

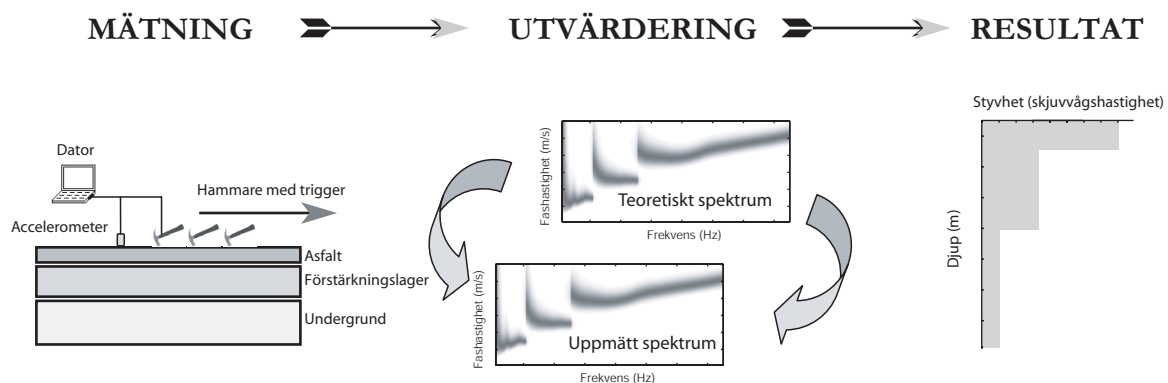
Oförstörande Provning av Vägar med Seismik

Nils Rydén

SBUF proj. nr.: 11201, titel: Användandet av oförstörande seismiska metoder för generering av indata vid analytisk dimensionering av vägkonstruktioner.

Sammanfattning

En ny metod för oförstörande provning av vägar och betongkonstruktioner har utvecklats inom detta doktorandprojekt. Tekniken kan användas för att uppskatta styvheten och tjockleken på respektive lager i en vägkonstruktion. Metoden är oförstörande och mätningar kan därför göras profilerande längs med vägen och upprepas vid olika tidpunkter för att studera vägens status vid olika årstider. I nya vägkonstruktioner kan tekniken användas för att kontrollera värden på de parametrar som antagits vid en analytisk dimensionering. Den tekniska utvecklingen bygger på en studie av vågutbredning i vägar samt rapporterade svårigheter med befintliga metoder. Ett datorbaserat portabelt mätsystem samt datorprogram för insamling och utvärdering av data har utvecklats inom projektet. Figur 1 visar en schematisk översikt av metoden. En accelerometer och en hammare används för att samla in data på vägytan. Resultatet redovisas som en styvhetsprofil mot djupet där tjocklekar och styvhetsmoduler i respektive lager kan avläsas.

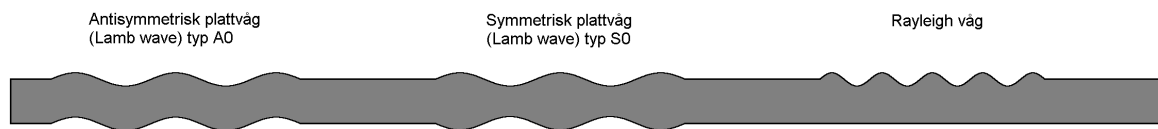


Figur 1. Seismiska vågor genereras och registreras på vägytan. Den uppmätta responsten (fashastighetsspektrum) från vägen är en funktion av vägens strukturella uppbyggnad vilken också kan beräknas teoretiskt. Den uppmätta responsten jämförs med den teoretiska responsten och den bästa passningen resulterar i en styvhetsprofil mot djupet.

Projektet började med en litteraturstudie av befintliga metoder vilka också testades i praktiken. Resultatet visade att befintliga mät- och utvärderingsmetoder byggde på en förenklad bild av vågutbredning i vägar. Existerande metoder antog att vågfältet dominerades av så kallade Rayleigh vågor och att den seismiska responsten kunde beskrivas med en fashastighet per frekvens, i form av en kontinuerlig dispersionskurva. Efter en omfattande studie av vågutbredningen i vägar kunde det konstateras att felaktigheter och problem med befintliga metoder kunde härledas till denna förenkling.

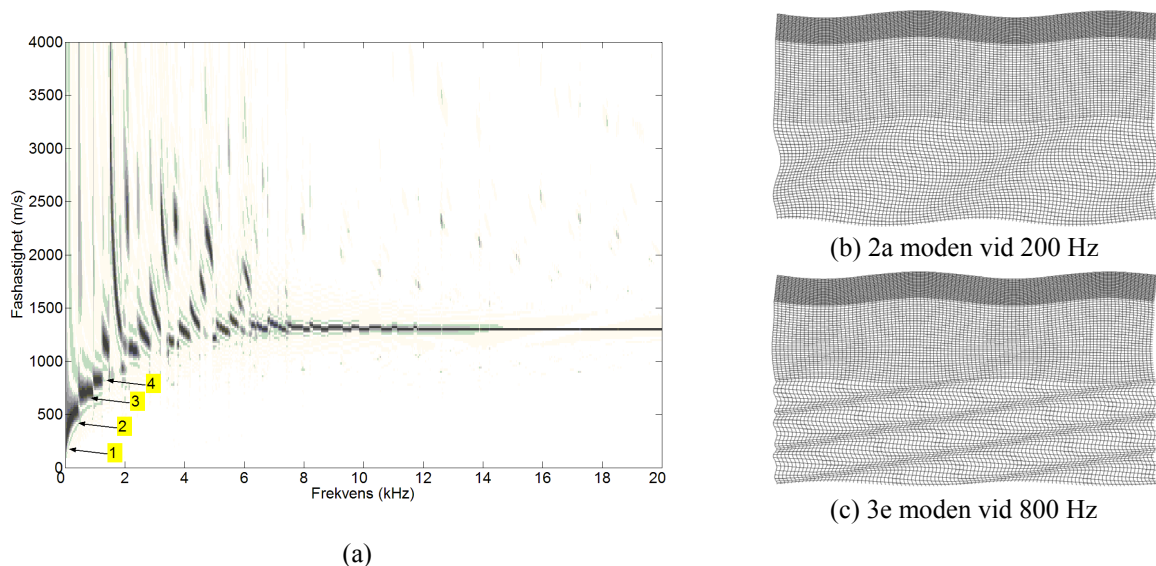
De stora styvhetskillnaderna mellan olika lager i en väggropp genererar så kallade plattvågor (Lamb waves) i de olika lagren. Den fundamentala skillnaden jämfört med Rayleigh vågor är

att hela lagret vibrerar som en platta. Detta gör att hastigheten på vågorna inte bara beror på styvheten i själva materialet utan på plattans totala böjstyvhet, alltså även tjockleken. I en fri platta finns det två olika typer av plattvågor vilka illustreras tillsammans med Rayleighvågen i Figur 2.



Figur 2. Rörelsemönster för plattvågor (Lamb waves) och Rayleigh vågor.

Vågutbredning i en väggkropp kan beskrivas som en superponering av plattvågor i respektive lager. Rörelsemönstret i det första och andra lagret måste "passa ihop" över gränssytan för att effektiv vågutbredning längs med hela väggkroppen ska kunna uppstå. Detta kan beskrivas som ett resonans fenomen där endast de kombinationer av frekvens och hastighet som medför en bra passning av vågor i hela konstruktionen går att mäta upp på ytan av vägen. För en typisk väggkonstruktion finns det många möjliga kombinationer av hastighet och frekvens. Det är därför nödvändigt att beskriva responsen från ett uppmätt vägfält på vägytan i form av ett komplett fashastighetsspektrum istället för en diskret dispersionskurva. Figur 3a visar ett beräknat teoretiskt fashastighetsspektrum från en typisk väggkonstruktion. Hastigheten vid olika frekvenser delar upp sig i olika grupper (moder) med olika rörelsemönster, se Figur 3b och 3c.

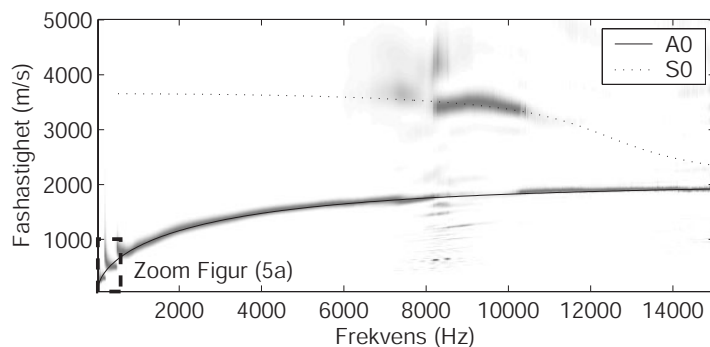


Figur 3. (a) Beräknat fashastighetsspektrum (respon) på ytan av en given väggkonstruktion. (b) Rörelsemönster för den andra moden markerad med [2] i Figur 3a. (c) Rörelsemönster från den tredje moden markerad med [3] i Figur 3a.

Genom att utnyttja hela fashastighetsspektrumet i utvärderingen av mätdata undviks flera problem relaterade till den diskreta dispersionskurvan som begränsat tidigare metoder. Dessutom går hela utvärderingen att automatisera eftersom ingen diskret dispersionkurva behöver tas fram från uppmätta data. Den största nackdelen med metoden är att mer data behöver samlas in på vägytan och att utvärderingen är relativt datorkrävande. Därför har en

snabbare approximativ metod utvecklats för utvärdering av det översta lagret direkt i fält. Nedan presenteras ett verkligt exempel där båda metoderna använts för att verifiera uppnådda strukturella egenskaper i en nybyggd väg.

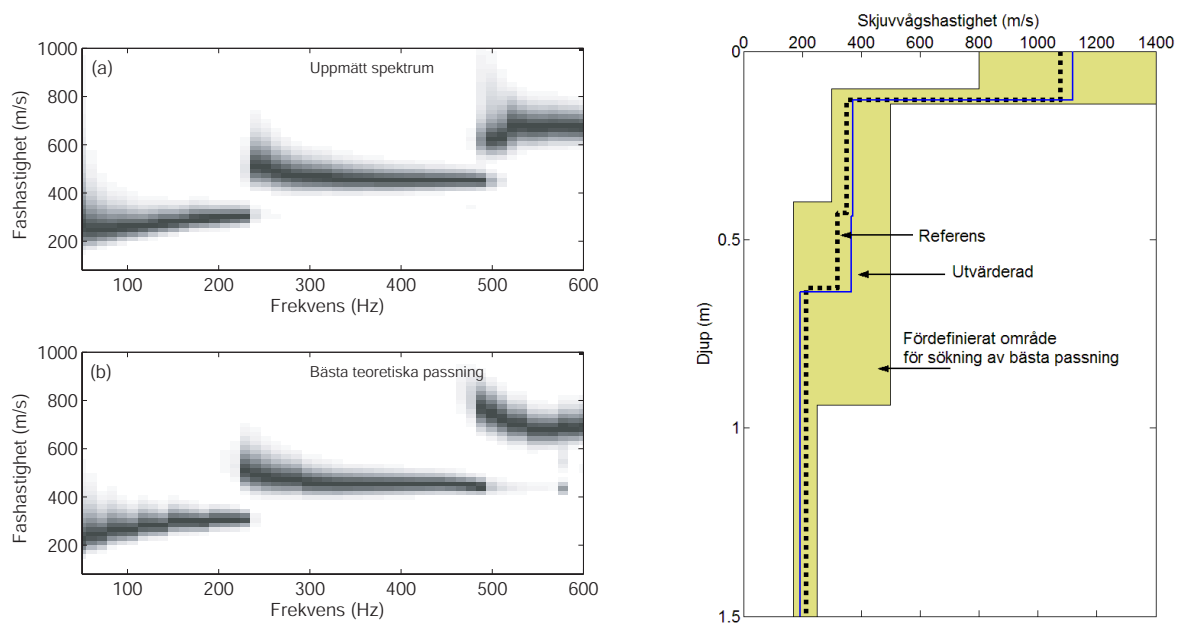
Den snabba utvärderingen av det översta lagret bygger på att lagret approximeras med en fri platta. Vid utvärderingen matchas teoretiska dispersionskurvor (motsvarande A0 och S0 i Figur 2) till den högfrekventa delen av det uppmätta spektrumet. Figur 4 visar ett exempel där den approximativa metoden har använts för att bestämma styvhetsmodulen och tjockleken på det översta lagret i en väg direkt i fält. Mätningen är utförd på en väg med en känd asflattjocklek på 0.13 m. Teoretiska dispersionskurvor, A0 och S0, passas automatiskt till mätdata. Resultatet visas i Figur 4 där dispersionskurvor motsvarande en fri platta med skjuvvågshastigheten 2162 m/s, tjockleken 0.13 m, och ett tvärkontraktionstal på 0.30 har plottats över mätdata. Skjuvvågshastigheten motsvarar en dynamisk styvhetsmodul (E-modul) på 29 000 MPa. Modulen är starkt beroende av asfaltens viskoelastiska egenskaper och är därför bara representativ för aktuell temperatur (13 grader) och aktuellt frekvensområde (2-15 kHz).



Figur 4. Uppmätt fashastighetspektrum från en väg med 0.13 m tjockt asfaltlager.

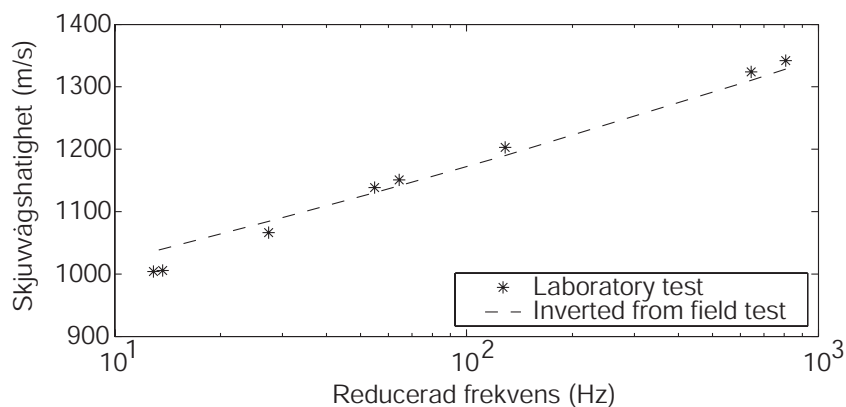
För att utvärdera alla lager i konstruktionen och även kunna uppskatta asfaltens styvhetsmodul vid lägre frekvenser, representativa för trafikbelastning, används ett lägre frekvensintervall markerat i Figur 4. En global optimeringsmetod (Simulated Annealing) har implementerats för att leta efter den lagermodell som ger bästa möjliga teoretiska passning till uppmätta data. Figur 5a visar den del av spektret som använts vid utvärderingen samt det teoretiskt beräknade spektrum (Figur 5b) från den lagermodell som resulterat i bästa möjliga passning (Figur 5c). Den färgade ytan i Figur 5c motsvarar ett fördefinierat område inom vilket programmet letar efter den bästa lösningen. Detta område har bestämts utifrån rimliga värden på en typisk vägkonstruktion. Den streckade linjen i Figur 5c visar referensvärden vilka mätts upp direkt på respektive lager under byggnationen av vägen. Den bästa passningen från utvärderingen av alla lager (heldragen linje) visar god överensstämmelse med referensprofilen.

Asfaltens viskoelastiska egenskaper har tagits med i utvärderingen och redovisade värden i Figur 5c motsvarar 13 grader C och 30 Hz (trafiklast). Borrkärnor tagna i samma sektion har testats i laboratoriet. Figur 6 visar en jämförelse mellan värden från laborietester (Indirect Tensile Test) och fältmätningen med seismik. Den dynamiska styvhetsmodulen (E-modul) kan beräknas från skjuvvågshastigheten och blir 7 814 MPa vid 30 Hz. Laborietesterna gav en något lägre modul på 7 224 MPa.



(a) övre vänster (b) nedre vänster (c) höger

Figur 5. (a) Uppmätt spektrum från ytan av vägen. (b) Bästa teoretiska passning motsvarande lagermodellen i (c).



Figur 6. Asfaltens skjuvvågshastighet som funktion av frekvens från laborietest (stjärnor) och utvärderat samband från seismisk fältmätning (streckad linje).

Utförligare resultat finns redovisade i sammanläggningsavhandlingen ”Surface Wave Testing of Pavements”. I avhandlingen har metoden huvudsakligen testats på vägar och betongplattor. Men metoden bedöms också kunna användas inom andra områden av oförstörande provning. Potentiella områden är ultraljudsundersökningar av tunna plattor och sandwich konstruktioner, ytvågsseismik i naturlig geologi, och medicinska tillämpningar.