permittivitet med markradar (PaveScan). I detta kapitel är tanken att jämföra resultaten från de använda mätmetoderna med varandra.

4.1 Riksväg 40

Figur 26 visar en jämförelse mellan ytvågshastigheten från rullande mätningar och motsvarande uppmätta och beräknade ytvågshastigheter från masterkurvorna på borrkärnorna i kapitel 3.2. För att kunna jämföra den dynamiska styvheten (eller seismiska hastigheten) från laboratorium och fält är det viktigt att jämförelsen görs vid samma frekvens och temperatur. Frekvensområdet som använts för att analysera fältmätningarna är 10–30 kHz och därför har en frekvens på 20 kHz valts som representativ. För masterkurvorna bestämda i labb har alltså styvheten beräknats vid samma frekvens (20 kHz) för att motsvara fältmätningarna. Medeltemperaturen genom hela beläggningen vid tiden för fältmätningarna är okänd men yttemperaturen mättes upp till ca 7°, 8° och 9° C under

de tre första mätningarna (Tabell 1 och Figur 8). Yttemperaturen ökade relativt snabbt med tiden på grund av starkt solsken men natten innan mätningarna utfördes var det frost vilket troligen lett till en avtagande temperaturgradient mot djupet i vägen. För att kompensera för den ökande medeltemperaturen i de bundna lagren har resultaten från laboratorium plottats i ett spann av stigande temperatur från 5° till 10° C, där en lägre temperatur ger en högre Rayleighvågshastighet (och E-modul). Detta spann ger också en uppfattning om hur stor inverkan temperaturen har på ytvågshastigheten (ca 70–90 m/s). I varje sektion har resultaten från två olika borrkärnor plottats med cirklar respektive asterisker. Borrkärnorna är tagna ca 4 månader efter fältmätningarna mellan hjulspåren i körfält K1 medan fältmätningarna gjorts i höger hjulspår.

Trots skillnader i exakt tidpunkt, position och temperatur visar jämförelsen i Figur 26 en viss samstämmighet i alla sektioner utom P4. I sektion P4, med högst andel polymermodifierat bitumen, visar fältmätningarna betydligt lägre styvhet jämfört med borrkärnorna i laboratorium.



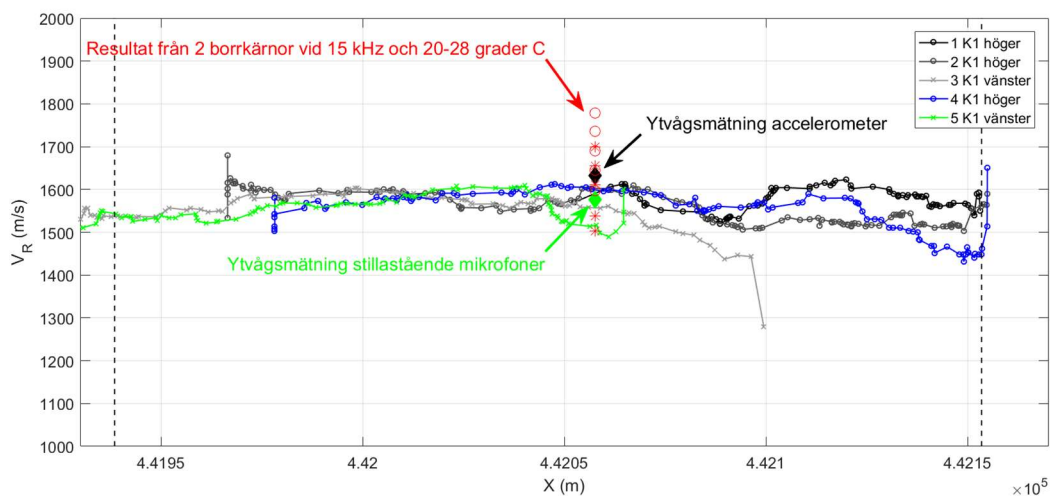
Figur 26. Resultat från mätningar i laboratorium på borrkärnor från Rv 40 (röda cirklar och asterisker) jämfört med fältmätningar (linjer från Figur 7).

4.2 E22

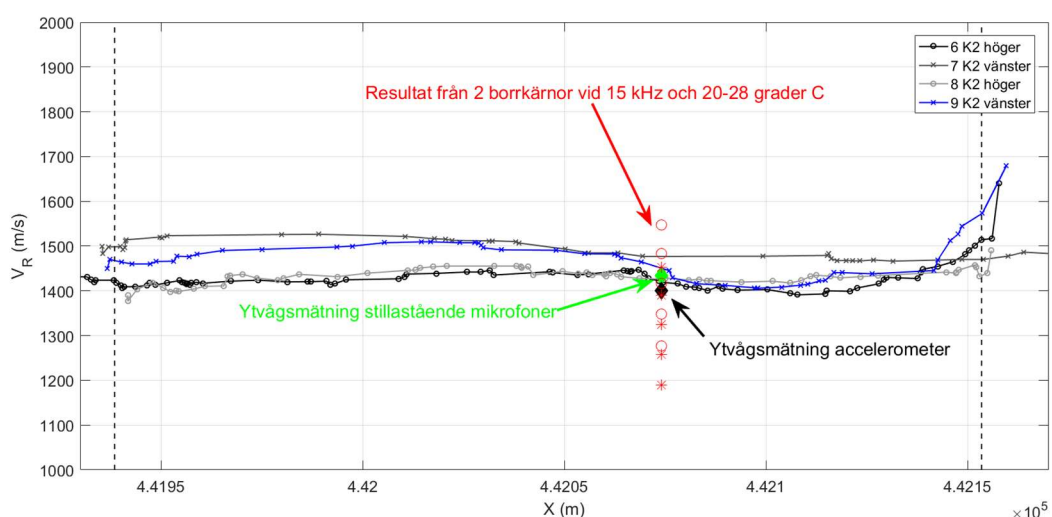
Figur 27 visar en jämförelse mellan ytvågshastigheten från rullande mätningar och motsvarande uppmätta och beräknade ytvågshastigheter från masterkurvorna på borrkärnorna ifrån E22. Frekvensområdet som använts i fältmätningarna på E22 är 10–25 kHz och därför har en frekvens på 15 kHz (ungefär mitt i det studerade frekvensspannet) valts från masterkurvorna från lab. Medeltemperaturen genom hela beläggningen vid tiden för fältmätningarna är okänd men yttemperaturen mättes upp till ca 30° C under de rullande mätningarna (Tabell 2 och Figur 16). Yttemperaturen ökade relativt snabbt med tiden på grund av starkt solsken men på morgonen (kl. 06:00) var lufttemperaturen bara ca 11° C vilket troligen lett till en avtagande temperaturgradient mot djupet i vägen. För att kompensera för den ökande medeltemperaturen i de bundna lagren har resultaten från laboratorium plottats i ett intervall av stigande temperatur från 20° till 28° C. Detta intervall ger också en uppfattning om hur stor inverkan temperaturen har på ytvågshastigheten (ca 200 m/s från 20° till 28° C). I varje sektion har resultaten från två olika borrkärnor (A1 och A2) plottats med cirklar respektive asterisker. Borrkärnorna är tagna nära vänster hjulspår i K1 (se Figur 22). För att ytterligare undersöka precisionen i de rullande mätningarna har även stillastående ytvågsmätningar utförts i provpunkten. Resultatet från traditionella mätningar med

en accelerometer och flera hammarslag är markerat med en svart diamant i Figur 27. Stillastående mätningar med mikrofonarrayen som mottagare och hammarslag både framför och bakom mikrofonerna som källa har också utförts i samma provpunkt och medelvärdet är markerat med en grön diamant i Figur 27. Figur 28 visar motsvarande resultat för provtagningspunkt B i K2.

Trots skillnader i exakt position och exakt temperatur visar jämförelserna i Figur 27 och Figur 28 en viss samstämmighet i både punkt A (X=442058 m) och B (X=442074 m). De stillastående ytvågsmätningarna ligger mycket nära de rullande ytvågsmätningarna i båda provpunkterna. Resultaten från de två olika borrhärdarna i respektive punkt varierar något men ligger också ganska nära ytvågsmätningarna inom det uppskattade temperaturområdet. Alla resultat visar en högre styvhet i K1 (punkt A) jämfört med K2 (punkt B).



Figur 27. Resultat från mätningar i laboratorium på borrhärdar från punkt A i K1 E22 (röda cirklar och asterisker) jämfört med fältmätningar (linjer från Figur 14). Fyllda markeringar motsvarar traditionella ytvågsmätningar med accelerometer (svart) och ytvågsmätningar med stillastående mikrofoner (grön) i samma punkt.



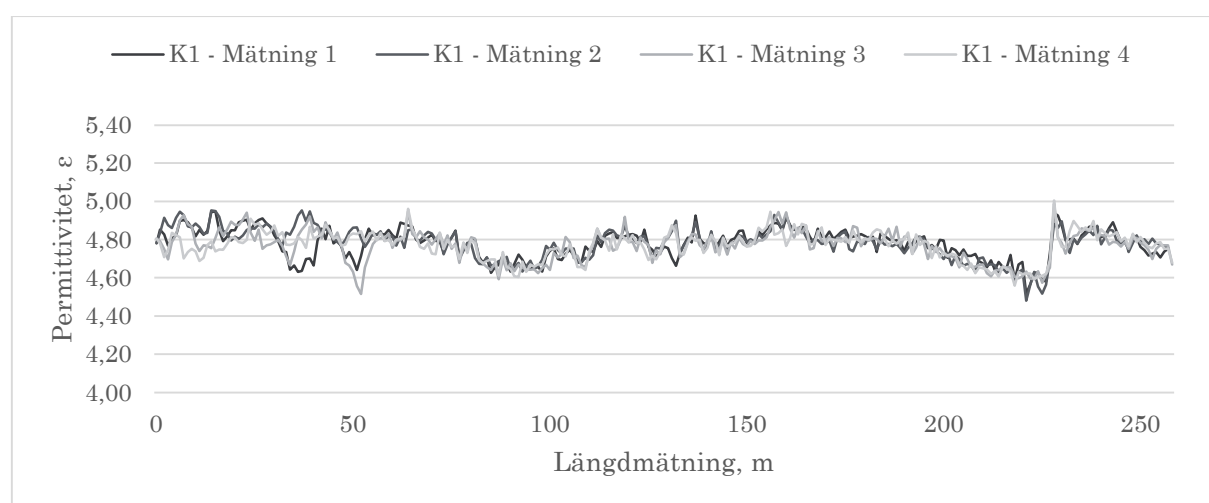
Figur 28. Resultat från mätningar i laboratorium på borrhärdar från punkt B i K2 E22 (röda cirklar och asterisker) jämfört med fältmätningar (linjer från Figur 15). Fyllda markeringar motsvarar traditionella ytvågsmätningar med accelerometer (svart) och ytvågsmätningar med stillastående mikrofoner (grön) i samma punkt.

I samband med de seismiska fältmätningarna på E22 utfördes även tester med PaveScan RDM (Gardner & Tennby 2019; Gardner & Tennby 2020). PaveScan RDM är en typ av georadar som mäter asfaltens permittivitet. Tanken med utrustningen och testningen är att utvärdera homogenitet på nylagda vägar och upptäcka eventuella avvikelser där vidare testning och borrning kan utföras. Utrustningen har tre antenner som mäter permittiviteten simultant medan mätvagnen rullas framåt. På E22 mättes drygt 250 m med PaveScan RDM där mätvärden samlades in var tionde centimeter. I varje mätlinje registrerades >2500 mätvärden för varje antenn där resultaten framgår av Tabell 3. Tabellen visar medelvärden och standardavvikelse för permittiviteten för alla tre antenner. De två körfälten, K1 och K2, testades två gånger i västlig riktning och två gånger i östlig riktning. Inga värden sticker ut särskilt mycket och standardavvikelserna för samtliga antenner är små. Mätningarna med PaveScan RDM bekräftar därmed de seismiska ytvågsmätningarna i avseendet att vägen förefaller homogen utan några signifikanta avvikelser gällande vare sig permittivitet eller ytvågshastighet (styvhet).

Tabell 3. Medelvärden och standardavvikelse från mätlinjer i västlig och östlig riktning. H, C och V representerar de tre antennerna; vänster, center respektive höger.

Riktning	Västlig 1			Västlig 2			Östlig 1			Östlig 2		
	V	C	H	V	C	H	V	C	H	V	C	H
Medel – K1	4,62	4,77	4,78	4,59	4,76	4,78	4,77	4,73	4,66	4,77	4,74	4,66
Std.av. – K1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,10
Medel – K2	4,94	4,94	4,91	4,95	4,95	4,93	4,84	4,99	4,98	4,85	4,99	4,98
Std.av. – K2	0,12	0,16	0,13	0,12	0,15	0,13	0,13	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13

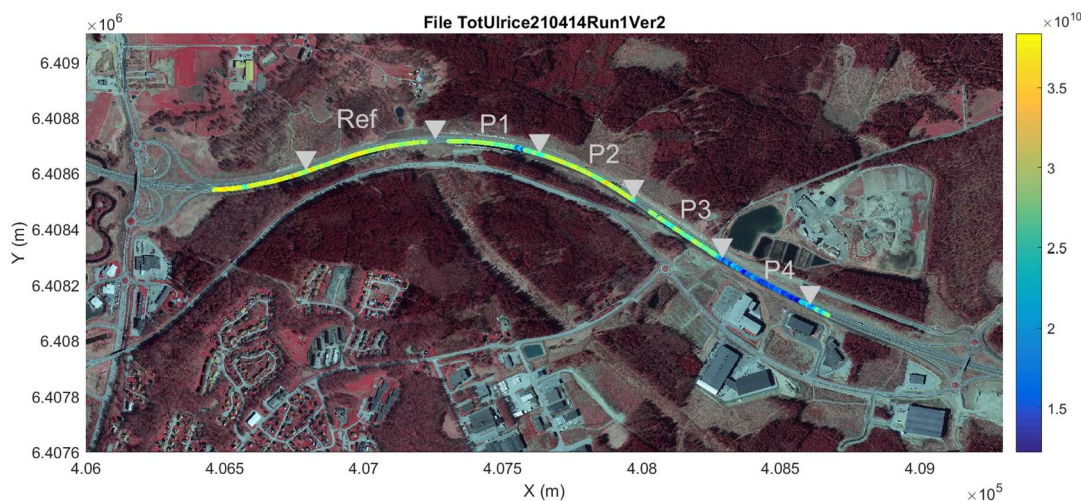
För att illustrera hur mätningarna med PaveScan RDM kan se ut har fyra mätningar från K1 plottats i Figur 29. I figuren visas resultaten som genomsnittsvärden per meter och det är endast värden från en antenn som använts. Höger antenn i körning 1 och 2 (västerut) har jämförts med vänster antenn i körning 3 och 4 (österut) för att resultaten ska motsvara samma mätlinje. Resultaten visar att mätningarna är mycket repeterbara och att beläggningsarbetet utförts på ett konsekvent sätt med ett homogent resultat längs mätlinjen. Hoppet i kurvorna vid ca 225 m beror på en beläggningsskarv.



Figur 29. Permittivitet uppmätt med PaveScan RDM i höger körfält, K1.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

I denna studie har alla resultat från de seismiska mätningarna redovisats i form av Rayleighvågshastighet eftersom det är den som mäts upp med mikrofonerna. Vågshastigheten kan sedan räknas om till E-modul, givet att materialets densitet och tvärkontraktionstal kan bestämmas eller uppskattas. För att illustrera hur denna E-modul kan se ut har värden på densitet och tvärkontraktionstal antagits till 2400 kg/m^3 respektive 0,3 och modulen beräknats och plottats i Figur 30. Figuren är densamma som Figur 5 men visar alltså E-modul direkt i stället. Här kan modulen jämföras mot eventuella gränsvärden och svaga partier lokaliseras.



Figur 30. Uppmätt ytvågshastighet har räknats om till E-modul som plottats kontinuerligt utmed den testade sträckan. De utvärderade resultaten kommer från mätsystemets ena (främre) källa och resultaten är plottade på kartan som funktion av X- och Y-koordinater från GPS.

Projektet har demonstrerat möjligheten att på ett mycket snabbt och automatiserat sätt samla in heltäckande ytvågsdata. Dessa data har använts för att utvärdera styvhet för de övre två bundna asfaltlagren. Rullande datainsamling kan jämföras med traditionella stationära mätningar, med t.ex. en accelerometer som mottagare, för att inse fördelarna med den presenterade metoden. En traditionell seismisk ytvågsmätning tar i storleksordningen 5–10 min att genomföra då utrustningen ska riggas upp, accelerometern fästas i vägbeläggningen, avstånd mäts ut och själva mätningen genomförs. I Tabell 1 anges start- och stopptid för de olika körningarna. Där framgår att det under körningarna genomfördes 5700 mätningar på ca. 5 min. På samma tid som en stationär mätning utförs traditionellt kunde nu alltså tusentals mätningar göras utmed en sträcka på två kilometer för att skapa en styvhetsprofil.

Rullande ytvågsmätningar är tids- och kostnadseffektiva att genomföra. Utöver detta reduceras arbetsmiljöriskerna drastiskt då mätningarna startas och övervakas ifrån bilen och inte kräver att någon befinner sig ute på vägen eller att körfält stängs av för provtagning.

Genom att utföra kvalitetskontroll baserat på styvhet fås en direkt återkoppling mot konstruktionens dimensionering som utgår ifrån just E-modul och lagertjocklek. Än idag finns ingen enkel och kostnadseffektiv metod som används rutinmässigt för att bestämma E-modul på asfalt. Rullande ytvågsmätningar har visats kunna användas för heltäckande kvalitetskontroll vid en kontrollerad töjningsnivå, frekvens och känd temperatur. I detta projekt har ytemperaturen utmed

vägen registrerats vid de rullande ytvågsmätningarna och antagits representera asfaltlagrens temperatur. Egentligen har dock asfaltlagren nästan alltid någon form av temperaturprofil, temperaturen varierar oftast med djupet från vägytan, beroende på medeltemperaturen under det senaste dygnet eller dygnet. För framtida projekt skulle temperaturprofilen kunna uppskattas och inkluderas i beräkningen med hjälp av befintliga modeller (Hermansson 2002). Detta kräver dock tillgång till korrekta väderparametrar men kan troligtvis inhämtas från webbaserade väderdata.

Det ska poängteras att alla labbmätningar utfördes på hela provkropparna bestående av alla de bundna lagren för respektive sträcka. Den bestämda E-modulen (eller Rayleighvågshastigheten) är då ett sammanslaget värde som representerar egenskaperna i hela provkroppen. Vad gäller fältmätningarna däremot beror de utvärderade resultaten på vilken våglängd hos ytvågen som studeras. En vanlig tumregel brukar vara ytvågen påverkar materialet från vägytan ner till djupet av en halv våglängd. Detta innebär att resultaten från de rullande ytvågsmätningarna kan sägas motsvara materialegenskaperna ner till 10 cm djup på Rv 40 vilket motsvarar de två översta lagren, ABS och ABb. Motsvarande djup för ytvågen på E22 blir 8 cm vilket även där motsvarar slit- och bindlager. Även horisontellt skiljer sig de undersökta materialvolymerna åt mellan de olika mätmetoderna. Medan en provkroppens diameter är 150 mm är den utvärderade hastigheten i fältmätningarna representativ för hela mikrofonarrayens längd på drygt 350 mm. Även om det kunde konstateras en god överensstämmelse mellan resultaten från de rullande fältmätningarna och de uppborrade provkropparna ska det alltså understrykas att de undersökta materialvolymerna inte är exakt desamma för de olika mätmetoderna och att tidpunkten för provning också varierat.

REFERENSER

- Bjurström, H. & Ryden, N. (2015). Effect of surface unevenness on non-contact surface wave measurements using a rolling microphone array, AIP Conference Proceedings 1650 (1), <https://doi.org/10.1063/1.4914602>.
- Bjurström, H., Gudmarsson, A., Ryden, N. & Starkhammar, J. (2016). Field and laboratory stress-wave measurements of asphalt concrete, Construction and building materials, 126, 508–516, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.067>.
- Bjurström, H. (2017). Non-contact surface wave measurements on pavements, Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- Gardner, E. & Tennby, G. (2019). Georadarmätning av asfaltbelägningars egenskaper, SBUF projekt 13513.
- Gardner, E. & Tennby, G. (2020). Mätning med anpassad georadarteknik för kontroll av packning och homogenitet vid utförandet av asfaltbelägningar del 2., SBUF projekt 13703.
- Gudmarsson, A. (2014). Resonance testing of asphalt concrete, Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- Gudmarsson, A., Ryden, N., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C. (2015). Complex modulus and complex Poisson's ratio from cyclic and dynamic modal testing of asphalt concrete. Construction and Building Materials, 88, 20–31, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.007>.
- Gudmarsson, A., Carret, J.-C., Pouget, S., Nilsson, R., Ahmed, A., Di Benedetto, H. & Sauzéat, C. (2019). Precision of modal analysis to characterise the complex modulus of asphalt concrete. Road Materials and Pavement Design, 20:sup1, S217–S232, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1590224>
- Hermansson, Å. (2002). Modeling of frost heave and surface temperatures in roads, Ph.D. thesis, Luleå University of Technology.
- Nazarian, S., Yuan, D. & Tandon, V. (1999). Structural field testing of flexible pavement layers with seismic methods for quality control, Journal of the Transportation Research Board, 1654, 50–60, <http://dx.doi.org/10.3141/1654-06>.
- Ryden, N., (2004), Surface wave testing of pavements, Ph.D. thesis, Lund University.
- Ryden, N., Bjurström, H., Starkhammar, J., Lindh, P., (2018), Non-destructive quality control during the production of civil engineering infrastructure, 12th European conference on Non-Destructive Testing in Gothenburg, Sweden, June 11-15, 2018.
- Ryden, N., Starkhammar, J., Yilmaz, O., Bjurström, H., Gudmarsson, A., Tofeldt, O., (2019), Small scale seismic testing using microphones, Fifth International Conference on Engineering Geophysics (ICEG), 21–24 October 2019, Al Ain, UAE, DOI: 10.1190/iceg2019-011.1
- Ryden, N., Ulriksen, P., Park, C. & Miller, R. (2002). Portable seismic acquisition system (PSAS) for pavement MASW. 15th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Zofka, A., Sudyka, J. & Sybilski, D. (2017). Assessment of pavement structures at traffic speed. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 1st Edition, CRC Press.