

# OFÖRSTÖRANDE PROVNING AV JETPELARE



Nils Rydén och Per Lindh

2015-01-11

# FÖRORD

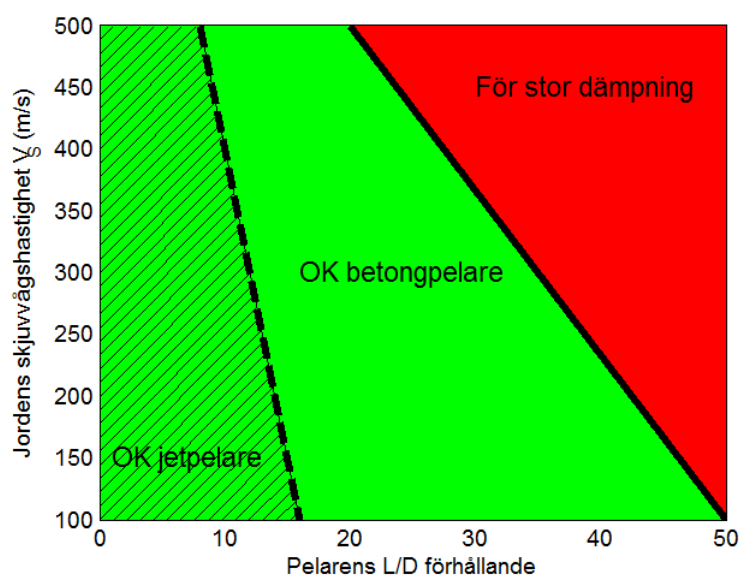
Detta projekt har utförts under 2013 och 2014 på Peab Anläggning och Peab Grundläggning med finansiering från SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond). Philip Landqvist har tagit initiativ till projektet och drivit fullskaleförsöken med jetpelare. Nils Rydén är huvudförfattare till slutrapporten och har utfört alla seismiska mätningar och analys av data. Per Lindh har utfört provtagning och dokumentering av borrhärdar. Från Peab tackas särskilt Philip Landqvist, Tomas Esperi, och Per-George Uddgård som alla varit delaktiga projektet. Ett stort tack till de externa medlemmarna i referensgruppen Sven Liedberg (Skanska) och Johan Blumfalk (Hercules Grundläggning) som båda bidragit med engagemang och värdefulla synpunkter under projektets gång.

Nils Ryden och Per Lindh, Peab Anläggning AB, 2015-01-11

# SAMMANFATTNING

I detta projekt studeras seismiska mätningar för oförstörande kvalitetskontroll av jetpelare. Resultat från borrprover och framschaktning av jetpelare i full skala har jämförts med oförstörande seismikmätningar från toppen av pelarna. Slutsatsen från projektet är att seismikmätningar på jetpelare är relativt sett svårare än motsvarande mätningar på en betongpelare (vilket används standardmässigt på grävda betongpålar i många länder) med samma geometri. Den största svårigheten beror på att seismiska vågor dämpas relativt sett mer i jetpelare/jord jämfört med betong/jord.

Resultaten indikerar att seismikmätningar för oförstörande kvalitetskontroll av jetpelare har potential att fungera på kortare pelare, ca <8 m i fast jord och ca <16 m i mycket lös jord, Figur 1. Metoden har därmed potential att kunna utvecklas till en framtida kostnadseffektiv oförstörande kontrollmetod av jetpelare efter ytterligare validering i olika jordar. Resultat från projektet visar också hur svårt det är att borra upp opåverkade kärnor från cementstabiliserat material med förhållandevis låg hållfasthet (ca 4 MPa). Flera upptagna kärnor från jetpelare som visar på bra resultat från seismiska mätningar (hel och fast pelare) visar på skador som med stor sannolikhet uppstått under själva borrningen och hanteringen av proverna. De prover som kunnat tas upp och provas i labb visar generellt betydligt högre seismisk hastighet jämfört med medelvärdet längs hela jetpelaren i fält.



**Figur 1. Schematisk figur över ungefärliga mätbara pelare med olika slankhet ( $L/D$ ) i lös ( $V_s=100$  m/s) till mycket fast ( $V_s=500$  m/s) omkringliggande jord.  $L/D$  anger Längd/Diameter förhållandet på pelaren.**

Eftersom dämpningen av seismiska vågor längs med pelaren medför stora begränsningar har detta fenomen studerats i detalj. Mätningar på både jetpelare och betongpålar samt numeriska simuleringar i både 1D och 3D har utförts för att studera problemet med dämpning i jetpelare. Resultaten från numeriska simuleringar visar att kontrasten i skjuvvågshastighet ( $V_s$ ) (eller skjuvmodul  $G$ ) mellan jetpelare och jord är avgörande för hur långa pelare som går att undersöka med en seismisk mätning från toppen av pelaren.

En ny typ av utvärdering med fönstring (filtrering) av uppmätt signal i tidsdomän innan transformering till frekvensdomän, har visat sig ge bättre resultat jämfört med traditionell utvärdering av ekon i tidsdomän eller mobilitet i frekvensdomän. Metoden med fönstring av signalen i tidsdomän har testats på jetpelare tillverkade i svåra förhållande (fast sand/grus). Resultaten visar att det går att uppskatta kompressionsvågshastighet i upp till 8 m långa jetpelare med diameter 800 mm från seismiska mätningar på toppen av pelaren. Uppmätt hastighet (här ca  $V_{P_{1D}}=2700$  m/s) är då ett medelvärde genom hela pelaren och metoden förutsätter att pelaren är relativt homogen. Det bör påpekas att det med stor sannolikhet inte går att lokalisera mindre defekter längs med pelaren i detta fall.

Pelarnas homogenitet har undersökts genom att borra upp en kärna ur varje pelare. Delar av kärnorna har ofta spruckit och fragmenterats på grund av det cementstabiliserade materialets spröda karaktär. Laborariemätningar på de bästa delarna av borrhärdarna visar att de bästa partierna har en hög seismisk kompressionsvågshastighet ( $V_{P_{1D}}=3200$  m/s) och tryckhållfasthet (12 MPa).

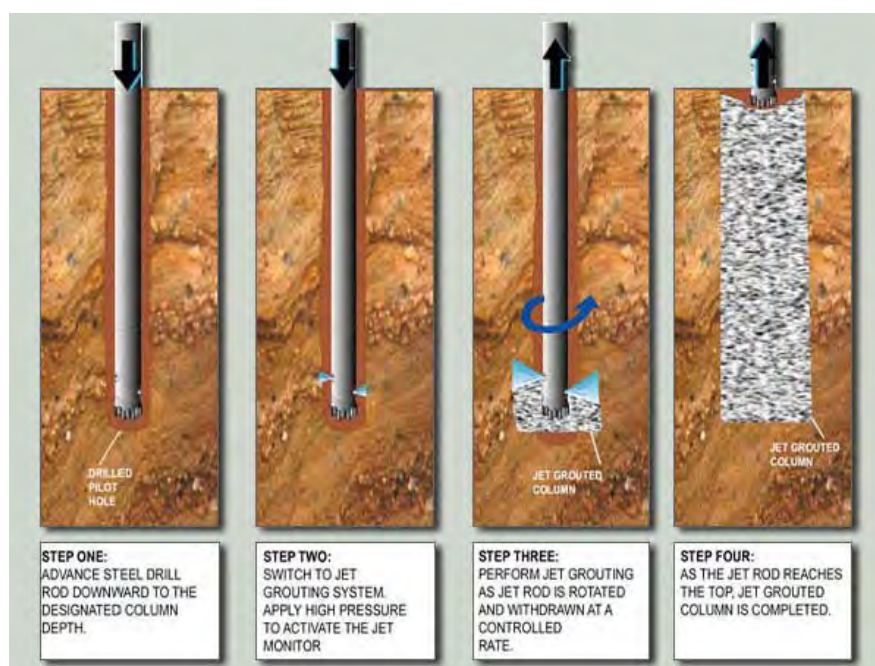
Seismikmätningar på jetpelare i lösare jord förväntas vara enklare på grund av betydligt lägre dämpning. För framtida studier rekommenderas också kompletterande mätningar med så kallad ”parallell seismik” eller ”downhole” mätningar. Dessa mätningar kan utföras med seismisk CPT och borde kunna ge fördelaktiga resultat vid provning av jetpelare eftersom relativt sett mer energi läcker ut från pelare till jord jämfört med mätningar på betongpålar.

# INNEHÅLL

<b>1. BAKGRUND</b> .....	<b>5</b>
<b>2. SYFTE</b> .....	<b>6</b>
<b>3. METODIK</b> .....	<b>7</b>
<b>4. SEISMIKMÄTNINGAR I JETPELARE OCH SIMULERING</b> .....	<b>7</b>
4.1 UTVÄRDERING I FREKVENSDOMÄN .....	7
4.2 DÄMPNING I JETPELARE .....	8
4.3 NUMERISK SIMULERING AV VÅGUTBREDNING I JETPELARE – 1D .....	8
4.4 EXEMPEL FRÅN MÄTNING PÅ SP1 BETONGPÅLE .....	9
4.5 NUMERISK SIMULERING AV VÅGUTBREDNING I JETPELARE – 2D FEM.....	11
<b>5. FÄLTFÖRSÖK MED SEISMIKMÄTNINGAR PÅ JETPELARE</b> .....	<b>14</b>
5.1 TILLVERKNING AV JETPELARE I FÄLT .....	14
5.2 RESULTAT FRÅN OFÖRSTÖRANDE SEISMIKMÄTNINGAR I FÄLT.....	14
5.2.1 Resultat från seismikmätningar på pelare 10A .....	15
5.2.2 Resultat från seismikmätningar på pelare 20A .....	17
5.2.3 Resultat från seismikmätningar på pelare 20C .....	19
5.2.4 Resultat från seismikmätningar på pelare P183.....	20
5.2.5 Resultat från seismikmätningar på pelare P300.....	22
5.2.6 Resultat från seismikmätningar på pelare P301.....	22
5.3 RESULTAT FRÅN BORRNING OCH FRAMSCHAKTNING AV JETPELARE I FÄLT.....	23
5.4 MÄTNING PÅ BORRKÄRNOR.....	24
<b>6. SLUTSATSER</b> .....	<b>24</b>
<b>LITTERATURFÖRTECKNING</b> .....	<b>25</b>
<b>APPENDIX A: FOTO FRÅN BORRKÄRNOR</b> .....	<b>27</b>

## 1. BAKGRUND

Jetinjektering kan användas för att göra cementstabiliserade pålar direkt i jorden (jetpelare). Metoden kan vara ett kostnadseffektivt alternativ till traditionella betongpålar i flera olika typer av grundläggningsprojekt. Pålarna tillverkas genom att först borra ner till önskat djup och sedan injektera en cementsuspension under högt tryck (ca 450 bar) i den befintliga jorden samtidigt som borren roteras upp till markytan, Figur 2. Pålens slutliga egenskaper i form av homogenitet, diameter, och tryckhållfasthet beror på en mängd olika parametrar som; typ av jord, cementsuspension, munstycken, injekteringsstryck, injekteringsflöde, stigning och rotationshastighet. Samspelet mellan alla dessa produktionsparametrar och jordens egenskaper är komplext och kvalitén på tillverkade pålar har visat sig kunna variera kraftigt (Tinoco et al., 2011; Croce and Flora, 2000). Problem med inhomogenitet och varierande diameter i jetpelaren ökar vid installation genom olika jordlager med stora kontraster i jordens egenskaper (till exempel i sand med lager av torv och dy). Kvalitetskontroll kan göras genom att gräva fram testpålar eller borra ut en kärna genom hela pålen. Denna typ av kvalitetskontroll är kostsam och förstör dessutom pålen. Det finns därför ett stort behov av kunna kvalitetsvärdera jetpelare med oförstörande provning.

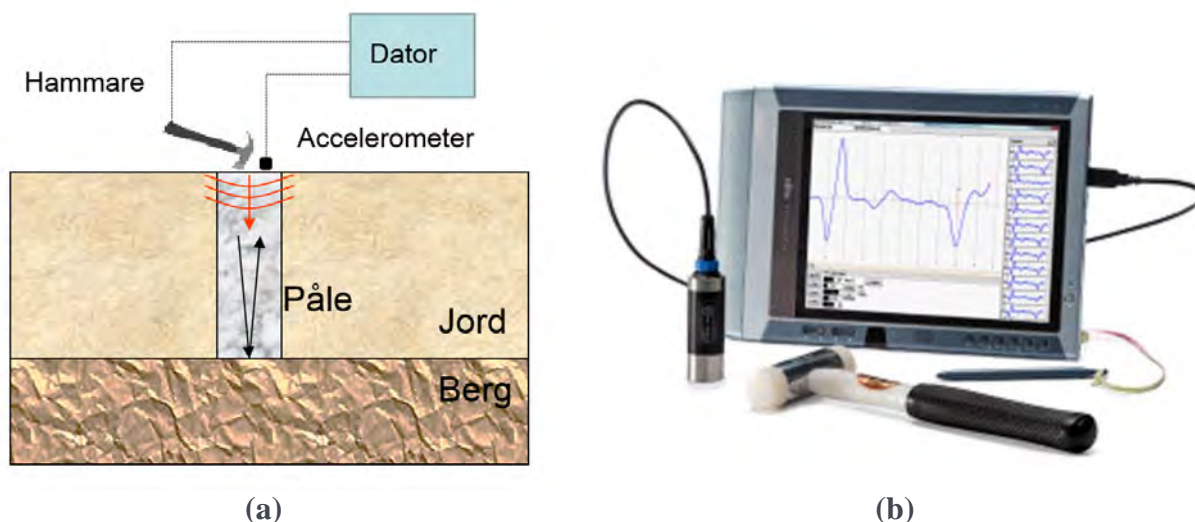


**Figur 2. Schematisk figur över produktion av jetpelare (figur från <http://sunlyengineering.com>)**

Oförstörande provning av jetpelare med seismik (low strain pile integrity testing (PIT)) och temperaturmätningar har nyligen testats i några utländska projekt (Özcan and Özdemir, 2008; Mullins, 2010). Seismikmätningar har rapporterats ge lovande resultat (Özcan and Özdemir, 2008) men det finns idag inga kända publicerade detaljerade resultat från dessa mätningar eller information om hur mätningarna bör utföras.



Seismikmätningar på betongpålar kan göras genom att mäta upp vibrationshastighet från ett slag med en handslägga på pålens topp. I de flesta tillämpningar antas då vibrationerna från impulsen enbart sprida sig ner i pålen som en 1D longitudinell våg, även kallad kompressionsvåg ( $P$ -våg). Eventuella uppmätta reflexer antas komma från botten på pålen och/eller variationer i dynamiskt motstånd (impedans). Dynamiskt motstånd i pålen beror på pålens densitet ( $\rho$ ) och kompressionsvågshastigheten ( $V_P$ ) samt pålens diameter ( $D$ ). Denna metod kallas internationellt ofta Low Strain Pile Integrity Testing (PIT) eller Pulse-Echo Method (PEM). Figur 3 visar ett exempel på mätuppställning och utrustning samt uppmätt signal från en betongpåle.



**Figur 3. (a) Exempel på mätuppställning och (b) utrustning och uppmätt signal från PIT test (figur 3b från <http://trade.indiamart.com>).**

Temperaturmätningar har också visat på lovande resultat men här krävs det att en mängd temperaturgivare installeras i varje påle som ska testas (Mullins, 2010). Temperaturmätningarna går sedan ut på att analysera temperaturutvecklingen från hydratationen av cementen i jorden vilken är indirekt kopplad till diameter och homogenitet i pålen.

## 2. SYFTE

Syftet med detta projekt är att utvärdera seismikmätningars (Low Strain Pile Integrity Testing (PIT)) tillämpbarhet för oförstörande provning av jetpelare. Seismiska mätningar från toppen av en påle med känd längd antas kunna ge seismisk medelhastighet och homogenitet i pålen. Den seismiska hastigheten kan sedan användas för att uppskatta hållfastheten i pålen enligt samma metodik som vid kvalitetskontroll av djupstabilisering (Dannewitz et al. 2005) och ytstabiliserade jordlager (Ryden et al. 2006). Resultaten förväntas kunna bidra till en effektivare oförstörande och kostnadseffektiv kvalitetskontroll av jetpelare.

### 3. METODIK

I detta projekt utvärderas seismikmätningars (Low Strain Pile Integrity Testing (PIT)) tillämpbarhet för oförstörande provning av jetpelare. Flera jetpelare i full skala har tillverkats i fast sand/grus och oförstörande seismikmätningar har jämförts med förstörande provtagning. Numerisk modellering har använts för att systematiskt kunna studera olika parametrars teoretiska inverkan på resultaten. Metodiken syftar främst till att kunna kvalitetsvärdera jetpelare genom ett medelvärde på uppmätt seismisk hastighet i hela pelaren. Eventuell variation i egenskaper längs med pelaren eller lokalisering av mindre defekter har inte studerats i detta projekt och bedöms vara mycket svårt med tekniken som använts i detta projekt.

### 4. SEISMIKMÄTNINGAR I JETPELARE OCH SIMULERING

Seismikmätningar används redan idag för oförstörande provning av platsgjutna grävpålar i betong och brukar internationellt benämnas ”low strain” testing (PIT eller PEM). Observera att detta inte är samma teknik som används för dynamisk provbelastning i form av stötvågsmätning med betydligt större töjningsnivåer (Alheid et al. 2014). Vid seismiska mätningar med lägre töjningsnivåer används en liten hammare eller handslägga och en vibrationsgivare på toppen av pålen (Rausche et al. 1992; ASTM D 5882 – 07) (Figur 3). Genom att analysera vågorna från ett hammarslag på toppen av pålen kan pålens genomsnittliga kompressionsvågshastighet ( $V_{P\_1D}$ ) eller längd ( $L$ ) utvärderas. Teoretiskt finns det också en viss möjlighet att uppskatta pålens tvärsnittsarea och profil (Rausche et al. 1992). Den utvärderade tvärsnittsarean anses dock relativt osäker och svår att utvärdera (Liao och Roesset, 1997). Den uppmätta responsen kan utvärderas i både tidsdomän (Figur 3b) och frekvensdomän. Utvärdering i frekvensdomän rekommenderas vanligtvis för robust utvärdering av  $L$  eller  $V_{P\_1D}$ .

#### 4.1 Utvärdering i frekvensdomän

I frekvensdomän utvärderas normalt frekvensskillnaden ( $\Delta f$ ) mellan olika longitudinella resonansfrekvenser i pålen (stående longitudinella vågor). Vid liknande resonansfrekvensmätningar på cylindriska provkroppar med fria randvillkor (i laboratorium) används istället den lägsta longitudinella resonansfrekvensen  $f_0$  istället för  $\Delta f$  (Ryden et al. 2006). För pelare i jorden beror dock  $f_0$  på pelarens randvillkor i botten på pelaren vilket i många fall kan vara okänt. Det är därför säkrare att använda  $\Delta f$  vid mätningar på pålar eller pelare i jorden. Om längden ( $L$ ) på pålen är känd kan sedan ljudhastigheten beräknas som:

$$V_{P\_1D} = 2L\Delta f \quad (1)$$

Denna ljudhastighet anses vara den endimensionella ljudhastigheten vid låga frekvenser i en lång pelare eller stav ( $V_{P\_1D}$ ) vilken är direkt kopplad till pålens dynamiska E-modul genom:



$$E_d = \rho V_{P\_1D}^2 \quad (2)$$

För ett givet material kan sedan den dynamiska E-modulen (eller  $V_{P\_1D}$ ) empiriskt relateras till materialets tryckhållfasthet genom laboratorieförsök på samma material (Ryden et al. 2006). Seismikmätningar har visat sig fungera väl på homogena hela betongpålar och används internationellt för att kvalitetsvärdera grävpålar (Rausche et al. 1992; ASTM D 5882 – 07; BTS 2011/08).

## 4.2 Dämpning i jetpelare

Den stora utmaningen och svårigheten med att använda seismikmätningar på jetpelare beror på att jetpelare oftast inte är lika homogena och starka (styva) som en betongpåle. Den lägre ljudhastigheten i en jetpelare gör att relativt sett mer energi ”läcker” över från pålen till jorden (Liao och Roesset, 1997). Denna spridning av energi (refraktion) benämns ofta friktion mellan jord och påle i pålbranschen. För en given längd på pålen gör en större diameter att relativt sett mer energi ”läcker” över från påle till jord. Detta läckage av energi gör att reflektionen (ekot) från botten av pålen till slut inte går att registrera på toppen av pålen. Amplituden från ekot är då inte större än den naturliga brusnivån i signalen i tidsdomän. Om inget eko från botten av pålen kan identifieras går det inte att utvärdera pålens egenskaper direkt i tidsdomän.

För betongpålar uttrycks ofta maximalt undersökningsdjup med kvoten mellan längd ( $L$ ) och diameter ( $D$ ).  $L/D$  kvoten anses ligga runt 20-50 beroende på skjuvvåghastigheten ( $V_s$ ) i jorden (BTS 2011/08, Breysse, D., 2012), Figur 1. För en betongpåle med diameter 0.3 m anses alltså 6 m ( $0.3 \cdot 20$ ) vara ett maximalt undersökningsdjup i mycket fast jord. Den relativa skillnaden i styvhet mellan påle och jord avgör hur mycket energi som läcker ut i jorden. En hög relativ skillnad i styvhet (betongpåle i lös lera) ger gynnsamma provningsförhållande eftersom relativt lite dynamisk energi läcker ut i jorden. Motsvarande maximalt djup för en betongpåle med diametern 0.3 m blir därför betydligt längre i mycket lös jord (ca  $0.3 \cdot 50 = 15$  m). Eftersom cementstabiliserad jord (jetpelare) har lägre styvhet (och lägre seismisk hastighet) jämfört med betong blir det maximala undersökningsdjupet mindre för jetpelare. Den största energiförlusten sker i kopplingen mellan jetpelare och jord och kan för givna materialegenskaper beräknas numeriskt med vågekvationen för en oändligt lång inbäddad stav (Disperse 2001).

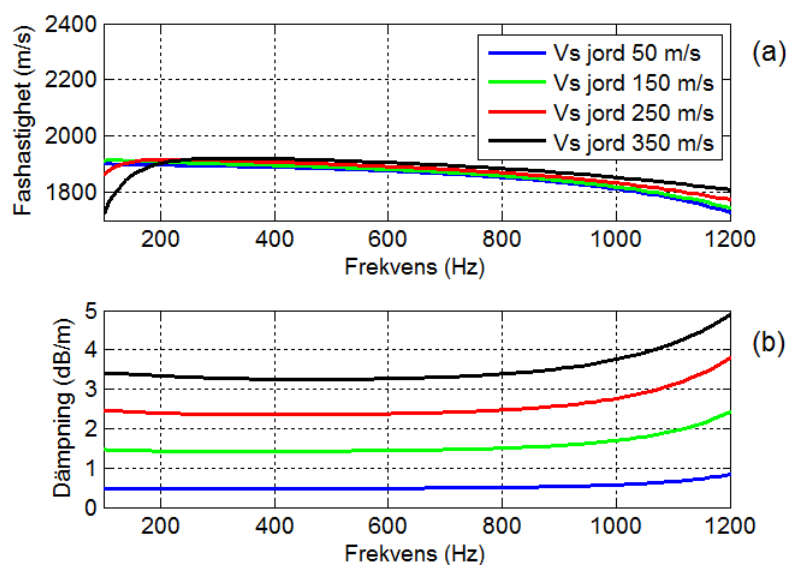
## 4.3 Numerisk simulering av vågutbredning i jetpelare – 1D

För att uppskatta dämpningen vid seismiska mätningar i en jetpelare installerad i jord har teoretiska dispersionkurvor för den första longitudinella moden ( $L(0,1)$ ) i en oändligt lång endimensionell homogen inbäddad stav beräknats (Disperse 2001). Materialegenskaper i ”jetpelaren” och ”jorden” finns angivna i Tabell 1. Densitet och Poisson’s tal har i detta fall marginell betydelse för resultaten. Beräkningarna visar att den longitudinella fashastigheten (och grupphastighet) i jetpelaren påverkas relativt lite av omkringliggande jords styvhet vid de frekvenser som alstras vid provning med hammare eller handslägga (100-1200 Hz), Figur 4a. Dämpningen påverkas däremot mycket av styvheten på jorden, Figur 4b. I relativt styv jord

( $V_s=300$  m/s) blir dämpningen på grund av läckage (spridning) till jorden ca 3 dB/m vilket till exempel innebär att amplituden på bottenknot från en 5 m lång jetpelare bara har 3 % (-30 dB) av den ursprungliga amplituden från hammarslaget då vågen når tillbaka till pelarens topp. Motsvarande värde för en jetpelare i mycket lös lera ( $V_s=50$  m/s) blir dock hela 54 % (-5dB). Som jämförelse, ligger den beräknade dämpningen i dB/m i Tabell 1 ca dubbelt så högt för en jetpelare jämfört med en betongpelare med samma diameter. Dämpningen i Figur 4b avser endast läckage i mantelytan från påle till jord. I verkligheten tillkommer materialdämpning i jetpelaren samt energiförluster vid reflektionen i botten på pelaren vilka inte inkluderats i denna förhållandevis enkla 1D beräkning.

**Tabell 1. Materialegenskaper i jetpelare och jord för teoretisk 1D beräkning av dämpning i jetpelare på grund av läckage till omslutande jord.**

	$V_s$ (m/s)	$V_{P\_1D}$ (m/s)	Poisson's tal	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Diameter (m)	E-modul (MPa)
<b>Jetpelare</b>	1200	1897	0.25	2100	0.8	7560
<b>Jord</b>	50-350	82-575	0.35	1900	$\infty$	13-628

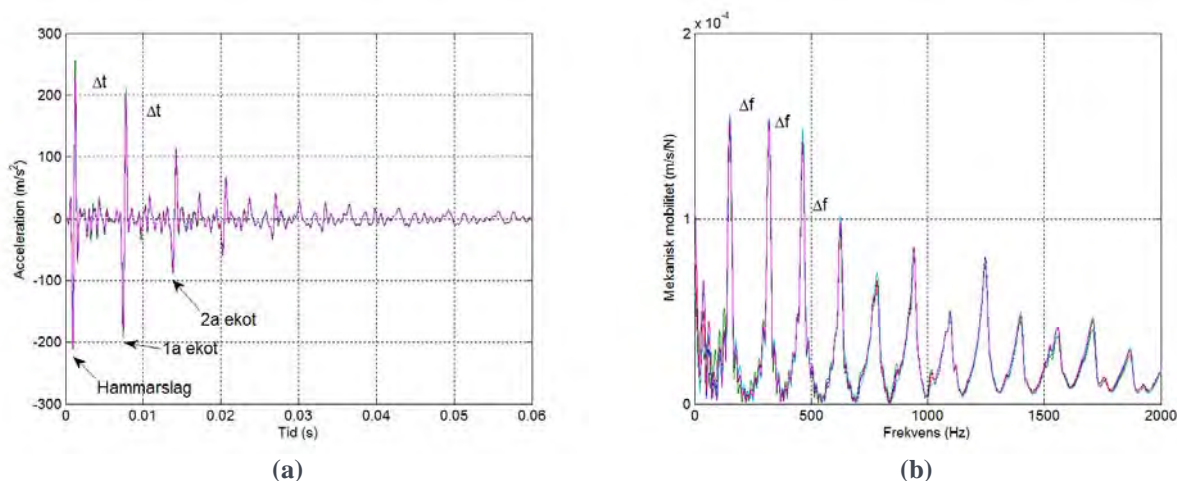


**Figur 4. (a) Fashastighet och (b) dämpning för den fundamentala longitudinella moden (L(0,1)) i en påle med omkringliggande jord med varierande skjuvstyvhet i jorden.**

#### 4.4 Exempel från mätning på SP1 betongpåle

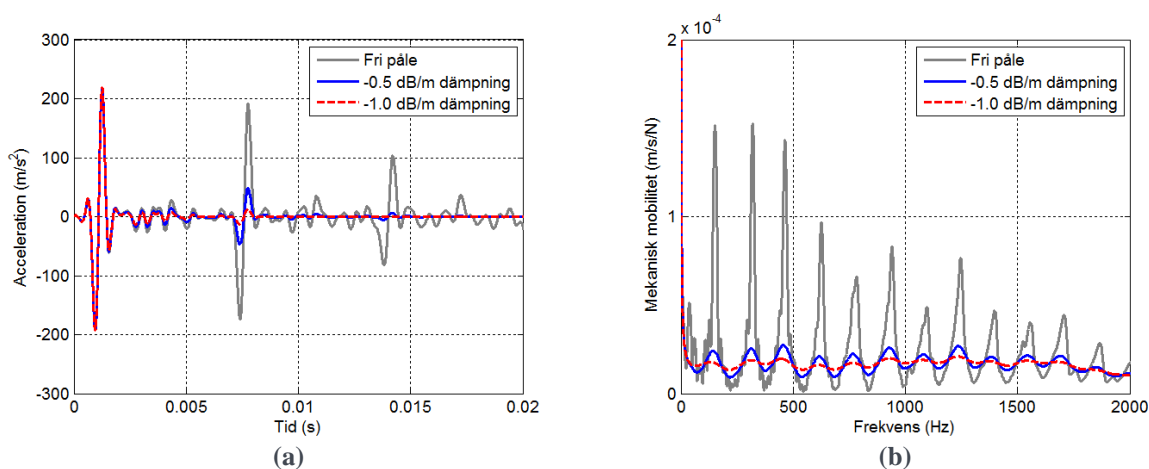
Resultatet från en seismisk mätning på en prefabricerad SP1 betongpåle redovisas här för att beskriva utvärderingen i frekvensdomän och samtidigt illustrera problemet med dämpning. Figur 5 visar ett exempel på uppmätt respons (acceleration) från en seismikmätning på en 12.3 m lång oinstallerad (nästan helt fria randvillkor) betongpåle (SP1 235x235 mm).  $V_{P\_1D}$  kan utvärderas

direkt från tidsskillnaden ( $\Delta t$ ) mellan synliga eko i rådata ( $V_{P\_ID}=2L/\Delta t=24.6/0.0066=3727$  m/s), Figur 5a. Alternativt kan hastigheten utvärderad i frekvensdomän från frekvensskillnaden ( $\Delta f$ ) mellan longitudinella resonansfrekvenser ( $V_{P\_ID}=2L\Delta f=24.6*152=3739$  m/s Ekvation 1).  $V_{P\_ID}$  blir i båda fallen ca 3735 m/s. I detta fall syns ekon från botten av pålen och resulterande resonansfrekvenser tydligt på grund av att pålen är homogen, hel, och ligger nästan helt fritt på marken. En stor del av energin från hammarslaget stannar i stort sett kvar i pålen innan den dämpas ut av inre materialdämpning i pålen.



**Figur 5. Exempel på uppmätta signaler (5 slag) på en oinstallerad (fri) 12.3 m lång betongpåle i (a) tidsdomän och (b) frekvensdomän.**

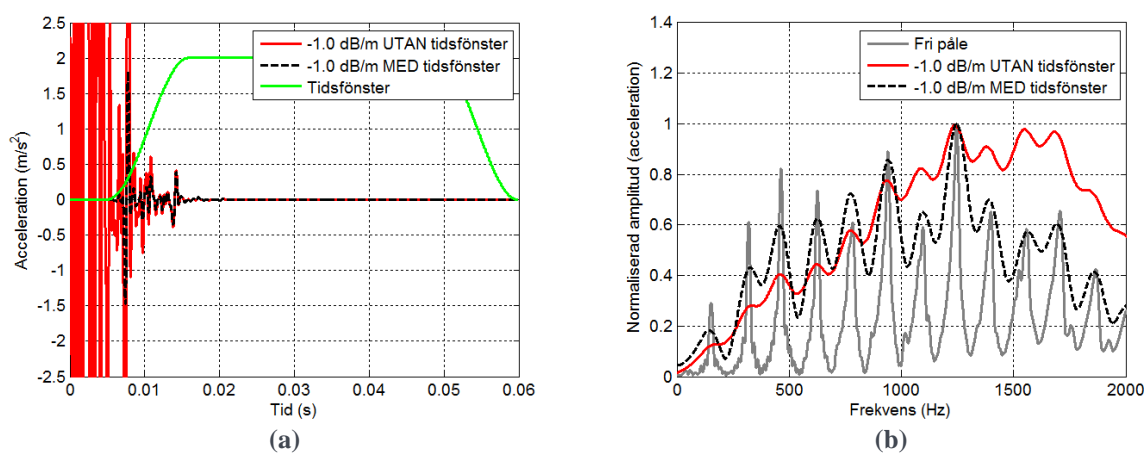
För att illustrera problemet med dämpning har en artificiell dämpning lagts till genom att reducera uppmätt amplitud (Figur 5a) med -0.5 och -1.0 dB/m (motsvarar 1.87 dB/ms och 3.74 dB/ms vid  $V_{P\_ID}=3700$  m/s). Heldragen blå och streckad röd linje i Figur 6 visar hur snabbt ekon i tidsdomän och piken i frekvensdomän försvinner med ökande dämpning av signalen i pålen.



**Figur 6. Exempel på uppmätta signaler (5 slag) på en oinstallerad (fri) 12.3 m lång betongpåle i (a) tidsdomän och (b) frekvensdomän.**

Figur 6b visar att det kan vara svårt att utvärdera frekvenskillnaden mellan pikarna ( $\Delta f$ ) efter att en realistisk dämpning lagts på den uppmätta signalen från Figur 5. För att kompensera för denna dämpning används traditionellt ofta en exponentiell förstärkning som funktion av tid vid utvärdering i tidsdomän (Rausche et al. 1992; ASTM D 5882 – 07). Detta innebär att den uppmätta signalen multipliceras med en förstärkningsfaktor som ökar som funktion av tid. I praktiken förstärks då också naturligt brus vilket gör att det ändå kan vara svårt att utvärdera signalen i både tids- och frekvensdomän.

Ett alternativ till den traditionella exponentiella förstärkningen som visat sig fungera bra för jetpelare i detta projekt är att istället ”klippa ut” en del av den uppmätta signalen med ett fönster i tidsdomän. Figur 7a visar ett exempel på ett sådant tidsfönster plottat med grön heldragen linje. Figur 7b visar ett vanligt amplitudspektrum från den 1.0 dB/m dämpade signalen i Figur 6 med något tydligare pikar (röd linje). Om den första delen av signalen som innehåller den initiala impulsen från hammaren filtreras bort (i tidsdomän genom multiplikation med ett tidsfönster se grön linje i Figur 7a) blir topparna tydligare (svart streckad linje i Figur 7b). Den direkta träffen från hammaren innehåller ett brett frekvensspektrum som stör identifieringen av de toppar som uppstår efter att vågorna påverkats av pålens strukturella egenskaper. Denna signalbehandling med tidsfönster kan ses som ett alternativ till den förstärkning som funktion av tid som ofta används vid utvärdering av seismiska mätningar på pålar i tidsdomän.



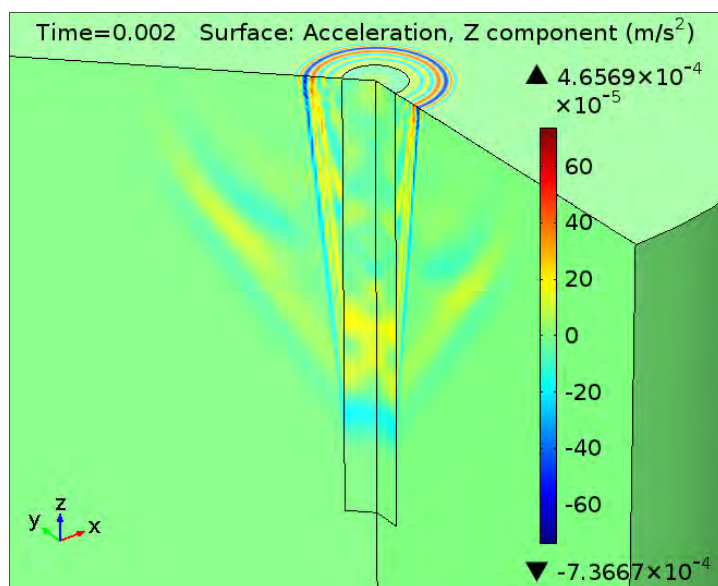
**Figur 7. Exempel på effekten av fönstring i tidsdomän på uppmätt respons vid 1.0 dB/m extra dämpning. (a) tidsdomän och (b) frekvensdomän.**

#### 4.5 Numerisk simulering av vågutbredning i jetpelare – 2D FEM

För att ytterligare verifiera resultaten från de enkla 1D modelleringarna och analys av data med det förslagna tidsfönstret har Finita Element Modelleringar (FEM) också utförts (Figur 8). Beräkningarna har gjorts för att simulera en verklig mätning på en jetpelare i jord (TP 10A från fältmätningarna). Indata till den 2D axialsymmetriska modellen finns redovisade i Tabell 2 nedan.

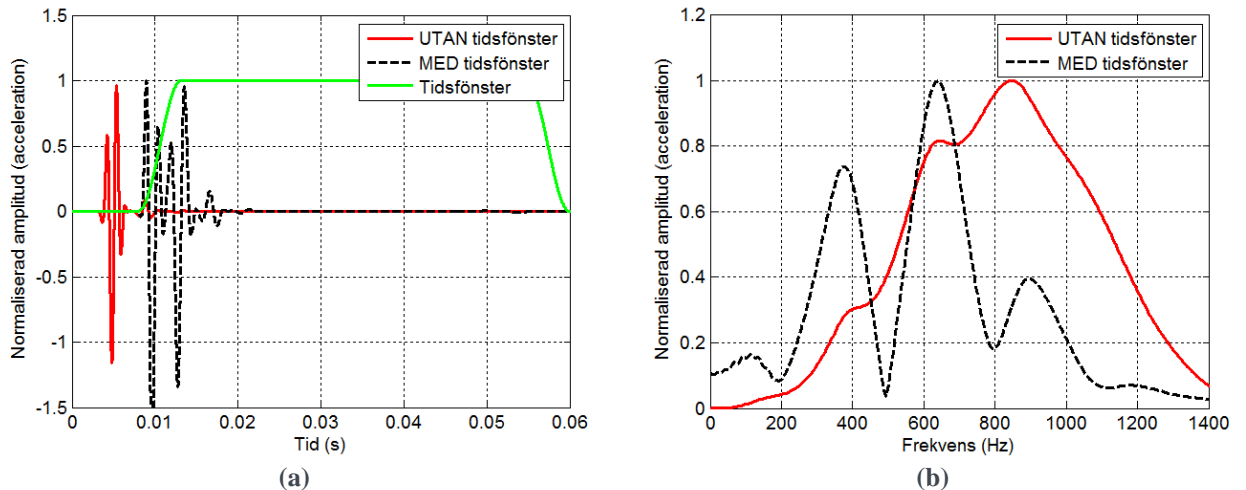
**Tabell 2. Indata till FEM beräkningar i 2D axialsymmetri.**

	$V_S$ (m/s)	$V_{P\_1D}$ (m/s)	Poisson's tal	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Radie (m)	Djup (m)	E-modul (MPa)
<b>Jetpelare</b>	1500	2372	0.25	2100	0.4	4.4	11813
<b>Jord</b>	200	322	0.30	1800	5	4.4	187
<b>Berg</b>	1800	2846	0.25	2400	5	3.6	19440



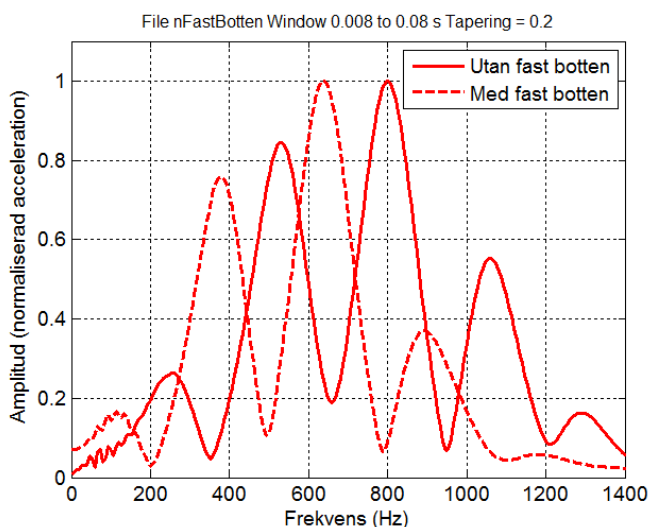
**Figur 8. Axialsymmetrisk FEM simulering av en jetpelare i jord. Seismiska vågor i pelaren dämpas kraftigt på grund av att energin i pelaren läcker (refrakterar) ut i jorden.**

Figur 9 visar simulerad respons från en impuls på toppen av pelaren med och utan det föreslagna tidsfönstret. Utan tidsfönster (röd linje i Figur 9a och 9b) domineras den simulerade responsen av pulsen (vibrationskällan) på toppen av pelaren i både tids- och frekvensdomän. Efter att denna första del av signalen har dämpats med hjälp av multiplikation med ett tidsfönster (grön linje) blir ekon i tidsdomän och resonstoppar i frekvensdomän relativt sett tydligare (svart streckad linje i Figur 9). I det svarta streckade spektrumet (fönstrad signal) syns tydliga pïkar med ett inbördes avstånd  $\Delta f=265$  Hz. Detta avstånd ger en teoretisk kompressionsvågshastighet  $V_{P\_1D}=2332$  m/s vilket ligger nära den teoretiska hastigheten  $V_{P\_1D}=2372$  m/s från Tabell 2.



**Figur 9. Resultat från FEM simulering av jetpelare i jord. Avståndet mellan frekvenstopparna i den fönstrade signalen (röd) är 265 Hz.**

FEM simuleringar gör det möjligt att studera den teoretiska inverkan av olika parametrar på resultatet. Indata i Tabell 2 valdes för att simulera mätningarna på den första testpålen som tillverkades i fält (TP 10A). Denna påle är 4.4 m lång och uppmätt  $\Delta f$  är 265 Hz (se kapitel 5 nedan). Det exakta läget på olika frekvenstoppar från simuleringen är dock lite annorlunda jämfört med uppmätt respons (Figur 12). Skillnaden beror sannolikt på olika randvillkor längs pelaren i simuleringen och i verkligheten. Figur 10 visar effekten av att ta bort det nedre styva lagret (berget) som pelaren antas ha kontakt med. I denna andra simulering har det nedre styva lagret ersatts av ett lager med samma egenskaper som jorden i Tabell 2. Resultatet visar att frekvenstopparna flyttar sig markant vilket stämmer väl överens med teorin från kapitel 4.1. Skillnaden mellan frekvenstopparna  $\Delta f$  förblir dock den samma oavsett pelarens randvillkor i botten på pelaren.



**Figur 10. Resultat från FEM simulering av jetpelare i jord med och utan fast botten (berg).**



FEM simuleringarna bekräftar den höga dämpningen som observerats i de enklare numeriska 1D beräkningarna (kapitel 4.3). Resultaten visar också att effekten av dämpningen kan minimeras med hjälp av fönstring av signalen i tidsdomän. Med denna metod går det teoretiskt att utvärdera ett korrekt  $\Delta f$  vilket med hjälp av pelarens längd kan användas för att uppskatta ett medelvärde på ljudhastigheten längs med hela pelaren ( $V_{P\_1D}$ ).

## 5. FÄLTFÖRSÖK MED SEISMIKMÄTNINGAR PÅ JETPELARE

### 5.1 Tillverkning av jetpelare i fält

Jetpelare i full skala har tillverkats i Hässleholm under sommaren och hösten 2013. Pelarna tillverkades med en MDT borrar specialutrustad för jet pelare (MDT-180JG), se Figur 11. Pelarna tillverkades med en teoretisk diameter på 800 mm med 450 bars tryck. Cementsuspensionen blandades för att med god säkerhet uppnå en minsta teoretisk tryckhållfasthet på 4 MPa ( $V_{P\_1D}$  ca 2770 m/s).



**Figur 11. Tillverkning av testpelare i fält.**

### 5.2 Resultat från oförstörande seismikmätningar i fält

Geologin på provområdet består av ca 3-9 m fast sand/grus med inslag av torv på ca 3 m djup. Marknivån är relativt plan (+40 m till +42 m) men bergnivån varierar kraftigt över området och det finns inslag av stora block i sanden. Grundvattennivån är uppmätt till +38.5 m vilket motsvara ca 2 till 3 m djup under markytan.

Seismiska mätningar har utförts på flera olika jetpelare och resultaten har sammanställts i Tabell 3 nedan. Längden på varje pelare registreras under produktionen och finns angiven i Tabell 3. Denna längd tillsammans med uppmätt  $\Delta f$  har använts för att beräkna en genomsnittlig ljudhastighet i varje pelare (Ekvation 1). Foton från mätningarna och uppmätta spektrum finns redovisade i kapitel 5.2.1 till 5.2.6 nedan.

Alla mätningar är utförda med en seismisk accelerometer från PCB Piezotronics (PCB 393A03) och ett datainsamlingssystem från National Instruments (NI-USB 6251) inklusive signalkonditionering (PCB 480B21). Accelerometern har tryckts mot toppen på pelaren med lite fett som extra koppling mellan givare och pelare. Flera olika hammare har provats i fält och bäst resultat erhöles med en normalstor hammare (PCB 086D05) och en lite större handslägga (PCB 086D20). På varje pelare har 20 st 40 ms långa signaler mätts upp med en samplingshastighet på 100 kS/s. Signalerna från både hammare och accelerometer har sparats automatiskt efter varje slag på en fältdator (Panasonic Toughbook).

**Tabell 3. Sammanställning av resultat från testade jetpelare i Hässleholm.**

Jetpelare	Diameter (m)	Djup (m)	Uppmätt $\Delta f$ (Hz)	Beräknad $V_{P\_ID}$ (m/s)	Rådatafil
TP 10.A	0.8	4.40	265	2332	130502a10
TP 20.A	1.0	3.54	350	2478	130502a4
TP 20.C	0.8	3.66	250	1830	130502a15
183	0.8	8.61	160	2755	130702a8
300	0.8	5.05	270	2727	130702a15
301	0.8	3.40	250	1700	130625a32

### 5.2.1 Resultat från seismikmätningar på pelare 10A

Figur 12 visar mätutrustningen vid jetpelare 10A. Data samlades in med och utan slag på plastplatta (vit platta på bilden) för att prova ut bästa möjliga mätuppställning. Resultaten med och utan platta har plottats i Figur 13 och 14 nedan. Båda mätningarna ger ett uppmätt  $\Delta f$  på 265 Hz (mellan 165 Hz och 430 Hz i Figur 13 och 14) vilket med 4.4 m längd på pelaren motsvara en genomsnittlig hastighet på  $V_{P\_ID}=2332$  m/s i hela pelaren. Slag på platta ger en något mer högfrekvent respons med ytterligare frekvenstoppar över 400 Hz vilket är positivt.

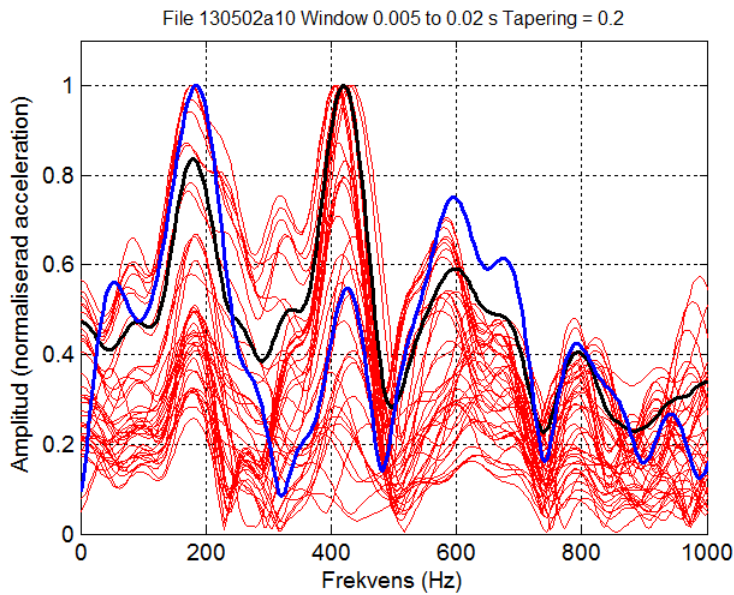
I figurerna motsvarar tunna röda spektrum varje enskilt slag. Blå linje motsvarar spektrumet från medelvärdet (i tidsdomän) av alla individuella slag. Svart linje motsvarar medelvärdet i frekvensdomän från alla individuella spektrum. Amplituden i alla spektrum har normaliserats eftersom det bara är  $\Delta f$  som utvärderas och verklig amplitud är inte relevant. I regel ger båda metoderna för medelvärdesbildning liknande resultat. Medelvärdesbildning i frekvensdomän kan dock vara något mer tillförlitligt om variationen på uppmätta signaler är stor. Alla spektrum har beräknats med det föreslagna tidsfönstret (se Figur 7) från 5 till 20 ms efter trigger tillfället ( $t=0$  s).

Den uppmätta ljudhastigheten i jetpelaren på  $V_{P\_ID}=2332$  m/s indikerar att pelaren är av relativt god kvalitet men inte riktigt når upp till målet på  $V_{P\_ID}=2770$  m/s (motsvarande 4 MPa tryckhållfasthet). Dokumenteringen av borrhöret från pelare 10.A visar också att det bara gick att få upp en någorlunda sammanhängande kärna ner till ca 2.2 m djup (Appendix A). I detta fallet ger seismikmätningen information om pelarens kvalitet som inte går att få ut från traditionell provning eftersom borrhöret inte ger information om hur svagt hela pelarens tvärsnitt är vid djupet 2.2 m. Seismikmätningen indikerar däremot att pelaren håller ihop hela vägen till 4.4 m djup med en relativt bra uppmätt genomsnittlig hastighet ( $V_{P\_ID}=2332$  m/s).

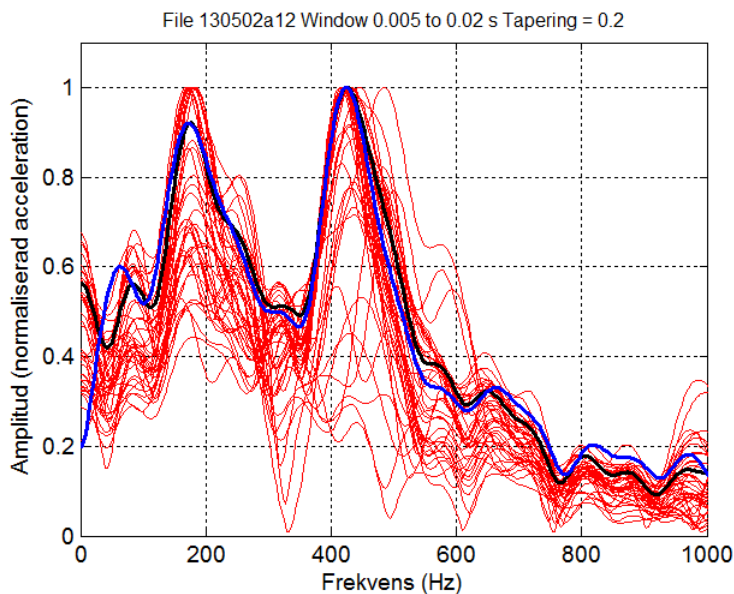
Laboratiormätningar på en av de bästa delarna från 10A gav en mycket hög hastighet  $V_{P\_ID}=3155$  m/s (Tabell 5) och tryckhållfasthet 13.1 MPa (Tabell 4) vilket indikerar relativt stora variationer i jetpelarens egenskaper.



**Figur 12. Seismisk mätning i fält på jetpelare nummer 10A.**



**Figur 13. Seismisk mätning i fält på jetpelare nummer 10A. Slag på plastplatta.**



**Figur 14. Seismisk mätning i fält på jetpelare nummer 10A. Slag direkt på jetpelare utan plastplatta.**

### 5.2.2 Resultat från seismikmätningar på pelare 20A

Jetpelare 20A fick en något större diameter på 1.0 m med en längd på 3.54 m. Seismikmätningar utfördes på samma sätt som ovan och gav  $\Delta f = 350$  Hz (mellan 700 Hz och 1050 Hz i Figur 16) vilket motsvarar  $V_{P\_ID} = 2478$  m/s. Denna pelare visar därför en något högre (bättre) hastighet jämfört med pelare 10A ovan men når inte riktigt upp till målet på  $V_{P\_ID} = 2770$  m/s. Foton från borrhöret i Appendix A indikerar en liknande svaghet vid samma djup (2.2 m) som för pelare

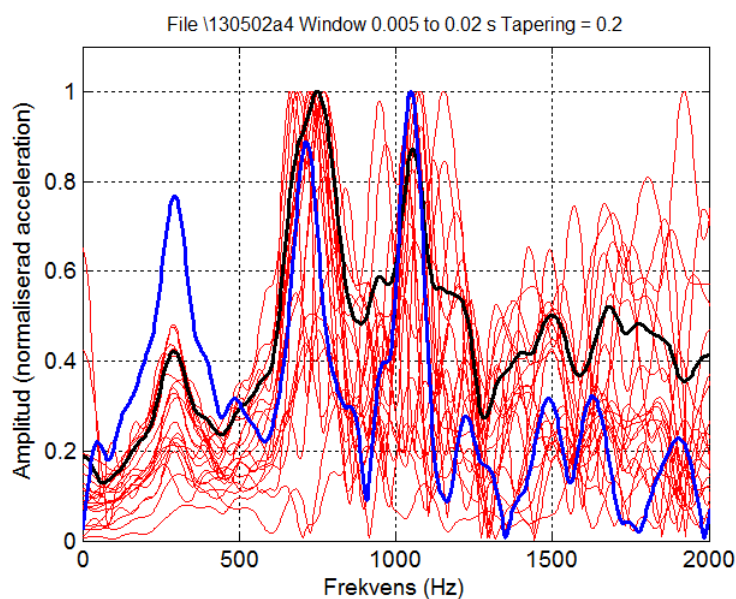


10A ovan. Den seismiska mätningen indikerar dock att pelaren är tillräckligt homogen och styv för att resonans i hela pelaren ska uppstå. Om pelaren varit helt defekt vid 2.2 m djup hade frekvenspikarna och avståndet mellan moderna varit cirka dubbelt så stort (ekvation 1) för att få en rimlig ljudhastighet i det stabiliserade materialet. Även denna jetpelare indikerar därför att seismikmätningarna kan ge en kvalitetsvärdering som inte går att få med traditionell kärnprovtagning i det spröda stabiliserade materialet.

Laboratiormätningar på en av de bästa delarna från 20C gav en hög hållfasthet på 8.2 MPa (Tabell 4) vilket indikerar stora variationer i jetpelarens egenskaper.



**Figur 15. Seismiskmätning i fält på jetpelare nummer 20A.**



**Figur 16. Resultat från seismiskmätning i fält på jetpelare nummer 20A.**

### 5.2.3 Resultat från seismikmätningar på pelare 20C

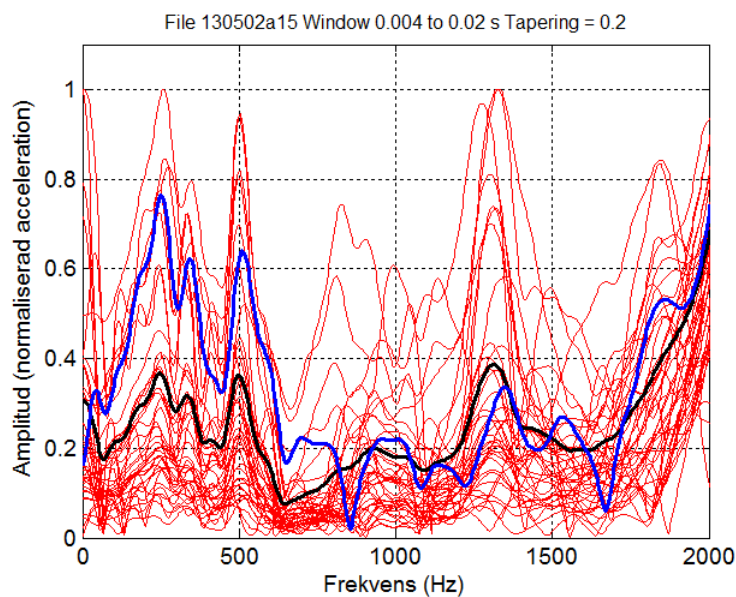
Jetpelare 20C med en längd på 3.66 m (D=800 mm) undersöktes med seismiska mätningar på samma sätt som ovan och gav  $\Delta f = 250$  Hz (mellan 250 Hz och 500 Hz i Figur 18) vilket motsvarar  $V_{P\_ID} = 1830$  m/s. Denna pelare visar därför en något lägre (sämre) hastighet jämfört med pelare 10A och 20A ovan och når inte upp till målet på  $V_{P\_ID} = 2770$  m/s. Foton från borrhärnan i Appendix A indikerar en liknande svaghet strax under 2.0 m som också identifierats för pelare 10A och 20A ovan.

Laboratoriemätningar på en av de bästa delarna från 20C gav en mycket hög hastighet  $V_{P\_ID} = 3191$  m/s vilket indikerar stora variationer i jetpelarens egenskaper.



**Figur 17. Seismiskmätning i fält på jetpelare nummer 20C.**





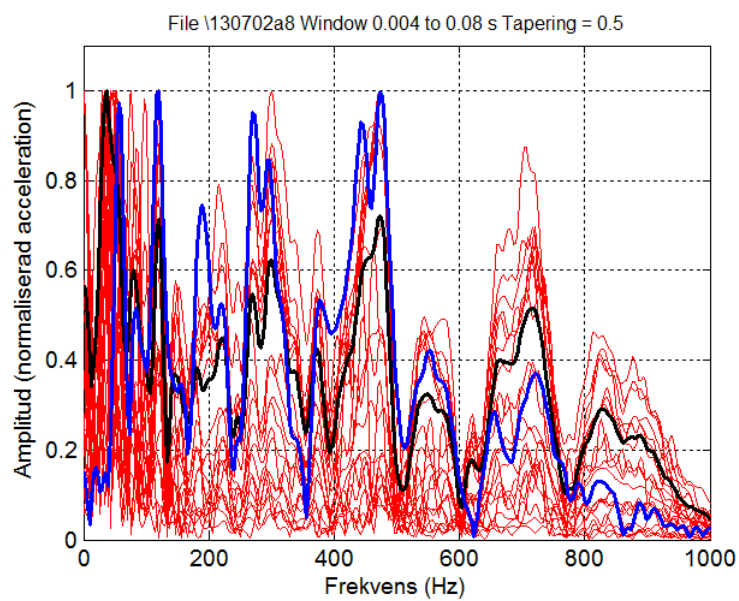
**Figur 18. Resultat från seismiskmätning i fält på jetpelare nummer 20C.**

#### 5.2.4 Resultat från seismikmätningar på pelare P183

Jetpelare P183 (L=8.61 m och D=800 mm) utfördes i kombination med ytstabilisering och är tillverkad genom att först borra genom det ytstabiliserade lagret (Figur 19). Resultaten från jetpelare P183 syns i Figur 20 och gav  $\Delta f = 160$  Hz (mellan 300 Hz och 460 Hz i Figur 20) vilket motsvarar  $V_{P\_ID} = 2755$  Hz. Denna jetpelare visar därmed bättre kvalitet och når i princip upp till målet på  $V_{P\_ID} = 2770$  m/s (motsvarande 4 MPa). Resultatet från seismikmätningen bekräftas av bilderna på borrhärnan från P183 (Appendix A) vilket visar betydligt bättre kvalitet jämför med jetpelare 10A, 20A och 20C. Borrhärnan från jetpelare P183 har en jämnare och bättre kvalitet hela vägen ner till 8.61 m djup även om några sprickor från själva provtagningen syns i bilderna.



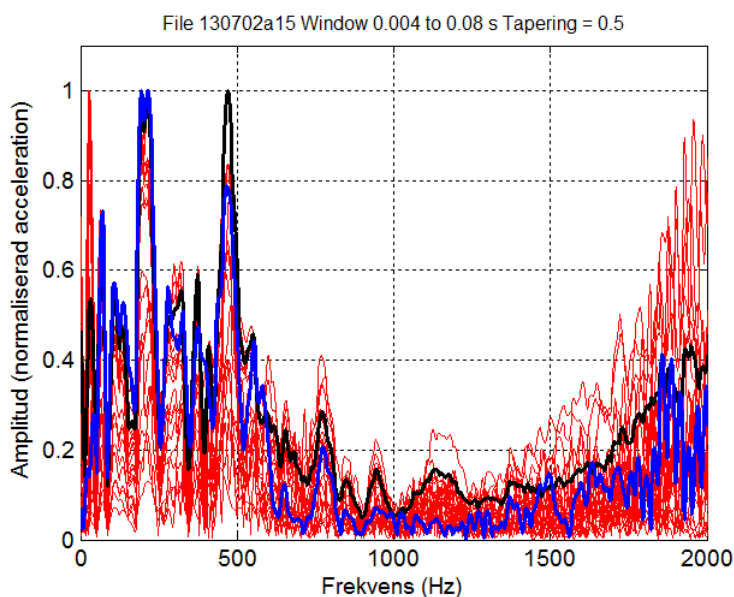
**Figur 19. Seismiskmätning i fält på jetpelare nummer P183.**



**Figur 20. Resultat från seismiskmätning i fält på jetpelare nummer P183.**

### 5.2.5 Resultat från seismikmätningar på pelare P300

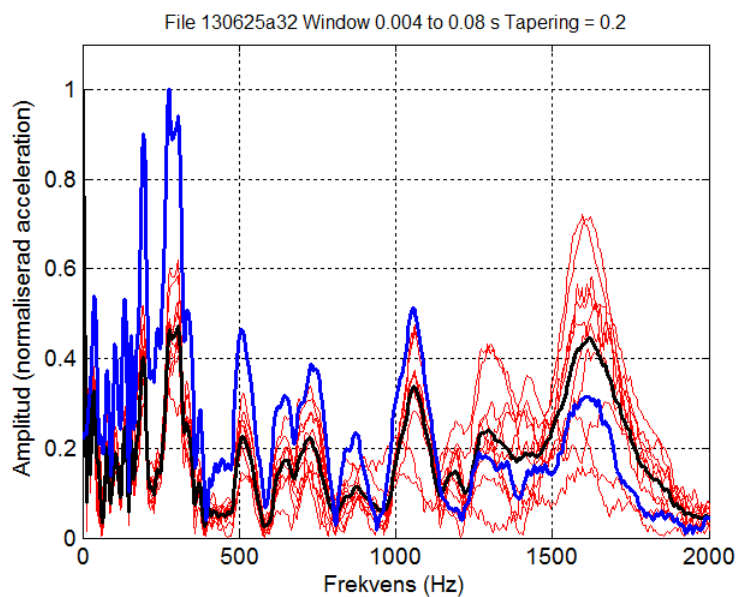
Jetpelare P300 (L=5.05 m och D=800 mm) tillverkades också i kombination med ett ytstabiliserat lager. Seismikmätningarna från toppen av pelaren gav  $\Delta f = 270$  Hz (mellan 220 Hz och 490 Hz i Figur 21) vilket motsvarar  $V_{P\_ID} = 2727$  m/s (Figur 21). Borrkärnan visar på bra kvalitet med en mindre defekt runt 2.6 m djup (Appendix A). Tryckhållfastheten på ett prov från 1.8 m djup är uppmätt till 12.9 MPa (Tabell 4).



**Figur 21. Resultat från seismikmätning i fält på jetpelare nummer P300.**

### 5.2.6 Resultat från seismikmätningar på pelare P301

Jetpelare P301 (L=3.40 m och D=800 mm) tillverkades också i kombination med ett ytstabiliserat lager. Seismikmätningarna från toppen av pelaren gav  $\Delta f = 250$  Hz (mellan 250 Hz, 500 Hz, 750 Hz i Figur 22) vilket motsvarar en relativt låg hastighet  $V_{P\_ID} = 1700$  m/s (Figur 22). Borrkärnan visar sprickor som troligen uppkommit vid själva provtagningen (Appendix A). Tryckhållfastheten och densiteten på ett prov från 0.6 m djup är uppmätt till 3.3 MPa respektive 1480 vilket är betydligt lägre jämfört med övriga prover (Tabell 4).



**Figur 22. Resultat från seismiskmätning i fält på jetpelare nummer P301.**

### 5.3 Resultat från borrning och framschaktning av jetpelare i fält

De första jetpelarna som tillverkades och undersöktes med seismik och kärnbörning schaktades även fram för vidare inspektion. Figur 23 nedan visar delar av pelare 10A och 20A. På grund av pelarnas vikt och cementstabiliserade materialets spröda karaktär gick de flesta pelarna av vid den identifierade svagheten på ca 2 m djup. Den teoretiska diametern på 0.8 m och 1.0 m visade sig dock stämma bra med verklig diameter även om pelarna inte är perfekt cirkulära.



**Figur 23. Framschaktade delar från pelare 10A och 20A.**

## 5.4 Mätning på borrhärnor

Tryckhållfastheten har mätts upp på delar av de uppborrade kärnorna (SS-EN 12390-3:2009/AC:2011). Positioner och/eller proven syns i Appendix A för pelare P183, P300, och P301. Tabell 4 visar uppmätt densitet och tryckhållfasthet på provade kärnor. Uppmätt hållfasthet antas vara representativ för de bästa delarna av jetpelarna eftersom det bara var dessa delar som kunde sågas ut med rätt diameter och längd.

**Tabell 4. Resultat från enaxliga tryckförsök på prover från borrhärnor**

Prov från pelare ( $L/D=1.0$ )	Ålder (dygn)	Tryckhållfasthet (MPa)	Densitet ( $\text{kg/m}^3$ )
P10A	13	13.1	2120
P10B	13	15.2	2220
P20A	13	8.2	2140
P183	28	7.4	2120
P300	28	12.9	2200
P301	28	3.3	1480

Seismisk kompressionsvågshastighet har också mätts upp på utvalda prover från borrhärnor. Hastigheten har mätts upp med resonansfrekvensmätningar (ASTM C215-08) vilka kräver att längden är minst dubbelt så lång som diametern. Uppmätta hastigheter antas vara representativa för de bästa delarna av jetpelarna. De sämsta delarna har spruckit under själva borrhärningen och hanteringen av kärnan vilket gör att dessa delar inte går att testa med denna metod. Resultaten med  $V_{P\_1D} > 3000$  m/s visar att verifierar att de starkaste delarna av pelarna (10A och 20C) vilka lämpar sig för utsågning till laborierprover har en högre hastighet jämfört med fältmätningarna vilka ger en medelhastigheten över hela pelarens djup.

**Tabell 5. Resultat från seismiska mätningar på prover från borrhärnor**

Prov från pelare ( $L/D=1.0$ )	Ålder (dygn)	Kompressionsvågshastighet $V_{P\_1D}$ (m/s)
P10A	50	3155
P20C	50	3191

## 6. SLUTSATSER

Resultaten från detta projekt indikerar att längden på jetpelare (med diameter  $D=800$  mm) som går att undersöka med oförstörande seismiska mätningar är begränsad till ca  $<8$  m i fast jord och till  $<16$  m i lös jord. Resultatet från en testad jetpelare är en genomsnittlig



kompressionsvågshastighet över hela pelarens djup. Om mätningarna inte visar något tydligt resultat i form av en konstant frekvensskillnad ( $\Delta f$ ) mellan pikar i uppmätt amplitudspektrum eller ger en orimlig uppmätt hastighet indikerar detta att pelaren är defekt eller att för lång för att kunna testas. Den största begränsningen/svårigheten med seismiska mätningar på jetpelare är den stora dämpningen längs med pelaren från läckage (refraktion) av energi till omkringliggande jord. Dämpningen gör att ekon från botten av pelaren försvinner i det naturliga bruset i uppmätta signaler. En förbättrad metod med fönstring av signalen i tidsdomän har föreslagits i denna rapport, vilken gör att något längre pelare kan undersökas. Arbetet har också belyst svårigheten att ta upp ostörda borrhövar på sprött cementstabiliserat material med relativt låg hållfasthet (~4 MPa). Resultaten visar i detta fall att traditionell provtagning med borrhövar kan överskatta hållfastheten i pelaren eftersom bara de bästa delarna av pelaren går att såga upp till rätt längder för fortsatta försök i laboratorium. Fler fältförsök rekommenderas för att verifiera de rekommenderade maximala längder som kan undersökas med oförstörande seismiska mätningar.

## LITTERATURFÖRTECKNING

ASTM Designation: D 5882 – 07, Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations, (ASTM, West Conshohocken, PA).

ASTM C215-08: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens (ASTM, West Conshohocken, PA).

Alheid, P., Axelsson, G., Berggren, B., Berglars, B., Hermansson, I., Sarvell, F., 2014, Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod, Praktiska råd och rekommendationer vid projektering och kontroll, Pålkommisionen, Rapport 106.

Breyse, D., 2012, Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR. ISBN 978-94-007-2735-9.

BTD 2011/08, Bridge Technical Direction, Testing of cast in-place concrete piles, RTA, UK, Bridge Technical Direction Manual

Croce, P., Flora, A., 2000, Analysis of single-fluid jet grouting, *Géotechnique*, Vol. 50, No. 6, pp. 739–48.

Dannewitz, N., Eriksson, H., Mattsson, H., Larsson, R., Holm, G., 2005, Seismisk kontrollmetod för KC-pelare, *Svensk Djupstabilisering (SD)*, Arbetsrapport 35, 2005-05.

Disperse, (2001). "A system for generating dispersion curves," User's manual version 2.0.11. Software version 2.0.15e. Guided Ultrasonics, London.

Liao, S.T., Roesset, J.M., 1997, Dynamic response of intact piles to impulse loads, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 21, pp. 255-275.

Mullins, G. (2010). Thermal integrity profiling of drilled shafts. *Deep Foundations Institute (DFI) Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 54-64.



Rausche, F., Likins, G., Kung, S.R., 1992, Pile integrity testing and analysis, Application of stress-wave theory to piles, Edited by Barends F.B.J, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 0826.

Ryden, N., Ekdahl, U., and Lindh, P., 2006, Quality Control of Cement Stabilised Soil Using Non-destructive Seismic Tests, Proceedings Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials, Stuttgart, Germany, August 3-4, DGZfP-Proceedings BB 102-CD, Lecture 34, pp 1-5.

Stark, T.D., Axtell, P.J., Lewis, J.R., Dillon, J.C., Empson, W.B., Topi, J.E., Walberg, F.C., 2009, Soil Inclusions in Jet Grout Columns, *Deep Foundations Institute (DFI) Journal*, Vol. 3 No. 1, pp. 44-55.

Tinoco, J., Correia, A.G., Cortez, P., 2011, Application of data mining techniques in the estimation of the uniaxial compressive strength of jet grouting columns over time, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 1257–1262

Özcan, E., Özdemir, A., 2008, Control with one-dimensional wave theory of discontinuities in bored piles and jet grout columns, Conference proceedings, 18th international geophysical congress & exhibition by UCTEA, Ekim, Turkey.

## APPENDIX A: FOTO FRÅN BORRKÄRNOR

### Geobor-S provtagning TP 10A, kärna 0-2.34 m, installerat djup 4.4 m



### Geobor-S provtagning TP 10B, kärna 0-1.25 m, installerat djup 3.05 m



**Geobor-S provtagning TP 20C , kärna 0-2.05 m, installerat djup 3.66 m**



**Geobor-S provtagning TP 20, kärna 0-2.50 m, installerat djup 3.54 m**

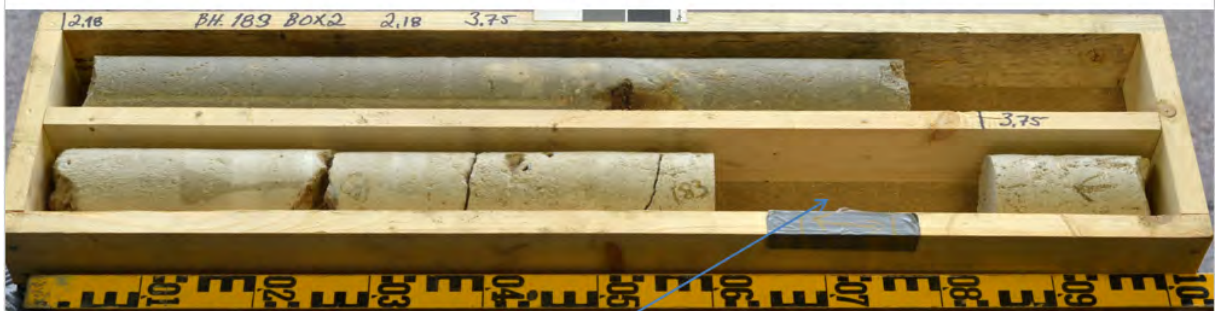




### Borrhål 183 box 1



### Borrhål 183 box 2



Uttaget prov för tryckförsök

### Borrhål 183 box 3



### Borrhål 183 box 4



# Borrhål 183 box 5





### Borrhål 300 box 1

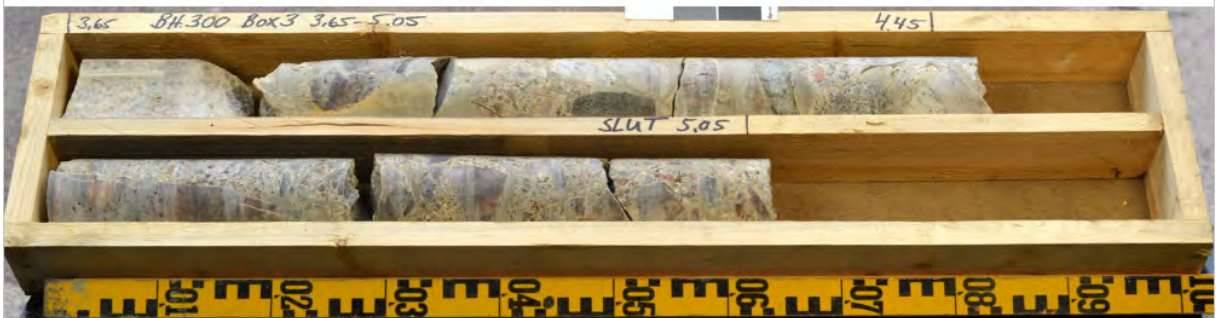


### Borrhål 300 box 2

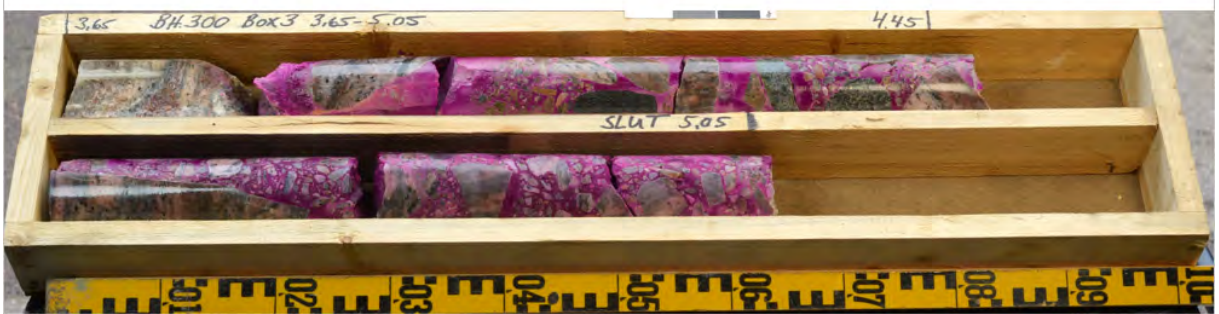
Uttaget prov för tryckförsök



### Borrhål 300 box 3



### Borrhål 300 box 3 infärgat (lila = cement)





### Borrhål 301 box 1



Uttaget prov för tryckförsök

### Borrhål 301 box 2



### Borrhål 301 box 3 infärgat (lila = cement)

