

## Förord

Den föreliggande studien är ett examensarbete utfört som ett samarbete mellan avdelningen för Jord- och bergmekanik inom institutionen för Bygghälsa vid Kungliga Tekniska Högskolan och institutionen för Geovetenskaper vid Uppsala Universitet.

Detta examensarbete utgör en obligatorisk och avslutande del av civilingenjörsutbildningen inom väg- och vattenbyggnadsteknik och miljö- och vattenteknik. Arbetet omfattar 20 högskolepoäng motsvarande 20 veckors arbete.

Handledare för examensarbetet är Tekn Dr. Gary Axelsson KTH/Skanska Teknik AB som även är initiativtagare till examensarbetet. Vi vill först och främst tacka honom för all hjälp och engagemang genom hela arbetet. Den snabba och direkta dialogen har varit väldigt betydelsefull.

Examinator är Adj. professor Staffan Hinze verksam inom institutionen för bygghälsa vid KTH och vid Skanska Teknik samt Docent Conny Larsson verksam vid institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet. Ämnesgranskare vid Uppsala Tekniska Högskola har varit Professor Kennet Axelsson.

Stort tack även till Johan Lindgren - *Nilsson & Lindgren Markkonsult AB*, Torbjörn Wemming - *Hercules Grundläggning AB*, Carl John-Grävare - *Pålanalys AB*, Jan Romell och Gunnar Holmberg - *Skanska Teknik, Göteborg*.

Vi vill även tacka hela Geogruppen på *Skanska Teknik* Stockholm för många glada stunder.

Stockholm januari 2004



Markus Dangré



Lena Elvin



## Sammanfattning

Den föreliggande studien är ett examensarbete utfört som ett samarbete mellan avdelningen för Jord- och bergmekanik inom institutionen för Bygghvetenskap vid Kungliga Tekniska Högskolan och institutionen för Geovetenskaper vid Uppsala Universitet.

Syftet med examensarbetet är att upprätta en databas över spetsburna pålar fastslagna i friktionsjord och morän. Vidare skall databasen analyseras för att hitta styrande parametrar samt även hitta områden med problematisk geoteknik.

Databasen omfattar spetsburna pålar som stoppslås i friktionsjord. Pålar som i huvudsak är mantelburna har uteslutits. Endast betongpålar har tagits med. Geografiskt omfattar databasen i stort sett hela Sverige. Totalt innehåller databasen 110 projekt med sammanlagt över 600 pålar.

För entreprenörer i byggbranschen är grundläggningsarbetet ofta förknippat med ekonomiska risker och osäkerhet gällande omfattning och tidsåtgång. Vid dimensionering av grundläggningsarbeten kan databasen vara till stor hjälp för att bestämma lämpliga lastnivåer. Mängden slagningsarbete och risken för bortslagna pålar kan lättare uppskattas.

Vid en sökning på marknaden hittades bara en databas som påminde om den i detta projekt tilltänkta databas. Databasen är amerikansk och administreras av FHWA, som är USA:s motsvarighet till Svenska Vägverket.

Först analyserades olika påltyper utan ytterligare urvalskriterier. Vikten av att filtrera informationen blev då tydlig, eftersom resultatet blev svårtolkat och inga markanta samband kunde urskiljas. Med databasen som grund har materialet vidare analyserats med hjälp av statistiska metoder. Orsaken till låga bärförmågor vid ett urval av projekt har även kartlagts.

Studien har visat att:

- Genom att med hjälp av databasen välja lämplig lastnivå kan omfattande drivningsarbete samt bortslagning av pålar undvikas. Dessa två faktorer medför ofta stora ekonomiska risker och osäkerhet angående tidsåtgången. Databasen kan vara extra värdefull då man jobbar i områden med fjädrande jordar.
- Ett lämpligt dimensioneringsvärde är ca 800 kN för en SP1-påle respektive ca 1000 kN för en påle av typen SP2 eller SP3.
- De låga variationskoefficienterna vid studie av bärförmågans beroende av stoppsjunkningen visar att stoppsjunkningen ger en god uppskattning av bärförmågan.
- Pålkommissionens värden på dimensionerande bärförmågor har god, men nödvändig, säkerhetsmarginal och bör fortsättningsvis användas då stötvågs mätning ej utförs.
- $J_c$ -faktorn har liten inverkan på bärförmågan för spetsburna pålar i friktionsjord



## Summary

This study is a master thesis, which is a compulsory part of a degree of Master of Science in Engineering at the Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden. The thesis was carried out at the department of Soil- and Rock mechanics and corresponds to twenty weeks full time studies.

The purpose of this study was to build a database for point-bearing piles in dense non-cohesive soil, predominantly moraine. Further, the database was analysed and areas with difficult geotechnical conditions was identified.

The database includes for point-bearing piles driven to refusal in moraine. Piles with mainly shaft friction have been excluded. Only concrete piles have been included. Geographically the database covers almost all geotechnical conditions of Sweden. The total amount of piling projects is 110 and the total amount of piles is 600.

For contractors, foundation work is usually connected with a lot of uncertainty and risk, concerning the estimating of time and cost. During the design stage of foundation construction the database can be a useful tool to estimate suitable loads on the piles.

The data was analysed further with different statistical method. Possible reasons for low bearing capacity, in some projects, have also been investigated.

Based on the study the following conclusions are made:

- By using the database as a tool in the design stage pile driving and pile damage can be avoided. The database can also be a good help when working in soils with large quakes.
- Based on the statistical analysis a recommended design load capacity value for an SP1 pile is 800 kN and 1000 kN for an SP2 or SP3 pile.
- The coefficient of variation in the study of the bearing capacity shows that permanent set at refusal is a good estimation of the bearing capacity.
- The  $J_c$ -factor has very little influence on the bearing capacity for point-bearing piles.



<b>FÖRORD.....</b>	<b>I</b>
<b>SAMMANFATTNING .....</b>	<b>III</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INLEDNING.....</b>	<b>1</b>
1.1. BAKGRUND .....	1
1.2. SYFTE.....	1
1.3. OMFATTNING OCH BEGRÄNSNING .....	2
<b>2. LITTERATURSTUDIE.....</b>	<b>3</b>
2.1. SVERIGES GEOLOGI .....	3
2.1.1. <i>Geologisk översikt</i> .....	3
2.1.2. <i>Jordarter</i> .....	3
2.1.3. <i>Geologisk orientering i Sverige</i> .....	4
2.2. PÅLNING.....	6
2.2.1. <i>Historik</i> .....	6
2.2.2. <i>Typer av betongpålar</i> .....	7
2.2.3. <i>Slagutrustning</i> .....	7
2.2.4. <i>Problematik vid pålning</i> .....	8
2.3. GEOTEKNISK BÄRFÖRMÅGA HOS BETONGPÅLAR.....	11
2.3.1. <i>Geoteknisk bärförmåga</i> .....	11
2.3.2. <i>Säkerhetsklasser</i> .....	12
2.3.3. <i>Bestämning av partialkoefficienter med <math>\beta</math>-metoden</i> .....	13
2.3.4. <i>Geotekniska klasser</i> .....	14
2.3.5. <i>Normerade och rekommenderade bärförmågor</i> .....	14
2.4. STÖTVÄGSMÄTNING .....	15
2.5. METODER FÖR UTVÄRDERING AV BÄRFÖRMÅGA.....	18
2.5.1. <i>CASE</i> .....	18
2.5.2. <i>CAPWAP</i> .....	19
2.5.3. <i>WEAP</i> .....	20
2.6. GEOTEKNISKA UNDERSÖKNINGAR.....	20
<b>3. BESKRIVNING OCH STRUKTURERING AV DATABAS .....</b>	<b>23</b>
3.1. VAL AV DATABAS.....	23
3.2. EN LIKNANDE DATABAS .....	23
3.3. STRUKTUR.....	24
3.4. ANVÄNDNING AV DATABASEN .....	25
3.5. FÖRKLARING AV POSTER I TESTRESULTAT TABELLEN .....	26
3.6. INGÅENDE DATA.....	27
3.6.1. <i>Urvalskriterier</i> .....	27
3.6.2. <i>Osäkerhet i data</i> .....	28
3.6.3. <i>Geografisk spridning</i> .....	28
<b>4. PRESENTATION OCH ANALYS AV PARAMETERSTUDIER .....</b>	<b>31</b>
4.1. STUDIE AV SAMTLIGA PÅLAR .....	31
4.1.1. <i>Allmänt</i> .....	31
4.1.2. <i>Stoppsjunkningen inverkan på bärförmågan</i> .....	32
4.1.3. <i>Energins inverkan på bärförmågan</i> .....	33
4.2. ANALYS AV ERFARENHETSVÄRDEN MED B-METODEN .....	34

4.3.	STUDIE AV $J_c$ -FAKTORNS INVERKAN.....	42
4.3.1.	<i>Jämförelse av <math>J_c</math>-faktorer</i> .....	42
4.3.2.	<i>Jämförelse CASE, CAPWAP och <math>J_c</math>-faktor</i> .....	43
4.4.	PROJEKT MED RELATIVT SETT LÅG BÄRFÖRMÅGA .....	44
4.4.1.	<i>Allmänt om låg bärförmåga</i> .....	44
4.4.2.	<i>Projekt framtagna med hänsyn till medelvärdet</i> .....	45
4.4.3.	<i>Projekt med ej mobiliserad bärförmåga</i> .....	47
4.4.4.	<i>Projekt med fjädrande jordar</i> .....	49
<b>5.</b>	<b>DISKUSSION OCH SLUTSATSER .....</b>	<b>53</b>
5.1.	DISKUSSION .....	53
5.2.	SLUTSATSER.....	56
5.3.	FORTSATTA STUDIER .....	57
<b>6.</b>	<b>LITTERATURFÖRTECKNING .....</b>	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>BILAGOR.....</b>	<b>61</b>
7.1.	LISTA ÖVER PROJEKT SOM INGÅR I DATABASEN .....	61
7.2.	FÖREKOMMANDE PÅLTYPEN.....	64
7.3.	LISTA ÖVER PERSONER SOM UTFÖRT PROJEKT I DATABASEN .....	64
7.4.	FÖREKOMMANDE SLAGUTRUSTNING .....	64
7.5.	STÖTVÅGSKURVOR.....	65
7.5.1.	<i>Landskrona</i> .....	65
7.5.2.	<i>Gärtuna</i> .....	66



# 1. Inledning

## 1.1. Bakgrund

För entreprenörer i byggbranschen är grundläggningsarbetet ofta förknippat med ekonomiska risker och beroende på osäkerhet gällande omfattning och tidsåtgång. Vid pålning är det huvudsakligen mängden slagningsarbete och andelen bortslagna pålar som är osäkra faktorer. (Axelsson, 2003)

I en stor andel projekt är den last som utnyttjas på spetsburna betongpålar mycket hög. Pålar som tidigare hade normerade laster på ca 600 kN räknas idag ofta upp till ungefär 1200 kN. De höga kraven på bärförmågan medför att pålarna måste drivas till en spetspåskänning på ungefär 30 MPa. I vissa jordar är det inte möjligt att utan stora svårigheter driva pålar till ett sådant stort spetsmotstånd. Extra problematiskt blir det vid kraftigt fjädrande jordar, som är vanligt i tjocka moränlager med stor halt av silt och finsand. Om inte kraven på bärförmågan uppnås måste drivningen fortsätta i ett försök att hitta styvare jordlager eller nå bergytan. Detta kan innebära mycket tidsödande drivning med stor andel bortslagna pålar. (Axelsson och Rehnman, 1999)

En bedömning i projekteringsstadiet av vilka laster som kan utnyttjas på pålarna med hänsyn till de geotekniska förhållandena skulle vara mycket värdefull. Idag görs ofta ingen åtskillnad mellan olika geotekniska förutsättningar då lastnivån för spetsburna pålar bestäms. Istället förutsätts pålelementets lastkapacitet vara begränsande för pålens last. Detta enkla betraktelsesätt kan leda till hård långvarig drivning som leder till en stor andel skadade och bortslagna pålar. (Axelsson, 2003)

## 1.2. Syfte

Syftet med examensarbetet är att upprätta en databas över spetsburna pålar fastslagna i friktionsjord och morän. Vidare skall databasen analyseras för att hitta styrande parametrar samt även hitta områden med problematisk geoteknik. I Sverige har dynamisk provbelastning (stötvågsmätning) slagit igenom stort, och de senaste 20 år har stötvågsmätning utförts på uppskattningsvis 40-60 % av pålningsprojekten (Axelsson, 2003). Med denna stora mängd material finns nu en unik möjlighet att samla in information från ett stort antal projekt från hela Sverige. Med hjälp av databasen kan sedan en rad parametrar utvärderas som t.ex. stoppsjunkning, bärförmåga, slagenergi.

Vid dimensionering av pålar är det ofta svårt att bestämma de geotekniska förutsättningarna. Därför är det oerhört värdefullt att ha en stor erfarenhetsbank som stöd vid dimensioneringen. Även vid tillbyggnad av befintliga byggnader på höjden kan databasen vara till stor hjälp.

Databasens användning ska inte begränsas av detta projekt utan är tänkt ska bli en allmän databas tillgänglig för personer inom pålningsbranschen.

### 1.3. **Omfattning och begränsning**

Databasen omfattar spetsburna pålar som stoppslås i friktionsjord. Pålar som i huvudsak är mantelburna har uteslutits. Endast betongpålar har tagits med. Dominerande är pålar av standardmått 235x235 millimeter (SP1) och 270x270 eller 275x275 millimeter (SP2 och SP3). Även projekt där specialtillverkade pålar med stora tvärsnittsmått har förekommit inkluderats. Aktuella tvärsnittsmått hos de specialtillverkade pålarna är t.ex. 350x350 millimeter.

Geografiskt omfattar databasen i stort sett hela Sverige. De företag som bidragit med material är *Nilsson & Lindgren Markkonsult AB*, *Pålanalys* samt *Hercules Grundläggning*. Material har även inhämtats från *Skanska Teknik* i Stockholm och Göteborg. Totalt omfattar databasen 110 projekt med 620 pålar. Fördelningen mellan påltyperna redovisas i Tabell 1.1.

*Tabell 1.1 Fördelningen mellan påltyperna i databasen*

<b>Påltyp</b>	<b>Antal</b>	<b>Tvärsnittsarea (mm<sup>2</sup>)</b>
SP1	154	552
SP2	205	729/742
SP3	187	729/742
Övriga	74	-

Tyngdpunkten i examensarbetet har lagts på att upprätta, strukturera och analysera databasen. På grund av tidsramen för examensarbetet har insamlingen av data tvingats begränsas. Våldokumenterade projekt har prioriterats framför projekt med bristfällig information.

## 2. Litteraturstudie

### 2.1. Sveriges geologi

#### 2.1.1. Geologisk översikt

Sveriges bergrund täcks till ca 75 % av morän av varierande kornstorlek. Ca 10 % upptas av berg i dagen eller berg med mindre än 0,5 meter jordlager. Övriga delar täcks av isälvavlagringar och andra finkorniga sediment och torvmarker. Kalt berg förekommer främst längs Sveriges kuster och i fjälltrakterna. Sveriges geologi beror på kvartärgeologiska fenomen som inlandsisens rörelser och svallningen från innanhaven och de stora sjöarna. Runt Sveriges kuster är jordlagrens mäktighet relativt liten och i många fall har berget kommit i dagen på grund av svallning. Även i fjälltrakterna är jordtäcknet tunt men detta beror på inlandsisens rörelser. (*Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984*)

#### 2.1.2. Jordarter

Vid indelning av jordarter används ett system som bygger på jordarternas bildningssätt och innehåll av varierande kornstorlekar. Som tidigare nämnts täcks stora delar av Sveriges yta av morän, som bildats under istiden. Jordarten består av de jordarter som landisen passerat över och brutit loss. Detta förklarar den stora variationen i ursprungsmaterialet. Under landisens avsmältning avlagrades moränen som ett täcke med varierande mäktighet. Materialet avsätts i landisens periferi och under transporten mot kanten materialet i olika hög grad. Materialet till den så småningom bildade moränen transporterades i isens botten, inne i isen och på isens yta. Benämningarna bottenmorän och ytmorän anger därför moränens läge i isen. Eftersom bottenmoränen utsatts för högt tryck och knådats uppvisar jordarten en mycket tät struktur och uppvisar ett litet förhållande mellan porernas och fasta fasens volym. Bottenmoränen ger därför troligare ett påstopp än ytmoränen, som inte har utsatts för samma tryck.

Morän är exempel på en jordart som innehåller flera kornstorlekar, s.k. månggraderad. Jordarten kan därför innehålla allt från stora block till små lerpartiklar. I Sverige brukar moränen karakteriseras dels av den dominerande kornstorleken dels av blockhalten i jordprofilen. Moränens sammansättning beror på vilka bergarter som gett upphov till den. Mjuka, lätt krossade bergarter som lerskiffer och kalksten ger upphov till finkornig morän med få block. Exempel på sådan jordart är lermorän. Består ursprungsmaterialet av hårda bergarter som granit bildas istället en mer grovkornig jordart. Siltig morän eller sandig morän är två exempel på sådana jordarter. Kornstorleken hos en morän påverkas även av avståndet som den färdats med isen. Ju längre ifrån sitt ursprung den avsätts desto mer finkornig. (*Lundquist, 1988*), (*Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984*)

Morän är en glacial jordart. Till denna grupp hör även isälvs sediment, som innehåller material som transporterats, sorterats och avsätts av smältvatten från inlandsisen. Ofta innehåller sedimentet en eller ett fåtal kornstorlekar, som är väl sorterade. På grund av sin höga

genomsläpplighet har jordarten goda geotekniska egenskaper. Detta gäller dock inte för siltig morän. Denna jordtyp kommer att behandlas i Avsnitt 2.2.4.

En annan stor grupp av jordarter är de postglaciala. De flesta postglaciala jordarter är avsatta i vatten, antingen strömmande eller i sjöar och hav. Till denna grupp hör även organiska jordarter som består av gyttja och torv. (SGU, 2003)

Hållfastheten hos en jord byggs upp av faktorer, såsom friktion och kohesion. Med avseende på dessa faktorer delas jordarter in i tre grupper.

*Friktionsjord:* I friktionsjord byggs skjuvhållfastheten upp av friktionen mellan kornen. Permeabiliteten är vanligtvis hög. Hit räknas de grovkorniga jordarterna.

*Kohesionsjord:* I finkorniga jordar byggs skjuvhållfastheten upp av friktion och kohesion mellan jordpartiklarna. Kohesion uppstår genom elektrisk ytaktivitet hos kornen eller på grund av organiskt beståndsdelar. Till denna grupp hör lera, torv, dy och gyttja. Permeabiliteten är ofta låg.

*Mellanjord:* Ur hållfasthetssynpunkt är mellanjord ett mellanting mellan friktionsjord och kohesionsjord. Till denna grupp räknas silt och blandkorniga jordarter. (Svensson, 2003)

### 2.1.3. Geologisk orientering i Sverige

Geologin påverkar pålning mycket och det är därför viktigt att utreda vilka förhållanden som råder på platsen. En mantelburen påle bär större delen av belastningen genom pålens mantelyta. Slås pålen ner i kohesionsjord (lera) överförs belastningen nästan uteslutande genom mantelytan. I många fall är kohesionspålarnas spetsmotstånd så litet att det helt kan försummas jämfört med mantelmotståndet. Denna typ av pålar används i områden med mäktiga lerlager, som i till exempel Göteborg och Uppsala.

En spetsburen påle överför lasten belastningen i pålen främst genom pålspetsen. Spetsburna pålar är antingen slagna till berg eller till fast jordlager. När pålen är stoppslagen till friktionsjord tas en del utan lasten upp genom spetsen och en viss del tas upp av manteln. Det går alltså ingen skarp gräns mellan spetsburen och mantelburen påle. Spetsburna pålar är vanligast i områden med tunnare lager av kohesionsmaterial som överlagrar fastare lager av morän eller berg. Ett exempel på ett sådant område är Mälardalen.

Här följer en geologisk orientering i Sverige för att koppla geologin till olika pålfunktioner (spetsburen eller mantelburen). (Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984)

#### *Skåne*

Skånes geologi domineras till stor del av lera. Regionen kan delas in i två delar, en syvästlig och en nordöstlig del med en gräns mellan Ängelholm och Simrishamn. Berggrunden i området är främst sedimentär. Geologiskt sett är de relativt unga och nästan alla sedimentära bergarter såsom sandsten, skiffer, kalksten och stenkol återfinns i Skåne.

I den sydvästra delen har den sedimentära berggrunden gett upphov till kalk- och lerhaltiga moräner. Blockhalten är låg och lerhalten är större än 20 %. Lermoränen tillhör de bördigaste jordarna i vårt land och fungerar i allmänhet som bra byggnadsmark. De finkorniga

sedimenten i sydvästra Skåne är ofta leriga och exempelvis i Ängelholmsområdet är utbredningen stor med en lerhalt på mer än 40 % och är överkonsoliderad.

Den nordöstra delen skiljer sig lite från den västra delen då moränen innehåller mer urbergspartiklar och en liten lerhalt. Halten av större block och sten är betydligt större i urbergsmoränen än i den västliga lermoränen. (*Handboken Bygg , del Geoteknik, 1984*)

### *Sydöstra Sverige*

Området är ganska stort och sträcker sig från Blekinge i söder till Närke-trakten i norr. Blekinge domineras av kalt berg omgivet av lera i en småkuperad terräng. Längre norrut börjar det Småländska höglandet med en mycket mer kuperad terräng. I höglandsområdena finner man i huvudsak sandig och siltig morän. Moränen har ofta hög halt av block och sten. Längre norrut börjar Östgötaslätten och Närkeslätten. Här dominerar mer sedimentära bergarter vilket även återspeglas i moränen som innehåller mer lera. Mäktigheten på lagren kan bli ända upp till 15 meter. Lermoränen är helt dominerande men även lerig siltmorän. Blockhalten är oftast låg, men stenförekomsten är hög, vilket är extra påtagligt i Östergötland. Kustområdena i regionen består huvudsakligen av kala berg som täcks av lera. Ofta kan lager med svallsediment förekomma ovanpå lerlagret eftersom kustlinjen legat under högsta kusten linjen. (*Handboken Bygg , del Geoteknik, 1984*)

### *Västra Sverige med Vänerområdet*

Västkustens södra hälft består av ett flackt lågland. Slätten består främst av lera och sand. På grund av den upprepade havsytestigningen efter inlandsisens avsmältning är sedimentlagerföljden något speciell. Lager av grovkorniga sediment kan oväntat förekomma i en lerlagerföljd. I andra fall kan torrskorpelera förekomma. Då detta inträffar kan geotekniska problem uppstå.

Norrut längs Västkusten finns flera stora randbildningar. Avlagringarna bildades under istiden då iskanten vandrade fram och tillbaka parallellt med kusten. Dessa finns även österut inåt landet. Randbildningarna består av isälvsmaterial ofta med inslag av morän.

I Västsverige förekommer sprickdalar som är fyllda med mäktiga lager av finkorniga sediment. De glaciala lerorna har ofta karaktären av kvicklera. Dessa överlagras av postglaciala sediment, som består av lera, silt och sand. De mäktiga lerlagren i kombination med branta sluttningar orsakar problem vid grundläggningsarbete, se vidare Avsnitt 2.2.4. Från Västkustregionen in i Dalsland till sydöstra Värmland är moräntäcket mycket tunt eller saknas helt. Österut och i Västergötland ökar moränlagernas mäktighet. Vid drumliner kan mäktigheten uppmätas till 30-40 meter. Berggrunden i området består av sedimentära bergarter. (*Handboken Bygg , del Geoteknik, 1984*)

### *Mälardalen*

Mäljarregionen kännetecknas av ett mycket flackt landskap med ytterst få höjder som når över högsta kusten linjen (150-190m ö h). Stora uppodlade slätter och låga kala berg är en vanlig syn. Sandig och siltig morän täcker bergrunden med ett relativt jämnt lager, som i genomsnitt är 4 meter tjockt, men stora lokala variationer förekommer (*Axelsson, 2003*). Moränen har ofta stora inslag av sediment och halten av sten och block är oftast låg till måttlig.

Regionen genomskärs av några av Sveriges största åsar. Åsarna har alltid haft stor betydelse för bebyggelse och kommunikation. För övrigt har glacial lera stor utbredning i regionen. Den har en rödbrun färg och skiljs lätt från den grå postglaciala leran. I den glaciala leran ökar silthalten med djupet. På grund av omfattande svallning i området har det skett stora förändringar i jordlagerföljden. Svallsediment med varierande kornstorlek kan ofta täcka underliggande lerlager, vilket är mycket viktigt att känna till vid byggnationer. (*Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984*)

### *Norrland, Dalarna och norra Värmland*

Till skillnad från övriga landet karaktäriseras detta område av en storkuperad terräng, som framhävs av djupa dalgångar. Fjällkedjan består av kalt berg eller berg med ett tunt jordtäcke. Även längs Höga kusten råder liknande förhållanden. Mer än 50 % av områdets yta täcks av morän. Moränens karaktär varierar mycket, men i huvudsak återspeglar den det underliggande bergets yta.

I kustområdena förekommer bl.a. ett stort antal ändmoräner och en viss typ av morän som kallas Kalixpinno. Denna morän byggs upp av sand och silt och har ibland inslag av grus. Kraftigt veckade och omböjda strukturer i jordlagerföljden är typiskt för Kalixpinno. I dalgångar och på kustslätterna förekommer finkornigt sediment. Kustslätterna domineras av sedimenten bestående glacial lera med inslag av silt. Detta lager täcks av postglacial lera, silt och sand. Ibland kan leran innehålla järnsulfid, som svartfärgar den. Leran kallas då för svartmocka. I dalgångarna ökar silthalten i sedimenten.

Norrlands inland domineras av sandig och grusig morän med inslag av sedimentlager. Dessutom finns torvmarker i stor utsträckning, som utgörs av olika typer av myrar. Oftast har myrarna ett tunt lager av torv. Siljansområdet och Storsjöbygden består främst av lermorän med tämligen hög grushalt, vilket är ovanligt för övriga delar av Sverige. (*Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984*)

## **2.2. Pålning**

### **2.2.1. Historik**

Grundläggning har alltid varit en viktig del i byggandet. Detta görs för att minska sättningar och möjliggöra byggande i lösa jordar. Principen med pålgrundläggning bygger på att med hjälp av pålar föra ner lasten djupare i jorden till bärkraftigare jordlager.

Redan våra förfäder använde olika typer av träpålar till sina hus, hamnar och olika befästningar. Pålarna var huvudsakligen manuellt slagna träpålar, men även grävpålar användes. Utvecklingen gick framåt och linspel började användas. Ångmaskinen och förbränningsmotorerna gjorde att större och effektivare påldrivningsutrustningar kunde börja användas. Den första moderna påldrivningsutrustningen uppfanns av Christoffer Polhem 1740. Detta ledde i sin tur till att tyngre hejare kunde användas och större bärighet på pålarna kunde uppnås. (*Olsson och Holm, 1993*)

Problemet med träpålar är att dom ruttnar när de kommer ovanför grundvattennivån. Därför har andra typer av pålar vuxit fram genom åren. I slutet på 1800-talet började man att använda stålspålar och i början på 1900-talet kom de första betongspålarna. I Europa är variationen stor vid valet av påltyp beroende på geotekniska och kulturella förutsättningar. I

Sverige har betongpålen blivit den vanligaste. Ända sedan den började användas på 1920-talet har den varit pålitlig och haft ett mycket gott rykte. Endast ett fåtal missöden har förekommit och då i mycket komplicerade jordar med t.ex. lösa jordlager eller vid förekomst av stora sidorörelser. Varje land håller dock hårt på sina inarbetade metoder och det är svårt att introducera någon ny teknik trots att metoderna är väl beprövade. (Olsson och Holm, 1993)

På 1970-talet började man belasta pålarna dynamiskt (stötstågmätning) i Sverige. Vi kunde då på ett tillförlitligt och mycket enklare sätt bestämma pålens bärförmåga. Från allra första början (1920-talet) var den normalt tillåtna lasten 200 kN för en betongpåle, men den ökades sedan till ca 600 kN (1960-talet). Efter stötstågmätningens intåg ändrades den maximalt tillåtna lasten först till 900kN (Bredenberg och Jansson, 1991). Genom utveckling och förfining av beräkningsmetoder för pålelementets bärförmåga och att stötstågmätning blivit väletablerad har medfört att kapaciteten nu höjts till närmare 1200 kN för i stor sett samma typ av betongpåle. (Axelsson och Rehnman, 1999)

### 2.2.2. Typer av betongpålar

Idag används i huvudsak tre olika betongpålar, SP1, SP2 och SP3. Dessa beteckningar infördes i början av 90-talet och tidigare fanns motsvarigheter till dessa som gick under beteckningar som A600, B600 m.fl.

De betongpålar som används i Sverige är till största delen förtillverkade. Pålarna tillverkas inomhus i fabriker och transporteras sedan ut till olika projekt. Pålarna är skarvbara och tillverkas i längder mellan 3-13 meter. I Sverige används slakarmerade pålar till skillnad mot andra länder i Europa där förspänd armering är vanligare. En av nackdelarna med slakarmerade pålar är att de är känsligare för dragspänningar. Pålarna tillverkas med kvadratiska tvärsnitt och gjuts vanligen i betongkvalité K50. För särskilda ändamål tillverkas även specialpålar med andra tvärsnitt och högre betongkvalité. Vid kajer används ofta större tvärsnittsmått än detta för att klara knäckningsrisken. De standardiserade pålarna levereras med specifikationer enligt Tabell 2.1. De påltyper som ingår i databasen finns redovisade i Bilaga 7.2. Eftersom examensarbetet endast avser betongpålar har endast dessa behandlats i detta avsnitt.

Tabell 2.1 Dimensioner för vanligaste standardiserade pålarna (Olsson och Holm, 1993)

Beteckning enl. Sv. Std.	Kantmått (mm)	Armering	Betong
SP1	235	4ø16, Ks60	K50
SP2	270, 275	8ø12, Ks60	K50
SP3	270, 275	8ø16, Ks60	K50

Pålarna förses normalt med en fastgjuten bergsko. Detta möjliggör inmejsling vid eventuellt berg och risken minskar samtidigt för excentrisk belastning vid slagningen av pålen.

### 2.2.3. Slagutrustning

I dagens Sverige är pålmaskiner av typen frifall dominerande. Anledningen är att de har bästa verkningsgraden vad gäller överföring av energi till pålen (ca 80 %). På 1960- och 1970-talet användes till stor del linhejare. Hejaren lyfts upp med hjälp av olika linspel. Nackdelen med

linhejare är att jämnhet i anslagshastigheten är svårt att uppnå. Detta ger i sin tur upphov till stora variationer i initialpåkänningen i pålen.

I slutet av 1970-talet ersattes linhejaren av den hydrauliska frifallshejaren. Här lyfts hejaren upp med hjälp av hydraulik istället för med linor. Den vanligast förekommande maskinen idag är den finsktillverkade Junttan, se Figur 2.1. Denna hejare lyfts upp med hjälp av oljetryck i en kolv. När trycket sänks, pressas oljan tillbaka och kolven faller. Hejarens effektivitet är beroende av temperaturen hos oljan.

En annan vanligt förekommande frifalls maskin är den svensktillverkade Banut. Den fungerar inte riktigt efter samma princip som Junttan, utan hejaren lyfts upp med en kolv som sedan dras undan snabbare än vad hejaren faller. Följden blir ett i stort sett fritt fall.

Hejarvikten varierar normalt mellan 3 och 5 ton, men även andra vikter förekommer. Den maximala fallhöjden är 0,8-1,2 meter beroende på maskintyp. Dessa höga fallhöjder behövs normalt ej under varken drivningen eller stoppslagningen utan används endast för att mobilisera bärförmågan vid stötvågsmätning av kontrollslaget (Olsson och Holm, 1993). Se Bilaga 7.4 för lista över slagutrustning som ingår i databasen. Det finns många andra typer av slagutrustning, men då dessa inte finns i databasen har de inte behandlats här. Dock kan nämnas att på senare tid har så kallade accelererade hejare börjat användas. Detta innebär att hejare accelereras innan den börjar falla fritt, vilket medför att effektiviteten ökar till 100-110%.



Figur 2.1. Pålkranen Junttan i aktion

## 2.2.4. Problematik vid pålning

### *Omfattande slagningsarbete*

I Pålkommisionens rapport 94 finns riktlinjer för hur mycket en påle maximalt får slås för att fortfarande klara bärighetskraven. Högt slagantal leder ofta till utmattningsskador och spruckna pålhuvuden vilket i största mån bör undvikas.

Tabell 2.2. Maximalt antal slag vid drivning enligt Pålkommisionens rapport 94 (Holmberg, m.fl., 1996)

Påltyp	Antal slag	Fallhöjd vid drivning
SP1	2500	0,4
SP2	3500	0,4
SP3	3500	0,4

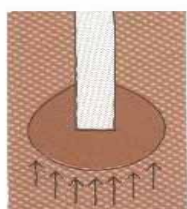


Tabell 2.2 anger maximalt tillåtna slagarbete för drivning av olika pålar. Grundkravet vid stoppslagning enligt Pålkommisionens rapport 94 är 10 mm per tio slag, och hålls drivningsarbetet inom ovanstående riktlinjer skall inga övriga åtgärder behövas. Dimensionering av lastkapacitet kan då ske enligt Pålkommisionens rapport 94. Uppstår däremot problem att klara stoppslagningskravet eller överskrids antal slag enligt Tabell 2.2 måste följande åtgärder vidtas:

- Den geotekniska bärförmågan måste verifieras med t.ex. stötvågsmätning eller statisk provbelastning
- Slagningen skall fortsätta tills stoppslagningskriterierna uppnås och därefter verifieras bärförmågan med stötvågsmätning
- Alternativt kan erforderlig bärförmåga på enskild påle minskas samtidigt som totala antalet pålar ökas efter samråd med konstruktören

### *Falska pålstopp*

Falska pålstopp är ett problem som ofta orsakar förseningar och ändrade konstruktionslösningar och/eller val av pålar. Ändringar som uppkommer mitt i byggskedet resulterar alltid i stora kostnadsökningar. Falska pålstopp förekommer emellanåt i siltiga jordar med stor fjädring. Fenomenet är dock relativt ovanligt. Silten ger ofta ett stort neddrivningsmotstånd utan att pålens bärförmåga blir särskilt stor. Detta beror på att jorden vid pålspetsen packas under slagningen (Hellman, 1978). Jorden måste sedan trängas undan av pålspetsen och kornen i jorden flyttas i förhållande till varandra, vilket leder till att porernas volym ökar. På grund av att silten är tät kan en utjämning av det undertryck som bildas kring pålspetsen inte ske tillräckligt snabbt.



*Volymökning vid slagning*

*Figur 2.2 Illustration av falskt pålstopp (Hellman, 1978)*



*Efter tryckutjämning*

Kornen pressas då hårdare och hårdare mot varandra och en klump bildas kring pålspetsen. Pålen kan då tros vara stoppslagen. När pålen sedan får stå i några timmar sugs vatten in i porerna igen och undertycket utjämnas, se Figur 2.2. Pålslagningen kan då fortsätta med normalt drivningsmotstånd, dock med risk att råka ut för falskt stopp igen. (Hellman, 1978)

Vid en vidare studie (Möller, 1991) studeras fenomenet närmare och här konstaterades det att det uppstår positiva och negativa dynamiska porvattentryck kring en påle vid varje slag. Dessa snabba porvattentryckförändringar leder till att pålen sugs fast och på så sett ökas pålens effektiva area. Effektivspänningsnivån kring pålen blir tillfälligt större vid varje slagögonblick och leder till mycket svår drivning. I Sverige påträffas sådana jordar främst i Norrland, men fenomenet förekommer även i andra delar av landet.

Falsa pålstopp kan vara svåra att upptäcka om efterslagning ej utförs. Efterslås pålen upptäcks problemet lätt. Det är omöjligt att genom geotekniska undersökningar identifiera problemet, utan ofta upptäcks falska pålstopp under byggnadsfasen. De falska stoppen leder ofta till hård drivning för att komma ner till ett bärkraftigare lager. Det leder i sin tur till stor andel bortslagna och utmattade pålar. Kan istället fenomenet upptäckas i ett tidigt skede finns möjligheter att anpassa pålningen efter de rådande geotekniska förhållandena. Förslag till åtgärder är följande:

- Hejarvikten ökas för att generera en längre och skonsammare stötvåg. Detta ger totalt sett färre antal slag och minskad risk för farliga dragspänningar i pålen.
- Stötvågmätning utförs på fler pålar inom projektet vilket leder till att totalsäkerhetsfaktorn kan sänkas.
- Extra dynträ kan användas som förlänger stötvågens varaktighet.
- Högre bärförmåga kan mobiliseras med högre fallhöjd på hejaren
- I vissa fall måste pållasten reduceras och i värsta fall måste påltypen bytas till t.ex. grävpålar eller borrarade stålplålar. (Axelsson och Rehnman, 1999)

Detta är dock akuta åtgärder som lätt kan undvikas genom utförd provpålning i ett tidigt skede. Då finns tid att finna nya lösningar och överraskningar när projektet redan pågår undviks. Finns även tidigare projekt på platsen går det att även den vägen få en uppfattning om hur drivningen kommer att bli. (Axelsson och Rehnman, 1999)

Ibland kan viss begreppsförvirring förekomma där falska pålstopp blandas ihop med försvårad neddrivning. Falsa pålstopp kan jämföras med engelskans *relaxation*. Definitionen på försvårad neddrivning är att det är svårt att uppnå tillräcklig bärighet trots intensivt slagningsarbete vilket ofta resulterar i utmattning och bortslagning av pålar. (Axelsson, 2003)

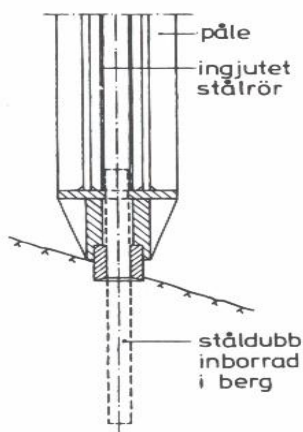
### *Dragspänningar*

Ett annat problem som kan uppstå vid pålning är att det uppkommer dragspänningar i pålen. Risken för dragspänningar är extra stor då drivning sker vid litet spetsmotstånd. Dragspänningar gör att småsprickor öppnas och vatten suges in i pålen. När sedan hejaren träffar pålen igen så tryck vattnet ut igen med stor kraft kan skapa stora skador på pålen. För att undvika dess skadliga spänningar kan man välja en tyngre hejare och lägre fallhöjd. Ett sätt att upptäcka dragspänningar i pålen är att ett klappande ljud mellan hejaren och pålen uppstår, då dragvägen är så stark att den drar med sig pålen nedåt. (Olsson och Holm, 1993)

Standardpålar drabbas sällan av detta problem utan risken är ofta större vid specialtillverkade pålar med större tvärsnitt. På dessa pålar krävs extra armering för att undvika vatteninträngning.

### *Släntberg*

I områden med släntberg kan ett annat problem uppstå. Vid stoppslagningen får man låg sjunkning som indikerar bergstopp. När fallhöjden sedan höjs vid kontrollslaget kan extremt stora värden på sjunkningen uppmätas. Anledningen är att pålen inte var stadigt stoppslagen på berg utan stod på en avsats, som pålen glider av vid kontrollslaget. I dessa fall kan det bli nödvändigt att använda den s.k. Göteborgsmetoden för att slå fast pålen, se Figur 2.3. Metoden går ut på att pålen förses med ett invändigt borrhör, vanligen med innerdiametern 57 mm.



Hålet längst ner vid bergdubben är fylld med betong för att förhindra inträngning av jord i röret under drivningen. När pålen träffar på berget borras ett hål på minst en halvmetr ner i berget. Därefter förs ett stålämne ned, vars längd är minst en meter. Slutligen innejslas pålen på vanligt sätt med 300 slag och låg fallhöjd.

Figur 2.3 *Betongpåle innejslad i berg (Olsson, 1993)*

### *Massförträngning*

Massförträngning kan ibland skapa problem, speciellt när pålar skall slås i nära anslutning till hus eller vid kajer. Detta problem kan lösas med en så kallad lerpropp. Metoden går ut på att ett rör borras ner i leran och botten sluts sedan mekaniskt eller så hålls leran kvar med hjälp av tryckluft. När röret sedan dras upp följer leran med och pålen kan slås utan massförträngning. Maximala djupet är 12 meter, men den används sällan till mer än 8 meter (Olsson och Holm, 1993)

## **2.3. Geoteknisk bärförmåga hos betongpålar**

### **2.3.1. Geoteknisk bärförmåga**

#### *Mantelburna pålar*

Den geotekniska bärförmågan är jordens och/eller bergets förmåga att ta upp påförda lasteffekter utan att det uppstår brott i jord och berg eller att skadliga rörelser uppstår. Tas största delen av lasteffekten upp utav friktion längs pålens mantel kallas pålen för mantelburen (Olsson och Holm, 1993).

Direkt efter att pålen är slagen är jorden störd. I kohesionsjord innebär det att pålens bärförmågan är nedsatt på grund av att lerans ursprungliga hållfasthet är tillfälligt förlorad. Med tiden rekonsoliderar leran och hållfastheten ökar. Därför är det viktigt att efter neddrivningen vänta innan kontrollslaget utförs. Är leran överkonsoliderad innan påslagningen övergår den oftast till att bli normalkonsoliderad och en normalkonsoliderad lera återgår till att vara normalkonsoliderad. (Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984)

#### *Spetsburna pålar*

Tas den största delen (mer än 50 %) av lasteffekten upp av pålens spets är pålen spetsburen. Antingen stoppslås pålen i bärkraftigt jordlager eller mot berg. En stor del av de pålar som slås i Sverige betraktas som spetsburna även om en viss del utav lasten överförs till jorden via pålarnas mantelyta. (Olsson och Holm, 1993)

En påles bärförmåga verifieras med hjälp av sjunkningsmätningar i samband med stoppslagningen och analysering av stötvågor, se Avsnitt 2.4. Vid stötvågsmätningen fås den karakteristiska bärförmågan ( $R_k$ ). Med hjälp av nedanstående formel (2.1), beräknas sedan den dimensionerande bärförmågan ( $R_d$ ) fram.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_n * \gamma_{mp} * \gamma_{Rd}} = \frac{R_k}{\gamma_{tot}} \quad (2.1)$$

Partialkoefficienterna som använts förklaras nedan.

- Partialkoefficient som beaktar säkerhetsklassen:  $\gamma_n$
- Partialkoefficient som beaktar osäkerheten i jordegenskaper:  $\gamma_{mp}$
- Partialkoefficient som beaktar variationen i slagutrustningen :  $\gamma_{Rd}$
- Partialkoefficient som beaktar totala säkerheten:  $\gamma_n$   
(Olsson och Holm, 1993)

### 2.3.2. Säkerhetsklasser

Vid byggnationer måste dels väljas vilken säkerhetsklass byggnadsdelarna skall konstrueras i samt vilken geoteknisk klass som är lämplig.

Det finns tre olika säkerhetsklasser. Den lägsta, SK1, används för mycket enkla konstruktioner där det är ringa risk för personskada. SK2 krävs där det finns risk för någon personskada och SK3 används där det är stor risk för personskada. Inom samma byggnation kan olika delar ha olika säkerhetsklasser beroende på hur stor skadan blir om en kollaps sker. T.ex. stommen i ett hus är ofta av SK3 medan innerväggarna inte alls behöver ha samma säkerhet.

För att välja lämplig säkerhetsklass kan följande riktlinjer användas:

#### *Säkerhetsklass 1, SK1*

- Personer vistas endast i undantagsfall i eller invid byggnaden
- Byggnadsdelen är av sådant slag att ett brott inte rimligen kan befaras medföra personskada.
- Byggnadsdelen har sådana egenskaper att ett brott inte leder till kollaps utan endast till obrukbarhet.

#### *Säkerhetsklass 3, SK3*

- Personer vistas ofta i byggnaden
- Byggnadsdelen är av sådant slag att en kollaps medför stor risk för personskador.
- Byggnadsdelen har sådana egenskaper att ett brott leder till omedelbar kollaps utan temporär kraftomlagring.

Alla övriga byggnader skall hänföras till Säkerhetsklass 2.

Vid pålning kan pålgrupper ej delas in i olika säkerhetsklasser, utan en generell bedömning måste göras. I vissa fall kan en kollaps av en enstaka påle eller pålgrupp leda till kollaps av

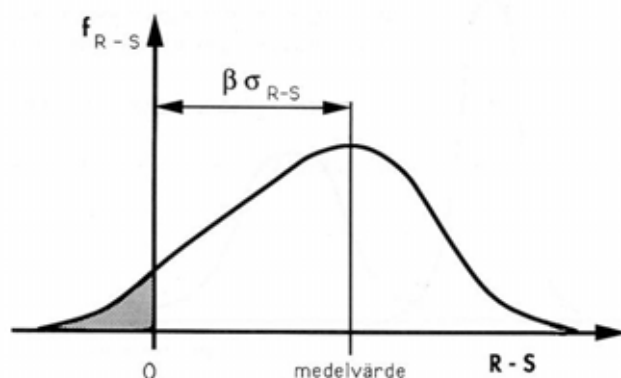
den ovanliggande byggnaden och i dessa fall måste SK3 väljas. Oftast sker dock bara en kraftomlagring mellan pålar och mark och ingen risk för omedelbar kollaps finns. Då väljs antingen SK2 eller SK1 men den sistnämnda används sällan. För de olika säkerhetsklasserna väljs partialkoefficienterna enligt Tabell 2.3. (Olsson och Holm, 1993)

Tabell 2.3 Partialkoefficienter

Säkerhetsklass 1	$\gamma_n = 1,0$
Säkerhetsklass 2	$\gamma_n = 1,1$
Säkerhetsklass 3	$\gamma_n = 1,2$

### 2.3.3. Bestämning av partialkoefficienter med $\beta$ -metoden

Vid dimensionering av pålar används olika partialkoefficienter för att bygga in en säkerhetsfaktor i beräkningarna. De rekommenderade koefficienterna kan i vissa fall ge överdrivet stora säkerhetsmarginaler som i sin tur fördyrar och försenar arbetet. För att kunna dimensionera mer effektivt är det ofta fördelaktigt att använda  $\beta$ -metoden, för att ta fram kalibrerade partialkoefficienter.  $\beta$ -metoden är en sannolikhetsbaserad teori. I metoden används den statistiska fördelningen hos laster och bärförmågor. (Detta ska inte förväxlas med integritetsvärdet  $\beta$ ).



Figur 2.4 Förklaring av poster i  $\beta$ -metoden

$\beta$  är ett säkerhetsindex som enligt Nybyggnadsreglerna är ett accepterat sätt att verifiera en konstruktions tillräckliga bärförmåga, stadga etc. Resultatet av en beräkning med  $\beta$ -metoden är ett tal, ett säkerhetsindex  $\beta$  som är ett mått på hur troligt det är att gränsen till önskat beteende skall överskridas. Metoden kräver att ett större antal pålar testas med stötvågsmätning. Sannolikhetsfördelningen ser ut enligt Figur 2.4. Brottssannolikheten är lika med ytan under kurvan i det intervall som betyder brott, det vill säga där  $R-S$  är mindre än noll.  $R$  står för de mothållande krafterna och  $S$  står för de pådrivande krafterna. I Figur 2.4 har området skrafferats. Eftersom denna sannolikhet är svår att beräkna har man ersatt den med ett ställföreträdande riskmått, säkerhetsindex  $\beta$ . Det talar om hur långt det är mellan gränsen till brott och kurvans medelvärde, där man ju förväntar sig att finna att de flesta verkliga värdena hamnar. Som mått för detta avstånd har man valt standardavvikelsen, d.v.s. spridningen hos kurvan. Om man istället gör detta kommer man att finna att  $\beta$ -värdet motsvara brottssannolikheten.

- Liten brottsannolikhet betyder alltså stort B
- Stor spridning betyder litet B och stor brottsannolikhet

B-metoden kan sedan kopplas till Säkerhetsklasserna, som beskrevs i Avsnitt 2.3.2. (*Hercules Grundläggning AB, 1991*), (*Olsson, 1990*)

### 2.3.4. Geotekniska klasser

Det andra ställningstagandet är vilken geoteknisk klass grundläggningsarbetena skall dimensioneras i. Detta beror på flera faktorer och det är inte alltid lätt att välja klass m.h.t. de geotekniska förutsättningarna, som ofta kan vara svåra att utreda. Geoteknisk klass 1 används sällan vid större byggnationer utan tillämpas vid mindre arbeten som t.ex. villor. De geotekniska förutsättningarna skall vara tydliga och pålar skall till exempel vara oskarvade, spetsburna och maximalt ha en dimensionerande bärförmåga på 300 kN. Ingen risk för ras får förekomma och det får heller inte förekomma några angränsande konstruktioner som kan påverkas.

Det råder inget samband mellan säkerhetsklasserna för byggnadsdelarna och den geotekniska klassningen. En konstruktion kan alltså ha geoteknisk klass två men samtidigt SK3 i övriga byggdelar. Den enda regleringen är att SK3 ej får användas ihop med GK 1.

GK2 är den vanligast förekommande och den används i stort sett vid alla konstruktioner. Endast om det finns speciella krav på säkerhet eller om det råder svåra geotekniska förhållanden används GK3. I GK2 skall jordens egenskaper kunna bestämmas med väldokumenterade och allmänt accepterade metoder och även konstruktionen skall bygga på erfarenhet och väl beprövade metoder. (*Olsson och Holm, 1993*)

### 2.3.5. Normerade och rekommenderade bärförmågor

*Pålkommisionen 94*

I Pålkommisionens rapport 94 (*Holmberg G., m.fl., 1996*) ges dimensionerande värden på bärförmågan i brottgränstillståndet för spetsburna pålar som stoppslås till högst 10 millimeter / 10 slag. Dessa redovisas i Tabell 2.4.

*Tabell 2.4. Dimensionerande värden på bärförmågan i brottgränstillståndet*

Hejare (ton)	Fallhöjd (meter)	SP1		SP2 och SP3	
		Säkerhetsklass 2	Säkerhetsklass 3	Säkerhetsklass 2	Säkerhetsklass 3
3	0,4	<b>490 kN</b>	<b>450 kN</b>	<b>572 kN</b>	<b>525 kN</b>
4	0,4	<b>550 kN</b>	<b>504 kN</b>	<b>663 kN</b>	<b>608 kN</b>
4	0,5	-	-	<b>750 kN</b>	<b>688 kN</b>
5	0,3	<b>536 kN</b>	<b>492 kN</b>	<b>609 kN</b>	<b>558 kN</b>
5	0,4	<b>550 kN</b>	<b>504 kN</b>	<b>727 kN</b>	<b>667 kN</b>

*Vägverket*

I delen om grundläggning i Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för brobyggande 2002 ges rekommendationer för bärförmågan hos en påle under förutsättning att den kvarstående

sättningen är högst 10 millimeter/10 slag, se Tabell 2.5. Frifallshejaren skall ha en effektivitet på minst 80 %, slagdynans vikt skall understiga 1/6 av hejarens vikt och dynträt skall vara inslaget med minst 300 slag och högst vara 25 millimeter tjockt.

Vid stoppslagning mot berg godtas en ökning av värdena med 10 % förutsatt att sjunkningen är högst 3 millimeter per tio slag.

Tabell 2.5 Dimensionerande värden på bärförmågan i brottgränstillståndet

Hejare (ton)	Fallhöjd (meter)	SP1 (0,055 m <sup>2</sup> )		SP2 och SP3 (0,076 m <sup>2</sup> )	
		Säkerhetsklass 2	Säkerhetsklass 3	Säkerhetsklass 2	Säkerhetsklass 3
3	0,4	520 kN	480 kN	600 kN	550 kN
4	0,4	585 kN	540 kN	685 kN	630 kN
4	0,5	655 kN	605 kN	770 kN	710 kN
5	0,4	625 kN	575 kN	750 kN	690 kN

Rekommenderade bärförmågor

Från branschen har det kommit krav på enklare och mer schablonmässig dimensionering vid de vanligast förekommande pålningsarbetena. För spetsburna pålar har följande förslag till maximala karakteristiska medelvärden tagits fram. Dessa värden redovisas i Tabell 2.6.

Tabell 2.6 Förslag på maximala medelvärdet på karakteristiska bärförmågan

Påltyp	Spets i bottenmorän	Spets på Berg
SP1	1600 kN	1800 kN
SP2, SP3	2000 kN	2500 kN

Dessa värden kan endast uppnås vid gynnsamma slagningsförhållanden med en hejarvikt på fyra ton och med måttlig spetsdämpning. Högre värden går att fås, men då med risken att pålens tryck och/eller dragkapacitet överskrids.

Den dimensionerade geotekniska bärförmågan ska inte överstiga värdena i Tabell 2.7. Värdena i tabellen gäller under förutsättning att slagning sker med frifallshejare och att stötvågsmätning utförs på minst 5 % av pålarna samt produktionskontroll utförts på minst 25 %. Värdena i Tabell 2.7. är endast baserade på erfarenhet samt utförda beräkningar. (Ehnbåge, m.fl., 1994)

Tabell 2.7 Dimensionerande övre geoteknisk bärförmåga

Påltyp	Spets i bottenmorän	Spets på Berg
SP1	800 kN	900 kN
SP2, SP3	1000 kN	1250 kN

## 2.4. Stötvågsmätning

Stötvågsmätning är en metod som används för att bestämma en påles geotekniska bärförmåga. Under 1980-talet utvecklades metoden mycket och idag har tekniken många tillämpningsområden inom pålning (Hermansson, 1992). Främst används stötvågsmätning för att verifiera en påles bärförmåga samt för att fastställa slagningskriterier.

När en påle utsätts för ett slag av en hejare uppstår en stötvåg. Den uppkommer av den hoptryckning som bildas i påltoppen då hejaren bromsas upp. Stötvågen transporteras nedåt i

pålen med ljudets hastighet, som i betong varierar mellan 3600-4200 m/s. Hastighets beror bland annat på slagningsarbetet och materialets ålder och kvalitet.

Vågens utbredning i pålen registreras av två töjningsgivare och två accelerometrar, se Figur 2.5. Anledningen till att två givare av varje sort används är för att minimera mätfel, som ofta beror på att hejaren träffar pålhuvudet snett och böjmoment i pålen uppstår (*Gustafsson och Romell, 1985*). De två töjningsgivarna ger ofta olika resultat, som sammanställs till ett medelvärde. Saknas en töjningsgivare blir därför resultatet missvisande och bör inte användas till analyser av bärförmågan. Accelerometrarna är inte lika känsliga för böjmoment och därför är resultat med endast en givare tillförlitliga. (*Axelsson, 2003*)

Oftast slås ett litet slag före själva mätslaget för att kontrollera att hejaren träffar i linje med pålen. Vid själva mätslaget är det också viktigt att tillräcklig mängd energi mobiliseras. En permanent sjunkning på tre millimeter brukar användas som indikation på att bärförmågan i princip är fullt mobiliserad (*Axelsson, 2003*). För att undgå stora variationer i bärighet för samtliga pålar behövs ibland flera slag slås, där energin successivt ökas. Det blir här tydligt att bärförmågan inom ett projekt till stor del beror på hur stor mängd energi pålen utsätts för under mätslaget. En påle som uppvisar onormalt låg bärförmåga i en i övrigt bra pålgrupp kan leda till onödiga spekulationer, som undviks om provslagen blir likvärdiga.



Figur 2.5 Accelerometer(tv) och töjningsgivare(th) vid stötvågsmätning

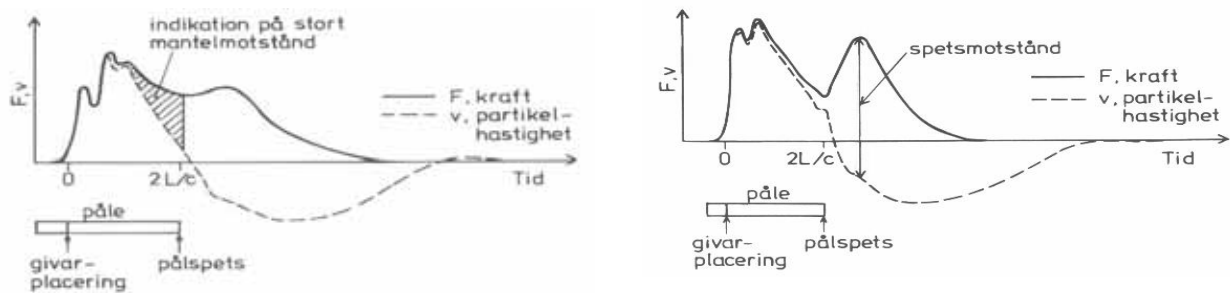
När pålen träffas av hejaren registrerar givarna den stötvåg som uppstår. En kurva kan sedan illustrera förloppet som därefter analyseras visuellt samt med beräkningsmetoder. Utseendet på stötvågen beror på ett stort antal faktorer vilket medför att det går att utläsa mycket information av att bara titta på kurvan. Tillämpningen av stötvågsmätning kan delas in i tre områden (*Hellman, 1967*).

### *Provpålning*

Provpålning utförs normalt på ca 5 % av alla pålar i ett projekt. Vid projekt med litet antal pålar ska antalet provpålar inte understiga fyra. Helst ska de vara slagna till olika djup eller stoppslagna till olika sjunkningar. Målet är att bestämma pålens funktion och bärförmåga. Har pålen stor mantelbärförmåga syns det genom att kraftkurvan ligger över hastighetskurvan, se



Figur 2.6. Mantelmotståndet orsakar en inbromsning av vågrörelsen och det syns som skillnaden mellan hastighetskurvan och kraftkurvan.



Figur 2.6 Stötvågskurvans utseende vid stort mantelmotstånd respektive spetsmotstånd (Olsson och Holm, 1993)

Har en påle utsatts för litet spetsmotstånd vid hejarslaget kommer reflexionen vara en dragvåg. Är spetsmotståndet däremot stort blir reflexionen istället en tryckvåg (Fischer och Hellman, 1963). Slås pålen mot hård jordlager kommer denna tryckvåg att vara mer markant, se Figur 2.6. Är reflexvågen tillräckligt kraftig erhålls en hejarstuds, som är en viktig indikation på hur stort spetsmotståndet är. Med hjälp av resultatet från stötvågmätningen kan bärförmågan analyseras med CASE-metoden eller genom signalmatchning med CAPWAP. Dessa beräkningsmetoder beskrivs närmare i Avsnitt 2.5. Utifrån detta kan sedan lämplig pällängd samt stoppslagningsvillkor bestämmas (Olsson och Holm, 1993).

#### Produktionskontroll

För att verifiera att pålarna uppnått erforderlig bärförmåga utförs i vissa fall produktionskontroll. Ofta utförs detta på 10-25 % av samtliga pålar. Här testas om villkoren från provpålningen är uppfyllda (Olsson och Holm, 1993).

#### Integritetskontroll

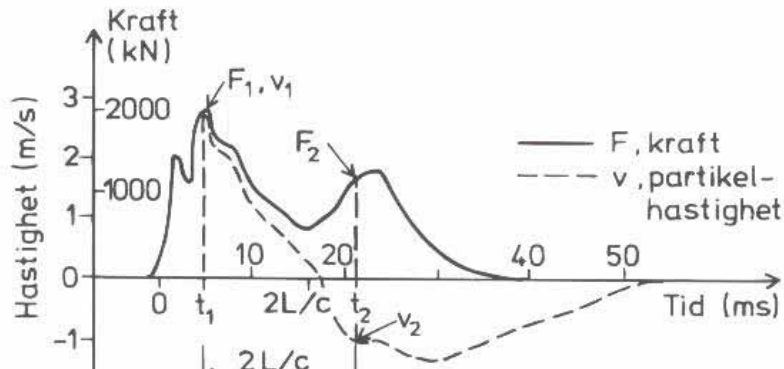
Vid integritetskontrollen identifieras och lokaliseras olika skador på pålen. Om pålen har en spricka syns på kurvan en minskning av kraften samtidigt som partikelhastigheten ökar. Detta orsakas av den uppåtgående dragreflexvåg som bildas ovanför sprickan. Eftersom ingen kraftöverföring sker förrän sprickan har blivit hoptryckt kommer reflexvågen senare i en skadad påle jämfört med en intakt påle (Gustafsson och Romell, 1985). Skadans storlekt eller sprickvidd kan bestämmas via olika beräkningsmetoder. I en av dessa metoder tas ett  $\beta$ -värde fram som anger skadegraden i form av reducerat tvärsnitt (Hermansson, 1992). Ett vanligt kriterium för att godkänna en påle är att  $\beta$ -värdet ska vara större än 0,8.

Är istället pålen helt av kommer en tidigare reflexion att detekteras, då pålen ”stoppslås” mot sin avbrutna nedersta del (Hellman, 1981). Oftast ingår integritetskontroll vid både produktionskontroll och provpålning (Olsson och Holm, 1993).

## 2.5. Metoder för utvärdering av bärförmåga

### 2.5.1. CASE

Utifrån resultat vid stötvågmätning kan en påles bärförmåga utvärderas med hjälp av CASE-metoden. Metoden utvecklades vid Case Western Reserve University i Ohio och den bygger på samspelet mellan partikelhastighet och kraft. För att kraft- och



Figur 2.7 Kraft- och partikelhastighetskurvorna vid stötvågmätning (Olsson och Holm, 1993)

Partikelhastighetskurvorna, se Figur 2.7, ska få samma amplitud multipliceras partikelhastigheten ( $v$ ) med impedansen ( $Z$ ). Impedansen räknas ut enligt (2.2), som är ett samband mellan pålens elasticitetsmodul ( $E$ ), pålens tvärsnittsarea ( $A$ ) och stötvågens utbredningshastighet i pålen ( $c$ ).

$$Z = \frac{E * A}{c} \quad (2.2)$$

När partikelhastigheten är multiplicerad med impedansen ser kurvorna ut enligt Figur 2.6. Ur kurvan kan flera parametrar läsas av som ligger till grunden för CASE-metoden. Pålens totala neddrivningsmotstånd är summan av den ingående kraften ( $F_{in}$ ) och den reflekterade kraften ( $F_{refl}$ ). Dessa räknas ut enligt sambanden (2.3) och (2.4).

$$F_{in} = \frac{1}{2}(F_1 + v_1 * Z) \quad (2.3)$$

$$F_{refl} = \frac{1}{2}(F_2 + v_2 * Z) \quad (2.4)$$

Summeras dessa två uttryck fås pålens totala neddrivningsmotstånd ( $R_{tot}$ ) (Ekvation 2.5).

$$R_{tot} = F_{in} + F_{refl} \quad (2.5)$$

Pålens neddrivningsmotstånd består av en statisk del och en dynamisk. Den statiska delen som motsvarar pålens statiska bärförmåga. Det dynamiska motståndet antas vara proportionellt mot partikelhastigheten vid pålspetsen enligt sambandet (2.6).

$$R_{dyn} = J_c * v_{spets} * Z \quad (2.6)$$

Man kan visa att  $v_{spets}$  är beroende av ett antal parametrar enligt samband (2.7).

$$v_{spets} = 2v_1 - \frac{R_{tot}}{Z} \quad (2.7)$$

Med hjälp av ovanstående ekvationer knyts alla uttryck samman och den statiska bärförmågan ( $R_{stat}$ ) kan beräknas.  $F_1$ ,  $v_1$ ,  $F_2$  och  $v_2$  avläses i Figur 2.7. Den statiska bärförmågan enligt CASE-metoden erhålls då ur samband (2.8).

$$R_{stat} = R_{total} - J_c(2 * F_1 - R_{total}) \quad (2.8)$$

Det största värdet på bärförmågan fås genom att söka den kombination av  $F_1$  och  $F_2$  som ger största  $R_{stat}$  då man vandrar över kurvan med bibehållet intervall  $2L/c$ .  $L$  står för avståndet mellan pålspetsen och mätpunkten.

Ekvationerna (2.6) och (2.8) innehåller en dimensionslös jordkonstant ( $J_c$ ). Den beskriver jordens dämpning och är beroende av jordens egenskaper vid pålspetsen. Goble & Rausche har angett rekommenderade värden för  $J_c$ -faktorn, men dessa kräver justeringar vid vissa jordtyper. De rekommenderade värdena är:

- 0,10 - 0,15 för sand
- 0,15 - 0,25 för siltig sand
- 0,25 - 0,40 för silt
- 0,40 - 0,70 för siltig lera
- 0,70 - eller högre för lera

Dessa värden är utformade enligt den ursprungliga metoden för CASE-beräkningen. Enligt den nuvarande RMX-metoden (som här beskrivs) ska värdena i tabellen ökas med 0,20 och  $J_c$ -faktorn får minst vara 0,40. (*Pile Dynamics Inc., 2000*)

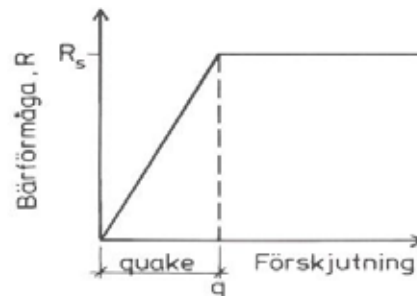
Vid bl.a. starkt fjädrande jordar, stor mantelbärförmåga och stor kvarstående sjunkning är det viktigt att noggrant bestämma  $J_c$ -faktorns värde. Detta kan göras med signalmatchning, så kallad CAPWAP-analys. Har pålen stor spetsbärförmåga påverkar inte  $J_c$ -faktorn den statiska bärförmågan i någon större utsträckning och CAPWAP-analysen är då oftast överflödigt (Olsson och Holm, 1993).

## 2.5.2. CAPWAP

Som tidigare nämnts kan en mer noggrann bestämning av den statiska bärförmågan fås fram vid signalmatchning med datorprogrammet CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program). Dessutom beräknas fördelningen av pålens bärförmåga mellan manteln och spetsen.

I modelleringen delas pålen in i segment. Varje segment har värden på parametrar som ska beskriva samverkan mellan jorden och pålen. De viktigaste parametrarna är:

- Statisk bärförmåga,  $R_s$
- Fjädring i jorden innan brott, quake,  $q_i$  (se Figur 2.8)
- Viskös dämpning,  $J$



Figur 2.8 Grafisk beskrivning av parametrar i CAPWAP-analys

Arbetsgången är en iterativ process, där parametrarna justeras tills dess att beräkning och uppmätt kraft sammanfaller. De aktuella parametervärdena anses då vara de korrekta. De resultat som fås ur analysen är främst den statiska bärförmågan samt fördelningen av denna på spets och mantel. Dessutom fås även ett mer noggrant värde på  $J_c$ -faktorn som sedan kan användas på övriga pålar i projektet om förhållanden på platsen inte varierar nämnvärt. (Olsson och Holm, 1993)

### 2.5.3. WEAP

I projekteringsstadiet av ett pålningsprojekt kan arbetet simuleras i datorprogrammet WEAP. I programmet simuleras rörelser och krafter i en påle då den utsätts för ett slag av en hejare. Simuleringen ger information om pålens drivbarhet, vilka spänningar som kan förväntas i pålen och dess bärförmåga som funktion av sjunkningen. Resultaten kan sedan användas för att välja lämplig kombination av påle, slagningsutrustning och bärförmåga samt bestämma sjunkningskrav för verifiering av pålens bärförmåga. I WEAP-programmet finns datafiler med information om bl.a. hejare, dynor och pålar, som i olika kombinationer kan användas vid simulering av pålning. Exempel på andra ingångsdata är fjädring, spetsmotstånd, dämpning och mantelfriktion. (Berglars, m.fl., 1993)

Vid datasimuleringar är det viktigt att tänka på att resultatet inte blir bättre än kvaliteten hos ingångsdata. Största osäkerheten i ingångsdata finns vanligen hos jordens egenskaper. (Berglars, m.fl., 1993)

## 2.6. Geotekniska undersökningar

Geotekniska undersökningar krävs för att få information om jord-, berg-, och grundvattenförhållandena. Utifrån resultatet bestäms sedan lämpliga påltyper, pålbarhet, pållängder etc. I Nybyggnadsreglerna ställs vissa krav på geotekniska utredningar beroende av konstruktionens geotekniska klass.

Den vanligaste typen av geoteknisk undersökning är sondering. Vid sondering drivs en spetsig stång ner i jorden, samtidigt som motståndet mot neddrivningen registreras. En tyngre sonderingsmetod tränger normalt djupare ner än en lättare men har samtidigt mindre möjlighet att urskilja fasthetsvariationer i lös jord. Ofta är det inte tillräckligt att utföra en typ av sondering, utan fler undersökningar görs vid samma borrhypunkt. Sonderingsmetoderna delas in i statiska och dynamiska metoder. Vid de förstnämnda drivs sonden ned genom tryckbelastning. Vid dynamisk sondering drivs sonden ned av slag. Här följer en kortfattad genomgång av de i databasen förekommande geotekniska undersökningsmetoderna. Databasen som skapas inom ramen för detta projekt förklaras närmare i Kapitel 3.

### *Viktsondering*

Denna metod tillhör de statiska sonderingsmetoderna, trots att det inte är helt korrekt. Viktsonden används som statisk sond i lös jord där sonderingsmotståndet är mindre än 1kN. När sonden inte sjunker ytterligare under denna belastning kringvrids den. Motståndet registreras med antal halvvarv som krävs för 20 cm neddrivning. Beroende av hur många halvvarv som går åt för 20 cm neddrivning kan slutsatser angående jordarten tas. I Tabell 2.8 redogörs riktlinjer för bedömning av jordtypen. Metoden används främst för att fastställa jordlagerföljdens relativa fasthet.

*Tabell 2.8. Riktlinjer för bestämning av jordtyp vid viktsondering*

<b>Halvvarv per 20cm</b>	<b>Jordtyp</b>
<10	Lös till medelfast lera eller mycket lösa sand- eller siltlager
10-30	Silt eller finsand
>30	Friktionsjord

### *Hejarsondering*

Hejarsondering är en dynamisk sonderingsmetod, som används för att bedöma fastheten hos fastare jordlager som t.ex. grus och morän. Neddrivningsmotståndet bestäms i antal slag per 20 cm sjunkning. Krävs fler än sex slag för att driva sonden 20 cm kan friktionsjord antas. Detta gäller dock inte för torrskorpelera.

Hejarsondering används också för att bestämma djupet till bärkraftiga lager. Vid spetsburna pålar kan en lämplig pållängd uppskattas eftersom sonderingsdjupet väl överensstämmer med neddrivningsdjupet för betongpålar. Genom att vrida sonden kan även mantelmotståndet bestämmas med denna metod.

### *Jord-bergsondering*

Vid jord-bergsondering drivs sonden med hjälp av bergborrmaskiner. Under sonderingen mäts motståndet i antal sekunder per 20 cm sjunkning. Denna metod används främst för att avgöra gränsen mellan jord och berg. Dessutom kan blockrik jord trängas igenom och tjockleken på block kan bestämmas. (*Handboken Bygg, del Geoteknik, 1984*).



## 3. Beskrivning och strukturering av databas

### 3.1. Val av databas

Efter att studerat flertalet av de vanligast förekommande databaserna på marknaden valdes en PC-baserad lösning med Microsoft Access. Valet stod mellan SQL- eller PC-baserad databas. En SQL-databas kan hantera stora mängder data och kan göras tillgänglig för i stort sett obegränsat antal personer. Nackdelen är att den är svårare att arbeta med och omfattande programmeringskunskaper krävs. Efter att ha bedömt omfattningen av ingående data och dess användningsområde valdes Access. Access är användarvänligt och har stor spridning på marknaden. I senaste versionen finns även möjlighet att konvertera databasen till SQL-format. Den kan då göras tillgänglig på Internet via webbapplikationer om det skulle behövas i efterhand (Thöyrä, 2003). Valet föreföll då vara enkelt, eftersom examensarbetets syfte inte var att lära sig avancerad databasprogrammering, utan att samla in material och analysera parametrar ur databasen.

Tanken med databasen är att den skall kunna användas av personer som arbetar med pålgrundläggning. Då databasen utformas i Access är det lätt bearbeta och utöka den efter framtida önskemål. En SQL-baserad databas kräver ett helt annat kunnande och bör administreras av utbildad personal.

### 3.2. En liknande databas

Vid en sökning på marknaden hittades bara en databas som påminde om den i detta projekt tilltänkta databas. Databasen är amerikansk och administreras av FHWA, som är USA:s motsvarighet till Svenska Vägverket. I databasen finns ca 850 projekt från hela världen varav de flesta är från Nordamerika. Den omfattar ungefär 1500 pålar, som är testade med bl.a. konventionell statisk provbelastning, stötvågsmätning samt Ostberg test. Alla typer av pålar förekommer, såsom stålpålar, grävpålar och betongpålar. Databasen innehåller även information om geologin i projektområdet.

Databasens struktur består av en SYBASE SQL-server som nås genom vanliga PC-datorer via klient/server-applikationer. Databasen är öppen och det är fritt för vem som helst att logga in och söka i databasen.

Sökningen i den amerikanska databasen sker genom fem olika sökkriterier. Kriterierna är *plats*, *påltyp*, *test metod*, *plats undersökning* och *geologisk information*. Efter att gjort önskade urval kan de erhållna data sedan analyseras i en användarvänlig mjukvara. Här följer några exempel på studier som kan göras.

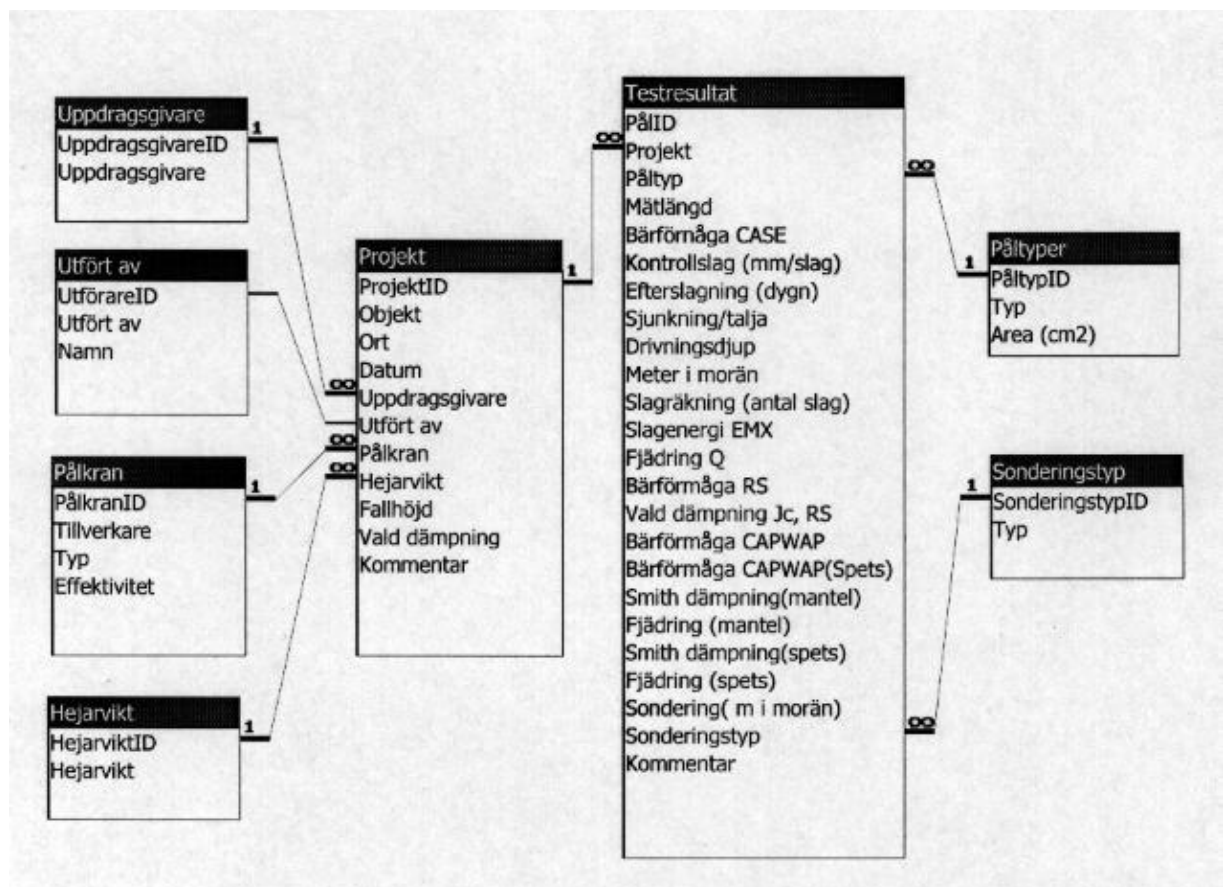
- Studera grundläggningen, jord prover och testmetoder
- Studera brottlaster
- Jämföra resultat från t.ex. stötvågsmätning och statisk mätning
- Utföra CAPWAP-analys
- Övriga korrelationsstudier mellan olika parametrar.

Skillnaden mellan denna amerikanska databas och den som skapas inom detta projekt är att den amerikanska är bred och omfattar i stort sett alla pålar, både mantelburna och spetsburna pålar. I den amerikanska databasen finns också en mycket mer omfattande geologisk information. Ca 120 projekt avser betongpålar i kohesionsjord och 260 projekt avser betongpålar i friktionsjord. I övriga projekt förekommer stålplålar och grävplålar. Databasen som har skapats inom ramen för detta projekt är fokuserad på spetsburna betongpålar i morän. Med ca 600 pålar i endast denna kategori finns ett mycket stort material att studera. I den amerikanska databasen finns inte lika stora mängder testresultat inom varje kategori.

Tanken var att eventuellt kunna använda sig av samma struktur som den amerikanska databasen men den övergavs eftersom den var SQL baserad och var alltför omfattande för det befintliga behovet.

### 3.3. Struktur

Den aktuella databasens har delats in i två grundtabeller. Dessa benämns *projekt* och *testresultat*, se Figur 3.1. I tabellen *projekt* finns alla data såsom plats, datum, och utrustning samt övriga parametrar som är gemensamma för samtliga pålar i projektet. De projekt där det finns särskilda omständigheter har kommentarer lagts till som exempelvis fjädrande jord eller stor bortslagning. Varje projekt har ett projekt ID som även finns med i tabellen *testresultat*. Det gör att varje påle lätt kan kopplas till rätt projekt.



Figur 3.1 Databasens struktur



Tabellen *testresultat* innehåller alla enskilda data för varje påle. Där ligger även påltypen eftersom den kan variera inom samma projekt. I tabellen finns en mängd olika parametrar som bl.a. beskriver bärförmågan, sjunkning/talja mm. Alla projekt är olika och dokumentationen är mer eller mindre komplett. I de fall där cellerna är tomma saknas uppgifter. En nolla i ett fält betyder att värdet är noll, t.ex. sjunkning i kontrollslaget.

Utöver de två grundtabellerna finns ett antal hjälptabeller, som främst har används för att underlätta inmatningen. De kan även användas för att ställa frågor i.

### **3.4. Användning av databasen**

Vid sökning i databasen används så kallade frågor för att filtrera och välja ut de data som ska analyseras. Med tanke på databasens omfattning är filtrering ett viktigt redskap för att få fram intressanta samband. Vid filtreringen som sker i Access frågefönster väljs först vilka tabeller man vill söka data ur. I de två stora tabellerna, *Testresultat* och *Projekt*, finns de parametrar som är vanligast vid sökning. Endast de tabeller som är öppna och syns i fönstret går att söka ur. Vill sökning efter ytterligare information göras och fler kriterier ställas upp måste de mindre tabellerna öppnas. Detta för att innehållet i tabellerna ska vara tillgängligt och nödvändigt då sökning ska göras med hänsyn till t.ex. påltyp, hejare, hejarvikt etc. Med filtrering menas att kriterier ställs upp för att kunna välja ut de pålar som ska studeras. När alla tabeller som ska användas är öppnade och synliga i fönstret blir samtliga ingående parametrar valbara för filtrering. Filtreringen sker i det nedre fönstret, där exakt vilka parametrar som ska undersökas väljs. Här kan även speciella villkor skrivas in som t.ex. ett visst intervall för sjunkning per talja eller drivningsdjup. Villkoren styrs med hjälp logiska operatörer, men programmet förstår även korta ord som t.ex. ”eller”.

Exempel på olika sökningar och speciella villkor:

- ”SP3 och SP2”, väljer ut Pålar av en viss typ
- ”>5 och <10, söker inom ett givet området, t.ex. stoppsjunkning
- ”0,076”, sökningen avgränsas till pålar med viss area.

Enklare beräkningar mellan olika parametrar kan också utföras i frågefönstret. Resultatet presenteras i en separat kolumn bredvid de övriga.

Databasen kan alltså användas för mer eller mindre avancerade sökningar. Ibland kanske bara ett snabbt och enkelt svar önskas för att jämföra uppmätta testresultat med tidigare utförda mätningar på en ort.

Det går även att göra egna formulär som är mycket mer användarvänliga med rullmenyer och knappar som gör databasen tillgänglig för personer som är ovana vid databaser och samtidigt kan urvalsmöjligheterna anpassas efter användningsområdet. Dock har här valts att inte göra några formulär för att detta skulle begränsa sökmöjligheterna.

### 3.5. Förklaring av poster i Testresultat tabellen

De poster som ingår i databasens ena huvudtabell beskrivs nedan.

<i>PålID:</i>	<i>Pålens individuella id-nummer</i>
<i>Projekt:</i>	<i>Projektet som pålen tillhör. Återfinns i tabellen Projekt.</i>
<i>Påltyp:</i>	<i>Ex SP1, SP3 eller äldre typer som A600 m.fl.</i>
<i>Måtlängd:</i>	<i>Avståndet mellan pålens spets och givarna</i>
<i>Bärförmåga CASE:</i>	<i>Utvärderad bärförmåga enligt CASE metoden</i>
<i>Kontrollslag:</i>	<i>Sjunkningen vid provslaget då stötvågsmätningen utförs.</i>
<i>Efterslagning:</i>	<i>Antal dygn efter stoppslagningen som stötvågsmätningen har utförts. Anges i decimal form, t.ex. 0,5 dygn=12 timmar</i>
<i>Sjunkning/talja:</i>	<i>Uppmätta sjunkningen vid sista taljan (mm/ 10 slag)</i>
<i>Drivningsdjup:</i>	<i>Pålen djup under marknivån</i>
<i>Meter i morän:</i>	<i>Pålens djup i morän. Uppskattat med hjälp av slagräkningsprotokoll. Friktionsjord antas vid mer än 30 slag per meter</i>
<i>EMX:</i>	<i>Uppmätt energi vid kontroll slaget. Mäts i enheten kNm.</i>
<i>Fjädring Q:</i>	<i>Uppmätt total fjädring vid kontrollslaget från stötvågsmätningen.</i>
<i>Bärförmåga CAPWAP:</i>	<i>Framräknad bärförmåga genom CAPWAP analys.</i>
<i>CAPAWAP (spets):</i>	<i>Bärförmågan för spetsen, (kN)</i>
<i>CAPWAP (mantel):</i>	<i>Bärförmågan kring manteln, (kN)</i>
<i>Smith dämpning (mantel):</i>	<i>Smith dämpningsfaktor för manteln, (s/m)</i>
<i>Fjädring (mantel):</i>	<i>Fjädring , (mm)</i>
<i>Smith dämpning (spets):</i>	<i>Smith dämpningsfaktor för spetsen, (s/m)</i>
<i>Fjädring (spets):</i>	<i>Fjädring, (mm)</i>
<i>Sondering (m):</i>	<i>Antal meter som sonderingar har trängt ner i friktionsjord. Förekommer endast på ett fåtal projekt då dessa uppgifter sällan finns med i rapporterna. Då de funnits med har de används för att verifiera antagandet om friktionsjord vid mer än 30 slag per m.</i>

Utfört av: Namnet på personen som analyserat resultaten av stötvågsmätningen. Förklaring av förkortningarna återfinns i tabellen med samma namn. Dessa redovisas i bilaga 7.3.

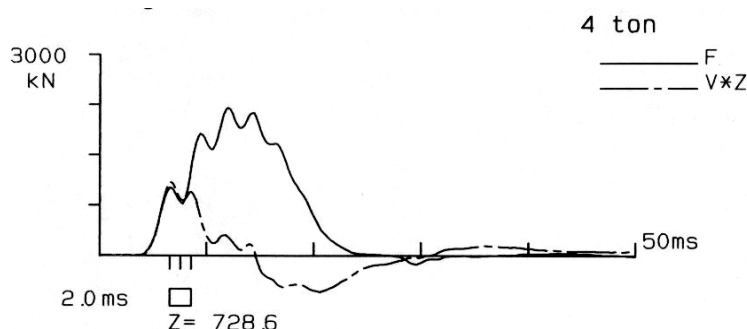
Sonderingstyp: Typ av sondering, ex viktsondering, JB-sondering

Kommentarer: Här finns kommentarer av enskilda pålar. Inga egna kommentarer eller slutsatser har fyllts i här, utan endast kommentarer från Stötvågsrapporterna från respektive projekt.

### 3.6. Ingående data

#### 3.6.1. Urvalskriterier

Projektets fokus är spetsburna betongpålar som är stoppslagna i morän. Därför har pålar med stor mantelbärförmåga uteslutits. Ofta står pålarnas funktion (spetsburen eller mantelburen) nämnt redan i projektbeskrivningen, men i samtliga fall har stötvågskurvorna studerats för att utvärdera om pålen ska inkluderas i databasen. I Figur 2.6 finns ett tydligt exempel på hur kurvan kan se ut vid stor mantelfriktion.



Figur 3.2 Bergstopp vid Högdalen, utfört av Aarnio, 1998

När en påle stoppslås på bra berg uppnås en hög bärförmåga och en låg stoppsjunkning. För att avgöra huruvida dessa skulle uteslutas studerades utseendet på kurvor från stötvågsmätningen. Vid kurvor liknande den i Figur 3.2 kan bergstopp antas och då togs den inte med i databasen. Det är dock inte alltid som kurvan visar ett lika tydligt tecken på bergstopp som i figuren. Därför har stor tillit lagts på de personer som utfört stötvågsmätningen. Fanns det i projektrapporter kommentarer om att en viss påle var stoppslagen på berg uteslöts den direkt. Likaså uteslöts pålar med kommentar om skador. Fanns uppgifter om pålens  $\beta$ -värde uteslöts de pålar där värdet understeg 0,8.

Vid stötvågsmätning måste två töjningsgivare användas, se Avsnitt 2.4. För att minska risken att inkludera mätfel har projekt uteslutits där endast en töjningsgivare använts.

För att det ska finnas största möjliga mängd information om en påle har projekt med bristfälliga rapporter uteslutits. Provpålningprojekt med slagräkningsprotokoll, CAPWAP-

analys och geologisk undersökning har prioriterats framför produktionskontroller. Ett antal produktionskontroller är inkluderade i databasen, men i de flesta fall är de bortrationaliserade.

### **3.6.2. Osäkerhet i data**

Av naturliga skäl har ingen möjlighet funnits att närvara vid de projekt som ingår i databasen och det är därför svårt att bedöma kvaliteten av ingångsdata. Här följer några exempel på faktorer och situationer som kan ha påverkat noggrannheten.

#### *Stötvågskurvor*

Stötvågskurvorna är inte bifogade i samtliga projekt. Då saknas bl.a. uppgifter om antalet töjningsgivare som använts, omfattning av mantelfriktion och huruvida bergstopp förekommit. Har varken några kommentarer eller extrema bärförmågor antytts angående pålens olämplighet har den inkluderats i databasen. Även redovisningen av maximalt uppmätt fjädring (DMX) varierar. Ibland är den utskrivna på stötvågskurvan med två decimalers noggrannhet, medan andra gånger avläses den i en graf till närmaste millimeter.

#### *Tid för kontrollslag*

Ibland finns uppgifter på exakt hur många timmar efter neddrivningen kontrollslaget är utfört. I andra projekt stod samma uppgift angiven i antal dygn, vilket minskar noggrannheten. Av denna anledning varierar kvaliteten i parametern.

#### *Fältförhållanden*

I en del projekt kan det på grund av svåra markförhållanden ha varit svårt att komma tillräckligt nära för att utföra noggrann avläsning. Ibland kan till och med mätningarna utföras i vatten. Vid mätning av sjunkning i kontrollslag handlar det ofta om några enstaka millimeter. Eftersom avläsningen ofta sker med grova pennsträck eller spett och ögonmått måste ett visst fel antas. Det är rimligt att mätfelet normalt är i storleksordningen ca en millimeter.

#### *Stoppslagning*

Kalkberg eller morän kan vara svårt att skilja på i södra Sverige. Ofta kan ett mycket fast moränstopp egentligen vara ett bergstopp. Därför kan kalkbergstopp finnas med i databasen trots att databasen är inriktad på spetsburna pålar i friktionsjord. Då dessa har liknande funktion som spetsburna pålar i friktionsjord är detta inget problem.

### **3.6.3. Geografisk spridning**

Vid uppbyggnaden av databasen har stor geografisk spridning av projekten eftersträvat. Anledningen till detta är att databasen skall kunna användas av personer som arbetar i hela Sverige och inte bara i en viss region. Totalt innehåller databasen 110 projekt med sammanlagt över 600 pålar. En lista över samtliga projekt i databasen finns redovisad i Bilaga 7.1 och deras spridning illustreras i Figur 3.3.



Vissa regioner innehåller få projekt. Detta kan bero på en låg byggfrekvens inom området samt att det inom ramen för detta examensarbete inte funnits tid att besöka alla aktörer som arbetar med pålning och stötvågsmätning.

Spridningen är även viktig för att kunna se samband och dra slutsatser gällande för pålar i Sverige och inte bara i en region med begränsad geologisk variation. Nu är alla olika jordar i Sverige representerade och databasen kan användas som hjälp vid dimensionering av pålar i hela Sverige.

*Figur 3.3 Geografisk spridning av projekten som ingår i databasen.*

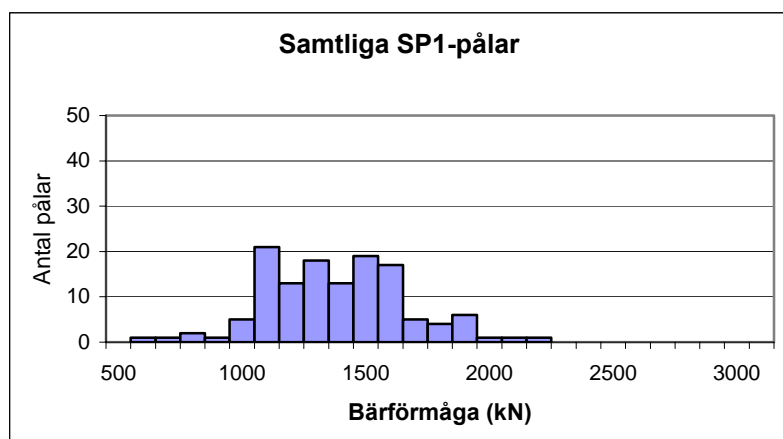


## 4. Presentation och analys av parameterstudier

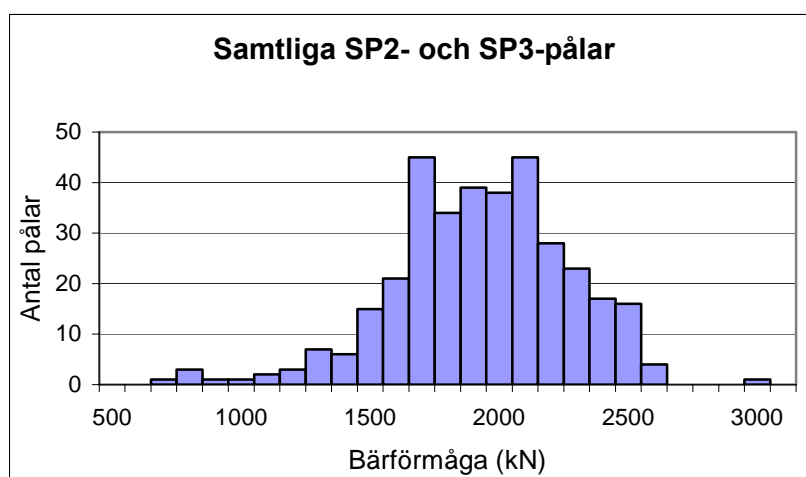
### 4.1. Studie av samtliga pålar

#### 4.1.1. Allmänt

Databasen innehåller över 600 pålar som alla är spetsburna betongpålar stoppslagna i morän. Pålarna har dessa förutsättningar gemensamt, men många andra parametrar är olika. Dessa parametrars påverkan ska med hjälp av databasen studeras i detta avsnitt. I Figur 4.1 och 4.2 har den karakteristiska bärförmågan plottats mot antalet pålar för att illustrera spridningen. Den enda uppdelning som gjorts är efter påltyperna. Medelvärdet på bärförmågan är högre för SP2- och SP3-pålar än för SP1-pålar. Det bör också tilläggas att databasen innehåller färre SP1-pålar än SP2- och SP3-pålar.



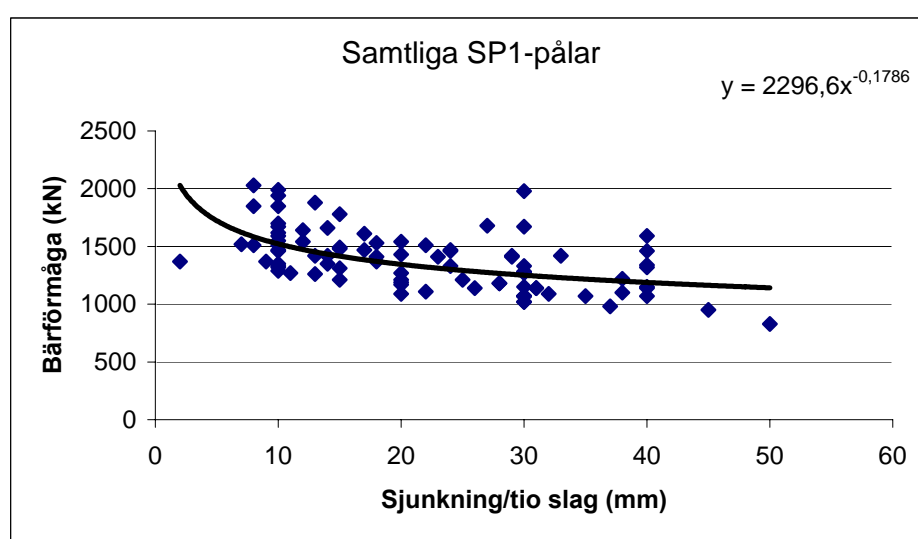
Figur 4.1 Spridning i bärförmåga från CASE-metoden hos samtliga SP1-pålar



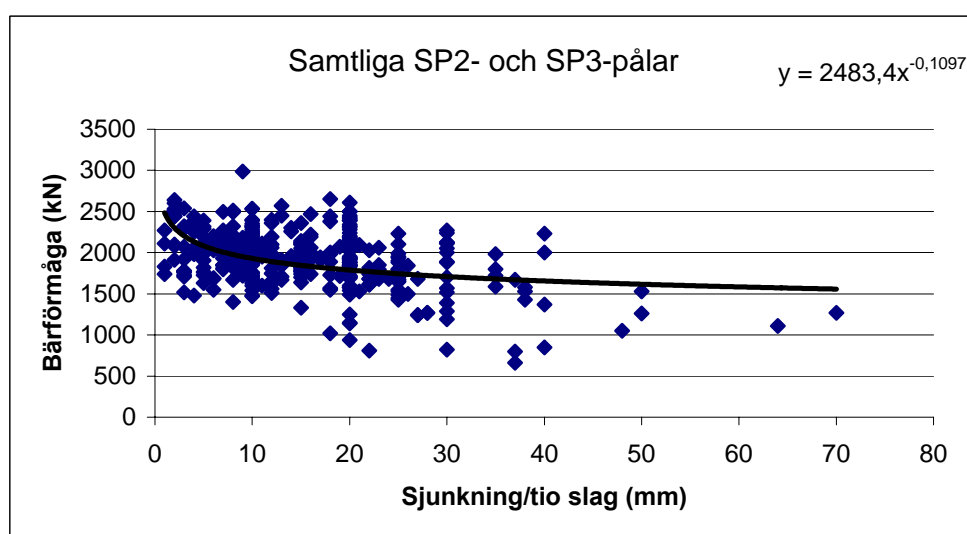
Figur 4.2 Spridning i bärförmåga från CASE-metoden hos samtliga SP2- och SP3-pålar

### 4.1.2. Stoppsjunkningen inverkan på bärförmågan

För att få en ökad förståelse för parametrarnas inverkan på bärförmågan har denna plottats för samtliga pålar mot den slutliga stoppsjunkningen per 10 slag. Drivningen av en påle avslutas när sjunkningen per talja är mindre än de uppställda kraven. Då antas pålen vara slagen till tillräckligt bärkraftigt jordlager för att önskad bärförmåga ska vara nådd. För en enskild påle är det naturligt att den karakteristiska bärförmågan ökar då pålen stoppslås till en mindre sjunkning. Databasen används här för att undersöka hur väl detta påstående överensstämmer för samtliga pålar i databasen utan att hänsyn tas till övriga parametrar. I Figur 4.3 och 4.4 har bärförmågan plottats mot sjunkningen per talja för 540 pålar. Det totala antalet pålar i databasen överstiger 600 stycken. Anledningen till att ett mindre antal tagits med här är att vissa pålar saknar uppgift angående sjunkningen per talja. Dessutom har pålarna delats in efter typ. Annars har inga övriga gallringar gjorts.



Figur 4.3 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot sjunkning per talja för samtliga SP1- pålar



Figur 4.4 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot sjunkning per talja för samtliga SP2- och SP3- pålar

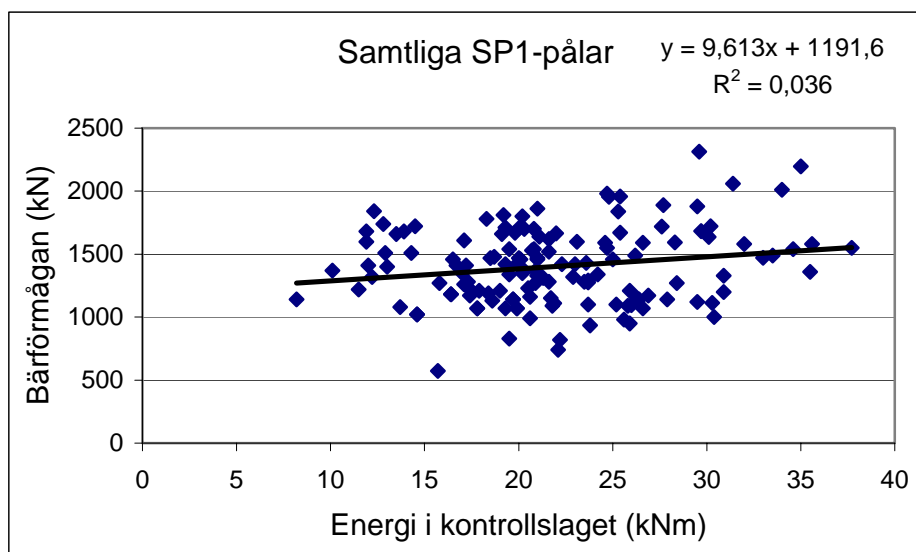


I Figur 4.3 och 4.4 är det svårt att urskilja något samband mellan bärförmågan och sjunkningen per talja. Anledningen är att hänsyn inte tagits till parametrar som påverkar bärförmågan. Bärförmågan är beroende av geotekniska förhållanden, slagutrustning, energi i kontrollslaget etc. (Olsson och Holm, 1993). En viss tendens till ökad bärförmåga vid låga stoppsjunkningar finns i de båda graferna. Dessa tendenser kan synas tydligare då pålar inom ett projekt plottas. Pålarna har då slagits med samma utrustning och likvärdiga geotekniska förhållanden.

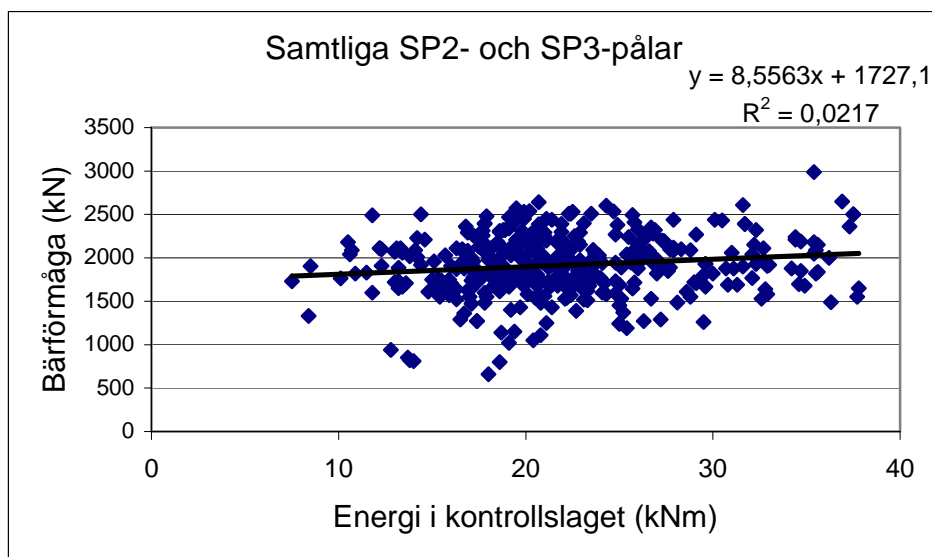
#### 4.1.3. Energins inverkan på bärförmågan

Ytterligare ett exempel där samtliga pålar plottats i två grafer visas i Figur 4.5 och 4.6. Här har bärförmågan plottats mot energin i kontrollslaget. Vid stor mängd energi i kontrollslaget mobiliseras större del av den möjliga bärförmågan. Resultatet från stötvågsmätningen blir då ett större värde på den karakteristiska bärförmågan. För en enskild påle är det därför naturligt att bärförmågan ökar vid större energimängd i kontrollslaget.

I diagrammen i Figur 4.5 och 4.6 är det inte heller lätt att se tydliga samband. Kurvan kan tolkas som om energin i kontrollslaget endast har en svag påverkan på bärförmågan. I likhet med grafen i Figur 4.3-4.4 beror den stora spridningen på att hänsyn inte tagits till övriga parametrar som också påverkar bärförmågan. Vid fortsatta analyser är därför en gallring av pålarna av stor vikt.



Figur 4.5 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot energin i kontrollslaget för samtliga SP1-pålar



Figur 4.6 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot energin i kontrollslaget för samtliga SP2- och SP3-pålar

Det kan vara värt att nämna att det i grafen i Figur 4.6 finns ett litet antal pålar som avviker mycket från de övriga genom att de har stor mängd energi i kontrollslaget. Anledningen till detta är att en hejare med vikten sex ton har använts vid kontrollslaget. Stor hejarvikt används vanligen vid neddrivning specialtillverkade pålar med stor tvärsnittsarea. I Tabell 4.1 redovisas en lista över de projekt där andra påltyper än SP1, SP2 eller SP3 använts.

Tabell 4.1 De projekt där andra påltyper använts än SP1, SP2 eller SP3

Datum	Ort	Objekt	Påltyp	Area (cm <sup>2</sup> )
1994-11-02	Läggesta	Järnvägsbro, Läggesta, stöd 3	350x350	1225
1994-10-17	Läggesta	Järnvägsbro, Läggesta, stöd 4	350x350	1225
1993-04-14	Upplands Väsby	Ladbron	350x350	1225
1998-11-26	Stockholm	Pampuskajen	300x300	900
1996-01-25	Halmstad	Svenska Malt AB	300x300	900

## 4.2. Analys av erfarenhetsvärden med $\beta$ -metoden

I Pålkommisionens rapport 94 finns rekommenderade värden för bärförmågor vid 10 millimeters stoppsjunkning per tio slag. Dessa värden får användas utan att stötvågsmätning utförs. Kravet är att pålarna stoppslås till maximalt 10 millimeters sjunkning per tio slag. Dessa värden bygger på erfarenhet, beräknad geoteknisk bärförmåga med hjälp av WEAP-analys. Med hjälp av databasen togs nya värden fram som sedan har jämförts med befintliga värden. I detta avsnitt har sex fall studerats med olika kombinationer av hejarvikt, påltyper och fallhöjd. Fallen redovisas i Tabell 4.2. I fall 1 redovisas beräkningsmetoder, använda formler och ekvation. I övriga fall redovisas endast resultaten.

Tabell 4.2 Sammanställning av de fall som studeras i detta avsnitt

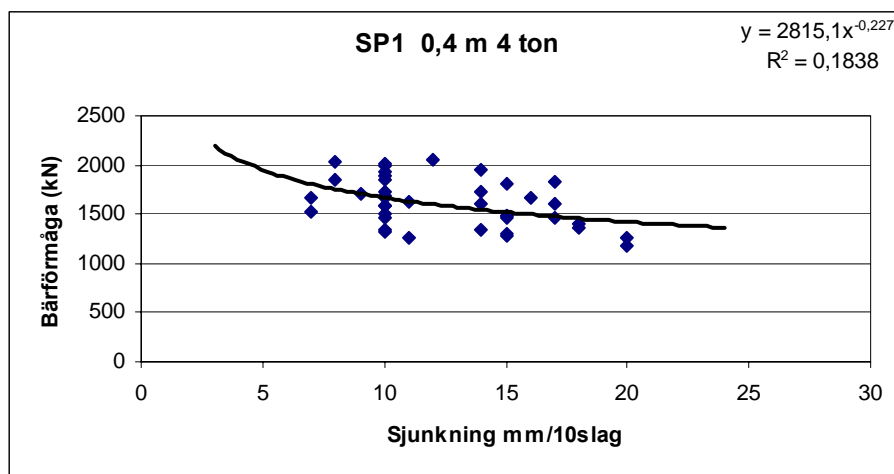
Fall	Påityper	Hejarvikt	Fallhöjd
1	SP1	4	0,4
2	SP2, SP3	4	0,4
3	SP1	4	0,3
4	SP2, SP3	4	0,3
5	SP2, SP3	5	0,3
6	SP2, SP3	5	0,4

### Fall 1

Efter filtreringen fanns 41 stycken SP1-pålar kvar från 11 projekt. För att få en bild av hur bärförmågan varierar runt 10 millimeter sjunkning valdes att plotta pålar inom intervallet 5-20 millimeter. Intervallet 5-20 millimeter valdes av tre anledningar:

- 10 mm sjunkning per tio slag krävet i många tabeller och värdet ligger i detta intervall
- De flesta framräknade stoppslagningskriterier efter provpålning ligger inom detta intervall
- En felmarginal på några millimeter måste alltid medräknas och därför har standardavvikelsen beräknats i ett större område.

I diagrammet i Figur 4.7 ses spridningen runt 10 millimeters sjunkning per tio slag för SP1-pålar.



Figur 4.7 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för 22 stycken SP1-pålar

Vad gäller pålar av typen SP1 uppvisar de en tendens till att få högre bärförmåga vid lägre sjunkningar.

För att sedan kunna ta fram nya dimensionerande bärförmågor krävdes att standardavvikelsen beräknades runt kurvan. Denna togs fram med samband (4.1), samt kurvans ekvation (4.2), där  $L$  står för millimeter stoppsjunkning per tio slag.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

$$\text{För SP1-pålar: } R = -36,4L + 2005 \quad (4.2)$$

Med standardavvikelsen beräknades variationskoefficienten ( $V$ ) fram med ekvation (4.3). Med hjälp av denna beräknades dimensionerade bärförmågor fram med betametoden, beskriven i Avsnitt 2.3.3.

$$V = \frac{\text{Standardavvikelsen}}{\text{Medelvärde}} \quad (4.3)$$

Resultatet från utvärderingen av SP1-pålar redovisas i Tabell 4.3.

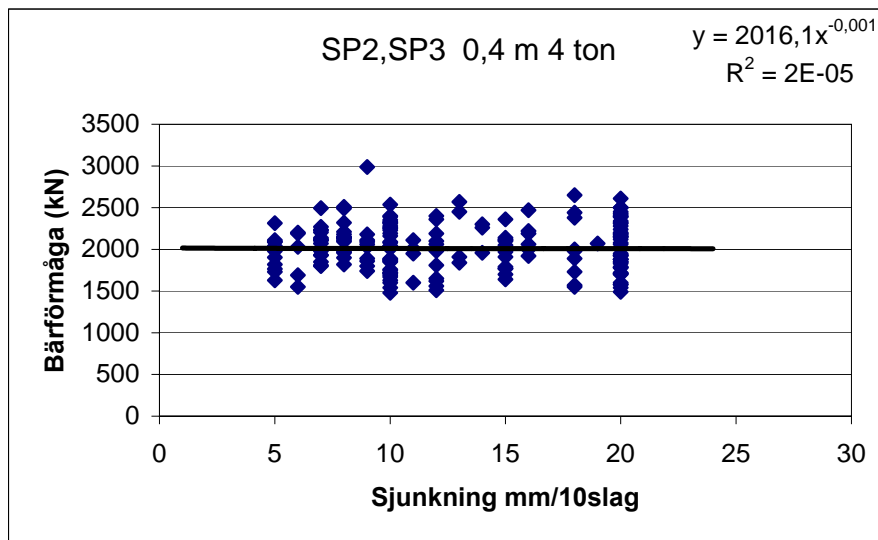
Tabell 4.3 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga för SP1-pålar

Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>213,6kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>1667 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning:	<b>12,8 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt $\beta$ -metoden, SK2, vid 10 mm sjunkning/10 slag	<b>820 kN</b>
Pålkommisionen rapport 94 Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>550 kN</b>

De framtagna värdena är framräknade i säkerhetsklass 2 och kan därför jämföras med värdet i Tabell 2.4. Värdet har dividerats med partialkoefficienten för säkerhetsklass 2 och det framtagna värdet redovisas i Tabell 4.3. För pålar av typen SP1 kan konstateras en skillnad på ungefär 300 kN mellan Pålkommisionens rekommenderade värden på den dimensionerande bärförmågan och de som här erhållits med  $\beta$ -metoden.

## Fall 2

Kriteriet i Fall 2 är att en hejare med 4 ton används med 0,4 m fallhöjd. Här har 190 pålar av typen SP2 och SP3 plottats från 44 olika projekt. Egentligen borde bärförmågan öka då bärförmågan minskar. I studien av detta fall ser det inte ut av vara på det viset. Inom intervallet 5-20 millimeter stoppsjunkning ser bärförmågan ut att vara oberoende av stoppsjunkningen. (Detta gäller dock ej om hänsyn tas till spridningen utanför detta intervall, se Figur 4.8). Vad detta beror på kan ej förklaras.



Figur 4.8 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för 154 SP2- och SP3-pålar

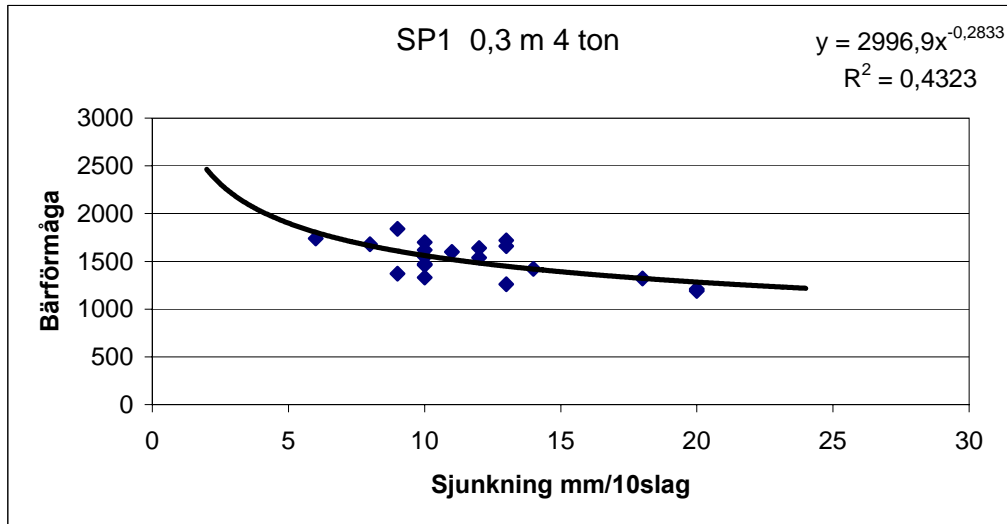
Tabell 4.4 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga för SP2- och SP3-pålar

Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>274,5 kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>2010 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning	<b>13,6 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt beta metoden, SK2	<b>980 kN</b>
Pålkommisionen rapport 94	
Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>663 kN</b>

För pålar av typen SP2 och SP3 kan konstateras en skillnad på ungefär 320 kN mellan Pålkommisionens rekommenderade värden på den dimensionerande bärförmågan och de som här fås fram med  $\beta$ -metoden.

Fall 3

Vad gäller de 19 SP1-pålar slagna med en hejare med vikten 4 ton och med en fallhöjd på 0,3 meter uppvisar de en tendens till att få högre bärförmåga vid lägre stoppsjunkning (se Figur 4.9 och Tabell 4.5). Dessa pålar kommer från tre projekt.



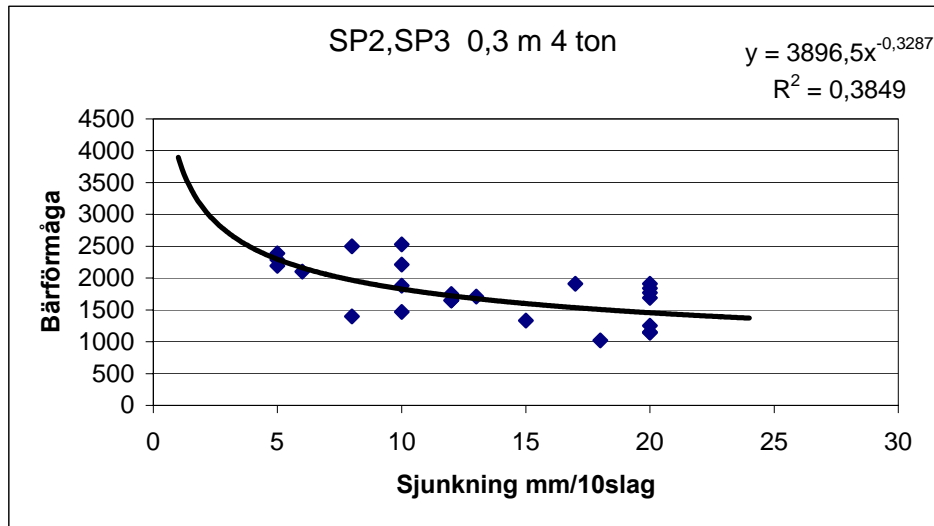
Figur 4.9 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för de 19 SP1-pålar som uppfyllde de här ställda kriterierna

Tabell 4.5 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga för SP1

Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>147,2 kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>1560 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning	<b>9,4 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt beta metoden, SK2	<b>880 kN</b>
Pålkommisionen rapport 94	
Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>490 kN</b>

Fall 4

Efter filtreringen fanns 24 pålar kvar, som kommer från nio projekt. Vad gäller de 24 SP2- och SP3-pålarna slagna med en hejare med vikten 4 ton och med en fallhöjd på 0,3 meter uppvisar även de en tendens till att få högre bärförmåga vid lägre sjunkningar (se Figur 4.10 och Tabell 4.6).



Figur 4.10 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för 24 SP2- och SP3-pålar

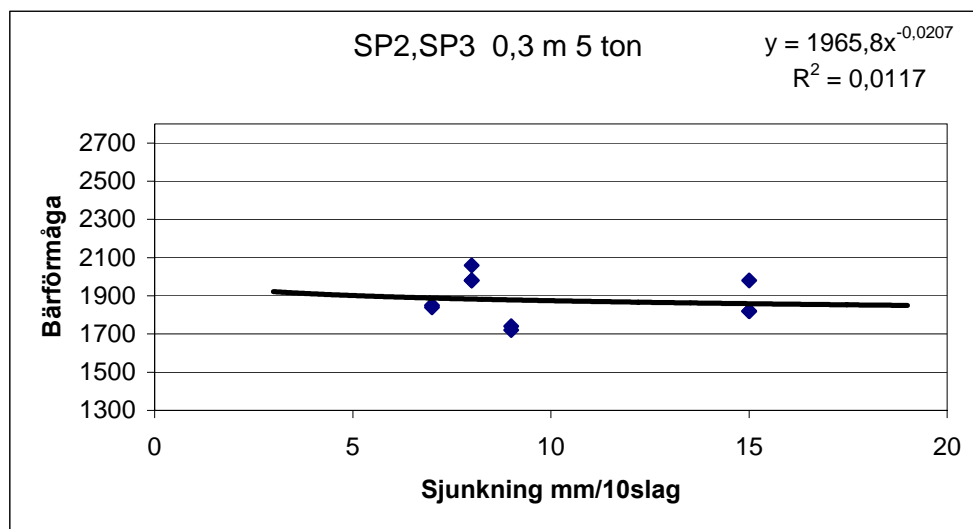
Tabell 4.6 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga för SP2, SP3

Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>249 kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>1827 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning	<b>13,6 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt beta metoden, SK2	<b>890 kN</b>

Pålkommisionen rapport 94	
Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>563 kN</b>

Fall 5

Vad gäller de 10 SP2- och SP3-pålarna slagna med en hejare med vikten 5 ton och med en fallhöjd på 0,3 meter uppvisar de endast en svag tendens till att få högre bärförmåga vid lägre sjunkningar (se Figur 4.11). Dock bör påpekas att endast 10 pålar ingår i analysen. Följden av detta blir en låg varians (se Tabell 4.7). Pålarna kommer från fyra olika projekt.



Figur 4.11 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för 10 SP2- och SP3-pålar

Tabell 4.7 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga för SP2, SP3

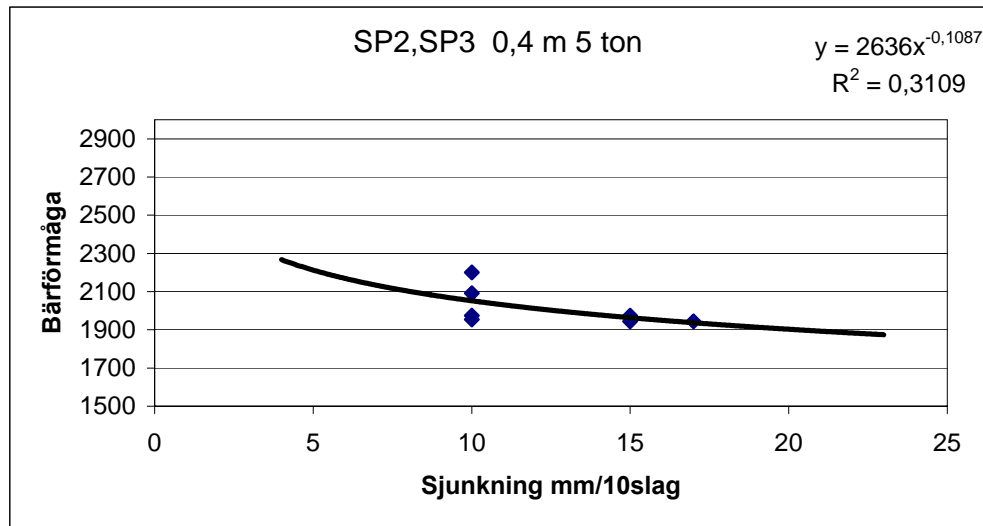
Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>113,5 kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>1873 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning	<b>6 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt beta metoden, SK2	<b>1170 kN</b>

Pålkommisionen rapport 94	
Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>609 kN</b>



### Fall 6

Vad gäller de 7 SP2- och SP3-pålarna slagna med en hejare med vikten 5 ton och med en fallhöjd på 0,4 meter uppvisar de en tendens till att få högre bärförmåga vid lägre sjunkningar (se Figur 4.12). Man bör även i detta fall påpeka att det statistiska underlaget är litet (sju pålar) som samtliga är från ett och samma projekt. Detta leder till liten variationskoefficient (se Tabell 4.8).



Figur 4.12 Bärförmågan plottad mot sjunkning per talja för 7 SP2- och SP3-pålar

Tabell 4.8 Utvärdering med hjälp av  $\beta$ -metoden av dimensionerande bärförmåga hos SP2, SP3

Standardavvikelse i intervallet 5-20 mm kring trendlinjen:	<b>84,4 kN</b>
Medelvärde vid 10 mm sjunkning framtaget med kurvans ekvation:	<b>2092 kN</b>
Variationskoefficient i intervallet 5-20 mm sjunkning	<b>4 %</b>
Uppnådd dimensionerande bärförmåga enligt beta metoden, SK2	<b>1360 kN</b>

Pålkommisionen rapport 94	
Rekommenderad dimensionerande bärförmåga vid 10 mm sjunkning	<b>727 kN</b>

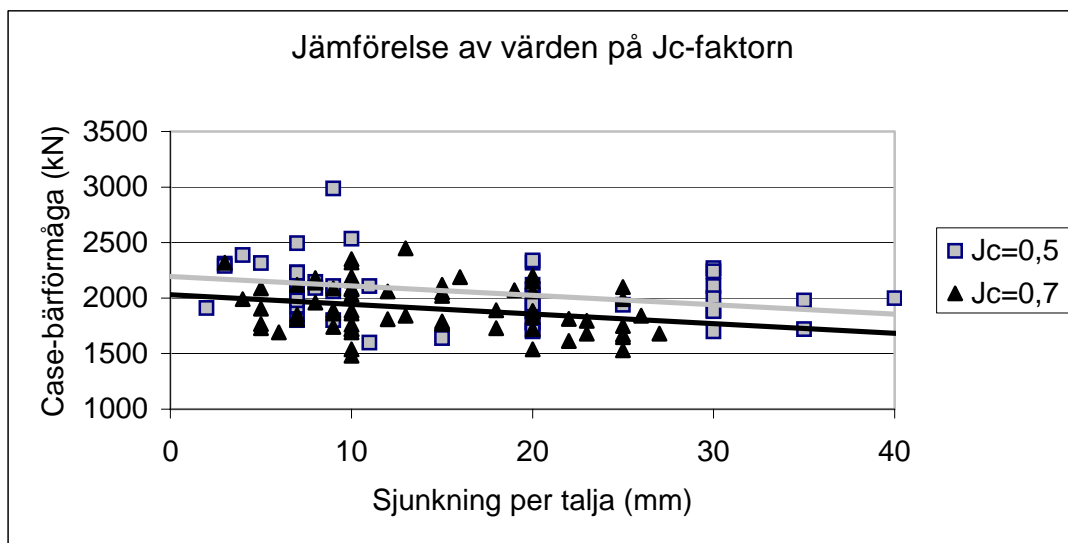
### Sammanfattning av de sex fallen

Anmärkningsvärt för samtliga fall är de låga variationskoefficienterna som här tagits fram. Eftersom pålarna har slagits på olika platser med olika geotekniska förhållanden hade högre variationskoefficienter förväntats. Siffrorna bör iakttagas med försiktighet då det statistiska underlaget, d.v.s. antalet pålar, varierar i de olika fallen. I *Fall 5* och *Fall 6* fås extremt låga variationskoefficienter på grund av få pålar.

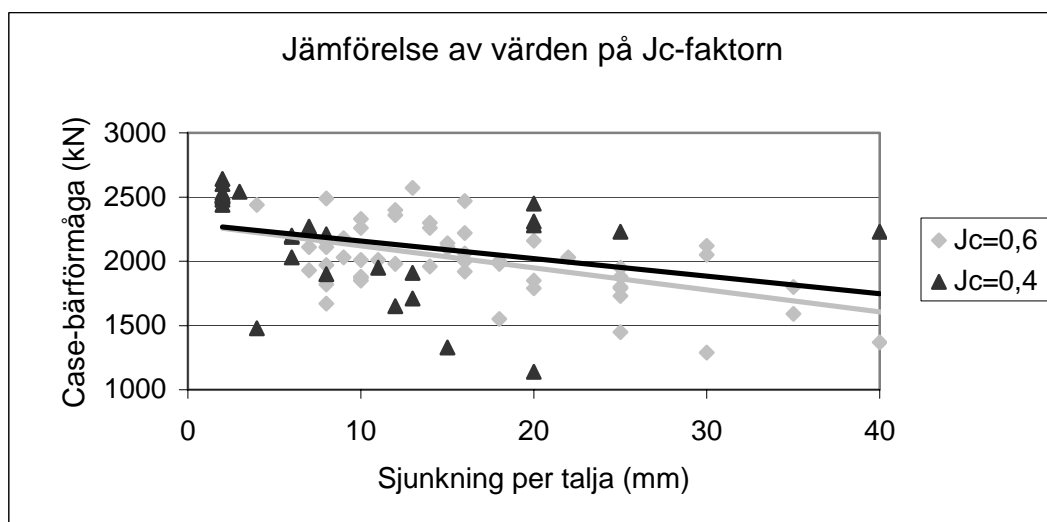
### 4.3. Studie av $J_c$ -faktorns inverkan

#### 4.3.1. Jämförelse av $J_c$ -faktorer

$J_c$ -faktorn beskriver jordens dämpning och är beroende av egenskaper vid pålspetsen. Denna faktor används i CASE-metoden för beräkning av bärförmågan. I Figur 4.13 och 4.14 har bärförmågan plottats mot sjunkning per talja. De pålar som analyseras här är antingen SP2- eller SP3-pålar som drivits med en hejare med vikten 4 ton och med 0,4 meters fallhöjd. Pålar med en sjunkning per talja som överstiger 40 millimeter har ej tagits med i analysen, eftersom de inte kan antas uppfylla de krav på sjunkningen som ställs i de flesta projekt.



Figur 4.13 SP2- och SP3-pålar med 4 ton hejarvikt och 0,4 meter fallhöjd vid drivningen. Sjunkningen i kontrollslaget får inte överstiga 13 millimeter och sjunkning per talja får inte överstiga 40 millimeter.



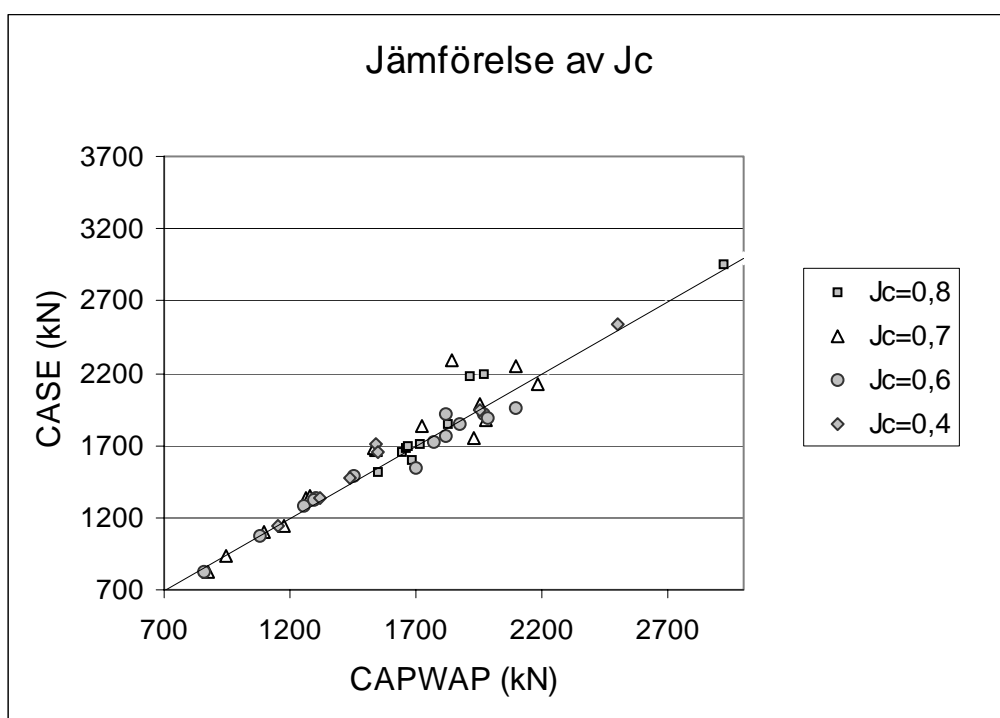
Figur 4.14 SP2- och SP3-pålar med 4 ton hejarvikt och 0,4 meter fallhöjd vid drivningen. Sjunkningen i kontrollslaget får inte överstiga 13 millimeter och sjunkning per talja får inte överstiga 40 millimeter.

I Figur 4.13 har två kurvor har plottats där den ena har en  $J_c$ -faktor på 0,5 och den andra kurvan har en  $J_c$ -faktor på 0,7. Med tanke på den stora spridningen hos punkterna bör kurvorna främst ses som ett medelvärde. I nästa diagram, Figur 4.14, har på liknande sätt  $J_c$ -faktorn 0,4 och 0,6 plottats.

### 4.3.2. Jämförelse CASE, CAPWAP och $J_c$ -faktor

En av anledningarna till att utföra en CAPWAP-analys är för att bestämma en lämplig  $J_c$ -faktor. Denna används sedan i CASE-metoden för att få fram pålens karakteristiska bärförmåga. I detta avsnitt undersöks hur bra bärförmågan från CASE-metoden överrensstämmer med den från CAPWAP-analysen. Dessutom undersöks om det finns skillnad i överrensstämelsen beroende på vilken  $J_c$ -faktor som faktiskt valts.

I analysen ingår samtliga pålar med utförd CAPWAP-analys som har en  $J_c$ -faktor varierande mellan 0,4 och 0,8. Har  $J_c$ -faktorn valts på ett korrekt sätt ska punkterna ligga på en rät linje med 45° lutning. I Figur 4.15 stämmer detta påstående bra, men vissa punkter avviker ändå något. CAPWAP-analysen utförs dels för att kontrollera att rätt  $J_c$ -faktor är vald. Ibland fås en relativt stor skillnad i bärigheten mellan CAPWAP-analysen och CASE-metoden. Då kan det vara viktigt att beräkna CASE-bärigheten på nytt, för att få ett mer korrekt värde. Har pålen däremot en stor säkerhetsmarginal har det för operatören inte funnits någon anledning att uppdatera CASE-bärförmågan. Detta kan ses som en förklaring till att vissa punkter i Figur 4.15 avviker från linjen.



Figur 4.15 Jämförelse mellan bärförmågan från CASE-metoden och CAPWAP-analysen för olika värden på  $J_c$ -faktorn

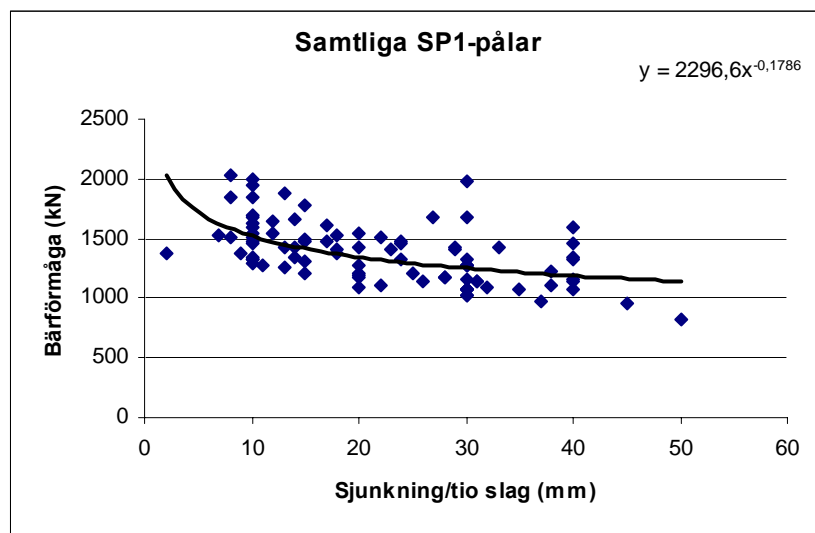
## 4.4. Projekt med relativt sett låg bärförmåga

### 4.4.1. Allmänt om låg bärförmåga

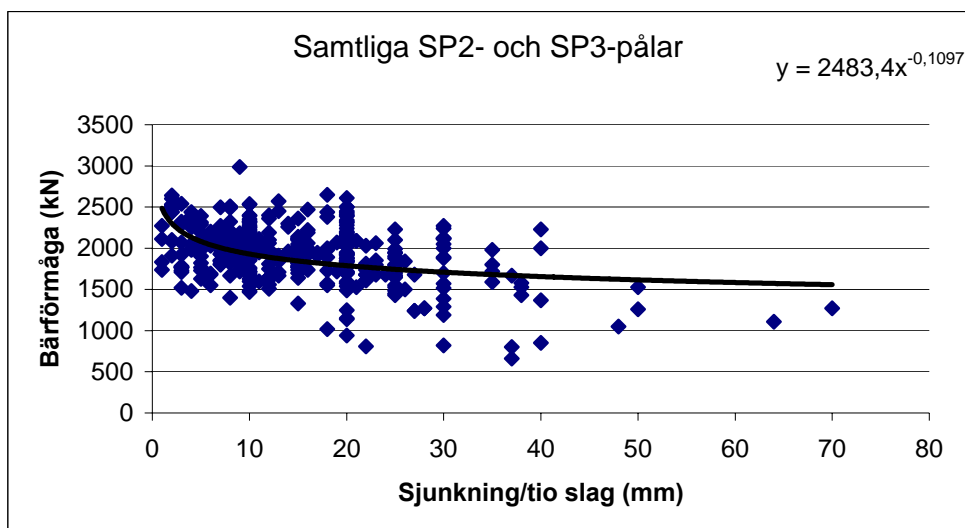
Låg bärförmåga kan i stort sett bero på tre saker.

- Bärförmågan mobiliseras inte fullt, då pålen utsätts för liten energimängd vid mätslaget
- Pålen är inte stoppslagen i bärkraftigt jordlager
- Svåra geotekniska förhållanden

Projekt med svårighet att uppnå tillräckliga bärförmågor är svårare att hitta och flera parametrar måste studeras samtidigt. De parametrar som tagits hänsyn till här är bärförmågan och stoppsjunkningen, då dessa parametrar har plottats mot varandra. Dessa parametrar plottas i Figur 4.16 för SP1-pålar respektive Figur 4.17 för SP2- och SP3-pålar. Projekt av intresse är de som innehåller pålar som trots låg stoppsjunkning har låg bärförmåga. Normalt sett ska bärförmågan öka med minskad stoppsjunkning. Den låga bärförmågan ska alltså inte bero på att bärförmågan inte är mobiliserad. Detta kontrolleras genom att undersöka att sjunkningen i kontrollslaget är minst tre millimeter.



Figur 4.16 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot sjunkning per talja för samtliga SP1-pålar



Figur 4.17 Bärförmågan från CASE-metoden plottad mot sjunkning per talja för samtliga SP2- och SP3- pålar

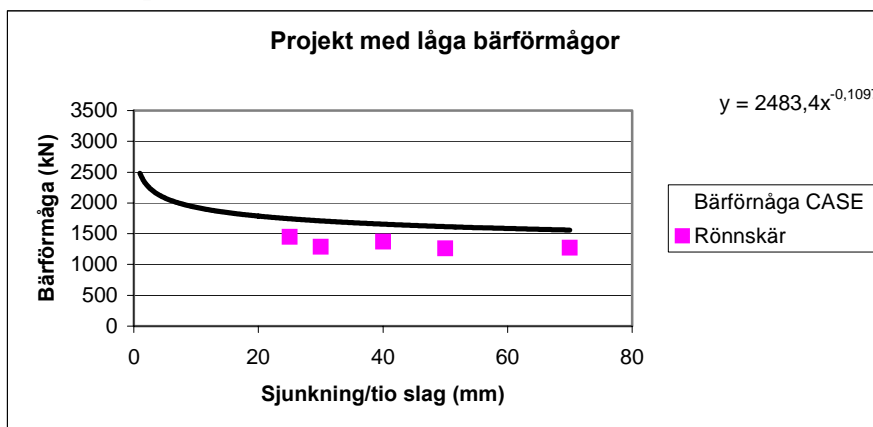
Låg bärförmåga är de som visar en klart lägre bärförmåga än trendlinjen i Figur 4.16 och 4.17. Medelvärdet för pålarnas bärförmåga beskrivs enligt (4.4) och (4.5).

$$SP1\text{-pålar: } R = 2296,6L^{-0,1786} \quad (4.4)$$

$$SP2\text{- och } SP3\text{-pålar: } R = 2483,4L^{-0,1097} \quad (4.5)$$

#### 4.4.2. Projekt framtagna med hänsyn till medelvärdet

I föregående avsnitt 4.4.1 togs ett matematiskt samband fram som beskriver medelvärdet för bärförmågan hos pålarna. Intressanta pålar är de som avviker mycket från detta medelvärde. Det matematiska sambandet används endast som ett kriterium då frågor skapas i Access för att hitta intressanta projekt. Projekt med pålar som avvek mer än 13 % under kurvan har studerats. 13 % antogs vara ett lämpligt gränsvärde eftersom det motsvarar den standardavvikelse som erhållits i Avsnitt 4.2.1. Kurvan som beskriver medelvärdet för samtliga SP2- och SP3-pålar är fortfarande kvar i diagrammet i Figur 4.18.



Figur 4.18 Projekt med låg bärförmåga. Kurvan motsvarar medelvärdet för samtliga SP2- och SP3-pålar

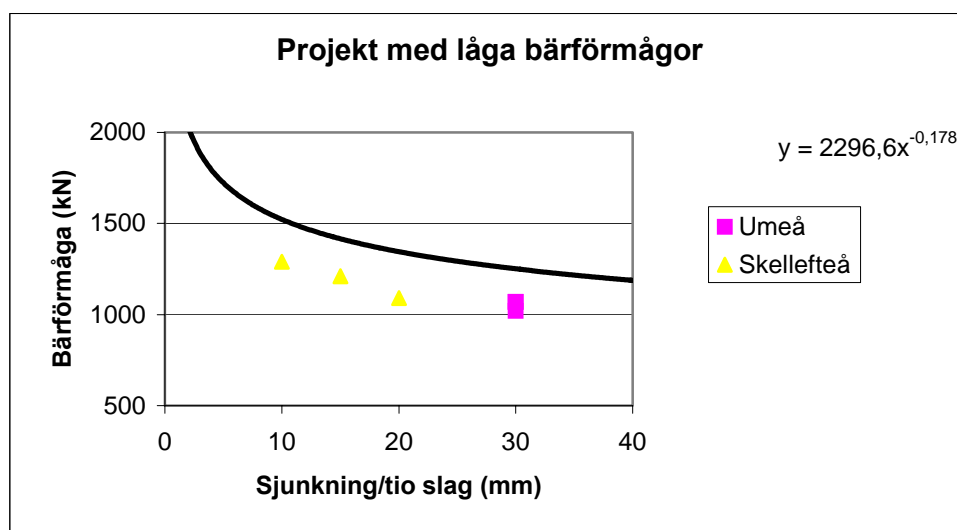
Rönnskär, år 1999

Av samtliga pålar i projektet utfört i Rönnskär år 1999 inkluderades åtta stycken i databasen. Dessa pålar redovisas i Tabell 4.9. Dimensionerande lasteffekt var 500 kN enligt pålplanen. På grund av de lågt ställda kraven på bärförmågan har pålarna inte drivits vidare för att nå högre bärförmåga. Pålarna kunde tryckas ner med hejarens vikt och ett fåtal slag till nio meters djup. Därefter började drivningen.

Tabell 4.9 Parametrar för pålarna i projektet från Rönnskär, år 1999

Bärförmåga CASE	Sjunkning/talja	Kontrollslag (mm/slag)	Slagräkning (antal slag)	Slagenergi i EMX
1270	70	11	254	26,3
1530	50	12	997	26,7
2050	30	5	1064	35,4
1260	50	15	728	29,5
1450	25	9	1158	25
1290	30	13	1183	27,2
1800	35	5	927	22,7
1370	40	8	951	25,2

På liknade sätt som för SP2- och SP3-pålar tas tre projekt fram för SP1-pålar. Pålarna som uppfyller ställda kriterier har plottats i Figur 4.19. Kurvan som beskriver medelvärdet för samtliga SP2- och SP3-pålar är fortfarande kvar i diagrammet.



Figur 4.19 Projekt med SP1-pålar och med relativt sett låg bärförmåga har plottat mot stoppsjunkningen. Kurvan i figuren motsvarar medelvärdet på bärförmågan för samtliga SP1-pålar

#### Skellefteå, år 1999

Av pålarna i projektet utfört i Skellefteå år 1999 har sex stycken inkluderats i databasen. Dessa är av typen SP1 och är 5-8 meter långa. Pålarna är neddrivna ca en meter i morän. Slagräkning visar inget exceptionellt drivningsarbete. Troligtvis är pålarna inte stoppslagna i tillräckligt bärkraftigt jordlager. Kravet på karakteristisk bärförmåga för detta projekt var 1020 kN samt att medelvärdet för bärförmågan skulle ligga över 1200 kN. Parametrarna redovisas i Tabell 4.10.

Tabell 4.10 Pålarna från projektet i Skellefteå, år 1999

Bärförmåga (kN)	Sjunkning/talja (mm)	Kontrollslag (mm/slag)	Slagenergi (kNm)	Slagräkning (antal slag)
1420	13	15	19,9	339
1290	10	8	23,7	188
1210	15	15	25,9	281
1090	20	14	21,8	769
1270	30	15	28,4	509
1880	13	6	29,5	395

#### Umeå, Dragonfältet, år 2000

Av samtliga pålar i projektet utfört i Umeå Dragonfältet år 2000 ingår fem pålar i databasen. Kravet på dimensionerande lasteffekt är 330 kN. Den totala säkerhetsfaktorn är 2,07. Även här är förklaringen till de låga bärförmågorna de lågt ställda kraven. Samtliga pålar uppfyller kraven, se Tabell 4.11.

Tabell 4.11 Pålarna från projektet i Umeå Dragonfältet, år 2000

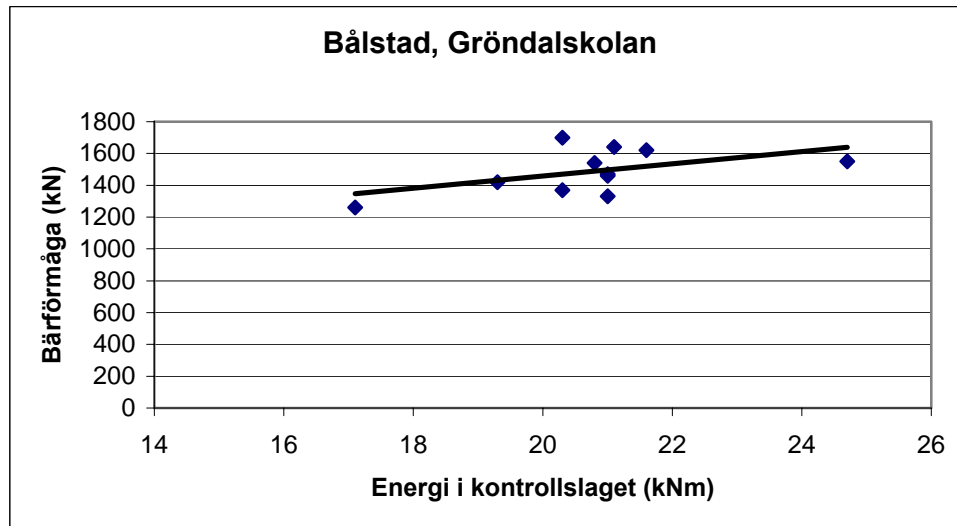
Bärförmåga (kN)	Sjunkning/talja (mm)	Kontrollslag (mm/slag)	Slagenergi (kNm)	Slagräkning (antal slag)
1020	30	6	14,6	417
1070	30	6	19,9	792
1140	31	7	19,7	454
1180	28	6	16,4	357
1070	30	8	17,8	931

#### 4.4.3. Projekt med ej mobiliserad bärförmåga

Som tidigare nämnts kan en låg bärförmåga bero på att pålen utsatts för liten mängd energi i mätslaget. Anledningen till detta kan vara lågt ställda krav på bärförmågan. Är kravet på bärförmågan uppfyllt finns det ingen anledning att driva pålen vidare eller öka energimängden för att uppnå högre bärförmåga. En större del av bärförmågan kan mobiliseras genom att antingen öka fallhöjden eller att öka hejarvikten.

### Bålsta, Gröndalskolan

År 1999 utfördes ett projekt i Bålsta. I detta projekt användes SP1-pålar. Bärförmågan hos samtliga pålar har plottats mot energin i kontrollslaget i Figur 4.20.



Figur 4.20 Bärförmågan har plottats mot energin i kontrollslaget för projektet i Bålsta år 1999

De relativt låga bärförmågorna kan bero på låga sjunkningar i kontrollslaget, se Tabell 4.12. Detta är ett tecken på att bärförmågan inte mobiliserats. Troligtvis krävdes i projektet inte högre bärförmågor än de som uppmätts. Detta är anledningen till att de låga energimängderna i kontrollslaget var tillräckliga.

Tabell 4.12 Samtliga pålar från projektet i Bålsta år 1999

Slagenergi (kNm)	Bärförmåga (kNm)	Kontrollslag (mm/slag)	Sjunkning/talja (mm)
17,1	1260	2	13
21	1470	1	10
20,3	1370	2	9
21,6	1620	2	10
21	1330	2	10
24,7	1550	1	10
21	1460	1	10
19,3	1420	2	14
20,8	1540	1	12
21,1	1640	0	12
20,3	1700	1	10

Projekt liknande det i Bålsta är i denna studie tämligen ointressant vid jämförelse av geotekniska bärförmågan hos olika projekt. Önskas större bärförmåga är det möjligt att uppnå det genom att öka energin i kontrollslaget och därför är de geotekniska förhållandena inte gränssättande för den uppmätta bärförmågan. Som tidigare nämnts kan en högre bärförmåga uppnås genom att antingen öka fallhöjden eller hejarvikten. Alternativet är annars att driva pålen vidare till ett strängare stoppslagningskriterier.



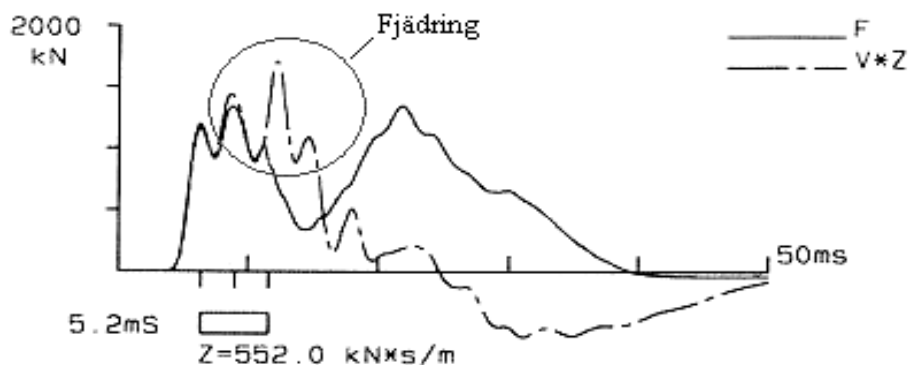
#### 4.4.4. Projekt med fjädrande jordar

Problemet med fjädrande jordar har förekommit i vissa av de projekt som tidigare lyfts fram (t.ex. Landskrona år 1996). Här följer några fler exempel på projekt där fjädrande jordar orsakat besvär vid neddrivningen. Dessa har tagits fram genom att studera kommentarer från provpålningsprotokoll, stötvågskurvor och övriga parametrar såsom slagräkning och stoppsjunkning.

##### Gärtuna

År 1999 genomfördes ett projekt i Södertäljetrakten, Gärtuna, som är intressant på grund av att omfattande fjädring uppträtt. I detta fall medförde de fjädrande jordarna omfattande drivningsarbete. Fjädringen ses tydligt inom det inringade området på stötvågskurvan i Figur 4.21.

Genom att studera projekt med likartade förutsättningar kan detta problem förutses. Omfattande drivningsarbete kan undvikas med t.ex. tyngre hejare, lägre lastnivå eller utvidgad stötvågsmätning för att kunna sänka totalsäkerhetsfaktorn.



Figur 4.21 Stötvågskurva från Gärtuna, 1999

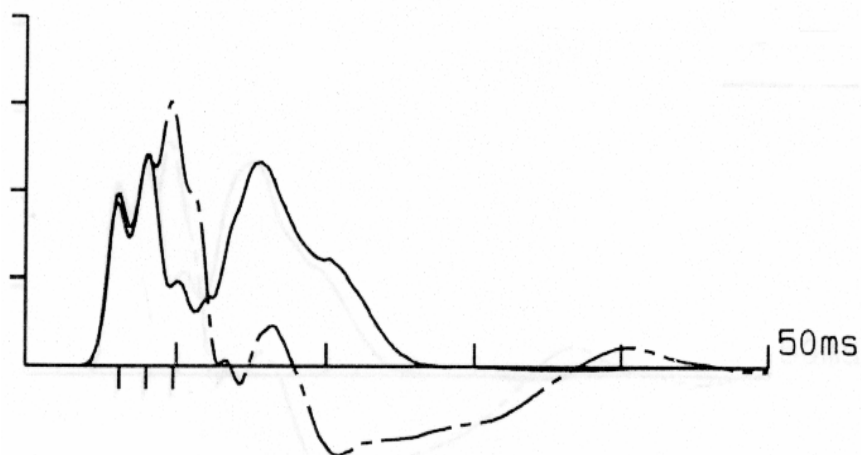
##### Holmsund

I Holmsund utfördes ett projekt år 1999. Av de pålar där dynamisk provbelastning utförts har fem pålar inkluderats i databasen. Pålarna är samtliga av typen SP3. I Tabell 4.13 redovisas uppgifter om pålarna. I tabellen kan man se att det är stor variation mellan pålarna.

Tabell 4.13 SP3-pålar från projektet i Holmsund år 1999

Bärförnåga (kN)	Sjunkning/talja (mm)	Kontrollslag (mm/slag)	Slagräkning (antal slag)	Slagenergi (kNm)
2360	12	2	353	16,8
2470	16	2	641	19,1
<b>1870</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>1148</b>	<b>16,3</b>
2060	16	3	519	16,7
<b>1980</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>1420</b>	<b>17,1</b>

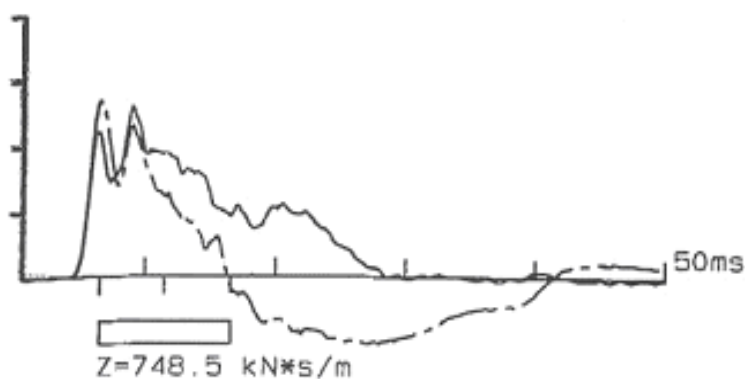
Två av pålarna (i Tabell 4.13 markerade med fet stil) utmärker sig genom att det gått åt osedvanligt många slag vid neddrivningen. Man kan även se att bärförmågan hos dessa pålar är något lägre än de övriga. Som kommentar i projektrapporten har om dessa pålar skrivits att det förekommit ”stor fjädring” vid neddrivningen. Stötvågskurvan till en av dessa pålar redovisas i Figur 4.22.



Figur 4.22 Stötvågskurva från projektet i Holmsund

Landskrona, Järnvägsbro över Vegeån, år 1996.

År 1996 utfördes ett projekt i Landskrona. Den relativt låga bärförmågan vid detta projekt kan till viss del bero på att knekt har använts. Då förekommer vissa förluster i energiöverföringen mellan knekt och påle. Dock är dessa förluster små eftersom en annan betongpåle använts som knekt. Den lägre bärförmågan kan också bero på fjädrande jord vilket syns på stötvågskurvan, se Figur 4.23.



Figur 4.23 Stötvågskurva för en av pålarna i projektet i Landskrona år 1996

I Tabell 4.14 redovisas uppgifter om samtliga pålar från projektet i Landskrona som ingår i databasen. Detta projekt saknade information om sjunkningen i kontrollslaget och slagräkningsprotokoll (som ger antal slag vid neddrivningen).

Tabell 4.14 Samtliga pålar i projektet utfört i Landskrona år 1996

Bärförmåga (kN)	Sjunkning/talja (mm)	Slagenergi (kNm)
1980	8	19,9
1850	7	22,8
1980	4	22,4
2060	8	22
1770	3	20,7
1760	3	20,3
1770	3	19,3

Umeå, Storån, september år 1998

Från projektet i Umeå Storån år 1998 är tre pålar inkluderade i databasen. I förhållande till stoppsjunkningen är bärförmågan relativt sett låg. Detta kan bero på den låga sjunkningen i mätslaget, som är ett tecken på att bärförmågan inte mobiliserats, se Tabell 4.15. Alltså skulle högre bärförmåga kunna uppnås om pålen drivs vidare utsätts för mer energi i mätslaget. Marken vid projektet har dock kommenterats vara mycket fjädrande och drivningen var svår. För att undvika arbets- och tidskrävande drivning bör detta tas i akt då laster på pålarna dimensioneras. Vid jordar liknande den i detta projekt kan det vara mer lönsamt att använda fler pålar med mindre last. Det totala drivningsarbetet minskar samtidigt som risken för bortslagna och utmattade pålar minskar.

Tabell 4.15 Samtliga pålar från projektet i Umeå, år 1998

Slagenergi (kNm)	Bärförmåga (kN)	Kontrollslag (mm/slag)	Efterslagning (dygn)	Sjunkning/talja (mm)
27,2	1930	1	4	7
27,6	1850	1	4	10
30,7	1880	1	4	10

Umeå, Filmstaden, år 1993

Samtliga pålar i projektet utfört i Umeå Filmstaden år 1993 var mycket lika varandra med avseende på sjunkning och energi i kontrollslaget och bärförmåga (se Tabell 4.16). Av de uppgifter som finns kan slutsatsen dras att bärförmågan till stor del har mobiliserats eftersom energin i kontrollslaget var stor och sjunkningen varierade mellan två till sex millimeter. Uppgifter om stoppsjunkningen per tio slag saknades för alla pålar utom för en. Detta gäller även uppgiften om antal slag. Det omfattande drivningsarbetet tyder på att svårigheter att uppnå tillräcklig bärförmåga förekommit. Drygt 2000 slag har använts för att slå ner pålen fem meter ner i moränlagret. Som kommentar till projektet nämns att jordlagerföljden består av sand, sulfitsilt och friktionsjord.

Tabell 4.16 Samtliga pålar från projektet i Umeå år 1993

<b>Slagenergi (kNm)</b>	<b>Bärföråga (kN)</b>	<b>Kontrollslag (mm/slag)</b>	<b>Efterslagning (dygn)</b>	<b>Sjunkning/talja (mm)</b>
34,6	1540	5	1	
35,6	1580	2		12
37,7	1550	4	1	
32,0	1580	2		
24,2	1340	3		
33,5	1490	6	1	
30,9	1200	4	1	
35,5	1360	3	1	
29,5	1120	5	1	

## 5. Diskussion och slutsatser

### 5.1. Diskussion

Syftet med examensarbetet var att strukturera och upprätta en databas över spetsburna pålar i friktionsjord. Målet var att få största möjliga underlag för studier av de parametrar som påverkar bärförmågan. Dessutom ska databasen fungera som ett statistiskt underlag vid bestämning av den geotekniska bärförmågan. På grund av att innehållet i databasen har stor geografisk spridning är den ett lämpligt verktyg för geotekniker i hela Sverige, vilket var ett av målen med databasen.

Första delen av arbetet var att skapa och strukturera databasen. Kravet var att det skulle vara lätt att söka och filtrera information i databasen. Detta krav har uppfyllts och det är nu enkelt att snabbt ta fram liknande projekt under projekteringsfasen. Dessutom är det enkelt att bygga ut databasen och utföra vidare studier.

Inledningsvis togs i stort sett alla tänkbara parametrar med i databasen. Under arbetets gång fick några parametrar utgå, eftersom få projekt innehöll uppgifter om vissa parametrar. Tanken från början var att få med omfattande geologisk information i databasen. Många projekt redovisar ej geotekniska undersökningar, men i den mån det har funnits information om geologin har detta inkluderats. Om man är intresserad av ett specifikt projekt innehåller databasen uppgifter om vem som utfört projektet. Via denna kontakt kan oftast mer information hämtas om de geotekniska förutsättningarna. På grund av tidsbegränsning av arbetet har det inte funnits möjlighet att hämta in information om geotekniska undersökningar från samtliga projekt.

Den avslutande delen i examensarbetet bestod i att utföra en parameterstudie samt att jämföra resultat ur databasen med nuvarande riktlinje för lastnivåer på spetsburna pålar. Först analyserades olika påltyper utan ytterligare urvalskriterier. Vikten av att filtrera informationen blev då tydlig, eftersom resultatet blev svårtolkat och inga markanta samband kunde urskiljas.

Idag görs ingen som helst åtskillnad mellan olika geotekniska förhållanden när lastnivån för spetsburna pålar väljs. Databasen kan därför vara till stor hjälp för att redan under projekteringen bedöma vilka laster som kan utnyttjas på pålarna med hänsyn till de geologiska och geotekniska förutsättningarna på platsen.

Såsom framgår i Avsnitt 4.1 är vinsten i ökad bärförmåga ytterst marginell vid drivning till en stoppsjunkning som inte överstiger 10 millimeter för SP2- och SP3-pålar. Vad detta beror på är svårt att säga. Det naturliga hade varit en ökad bärförmåga vid lägre stoppsjunkning, eftersom pålen torde vara stoppslagen i ett mer bärkraftigt jordlager. Detta gäller under förutsättning att bärförmågan mobiliserats. Observera att detta gäller medelvärden för aktuella pålar i databasen. Kan provpålning och stötvågsmätning utföras i ett tidigt skede finns möjlighet att anpassa lastnivåerna på pålarna till de geologiska förutsättningarna på platsen. Detta är ofta inte möjligt på grund av snabb projektering och byggstart och ökade kostnader som kan vara svåra att motivera gentemot en beställare. I dessa fall kan databasen vara till stor hjälp för att hitta lämpliga lastnivåer. Detta kan göras genom att hitta liknande projekt inom samma område med liknande förutsättningar. Genom att välja lämplig lastnivå kan

omfattande drivningsarbete samt bortslagning av pålar undvikas. Dessa två faktorer medför ofta stora ekonomiska risker och osäkerhet angående tidsåtgången. Databasen kan vara extra värdefull då man utför pålningsarbeten i jordar med fjädrande jordar.

I Avsnitt 4.2 utfördes en analys för att jämföra dimensionerade värden hämtades från Pålkommisionens rapport 94 (Holmberg, m.fl., 1996) med informationen i databasen. Sex olika fall togs fram och resultaten från  $\beta$ -metoden redovisas i Tabell 5.1.

*Tabell 5.1 Jämförelse med rekommenderade värden på dimensionerande bärförmågan av de sex fallen som studerades i avsnitt 4.2 med olika kombinationer av hejarvikt och fallhöjd*

Fall	Antal pålar	Variationskoefficient	Pålkommisionens rekommenderade värden	Erfarenhetsvärden med $\beta$ -metoden
1	22	12,4	550 kN	840 kN
2	154	13,0	663 kN	1020 kN
3	19	9,4	490 kN	880 kN
4	24	13,6	563 kN	890 kN
5	10	6,0	609 kN	1190 kN
6	7	4,0	729 kN	1360 kN

I Tabell 5.1 redovisas även de rekommendationer som Pålkommisionen ger vid 10 millimeter stoppsjunkning per tio slag. Här ses att en god säkerhetsmarginal finns till de värden som tagits fram med hjälp av databasen och  $\beta$ -metoden. Dock gäller Pålkommisionens rekommendationer även då statisk eller dynamisk kontroll av bärförmågan ej utförs.

Anmärkningsvärt för samtliga fall är de låga variationskoefficienterna som här tagits fram. Eftersom pålarna har slagits på olika platser med olika geotekniska förhållanden hade högre variationskoefficienter förväntats. Siffrorna bör iakttas med försiktighet då det statistiska underlaget, d.v.s. antalet pålar, varierar i de olika fallen. I *Fall 5* och *Fall 6* fås extremt låga variationskoefficienter, men antalet pålar var få. De låga variationskoefficienterna är en indikation på att stoppsjunkningen ger en bra uppskattning av bärförmågan.

Ytterligare ett bidrag till de låga variationskoefficienterna vid *Fall 5* och *Fall 6* är att endast pålar från få projekt ingår. Då kan antagandet om olika geotekniska förhållanden ej förväntas gälla.

Tidigare publikationer har gett rekommendationer på lämpliga lastnivåer när dynamisk provbelastning utförs. I Tabell 5.2 jämförs resultatet från  $\beta$ -metoden i Avsnitt 4.2 med tidigare publikationer. Samtliga värden gäller för hejare med vikten 4 ton och en fallhöjd på 0,4 meter, och därför blir endast *Fall 1* och *Fall 2* aktuella. Man bör dock ha i åtanke att värdena från den tidigare publikationen (Ehnbåge, m.fl., 1994) samt värdena framtagna med  $\beta$ -metoden gäller endast då stötvågsmätning utförts.

*Tabell 5.2 Dimensionerande övre geoteknisk bärförmåga*

Påltyp	Ehnbåge, m.fl. (1994)	Erfarenhetsvärden med $\beta$ -metoden
SP1	800 kN	840 kN
SP2, SP3	1000 kN	1020 kN

Vid studien av hur väl bärförmågan från CASE-metoden överensstämmer med bärförmågan från CAPWAP-analysen i Avsnitt 4.3 fick man ett tydligt svar. Metoderna överensstämmer mycket väl med varandra. Detta är dock väntat eftersom  $J_c$ -faktorn, som används i CASE-metoden, väljs med hjälp av genomförd CAPWAP-analys. Oftast genomförs ingen CAPWAP-analys utan bärförmågan bestäms endast med hjälp av CASE-metoden. Då har teknikerna endast sin erfarenhet till hjälp vid bestämning av  $J_c$ -faktorn. Det skulle därför vara intressant att utföra CAPWAP-analys på de projekt i databasen där endast CASE-metoden använts för att se hur bra metoderna korrelerar. Ur detta kan sedan analyseras hur bra  $J_c$ -faktorn har valts.

I Avsnitt 4.4.3 har ett projekt från Bålsta år 1999 lyfts fram för att illustrera en svårighet vid analysen av databasen. Bärförmågan hos pålarna är endast till liten del mobiliserad, vilket de låga sjunkningarna i kontrollslaget visar på. Dessutom har låga energimängder i kontrollslaget används. Inget tyder på att det förekommit problem som gjort det svårt att uppnå högre bärförmågor. Den låga bärförmågan är inget konstig i sig, utan beror på att pålarna inte behövde klara högre laster än de som redovisas i projektrapporten. Skulle större mobiliserad bärförmåga önskas vore det bara att öka energin i kontrollslaget. Det kan därför vara svårt att jämföra ett projekt liknande det i Bålsta med ett projekt där bärförmågan till största möjliga del är mobiliserad. Detta bör man ha i åtanke då databasen och dess projekt analyseras.

I projektet från Holmsund år 1999, som studerats i Avsnitt 4.4.4, syns ett tydligt exempel på fjädrande jordar. Detta bekräftas av teknikerna som utfört mätningarna genom kommentarer i protokollet angående fjädrande jord. Två av pålarna i projektet påvisar stort antal slag under neddrivningen, men ändå kommer pålarna inte upp i lika stor bärförmåga som de övriga pålarna i projektet.

I avsnitt 4.4.4 studeras ytterligare ett exempel på fjädrande jord. Projektet är utfört i Landskrona år 1996. På stötvågskurvan till en av pålarna från projektet i Figur 4.23 kan ses att jorden på platsen varit fjädrande. Följden av fjädrande jord är ofta svår med omfattande drivning och problem att uppnå önskad bärförmåga.

Även i projektet från Umeå, år 1998, kommenterades att jorden varit fjädrande. I detta projekt kan den låga bärförmågan även bero på att möjlig bärförmåga inte mobiliserats. Ett tecken på detta är de låga sjunkningarna i kontrollslaget. I Umeå har ytterligare ett projekt utförts som här lyfts fram (år 1993). I detta projekt tyder stoppsjunkningen på att en stor del av den möjliga bärförmågan mobiliserats. Drivningen av pålarna i detta projekt var mycket svår. Drygt 2000 slag har använts för att slå pålarna fem meter ner i moränen. Det finns i detta projekt ingen kommentar huruvida fjädrande jord förekommit, men med tanke på det omfattande drivningsarbetet är det ändå mycket troligt att jorden varit fjädrande. Jorden på platsen har ett inslag av silt, vilket är vanligt vid fjädrande jordar.

För framtida användare av databasen är det viktigt att vara medveten om osäkerheten i vissa av de parametrar som ingår. Svåra fältförhållanden kan orsaka fel i avläsningen av t.ex. stoppsjunkningen. Mätteknikern på plats kan oftast påverka bärförmågan hos enskilda pålar, genom att öka fallhöjden och mobilisera större bärförmåga. Vissa mättekniker kan på detta sätt eftersträva en likvärdig bärförmåga hos samtliga pålar, även om kraven på bärförmågan redan är uppnådd. Tar man inte någon hänsyn till detta kan onödiga spekulationer uppstå angående avvikande bärförmåga hos vissa pålar.

## 5.2. Slutsatser

En av riktlinjerna vid struktureringen av databasen har varit att skapa ett lättanvänt hjälpmedel för dimensionering av lämpliga lastnivåer. Databasen ska även kunna utökas med fler projekt utan att djupare datakunskaper ska krävas. Detta krav anses vara uppfyllt.

Föregående diskussion i Avsnitt 5.1 kan sammanfattas följande punkter:

- Databasen täcker hela Sverige och innehåller ca 120 projekt med över 600 pålar vilket ger bred bas för analys och bearbetning.
- Genom att med hjälp av databasen välja lämplig lastnivå kan omfattande drivningsarbete samt bortslagning av pålar undvikas. Dessa två faktorer medför ofta stora ekonomiska risker och osäkerhet angående tidsåtgången. Databasen kan vara extra värdefull då man utför pålningsarbeten i områden med fjädrande jordar.
- Pålkommisionens värden på dimensionerande bärförmågor har god, men nödvändig, säkerhetsmarginal och bör även fortsättningsvis användas då stötvågmätning ej utförs och en detaljerad bild över de lokala pålningsförhållandena saknas.
- De låga variationskoefficienterna vid analys av bärförmågans beroende av stoppsjunkningen (10 mm/10 slag) visar att stoppsjunkningen ger en bra uppskattning av bärförmågan.
- Om stötvågmätning utförs kan ett lämpligt dimensioneringsvärde vara ca 800 kN för en SP1-påle respektive ca 1000 kN för en påle av typen SP2 eller SP3.
- $J_c$ -faktorn har liten inverkan på bärförmågan för spetsburna pålar i friktionsjord
- Korrelationen mellan bärförmågan från CAPWAP-analysen och CASE-metoden är god. Detta är dock väntat eftersom  $J_c$ -faktorn, som används i CASE-metoden, väljs med hjälp av genomförd CAPWAP-analys.
- I varje projekt är det av stor vikt att studera alla ingående parametrar innan slutsatser kan dras. Vid eventuella frågetecken måste studien av databasen kompletteras med inhämtning av aktuella stötvågskurvor.



### **5.3. Fortsatta studier**

Eftersom tidsramen varit den begränsande faktorn för arbetet finns stora möjligheter för vidare analys av databasen. Tanken på ytterligare ett examensarbete för att djupare analysera databasen finns redan och det anses vara en god idé. Att kunna utföra WEAP- och CAPWAP-analyser är nödvändigt för vidare analyser av databasen. Nedan ges förslag på fortsatta studier.

- WEAP-analys för att undersöka om befintliga dimensionerande bärförmågor är lämpliga och ta fram lämpliga erfarenhetsvärden för spetsdämpning och spetsfjädring i svenska moränjordar.
- Uppdatering av databas med fler projekt vilket ger en ännu bredare erfarenhetsbank
- CAPWAP-komplettering av intressanta projekt. Det skulle vara intressant att utföra CAPWAP-analys på de projekt i databasen där endast CASE-metoden använts för att se hur bra metoderna korrelerar. Ur detta kan sedan analyseras hur bra  $J_c$ -faktorn har valts.
- Utförligare studie av information om geologin hos intressanta projekt. För att vidare kunna studera t.ex. projekt med fjädrande jordar skulle information från geotekniska undersökningar kunna inhämtas.



## 6. Litteraturförteckning

- Andersson H., Holm G., Magnusson O., Åstedt B., 1994, *Pålbarhet baserad på sonderingsresultat*, Tekniska högskolan i Luleå.
- Axelsson G., 2003, *mundlig kommunikation*.
- Axelsson G., Rehnman S.E., 1999, Hur höga spänningar klarar jorden?, *Bygg och Teknik nr 1*.
- Berglars B., m.fl., 1993, *Datorsimulering av pålslagning*, Pålkommisionen rapport 92, SGI, Linköping.
- Bredenberg H., Jansson B., 1991, Håller pålarna? Low Strain-mätning ger säkert besked, *Bygg & teknik nr 8*.
- Ehnbåge G., Olsson C., Svensson L., 1994, Dimensionering av pålar- en fråga om lastkapacitet (i olika skeden) och geoteknisk bärförmåga, *Bygg och teknik nr 8*.
- Fischer H.C., Hellman L., 1963, Pålslagningen och stötvågsteorin, *Väg- och vattenbyggaren nr 1*.
- Gustafsson S., Romell J., 1985, *Pile driving analyzer- CASE-metoden*, SKANSKA Tekniska avdelningen, Göteborg.
- Handboken Bygg- Geoteknik*, 1984, Liber Förlag, Stockholm.
- Hellman L., SGI, 1978, *Att slå betongpålar*, Betongforskningens informationsblad B2, Stockholm.
- Hellman L., 1967, Om stoppslagning av stödpålar, *Byggnadskonst nr 8*.
- Hellman L., 1981, *Elementa om stötvågor i pålar*, Linköping.
- Hercules Grundläggning AB, 1991, *Verifiering av slagna pålars bärförmåga*, Stockholm.
- Hermansson I., 1992, *Integritetskontroll av pålar med stötvågsmätning*, Pålkommisionen rapport 89, SGI, Linköping.
- Holm G., Åstedt B., 1995, *Geotekniska bärförmågans tidsberoende tillväxt hos friktionspålar*, SIG, Linköping.
- Holmberg G., m.fl., 1996, *Standardpålar av betong- lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga*, Pålkommisionen rapport 94, SGI, Linköping.
- Holmberg G., Grävare C.J., 1996, *Standardpålar av betong*, Pålkommisionen rapport 94, SIG, Linköping.
- Lundqvist J., 1988, *Geologi: Processer-landskap-naturresurser*, pp 103-105, Studentlitteratur, Lund.

Möller, B, 1991, *Falskt pålstopp En jämförelse mellan statisk och dynamisk bärförmåga hos pålar i siltig jord*, nr 342, SGI, Linköping.

Olsson C., Holm G., 1993, *Pålgrundläggning*, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Olsson L., m.fl., 1990, *Beta-metoden vid pålberäkning*, Pålkommisionens rapport 82, SIG, Linköping.

Pile Dynamics Inc., 2000, *PDA-W Users Manual*, Ohio.

SGU, den 20 nov 2003, [http://www.sgu.se/geologi/jord/jordart/indeln\\_s.htm](http://www.sgu.se/geologi/jord/jordart/indeln_s.htm).

Svensson C., den 19 november 2003

<http://connywww.tg.lth.se/Sv.jordarterdokument/indegeotegenskdokument/geotekegenskdokument/hllfasthet.html>

Thöyrä T., 2003, *mundlig kommunikation*.

Vägverket, Bro 2002, Publikation 2002:47, Grundläggning, Borlänge.

## 7. Bilagor

### 7.1. Lista över projekt som ingår i databasen

Datum	Ort	Objekt	Pålkran	Hejarvikt
1983-11-24	Malmö	Fluid Carbon, Mölmö hamn	Åkerman	4
1990-02-19	Hallstavik	Hallstavik Pappersbruk	Junttan	4
1990-11-26	Stockholm	Rönninge centrum	Junttan	3
1991-03-20	Kufors	Bro över Petikån	Junttan	4
1991-06-12	Värnamo	Kv Åkern nr 6	Junttan	4
1991-12-09	Södertälje	ASTRA	Junttan	4
1992-02-06	Stockholm	Lunda Godsterminal	Junttan	4
1992-05-25	Stockholm	Salemvägen	Banut	3
1992-06-23	Botkyrka	Himmerfjärdsverket	Junttan	3
1992-06-25	Stockholm	Bleholmstorget, gång-cykelramp	Junttan	4
1992-08-12	Vansbro	Bro, västerdalälven	Banut	4
1992-12-17	Uppsala	Kv. Gösta	Junttan	3
1992-12-17	Uppsala	Kv. Gösta	Junttan	3
1993-02-23	Löddeköping	Bro över Löddeån	Banut	4
1993-03-05	Löddeköping	Bro över Löddeån	Banut	4
1993-04-14	Upplands Väsby	Ladbron	Junttan	5
1993-04-28	Vattholma	Bro Fyrisån	Junttan	4
1993-05-04	Båstad	Bro L759	Junttan	4
1993-06-17	Södertälje	Kv. Skogsviolen	Junttan	4
1993-06-22	Umeå	Filmstaden	Banut	4
1993-07-13	Jönköping	Bro F990	Junttan	4
1993-07-27	Nässjö	STG 1D Runneryd	Junttan	4
1993-11-15	Vattholma	Bro Fyrisån	Junttan	4
1993-12-04	Vattholma	Bro Fyrisån	Junttan	4
1994-02-14	Söderbärke	Bro över Barken	Banut	5
1994-02-18	Umeå	Kv. Baldakinen	Banut	4
1994-04-15	Sundsvall	SCA, Valsförråd	Åkerman	3
1994-05-05	Haninge	Bro, Haningeleden	Junttan	4
1994-05-07	Tumba	Tumba Centrum	Junttan	3
1994-06-12	Skellefteå	Kv. Advokaten	Junttan	4
1994-09-16	Vårby	Bro, Tegelbruksvägen	Junttan	4
1994-10-06	Uppsala	Bärebyleden, bro	Junttan	4
1994-10-17	Läggesta	Järnvägsbro, Läggesta, stöd 4	Junttan	5
1994-10-24	Sättingeporten	Vägport väg 939	Junttan	4
1994-10-24	Hanhals	Bro N804, Väst kustbanan	Junttan	4
1994-10-24	Slöinge	Bro N783, Suseån	Junttan	4
1994-11-02	Läggesta	Järnvägsbro, Läggesta, stöd 3	Junttan	5
1994-11-09	Uppsala	Bro, Fyrisån	Junttan	4
1994-11-21	Skälebol	Bro över väg 1137	Åkerman	3
1994-11-29	Östersund	Bro Z1021	Banut	4
1994-12-07	Mörrum	Mörumsbruk	Junttan	5

Datum	Ort	Objekt	Pålkran	Hejarvikt
1995-01-27	Mellansel	Bro över Moälven	Banut	4
1995-02-02	Malå	Malå Trä AB	Junttan	4
1995-02-07	Falkenberg	Vin och Sprit AB, hus F		4
1995-03-01	Skövde	Kv Folkparken	Åkerman	4
1995-03-03	Kungör	Bro	Banut	6
1995-04-24	Umeå	Kv Stigbygeln	Junttan	3
1995-04-28	Luleå	Kransbår, Nya hamnen	Banut	5
1995-06-03	Umeå	Volvo, Umeverken	Junttan	4
1995-07-07	Eskilstuna	Järnvägsbro, Sveavägen	Junttan	4
1995-08-15	Jönköping	Högskolan	Junttan	4
1995-09-05	Orrskog	Järnvägsbro, E4	Junttan	4
1995-10-31	Orrskog	Järnvägsbro, E4	Junttan	4
1995-12-13	Halmstad	Halmstads renhållningsbolag	Junttan	5
1996-01-12	Höga Kusten	Bro, Gallsäter	Junttan	4
1996-01-25	Halmstad	Svenska Malt AB	Junttan	6
1996-02-12	Jursta	Brostöd, B1708	Junttan	4
1996-04-12	Örnsköldsvik	Alfred hem, MODO	Junttan	3
1996-04-15	Nyköping	Vägport D545	Junttan	4
1996-06-05	Landskrona	Järnvägsbro över Vegeån	Junttan	5
1996-06-21	Tumbo	Vägbro	Junttan	4
1996-06-24	Huddinge	Kv Kurvan 5	Junttan	4
1996-06-27	Hamneda	Bro G584, E4	Junttan	5
1996-06-27	Huddinge	Kv Kurvan 5	Junttan	4
1996-07-17	Husum	Husums papperbruk	Junttan	4
1996-10-15	Luleå	Pelletsfabrik	Junttan	4
1997-01-17	Karlskrona	Bro K552, Möcklesund	Junttan	4
1997-02-04	Karlskrona	Bro K 552, Möcklesund	Junttan	4
1997-04-25	Karlskrona	Bro K 552, Möcklesund	Junttan	4
1997-10-02	Gärtuna	Astra, B-621	Junttan	4
1998-01-21	Örebro	Unikum	Junttan	4
1998-02-09	Örebro	Kv Knistan	Junttan	4
1998-07-08	Kristianstad	Kronfågel, Kv Kylan	Åkerman	3
1998-08-17	Gärtuna	Astra 616	Junttan	4
1998-09-09	Glanshammar	Bro T901	Junttan	4
1998-09-21	Umeå	Storån	Junttan	4
1998-10-26	Umeå	Storån	Junttan	5
1998-11-24	Älvsjö	Kv Mässhallen 1	Junttan	4
1998-11-26	Stockholm	Pampuskajen	Junttan	5
1999-01-21	Skellefteå	Kv Prefekten nr 1	Åkerman	3
1999-03-25	Gärtuna	ASTRA	Junttan	4
1999-03-30	Stockholm	Allé bron, Sickla udde	Junttan	4
1999-04-08	Håby- Rabbalshede	Bro över väg 908, E6	Junttan	4
1999-04-15	Södertälje	Astra 811	Junttan	4
1999-07-02	Rönnskär	Syrgastankar	Junttan	4
1999-08-30	Holmsund	Holmsund, bro	Junttan	4
1999-09-13	Bålsta	Gröndalskolan	Junttan	4

Datum	Ort	Objekt	Pålkran	Hejarvikt
1999-11-23	Norrköping	Etanilfabrik	Junttan	4
2000-01-17	Stockholm	Södra Länken 24	Junttan	4
2000-01-21	Malmö	BO 01, Skanska	Junttan	4
2000-02-02	Stöcksjö	Bro över E4	Junttan	5
2000-02-15	Stockholm	Södra länken 24	Junttan	4
2000-03-09	Linköping	Kv. Glasburken	Junttan	4
2000-03-10	Umeå	Dragonfältet	Junttan	4
2000-03-14	Umeå	Dragonfältet	Junttan	4
2000-04-05	Linköping	Kv. Glasburken	Junttan	4
2000-04-05	Linköping	Kv Glasburken	Junttan	4
2000-04-28	Domsjö	Alfredshem-Domsjö	Junttan	4
2000-07-10	Stockholm	Kista Entré	Junttan	4
2000-08-25	Kista	Kv Danmark	Junttan	4
2000-10-10	Sickla	Kv Daggkåpan	Junttan	4
2000-10-27	Nacka	ICA Maxi, Skvaltan	Junttan	4
2001-04-04	Borås	LBC Borås	Junttan	4
2001-05-09	Göteborg	Bilia AB, Eklanda	Junttan	4
2001-08-01	Jönköping	Kv Eskaden	Junttan	4
2001-08-27	Falkenberg	Carlsbarg, Kv Rönnhagen	Junttan	4
2001-10-25		KV Grynnan	Junttan	4
2001-11-23	Örnsköldsvik	Alfredshem, Sekab	Junttan	4
2002-02-02	Stöcksjö	Bro E4 Stöcksjö	Junttan	5
2002-02-05	Stockholm	Parken 1, Liljeholmen	Junttan	4
2002-03-08	Linköping	Kv Maskinen 3	Junttan	4
2003-08-06	Linköping	Väg 35, Bro E1125	Junttan	4
2003-08-21	Rotebro	Bro 1905	Junttan	4

## 7.2. Förekommande påtyper

Typ	Area (cm2)
SP3	729
SP2	729
SP1	552
B600	729
A900	756
350x350	1225
300x300	900
235	552

## 7.3. Lista över personer som utfört projekt i databasen

Utfört av	Namn	Företag
TA	Tomi Aarnio	Skanska Teknik
JL	Johan Lindgren	Nilsson & Lindgren Markkonsult AB
GA	Gary Axelsson	Skanska Teknik
CR	Christer Roman	Skanska Teknik
MB	Mattias Bodström	Skanska Teknik
TW	Torbjörn Wemming	Hercules Grundläggning
JR	Jan Romell	Skanska Teknik
IH	Ingmar Hermansson	Pålanalys AB
CJG	Carl-John Grävare	Pålanalys AB
MG	Mattias Grävare	Pålanalys AB

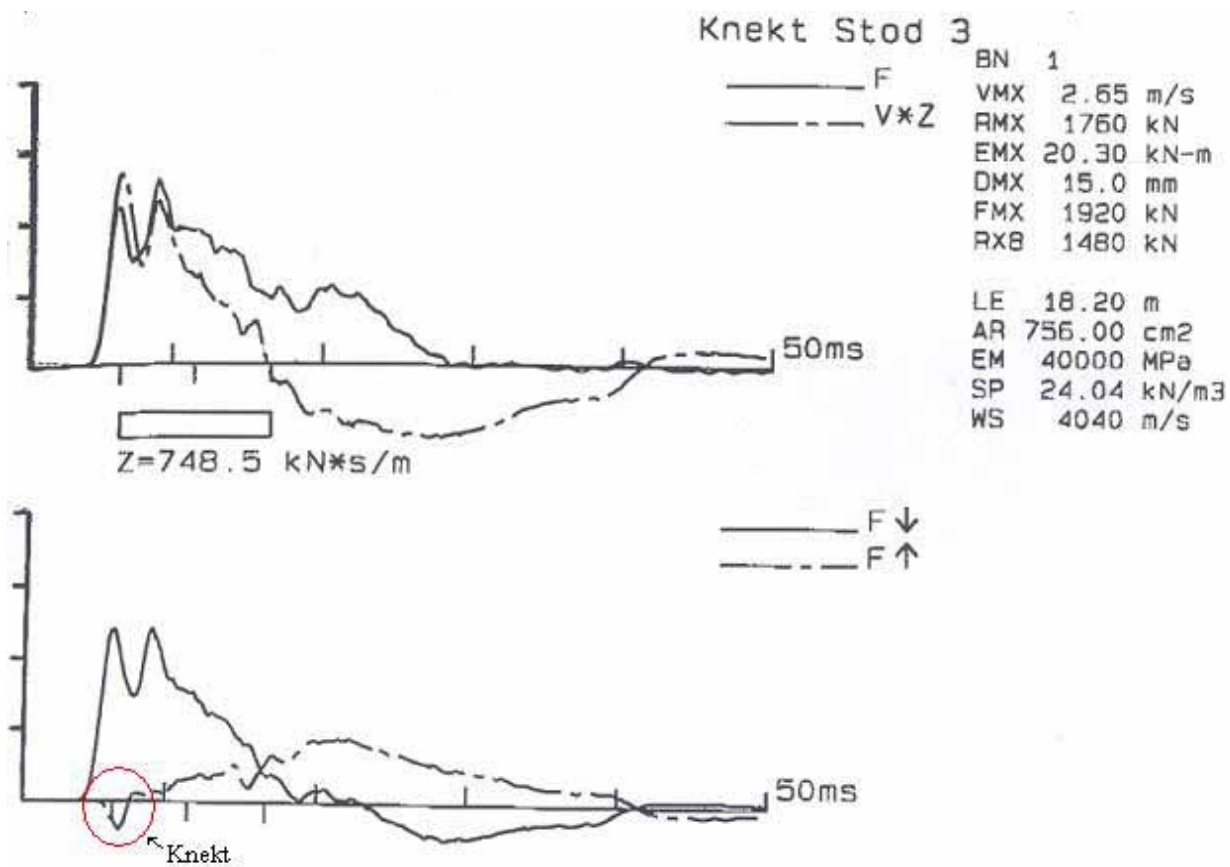
## 7.4. Förekommande slagutrustning

Tillverkare	Typ	Effektivitet
Junttan	Hydraul	0,8
Banut	Hydraul	0,8
Åkerman	Linhejare	0,6
Landwerk	Linhejare	0,6
Krupp	Hydraul	0,8



## 7.5. Stötvågskurvor

### 7.5.1. Landskrona



## 7.5.2. Gärtuna

