

INGENJÖRSVETENSKAPS AKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 89

**Integritetskontroll av pålar
med stötvågsmätning**

Pile Integrity Testing

Ingemar Hermansson

Jan Romell

Carl-John Grävare

Pris: 210:-
exkl. moms

Linköping 1992

ISSN 0347-1047

ISRN IVA/PAL/R--92/89--SE

PÅLKOMMISSIONEN

I september 1959 bildades Pålkommittén för pålslagning och pålbärighet. Efter några år införlivades kommittén med Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) och fick då sitt nuvarande namn IV A Pålkommissionen.

Pålkommissionen har till uppgift att bedriva forsknings- och informationsverksamhet inom pålningsområdet. Medlemmar är entreprenörer, tillverkare, konsulter, forskare, kommuner samt representanter från olika myndigheter. Till grund för kommissionens verksamhet ligger samhällets och branschens behov av forskning och information inom pålningsområdet. Verksamheten finansieras dels med årliga kostnadsandelar från medlemmarna, dels med forskningsanslag från Byggforskningsrådet (BFR).

Ytterligare upplysningar om Pålkommissionens verksamhet och medlemskap lämnas av kommissionens sekreterare Connie Olsson, Statens geotekniska institut, tel. 013-11 51 00.

Förord

I slutet av 1970-talet började stötvågsmätningstekniken användas i samband med påslagning i Sverige. Förutom att beräkna pålarnas bärformåga var syftet att kontrollera om pålarna var intakta - integritetskontroll - samt att jämföra effektiviteten hos olika hejartyper.

Intresset fokuserades till en början på att bestämma bärformågan hos pålar. En rad jämförelser mellan bärformåga, utvärderad från statiska provbelastningar och från stötvågsmätning, utfördes vid denna tid, både i och utanför Sverige.

Denna studie initierades i början av 1980-talet för att studera möjligheten att med hjälp av stötvågsmätningar bedöma integriteten hos slakarmerade betongpålar. Arbetet bedrevs till en början inom ramen för funktionskontrollgruppen i IVA:s Pålkommission. Under senare år har en separat arbetsgrupp, integritetsgruppen, slutfört arbetet som presenteras i föreliggande rapport.

Avsikten med rapporten är dels att ge en överblick över de metoder som för närvarande finns i Sverige för att kontrollera integritet hos slagna pålar, dels att呈现出 typexempel på mätresultat från olika typer av tvärsnittsförändringar eller ”skador”. (De beskrivna metoderna är tillämpbara även för grävpålar men den påltypen har inte testats inom ramen för denna studie.)

Ett stort tack framföres till följande företag som har ställt upp med påslagningsutrustning:

- Europile Pålteknik AB
- Hercules Grundläggning AB
- Pålgruppen Geomekan AB

För värdefulla synpunkter i samband med uppläggning av försöksserier samt på innehållet i rapporten tackar vi:

- Stig Bernander Con-Geo AB (f d avd.chef på Skanska Teknik AB)
- Lars Hellman Lars Hellman Byggråd AB
- Göran Holm Statens geotekniska institut

Göteborg i augusti 1992

Ingemar Hermansson, Jan Romell, Carl-John Grävare

Innehåll

	sid
Förord	3
Summary	6
Sammanfattning och slutsatser	8
1. Inledning	11
2. Teori	12
3. Testmetoder	14
3.1 Low-strain test (P.I.T. Pile Integrity Test)	
3.2 High-strain test	
3.3 Alternativa testmetoder	
4. Försöksomgång 1 (1983-1984)	16
4.1 Testpålar	
4.2 Testförfarande	
4.3 Resultat	
4.4 Utvärdering	
4.5 Slutsatser	
5. Försöksomgång 2 (1990-1991)	50
5.1 Testpålar	
5.2 Testförfarande	
5.3 Resultat	
5.4 Utvärdering - tolkning	
6. Litteratur	88

Summary

Stress-wave measurements during pile driving became routine in Sweden about ten years ago. When the technique was introduced in Sweden a great effort was expended to compare bearing capacity evaluated from stress-wave measurements with results from static load tests. Another application is integrity control of piles. In order to study if the method was applicable to the most common pile type in Sweden, regularly reinforced, precast piles, a research project was initialized by the Commission on Pile Research of the Royal Swedish Academy of Sciences.

This report describes the results from a test program. Piles with well defined cross sectional reductions, prepared during the casting, were subjected to low strain and high strain tests at different stages of the manufacturing and installation process.

The first part of the test program was carried out during 1983-1984. The piles were 235 mm x 235 mm and included relatively short (100 mm) reductions of the cross sections (along the pile axis). The reduction was respectively 1/6, 1/3 and 1/2 of the section. In addition "cracks" with a width of 4 and 10 mm respectively were tested.

The investigators low strain tested the piles while still in stock in the factory. High strain tests were carried out at a site. All test piles were fitted with a bayonet joint.

One by one they were connected to an already driven bottom section at a site to allow inspection of the damaged area during the test. The length of the bottom section was 12.3 m (including a rock shoe). The test sections were 11 m in length. The transducers were attached 1 m below the pile top which made the pile length below the gauges 22.3 m for all test piles.

The results showed that it was difficult to detect the prepared deficiencies, unless the stress wave produced a deformation at that point. A theoretical study revealed that the lack of a clear reflection was the result of superposition of reflections of an imperfect, long and rounded impact wave.

The second part of the test program, carried out 1990-1991, was performed in the same way as the first part. The cross sectional reductions included in the test varied between 0.5 m and 2.0 m in length and 1/6 and 1/3 of the area in extent. In addition three jointed piles were installed into the ground and tested with the low strain method in order to study the possibility to obtain reflections from a point below the joints.

The tests were similarly performed as for the first piles, but, in addition, the piles were tested with the low strain method two weeks and three months after the time of driving.

The low strain tests showed good agreement between calculated and real cross sectional variations especially after the piles had stayed in ground. An increase in the wave

speed in the concrete was observed from approximately 3500 m/s at the time of driving to 4000 m/s two weeks later.

Small reductions in area were difficult to detect by the high strain method, probably as a consequence of the superposition of reflection waves as described above. However, during the test blows, an increase in particle velocity and a decrease in force was noticed just before the $2L/c$ time (the double pile length divided by the wave speed, i.e. when the stress-wave was to return from the pile toe). This pile was driven into very soft clay and was possible to extract. At a point four metres above the pile toe the pile was bent (probably because of an inclining rock surface). On one side of the pile the concrete was crushed and on the opposite side severe cracks had occurred.

The investigators concluded that it is harder to detect an artificial, well defined cross sectional reduction than damage caused by crushing and cracking of concrete, at least with high strain tests.

Sammanfattning och slutsatser

Pålar med väldefinierade skador har undersökts med stötvågsmätning i två etapper, såväl med low-strain som med high-strain test. De engelska uttrycken syftar på den påkänninggrad som alstras i pålen av stötvågen. Stötvågen som studeras alstras i low-strain test med hjälp av en handslägga, medan en tung hejare används i high-strain test. I första fallet erhålls en accelerationssignal som integreras till partikelhastighet. I andra fallet studeras både kraft och partikelhastighet hos pålen.

Vid en jämförelse mellan resultat från low-strain test från första och andra etappen bör påpekas att både mätutrustning och utvärderingsmetoder utvecklats i mellantiden.

I första etappen testades pålar med sektionsminskningar med mycket liten utsträckning i pålens längdriktning. Dessa skador var svåra att upptäcka, speciellt om inte någon betydande deformation ägde rum i det aktuella snittet.

I andra etappen provades istället pålar med mer långsträckta sektionsminskningar för att försöka efterlikna mer realistiska skador. Dessutom provades tre pålar, försedda med olika skarvtyper, med low-strain test. Idén med försöket med olika skarvtyper var att studera om en stötvåg alstrad av en handslägga förmår tränga igenom en pålskarv.

Försöken visar att stötvågens längd och stiftid är av betydelse vid båda försöksmetoderna. En kort puls bör eftersträvas för att exempelvis inte reflexvågor från sektionsförändringar skall överlagras av den nedåtgående vågen och på så vis ”släcka ut” en skada. Denna omständighet bedöms vara den troliga orsaken till att bedömningen av betafaktorn, skadans omfattning, i den första etappen inte blev korrekt. En relativt stor areaminskning, som en tredjedel av tvärsnittet på 0,5 m längd, visade sig vara svår att upptäcka med high-strain test.

Low-strain test känsligast

Resultaten visar också att low-strain test är den känsligaste av de båda testmetoderna. För att exemplifiera hur känslig metoden är kan nämnas att en reflexvåg erhölls vid ett tillfälle från en spricka vid läget för en lyftöglå då pålarna testades i fabriken. Hanteringen inskränkte sig till lyft ur formarna.

Vid försöken på de olika skarvtyperna kan konstateras att signalen trängde igenom samtliga skarvar och att reflexvågor från respektive pålspets kunde registreras. Detta gäller emellertid inte generellt eftersom det vid mätningar i andra geotekniska förhållanden, till exempel drivning i hård friktionsjord, inte visat sig möjligt att upptäcka reflexvågor från någon punkt nedanför en skarv efter att pålen installerats.

Spricka och sektionsminskning

Ibland uppkommer frågeställningen om det är möjligt att avgöra om en partikelhastighetsökning kommer från en spricka eller en sektionsminskning. Det finns inget enty-

digt svar men en avfläkning av betong bör ge en reflexvåg som växer i storlek successivt och har längre utsträckning i tid än en reflexvåg från en spricka. Ett så kallat skarvglapp ger till exempel en väldigt plötslig men kortvarig reflexvåg. Stötvågens utseende kan studeras i fig 72, de två övre diagrammen vid tidpunkten 10 milliseunder. Viktigt att påpeka är också att en spricka kan utvecklas till en större skada om risk för vattensprängning föreligger. Jämför "Model Tests of Concrete Piles Driven in Water" [3] och Pålkommisionens Rapport nr 88 "Sprickbildning i betongpålar slagna i vatten eller i jordarter med hög permeabilitet" [4].

Krökt påle

En annan fråga som brukar ställas i samband med integritetskontroll är om man ur stötvågsmätningsresultat kan bedöma om en påle är svagt krökt på en längre sträcka, eventuellt hela längden. Detta förhållande kan exempelvis uppträda vid stödpålning mot släntberg. Någon systematisk undersökning har inte utförts i detta projekt men det kan nämnas att gånghastigheten i en uppsprucken påle är väsentligt lägre än i en osprucken. Om sålunda en låg gånghastighet uppmätes för en påle, jämfört med andra pålar slagna vid ungefär samma tidpunkt på samma arbetsplats, kan en förklaring vara att pålen är krökt och därmed uppsprucken. Under försöken med high-strain test i andra etappen användes skarvade pålar med försökpålarna som överpålar. Vid dessa försök uppvisade underpålen en mindre skada, krökning, som kunde utläsas ur kraft- och partikelhastighetskurvan (fig 75). Skadan bedömdes vara belägen cirka 4 meter ovanför pålspetsen. Då pålen var nedslagen i lös lera kunde den dras upp varvid en kraftig krökning kunde konstateras 4 m från pålspetsen. Trots detta förhållande uppvisade mätresultaten ca 1600 kN bärformåga enligt Case-metoden och en betafaktor på 0,84 (84% av tvärsnittet intakt). Normalt anses en påle vara godkänd om betafaktorn är minst 0,8. På ena sidan var pålen uppsprucken och på andra sidan var betongen krossad. Stor försiktighet bör iakttagas och ytterligare utredning utföras om motsvarande mätresultat erhålls. Det gäller speciellt för pålar som överför största delen av lasten via pålspetsen och inte är omgivna av fastare jord närmast pålspetsen. Särskilt viktigt är det att ta hänsyn till detta förhållande vid korta spetsbärande pålar samt om den aktuella pålen ingår i pålgrupp med relativt få pålar (2-4 st).

Förhållandet, att en påle som i princip bedöms vara godkänd vid en dynamisk provbelastning, trots att den är kraftigt utböjd och i vissa fall uppsprucken och krossad, föreslås bli föremål för ytterligare utredning.

Svårt att tolka

Sammanfattningsvis kan konstateras att tolkning av stötvågsdata ur synvinkeln integritetskontroll av pålar inte är någon lätt uppgift. Nämns kan att vid den fjärde internationella stötvågskonferensen i Haag i Holland 1992 arrangerades en tävling i tolkning av mätresultat från low-strain test. Tio pålar ingick i försöket. Av dessa var en helt oskadad. De övriga hade såväl sektionsminskningar som sektionsökningar, i några fall dessutom i kombination med sprickor. Ingen av deltagarna kunde med säkerhet ange pålen som ansågs vara utan defekter.

Större skador och defekter är relativt lätt att bestämma medan en mindre skada är

svår eller på gränsen till omöjlig att detektera. På grund av svårigheterna i kurvtolkning är det därför viktigt att operatören erhåller ett komplett bedömningsunderlag såsom bakgrundsdata om arbetsplatsen och om respektive påle. Viktig information är påelementens längd, eventuell kaplängd, slagningsdatum, geotekniska förhållanden, information om eventuell schakt i närheten av pålarna etcetera.

Viktigt för operatören att tänka på är att integritetsanalys från high-strain test bör utföras från mätningar utförda inom en kort tid efter slagningen. Om en påle ”växer fast” allt för mycket måste den ”väckas” så att stötvågen fortplantas hela vägen till spetsen och reflexer från tvärsnittsförändringar längs nedre delen av pålen kan erhållas. Beträffande low-strain test gäller å andra sidan att det är en fördel om mätningen utföres en viss tid efter slagningen. Det beror på att pålen är uppsprucken efter slagningen, vilket gör att signalen innehåller en hel del störningar. Efter en tid är dessa störningar mindre uttalade och signifikanta partikelhastighetsökningar är lättare att urskilja. Svårigheterna med integritetskontroll av skarvade pålar, med avseende på skador under skarven, måste också beaktas.

I olika delar av världen pågår en omfattande utveckling av utrustningar och metoder. Allteftersom teknikerna blir skickligare i kurvtolkning så kommer mätmetoden i än högre grad att vara ett värdefullt verktyg i kvalitetssäkringen av produkten.

1. Inledning

Under 1980-talet utvecklades stötvågsmätningstekniken till ett redskap som i dag används rutinmässigt i samband med pålning. Framför allt har metoden använts för att verifiera bärformågan för pålar med hög belastning ($>600\text{ kN}$) samt för att ur mätsresultatet fastställa slagningskriterier. Resultaten från en stötvågsmätning ger även möjlighet att upptäcka eventuella skador hos en påle, vilket brukar kallas "integritetskontroll".

Begreppet "integritetskontroll" är hämtat från engelskans "integrity control". Det innefattar kontroll av en påles lastkapacitet, d v s pålelementets förmåga att ta last efter slagningen med hänsyn till förekommande diskontinuiteter och får inte förväxlas med begreppet bärformåga som avser den omgivande jordens förmåga att uppta last.

Avsikten med integritetskontrolldelen är att bedöma om en påle är intakt. Följande diskontinuiteter kan därvid vara intressanta:

- Sprickor
- Skarvglapp och skarvfel
- Sektionsminskning (t ex avfläkning av betong för betongpålar, brott i svets för stålörspålar)
- Sektionsförändring på grävpålar
- Skadlig krokighet
- Buckling på stålörspålar

Rapporten är uppdelad i två delar. Den **första** avser provningar utförda under åren 1983 - 1984, men tidigare ej publicerade. Vid det tillfället studerades pålar med välvdefinierade sektionsminskningar ("skador") med mycket liten utsträckning längs pålen. Det visade sig att "skadorna" var svåra att upptäcka, speciellt om inte någon betydande deformation ägde rum i skadesnittet. Slutsatsen var att reflexvågor från övergång till mindre tvärsnitt och strax därefter till större tvärsnitt överlagrar varandra och gör det svårt att urskilja minskningen i tvärsnitt.

Resultaten gav anledning att undersöka pålar försedda med tvärsnittsminskningar med längre utsträckning för att simulera mer realistiska skador. Dessutom har både test- och utvärderings-metoder vidareutvecklats sedan 1984. Försök utfördes också på pålar försedda med olika skarvtyper för att studera skarvars inverkan på applicerad stötvåg. Den **andra** delen av rapporten omfattar sålunda kompletterande tester utförda 1990 - 1991.

2. Teori

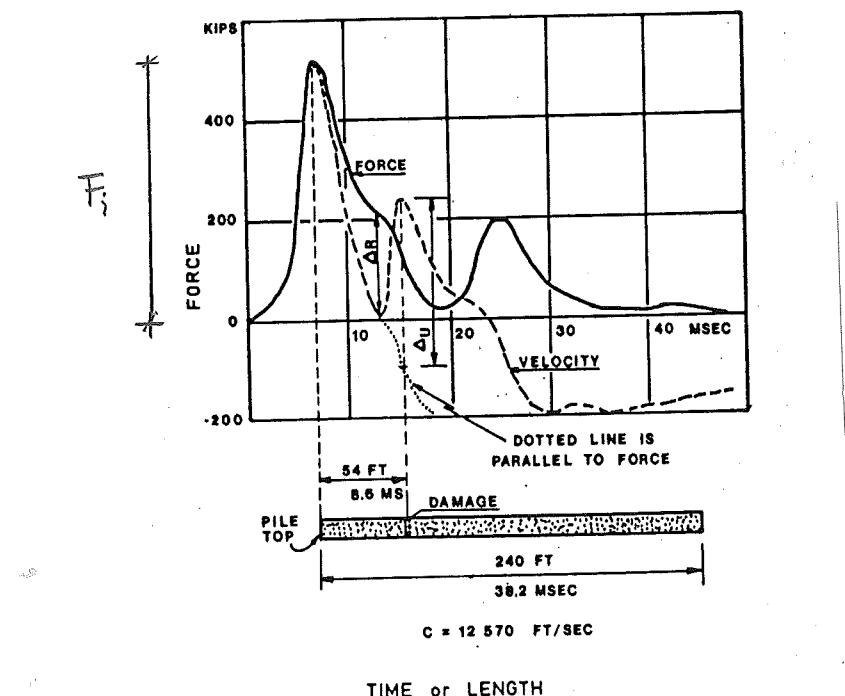
En teori för beräkning av storleken hos en tvärsnittsförändring har presenterats av Rausche [2]. Två olika beräkningsmetoder redovisas beroende på typen av tvärsnittsförändring. Den första avser ett reducerat tvärsnitt varvid en faktor beta (β), som anger skadegrad, kan beräknas.

$$\beta = (1-\alpha)/(1+\alpha), \text{ där } \alpha = \Delta u / 2(F_i - \Delta R)$$

Se figur 1 som är hämtad ur [2]. Teoretiskt är betafaktorn förhållandet mellan kvarvarande och ursprungligt tvärsnitt. Följande förslag till klassifiering av en skada redovisas:

Beta-faktor	Skadegrad
1,0	Oskadad
0,8-1,0	Lätt skadad
0,6-0,8	Skadad
<0,6	Brott i pålelement

Teorin förutsätter att skadan har en viss utsträckning.



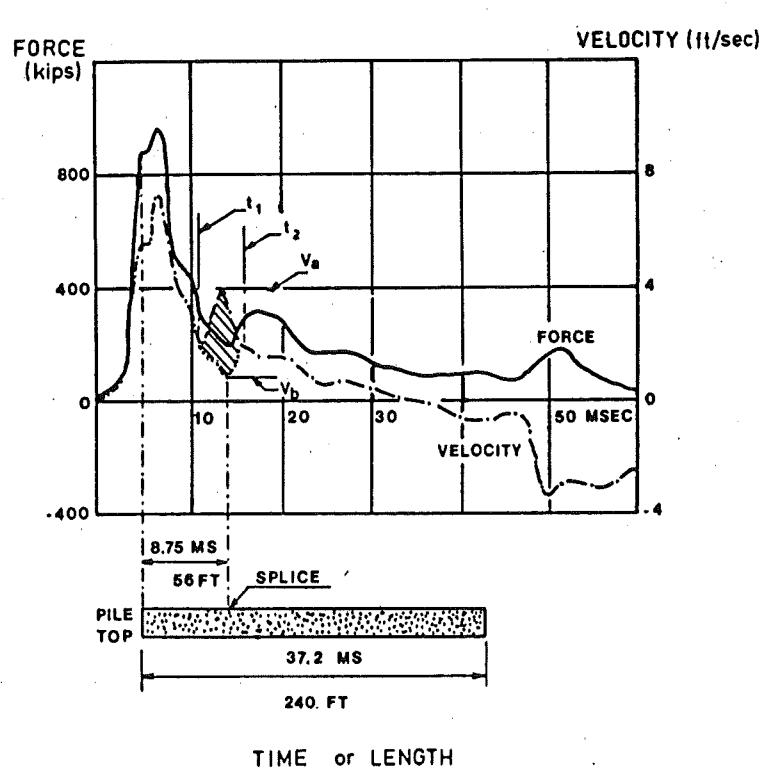
Figur 1. Exempel på kraft- och partikelhastighetskurvor från en avbruten påle [2].

Den andra metoden avser en genomgående spricka. Storleken av denna beräknas genom en integration av det skuggade området i **figur 2**, hämtad ur [2].

Skadetypen kan i viss mån bedömas genom studium av stötvågskurvör från ett flertal hejarslag. När pålen drives igenom ett löst jordmaterial ned i ett hårt bör teoretiskt den förra typen av skada förvärras medan den senare bör bli mindre.

För att beräkna β när endast en signal (partikelhastigheten) är tillgänglig används en något modifierad beräkningsmetod hämtad ur [6]. Initialvåg och reflexvåg ges samma amplitud varefter α mäts direkt ur partikelhastighetskurvan. α är förhållandet mellan storleken av reflexvågen från skadan och initialvågen.

För studium av skador som uppkommer i samband med att pålar slås i vatten eller genom mycket vattengenomsläpliga jordan (s k vattensprängning) se rapport [3] och [4] i litteraturförteckningen.



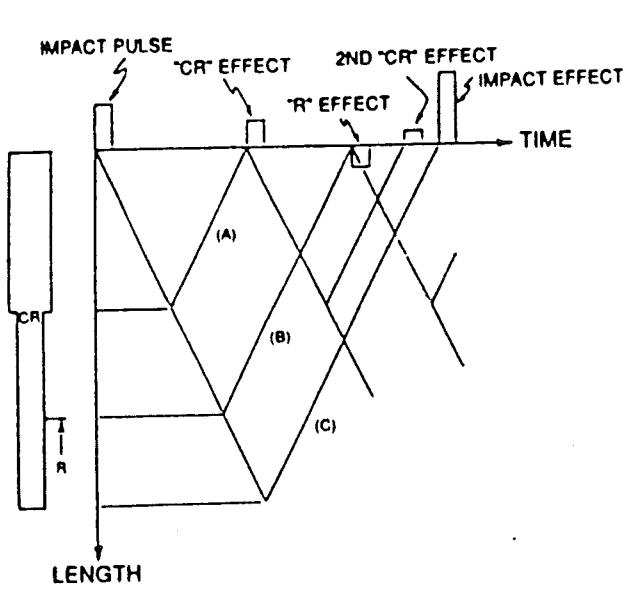
Figur 2. Exempel på kraft- och partikelhastighetskurvor från en påle som innehåller en spricka [2].

3. Testmetoder

3.1 Low-strain test (P.I.T. Pile Integrity Test)

I avsaknad av relevant svensk beteckning användes begreppet "low-strain test" i denna rapport. Metoden innebär att en känslig accelerometer appliceras med hjälp av något visköst material typ vaselin, lera eller liknande på påltoppen varefter en handsläggas användes för att initiera en stötvåg i pålen. Accelerometern ansluts till förstärkare och en dator. Den uppmätta accelerationen integreras till partikelhastighet. Signalen studeras med avseende på reflexer från diskontinuiteter längs pålen. Resultaten dokumenteras antingen på en plotter eller en printer. Principutseendet av reflexvågor från förändringar i jordmotstånd och pålens akustiska impedans illustreras i **figur 3**. Både läge och storlek på skadan kan teoretiskt utvärderas enligt denna metod.

Metoden är enkel och snabb att utföra. En begränsning är dock pållängden. Metoden fungerar för en pållängd av 30-40 gånger pålens tvärsnittsmått. Om pålen är omgiven av mycket fasta jordlager är räckvidden mindre.



Figur 3. Principutseende av reflexvågor från tvärsnittsförändring och jordmotstånd.

Normalt studeras medelvärdet av ett antal slag för att endast relevanta signaler skall erhållas och störningar elimineras.

Om t ex mantelmotståndet är stort kan signalen förstärkas exponentiellt med tiden för att reflexer från nedre delen av pålen inklusive spetsen skall kunna urskiljas tydligare.

Handsläggan kan även instrumenteras med en accelerometer varvid en registrering av kraften erhålls. Kraften omvandlas till partikelhastighet genom division med pålens

impedans. Därför måste även pålens tvärnittsarea anges vid mätningen. Denna metod ger bättre information om förhållanden vid pålens övre del. (Med enbart studium av partikelhastighet är det risk för att reflexer från denna del av pålen överlagras av "initialvågen".)

3.1.1 PITWAP

PITWAP är ett datorprogram som simulerar en skadas utseende ur stötvågskurvor erhållna enligt low-strain test. Programmet är till sin uppbyggnad analogt med CAP-WAPC (se kap 3.2.1), d v s det använder en kontinuerlig pålmodell. Den uppmätta initialvågen används som ingångsvärde, jordens motstånd antas och pålens impedansförändringar beräknas genom ett iterativt förfarande.

3.1.2 Frekvensanalys

Frekvensanalys kan utföras dels för uppmätt partikelhastighet, dels för uppmätt kraft. Metoden används för att tydligare urskilja signaler från signifikanta tvärnittsförändringar. Analysen utförs i två steg; först erhålls signalamplitud som funktion av frekvens, därefter erhålls signalamplitud som funktion av tid.

3.2 High-strain test

Med high-strain test avses "traditionell" stötvågsmätning med mätning av kraft och acceleration (som integreras till partikelhastighet) i samband med slagning av pålen med pålmaskin. Metoden förutsätts i detta sammanhang vara känd, men kan närmare studeras i [1].

3.2.1 CAPWAPC

Detta datorprogram är i första hand avsett för att beräkna lastfördelningen hos en påle samt studera pålens-jordens last-deformationssamband. Tvärnittsförändringar kan emellertid simuleras varför programmet kan vara ett hjälpmittel även vid integritetskontroll.

3.3 Alternativa testmetoder

Ett antal andra testmetoder finns. I Sverige användes tidigare (och förekommer även fortfarande) loddtolkning genom i pålen ingjutna inspekionsrör. Utomlands förekommer bl a "seismic reflection method" och vibrationstest.

4. Försöksomgång 1 (1983-1984)

4.1 Testpålar

Testpålarna var av typ B450 med tvärsnittsmått 235 mm x 235 mm och armering 4 ø16 mm Ks 600. Samtliga testpålar var 11 m långa överpålar med bajonettskarv i skarvänen och en sektionsminskning ca 3 m ifrån skarven.

Tvärsnittsförändringarna utformades enligt följande: (Armeringen var intakt för samtliga pålar) se sid. 17.

4.2 Testförfarande

4.2.1 Pålar i horisontalläge

Samtliga pålar provades först med hjälp av handslägga när de fortfarande låg i lager (hanteringens inskränker sig till lyft ur formarna).

Vid denna provning utvärderades stötvågens utbredningshastighet (gånghastighet) med hjälp av accelerationskurvor och/eller partikelhastighetskurvor. Dessa erhölls med hjälp av en accelerometer som monterades strax intill påländen.

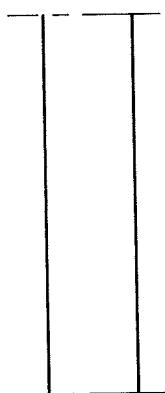
Därefter slogs några slag med en horisontellt upphängd 3 tons hejare på påle nr 3, 4 och 7. Hejaren var upphängd i en travers och "bungades" igång med hjälp av handkraft och travers. Kraftgivarna och accelerometrarna var monterade 1,0 m ifrån pålskallen. Pålarna provades åter med handslägga efter hejarslagningen. Dessa tester genomfördes i mars 1983.

4.2.2 Fullskaleförsök

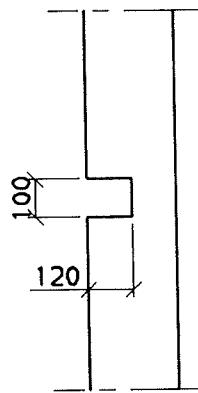
Fullskaleförsöken dröjde till februari 1984 (bl a beroende på avsaknad av lämplig arbetsplats).

Pålarna slogs på en arbetsplats i Varla, Kungsbacka. Jordlagerföljen var 11-12 m lera som överlade ett tunt lager morän (0,2 - 0,3 m) på berget.

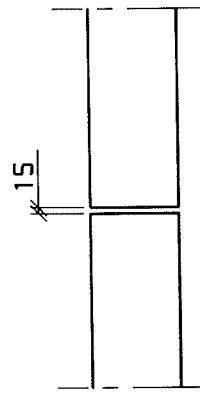
Försöken utfördes genom att en 12,3 m lång standard B450 underpåle (med skarvhälva i pålens överände) slogs ned till moränlagret (ca 12,1 m djup). Testpålarna monterades en efter en på denna underpåle varefter några hejarslag slogs på respektive testpåle. "Skadan" var på så vis synlig och kunde studeras för varje slag. Mätgivarna var monterade 1,0 m ifrån pålskallen varför mätlängden blir 22,3 m (inkl bergsko) för samtliga testpålar.



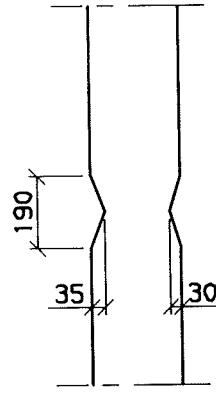
Testpåle 1: Ingen förändring



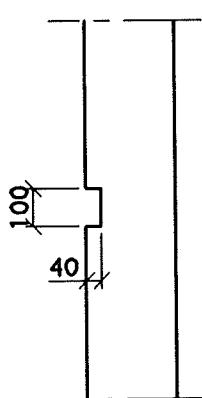
Testpåle 2: Halva tvärsnittet borta
3,08 - 3,18 m ifrån skarvänden. Material: Cellplast (Fig 4-5).



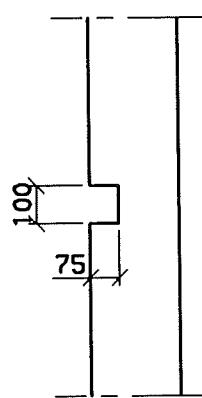
Testpåle 3: Genomgående "spricka"
3,140 - 3,155 m ifrån skarvänden. Material: Mineralull (Fig 6).



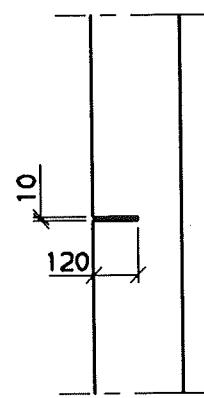
Testpåle 4: Succesiv reduktion på två motstående sidor
3,01 - 3,20 m ifrån skarvänden med max djup 3,0 resp 3,5 cm. Material: Cellplast (Fig 7).



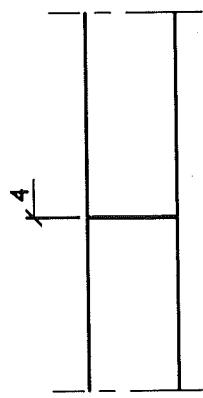
Testpåle 5: 4 cm tvärtnittsreduktion på en sida 3,10 - 3,20 m ifrån skarvänden. Material: Cellplast.



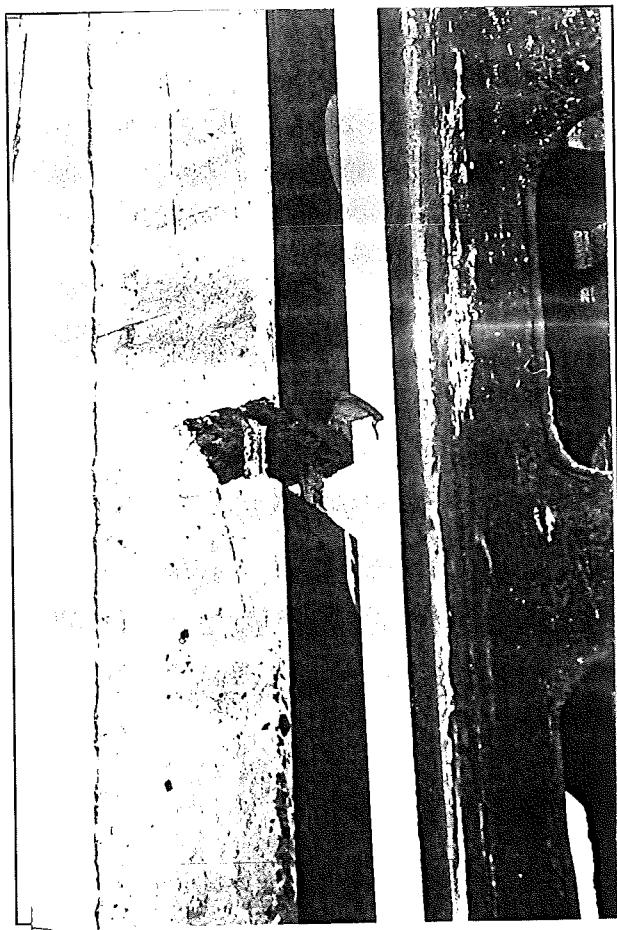
Testpåle 6: 7,5 cm tvärtnittsreduktion på en sida 3,12 - 3,22 m ifrån skarvänden. Material: Cellplast (Fig 8).



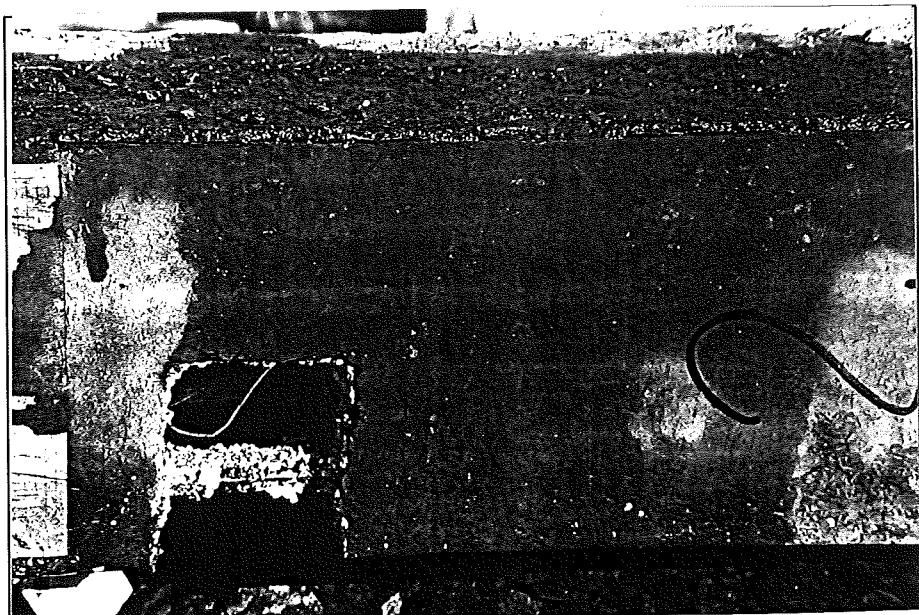
Testpåle 7: "Spricka" på halva tvärsnittet 3,05 - 3,06 m ifrån skarvänden. Material: Mineralull (Fig 9-10).



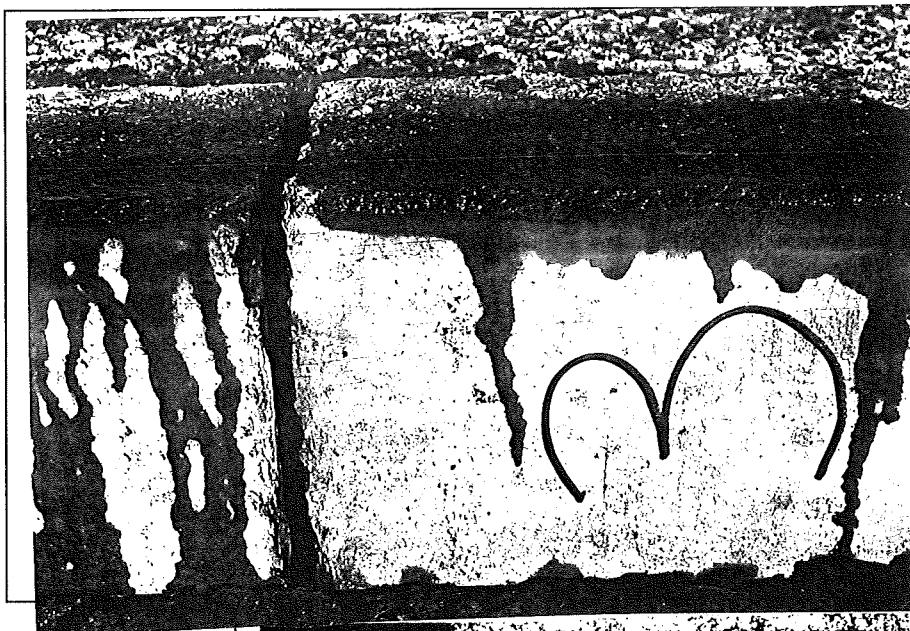
Testpåle 8: Genomgående "spricka" 3,100 - 3,104 m ifrån skarvänden. Material: Kartong (Fig 11).



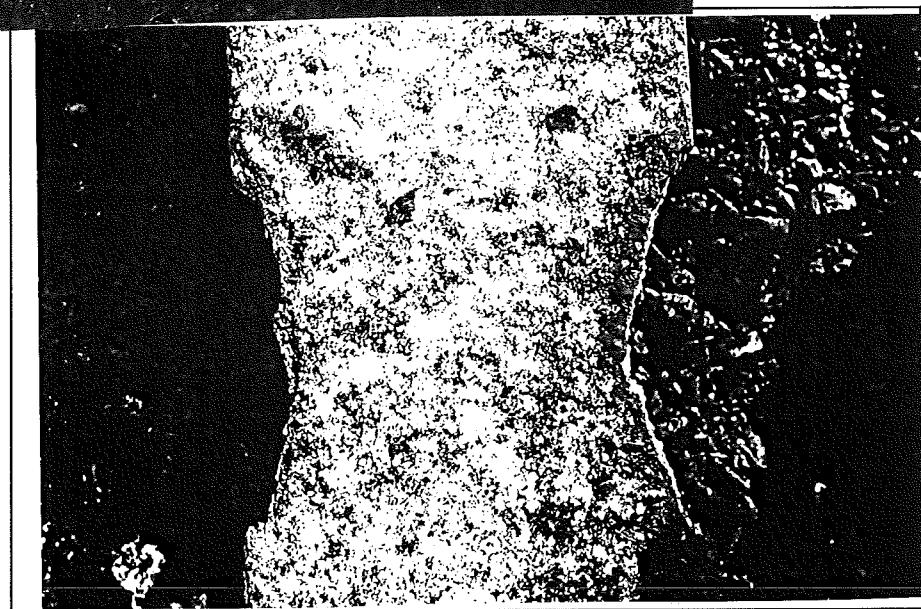
Figur 4. Skada påle 2.



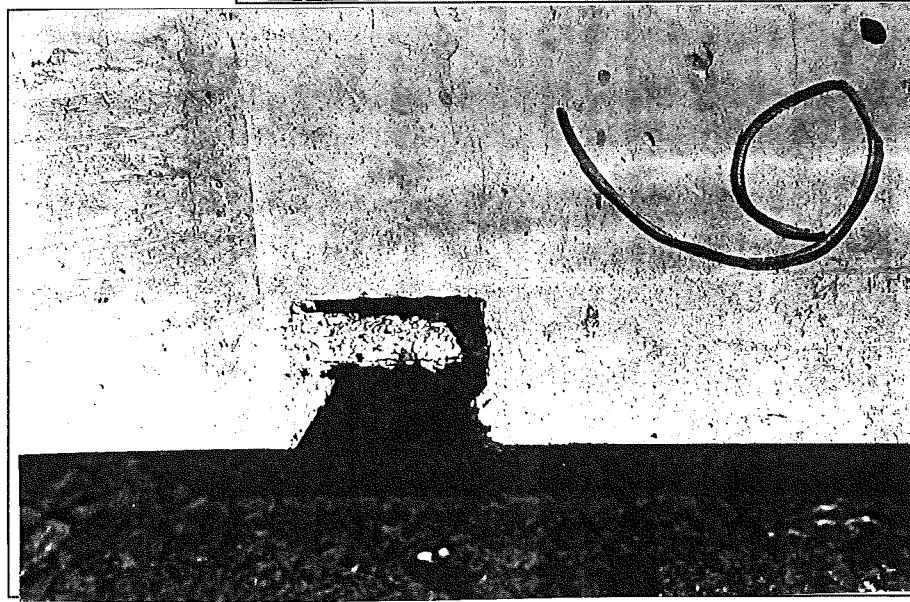
Figur 5. Skada påle 2.



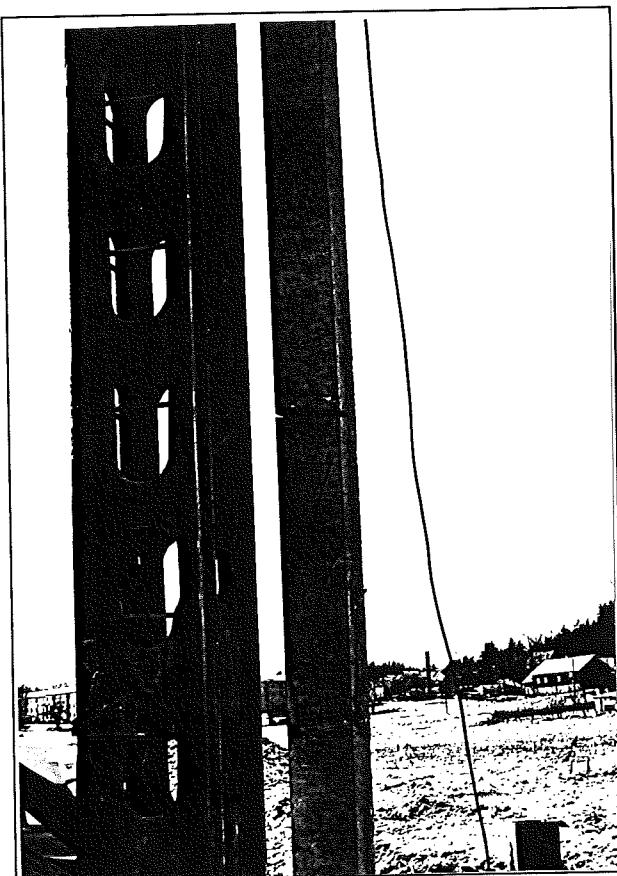
*Figur 6. Skada
påle 3.*



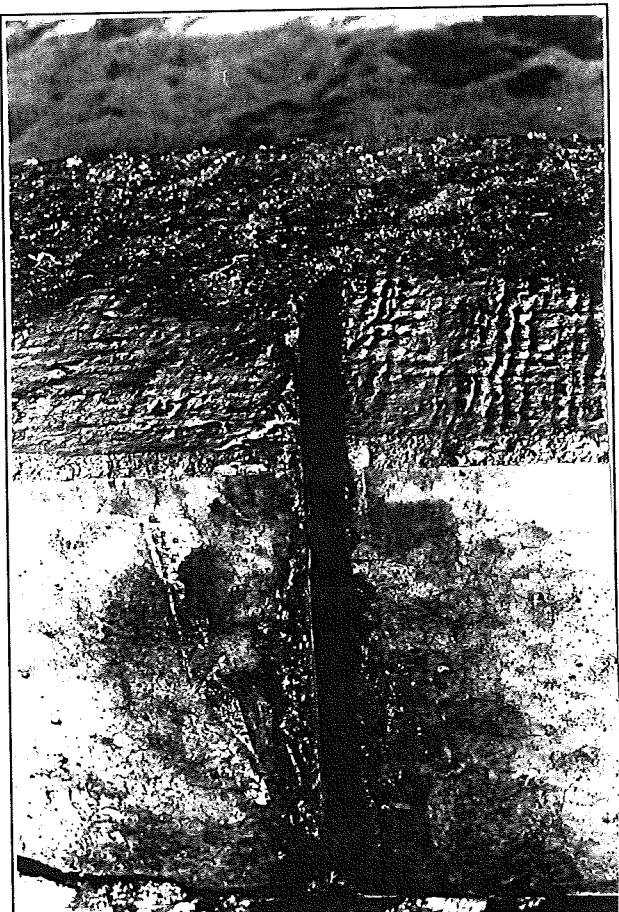
*Figur 7. Skada
påle 4.*



*Figur 8. Skada
påle 6.*



Figur 9. Skada påle 7.



Figur 10. Skada påle 7.



Figur 11. Skada påle 8.

4.3 Resultat

4.3.1 Pålar i horisontalläge

4.3.1.1 Utvärdering av gånghastighet

Resultat från mätning av gånghastighet med hjälp av handslägga och accelerometer redovisas i **figur 12-23**. I figurerna visas dels partikelhastighet (beräknad genom integration av accelerationen, övre kurvan) och dels accelerationen. Skalorna i y-led är ej relevanta. Tidsskalan i x-led är dock korrekt.

I **figur 24** visas kraft- och partikelhastighetskurvor från slagningen med hejare på påle 3 (skalorna i såväl x- som y-led är relevanta vid detta försök). Resultat från slagningen med handslägga efter hejarslagningen på påle 3, 4 och 7 visas i **figur 15-17** samt **21**.

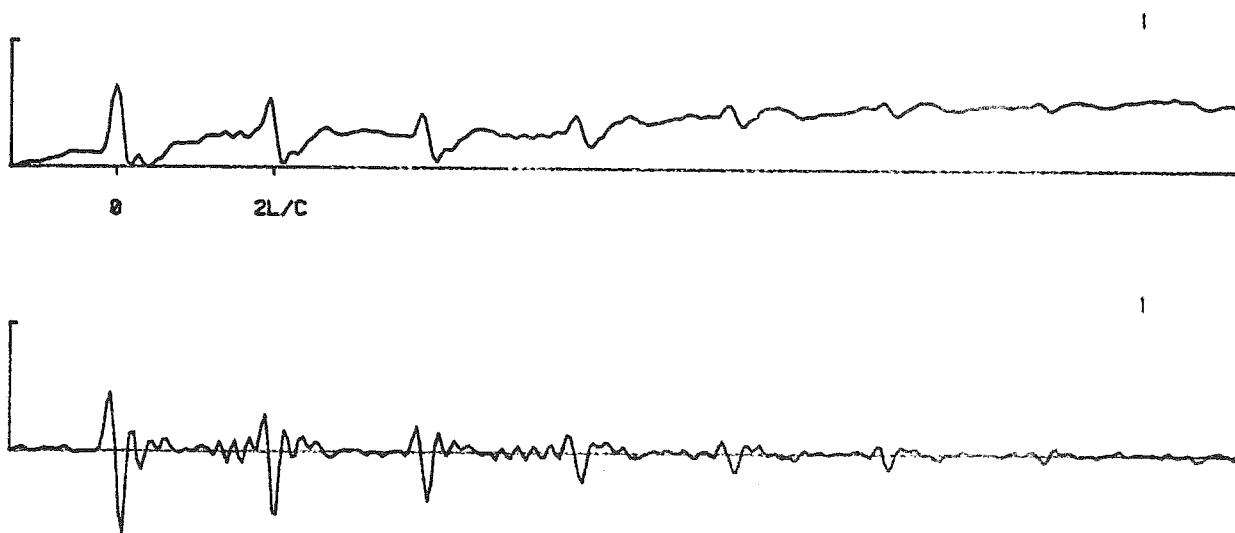
Beräknad gånghastighet framgår av följande tabell (skadorna har ej beaktats vid beräkningen):

Påle (nr)	Gånghastighet (c) i m/s		
	Handslägga	Hejare	Slägga efter hejare
1	4340		
2	4150		
3	4000	3550	3730
4	4070	3470	3860
5	4200		
6	4200		
7	3860	2930	3670
8	4070		

Då beräkningen utförts utan att skadorna beaktats bör inte siffrorna (med undantag av påle nr 1) ses som exempel på gånghastigheten i ej hanterade pålar. Det är emellertid intressant att notera att de pålar som slagits med hejare uppvisar en lägre gånghastighet vid hejarslagningen. Vid den efterföljande mätningen med handslägga är c högre än vid hejartesten. Eftersom gånghastigheten $c = \sqrt{E/\rho}$, där ρ är densitet, kan man anta att Elasticitetsmodulen E är högre för den mycket låga kraften som erhålls vid slagning med handslägga, det vill säga E är ej linjärt elastisk vid så små deformationer. Gånghastigheten är dessutom lägre vid slag med slägga efter hejartesten än före. Detta kan förklaras med att de dragkrafter som alstras (storleksordningen 250 kN, **figur 24**) ger upphov till mikrosprickor i betongen, vilka ger en lägre gånghastighet i betongen.

IVA PALE NR 1 SLAGGA SKARVANDE

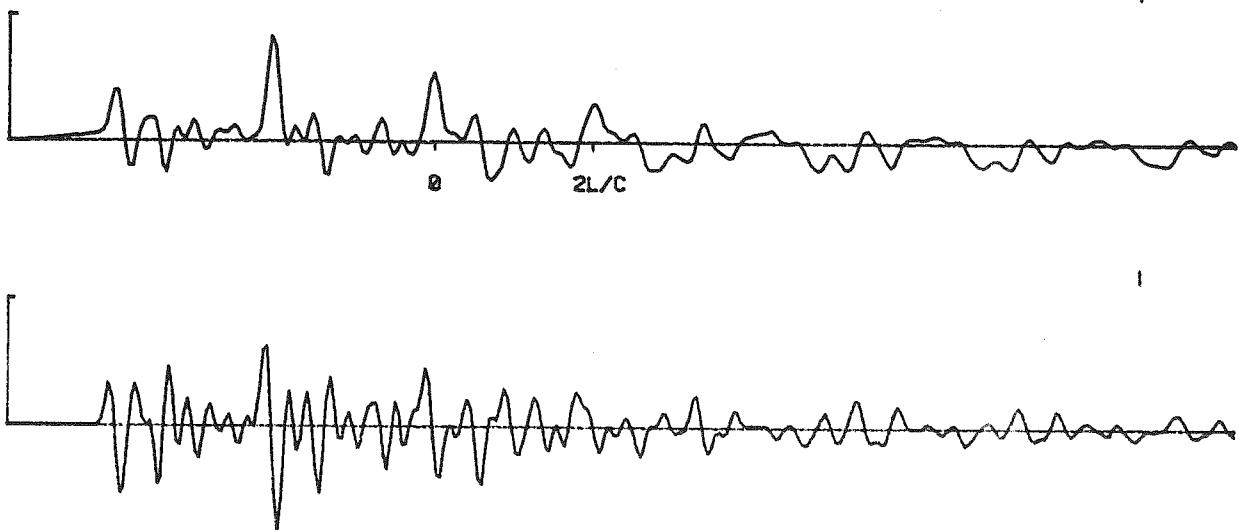
— 4 MS —



Figur 12. Påle 1. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på skarvände.

IVA PALE NR 2 SLAGGA SKARVANDE

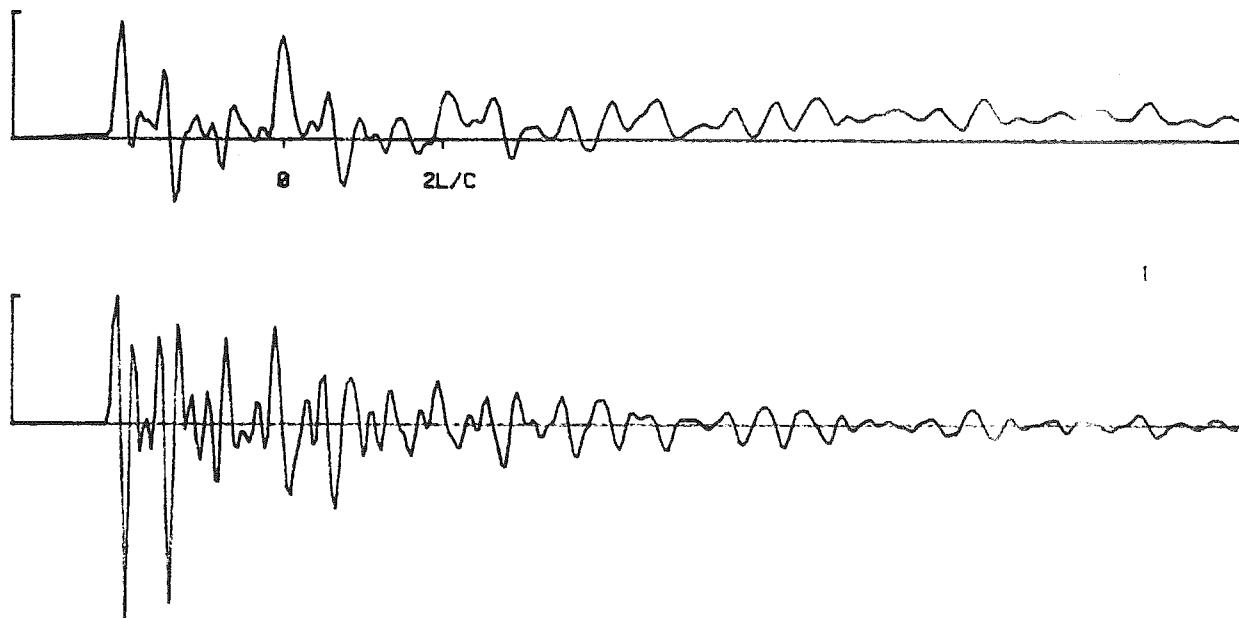
— 4 MS —



Figur 13. Påle 2. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på skarvände.

IVA PALE NR 3 SLAGGA SKARVANDE

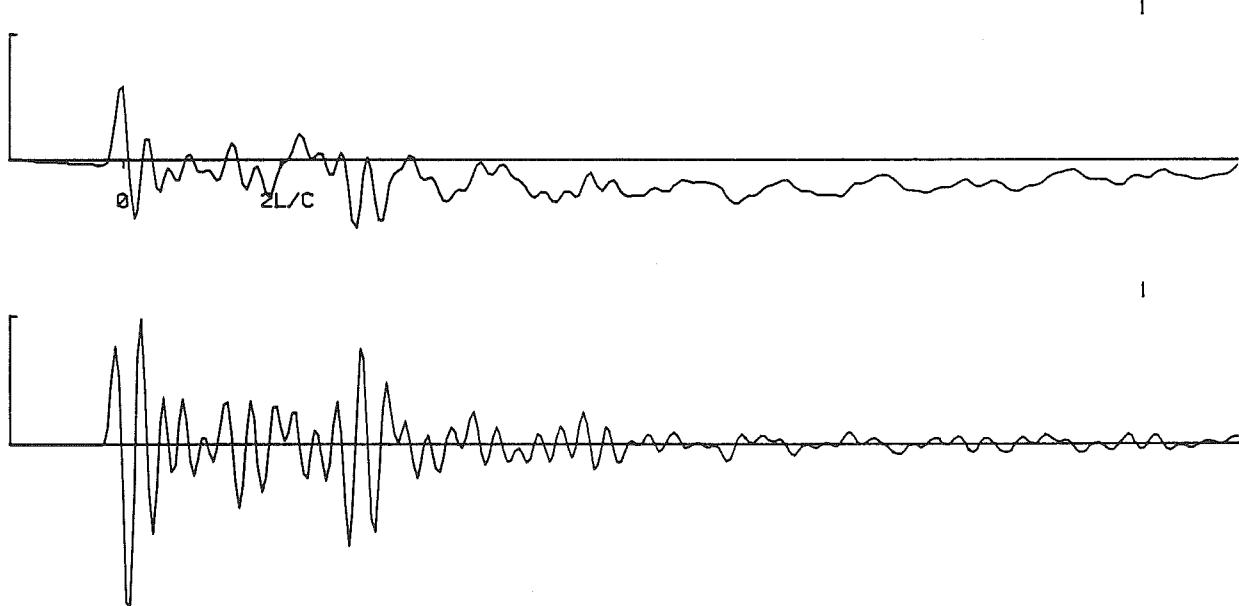
— 4 MS



Figur 14. Pôle 3. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på skarvände.

IVA PALE NR3 SLAGGA EFTER HEJARE PALTOPP

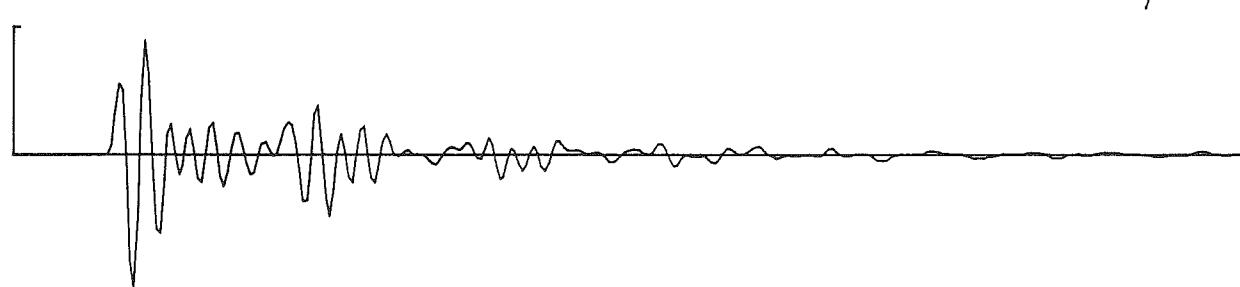
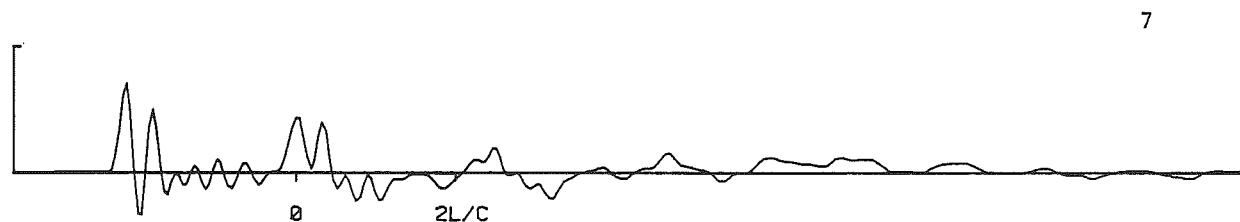
— 4 MS



Figur 15. Pôle 3. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på påltopp efter slagning med hejare.

IVA PALE 4 SLAGGA EFTER HEJARE PALTOPP

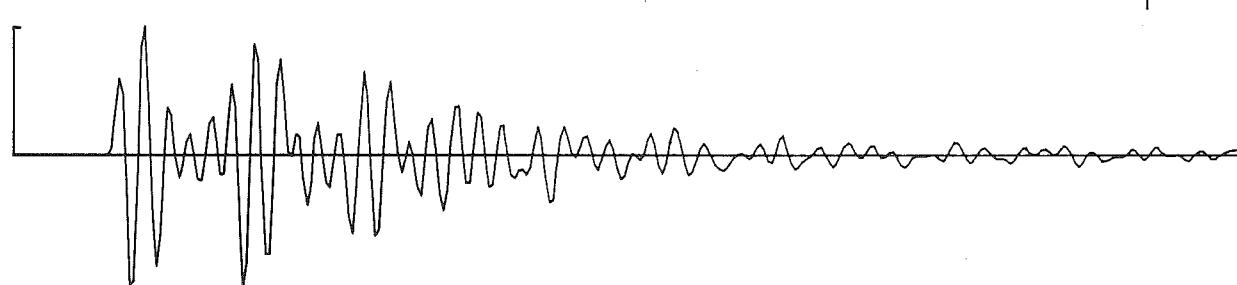
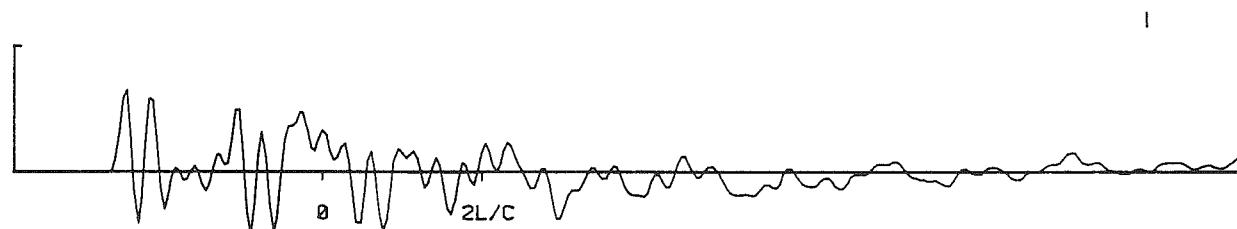
— 4 MS —



Figur 16. Pôle 4. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på pältopp efter slagning med hejare.

IVA PALE 4 SLAGGA EFTER HEJARE

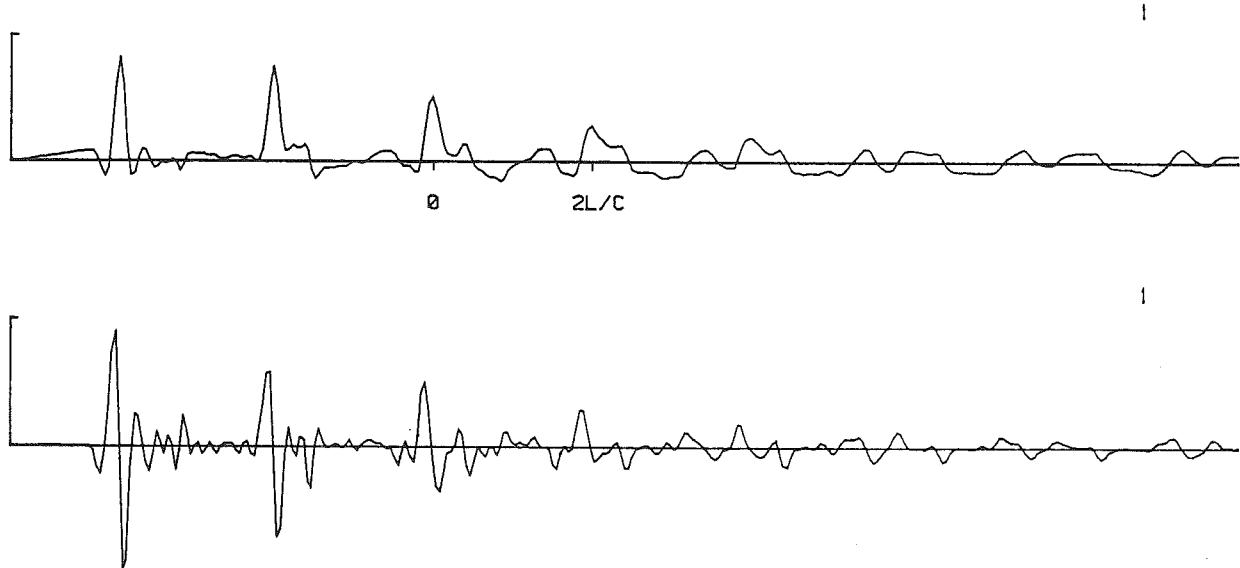
— 4 MS —



Figur 17. Pôle 4. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på pältopp efter slagning med hejare.

IVA PALE NR 5 SLAGGA SKARVANDE

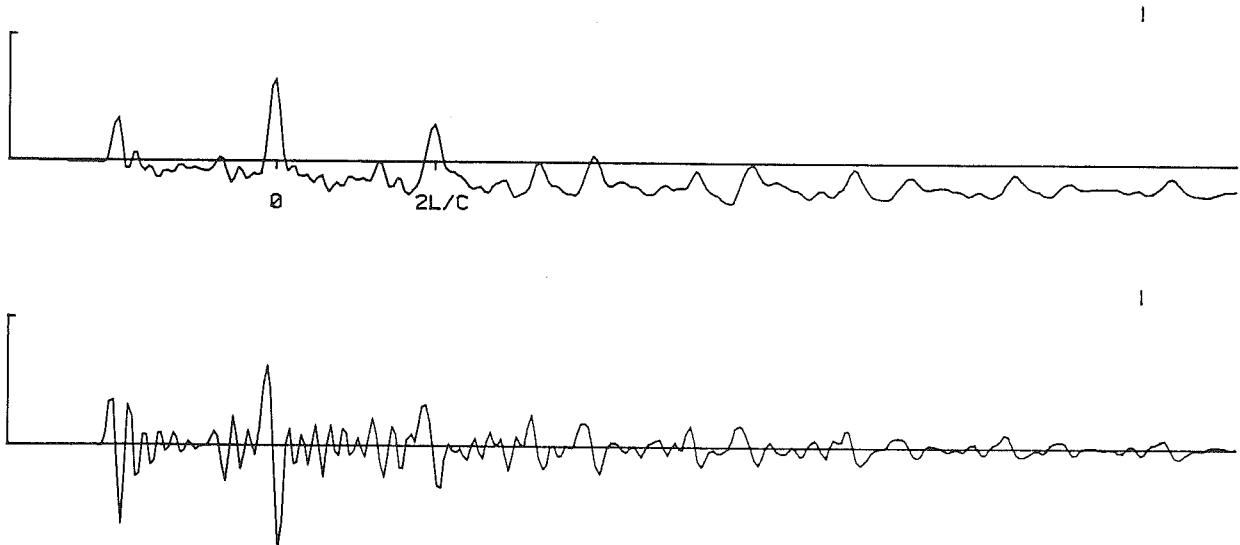
— 4 MS —



Figur 18. Påle 5. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på skarvände.

IVA PALE NR 6 SLAGGA PALTOPP

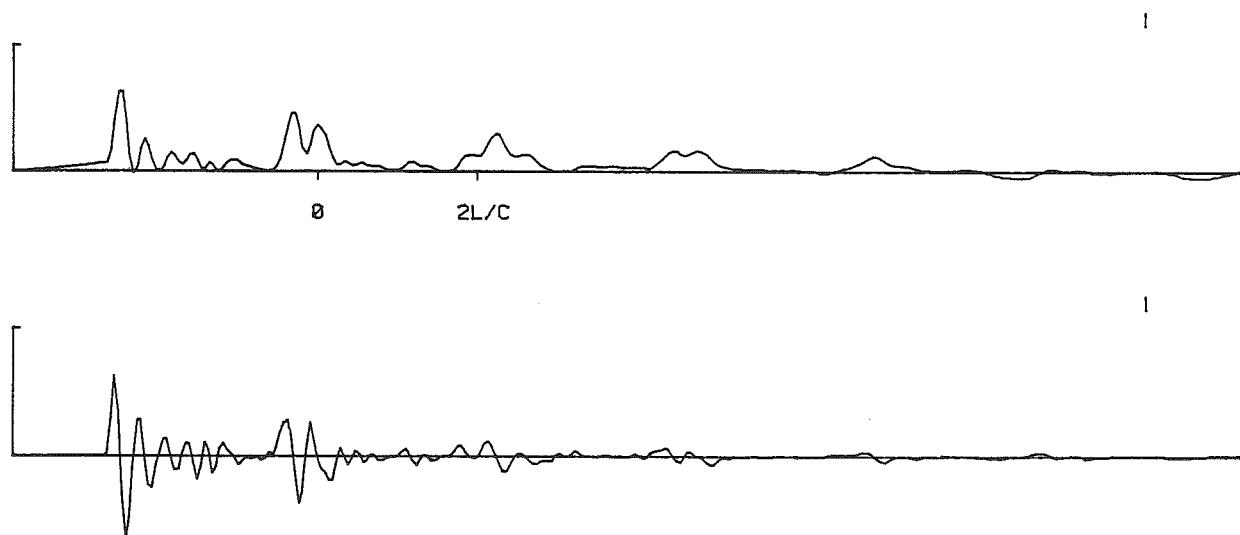
— 4 MS —



Figur 19. Påle 6. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på påltopp.

IVA PALE NR 7 SLAGGA PALTOPP

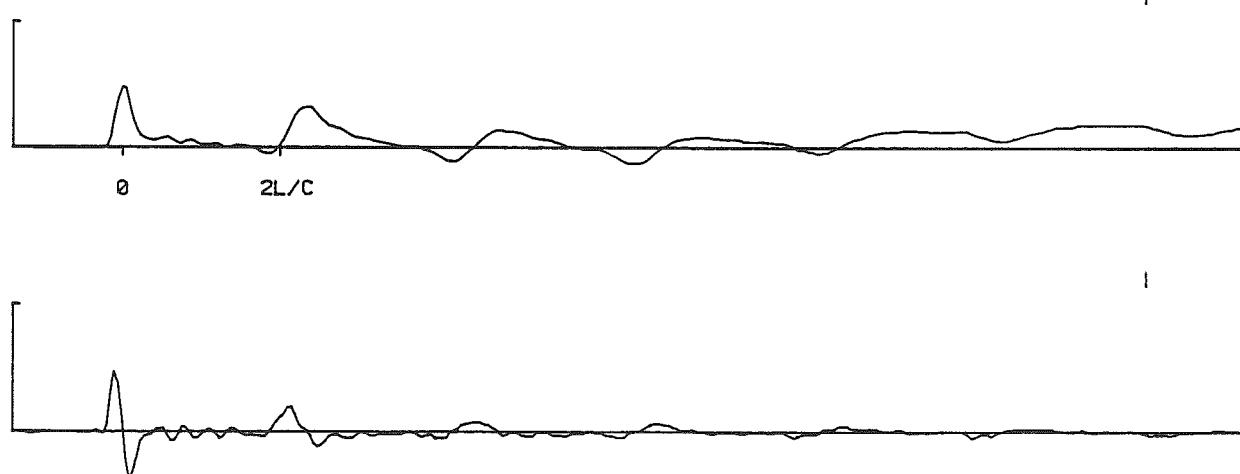
— 4 MS —



Figur 20. Påle 7. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på påltopp.

IVA PALE 7 SLAGGA EFTER HEJARE

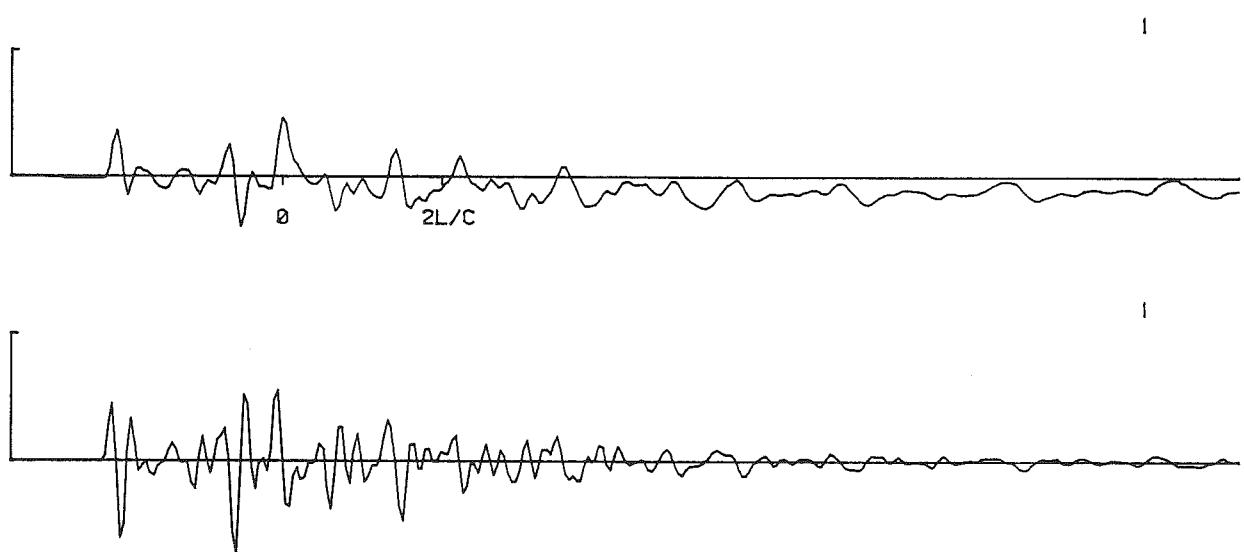
— 4 MS —



Figur 21. Påle 7. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på påltopp efter slagning med hejare.

IVA PALE NR 8 SLAGGA PALTOPP

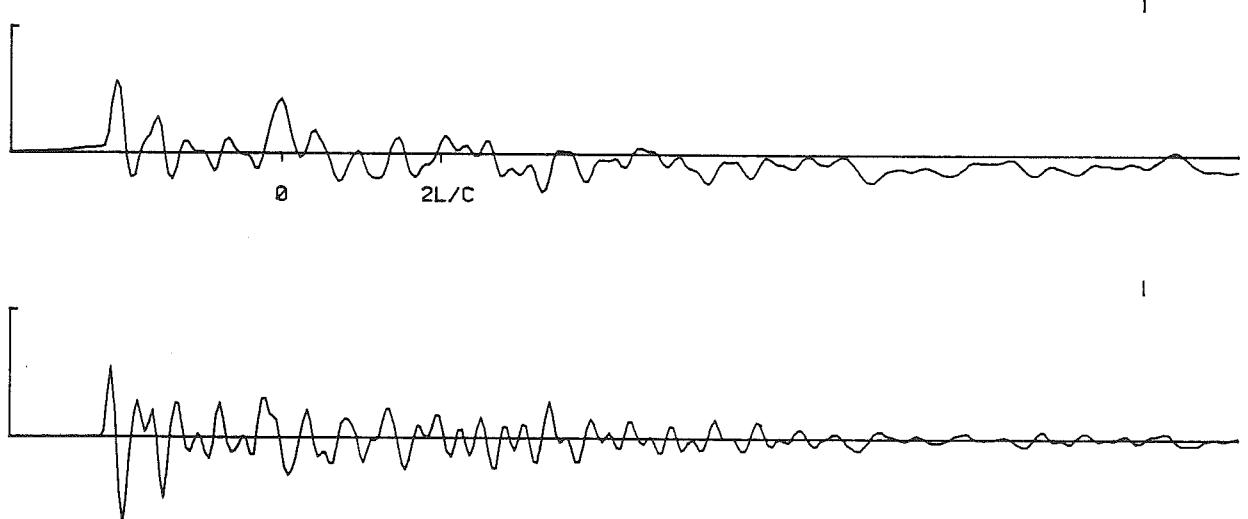
— 4 MS —



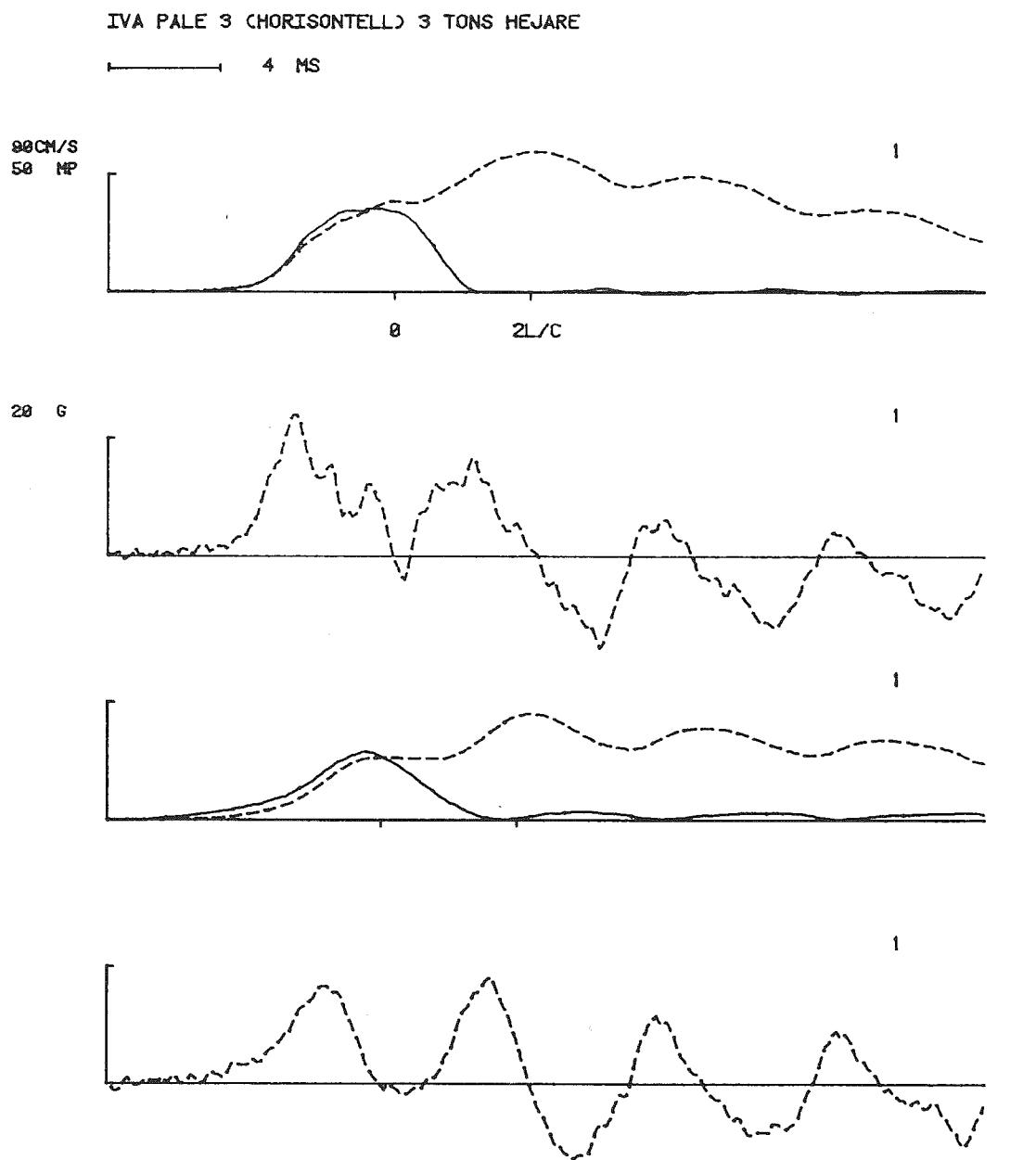
Figur 22. Påle 8. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på paltopp.

IVA PALE NR 8 SLAGGA SKARVANDA

— 4 MS —



Figur 23. Påle 8. Partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med slägga på skarvände.



Figur 24. Påle 3. Kraft (F), partikelhastighet (v) och acceleration (a) från slagning med horisontellt upphängd hejare.

4.3.1.2 Utvärdering av integritet

Framräknat värde på gånghastighet i föregående avsnitt har använts för att beräkna "skadans" läge. Detta bör jämföras med det verkliga läget som är ca 3,1 m för samtliga pålar. För vissa pålar är det svårt att urskilja skadan ur "bakgrundsbruset" (gäller framförallt lindriga skador).

Påle (nr)	Beräknat läge för skada (m)	Anm
1		Oskadad
2	2,9	Svår att urskilja
3	3,0	
4	3,6	Efter hejarslag
5	-	Svår att urskilja
6	3,4	Svår att urskilja
7	3,6	
8	3,5	

De genomgående sprickorna är lättast att urskilja. Att beräkningen av läget inte blir helt exakt kan bl a bero på mätonoggrannhet alternativt olika gånghastighet före och efter skadan.

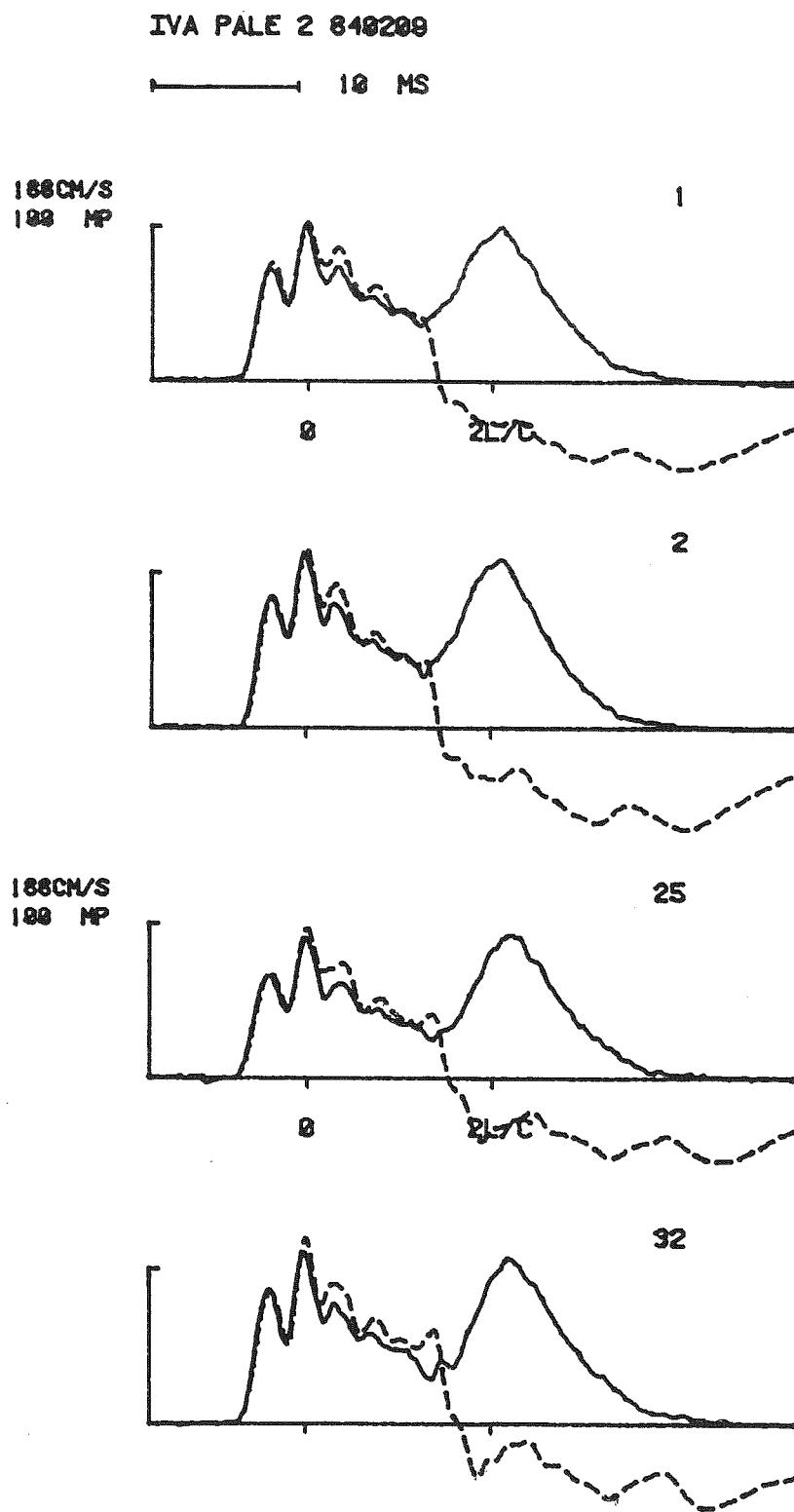
4.3.2 Fullskaleförsök

Slagningen utfördes av en Åkerman-maskin med 3 tons linhejare. Trämellanlägget var väl "inslaget". Pålarna slogs med ca 0,6 m fallhöjd (beordrad). Kraft- och partikelhastighetskurvor visas i figur 25-34 (kraftkurvan är heldragen). Betafaktorn har beräknats enligt metod redovisad i kapitel 2. Resultatet redovisas i tabell nedan.

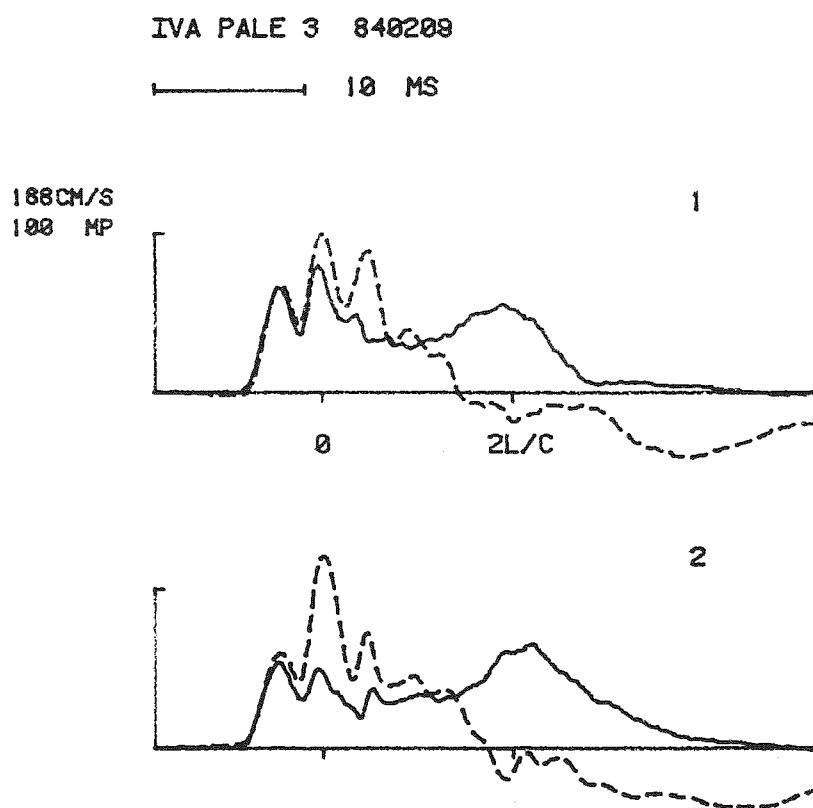
Påle (nr)	Slag (nr)	Beta-faktor Beräknad	Beta-faktor Verlig	Anm
2	1	0,82	0,53	
2	25	0,75	0,53	
3	1			(Spricka)
4	1	0,75	0,72	
6	1	0,82	0,68	
6	11	0,77	0,68	
7	10	0,85	0,53	
7	30	0,74	0,53	
8	2			(Spricka)

Kommentarer

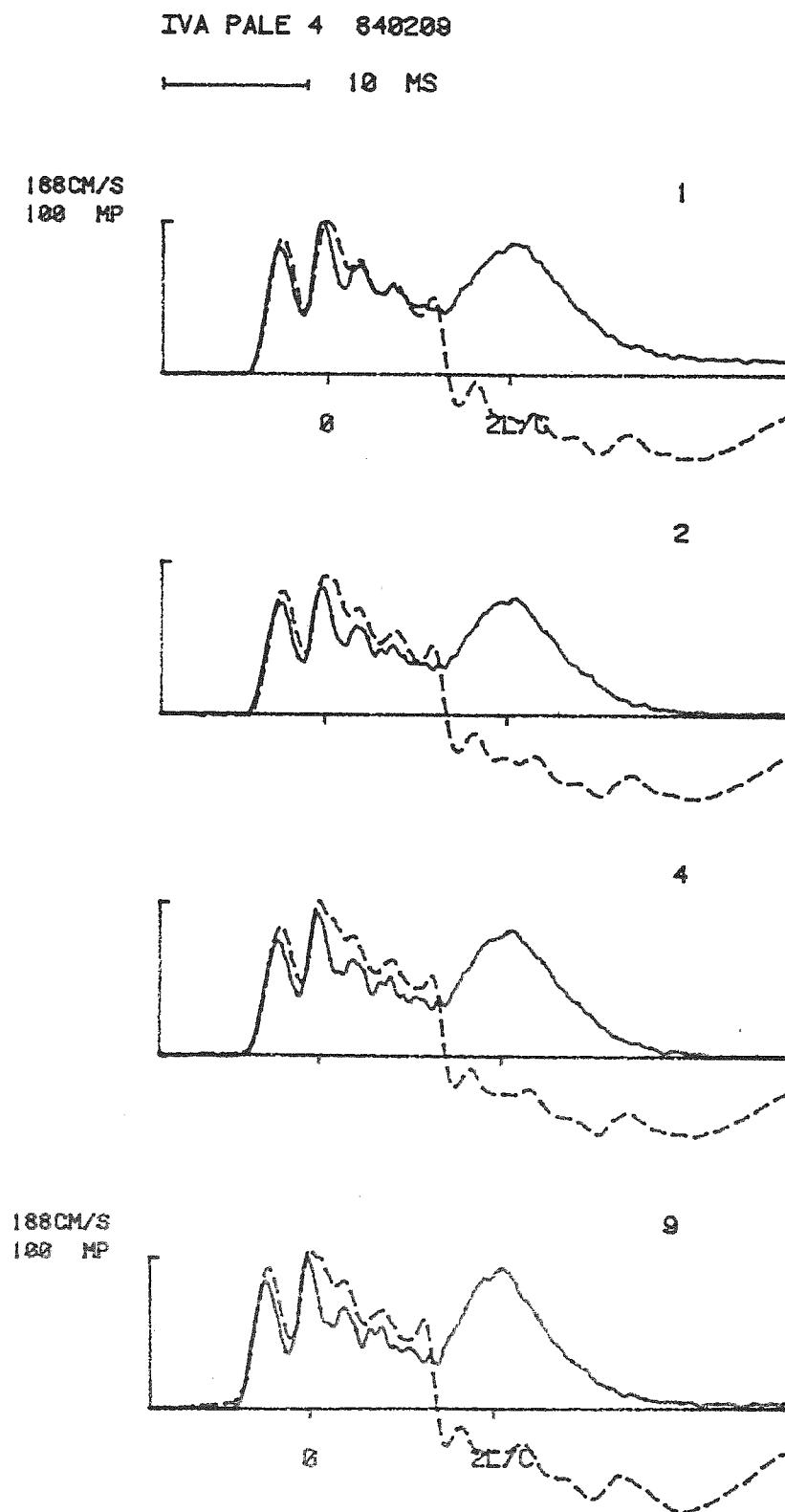
- Påle nr 2: **Figur 25.** Skadan syns strax efter initialstötvågens maximipunkt. Slagningen avbröts efter ca 35 slag då ingen ytterligare ökning av skadan kunde noteras. Skillnaden mellan beräknad och verklig betafaktor beror på att skadans utsträckning är så pass begränsad. Teorin förutsätter en något mer utsträckt sektionsförändring. Se avsnitt nedan.
- Påle nr 3: **Figur 26, 35-36.** Skadan syns tydligt vid första slaget. Armeringen spjälkade ut så att betongytorna kom i kontakt vid detta slag. Ytterligare ett slag slogs varvid pålen gick i brott.
- Påle nr 4: **Figur 27.** Beräknad och verklig betafaktor överensstämmer i stort sett. Det kan bero på att skadan har en annorlunda utformning än de övriga.
- Påle nr 5 kom aldrig till utförande, på grund av praktiska problem.
- Påle nr 6: **Figur 28-30.** Slagningen avbröts efter 11 slag då pålspetsen höll på att förlora sitt fäste. Vid okulärbesiktning kunde ej någon ökning av skadan noteras.
- Påle nr 7: **Figur 31-32.** Skadan syns inte alls till att börja med men är urskiljbar efter 10 slag. Pålen slogs med totalt 60 slag. Ingen försämring av skadan kunde noteras.
- Påle nr 8: **Figur 33-34, 37-39.** Pålen gick av vid 11:e slaget. Anledningen var troligtvis att pappskivan som utgjorde "skadan" ej var ingjuten helt vinkelrätt mot pålens längdriktning utan låg snett vilket innebar att brottet antagligen var ett skjubbrott.



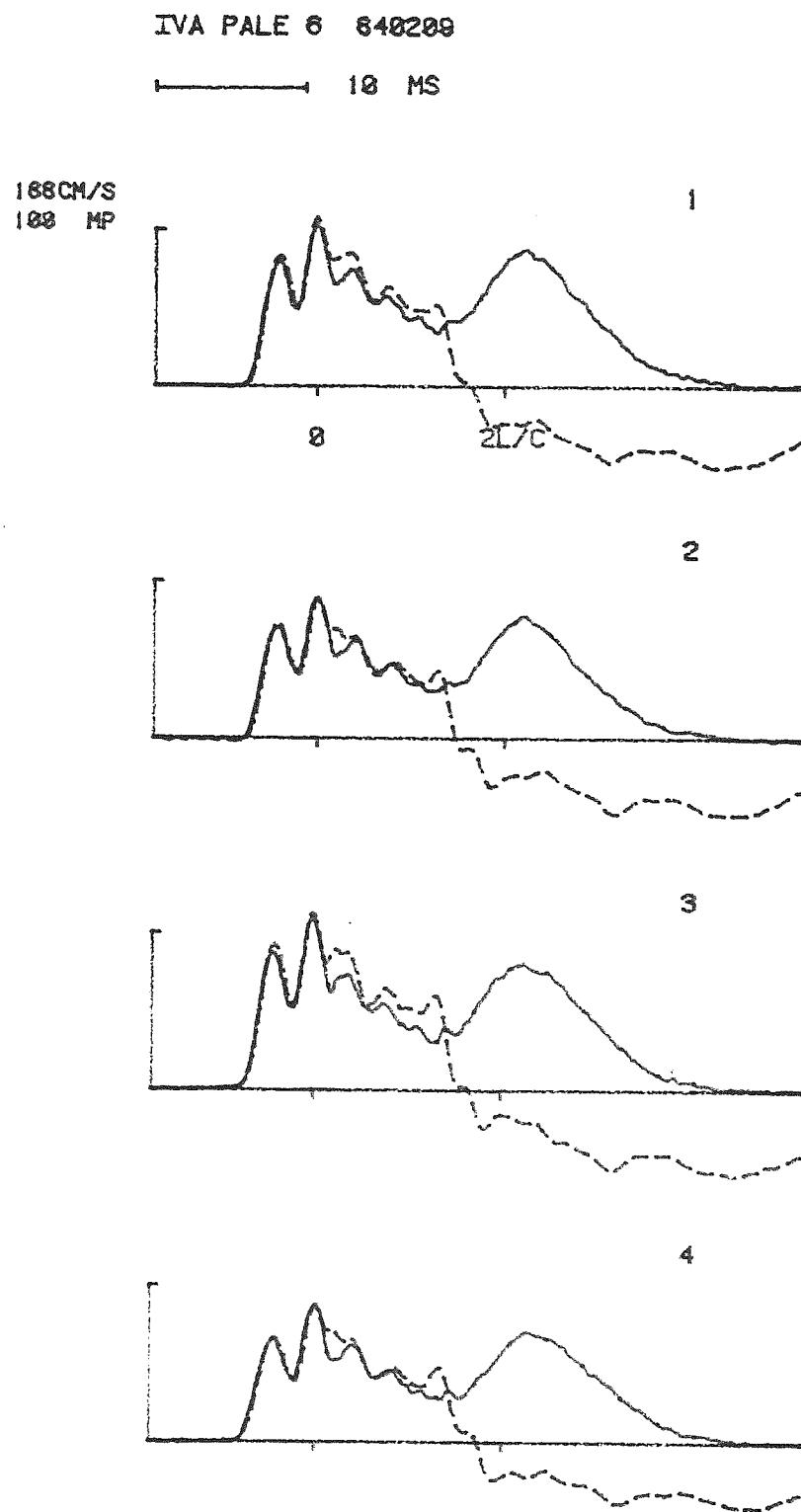
Figur 25. Påle 2. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök. Siffran till höger om varje kurva anger slagnummer.



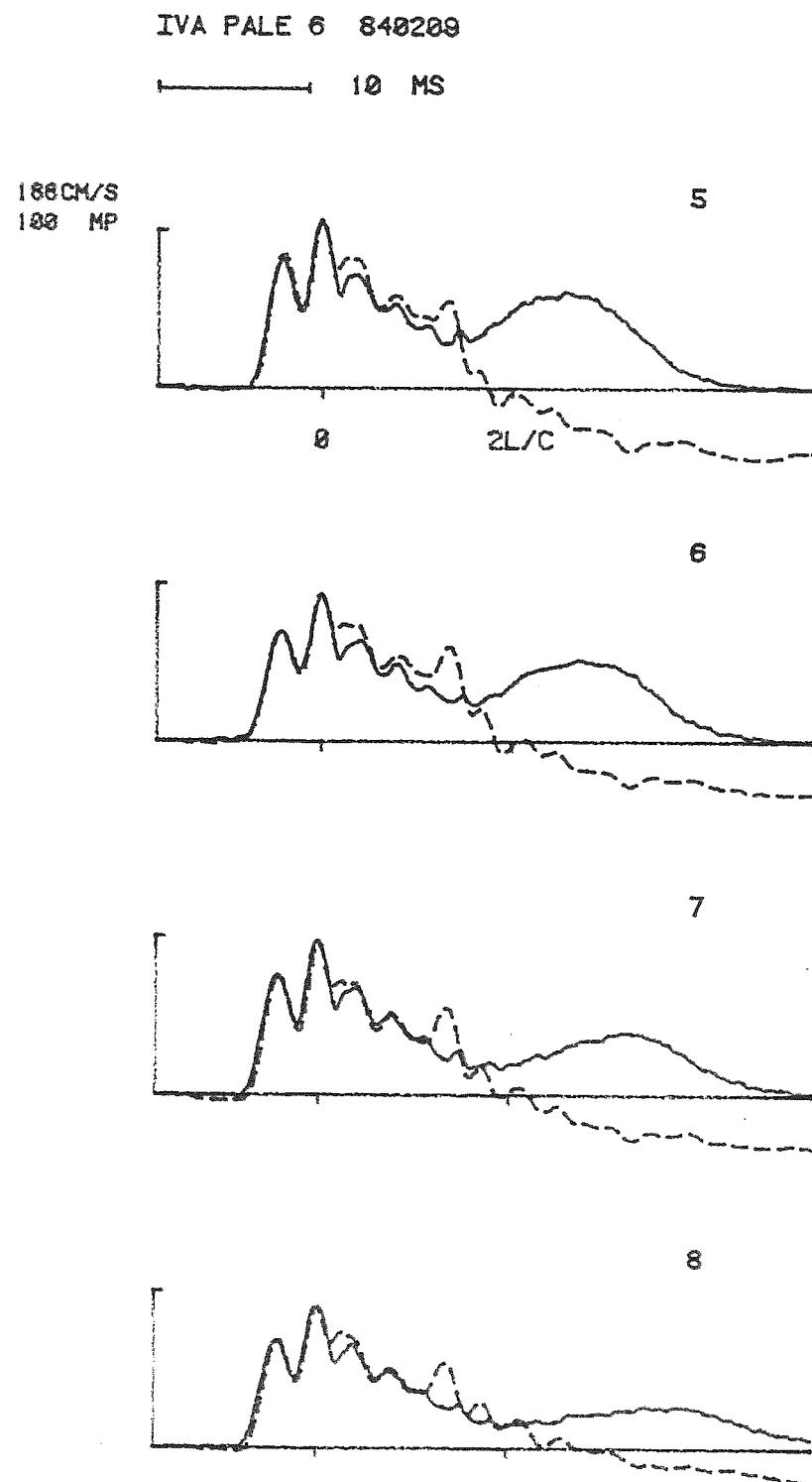
Figur 26. Pål 3. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök.



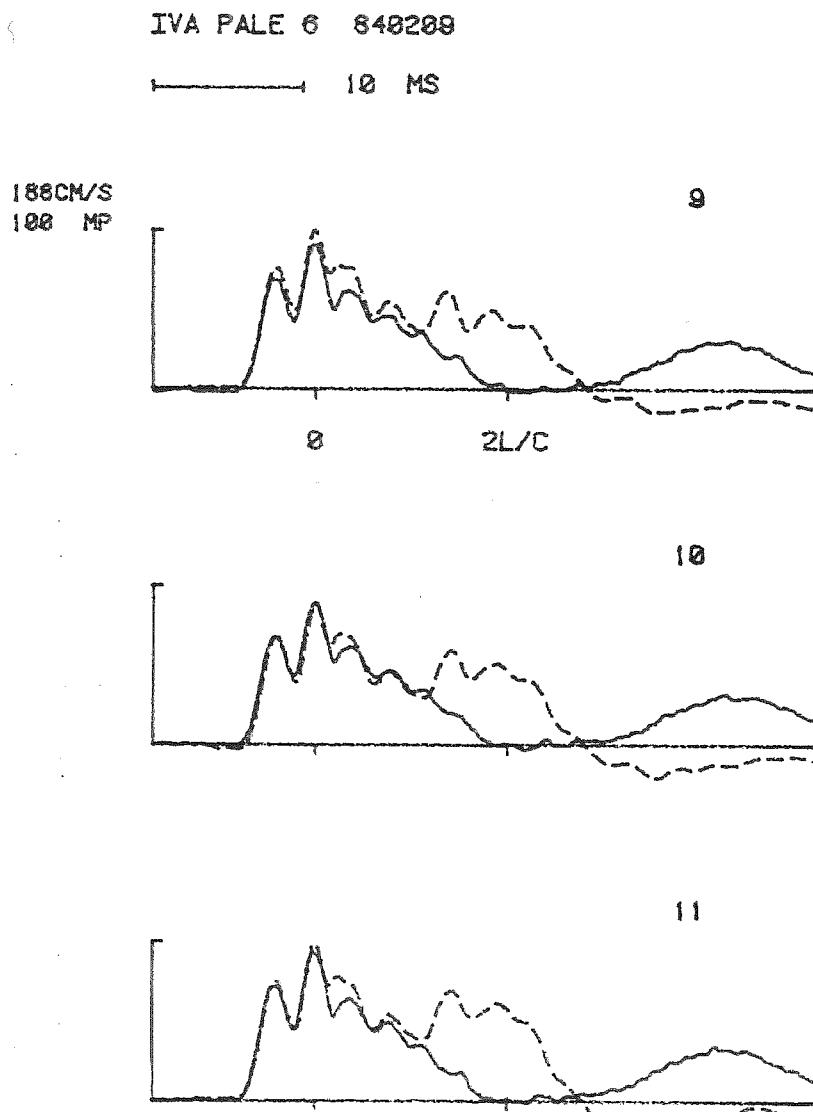
Figur 27. Påle 4. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök.



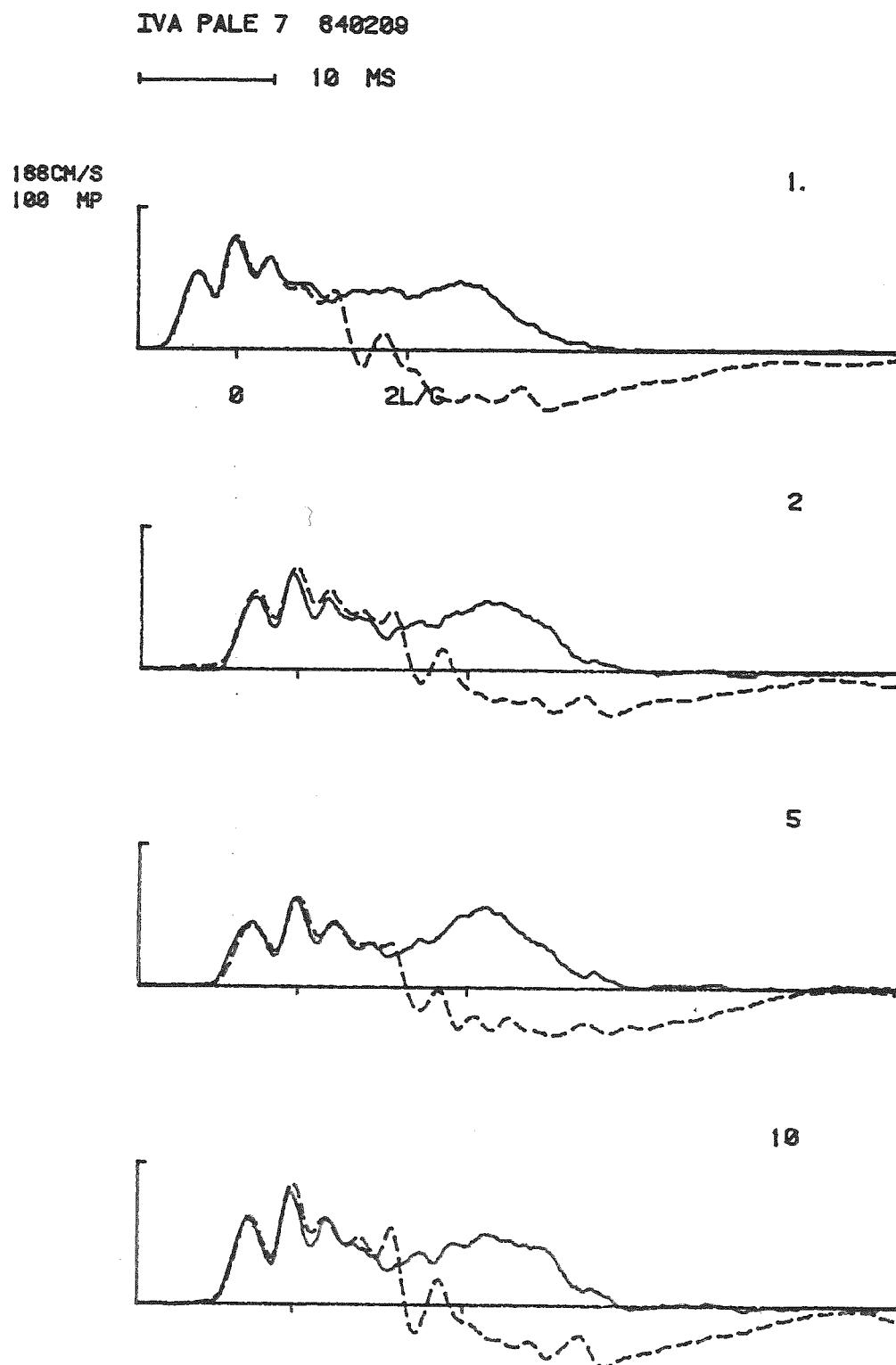
Figur 28. Påle 6. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök.



Figur 29. Påle 6 (forts).



Figur 30. Pôle 6 (forts).

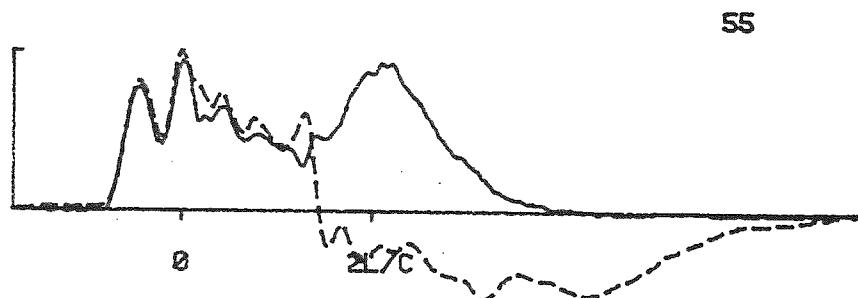


Figur 31. Påle 7. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök.

IVA PALE 7 840209

— 10 MS —

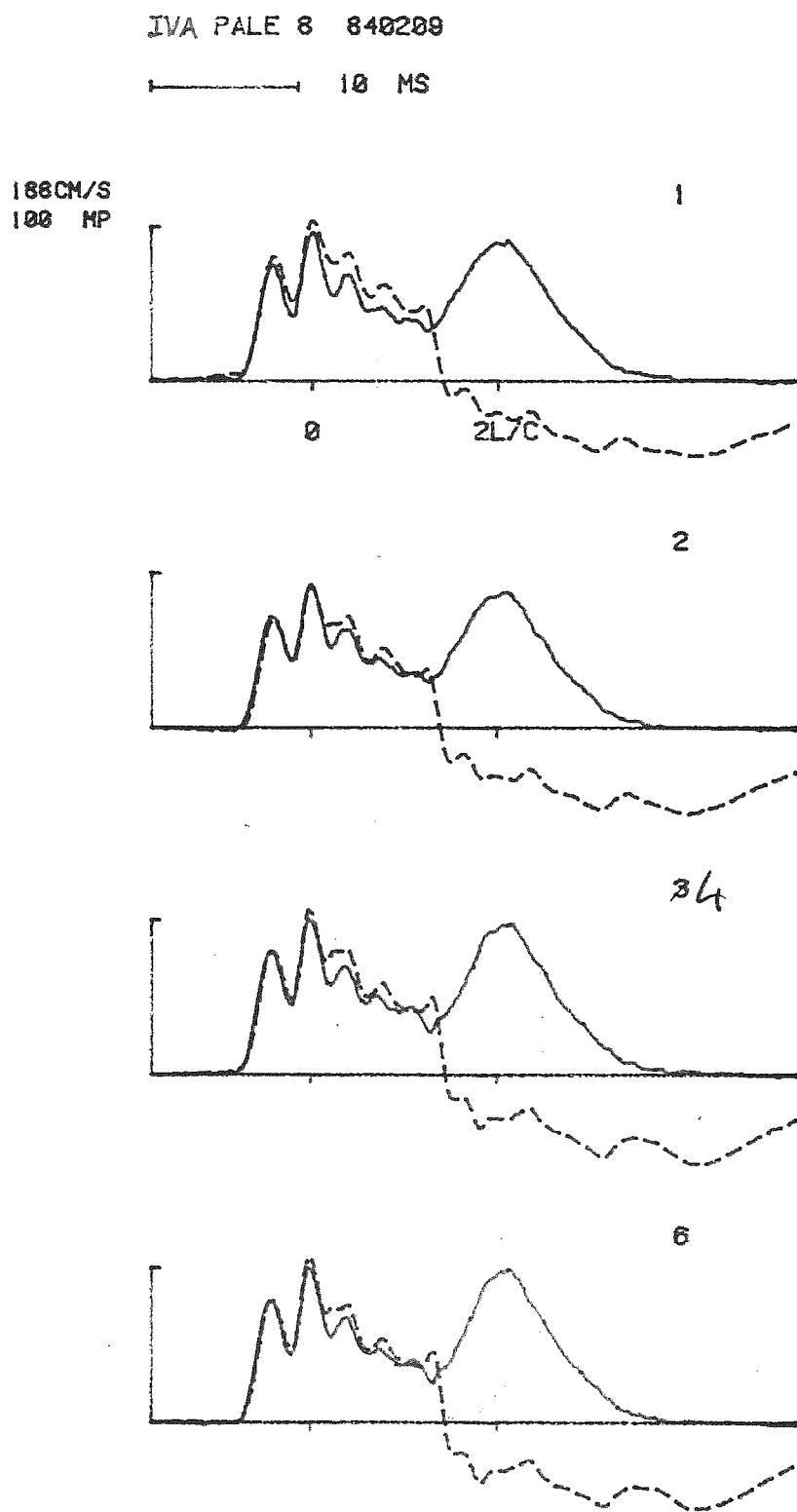
188CM/S
188 MP



60



Figur 32. Pôle 7 (forts).

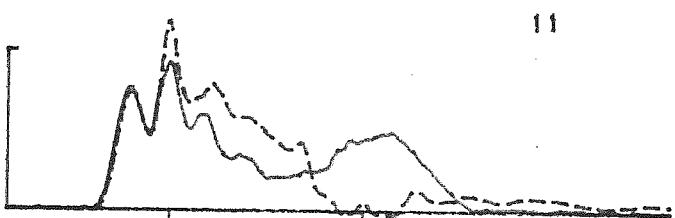


Figur 33. Påle 8. Kraft (F) och partikelhastighet (v) från fullskaleförsök.

IVA PALE 8 840209

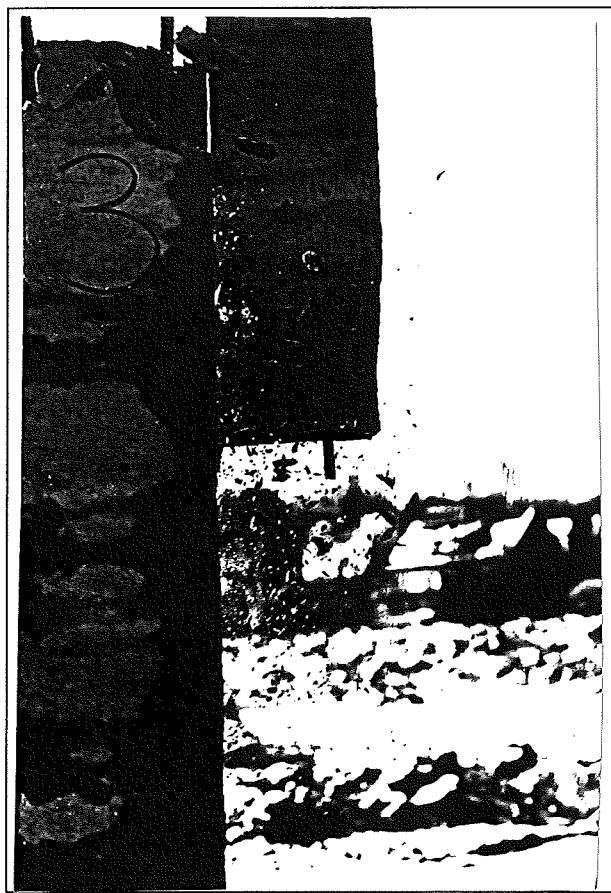
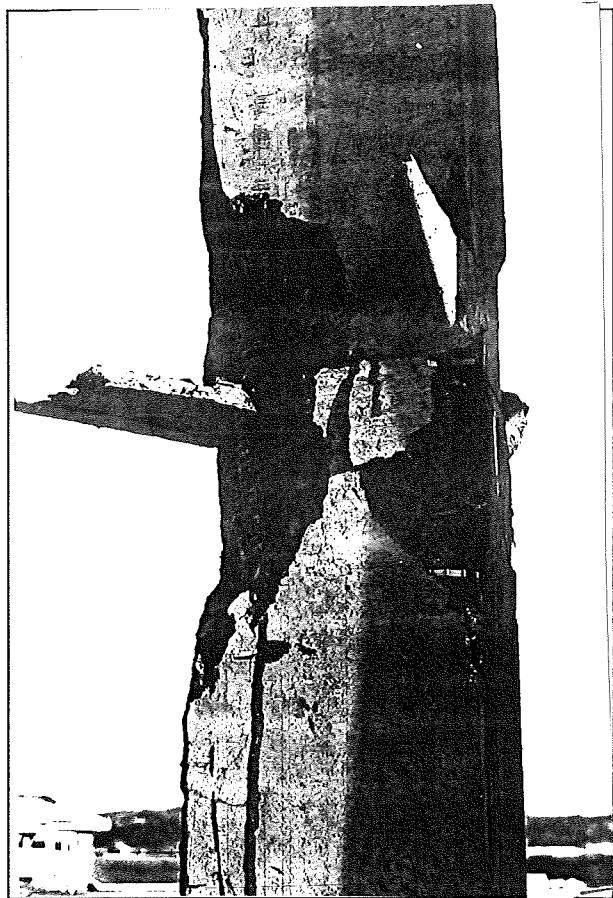
— 10 MS —

188 CM/S
100 MP

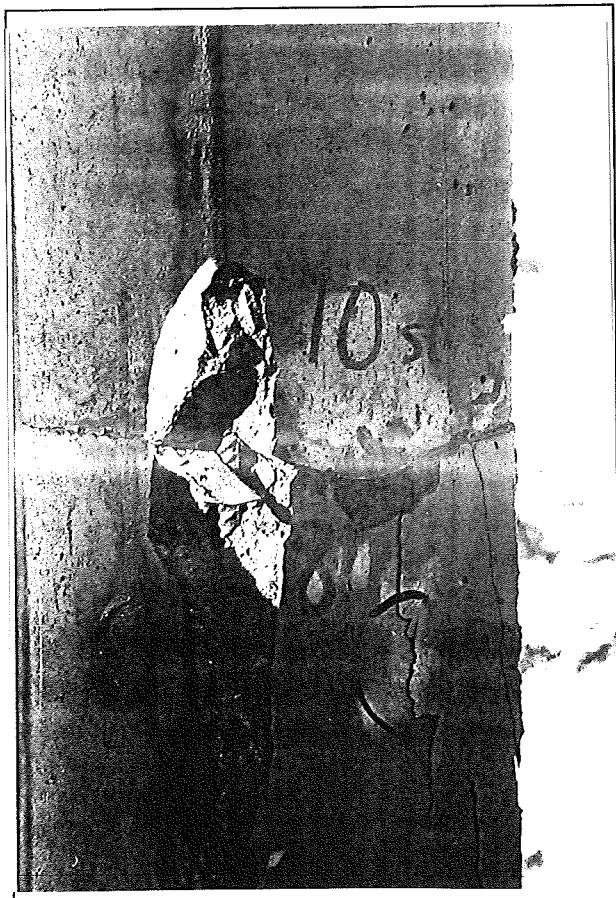


Figur 34. Pål 8 (forts).

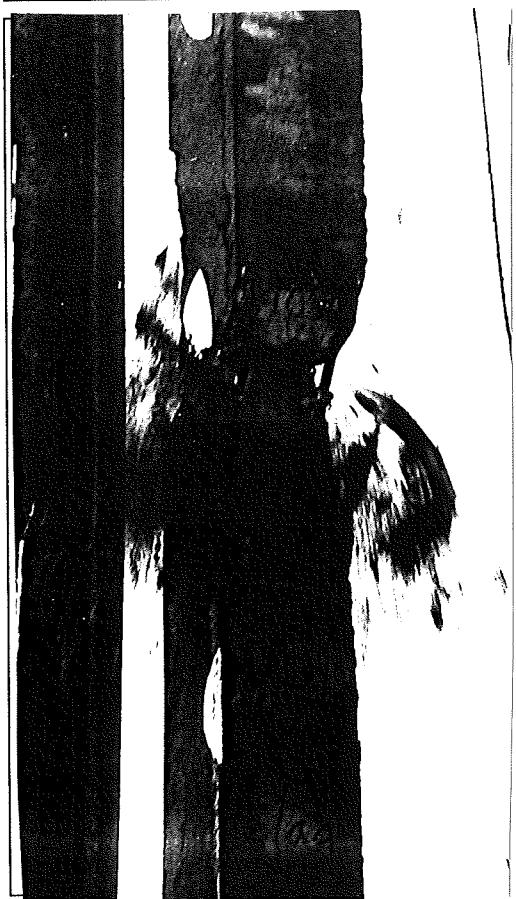
Figur 35. Påle 3 efter ett slag.



Figur 36. Påle 3 efter två slag.

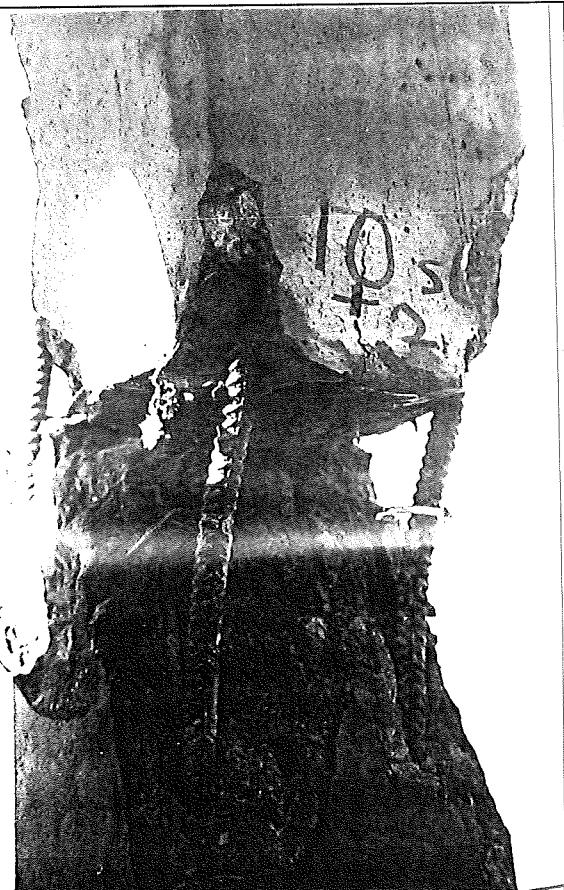


Figur 37. Påle 8 efter 10 slag.



Figur 38. Påle 8. 12:e slaget (nedan till vänster).

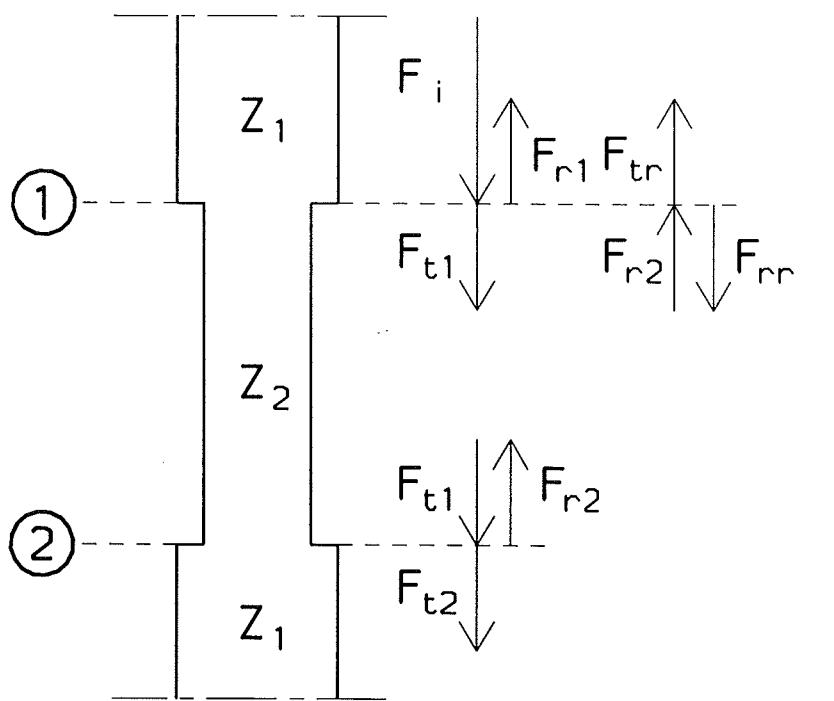
Figur 39. Påle 8 efter 12 slag (nedan till höger).



4.4 Utvärdering

På grund av den bristande överensstämelsen mellan verlig och beräknad betafaktor utfördes en teoretisk studie av effekten av den förhållandesvis kortvariga tvärsnittsförändringen. Reflekterade och transmitterade vågor beräknades för följande tre fall, se figur 40:

- a) Övergång till mindre sektion
- b) Övergång till större sektion
- c) Kombination av a) och b)



Figur 40. Tvärsnittsförändringar.

- a) Övergång från större till mindre sektion (överst)
- b) Övergång från mindre till större sektion (nederst)

$$a) Z_1 > Z_2 \quad Z = EA/c \quad \text{där} \quad Z = \text{akustisk impedans} \\ E = \text{elasticitetsmodul} \\ A = \text{tvärsnittsarea} \\ c = \text{stötvågens gånghastighet}$$

Jämviktsekvation ger

$$F_i + F_r = F_t \quad (1) \quad \text{där} \quad F = \text{kraft} \\ v = \text{partikelhastighet} \\ v_i + v_r = v_t \quad (2) \quad i = \text{initialvåg} \\ r = \text{reflexvåg} \\ t = \text{transmitterad våg}$$

$$\left. \begin{array}{l} F_i = v_i \cdot Z_1 \\ F_r = -v_r \cdot Z_1 \\ F_t = v_t \cdot Z_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} (3) \\ (4) \\ (5) \end{array}$$

insättes i (1) och (2)

$$v_i \cdot Z_1 - v_r \cdot Z_1 = (v_i + v_r) \cdot Z_2$$

$$v_r (Z_1 + Z_2) = v_i (Z_1 - Z_2)$$

$$v_r = v_i \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Uttrycket för v_r insättes i (4):

$$F_r = -v_i \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot Z_1$$

$$\text{med (3) erhålls } F_r = -F_i \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (6)$$

$$F_r \text{ insättes i (1): } F_t = F_i \left(1 - \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)$$

$$\text{Förenkling ger } F_t = 2 F_i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (7)$$

b) Ekvation (1) och (2) enligt a)

$$\left. \begin{array}{l} F_i = v_i \cdot Z_2 \\ F_r = -v_r \cdot Z_2 \\ F_t = v_t \cdot Z_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} (8) \\ (9) \\ (10) \end{array} \quad \text{Insättes i (1) och (2)}$$

$$v_i \cdot Z_2 - v_r \cdot Z_2 = Z_1 (v_i + v_r)$$

$$v_r (Z_1 + Z_2) = v_i (Z_2 - Z_1)$$

$$v_r = v_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$v_r \text{ insättes i (9): } F_r = -v_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} Z_2$$

$$\text{Med (8) erhålls } F_r = -F_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (11)$$

$$F_r \text{ insättes i (1): } F_t = F_i \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)$$

$$\text{Förenkling ger } F_t = 2 F_i \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

$$\text{c) I} \quad \text{Med (6) erhålls: } F_{rl} = -F_i \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$F_{rl} = -F_i \frac{\frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (13)$$

$$\text{II} \quad \text{Med (7) erhålls: } F_{tl} = 2 F_i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$F_{tl} = 2 F_i \frac{\frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (14)$$

III Med (11) erhålls: $F_{r2} = -F_{t1} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$

$$(14) \text{ insättes: } F_{r2} = -2F_i \cdot \frac{\frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_2}{Z_1} - 1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_2}{Z_1}}$$

$$F_{r2} = -2F_i \frac{\frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2} \quad (15)$$

IV Med (12) erhålls: $F_{tr} = 2 F_{r2} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$

$$(15) \text{ insättes: } F_{tr} = -4F_i \frac{\frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2}$$

$$F_{tr} = -4F_i \frac{\frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right)}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^3} \quad (16)$$

Ovanstående resonemang förutsätter att F_i är konstant, vilket kan anses vara fallet för kortvariga sektionsförändringar (10 mm motsvarar ca 3×10^{-6} sekunder i tid).

För att bedöma inverkan av reflexvågorna enligt ovan, studeras den "uppfatgående vågen" från sektionsförändringen. Denna kraft $F_{up} = F_{rl} + F_{tr}$ motsvarar förändringen i krafter vid mätstället ($\Delta u/2$ enligt Rausche, Goble).

$$\frac{\Delta u}{2} = F_{rl} + F_{tr}, \quad \alpha = \frac{\Delta u}{2(F_i - \Delta R)} = \frac{F_{rl} + F_{tr}}{F_i} \quad \text{om } \Delta R = 0$$

Vid bedömning enligt Rausche, Goble skall alltså detta användas för beräkning av skadornas storlek:

$$\beta_{beräknad} = \frac{1 - \frac{F_{rl} + F_{tr}}{F_i}}{1 + \frac{F_{rl} + F_{tr}}{F_i}}$$

Tabellen nedan ger samband mellan verlig β -faktor och beräknad β -faktor.

β - verlig	F_{rl}/F_i	F_{tr}/F_i	α	β - beräknad
1	0	0	0	1
0,9	-0,05	0,05	0	1
0,8	-0,11	0,11	0	1
0,7	-0,176	0,171	0,005	0,99
0,6	-0,25	0,234	0,016	0,97
0,5	-0,33	0,296	0,037	0,93
0,4	-0,429	0,350	0,079	0,85
0,3	-0,538	0,382	0,156	0,73
0,2	-0,667	0,37	0,297	0,54
0,1	-0,818	0,27	0,548	0,29
0	-1	0		0

4.5 Slutsatser

Resultaten visar att möjligheten att upptäcka en artificiell skada av de typer som ingick i försöksserien är beroende av den typ av slagdon som används. Då handslägga används

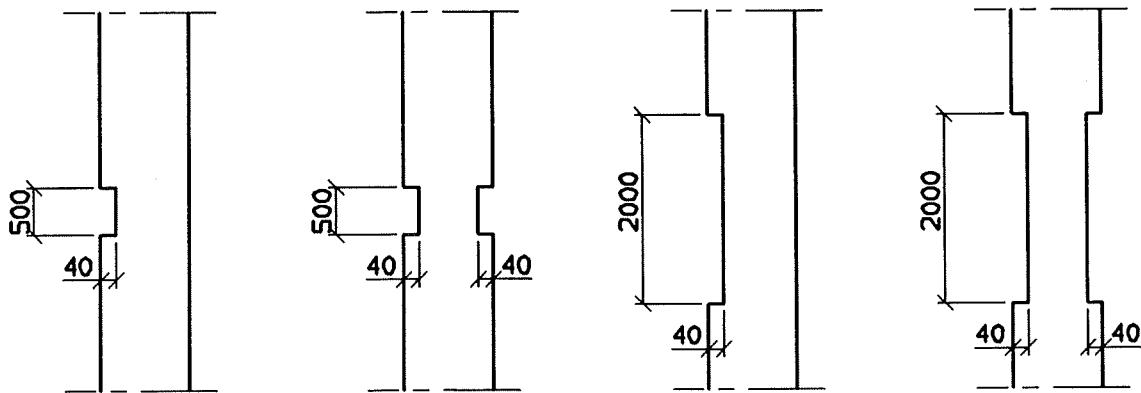
erhålls en kortvarig puls med liten stigtid. Denna kortvariga puls har möjlighet att reagera bättre för en skada med liten utsträckning än stötvågen från en hejare som är flackare och mjukare. Det innebär att läget för skadan kan beräknas mer exakt vid användning av handslägga. Viktigt är också en hög frekvens för digitaliseringen, annars kan man tappa inverkan av små skador. Vanligtvis används högre frekvenser vid low-strain mätningar än vid high-strain mätningar.

Teorin för beräkning av betafaktor förutsätter som tidigare nämnts att en tvärsnittsförändring har en viss utsträckning. Då de artificiella skadorna var mycket begränsade i utsträckning erhölls stora avvikelser mellan den verkliga och den beräknade betafaktorn. En ytterligare försöksserie med mer realistiska "skador" bedömdes vara nödvändig för undersöka tillförlitligheten hos betafaktorn. Denna försöksserie redovisas i kapitel 5.

5. Försöksomgång 2 (1990-1991)

5.1 Testpålar

Fyra pålelement med tvärsnitt 235 mm x 235 mm och längden 11 m tillverkades. De var försedda med bajonettskarv i ena änden och sprickring i andra änden (överpålar). Sektionsminskningar erhölls genom att cellplast med tjocklek 40 mm gjöts in i pålen med början 3,0 m från skarvärenden (mot påltopp) enligt följande:



IVA-1: 0,5 m längd
på ena sidan av
pålen

IVA-2: 0,5 m längd
på två motstående
sidor

IVA-3: 2,0 m längd
på ena sidan av
pålen

IVA-4: 2,0 m längd
på två motstående
sidor

En allmän uppfattning om low-strain metoden är att den inte kan användas för skarvpålar, d v s signalen tränger inte igenom en pålskarv. För att studera detta utökades försöket under arbetets gång med tre skarvpålar med följande benämning och utseende:

ABB: 13,0 m (up) + 7,0 m (öp) = 20,0 m betongpåle med kvadratiskt tvärsnitt med kantmått 235 mm försedd med ABB-skarv.

VP: Motsvarande påle men med VP-skarv (bajonett-typ).

Delta: 13,3 m (up) + 7,0 m (öp) = 20,3 m (inkl bergsko) med triangulärt tvärsnitt med sidmått 340 mm försedd med bultskarv.

5.2 Testförfarande

De fyra förstnämnda pålarna testades när de låg i lager vid Europiles fabrik i Angered utanför Göteborg med "low-strain" metoden i maj 1991.

Ett par veckor senare utfördes "high-strain" test med registrering av både kraft och partikelhastighet under slagning med pålmaskin med 4 tons hydraulhejare. Provningarna utfördes på liknande sätt som i förra etappen, d v s pålarna skarvades i tur och ordning på en tidigare nedslagen underpåle med längden 13,3 m. Mätgivarna var placerade 1,0 m från påltopp varför mätlängden var 23,3 m. Arbetsplatsen var belägen i Rollsbo ind omr i Kungälv. Jordlagerföljden var lös lera överlagrande ett tunt lager morän på berg.

I början av augusti 1991 slogs testpålarna ned utanför Pålgruppens fabrik i Kungsbacka. Såväl low-strain som high-strain test utfördes vid detta tillfälle. Dessutom utfördes low-strain test två veckor senare för att bedöma om sektionsförändringarna var lättare (eller svårare) att upptäcka när pålarna stått i jorden en tid. Resultaten från det senare tillfället utvärderades även med datorprogrammet PITWAP. I november 1991 utfördes ytterligare en low-strain test.

De tre tillkomna skarvpålarna slogs ned samtidigt med övriga testpålar utanför fabriken i Kungsbacka. De testades med low-strain metoden strax efter slagningen samt efter två veckor och tre månader.

Omfattningen av försöken är sammanställda i följande tabell.

Påle	Datum				
	910502	910523	910807	910821	911115
IVA-1	Low	High	Low+High	Low	Low
IVA-2	Low	High	Low+High	Low	Low
IVA-3	Low	High	Low+High	Low	Low
IVA 4	Low	High	Low+High	Low	Low
ABB	—	—	Low	Low	Low
VP	—	—	Low	Low	Low
Delta	—	—	Low	Low	Low
Kommentar:	Liggande i lager	Drivning i morän + berg	Drivning i lera	Efter- slagning i lera	Efter- slagning i lera

5.3 Resultat

Resultat från low-strain försök redovisas i figur 41-71. Överst visas medelvärde av partikelhastighet (integrerad acceleration) från 4-5 slag med handslägga. I några fall är senare delen av partikelhastighetskurvan förstorad exponentiellt. Detta visas i så fall i figuren under partikelhastighetskurvan där pålens längd och graden av förstoring redovisas. För-

storingen utföres för att tydligare kunna urskilja reflexvågen från pålspetsen samt för att kunna beräkna betafaktorn enligt beskriven metod (se avsnitt 2).

Kurvan längst ned i resp figur visar antingen uppmätt acceleration eller, för de fall där instrumenterad handslägga används, skillnaden mellan partikelhastighet och kraft.

Resultat från high-strain test redovisas i **figur 72-79**. I varje figur visas följande kurvor:

- kraft (F) och partikelhastighet (v)
- nedåt- och uppåtgående stötvåg
- totalt drivningsmotstånd samt bärformåga beräknad med $J_c=0,3$ som funktion av tiden
- rörelse (D) och energi (E) som funktion av tiden

Följande beteckningar används i utskriften:

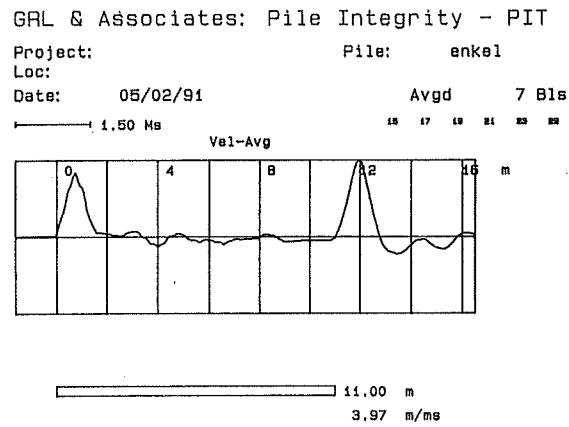
VMX: max partikelhastighet (cm/s)

RMX: bärformåga beräknad med $J_c=0,3$ (Mp)

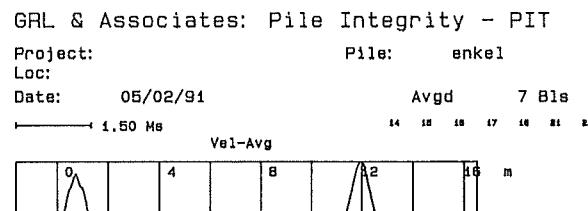
FMX: max kraft (Mp)

BTA: beta-faktor

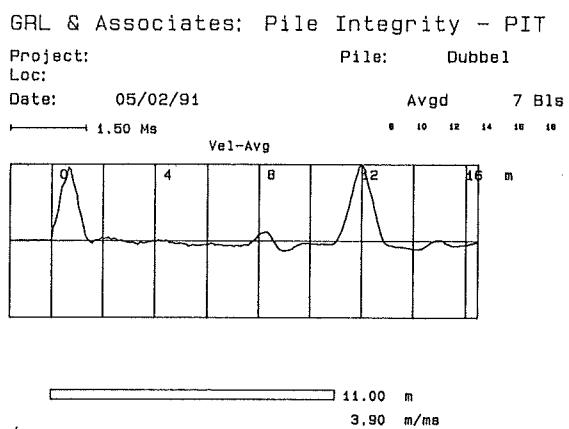
EMX: max överförd energi (Mp-cm)



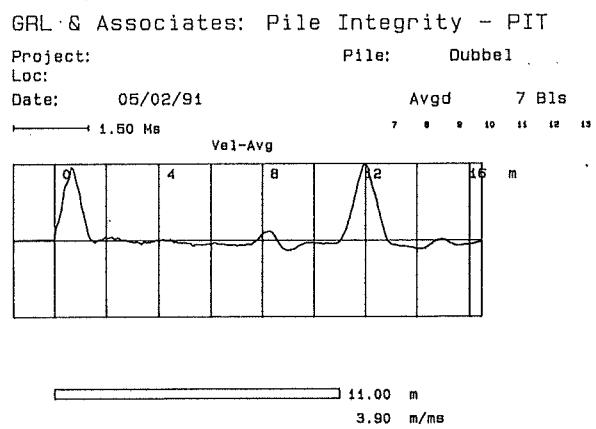
Figur 41. Low strain test, IVA 1, 910502.



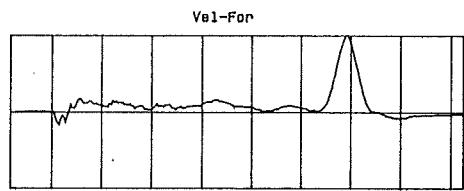
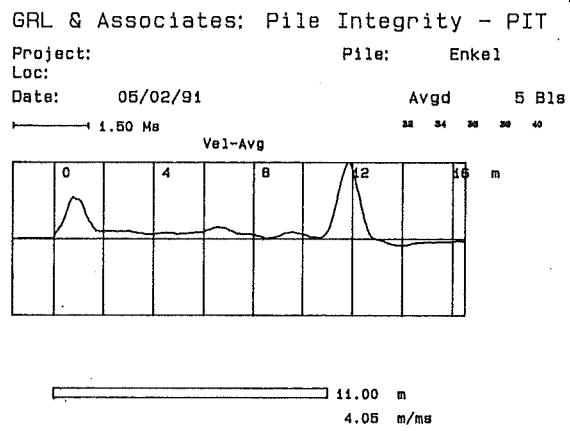
Figur 42. Low strain test, IVA 1, 910502.



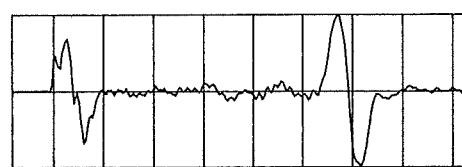
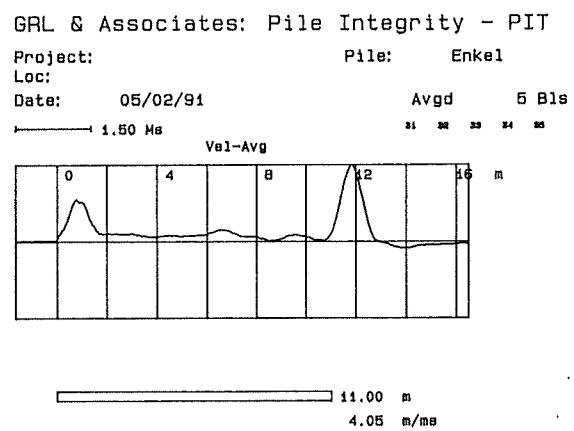
Figur 43. Low strain test, IVA 2, 910502.



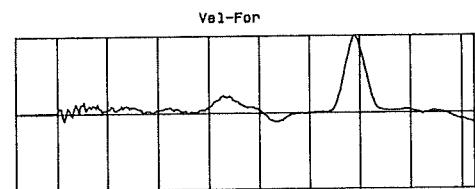
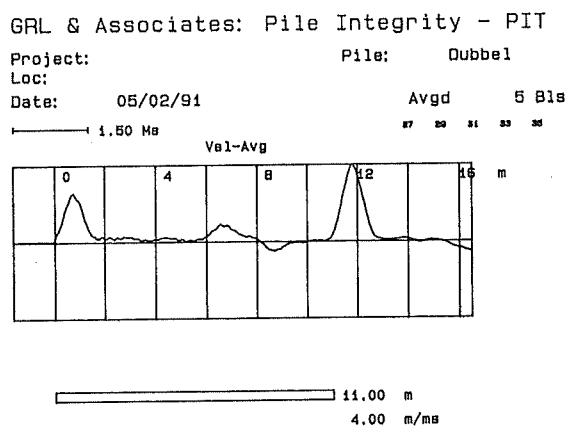
Figur 44. Low strain test, IVA 2, 910502.



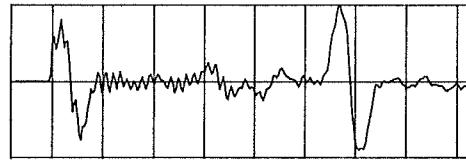
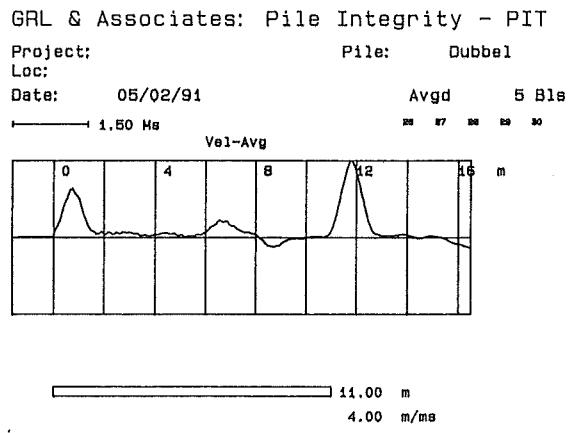
Figur 45. Low strain test, IVA 3, 910502.



Figur 46. Low strain test, IVA 3, 910502.



Figur 47. Low strain test, IVA 4, 910502.

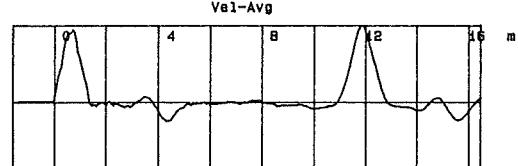


Figur 48. Low strain test, IVA 4, 910502.

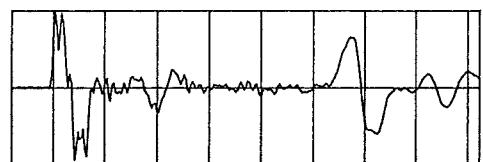
GRL & Associates: Pile Integrity - PIT
 Project: Dubbel
 Loc: Skarv
 Date: 05/02/91

Avgd 5 Bls

1.50 Ms



11.00 m
3.90 m/ms

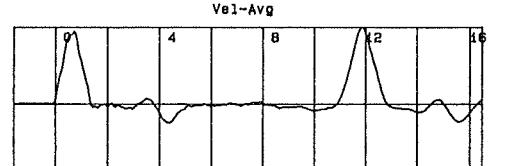


Figur 49. Low strain test, IVA 2, 910502.
 Skarv.

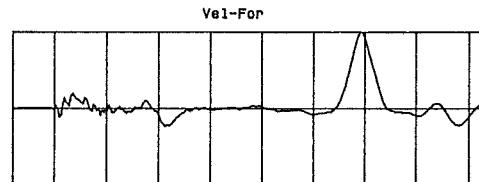
GRL & Associates: Pile Integrity - PIT
 Project: Dubbel
 Loc: Skarv
 Date: 05/02/91

Avgd 5 Bls

1.50 Ms



11.00 m
3.90 m/ms

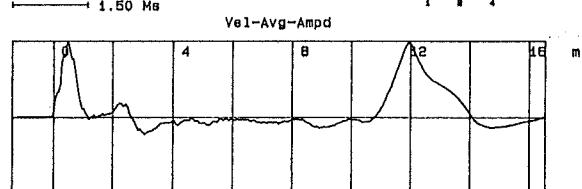


Figur 50. Low strain test, IVA 2, 910502.
 Skarv.

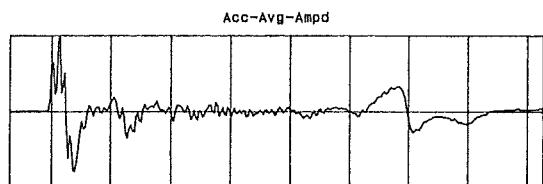
GRL & Associates: Pile Integrity - PIT
 Project: 910807 Pile: IVA-1
 Loc:
 Date: 08/07/91

Avgd 3 Bls

1.50 Ms



4.0
11.00 m
3.40 m/ms

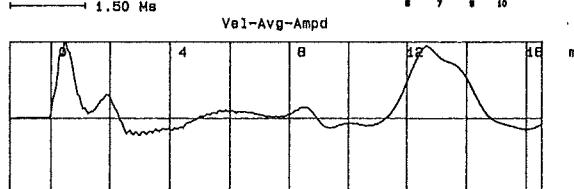


Figur 51. Low strain test, IVA 1, 910807.

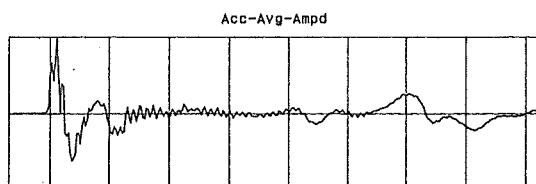
GRL & Associates: Pile Integrity - PIT
 Project: 910807 Pile: IVA-2
 Loc:
 Date: 08/07/91

Avgd 4 Bls

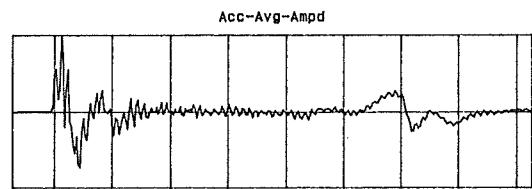
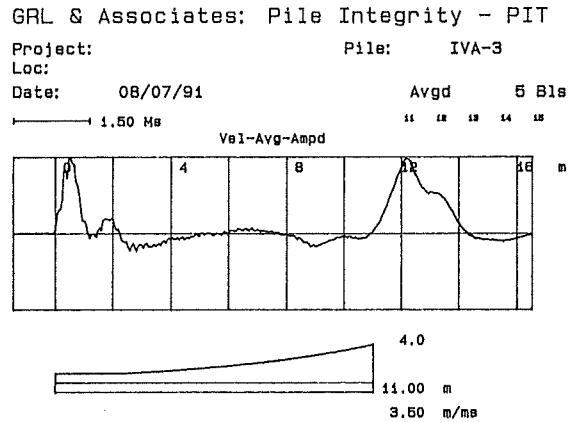
1.50 Ms



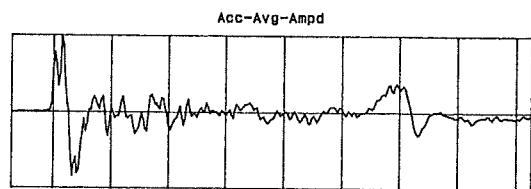
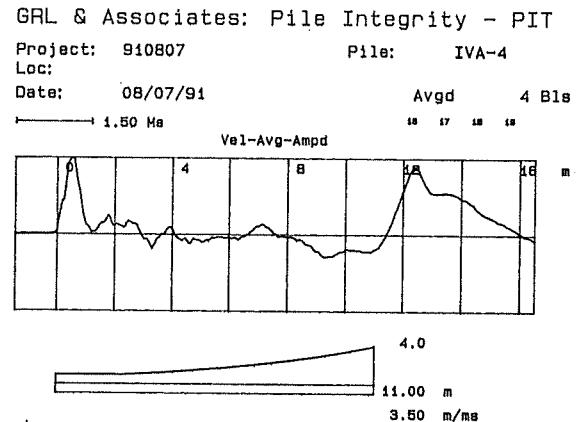
3.6
11.00 m
3.40 m/ms



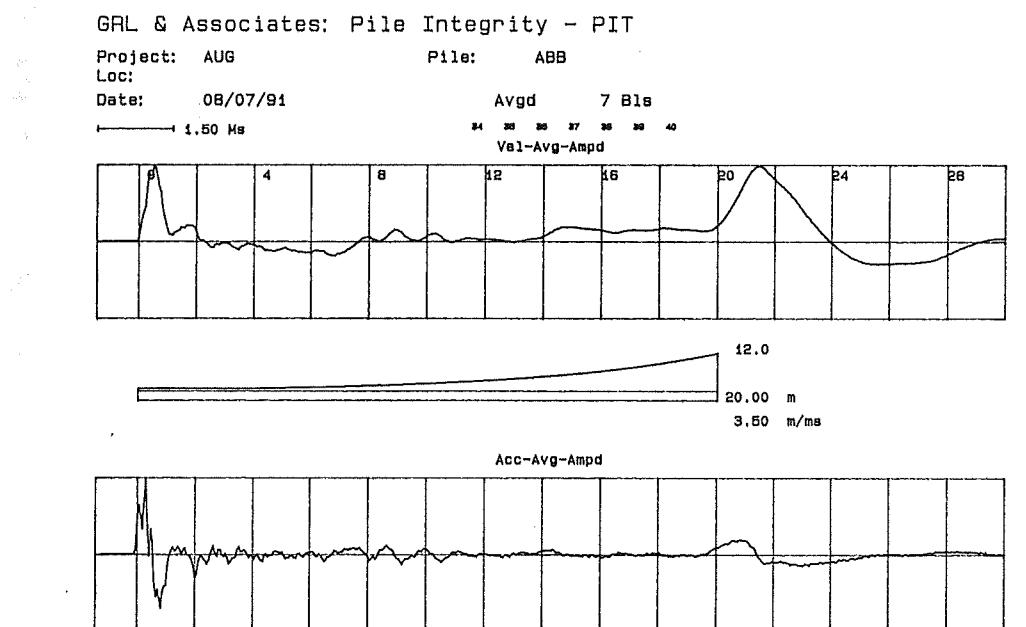
Figur 52. Low strain test, IVA 2, 910807.



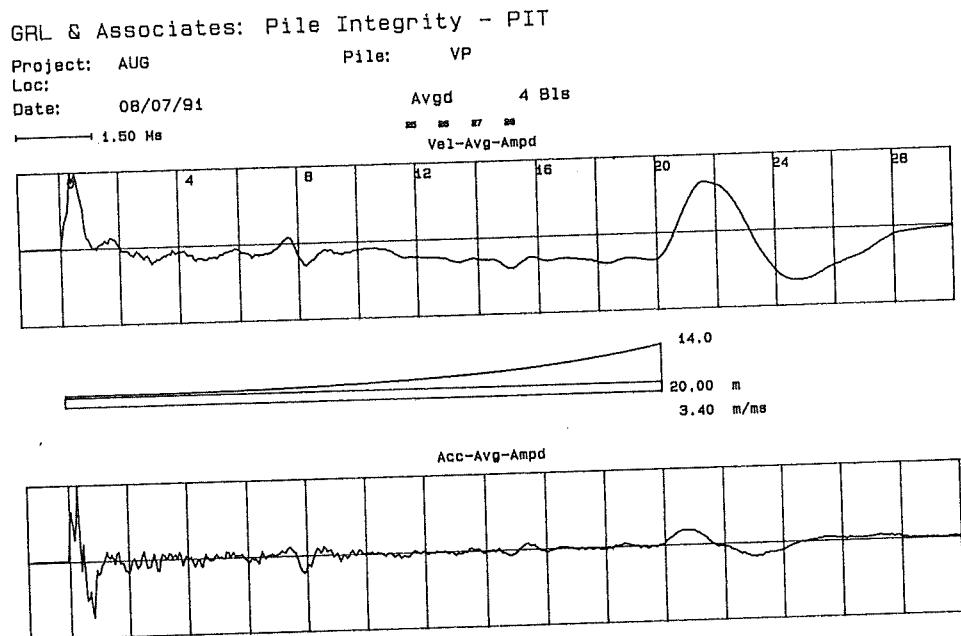
Figur 53. Low strain test, IVA 3, 910807.



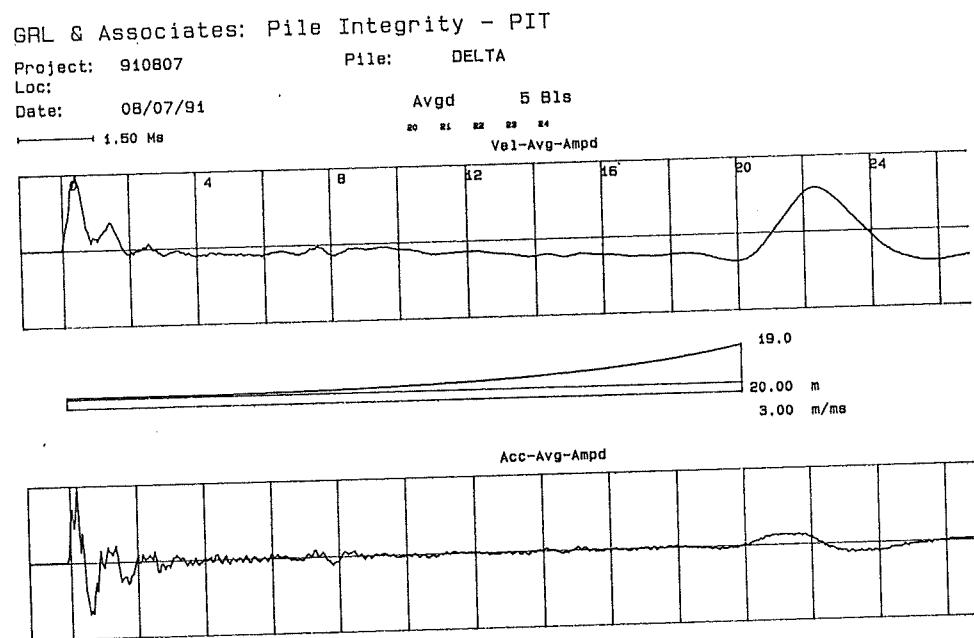
Figur 54. Low strain test, IVA 4, 910807.



Figur 55. Low strain test, ABB, 910807.

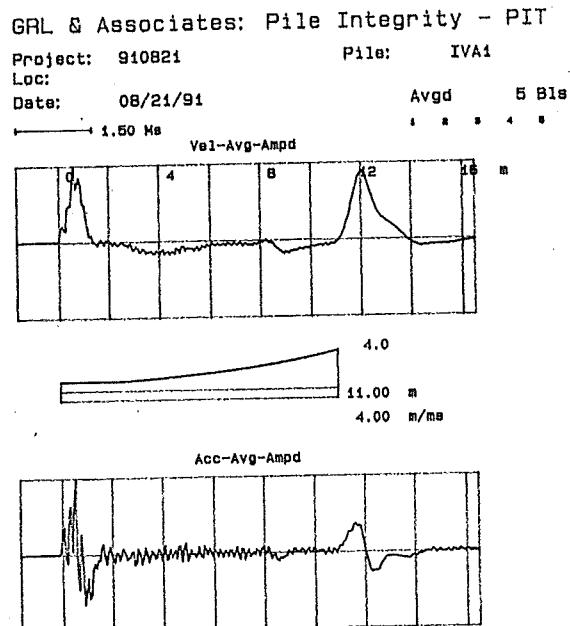


Figur 56. Low strain test, VP, 910807.

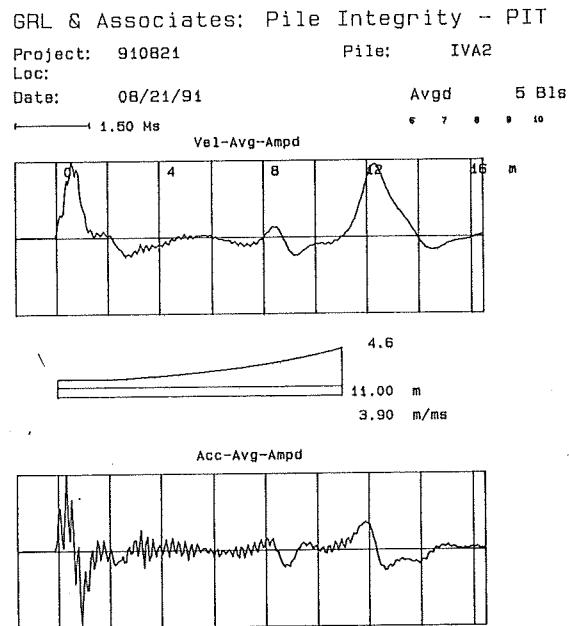


Figur 57. Low strain test, Delta, 910807.

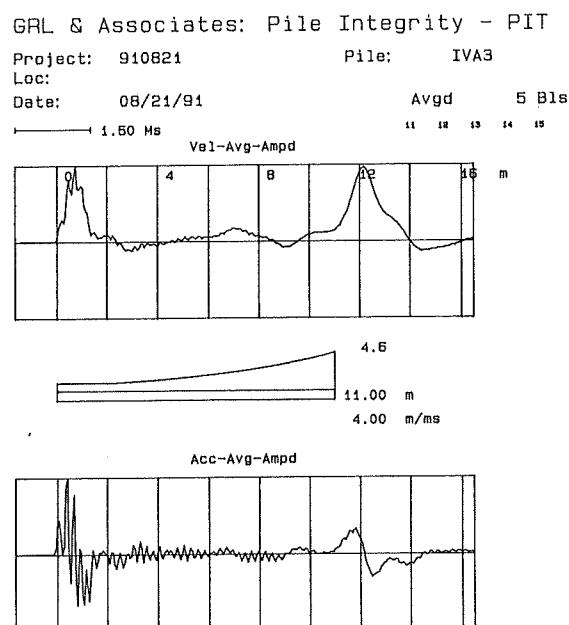
Integritetskontroll av pålar med stötvågsmätning



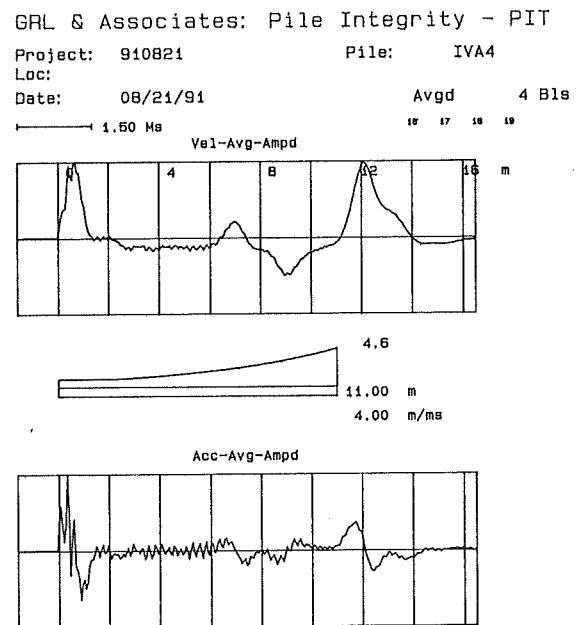
Figur 58. Low strain test, IVA 1, 910821.



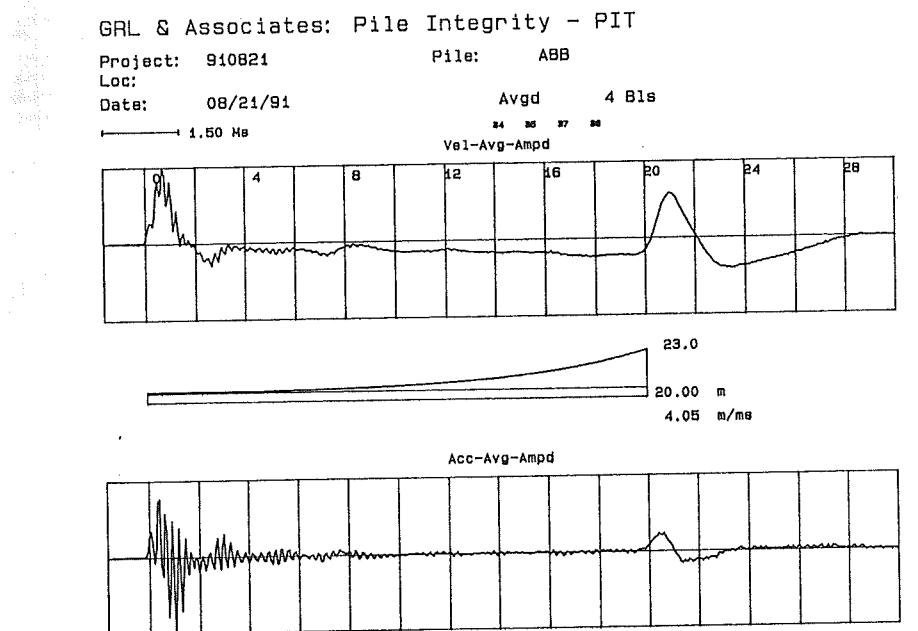
Figur 59. Low strain test, IVA 2, 910821.



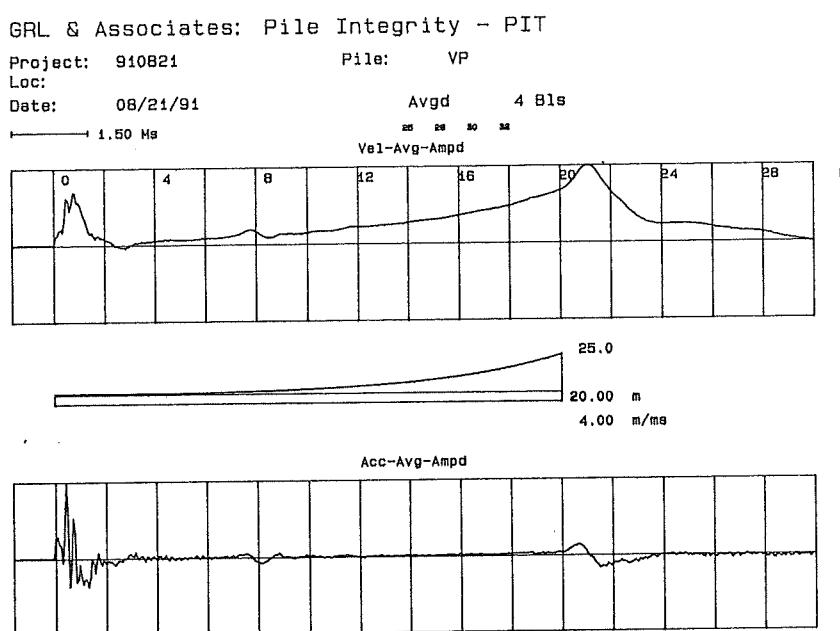
Figur 60. Low strain test, IVA 3, 910821.



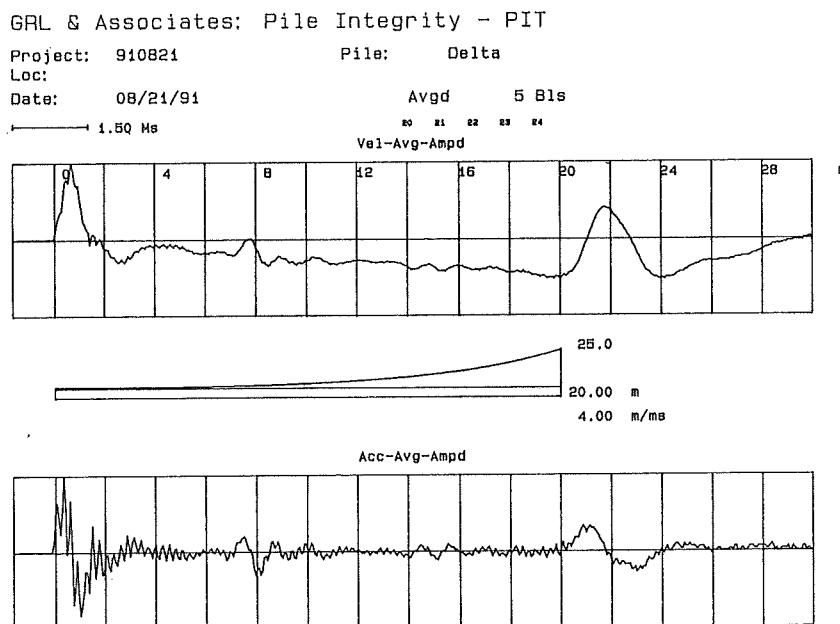
Figur 61. Low strain test, IVA 4, 910821.



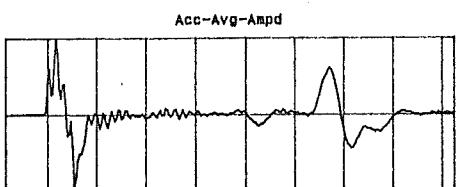
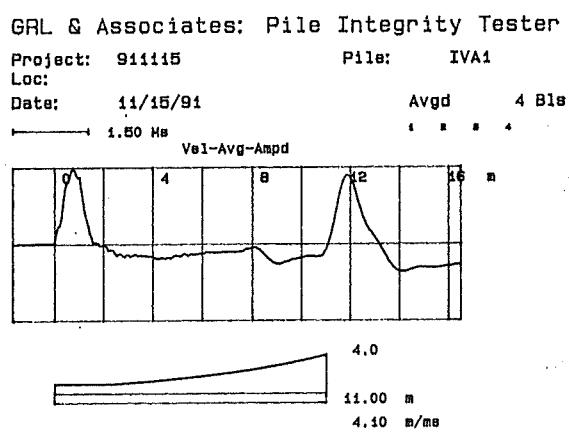
Figur 62. Low strain test, ABB, 910821.



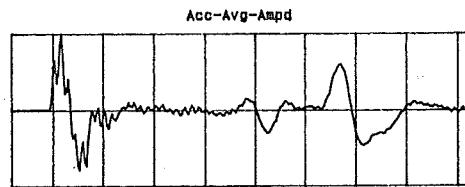
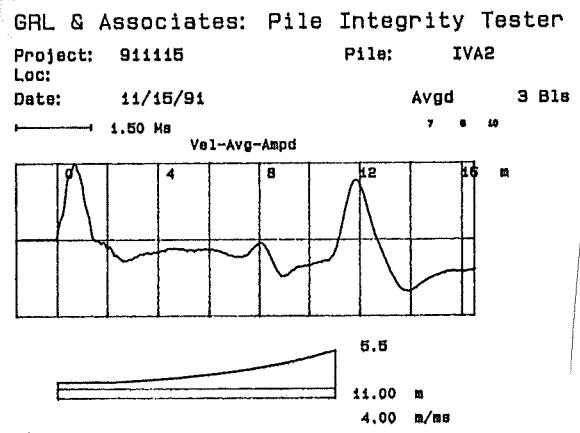
Figur 63. Low strain test, VP, 910821.



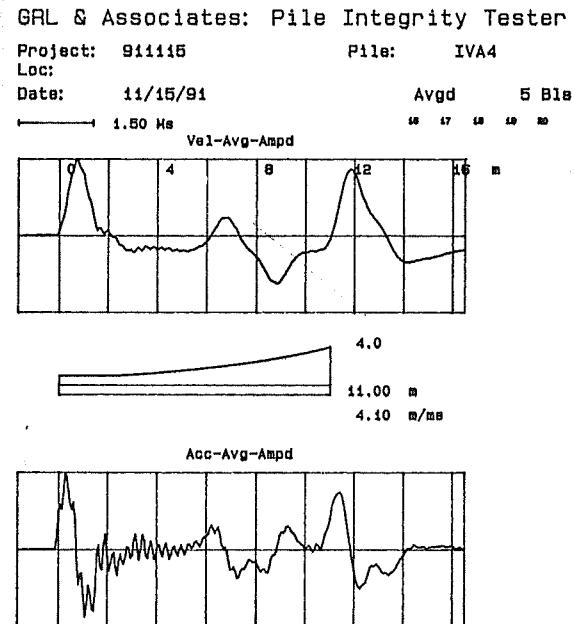
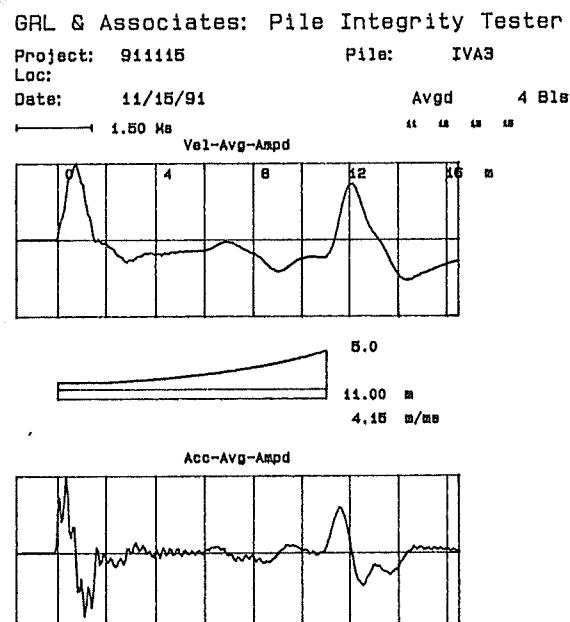
Figur 64. Low strain test, Delta, 910821.



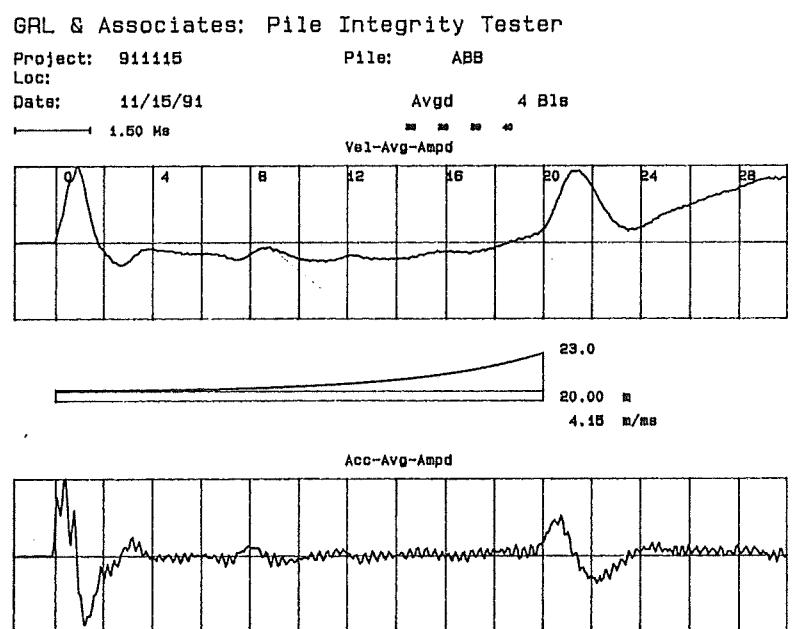
Figur 65. Low strain test, IVA 1, 911115.



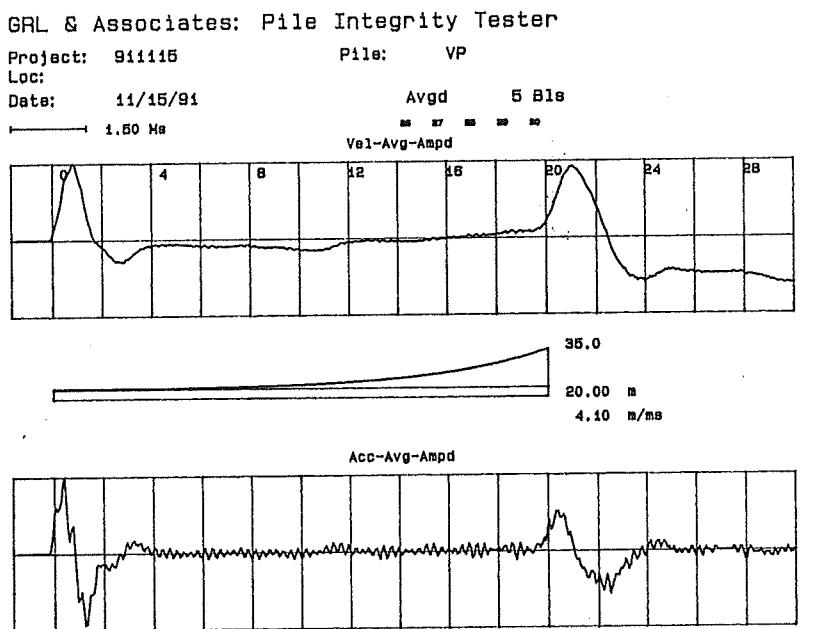
Figur 66. Low strain test, IVA 2, 911115.



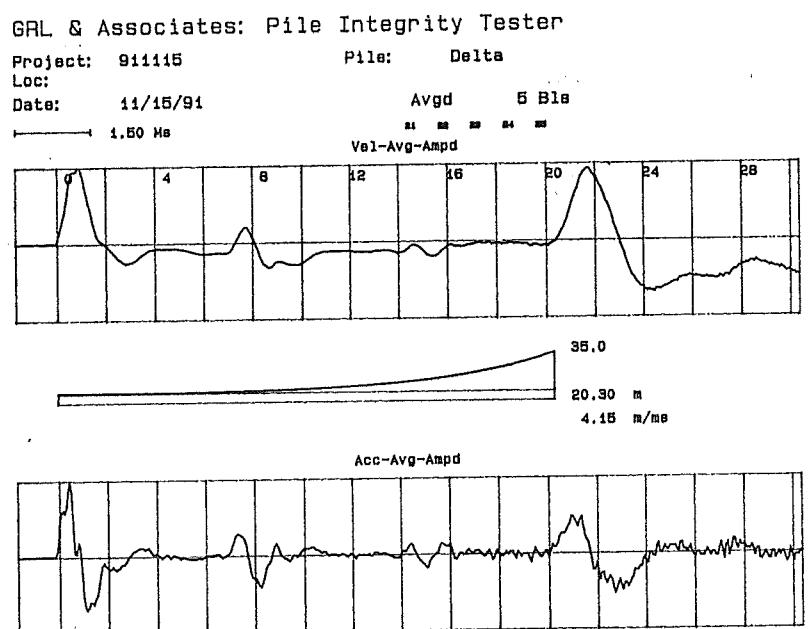
Figur 67. Low strain test, IVA 3, 911115. Figur 68. Low strain test, IVA 4, 911115.



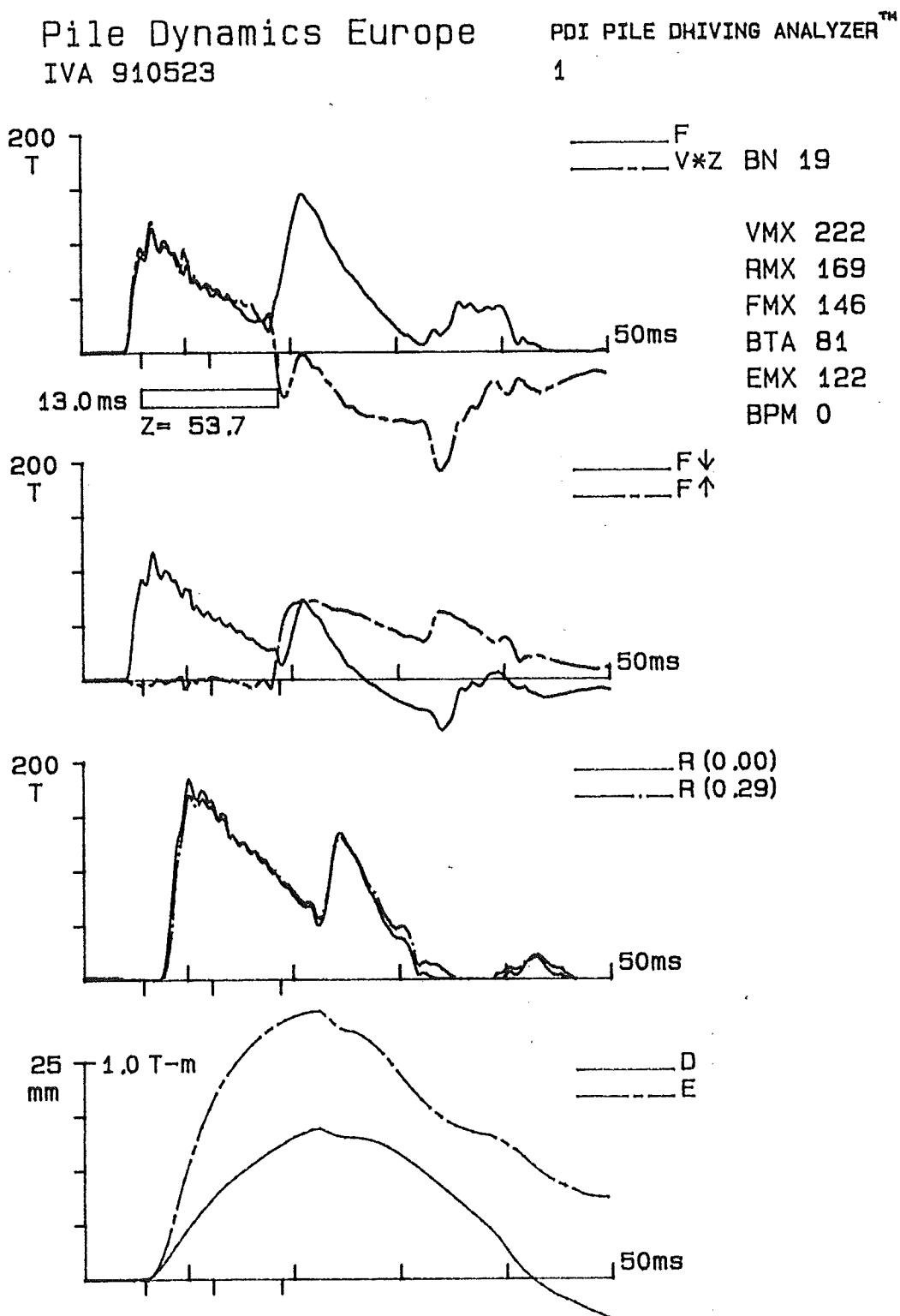
Figur 69. Low strain test, ABB, 911115.



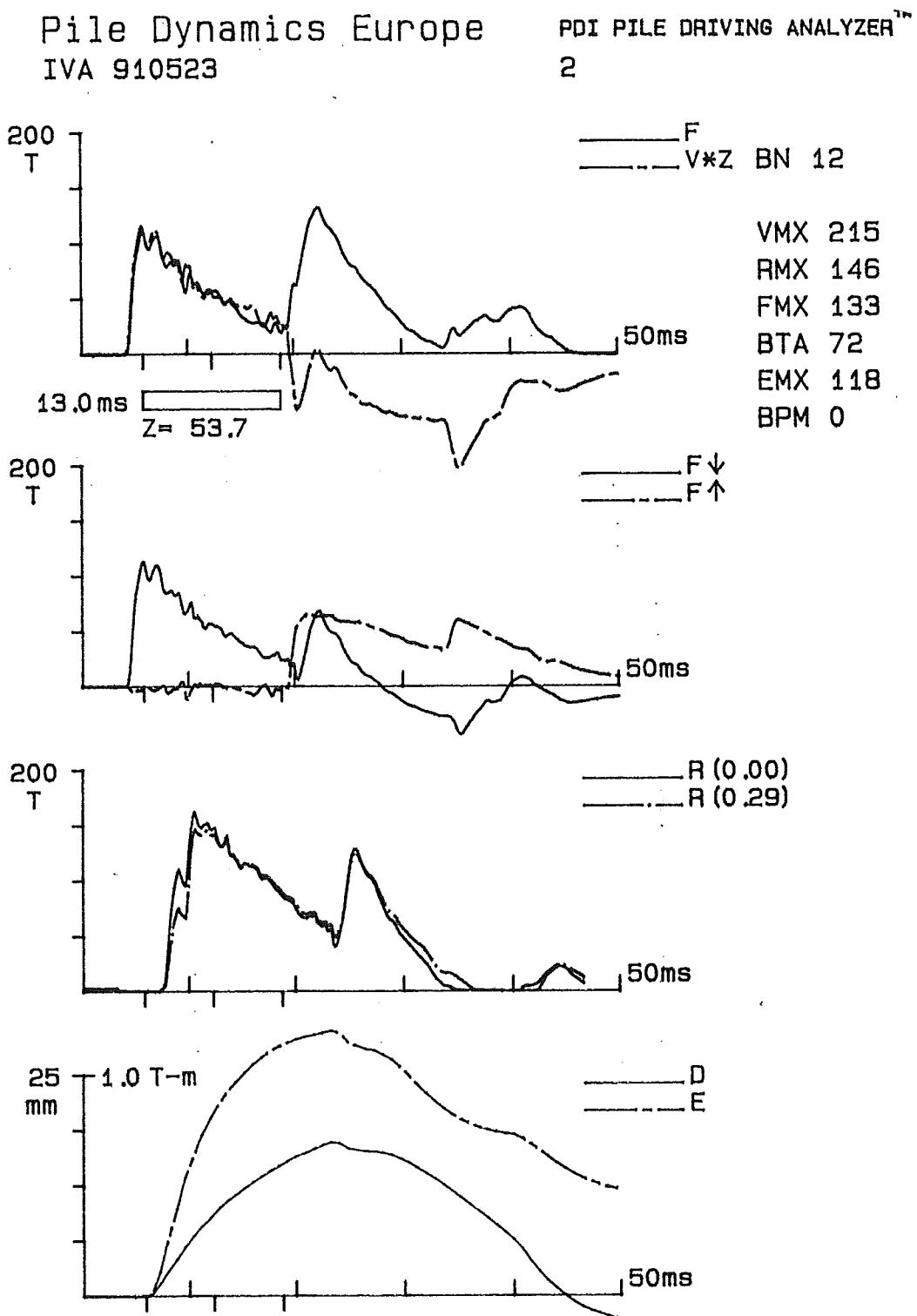
Figur 70. Low strain test, VP, 911115.



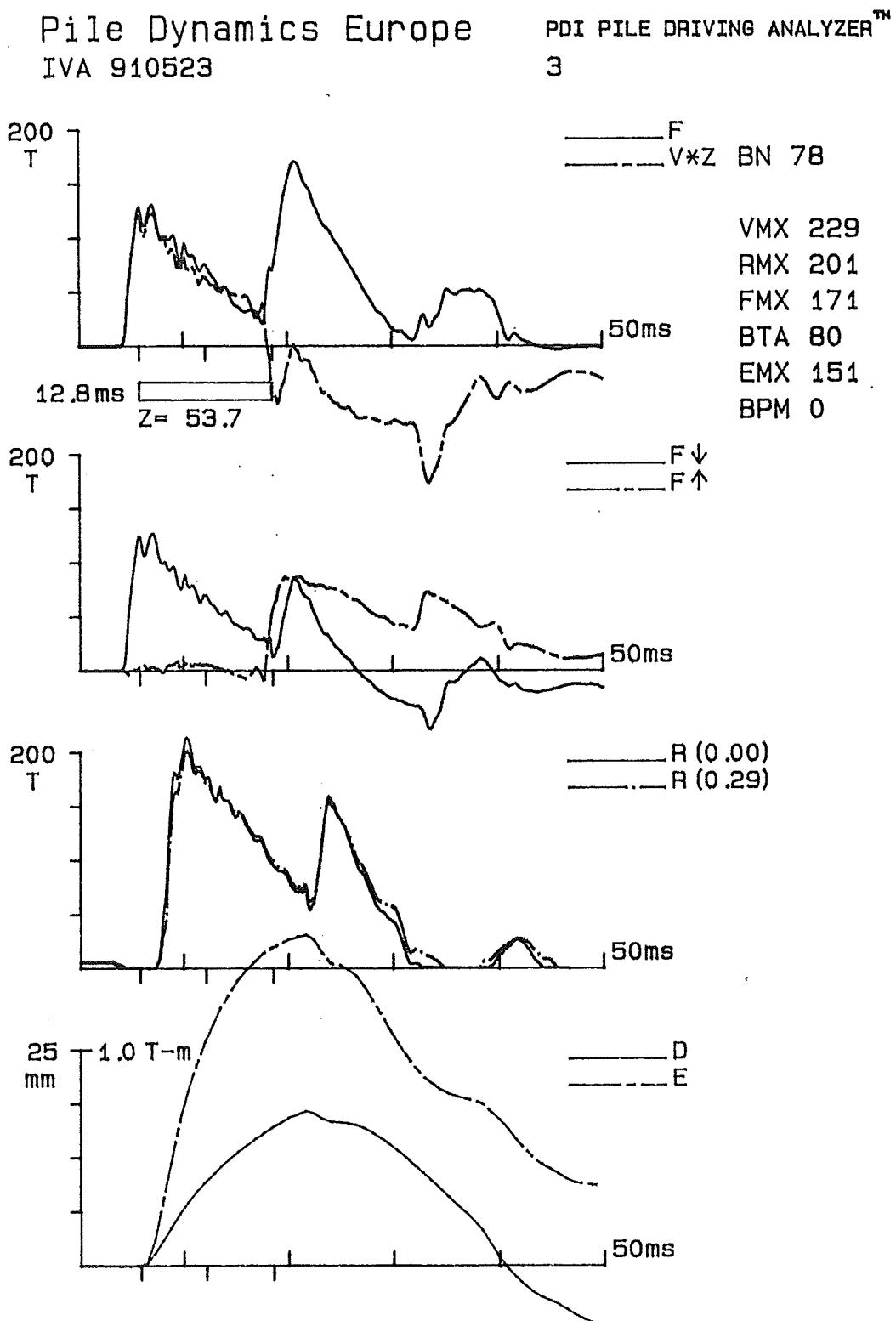
Figur 71. Low strain test, Delta, 911115.



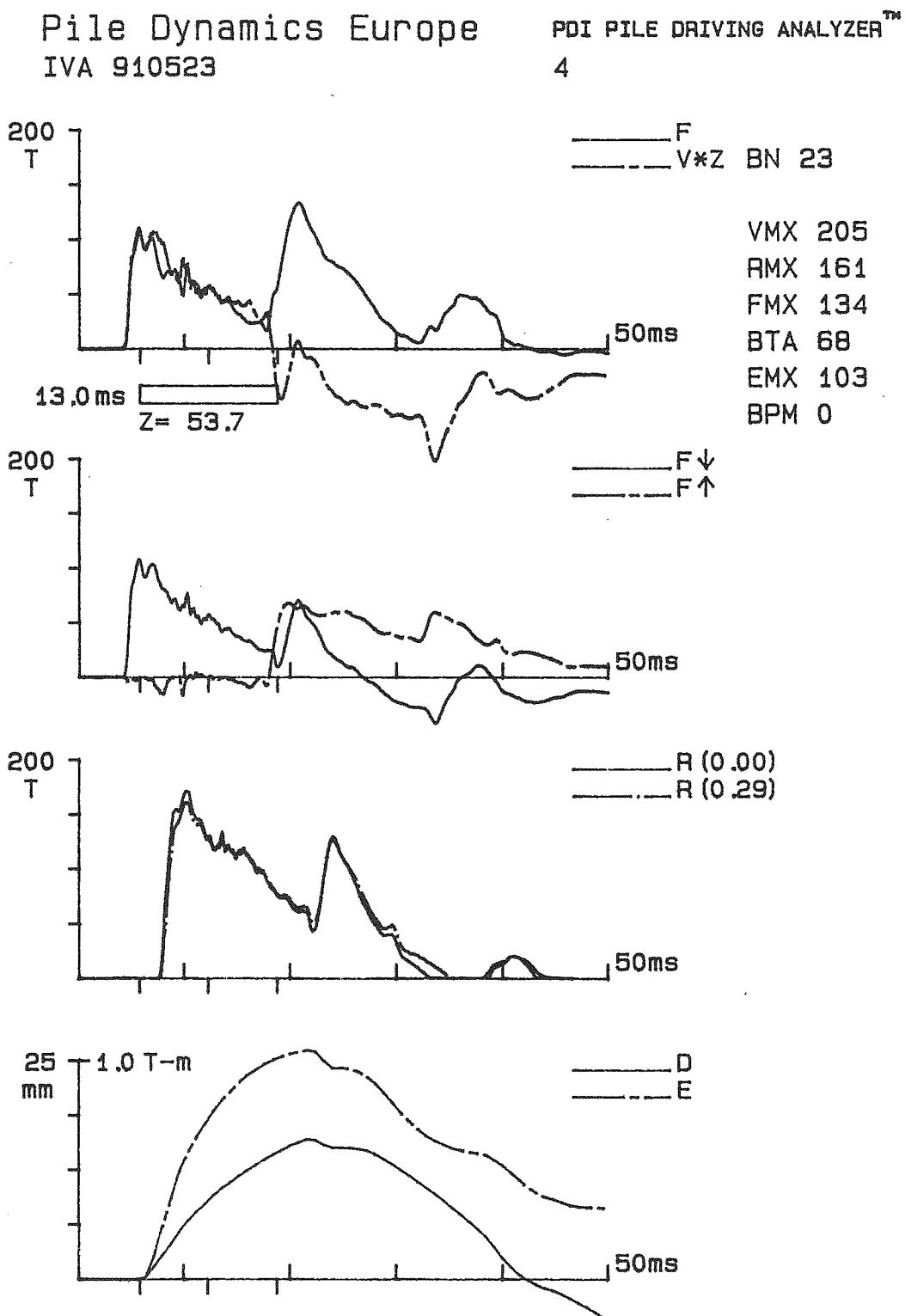
Figur 72. High strain test, IVA 1, 910523.



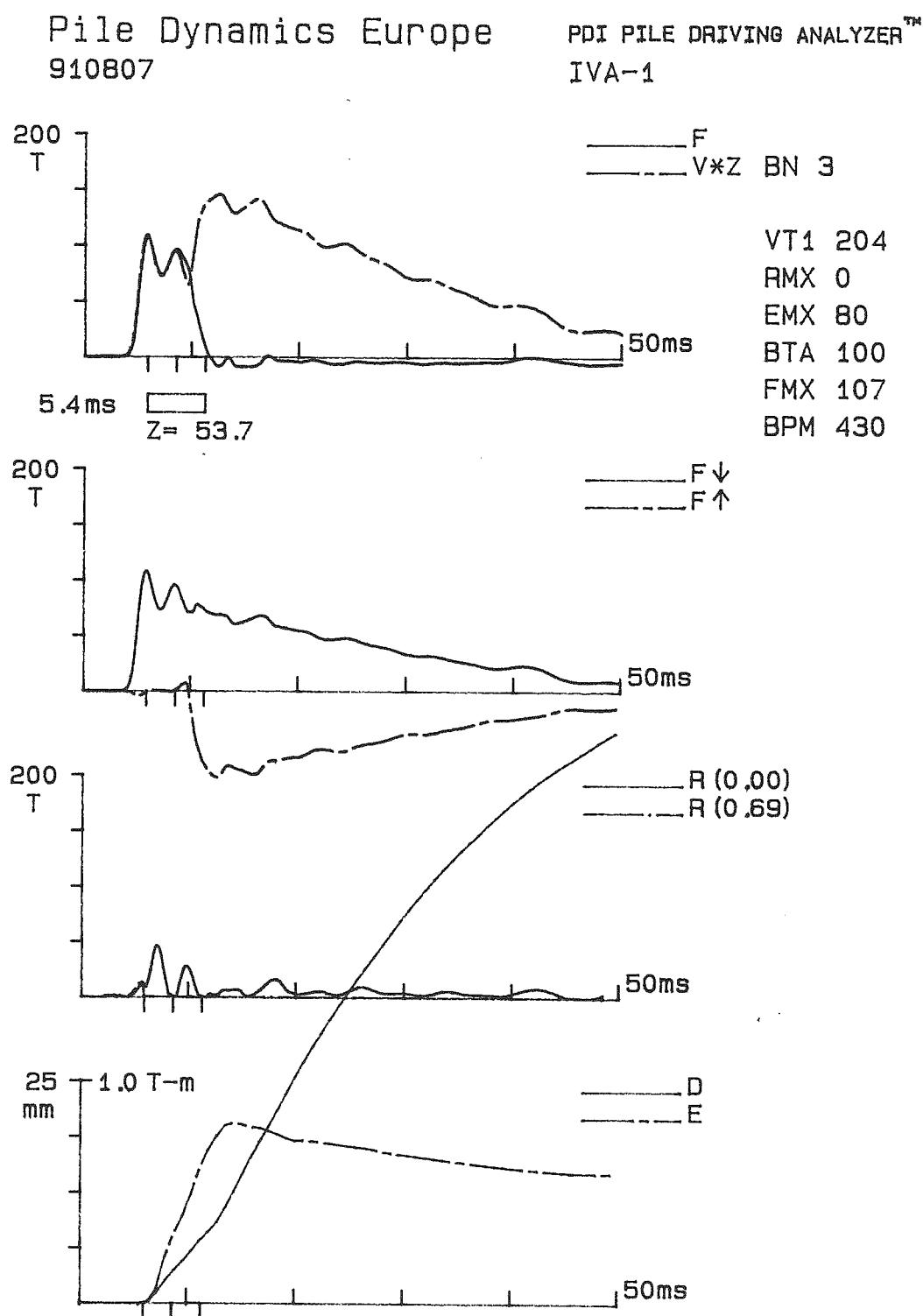
Figur 73. High strain test, IVA 2, 910523.



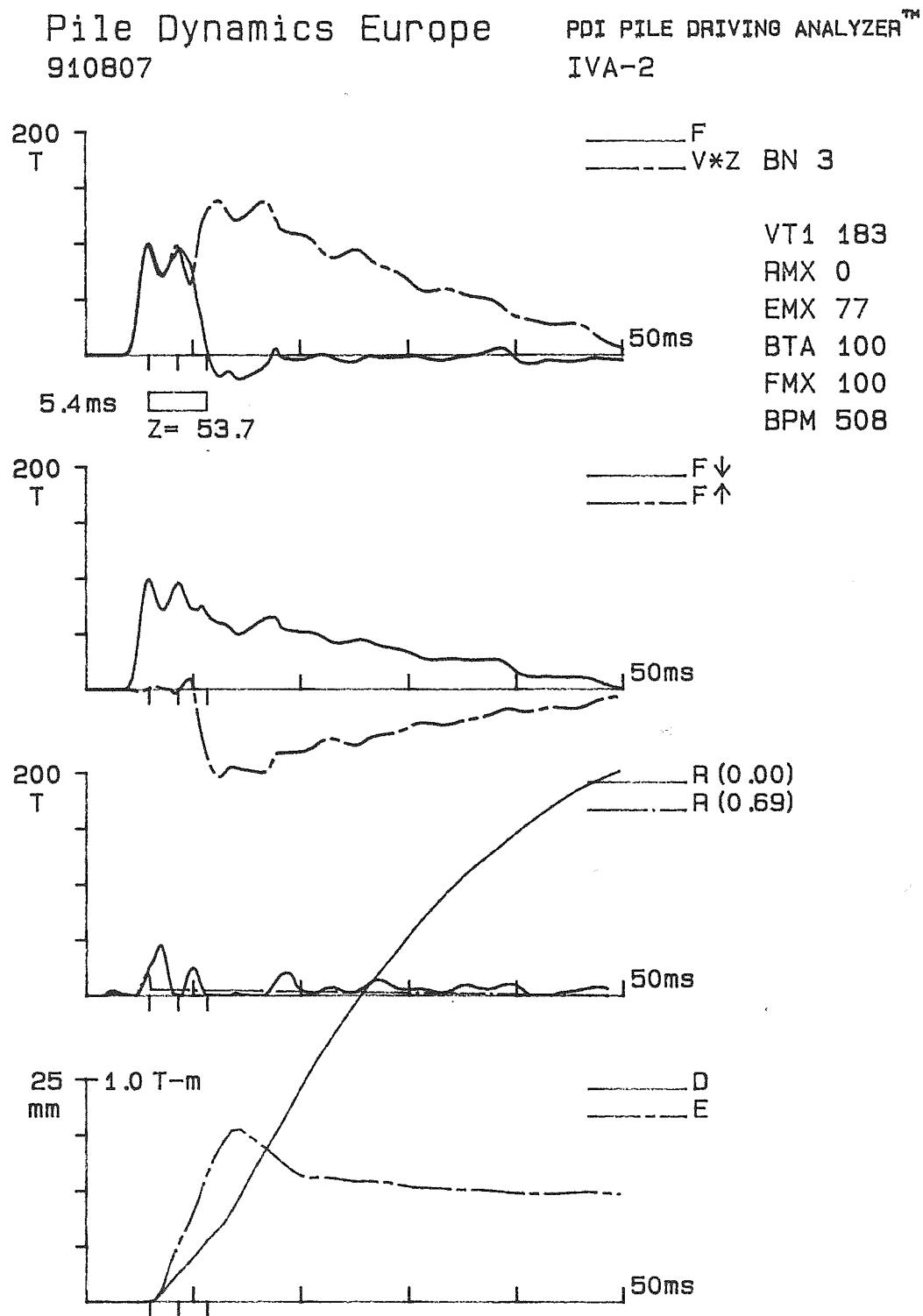
Figur 74. High strain test, IVA 3, 910523.



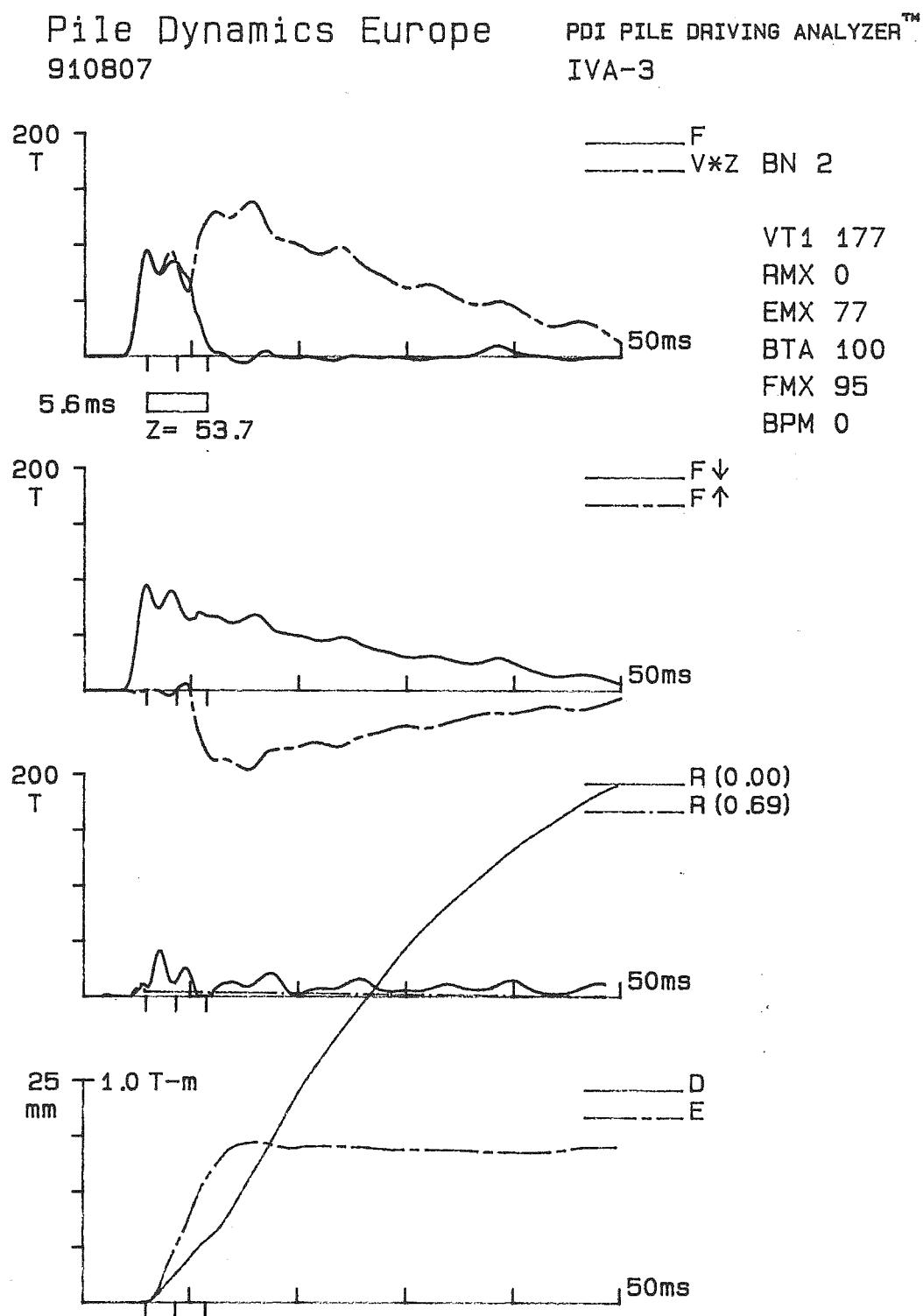
Figur 75. High strain test, IVA 4, 910523.



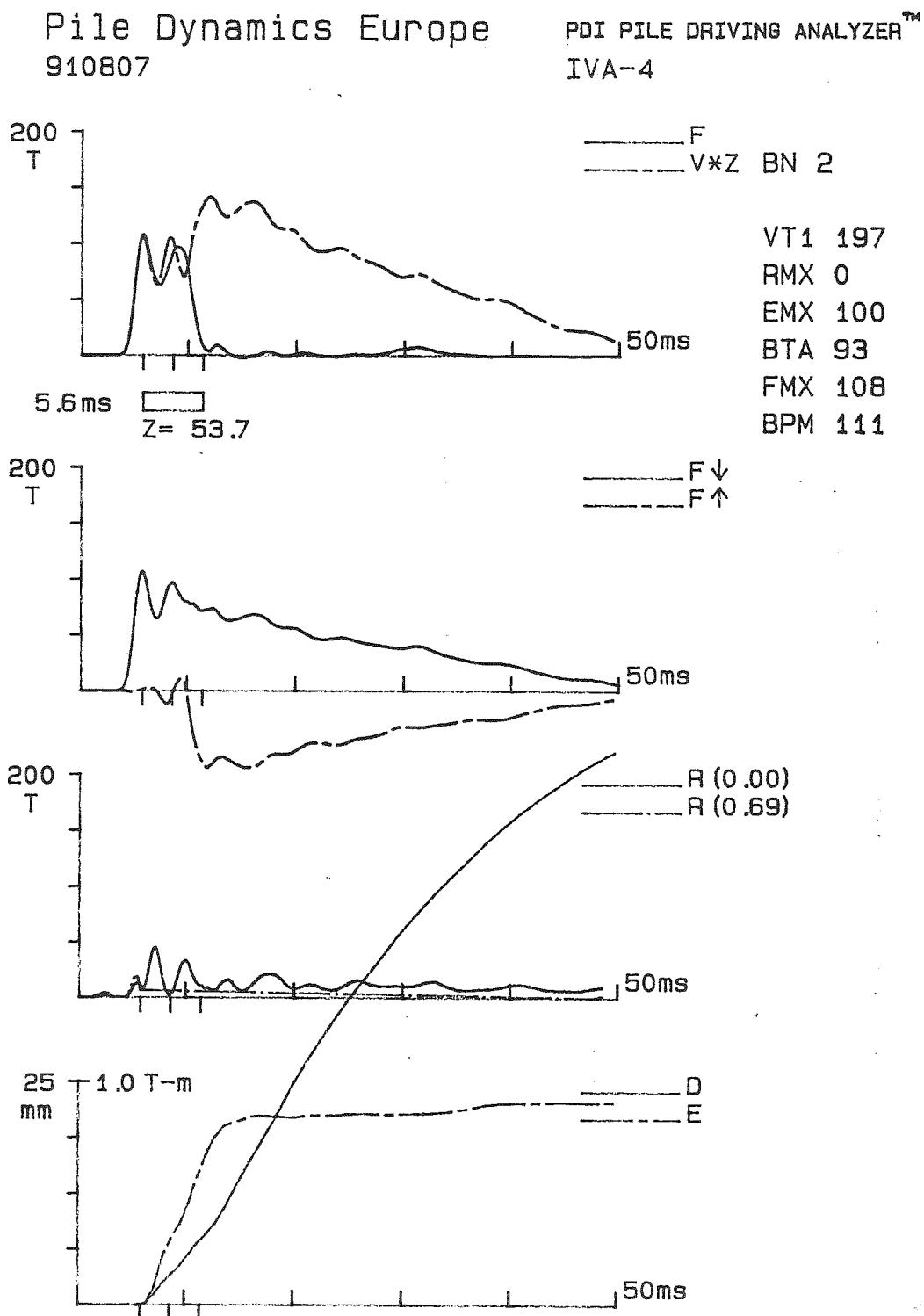
Figur 76. High strain test, IVA 1, 910807.



Figur 77. High strain test, IVA 2, 910807.



Figur 78. High strain test, IVA 3, 910807.



Figur 79. High strain test, IVA 4, 910807.

5.3.1 Beräkning av beta-faktor

Beräkning av beta-faktor enl metod för low-strain test resp high-strain test beskriven av Rausche, Pile Dynamics, Inc. [2] ger följande värden:

Påle	Beräknad beta-faktor							Verlig beta- faktor	
	Low-strain test					High-strain test			
	910502*	910502**	910807	910821	911115	910523	910807		
IVA-1	0,95	1,00	1,00	0,97	0,95	1,00	1,00	0,83	
IVA-2	0,82	0,89	0,92	0,78	0,85	(0,96)	1,00	0,68	
IVA-3	0,95	0,95	1,00	0,89	0,89	1,00	1,00	0,83	
IVA-4	0,82	0,87	0,85	0,73	0,66	0,75	0,93	0,68	

* Avser accelerometer applicerad vid "pålskallen". Horisontell provning

** Avser accelerometer applicerad vid skarv. Horisontell provning.

Kommentarer

Det bör observeras att high-strain mätningen 910523 utfördes när resp testpåle var ihop-skarvad med en underpåle. Detta var inte fallet vid mätningen 910807.

Mätningen 910807 utfördes vid slagning i lös lera. Normalt utvärderas inte integritet på detta sätt under sådana förhållanden.

Resultatet från IVA-2 910523 skulle vid rutinmässig utvärdering betraktas som något bristande proportionalitet mellan kraft och partikelhastighet och inte bedömas som en defekt.

I figurerna anges andra värden på beta-faktorn än ovan. Det beror på att den automatiska beräkningen härför sig till den största avvikelsen mellan kraft och partikelhastighet, vilken inträffar vid skarven.

Vid mätningen 910523 kunde en partikelhastighetsökning strax före 2L/c (nära pålspetsen) konstateras. Beta-faktorn kan beräknas till ca 0,84 för påle IVA-4. Efter demontering av överpålen kunde underpålen dras upp varvid en stukning kunde konstateras 3-4 m från pålspetsen. Trots detta erhålls en stor tryckreflex från pålspetsen. För att ytterligare studera detta utfördes en CAPWAP-analys på ett av slagen. Resultatet redovisas i **figur 80-82**. Vid analysen itererades först bärformågan fram på sedvanligt sätt. Därefter modellerades dels den ursprungliga tvärsnittsförändringen och dels en tvärsnittsförändring nära pålspetsen. Dessutom modellerades ett skarvglapp. Överensstämmelsen mellan verlig och datorberäknad kurva blev betydligt bättre efter detta. Anmärkningsvärt är att endast en bärformåga på 1300 kN kunde simuleras trots att Case-metoden indikerade 1600 kN.

Gravare Hermansson
 IVA4 910523 92 01 09
 Blow No. 23

Final CAPWAPC Capacity: Ru 1298.7, Skin 673.5, Toe 625.2 kN									
Soil Sgmnt No.	Depth Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Sum of Ru Up kN	Ru Down kN	Unit Resist. w. Respect to Damping Depth kN/m	Smith Area kN/m ²	Quake s/m	mm
			1298.7						
1	3.0	2.0	.0	1298.7	.0	.00	.00	.639	2.032
2	5.1	4.1	.0	1298.7	.0	.00	.00	.639	2.032
3	7.1	6.1	.0	1298.7	.0	.00	.00	.639	2.032
4	9.1	8.1	.0	1298.7	.0	.00	.00	.639	2.032
5	11.1	10.1	.0	1298.7	.0	.00	.00	.639	2.032
6	13.2	12.2	.0	1298.7	.0	.02	.02	.639	2.032
7	15.2	14.2	.2	1298.4	.3	.11	.12	.639	2.032
8	17.2	16.2	1.5	1297.0	1.7	.72	.77	.639	2.032
9	19.2	18.2	58.0	1238.9	59.8	28.65	30.49	.639	2.032
10	21.3	20.3	243.4	995.5	303.2	120.13	127.83	.639	2.032
11	23.3	22.3	370.3	625.2	673.5	182.75	194.46	.639	2.032
Average Skin Values			61.2			30.20	32.15	.639	2.032
Toe			625.2			11326.72	.430	1.600	
Soil Model Parameters/Extensions									
Case Damping .800									
Unloading Quake (% of loading quake) 50									
Unloading Level (% of Ru) 0									
Resistance Gap (included in Toe Quake) (.mm) .100									
EXTREMA TABLE									
Pile Sgmnt No.	Depth Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress kN/cm ²	max. Tension Stress kN/cm ²	max. Trnsfd. Energy kN-m	max. Veloc. m/s	max. Displ. cm	
1	1.0	1333.2	-3.9	2.42	-.01	10.40	2.0	1.613	
4	4.1	1287.3	-23.4	2.33	-.04	10.04	2.2	1.430	
6	6.1	1331.0	-2.1	2.41	.00	9.70	2.0	1.330	
8	8.1	1249.3	-52.2	2.26	-.09	9.38	2.0	1.250	
11	11.1	1183.1	-144.0	2.14	-.26	8.68	1.9	1.090	
13	13.2	1156.5	-215.1	2.10	-.39	8.02	2.0	.980	
15	15.2	1205.1	-285.6	2.18	-.52	7.34	2.1	.850	
18	18.2	1328.1	-354.9	2.41	-.64	5.95	2.0	.630	
20	20.3	1266.5	-345.8	2.29	-.63	4.27	1.7	.450	
22	22.3	1123.9	-269.2	2.04	-.49	2.38	1.4	.300	
23	23.3	1160.1	-271.1	2.10	-.49	1.49	1.1	.242	
Absolute	2.0			2.43		(T=	36.2 ms)		
	19.2				-.65	(T=	54.5 ms)		

Figur 80. CAPWAP-resultat IVA 4, 910523.

Gravare Hermansson
 IVA4 910523 92 01 09
 Blow No. 23

PILE PROFILE AND PILE MODEL

	Depth m	Area cm ²	E-Modulus kN/cm ²	Spec. Weight kN/m ³	Circumf. m
1	.00	552.00	3800.0	24.500	.940
2	23.30	552.00	3800.0	24.500	.940

Toe Area (m²) .055

Segmnt No.	Depth meter	B.G. Impedance kN/m/s	Imp. Change %	T. Slack mm	C. Slack mm	Circumf. meter
1	1.01	537.75	.00	.000	.000	.940
5	5.07	387.75	-27.89	.000	.000	.940
7	7.09	537.85	.02	.000	.000	.940
8	8.10	537.75	.00	.000	.000	.940
10	10.13	437.75	-18.60	.000	.000	.940
11	11.14	537.75	.00	.000	.000	.940
18	18.23	437.75	-18.60	.000	.000	.940
20	20.26	357.75	-33.47	.000	.000	.940
21	21.27	437.75	-18.60	.000	.000	.940
23	23.30	437.75	-18.60	.000	.000	.940

Pile Damping (%) 3.0, Time Incr (ms) .285, Wave Speed (m/s) 3550.0

IVA4 910523

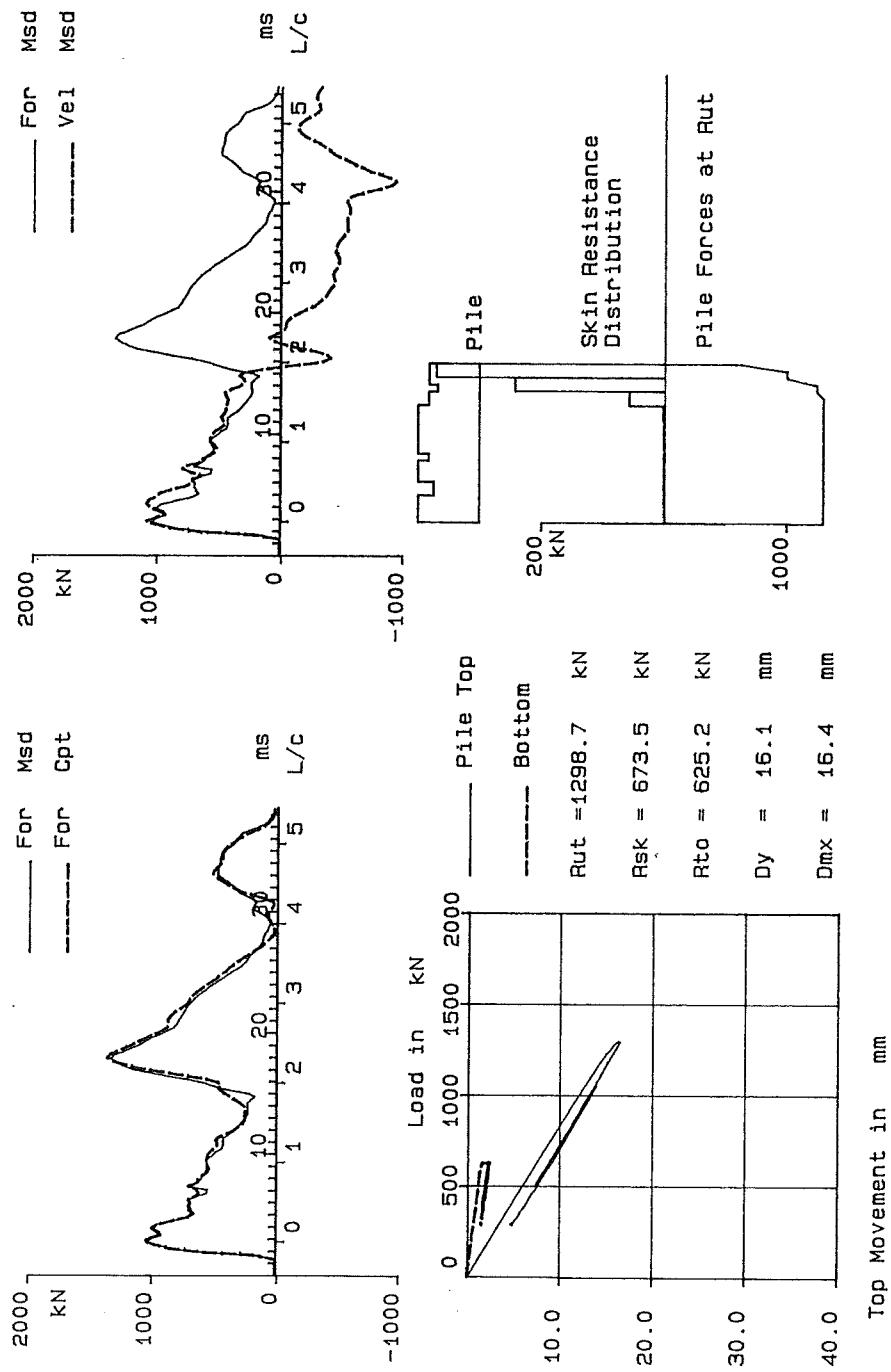
Case Method Capacity Results

	J=0.0	J=0.1	J=0.2	J=0.3	J=0.4	J=0.5	J=0.6	J=0.7	J=0.8	J=0.9
RS1	1344.	1275.	1206.	1137.	1068.	999.	930.	860.	791.	722.
RMX	1632.	1600.	1568.	1536.	1504.	1472.	1440.	1408.	1376.	1344.
RSU	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
RA A2 W	1079.	1181.	0.							
Current CAPWAP	Ru =	1298.7;	Corresponding J(Rs) =		.07;	J(Rx) =		1.00		

VMAX	VFIN	V1*Z	F1	FMAX	DMAX	DFIN	EMAX	EFIN	R HF	R EN
2.01	-.62	1079.8	1041.8	1333.2	1.613	-.058	10.4	4.4	1214.7	2939.2

Figur 81. CAPWAP-resultat IVA 4, 910523.

Gravare Hermansson
IVA4 910523
Blow 23 92 01 09



Figur 82. CAPWAP-resultat IVA 4, 910523.

5.3.2 Beräkning av gånghastighet

Pålarnas gånghastighet (stötvågens utbredningshastighet) från start initialvåg till start reflexvåg har uppmätts till följande värden:

Påle	Gånghastighet i m/s						
	Low - strain test					High - strain test	
	910502*	910502**	910807	910821	911115	910523	910807
IVA-1	3970	4000	3400	4000	4100	3430	3740
IVA-2	3900	3900	3400	3900	4000	3430	3740
IVA-3	4050	4050	3500	4000	4150	3480	3610
IVA-4	4000	4000	3500	4000	4100	3430	3610
ABB	---	---	3500	4050	4150	---	---
VP	---	---	3400	4000	4100	---	---
Delta	---	---	3000	4000	4150	---	---

* Avser accelerometer applicerad vid "pålskallen". Horisontell provning.

** Avser accelerometer applicerad vid skarv. Horisontell provning.

Kommentarer

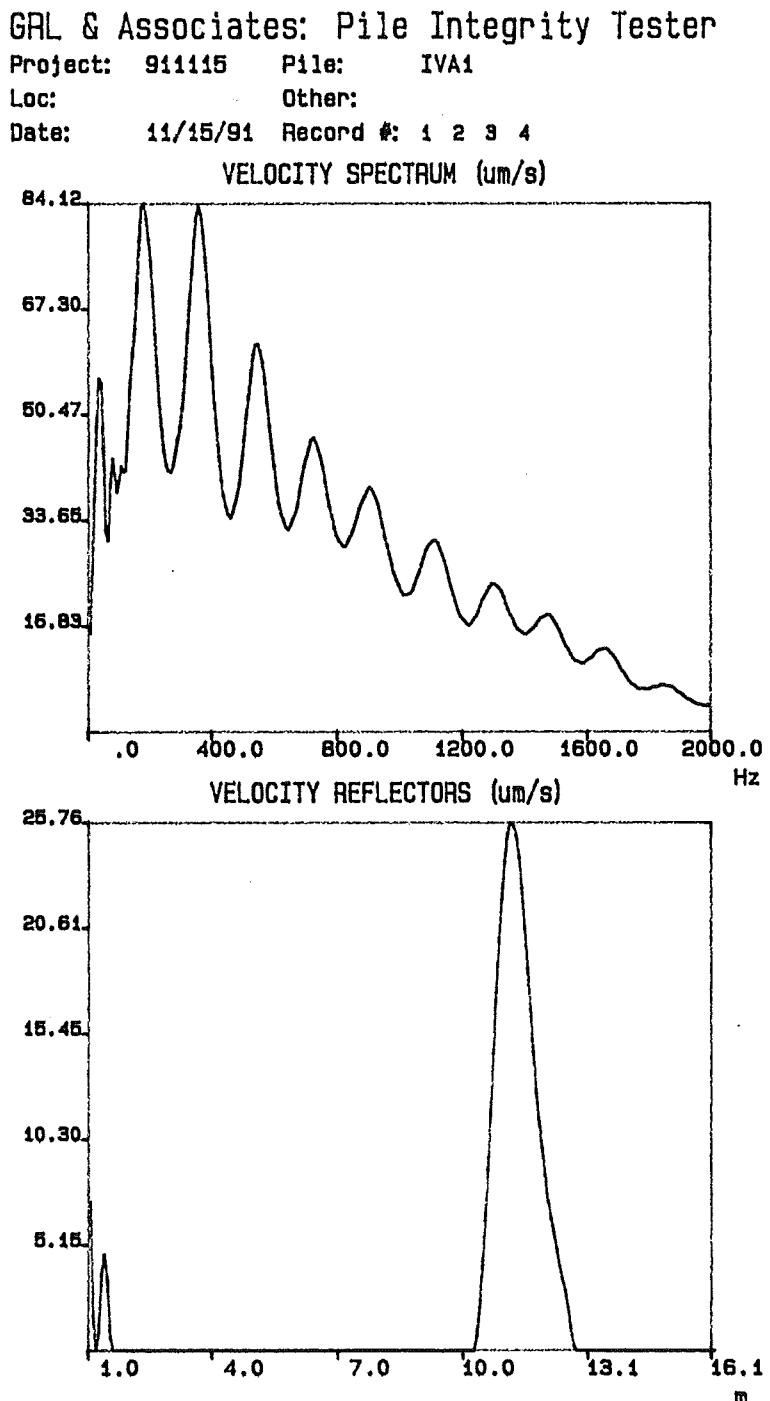
Reflexvågor både från pålskarv och pålspets kan urskiljas vid low-strain test både vid mätningen 910807 och 910821. Vid mätningen 911115 kan emellertid inte skarven på VP-pålen urskiljas. Det är anmärkningsvärt att det över huvud taget går att urskilja reflexvågen från spetsen för en skarvpåle. I andra sammanhang har stötvågen ej kunnat passera skarven.

High-strain test 910523 och 910807 är inte jämförbara eftersom resp testpåle var ihopskarvad med en underpåle vid mätningen 910523.

Anmärkningsvärt är att den uppmätta gånghastigheten i pålen var väsentligt högre 910821 jämfört med 910807, ca 4000 m/s jämfört med ca 3500 m/s. Något händer med tiden, läckning av betong? Mätningen 911115 (efter ca tre månader) gav värden på upp till 4150 m/s, vilket är i nivå med gånghastigheten för osprucken betong.

5.3.3 Frekvensanalys

Resultat av frekvensanalys redovisas för ett antal tester i figur 83-85. (Av utrymmesskäl redovisas inte samtliga.)



Figur 83. Frekvensanalys IVA 1, 911115.

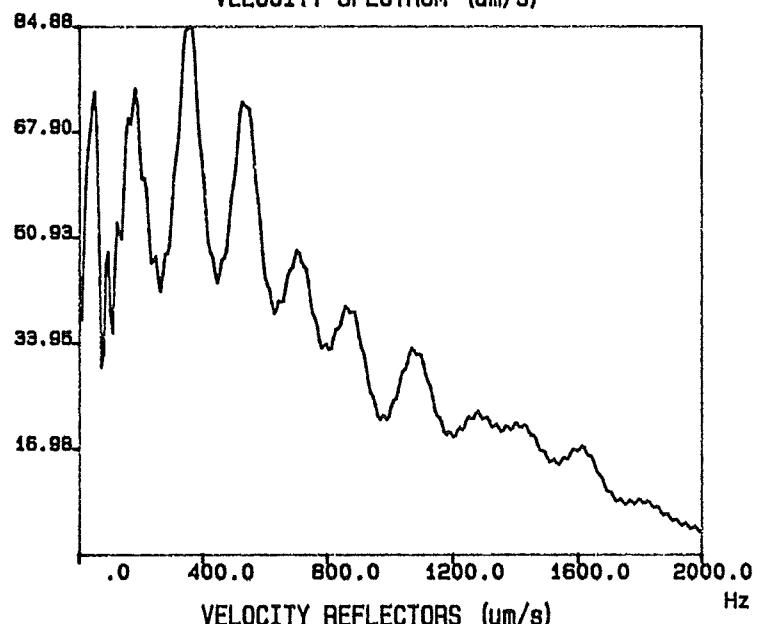
GRL & Associates: Pile Integrity Tester

Project: 911115 Pile: IVA2

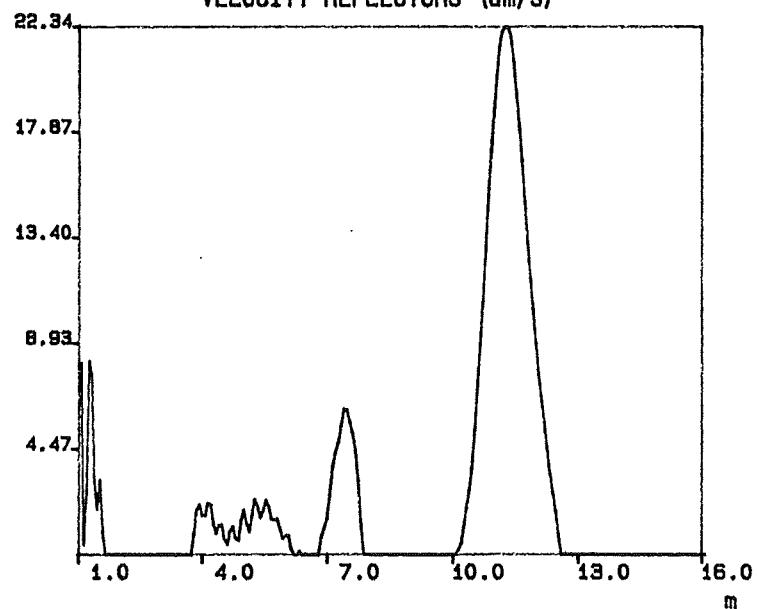
Loc: Other:

Date: 11/15/91 Record #: 7 8 10

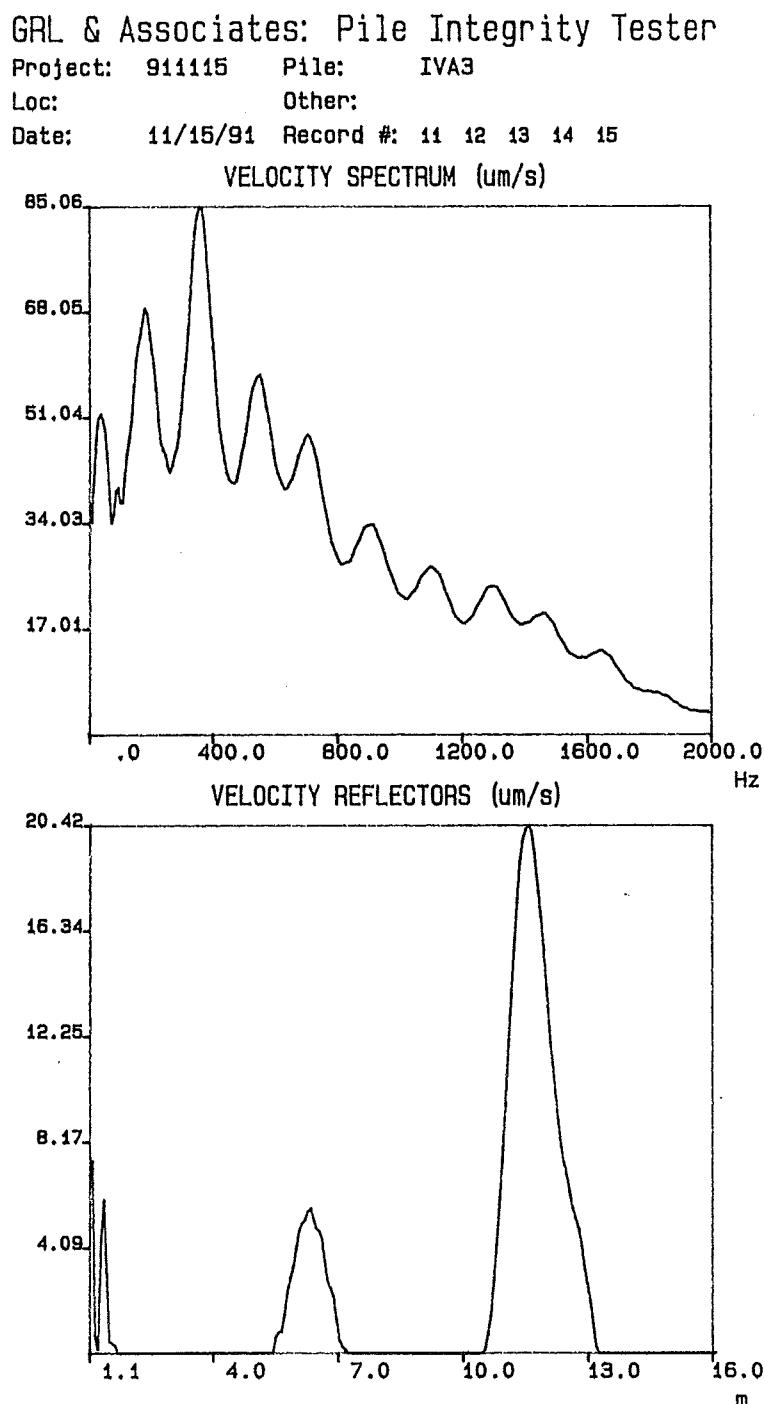
VELOCITY SPECTRUM (um/s)



VELOCITY REFLECTORS (um/s)



Figur 84. Frekvensanalys IVA 2, 911115.



Figur 85. Frekvensanalys IVA 3, 911115.

I tabellen nedan är de tester där "skadan" resp skarven var urskiljbar markerade med x.

Påle	Low - strain test				
	910502*	910502**	910807	910821	911115
IVA-1					
IVA-2	x			x	x
IVA-3	x			x	x
IVA-4	x	x	x	x	x
ABB	-	-		x	x
VP	-	-		x	
Delta	-	-		x	x

* Avser accelerometer applicerad vid "pålskallen". Horisontell provning.

** Avser accelerometer applicerad vid skarv. Horisontell provning.

Kommentarer

Frekvensanalysen ger för de testade pålarna inte mer information om skadans resp skarvens läge än vad den uppmätta partikelhastighetskurvan visar.

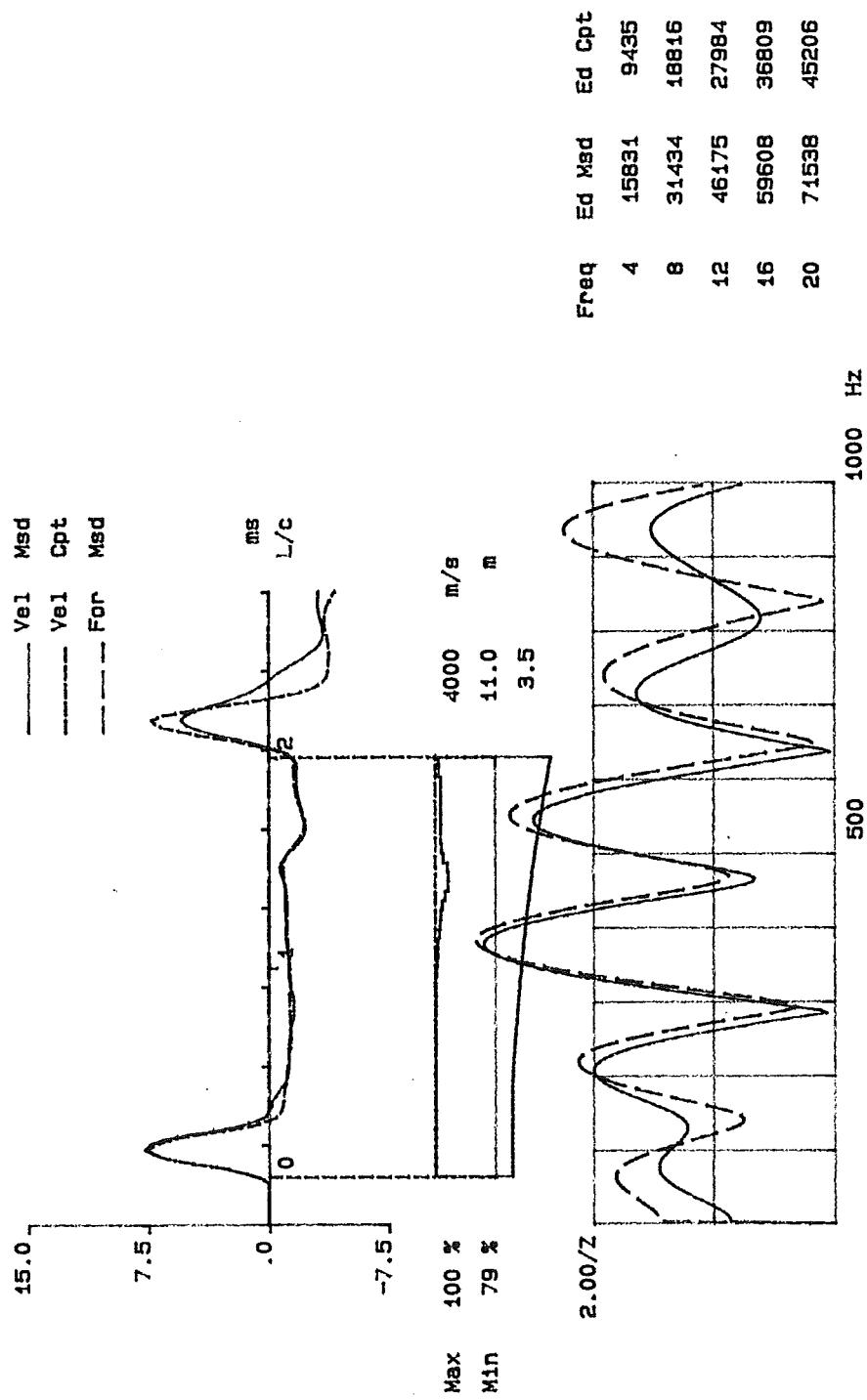
5.3.4 PITWAP

Resultat av PITWAP-analys redovisas i **figur 86-87**. Det övre diagrammet i respektive figur visar dels uppmätt partikelhastighet, dels datorberäknad partikelhastighet. Därunder visas den framräknade modellen av pålens akustiska impedans. Max och min avser avvikelser ifrån nominell impedans. I diagrammet längst ned på resp sida visas antingen antagen fördelning av jordens motstånd eller den s k "Mobility", vilket motsvarar det inverterade värdet av pålens impedans (Z). Resultaten redovisas även i tabellform, **figur 88**.

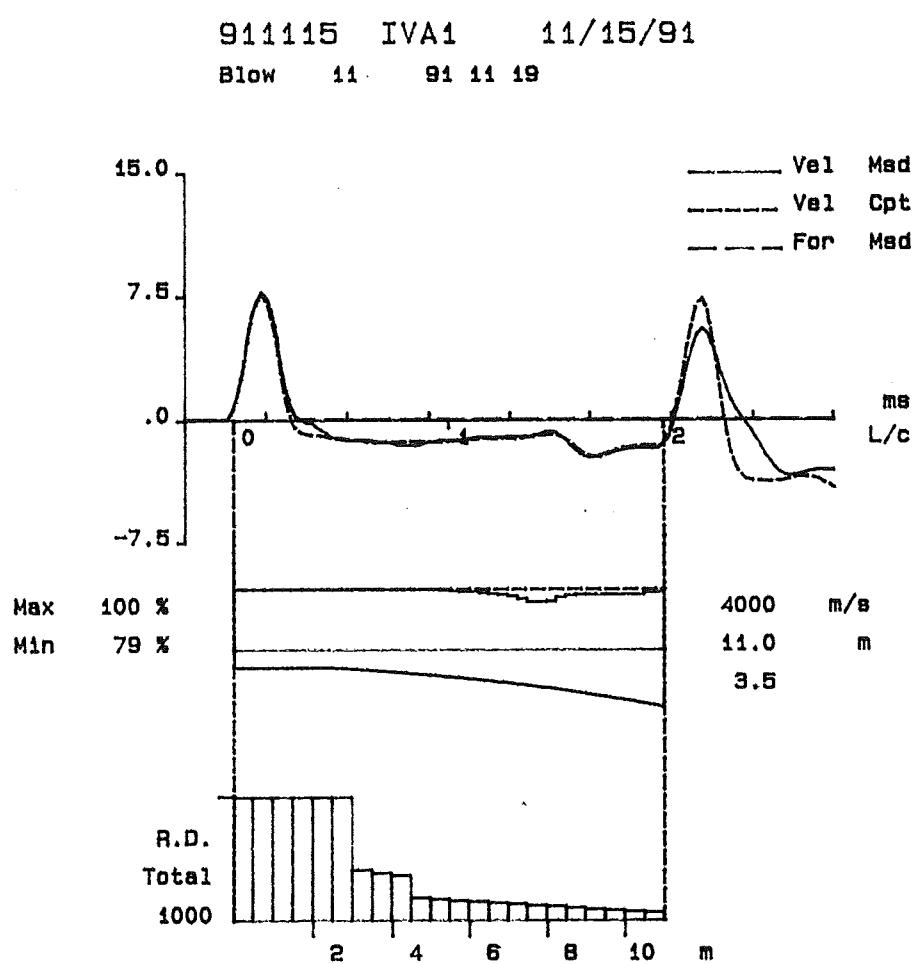
Kommentarer

Med PITWAP kan inte bara tvärsnittsförändringens storlek utan även dess utsträckning beräknas. Resultaten visar dock att den tvära övergången till mindre sektion är svår att modellera. Beräkningen av läge och storlek för sektionsförändringen stämmer bra med verkligheten.

911115 IVA:1 11/15/91
Blow 11 91 11 19



Figur 86. PITWAP-analys IVA 1, 911115.



Figur 87. PITWAP-analys IVA 1, 911115.

P.I.T.WAP

911115 IVA1 11/15/91 91 11 19
Blow No. 11

GIVEN PILE PROPERTIES AND CALCULATED MODEL

	Depth m	Area cm ²	E-Modulus FU/ cm ²	Spec. Weight FU/ m ³	
1	.00	552.00	3914.4	24.000	
2	11.00	552.00	3914.4	24.000	
Segmnt No.	Depth m	Impedance FU/ m/s	Imp. Change %	Rel. Imp. %	Ru %
1	.25	540.2	0	100	
2	.50	540.2	0	100	11.4
4	1.00	540.2	0	100	11.4
6	1.50	540.2	0	100	11.4
8	2.00	540.2	0	100	11.4
9	2.25	540.2	0	100	
10	2.50	540.2	0	100	11.4
12	3.00	540.2	0	100	11.4
14	3.50	540.2	0	100	4.6
16	4.00	540.2	0	100	4.4
17	4.25	540.2	0	100	
18	4.50	540.2	0	100	4.1
20	5.00	540.2	0	100	2.1
22	5.50	533.1	-1	99	1.9
23	5.75	525.5	-3	97	
24	6.00	518.6	-4	96	1.8
26	6.50	508.3	-6	94	1.7
27	6.75	498.1	-8	92	
28	7.00	490.3	-9	91	1.6
29	7.25	480.5	-11	89	
30	7.50	455.0	-16	84	1.5
31	7.75	428.1	-21	79	
32	8.00	428.1	-21	79	1.4
33	8.25	435.1	-19	81	
34	8.50	472.0	-13	87	1.3
35	8.75	488.2	-10	90	
36	9.00	495.5	-8	92	1.2
38	9.50	495.5	-8	92	1.1
40	10.00	495.5	-8	92	1.0
42	10.50	495.5	-8	92	.8
43	10.75	511.6	-5	95	
44	11.00	511.6	-5	95	.7
Toe					.6

Pile Damping 2.0 % Time Incr .060 ms Wave Speed 4150.0 m/s

Figur 88. PITWAP-analys IVA 1, 911115.

5.3.5 Övrigt

För att studera eventuellt samband mellan gånghastighet (c) och sprickor i pålen beräknades gånghastigheten för varje slag efter skarvningen av påle IVA-4 910523.

För osprucken sektion antages $c_0 = 4\ 000 \text{ m/s}$.

Tiden $t_0 = 2L/c_0$ motsvarar sålunda osprucken påle och $t_1 = 2L/c_1$ (motsvarar uppsprucket stadium). (L = pålens mätängd, d v s längd mellan givare och pålspets).

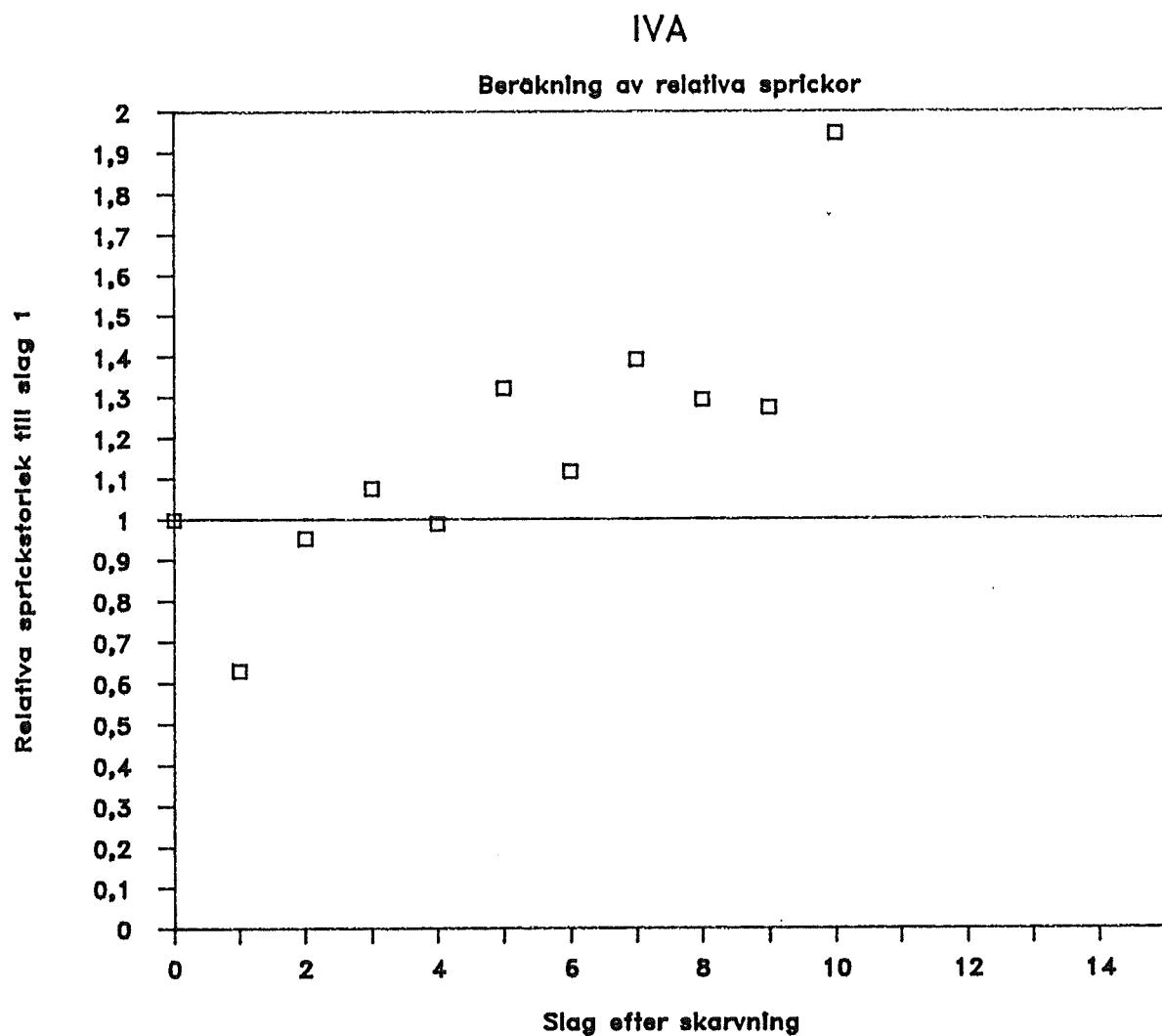
För varje slag uppmättes tiden t_1 på följande sätt:

Tidsskillnaden $dt = t_1 - t_0$.

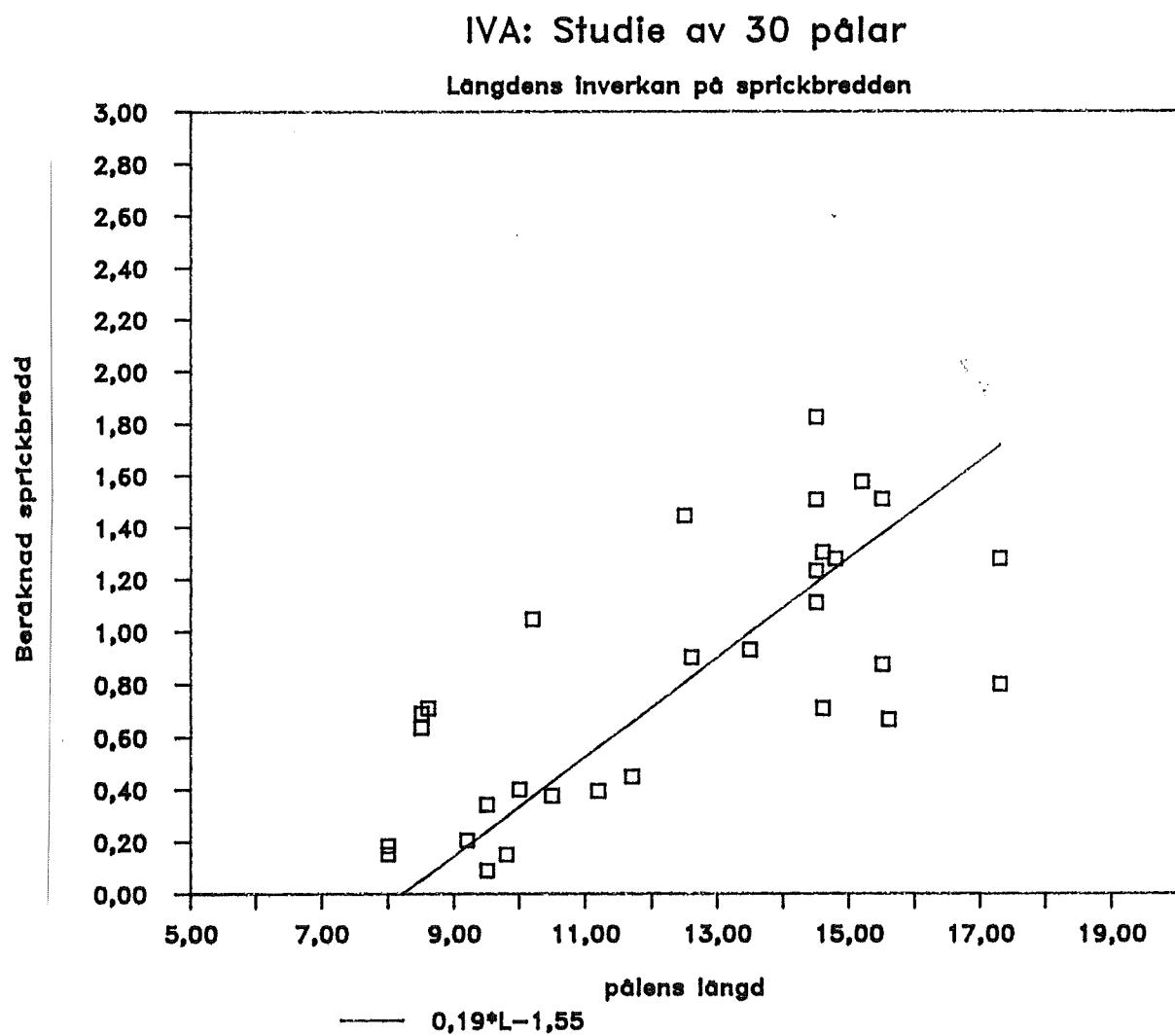
Sprickvidden beräknades enligt $dL = dt \times v_{\max}$, där v_{\max} är max partikelhastighet för resp hejarslag.

Därefter beräknades förhållandet mellan dL för resp slag och slag 1 efter skarvningen. Denna relation är redovisad i **figur 89**.

För att ytterligare studera inverkan av sprickor på gånghastigheten studerades stötvågsmätningar från ett trettiotal pålar på samma arbetsplats. Sprickvidden beräknades på samma sätt som ovan för resp påle. Resultaten redovisas i **figur 90** där den beräknade sprickvidden i mm redovisas på ena axeln och pållängd i meter på den andra.



Figur 89. Beräkning av relativ sprickstorlek.



Figur 90. Relation pållängd - sprickbredd.

5.4 Utvärdering - tolkning

5.4.1 Low-strain test

Till skillnad från utvärdering av bärförmåga, där formler används, är utvärdering av integritet mer en bedömningsfråga. Gången vid utvärdering av low-strain test kan förslagsvis vara enligt följande:

- a) Spetsreflexen identifieras, ofta med hjälp av exponentiell förstärkning av signalen. Gångastigheten antages till $c=4\ 000$ m/s till en början och justeras med hänsyn till spetsreflexen. Gångastigheten kan variera mellan 2 800—4 200 m/s, framförallt beroende på tidpunkten för stötvågsmätningen i förhållande till neddrivningen. Om ingen spetsreflex kan urskiljas kan pålen bedömas vara intakt ned till ett visst djup. Beakta att en "tydlig" spetsreflex kan vara en andra reflex från en tvärsnittsminskning eller skarv på halva pållängden.
- b) Resultaten jämfördes med typexempel i manual för P.I.T. -utrustning alternativt redovisade exempel i denna skrift.
- c) Om en hastighetsökning förekommer mellan initialvåg och reflexvåg bör följande frågor ställas:
 - Visar mätningar från intilliggande pålar motsvarande resultat?
 - Är gångastigheten väsentligt lägre än för övriga pålar?
 - Kan ett jordlager med stort mantelmotstånd överlägande ett lösare lager vara orsaken?
 - Visar eventuell slagräkning något onormalt beteende?
 - Är partikelhastighetsökningen nära pålskallen? I så fall kan en mindre handslägga användas för att få en kortare puls. Helst bör även kraften mätas (med instrumenterad handslägga).
- d) PITWAP kan användas för att simulera tvärsnittsförändringar. Eftersom endast en signal (partikelhastighet) är tillgänglig måste jordens motstånd antagas varför denna analys inte är lika tillförlitlig som t ex en CAPWAP-analys, där även en kraftkurva används.
- e) Frekvensanalys kan utföras dels för partikelhastigheten, dels för kraften. I vissa fall kan signifikanta tvärsnittsförändringar framträda tydligt i denna typ av analys. "Mobility Spectrum" erhålls genom division av den förstnämnda med den sist-nämnda. Detta spektrum ger i regel ingen ytterligare information om tvärsnittsförändringen.
- f) Kompletterande mätningar med high-strain test är, om möjlighet finns, att föredra vid pålar som vid low-strain test uppvisar reflexer i partikelhastighetskurvan. Dessa är eventuellt orsakade av skador utefter pålelementets längd.

Att föreslå någon bedömningsgrund på motsvarande sätt som för high-strain test låter sig

knappast göras. Beräkning av beta kan visserligen utföras men testresultaten visar att exempelvis tidpunkten för mätningen i förhållande till slagningen har stor betydelse för resultatet. Det bör dock understrykas att jämförelse med andra pålar från samma arbetsplats är en god hjälp eftersom bedömningen görs från endast en signal.

5.4.2 *High-strain test*

Försöken visar att de inledningvis nämnda kriterierna i tabell i kapitel 2 kan tillämpas, dock med viss försiktighet. Resultaten från de skarvade testpålarna visar att en partikelhastighetsökning (och motsvarande minskning av kraften) bör tas på allvar även om pålen har hög bärformåga.

Det kan emellertid finnas andra skäl till en bristande proportionalitet mellan kraft och partikelhastighet. Erfarenhetsmässigt är det ofta mycket stor skillnad mellan utslagen från de båda kraftgivarna, varför medelvärdet kan bli otillfredsställande. Visar ett studium av varje kraftgivare för sig att detta är fallet bör i första hand pålskallen centreras i dynan. Det är speciellt viktigt för 235 mm pålar om en stor dyna (avsedd för 275 mm pålar) används. I andra hand kan kraftgivarna ges en ny placering på pålen eftersom mikrosprickor inom mätsnittet kan förekomma. Är kurvorna likvärdiga efter omflyttningen föreligger sannolikt en skada. En ytterligare orsak till bristande proportionalitet kan vara att pålskallen inte är vinkelrät mot pålens längdriktnings.

För att erhålla ytterligare beslutsunderlag vid tveksamma fall kan CAPWAP-analys med fördel utföras. Det ger möjlighet att modellera inte bara tvärsnittsförändringens storlek, utan även dess utsträckning. Det är viktigt att i ett sådant fall jämföra jordmodellen med tidigare CAPWAP-analyser från samma arbetsplats för att kunna göra en relevant modell av tvärsnittsförändringen.

6. Litteratur

- [1] Goble, G G, Likins, G E, Rausche, F Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements. Final Report. Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, March 1975.
- [2] Rausche, F Criteria for Determination of Pile Damage from Pile Top Force and Velocity. Pile Dynamics, August 1987.
- [3] Sahlin, S Model Tests of Concrete Piles driven in Water. Second International Conference on the Application of Stress Wave Theory on Piles. Stockholm, May 1984.
- [4] Bernander, S Sprickbildung i betongpålar slagna i vatten eller i jordarter med hög permeabilitet. IVA Pålkommissionen, Rapport 88, 1992.
- [5] Bredenberg,H Stötvågsdämpning i pålar. Delrapport 1, beräkningsexempel och modelförsök. Byggforskningsrådet, Rapport R26:1980.
- [6] Goble, GG Pile Integrity Tester. Manual, Cleveland, Ohio, 1988.