

PÅLKOMMISSIONEN

Teknisk PM 3:2015

Litteraturstudie cyklisk belastning av pålar

Utförd av

Anders Beijer Lundberg

ELU Konsult AB

Gary Axelsson

ELU Konsult AB

FÖRORD

Denna rapport är en litteraturstudie som har tagits fram i syfte att belysa problemställningar kring axiellt cykliskt belastade pålar. Rapporten vänder sig främst till projektörer/konstruktörer av pålgrundlagda konstruktioner som är utsatta lastväxlingar som kan orsaka sättningar eller bärighetsbrott.

Rapporten innefattar både svensk och internationell vetenskaplig litteratur samt belyser olika möjligheter att beakta cyklisk belastning vid dimensionering av pålar.

Rapporten har tagits fram inom Pålkommissionen av:

- *Anders Beijer Lundberg* *ELU Konsult AB*
- *Gary Axelsson* *ELU Konsult AB*

Författarna vill tacka referensgruppen för värdefulla synpunkter och givande diskussioner:

- *Etienne Alderlieste, SPT Offshore*
- *Peter Alheid, Hercules Grundläggning*
- *Håkan Bredenberg, Bredenberg Geo*
- *Anders Fredriksson, Fredriksson Geo*
- *Lars Hall, ELU Konsult AB*

Innehåll

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	7
BETECKNINGAR	9
1. INLEDNING	10
1.1. SYFTE	10
1.2. DISPOSITION	10
1.3. BAKGRUND	10
1.3.1. OFFSHORE-KONSTRUKTIONER	11
1.3.2. VINDENERGI-LASTFALL	11
1.3.3. INFRASTRUKTUR	12
2. PROBLEMSTÄLLNING	13
2.1. JORDLAGERFÖLJD	13
2.2. PÅLTYPEN OCH DERAS FUNKTION	13
3. LASTFALL	15
3.1. MÖJLIGA LASTFALL VID CYKLISK BELASTNING	15
3.2. KORTVARIG CYKLISK LAST – CYKLISKT BROTT	15
3.3. LÅNGVARIG KONTINUERLIG CYKLISK LAST – ACKUMULERAD SÄTTNING	16
3.4. MÖJLIGA LASTFALL	17
3.5. CYKLISK BELASTNING AV PÅLAR I BEFINTLIGA NORMSYSTEM	18
4. DEFINITION AV CYKLISK BELASTNING	20
4.1. IDEALISERING AV CYKLISK LAST	20
4.2. LASTER OCH BÄRFÖRMÅGA I BELASTNINGSCYKLER	21
4.2.1. MEDELLAST OCH CYKLISK LAST	21
4.2.2. MEDELSKJUVSPÄNNING OCH CYKLISK SKJUVSPÄNNING	21
4.2.3. 1-VÄGS OCH 2-VÄGSLAST	22
4.2.4. CYKLISK NEDBRYTNING AV MANTEL- OCH SPETSBÄRFÖRMÅGA	22
4.2.5. STATISK MANTELÄRFÖRMÅGA	22
4.2.6. CYKLISK MANTELÄRFÖRMÅGA	22
4.2.7. ACKUMULERAD SÄTTNING	23

4.2.8.	VILOPERIOD MELLAN LASTSERIER	24
4.2.9.	CYKLISKA STABILITETSDIAGRAM	26
5.	<u>FÄLT- OCH LABORATORIEFÖRSÖK</u>	27
5.1.	OMFATTNING PÅ FÄLT- OCH LABORATORIEFÖRSÖK FÖR CYKLISK BELASTADE PÅLAR	27
5.2.	CYKLISKT BELASTADE PÅLAR I LERA	27
5.2.1.	BELASTNINGSHASTIGHET	27
5.2.2.	BROTTGRÄNSTILLSTÅND FÖR CYKLISK BELASTNING AV PÅLAR I LERA	29
5.2.3.	ACKUMULERAD SÄTTNING	30
5.3.	CYKLISK BELASTNING AV PÅLAR I FRIKTIONSJORD	31
5.3.1.	BROTTGRÄNSTILLSTÅND FÖR CYKLISK BELASTNING I FRIKTIONSJORD	32
5.3.2.	PÅVERKAN AV TIDIGARE CYKLISK BELASTNING PÅ STATISK BÄRFÖRMÅGA	32
5.3.3.	ACKUMULERAD SÄTTNING I FRIKTIONSJORD	32
6.	<u>MEKANISMER SOM STYR NEDBRYTNING AV BÄRFÖRMÅGA SAMT ACKUMULERING AV SÄTTNINGAR</u>	35
6.1.	MANTEL MOTSTÅND OCH SPETSMOTSTÅND	35
6.2.	MOBILISERING AV MANTEL MOTSTÅND VID STATISK BELASTNING	35
6.3.	MANTELUTMATTNING	36
6.4.	CYKLISK SKJUVNING AV LERA	37
6.5.	CYKLISK SKJUVNING AV FRIKTIONSJORD	38
6.6.	BELASTNINGSTYP	39
7.	<u>BERÄKNINGSMETODER</u>	41
8.	<u>CYKLISK PROVBELASTNING.</u>	43
8.1.	KONVENTIONELL PROVBELASTNING	43
8.2.	DYNAMISK PROVBELASTNING	43
9.	<u>CYKLISK BELASTNING AV PÅLGRUPPER</u>	45
10.	<u>DYNAMISK RESPONS VID CYKLISK BELASTNING</u>	46
11.	<u>DISKUSSION – DIMENSIONERING AV CYKLISK BELASTADE PÅLAR</u>	47
11.1.	CYKLISK BELASTNING PÅ PÅLAR I DIMENSIONERING	47
11.2.	ANPASSNING TILL SVENSKA FÖRHÅLLANDEN	47
11.3.	DIMENSIONERING I BROTTGRÄNSTILLSTÅND	47
11.4.	DIMENSIONERING I BRUKSGRÄNSTILLSTÅND	48
11.5.	PROVBELASTNING	48
11.6.	PÅLGRUPPER UTSATTA FÖR CYKLISK BELASTNING	48

SAMMANFATTNING

Konstruktioner avsedda för infrastruktur påverkas av variabla trafiklaster. Dessa laster förs ner till konstruktionens grundläggning, vilken för tyngre konstruktioner oftast består av pålar. Cyklisk belastning av pålar är i dagsläget ett område som inte har undersökts speciellt grundligt, till stor del på grund av kostnader och svårigheter förknippade med att genomföra fält- och laboratorieförsök.

I dagsläget beaktas cyklisk belastning av pålar vid dimensionering genom att addera variabel och permanent last enligt SS-EN-1990 och förutsätta att den cykliska bärförmågan är likvärdig med den statiska bärförmågan. Fält- och laboratorieförsök i olika jordarter har dock visat att pålar belastade med stor andel variabel last har lägre cyklisk bärförmåga än statisk bärförmåga. Pågående teknikutveckling innefattande lättare samverkanskonstruktioner och sättningskänsliga höghastighetståg gör att behovet av beräkningsmodeller och provbelastningsmetoder för cyklisk belastade pålar har ökat.

Syftet med denna litteraturstudie är att utifrån tillgänglig vetenskaplig litteratur beskriva tidigare erfarenheter av axiell cyklisk belastning av slagna pålar. Litteraturstudien behandlar i första hand slagna pålar; mantelburna i lera eller friktionsjord samt spetsburna pålar i friktionsjord. Vid låg belastning av pålen jämfört med brottgränslast kommer mantelfriktionen dominera pålens last-rörelse samband då pålspetsen har lägre styvhet än manteln. Detta gör att denna inte kommer att bli fullt mobiliserad då pålens rörelse är liten. Observationer från fält- och laboratorieförsök tyder på att det huvudsakligen är mantelbärförmågan som reduceras vid cyklisk belastning.

Cyklisk belastning kan uppdelas i två ytterligheter: ej återkommande kortvarig cyklisk belastning, och ständig långvarig cyklisk belastning. Mellan återkommande lastcykler sker en viloperiod, vilken kan ha stor betydelse för pålens bärförmåga. Vid kortvarig belastning kan pålen bära relativt hög last innan pålen går till brott. Långvarig belastning med relativt liten last kan resultera i ackumulerad sättning av pålen. Mellan dessa ytterligheter kan de flesta lastfall definieras i praktisk dimensionering av pålar.

Mantelbärförmåga hos pålar har tidigare studerats i ofta olika typer av cykliska skjuvförsök som visar att belastningstypen har stor inverkan på jordens cykliska beteende. Vid 1-vägs cykler (skjuvning runt en konstant skjuvspänning, så att skjuvspänningen alltid förbli positiv eller negativ i en bestämd riktning) är den cykliska påverkan liten vid små nivåer av cyklisk last. Vid övergång från positiva till negativa skjuvspänningar i 2-vägs cykling försvagas jordens hållfasthet och ackumulerad töjning ökar.

Fält- och laboratorieförsök av cyklisk mantelbärförmåga visar att cyklisk belastning är beroende av den specificerade belastningstypen (1-vägs eller 2-vägs), antal lastcykler N_{tot} , samt av den mobiliserade mantelfriktionen längs pålen relativt mantelfriktionen i brott $\tau(z)/\tau_{brott}(z)$. För relativt korta, huvudsakligen spetsburna pålar, kommer således mantelfriktionen att brytas ner fortare än för längre pålar. Även viloperioden t_{vila} mellan lastcykler kommer att påverka pålarna i både lera och friktionsjord, då tillväxt av mantelfriktion sker. I praktisk dimensionering betraktas pålars cykliska bärförmåga relativt en statisk bärförmåga, både för pålens total uppmätta eller bedömda bärförmåga P_k och för det mantelmotståndet vid statisk belastning $\tau_{brott}(z)$.

Jordarten styr den cykliska lastens påverkan: vid cyklisk belastning av lera sker uppbyggnad av portryck, vilket leder till av minskning av mantelfriktionen samt ackumulerad töjning. För friktionsjord sker en packning och valvbildning av jorden vid manteln, vilket

minskar normalspänningen mot pålen och därmed också mantelfriktionen. Båda dessa mekanismer leder till en minskning av pålens mantelfriktion.

Cykliska stabilitetsdiagram kan användas för analys av pålar vid cyklisk belastning. Dessa diagram konstrueras efter fält- och laboratorieförsök samt förenklade beräkningsprogram, för specifika påltyper och jordar. En ökande mängd lastcykler resulterar i instabilt, metastabilt, eller stabilt beteende för pålarna. Instabilt beteende leder till brott efter ett fåtal lastcykler. Metastabilt beteende leder till brott efter ett större (100-tal) lastcykler, vilket gör att enstaka större laster (t.ex. 1000-års vågor) som ingår i ett lastfall kan ingå utan att bärförmågan sänks betydligt. För analys av kortvarig belastning kan ett metastabilt läge väljas. Stabilt beteende gör att stora lastcykler ($>10^6$ cykler) förmodligen kan ske med liten ackumulerad sättning, och långvarig cyklisk last bör således inte överstiga sådana magnituder. Vid analys av pålars cykliska beteende används företrädesvis cykliska fjädermodeller där varje jordlager modelleras som en cyklisk belastad fjäder. Även FEM-modeller har använts vid sådana analyser.

Cyklisk provbelastning har tidigare utförts med en särskilt anpassad provutrustning på provpålar. Det är troligt att det även går att genomföra dynamisk provbelastning genom stöt-vågsmätning. Vid en sådan provbelastning bestäms först karakteristisk bärförmåga R_k från närliggande pålar, varefter bestämning av instabilt, metastabil och instabilt område i ett cykliskt stabilitetsdiagram utförs med gradvis ökad belastning på olika pålar.

BETECKNINGAR

c_u	[kPa]	Odränerad skjuvhållfasthet
d	[m]	Förskjutning av mantel
d_{max}	[m]	Förskjutning av mantel vid max. mantelfrikt.
$D_{påle}$	[m]	Pålens diameter
D_τ	[-]	Degradationsfaktor
f_{last}	[Hz]	Frekvens på lastcykler
$f(d)$	[kPa]	Mantelfriktion vid förskjutningen d
$f_c(N)$	[kPa]	Cyklisk mantelfriktion efter N cykler
$f_{c,max}$	[kPa]	Maximal cyklisk mantelfriktion
f_s	[kPa]	Mantelfriktion vid statisk belastning
G	[N]	Permanent last
$l_{påle}$	[m]	Pålens längd
N_{serie}	[-]	Antal lastcykler under lastserie
N_{tot}	[-]	Antal cykler över konstruktionens livslängd
P_M	[N]	Medellast i lastcykel
P_C	[N]	Cyklisk last i lastcykel
P_{max}	[N]	Maximal last i lastcykel
P_{min}	[N]	Minimal last i lastcykel
P_k	[N]	Uppmätt eller beräknad bärförmåga för påle
Q	[N]	Variabel last
s_{tot}	[m]	Total sättning i påltopp
$\Delta s(z)$	[m]	Sättning vid nivå z
τ_m	[kPa]	Medelskjuvspänning i lastcykel
τ_c	[kPa]	Cyklisk skjuvspänning i lastcykel
τ_{max}	[kPa]	Maximal skjuvspänning i lastcykel
τ_{max}	[kPa]	Minimal skjuvspänning i lastcykel
t_{vila}	[tid]	Viloperiod mellan lastserier
1-vägs cykler	[-]	$\tau_m > \tau_c$, endast pos/neg skjuvspänningar i cykel
2-vägs cykler	[-]	$\tau_m < \tau_c$, både pos/neg skjuvspänningar i cykel

1. INLEDNING

1.1. Syfte

Litteraturstudiens syfte är att utifrån tillgänglig vetenskaplig litteratur redovisa rådande ”state-of-the-art”-kunskap avseende dimensionering av helt eller delvis mantelburna pålar (friktionspålar och pålar stoppslagna i morän) utsatta för axiell cyklisk belastning. I detta PM diskuteras analysmetoder, fält- och laboratorieförsök, samt olika beräknings- och provbelastningsmetoder. Dessa relateras till rådande praxis för statistiskt belastade pålar samt jordlagerförhållanden.

1.2. Disposition

Inledningsvis diskuteras bakgrunden till påverkan av cyklisk last på pålar, samt tidigare tillämpningar. Cyklisk belastning av pålar definieras, och styrande parametrar beskrivs. Påltyper samt möjlig jordprofil beaktas.

Möjliga lastfall diskuteras, där speciellt viloperioden mellan lastcykler påverkar hur återkommande lastserier påverkar ackumulering av sättningar.

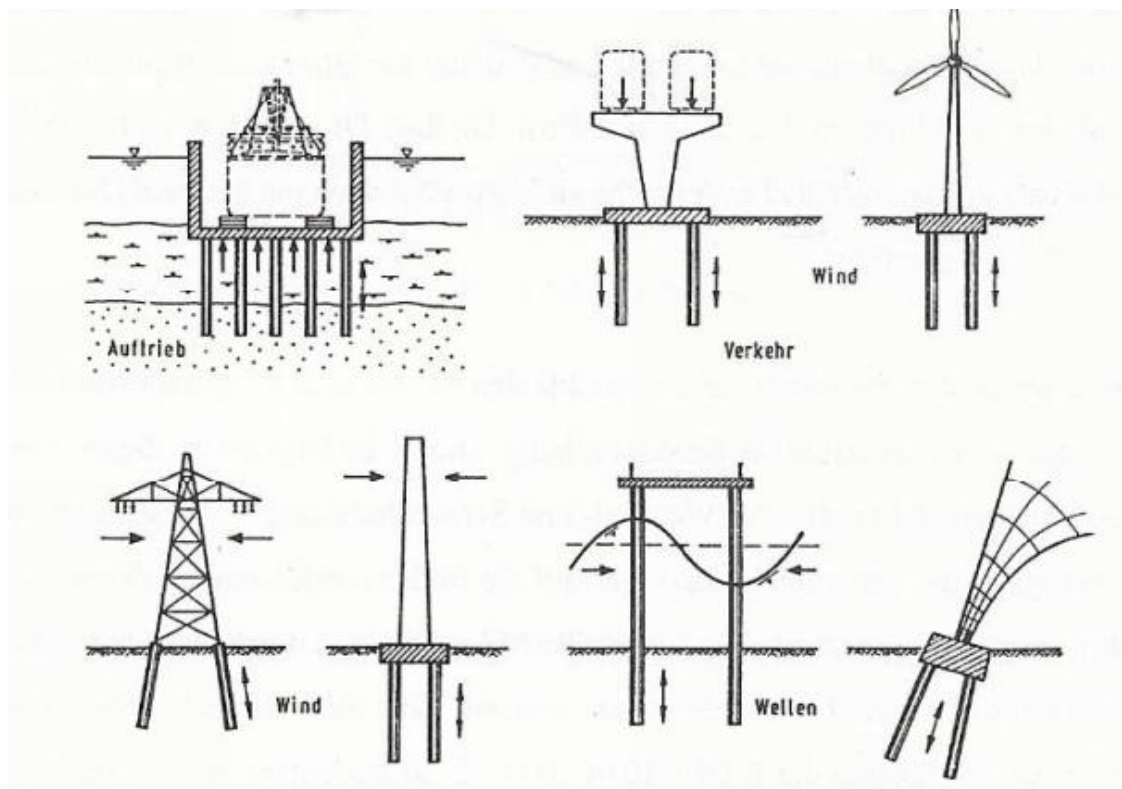
En djupare studie av cyklisk belastning av pålar i lera samt friktionsjord följer. En något längre beskrivning av pålens mantel utsatt för cyklisk belastning ges. Vid betraktande av leror är främst effektivspänningsberoende respons och efterföljande konsolidering av intresse. För friktionsjord diskuteras mantelutmattning samt tidsberoende tillväxt av mantelbärförmåga efter installation och belastning.

Avslutningsvis görs en genomgång av studier på pålar i fält- och laboratorieförsök, samt metoder för beräkning av bärförmåga och sättningar och möjliga typer av provbelastning.

1.3. Bakgrund

Cyklisk axiell belastning av pålar förekommer alltid vid variabel last. I de flesta fall är den cykliska lastandelen liten i förhållande till den permanenta lasten, och cyklisk lastinverkan behandlas därför inte i bedömning av pålens bärförmåga, (Tomlinson, 2001). Fältmätningar har även visat att en liten andel variabel last ökar pålens bärförmåga något, (Jardine & Standing, 2000), vilket ytterligare förklarar att det oftast inte beaktats.

När den variabla lastandelen är relativt stor mobiliseras dock en större del av mantelfriktionen längs pålen i varje lastcykel. Detta sker genom att pålen skjivas cykliskt mot jorden, (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2014). Sådan belastning bryter ner mantelfriktionen längs pålen, och riskerar att minska pålens cykliska bärförmåga, samt att leda till ackumulerade sättningar, (Puech & Jezequel, 1980). Några exempel på pålar utsatta för stor andel cyklisk last visas i Figur 1.1 från Schwarz, 2002 och i Figur 1.2, (Andersen et al, 2013). Som Figur 1.2 visar har cyklisk belastning av pålar främst beaktats vid beräkning av bärförmåga för pålar i offshore-konstruktioner (t.ex. oljeplattformer) samt vindkraftverk. Påverkan och risker orsakade av cyklisk belastning för pålar i dylika konstruktioner skiljer sig betydligt från pålar i svensk infrastruktur. Dessa tillämpningar diskuteras därför mer i detalj.



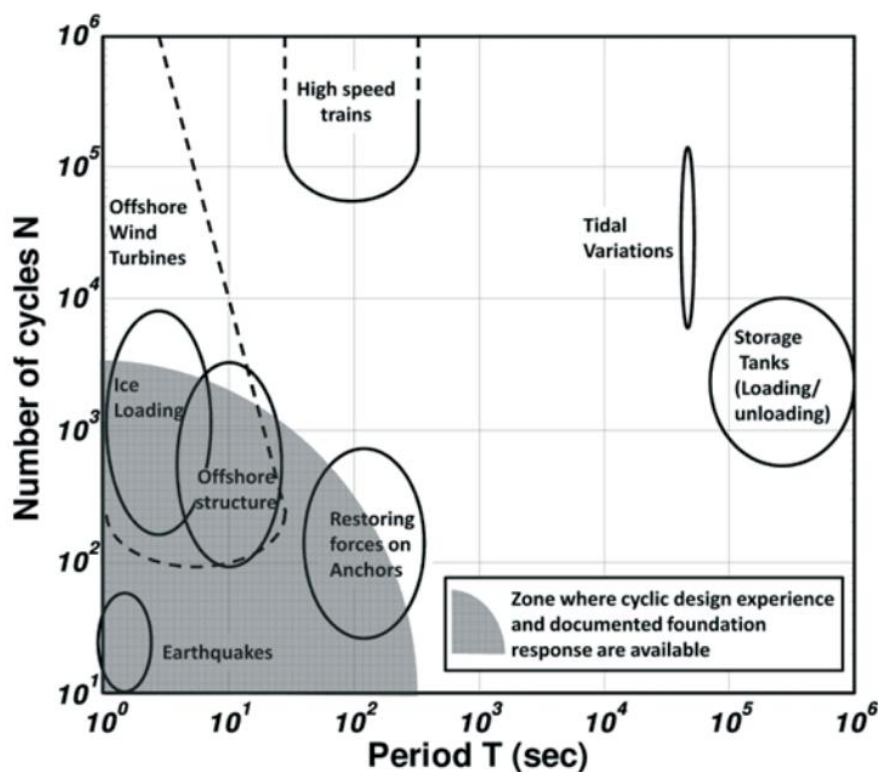
Figur 1.1. Exempel på pålar utsatta för cyklisk belastning, (Schwarz, 2002).

1.3.1. Offshore-konstruktioner

Problemställningar relaterade till axiell cyklisk belastning av pålens introducerades på 70-talet, vid dimensionering av offshorekonstruktioner utsatta för en stor andel variabel last, (Karlsrud, 2012). Speciellt intresse visades för beräkning av bärförmåga för pålar i TLP-plattformar (Tension Leg Platform), (Goulois, 1982). Sådana plattformar är flytande konstruktioner förankrade inspända i dragpålar på sjöbotten, där pålarna belastas med stor andel variabel våg- och vindlast, (Puech & Jezequel, 1980). Vid införandet av TLP-metoden rådde oklarhet om hur stor förändring av den totala bärförmågan som kunde förändras p.g.a. cyklisk lastpåverkan. En tänkbar risk var cyklisk minskning av bärförmågan, s.k. "unzipping" av pålen, vilket ledde till forskning inom området, t.ex. (Goulois, 1982, Karlsrud et al, 1986, Puech & Jezequel, 1980).

1.3.2. Vindenergi-lastfall

Vid senare utveckling av storskalig vindenergi i Östersjön och Nordsjön användes pålade konstruktioner som skiljde sig betydligt från tidigare offshore-konstruktioner eftersom dem betydligt högre andel cyklisk last, (Merritt et al, 2012). Detta ledde till behov av ny forskning, som inriktades på både cyklisk bärförmåga och ackumulerad sättning. Det senare eftersom vindkraftverk är känsliga för sättningar. Experiment utfördes av bl.a. Schwarz, 2002, vilket ledde till utvecklingen av en empiriskt styrd metodik för sättningsberäkning, t.ex. Baumbach, 2012. Det råder dock fortfarande råder betydande osäkerhet om hur stora cykliska laster som pålar kan bära, (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2014).



Figur 1.2. Mängd lastcykler och tidsperiod för cyklisk belastning i olika tillämpningar, (Andersen et al, 2013).

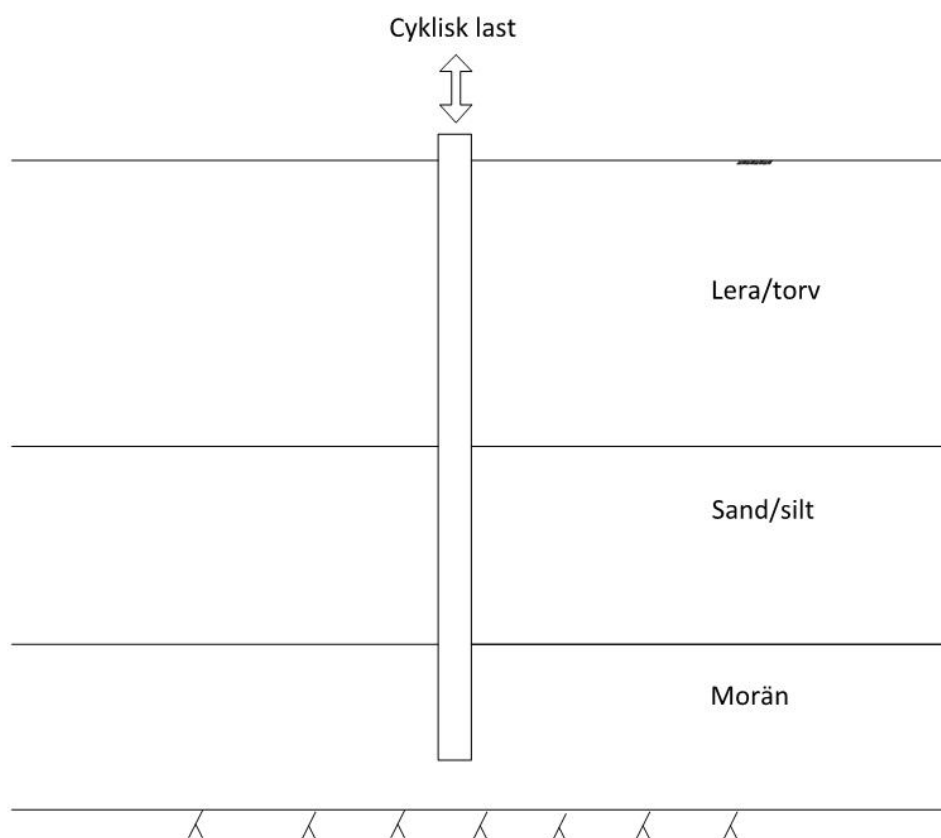
1.3.3. Infrastruktur

Den senare tidens utveckling av höghastighetståg runt om i världen har lett till ett ökat intresse för följderna av ackumulerad sättning av bankonstruktioner, (Chen, 2013, Raithel et al, 2008). Ban- och brokonstruktioner belastas med en hög andel variabel last, vilket kan leda till sättningar av pålar. Följderna av sättningar beror till stor del på valet av bansystem: då ballast används finns det möjlighet att justera spår vid uppkomna sättningar, medan detta är möjligt, men relativt omständigt, vid användning av ballastfria system. Det finns ännu en begränsad litteratur på området, eftersom analys av ackumulerad sättning är tidsödande.

2. PROBLEMSTÄLLNING

2.1. Jordlagerföljd

Inverkan av den cykliska belastningen styrs av jordlagerföljden, (Jardine et al, 2012). För att tydliggöra problemställningen kan vi betrakta en typisk mellansvensk jordlagerföljd bestående av morän på berg, överlagrad av varierande lager av friktionsjord, silt och lera, och eventuell torv, visad i Figur 2.1. Bergytan kan variera kraftigt för denna typ av jordlagerföljd, vilket gör att pålar av olika längder kommer användas, något som kan få stor betydelse för den cykliska lastens inverkan på pålarna. Slagna pålar kommer troligtvis att utsättas för en viss andel påhängslast i lerlagret även vid små mängder fyllnadsmassor eller mindre grundvattenförändringar. Påhängslaster har uppmätts i fältmätningar, även för kompakta siltlager, (Puech & Jezequel, 1980). Vid cyklisk belastning kommer påhängslastens riktning att vändas till positiv mantelfriktion om tillräckligt stor elastisk deformation hos pålen sker. Detta leder till lokal 2-vägs cykler och omfattande nedbrytning av mantelbärförmågan, (Karlsrud et al, 1986).

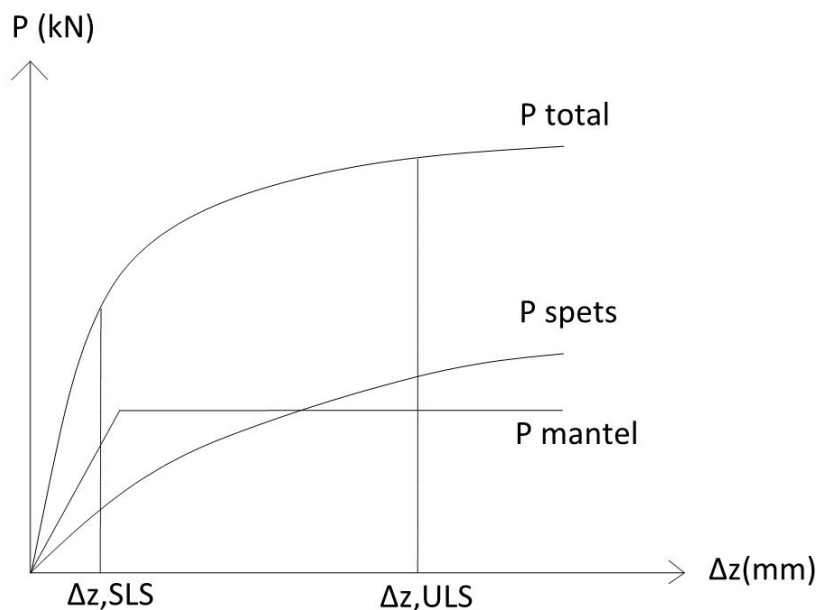


Figur 2.1. Typisk mellansvensk jordlagerföljd.

2.2. Påltyper och deras funktion

De vanligaste påltyperna i Sverige är slagna betong- och stålplålar. Bärförmågan för pålar i friktionsjord utgörs av både mantelmotstånd och spetsmotstånd. För pålar stoppslagna i morän

hänförs den större delen av bärförmågan till spetsmotståndet. Detta gäller emellertid endast vid belastning i brottgränstillstånd, d.v.s. för relativt stora laster. I bruksgränstillstånd belastas pålen av mindre laster. Då pålspetsen har en vekare respons än manteln gör pålens elastiska hoptryckning att lasten överförs gradvis från påltoppen och nedåt. Detta gör att manteln kommer att bära en stor del av lasten i bruk. Detta gäller även för spetsbärande pålar i morän, vilket visas principiellt i Figur 2.2, där manteln styr pålens last-rörelse samband. Det är alltså manteln som är av störst intresse för analys av pålens bärförmåga i bruksgränstillstånd, eftersom de laster som krävs för att mobilisera spetsmotståndet troligtvis inte kommer användas. För kohesionspålar däremot är oftast spetsmotståndet försumbart liten jämfört med den totala bärförmågan. Dessutom krävs väldigt stor rörelse för att mobilisera spetsbärförmågan.

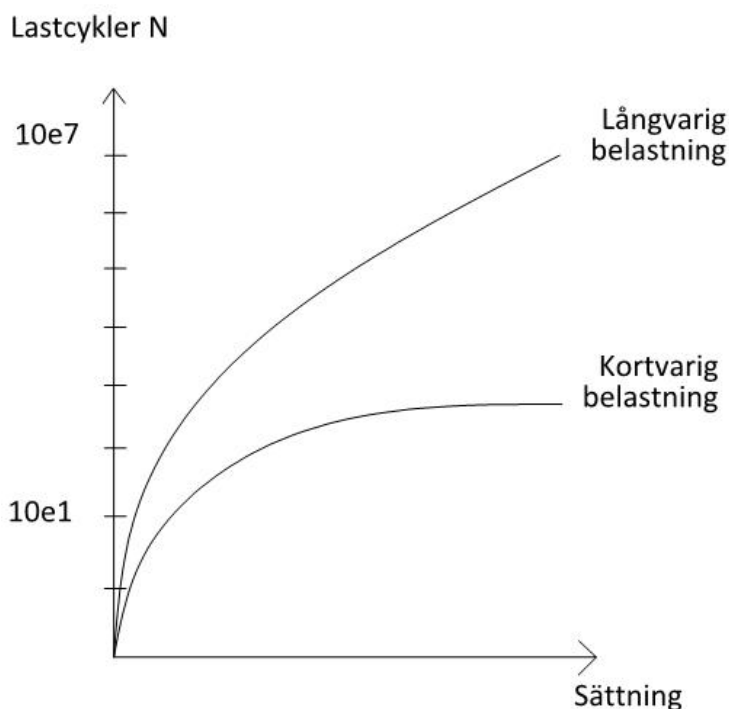


Figur 2.2. Last-rörelse samband för manteln, spetsen, och pålen som helhet

3. LASTFALL

3.1. Möjliga lastfall vid cyklisk belastning

Vid cyklisk belastning kan två lastfall definieras som möjliga ytterligheter: kortvarig, ej återkommande cyklisk belastning, och långvarig, kontinuerlig cyklisk belastning. Sättningen hos en påle resulterande från dessa lastfall visas principiellt i Figur 3.1, där antalet lastcykler som krävs för att uppnå brott- eller bruksgränstillstånd beror på storleken av den cykliska lasten. Vid återkommande lastcykler med efterföljande viloperiod kommer tiden mellan lasten att påverka pålens bärförmåga, (Jardine & Standing, 2000). Mellan dessa ytterligheter kan samtliga lastfall av intresse definieras. Dessa innehåller specificerad variation av lastens storlek, lastfrekvens och viloperiod mellan lastcykler.



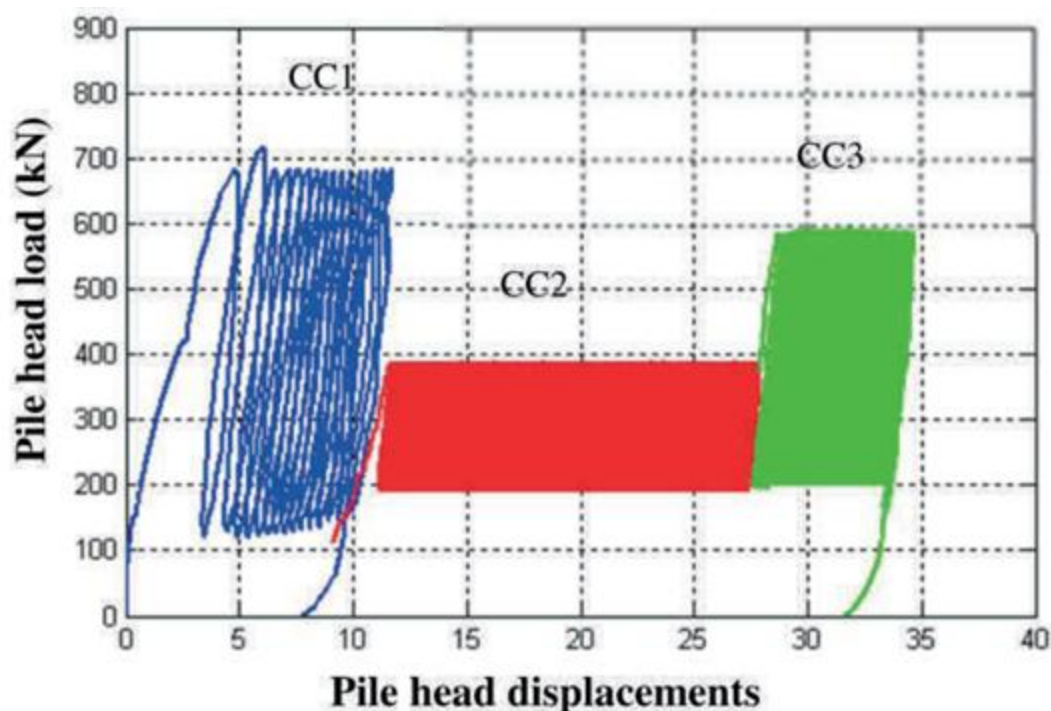
Figur 3.1. Principiell avbildning av sättning av påle vid cyklisk belastning från antingen kortvarig hög belastning eller långvarig lägre kontinuerlig belastning.

3.2. Kortvarig cyklisk last – Cykliskt brott

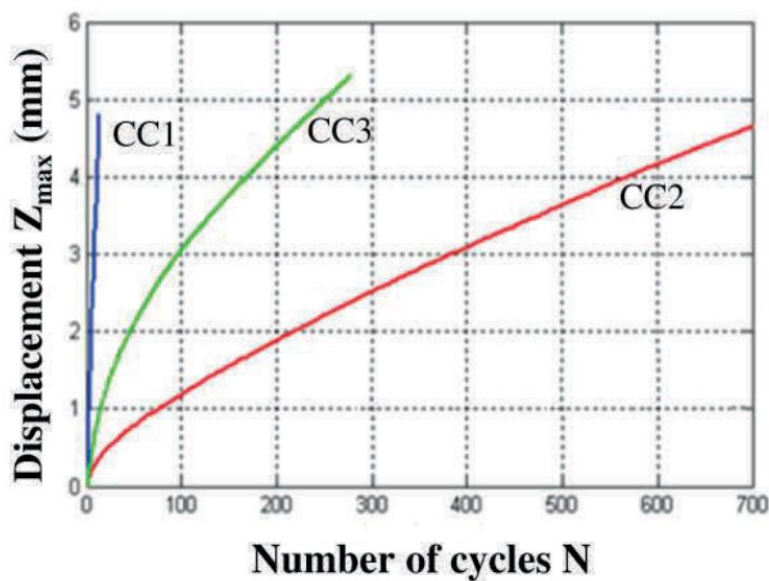
Cyklisk belastning innehållande en stor andel variabel last som sker under kort tid kan leda till stor sättning per belastningscykel och därmed brott för pålen för ett fåtal lastcykler. Detta demonstreras av lastfall CC1 i Figur 3.2a (Benzaria et al, 2013b), där den höga lastnivån vid cyklisk belastning i friktionsjord ger relativt stor rörelse av pålen i varje lastcykel. Detta visas i ett last-rörelse av påltopp-diagram. Resultande sättning påverkas både av medellastens storlek, och andelen variabel last, något som diskuteras i detalj i följande avsnitt. Lastfall CC1, där brott sker som följd av fåtal cykliska laster, har traditionellt varit av störst intresse inom forskningen avseende offshore-konstruktioner och vindkraftverk, vilket visas i Figur 1.2. (Jardine et al, 2012, Karlsrud et al, 1986, Puech & Jezequel, 1980).

3.3. Långvarig kontinuerlig cyklisk last – ackumulerad sättning

Långvarig cyklisk belastning innehållande en liten andel cyklisk last kan även ge stor total-sättning hos pålen på grund av ackumulerad sättning (Baumbach, 2012, Puech, 2013). Detta visas i lastserie CC2 och CC3 i Figur 3.2a och 3.2b, där rörelse och lastcykler visas. Sättning från långvarig lågintensiv belastning illustreras principiellt i Figur 3.1., där den ackumulerade sättningen sker relativt ett logaritmiskt ökande antal lastcykler N , (Chen et al, 2013). Andra mätningar tyder snarare på ett linjärt beroende av antalet lastcykler, (Baumbach, 2012). Mekanismerna som styr pålen vid långvarig lågintensiv belastning är betydligt svårare att analysera, på grund av bl.a. krypning i jorden och varierande grundvattenförhållanden över längre tidsperioder. På grund av de tidskrävande försök som krävs för att mäta ackumulerad sättning har relativt få studier av detta genomförts. De som kan nämnas är Baumbach, 2012, Chen et al, 2013 och Schwarz, 2002. I dessa studier antas att viloperioden inte har någon betydelse och att lastcyklerna är ständigt återkommande. Fältmätningar visar dock att pålens bärförmåga ökar vid långvarig cyklisk belastning med liten amplitud och långa viloperioder, (Benzaria et al, 2013a, Jardine & Standing, 2000). I leror sker konsolidering av poröverttryck efter pålastning, vilket också kan leda till en ökning av bärförmågan, (Karlsrud et al, 1990).



Figur 3.2a. Sättning av påle vid kombination av lastserier för cykliskt belastad påle i friktionsjord, (Benzaria et al, 2013b).

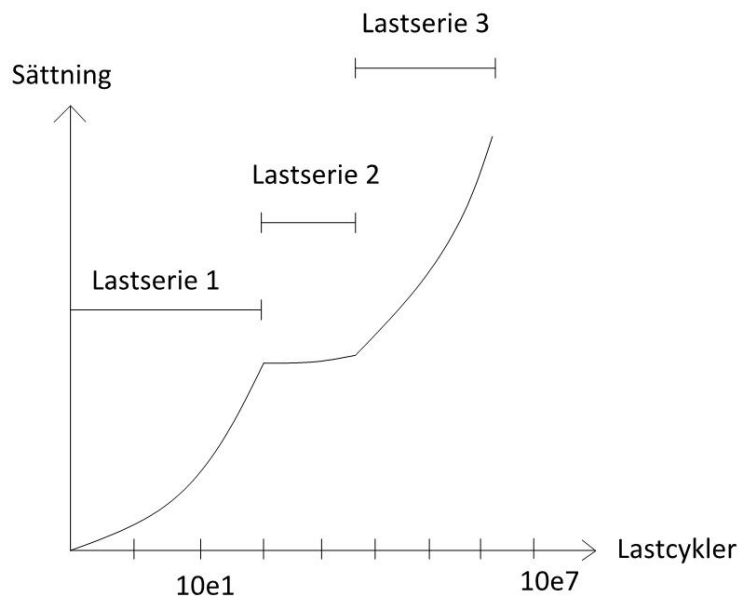


Figur 3.2b. Sättning av påle vid kombination av lastserier med olika längd, (Benzaria et al, 2013b).

3.4. Möjliga lastfall

Mellan dessa ytterligheter kan de flesta dimensionerande lastfall beskrivas som en kombination av kortare eller längre lastserier med en viloperiod t_{vilo} emellan. I viloperioden kan en ökning av pålens bärförmåga ske, vilket påverkar efterföljande respons, (Benzaria et al, 2013b). Viloperiodens längd mellan lastcyklerna är av stor betydelse i både friktionsjord och lera, men denna är troligen av störst vikt vid stora laster där en stor del av pålens bärförmåga mobiliseras, (Axelsson & Baker, 2007, Karlsrud et al, 1986). Även för små lastcykler sker en ökning av bärförmågan, men denna är troligtvis inte lika beroende av någon mellanliggande viloperiod (Jardine & Standing, 2000).

På grundval av bedömda laster går det att sätta samman en serie av laster i olika kombinationer som utgör det dimensionerande lastfallet för t.ex. indata till numerisk analys, (Merritt et al, 2012). Detta lastfall jämförs med motsvarande dimensionerande bärförmåga. En sådan lastserie representerar pålens belastningshistorik över konstruktionens livslängd. Sättningen som sker från en sådan lastserie illustreras i Figur 3.2a och Figur 3.2b, där tre olika lastserier (CC1, CC2 och CC3) och resulterande sättning av pålen visas. Det är tydligt att en bedömning av maxlasten ger stor påverkan på pålens sättning över konstruktionens livslängd. För en sammanlagd analys av sättningen över konstruktionens livslängd kan detta sammanställas till kurvan som visas principiellt i Figur 3.3, där lastserie 1 ger en relativt stor sättning, följs av lastserie 2, som resulterar i betydligt mindre sättningar per cykel N och som följs av lastserie 3, där sättningen ökar ytterligare.

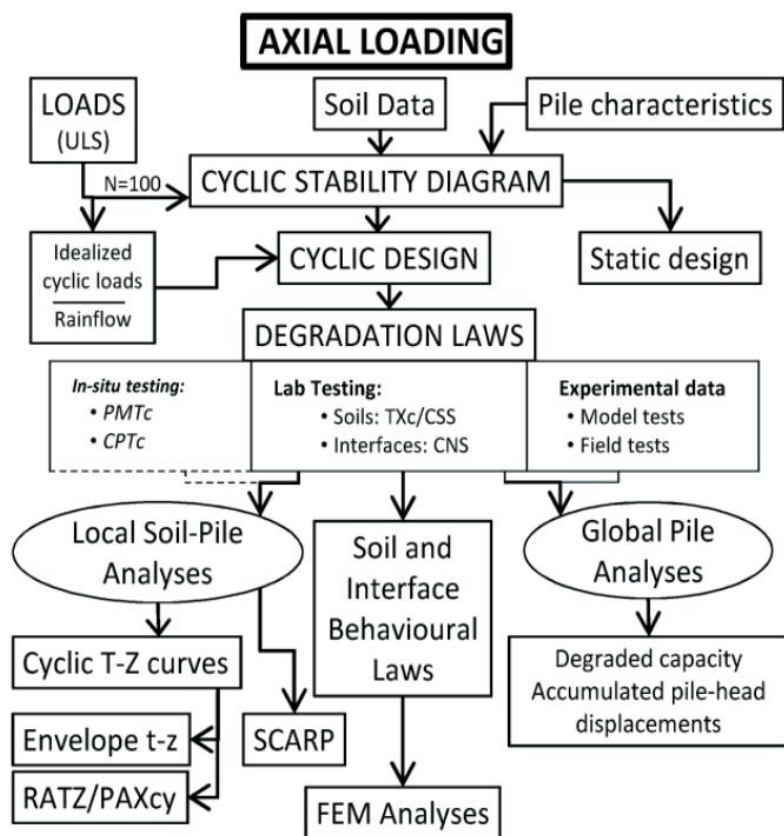


Figur 3.3. Principiell beskrivning av sättning av påle vid kombination av lastserier med viloperiod emellan.

3.5. Cyklisk belastning av pålar i befintliga normsystem

Cyklisk belastning av pålar har hittills inte behandlats i detalj i några normsystem, och nämns i enstaka vägledningar i olika länder, (API, 2011, Karlsrud, 2012). I dagsläget har tyska EA-Pfäle gett översiktliga riktlinjer för hur beräkning av cyklisk bärförmåga kan genomföras utgående från fältförsök, (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2014). Det påpekas dock att sådana empiriska metoder är osäkra och att det inte finns detaljerade beskrivningar av tillvägagångssätt för hur dimensionering med hänsyn till cyklisk belastning ska genomföras och hur partialkoefficienter ska sättas. Vid belastning av tryckta pålar i friktionsjord (med betydande spetsbärförmåga) nås dessutom oftast inte en tydlig brottgräns. Istället används schablonvärden, till exempel $D_{påle}/10$ i Eurokod 7. För höghastighetståg och dylika konstruktioner kommer sannolikt säkerställande av bruksgränstillstånd att styra dimensioneringen, varvid bedömning görs huruvida denna kan överskridas för kortvarig cyklisk last och långvarig cyklisk last. Det är således beställarens krav som styr dimensioneringen för dessa typer av konstruktioner än ett generellt brottkriterium (Puech, 2013).

För mer avancerade konstruktioner har ett tillvägagångssätt som utgörs av en serie allt mer detaljerande och noggranna program föreslagits för cykliskt belastade pålar, vilken visas i diagramform i Figur 3.4, från Andersen et al, 2012, och Puech, 2013. Möjliga beräkningsmetoder diskuteras i senare avsnitt. Dessa typer av analys kräver omfattande numerisk analys grundat på befintlig kunskap om jordlagerförhållanden samt pålegenskaper. För pålgrupper med varierande pållängder, vilket är typiskt för mellansvenska jordlager, är det troligen omständigt att använda denna typ av analys eftersom pålarna måste analyseras för varje längd och för varje jordlagerföljd, vilka ofta inte är kända initialt vid projekteringen. Dimensionerings- och beräkningsmetoder som används i länder med andra grundläggningsförhållanden måste alltså anpassas till typiska svenska jordlagerförhållanden för att ge korrekt bedömning av pålarnas cykliska bärförmåga.

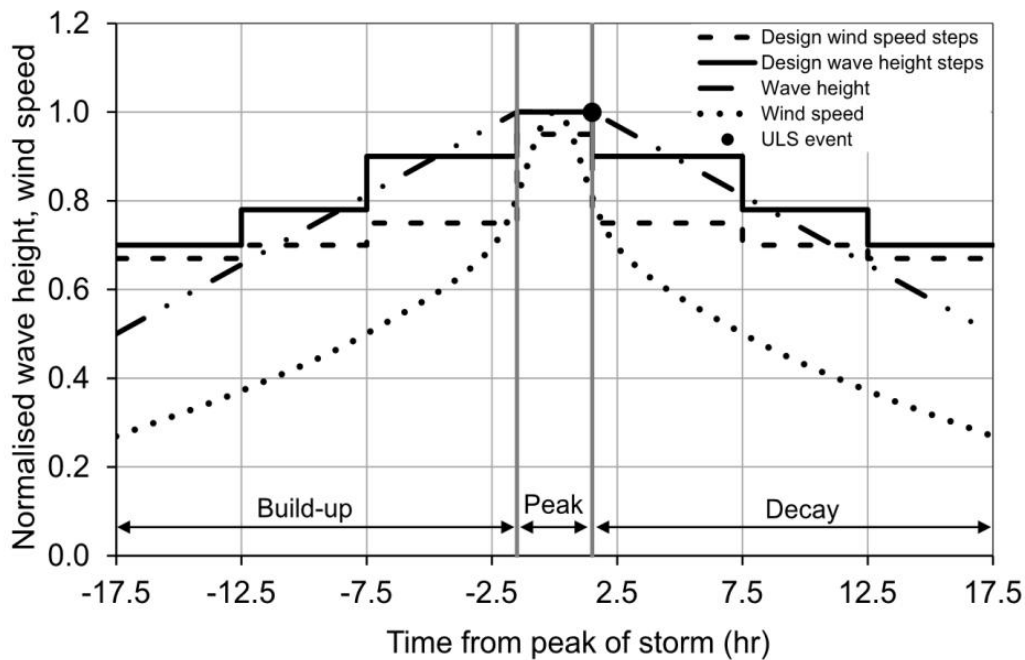


Figur 3.4. Beräkningsgång för dimensionering av cykliskt axialbelastade pålar, (Puech, 2013).

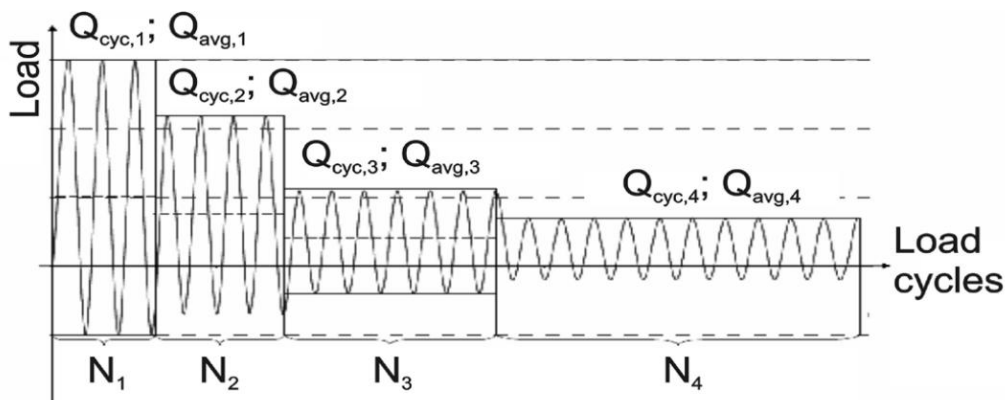
4. DEFINITION AV CYKLISK BELASTNING

4.1. Idealisering av cyklisk last

Cykliska laster utgörs av en lastserie av på- och avlastningar av pålen. Dessa kan ske med eller utan viloperioder däremellan. För offshore-konstruktioner innefattar dessa lastserier vanligtvis belastning från vågtoppar under stormar, (Karlsrud et al, 1986). Mätningar till havs har gett underlag till tidsserier av våghöjder, som förenklas till ett idealiserat specifikt lastfall. En sådan lastserie kan sedan delas in i homogena cykliska laster för att förenkla numerisk analys, (Jostad et al, 2014; Manzocchi, 2000). Figur 4.1 visar en antagen fördelning av våghöjd utgående från uppmätta värden för en storm. Våghöjden varierar i perioder med ökning vid stormens början, tills dess ett maximalt värde nås i mitten av stormen, varefter våghöjden minskar. För analys av pålens bärförmåga beräknas från denna idealisering en serie av homogena lastcykler, visade i Figur 4.2.



Figur 4.1. Idealisering av lasthistorik från storm i lastserier, (Merritt et al, 2012).



Figur 4.2. Idealisering av lastserier för numerisk analys, (Merritt et al, 2012).

4.2. Laster och bärförmåga i belastningscykler

Lastcykler från trafiklast antas ske regelbundet med relativt liten variation i medellast och cyklisk last (Schwarz, 2002). Detta gör att kännedomen om lasteffekten är betydligt bättre än vad som är fallet för offshore-konstruktioner, där senare mätningar har visat att lasterna har skilt sig från de antagna dimensioneringslasterna, (Jardine et al, 2012). I denna rapport förenklas oregelbundna cykliska laster till återkommande lastserier N_{serie} med frekvens f_{last} , medellast P_m och cyklisk last P_c . Dessa variabler används ofta för denna typ av analys eftersom det belyser hur stor del av den totala lasten som utgörs av variabel last, (Poulos, 1988). Mellan lastserier sker en viloperiod t_{vila} , vilken bör analyseras separat. För de trafiklasterna som är av intresse för konventionell infrastruktur torde detta ge en tillräcklig detaljnivå på den cykliska lasten.

4.2.1. Medellast och cyklisk last

Axiellt belastade pålar belastas av medellast P_m samt eventuellt en cyklisk last P_c , (Jardine et & Standing, 2000). Medellasten P_m bestäms enligt Figur 4.3 som

$$P_m = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (4.1)$$

Där P_{max} och P_{min} är den maximala och minimala lasten i en lastcykel. Medellasten kan också beskrivas av permanent last G och variabel last Q :

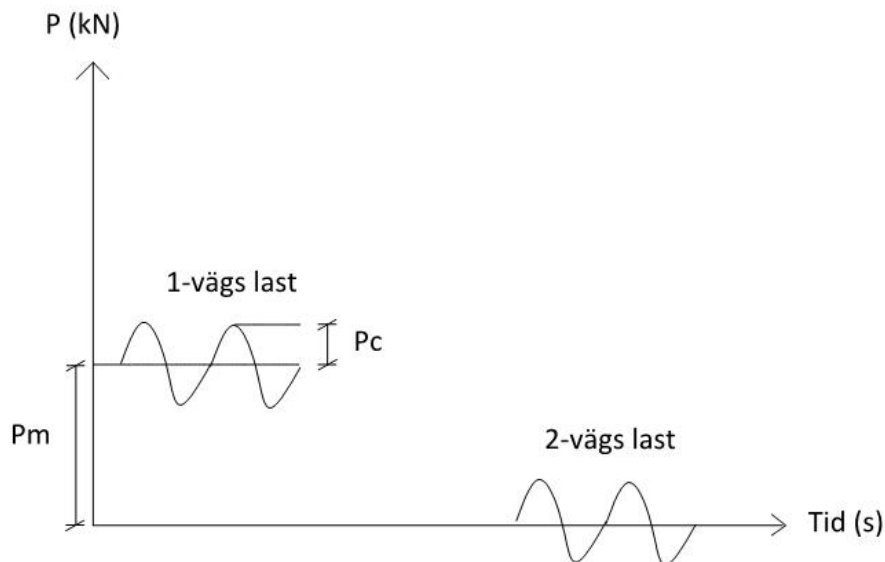
$$P_m = G + Q/2 \quad (4.2)$$

Den cykliska lasten P_c definieras som amplituden av lasten, d.v.s.

$$P_c = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (4.3)$$

Vilket kan beskrivas som en andel av den variabla lasten Q :

$$P_c = Q/2 \quad (4.4)$$



Figur 4.3. Bestämning av medellast samt cyklisk last.

4.2.2. Medelskjuvspänning och cyklisk skjuvspänning

Motsvarande komponenter av skjuvspänningen mellan jorden och manteln τ bestäms analogt med medellasten och den cykliska lasten. Den maximala skjuvspänningen τ_{max} i en lastcykel

motsvarar pålens cykliska mantelfriktion f_c . I en lastcykel kommer lasterna på påltoppen att ge lokala skjuvspänningar mot manteln längs pålens djup z som beror på pålens rörelse relativt jorden. Denna rörelse beror på belastning och pålens elastiska hoptryckning relativt jorden, (Tomlinson, 2001). Medelskjuvspänningen τ_m och den cykliska skjuvspänningen τ_c beskrivs analogt med medellasten och den cykliska lasten (Karlsrud, 2012):

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad (4.5)$$

$$\tau_c = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} \quad (4.6)$$

För analys av nedbrytning av den maximala mantelfriktionen vid manteln $f_{c,max}(N)$ med ökande antal cykler N längs pålens längd z används dessa uttryck.

4.2.3. 1-vägs och 2-vägs last

Den cykliska lastens påverkan på mantelfriktionen beror på förhållandet mellan medelskjuvspänningen och den cykliska skjuvspänningen. Om den cykliska skjuvspänningen är mindre än medelskjuvspänningen kommer pålens att belastas med 1-vägs last, dvs. skjuvspänningen byter inte riktning. I annat fall belastas pålen med 2-vägs last. För flexibla pålar kan manteln påverkas av både 1-vägs och 2-vägslaster på olika djup längs pålen, (Jardine & Standing, 2000, Karlsrud et al, 1990). Detta visas i Figur 4.3, samt Figur 4.4, där lastfördelningen i påle vid cyklisk belastning visas. I den övre delen av pålen ökar pålens last när avlastning sker, vilket innebär att påhängslast verkar på denna del av pålen. När pålen lastas på övergår denna negativa mantelfriktion till positiv mantelfriktion, dvs. 2-vägs lastcykler sker.

4.2.4. Cyklisk nedbrytning av mantel- och spetsbärförmåga

En pålens bärförmåga utgörs av mantelbärförmågan och spetsbärförmågan. Den vetenskapliga litteraturen behandlar huvudsakligen cyklisk nedbrytning av mantelbärförmågan. Undantaget är äldre laboratorieförsök av pålar i friktionsjord som visar på viss nedbrytning av mantelfriktionen, samt i viss mån spetsmotståndet, vilket diskuteras i Poulos, 1988. Senare laboratorieförsök innefattande ett relativt litet antal lastcykler tyder på att ingen nedbrytning av spetsbärförmågan sker, (Li et al, 2012). Litteraturen i övrigt behandlar cyklisk inverkan på mantelfriktionen. Av den anledningen behandlas i första hand nedbrytning av mantelbärförmåga i de följande avsnitten.

Spetsmotståndet i lera däremot är normalt försumbart jämfört med mantelmotståndet, dessutom kommer lerans hållfasthet försämrats på grund av omrörning och portrycksuppbyggnad om den utsätts för upprepade belastningar.

4.2.5. Statisk mantelbärförmåga

Pålens statiska mantelbärförmåga $R_{s,tot}$ utgörs av pålens mantelfriktion $f_s(z)$ summerad längs pålen:

$$R_{s,tot} = C \int f_s(z) dz \quad (4.7)$$

Där C är pålens omkrets och summationen görs över pålens längd z . Den cykliska bärförmågan kan analyseras relativt den statiska bärförmågan R_{tot} .

4.2.6. Cyklisk mantelbärförmåga

Cyklisk påverkan på pålens mantelfriktion kan uttryckas genom nedbrytningssfaktorn D_τ :

$$D_\tau(N) = \frac{f_c(N)}{f_s} \quad (4.8)$$

Där f_c är den cykliska mantelfriktionen (vilken beror på spänningskomponenterna τ_m, τ_c , och antalet lastcykler N) och f_s är pålens statiska mantelfriktion.

Den statiska mantelfriktionen för lera bestäms från lerans odränerade skjuvhållfasthet:

$$f_s = \alpha \cdot c_u \quad (4.9)$$

där α beror bl.a. på den odränerade skjuvhållfastheten och lastförhållanden, (Tomlinson, 2001), och för friktionsjord:

$$f_s = \tan \delta' \cdot \sigma_n' \quad (4.10)$$

där σ_n' är normal spänningen mot pålen och δ' är friktionsvinkeln mellan påle och jord, (Jardine & Standing, 2000).

Det är viktigt att notera att för lera kan hög belastningshastighet resultera i en högre odränerad skjuvhållfasthet, och därmed mantelfriktion, (Karlsrud et al, 1986, Larsson & Åhnberg, 2012, Poulos, 1988). För lera bör således mantelfriktionen efter antalcykler N jämföras med den maximala cykliska mantelfriktionen:

$$D_\tau(N) = \frac{f_c(N)}{f_{c,max}} \quad (4.11)$$

Efter cyklisk belastning av N lastcykler kommer degradationsfaktorn $D_\tau(N)$ göra att mantelfriktionen lokalt har minskat. Pålen får då en cyklisk bärförmåga:

$$R_{tot,c}(N) = C \int D_\tau(z, N) \cdot f_{c,max}(z) dz \quad (4.12)$$

Detta illustreras i Figur 4.4 (från Puech & Jezequel, 1980), som visar lastfördelningen längs en påle utsatt för cyklisk last. Vid cyklisk belastning minskar mantelfriktionen i övre delen av pålen, vilket gör att lastfördelningen går neråt. Pålen deformeras sålunda elastiskt och sättningen ökar. Degradationsfaktorn beror på flera faktorer. Detta beskrivs i detalj i avsnitt 5.

$$D_\tau = f(\tau_m, \tau_c, N, \dots) \quad (4.13)$$

4.2.7. Ackumulerad sättning

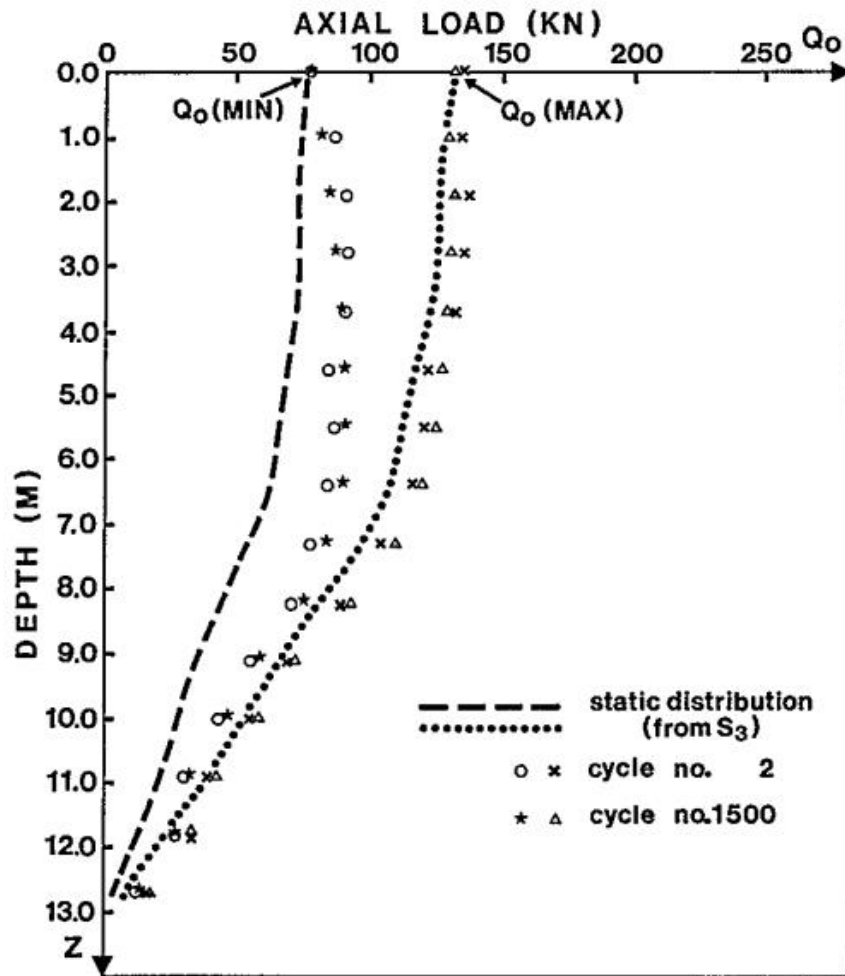
Nedbrytning av mantelfriktionen resulterar även i ökad förskjutning av jorden vid manteln, och därmed sättning. Totalsättningen beror på lastförhållanden samt antalet cykler:

$$s = f(N_{tot}, P_m, P_c) \quad (4.14)$$

Lokalt längs pålen fås en förskjutning Δs :

$$\Delta s = f(N_{tot}, \tau_m, \tau_c)$$

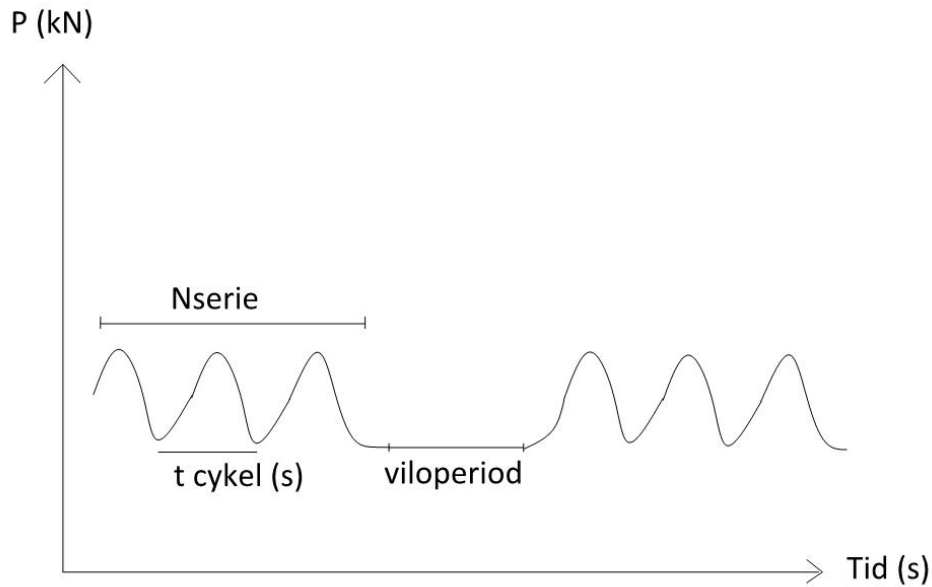
Det är viktigt att notera att 2-vägs cykler av manteln förekommer även när lasterna på pålen P_m och P_c leder till 1-vägsbelastning av påltoppen. I sådana fall där övre delen av pålen är utsatt för negativ mantelfriktion kommer 2-vägs cykler att ske över denna del av pålen, vilket visas i fältförsök i lera och friktionsjord i (Puech & Jezequel, 1980), samt fältförsök och simuleringar av cyklisk belastning i lera, (Karlsrud et al, 1990). Figur 4.4 visar att vid avlastning av pålen återgår den övre delen av pålen till negativ mantelfriktion, även när en relativt stor utmattning av mantelfriktionen har skett, (Jardine et al, 2012).



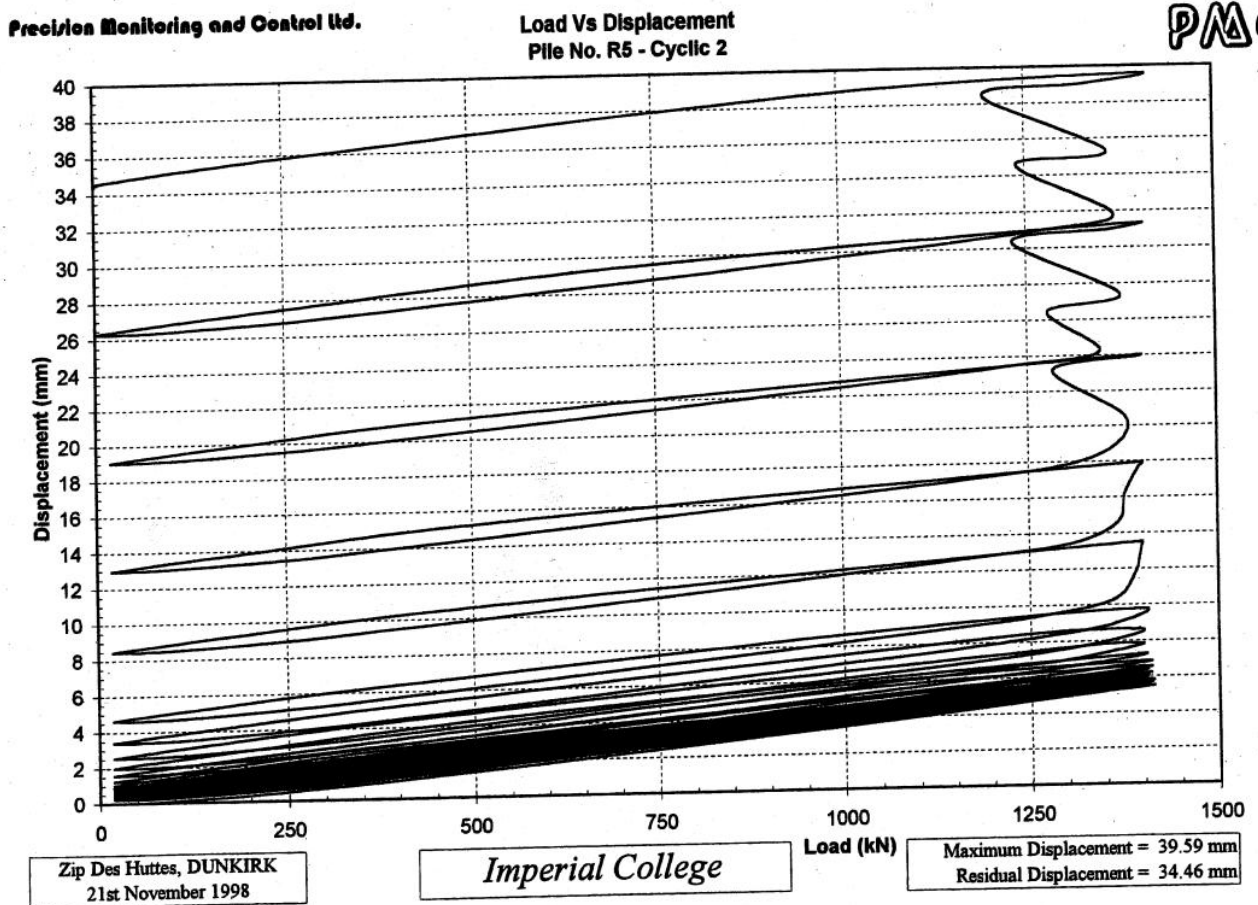
Figur 4.4. Fördelning av maximal och minimal lastfördelning vid ökande antal lastcykler, (Jardine et al, 2012).

4.2.8. Viloperiod mellan lastserier

Den cykliska lasten återkommer i lastserier. För varje lastserie sker ett antal lastcykler, N_{serie} , enligt Figur 4.5. Mellan lastserierna råder en viloperiod i vilken mantelfriktionen kan öka (Axelsson & Baker, 2007, Jardine & Standing, 2000). För friktionsjord sker en ökning av tillväxten enligt de principer beskrivna i Axelsson & Baker, 2007. För leror sker konsolidering av portryck runt pålen, vilket minskar vattenkvoten hos jorden och ökar den odränerade skjuvhållfastheten, (Karlsrud et al, 1990).



Figur 4.5. Bestämning av längd på lastserie, tid för cykel, samt viloperiod.



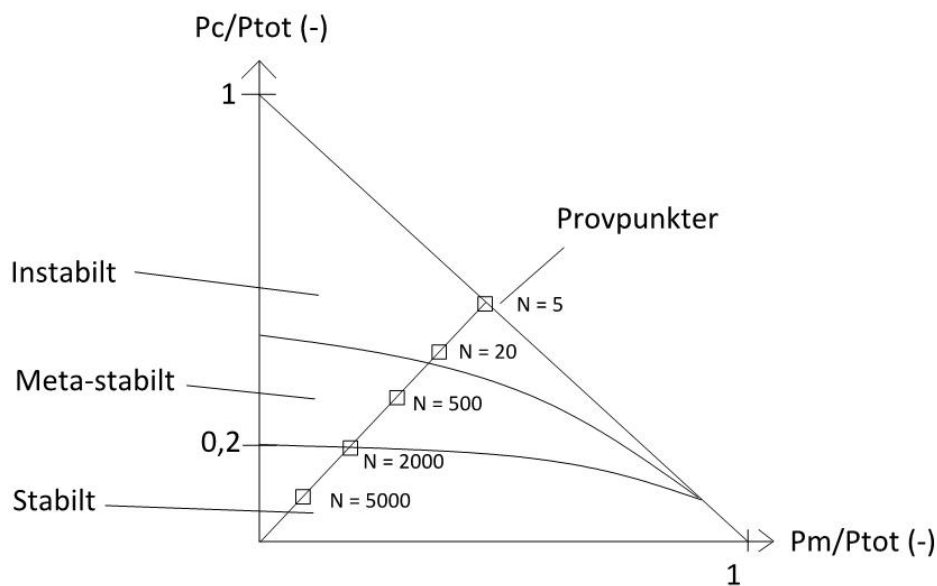
Figur 4.6. Cyklisk provbelastning, (Jardine & Standing, 2000).

4.2.9. Cykliska stabilitetsdiagram

Från utförda fältförsök (e.g. Jardine & Standing, 2000, Karlsrud, 1990, Puech, 2013), är det möjligt att sammanställa ett diagram som visar vid vilka laster P_m, P_c och lastcyklar N som cykliskt brott sker (definierat som en specificerad sättning av påltoppen). Ett försök som ligger till grund för ett sådant diagram visas i Figur 4.7 från Jardine & Standing, 2000. Från ett sådant försök bestäms det antalet cykler där brott av pålen sker. Detta antal sätts sedan in i ett diagram där antalet lastcyklar beskrivs. Detta beskrivs principiellt i Figur 4.7, där 1-vägs cykler med full avlastning sker mellan lastcykler

Utifrån ett sådant cykliskt stabilitetsdiagram går det att urskilja olika delområden som beskriver pålens beteende, (Poulos, 1988). Lasten på pålen är antingen belägen i ett område som är instabilt, meta-stabilt eller stabilt. I det instabila området kan brott ske inom ett fåtal antal lastcykler. Inom det meta-stabila området sker brott vid ett större antal lastcykler, (>100 lastcykler), och i det stabila området sker brott efter ett stort antal lastcykler eller inte alls. Detta är till stor hjälp i dimensionering av en påle eftersom flera olika lastfall kan beaktas separat. Vid beräkning av bärförmåga för enstaka höga laster, t.ex. för olyckslastsfall, kan lasteffekten tillåtas att vara belägen i det meta-stabila området, vilket gör att pålens bärförmåga inte styrs helt av cyklisk nedbrytning vid dessa stora laster.

Observera att ett sådant stabilitetsdiagram endast är representativt för den specifika pålen i jorden där försöken utförts. Förändrade pållängder och jordegenskaper resulterar i andra cykliska stabilitetsdiagram, då en annan relativ rörelse sker längs pålen, (Randolph, 2013).



Figur 4.7. Principiellt tillvägagångssätt för bestämning av cykliskt stabilitetsdiagram med pålastning och avlastning i 1-vägs cykler.

5. FÄLT- OCH LABORATORIEFÖRSÖK

5.1. Omfattning på fält- och laboratorieförsök för cyklisk belastade pålar

Fältförsök på cyklisk belastade pålar under kontrollerade former med modifierade apparaturer för statisk provbelastning resulterar i förhållandevis stora insatser, både mätt i tid och i kostnad, (Goulois, 1982). På grund av de höga kostnaderna förknippande med dessa fältförsök har relativt få sådana genomförts. Här ges en genomgång över några av dessa, uppdelade i försök genomförda i lera respektive friktionsjord.

5.2. Cykliskt belastade pålar i lera

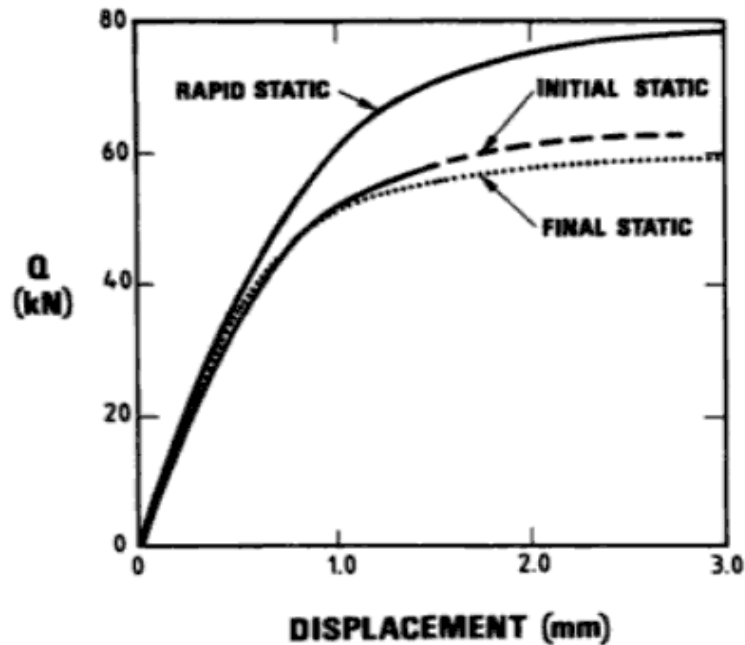
Genomförda fält- och laboratorieförsök i lera sammanfattas i Tabell 5.1. Lerorna där fältförsöken genomförts är i de flesta fall annorlunda jämfört med svenska leror, med betydligt lägre naturlig vattenkvot och där flera leror är kraftigt överkonsoliderade. Faktorer som styr påverkan av cyklisk belastning på pålar i lera innefattar belastningshastighet, belastningens andel av bärförmågan och ackumulerad sättning.

Tabell 5.1. Rapporter som redovisas försök av cyklisk belastning på pålar i lera.

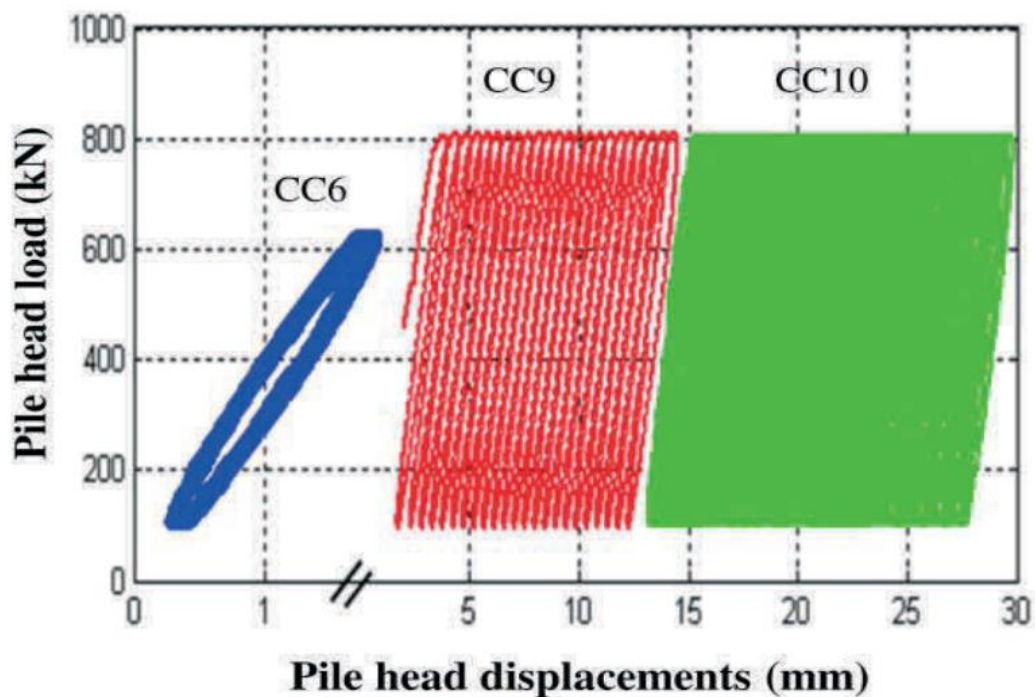
Dokumentation	Fält/laboratorieförsök
Karlsrud et al, 1986	Fält
McManus & Kulhawy, 1994	Fält
Baumbach., 2012	Fält
Benzaria et al, 2013a	Fält
Puech & Jezequel, 1980	Fält
Bea, 1992	Fält
Poulos, 1988	Laboratorium

5.2.1. Belastningshastighet

Belastningshastigheten har stor påverkan på bärförmågan för pålar i lera, (Poulos, 1989). Detta gör det omständigt att jämföra långsamma statisk belastade pålar och pålar belastade under kortare tidsperioder (t.ex. dynamisk provbelastning). Orsaken är den stora ökningen av lerans odränerade skjuvhållfasthet som sker vid snabb belastning, (Larsson & Åhnberg, 2012). Vid dynamisk provbelastning och utvärdering genom CAPWAP-analys ansätts en dämpningsfaktor för gränssnittet påle-jorden för att kompensera för dessa dynamiska effekter. Påverkan från belastningshastigheten visas vid provbelastningar som sker under hög hastighet jämfört med motsvarande provbelastning under längre tidsperiod, t.ex. i Figur 5.1 från Karlsrud et al, 1990. I dessa försök genomfördes statisk provbelastning före cyklisk provbelastning, utfört genom snabb och långsam belastningshastighet. Vid snabb pålastningshastighet har pålen en bärförmåga som är upp till 20-25 % högre än för motsvarande påle vid långsam belastning. Liknande värden för odränerad skjuvhållfasthet uppnås i triaxialförsök, (Larsson & Åhnberg, 2012).



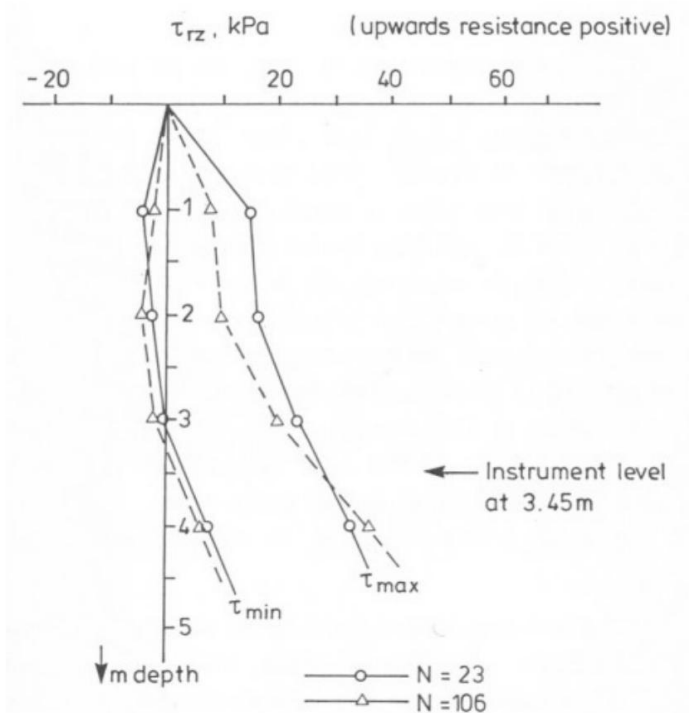
Figur 5.1. Deformation beroende på belastningshastighet i lera, från Karlsrud et al, 1986
 Fältförsök har visat att detta gäller även för cykliskt belastade pålar. Figur 5.2 från Benzaria et al, 2013a visar last-rörelse samband för en cykliskt belastad påle i överkonsoliderad lera. Lastserierna CC9 och CC10 har samma kombination av medellast P_m och cyklisk last P_m . Skillnaden är att lastserie CC9 har betydligt långsammare lastfrekvens f_{last} (0,1 Hz jämfört med 0,5 Hz). Detta resulterar i betydligt större ackumulerad sättning av pålen vid samma last. Belastningshastigheten kommer således att få stor inverkan på både bärförmåga och ackumulerad sättning för cykliskt belastade pålar.



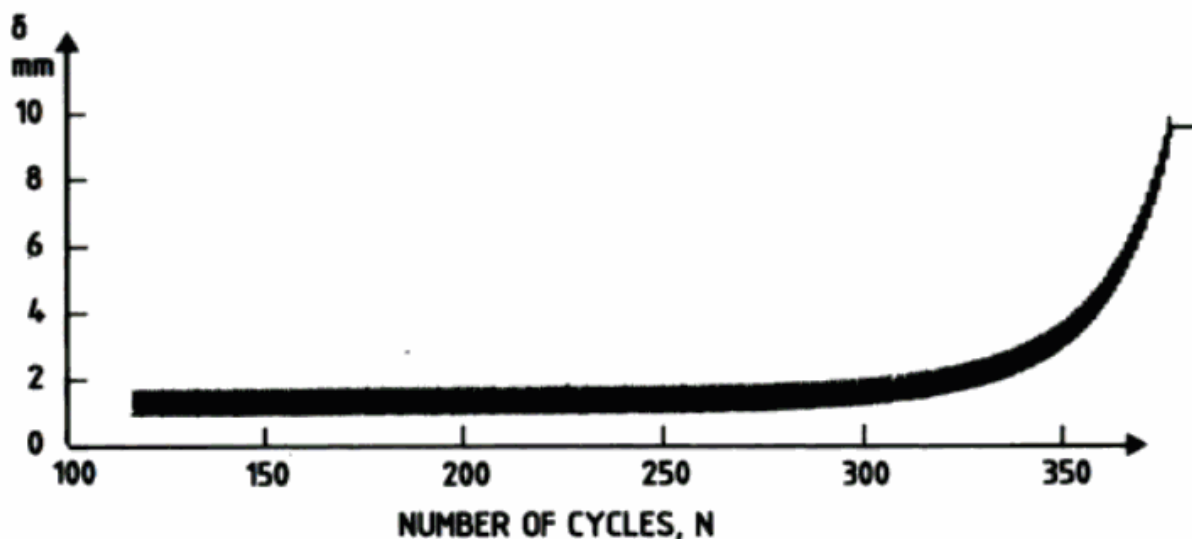
Figur 5.2. Sättning av påltopp beroende på töjningshastighet i lera, från Benzaria et al, 2013a.

5.2.2. Brottgränstillstånd för cyklisk belastning av pålar i lera

Vid cyklisk belastning av pålar i lera sker en gradvis utmattning av mantelfriktionen, vilket resulterar i att lasten förs ner längs pålen mot djupare jordlager. Detta visas i Figur 5.3, från Karlsrud & Haugen, 1983. Jordens odränerade skjuvhållfasthet kommer då gradvis att mobiliseras och minska vid ytterligare cyklisk belastning. Eftersom den odränerade skjuvhållfastheten vanligtvis ökar med djupet kommer pålen då att visa ökad sättning av påltopp, då relativ rörelse mellan jorden och manteln måste ske för att mantelfriktionen ska mobiliseras.



Figur 5.3. Lastfördelning efter cyklisk belastning av påle, (Karlsrud & Haugen, 1983).



Figur 5.4. Påldeformation vid 1-vägsbelastning (Karlsrud et al, 1986).

Den ökade sättning kommer att resultera i att brottgränstillståndet för pålen uppnås. Detta kan antingen ske succesivt, men kan också ske relativt plötsligt. Detta visas i Figur 5.4 från Karlsrud et al, 1986, där den cykliska belastningen plötsligt ger stor sättning efter ca 300 lastcykler,

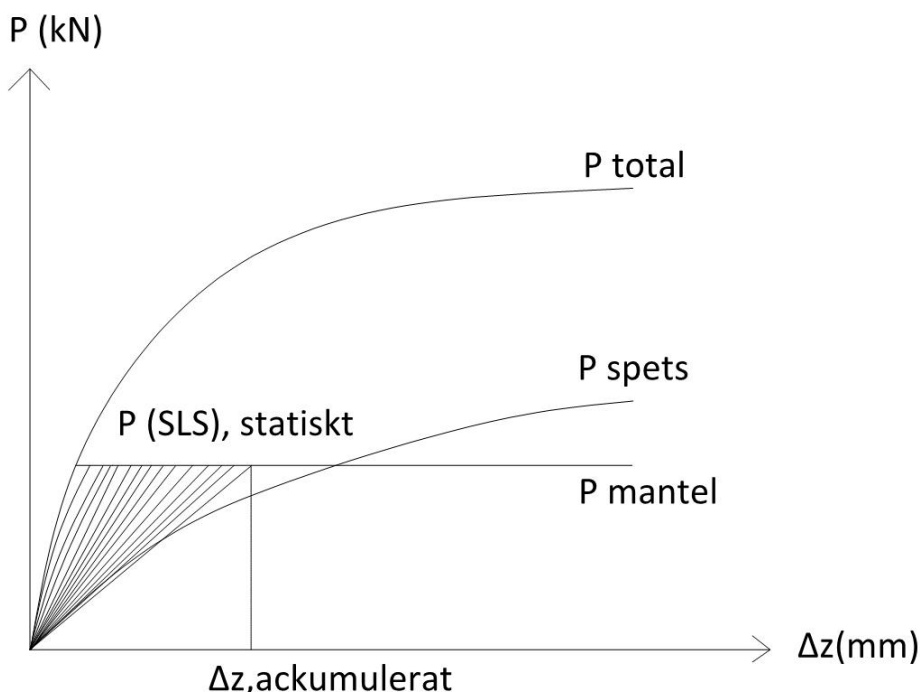
då pålen går till brott. Innan dess är pålen relativt stabil, med sättning av påltopp som är ca 2 mm efter 300 cyklar, vilket motsvarar endast ca 7 μm per lastcykel.

5.2.3. Ackumulerad sättning

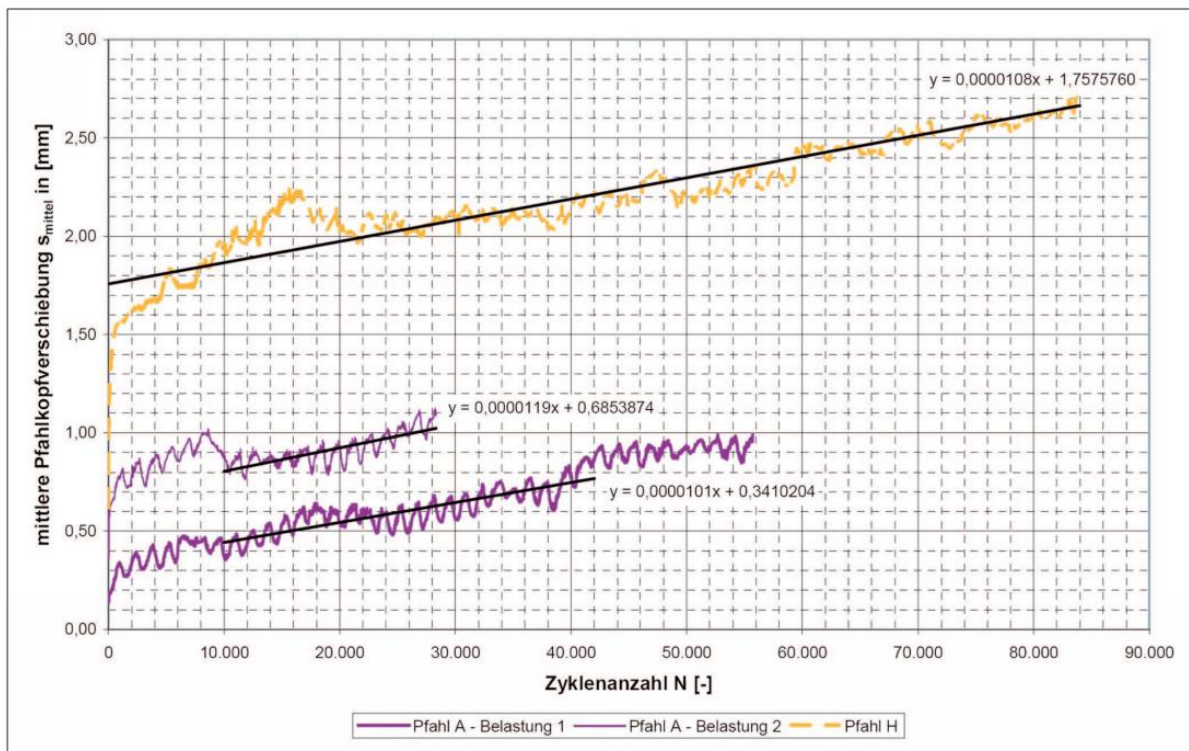
Ackumulerad sättning berör främst bruksgränstillståndet, då sättningstakten i detta fall är så långsamt att det dröjer lång tid innan brottgränstillståndet nås. Även låga nivåer av cyklisk last kan resultera i ackumulerad sättning då mantelfriktionen längs pålen bryts ner, och en större del av lasten förs ner mot pålspetsen. Figur 5.3. visar detta för en cyklisk belastad påle i lera vid olika antal lastcykler, då en ökning av den mobiliserade mantelfriktionen vid pålspetsen sker när pålen rör sig neråt i jorden, vilket sker samtidigt som mantelfriktionen i den övre delen av pålen bryts ner. Detta visas principiellt i Figur 5.5, där en laströrelsekurva för en delvis spetsbärande påle visas, där pålen i varje lastcykel belastad med brukslasten $P(\text{SLS})$. Vid statisk belastning förs huvuddelen av lasten ner längs manteln, vilket leder till små sättningar, men med det ökade antal lastcykler under cyklisk belastning bryts mantelfriktionen ner. Detta leder till att lastandelen som bärs av pålspetsen ökar, samtidigt som ackumulerad sättning sker. Pålen når alltså sitt bruksgränstillstånd långt innan den totala bärförmågan är mobiliserad.

Det är inte klarlagt hur ackumulerad sättning påverkar pålar vid långvarig kontinuerlig cyklisk belastning (många cykler utan mellanliggande viloperiod). Som Figur 1.2 visar är erfarenheterna kring sådana lastfall relativt begränsad. Dock har omfattande mängder cykliska lastserier ($> 90\text{k}$ lastcykler) utförts i fältförsök, och redovisats bl.a. i Baumbach, 2012. Figur 5.6. visar hur pålens sättning ökar med antalet lastcykler, vid olika andelar cyklisk last. Dessa fältförsök tyder på att den ackumulerade sättning ökar linjärt med antalet lastcykler.

Vid långvarig cyklisk belastning sker portrycksökning i lera, vilket följs av konsolidering under pågående belastning, (Karlsrud et al, 1990). Detta gör att bärförmågan vid efterföljande statisk belastning ökar, men ger troligtvis även ackumulerad sättning.



Figur 5.5. Princip för ackumulerad sättning sker p.g.a. nedbrytning av mantelfriktion vid låga lastnivåer.



Figur 5.6. Sättning vid stora antal lastcykler för pålar i lera, (Baumbach, 2012).

5.3. Cyklisk belastning av pålar i friktionsjord

Cyklisk belastning av pålar i friktionsjord vid normala lastfrekvenser bör resultera i övervägande dränerade förhållanden. Mätningar av portryck vid cyklisk belastning har visat att portrycksökningarna är relativt små (<10 kPa), (Jardine & Standing, 2000). Belastningshastigheten torde därför inte ha stor påverkan på pålarna. Däremot kan bärförmågan öka betydligt efter tidigare belastning, (Benzaria et al, 2013b). De mest intressanta faktorerna vid cyklisk belastning av pålar i friktionsjord är således brottgränstillstånd och ackumulerad sättning, samt påverkan av tidigare lastcykler. Fält- och laboriemätningar av pålar under axiell cyklisk belastning innefattar försök redovisade i Tabell 5.2.

Tabell 5.2. Rapporter som redovisar försök på cyklisk belastning av pålar i friktionsjord.

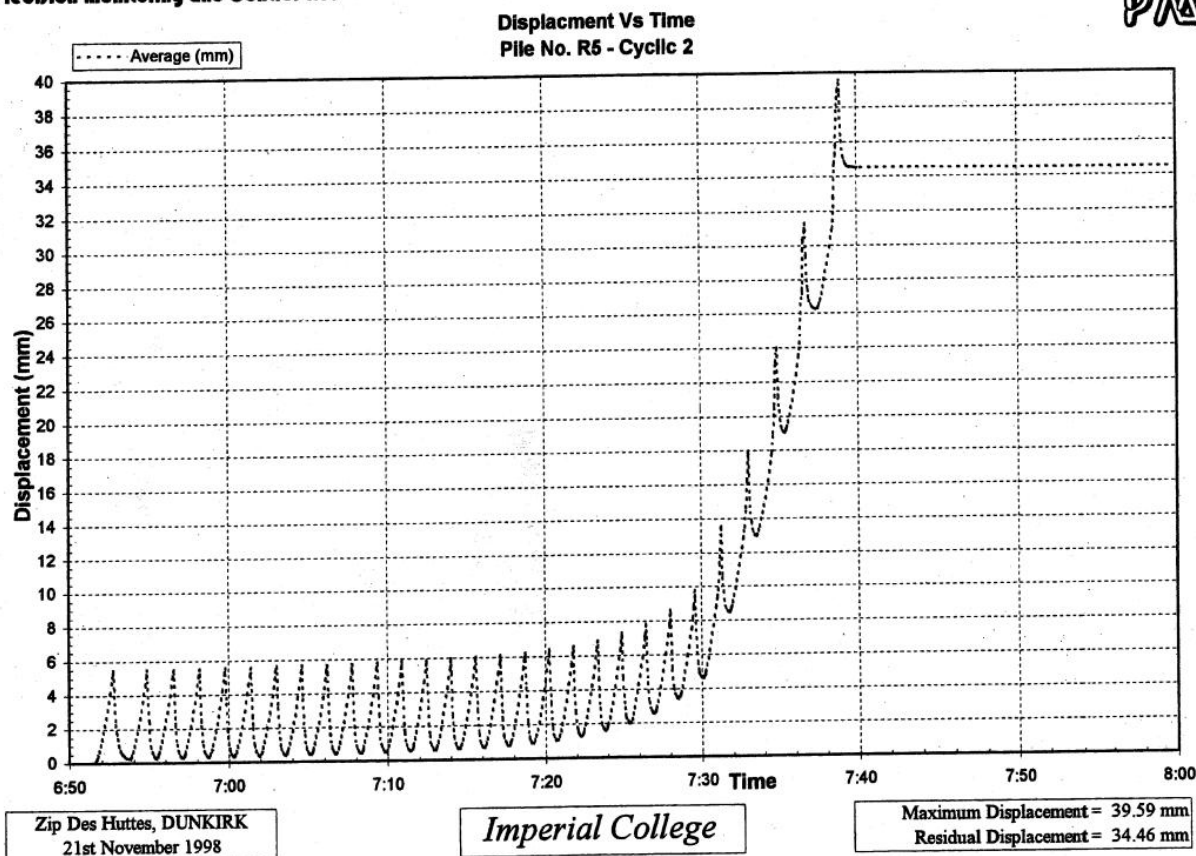
Dokumentation	Fält/laborieförsök
Benzaria et al, 2013b	Fält
Jardine & Standing, 2000	Fält
Jardine et al, 2012	Laboratorium
Hussein et al, 1988	Fält
Poulos, 1988	Laboratorium
Puech & Jezequel, 1980	Fält

5.3.1. Brottgränstillstånd för cyklisk belastning i friktionsjord

Vid cyklisk belastning av pålar i friktionsjord i Jardine & Standing, 2000, utfördes mätningar av sättning vid olika kvoter av uppmätt bärförmåga. Figur 5.7 visar brott av påle i friktionsjord efter ett fåtal antal cykler vid belastning med 1-vägsstyckler, där figuren visar pålens förskjutning under fältförsöket. Efter ett dussin cykler sker plötsligt större och större sättningar, och pålen går till brott.

Precision Monitoring and Control Ltd.

PMC



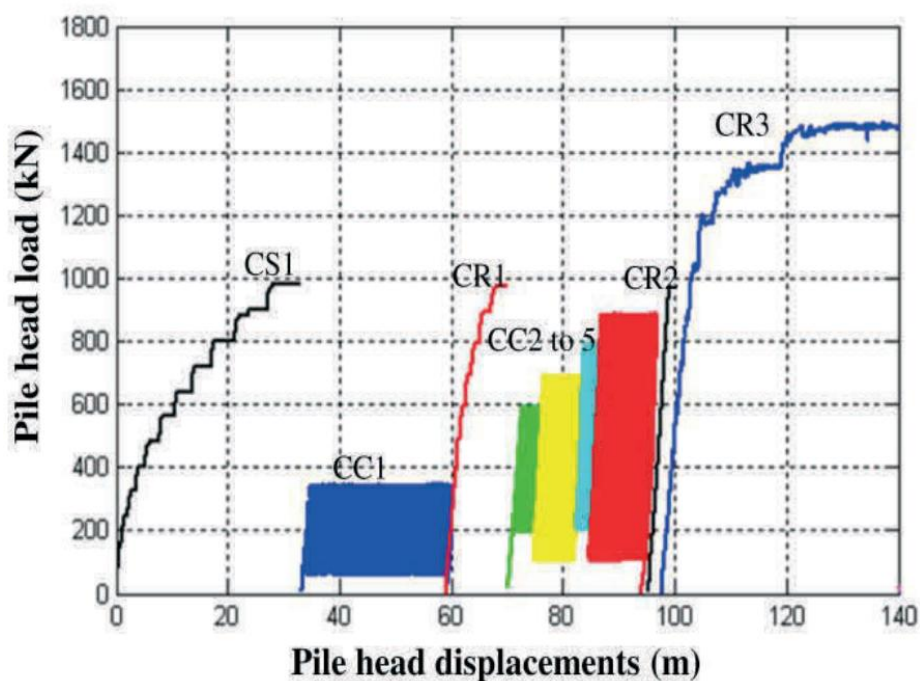
Figur 5.7. Brott i cykliskt belastad påle i friktionsjord, (Jardine & Standing, 2000).

5.3.2. Påverkan av tidigare cyklisk belastning på statisk bärförmåga

Figur 5.8 visar en lastkombination av statiska och cykliska laster vid cyklisk belastning vid ett fältförsök av en borrad påle i friktionsjord, (Benzaria et al, 2013b). Figuren visar last- och rörelse av påltopp. Lastkombinationer för fält visas i Tabell 3. Det är tydligt att den tidigare cykliska lasten resulterar i en ökning av den statiska bärförmågan. Detta gäller för en gräv- påle, men en viss påverkan på bärförmågan bör även ske för slagna pålar. Vid en efterföljande stor statisk last eller ett fåtal cykliska laster, är det alltså troligt att bärförmågan höjs något.

5.3.3. Ackumulerad sättning i friktionsjord

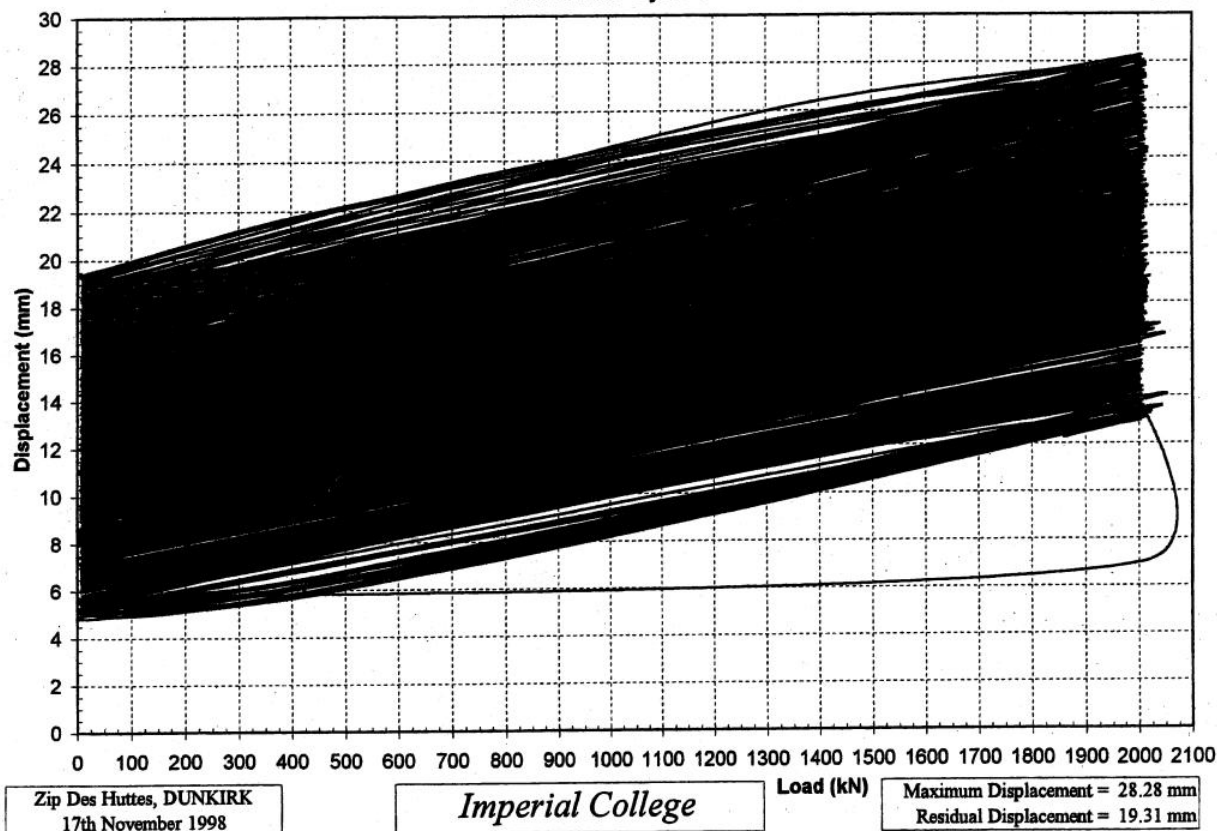
Vid axiell cyklisk belastning i friktionsjord kan ackumulerad sättning ske efter ett större antal sättningar. Figur 5.9 visar hur sättningar sker i lastcykler med relativt jämn sättning per cykel, från Jardine & Standing, 2000. Ackumulerad sättning i silt vid fullskaleförsök visas i Figur 5.10, från Chen et al, 2013, där en påles sättning visas relativt cyklisk last som en andel av den statiska bärförmåga, här benämnt CLR (Cyclic Load Ratio).



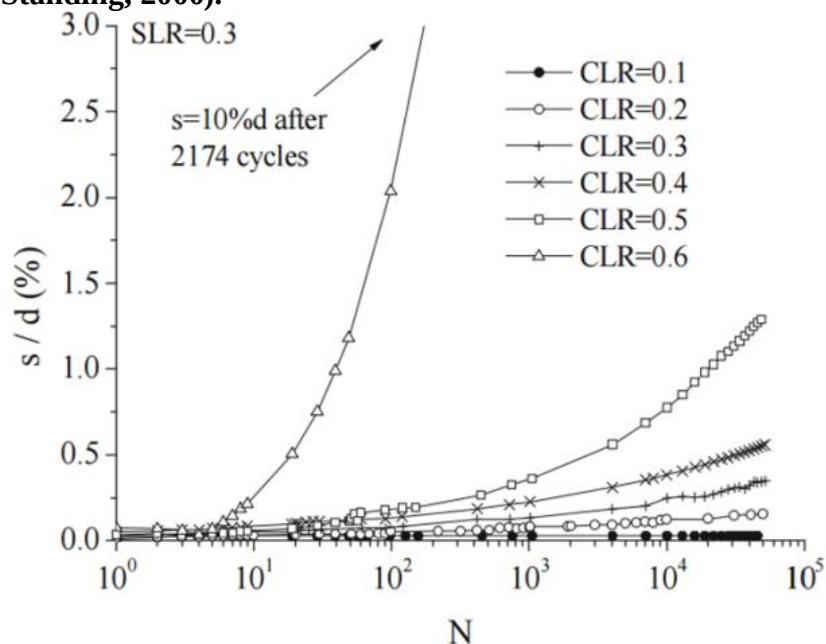
Figur 5.8. Last-förskjutning av påltopp vid statisk belastning, från Benzaria et al, 2013b

Pile F4	Type	Date	f (Hz)	Q_m / Q_{uc}	Q_c / Q_{uc}	N
Installation		25/11/11				
CS1	S	01/03/12				
CC1	C	02/03/12	0.5	0.18	0.13	1819
CR1	R	02/03/12				
CC2	C	02/03/12	0.5	0.36	0.18	200
CC3	C	02/03/12	0.5	0.36	0.27	200
CC4	C	02/03/12	0.5	0.47	0.25	100
CC5	C	02/03/12	0.5	0.45	0.36	200
CR2	R	02/03/12				
CR3	R	27/03/12				

Tabell 5.3. Lastkombinationer för fältförsök visade i Figur 5.8.



Figur 5.9. Ackumulerad sättning av cykliskt belastad påle i friktionsjord, (Jardine & Standing, 2000).



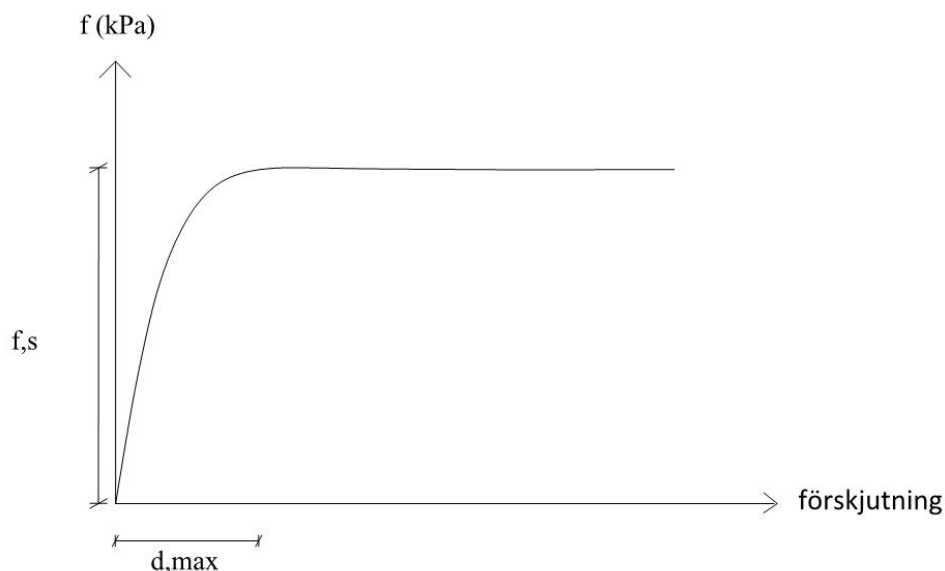
Figur 5.10. Sättning vid stora antal lastcykler för pålar i silt, (Chen, 2013).

6. MEKANISMER SOM STYR NEDBRYTNING AV BÄRFÖRMÅGA SAMT ACKUMULERING AV SÄTTNINGAR

6.1. Mantelmotstånd och spetsmotstånd

En Påles bärförmåga hänförs till både mantelmotstånd och spetsmotstånd. Laboratorieförsök på cyklisk belastade pålar i friktionsjord har visat att den cykliska lastens påverkan på spetsbärförmågan är relativt liten, (Li et al, 2012). Dessa laboratorieförsök innefattar ett relativt litet antal cykler, och det är således oklart om resultaten är generella, t.ex. diskuteras möjlig nedbrytning av spetsmotståndet vid cyklisk belastning i Poulos, 1988. Trots detta kommer diskussionen i det följande huvudsakligen inriktas på pålens mantelbärförmåga, eftersom den vetenskapliga litteraturen är helt inriktad på detta område. Att den vetenskapliga litteraturen om cykliskt belastade pålar är begränsad till mantelfriktionen beror på att de långa offshorepålar som varit aktuella vid cyklisk belastning oftast är huvudsakligen mantelburna, (Tomlinson, 2001). Som Figur 2.2 visar kommer mantelfriktionen längs pålen att dominera pålens laströrelse samband vid belastningar som är avsevärt mindre än brottlasten, vilket gör denna begränsning försvarbar (Axelsson & Baker, 2007).

Bestämning av cyklisk bärförmåga för specifika pålar visas oftast i de redan diskuterade cykliska stabilitetsdiagrammen. Dessa diagram överensstämmer för en specifik påle med bestämd längd. För pålar av varierande längd kommer den relativa rörelsen mellan pålen och jord att ha stor påverkan, och dessa diagram måste alltså modifieras, (Randolph, 2013). Detta gäller speciellt för typiska mellansvenska förhållanden, där variation i nivå till fast botten kommer att ge väldigt olika långa pålar i en pålgrupp.

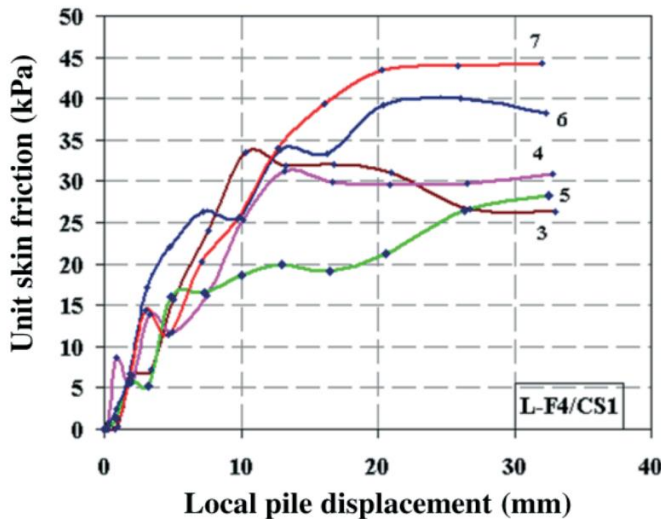


Figur 6.1. Idealiserad mobilisering av mantelfriktion.

6.2. Mobilisering av mantelmotstånd vid statisk belastning

Mantelmotståndet verkar över pålens mantel vid djupet z med en mantelfriktion $f(d)$, vars magnitud beror på den lokala förskjutningen av pålen $d(z)$. Vid statisk belastning når mantelfriktionen $f(d)$ ett maxvärde $f_s(z)$ vid förskjutningen $d_{max}(z)$, enligt Figur 6.1. Förskjutningen

vid maximal mantelfriktion $d_{max}(z)$, beror på jordtyp och påldiameter, (Randolph, 2013). Den maximala mantelfriktionen vid djupet z , $f(z)$, beror på jordtyp. För leror styrs den maximala mantelfriktionen av jordens odränerade skjuvhållfasthet $c_u(z)$, och i friktionsjord styrs den maximala mantelfriktionen av kontakttrycket $\sigma'_n(z)$ mot pålen, (Poulos, 1988). Kontakttrycket i friktionsjord styrs av spänningsfördelningen som följer av installation av pålen, (Axelsson & Baker, 2007). Figur 6.2 visar mobilisering av mantelmotstånd vid statisk belastning av en 420 mm grävpåle i friktionsjord vid olika nivåer längs pålen, där nivå 3 befinner sig närmast pål-toppen och 7 är placerad närmast pålspetsen. Förskjutnings-spänningssambandet stämmer relativt väl överens med den idealiserade kurvan visad i Figur 2.2.



Figur 6.2. Mätning i fält av mantelfriktion på olika djup i friktionsjord vid statisk belastning, från Benzaria et al, 2013b.

6.3. Mantelutmattning

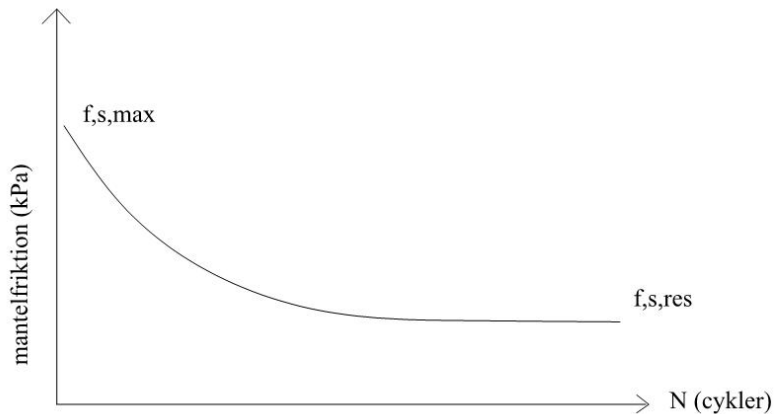
Vid cyklisk belastning sker en utmattning av mantelmotståndet gradvis med ökat antal lastcykler, (Poulos, 1988). Mantelutmattningen gör att mantelfriktionen reduceras då antalet lastcykler ökar. Graden av nedbrytning beror på typen av jord, men även mobiliseringslängden i varje cykel. Laboratorieförsök (Poulos, 1988), visade att nedbrytningen ökar med ökade förskjutning relativt den statiska max-förskjutningen vid ett visst antal cykler N . Vid ett visst antal cykler N nås ett residualvärde $f_{s,res}$ på mantelfriktionen. Sambandet mellan förskjutning av manteln d , antalet lastcykler N , och mantelutmattningen D_τ kan alltså uttryckas som:

$$D_\tau = f\left(\frac{d_{mob}}{d_{max}}, N, f_{last}\right)$$

Detta innebär att en större förskjutning d leder till större nedbrytning D_τ av mantelfriktionen. När lastfördelningen i en påle förskjuts neråt sker alltså en ökad mantelutmattning vid pålens övre delar. Nedbrytningen av mothållande skjuvspänning i ett skjuvförsök med antalet cykler N vid konstant förskjutning d visas principiellt i Figur 6.3, där ett residualvärde för skjuvspänningen $f_{s,res}$ uppnås efter N cykler. Det bör noteras att mantelns förskjutning längs pålen $d(z)$ är styrd av pålastningen. Detta innebär att vid cyklisk belastning trycks pålen ihop elastiskt när mantelfriktionen minskar, vilket ytterligare ökar nedbrytningen. Förhållande mellan antalet cykler och förskjutning blir i ett sådant fall:

$$d(z) = f(N, P_m, P_c)$$

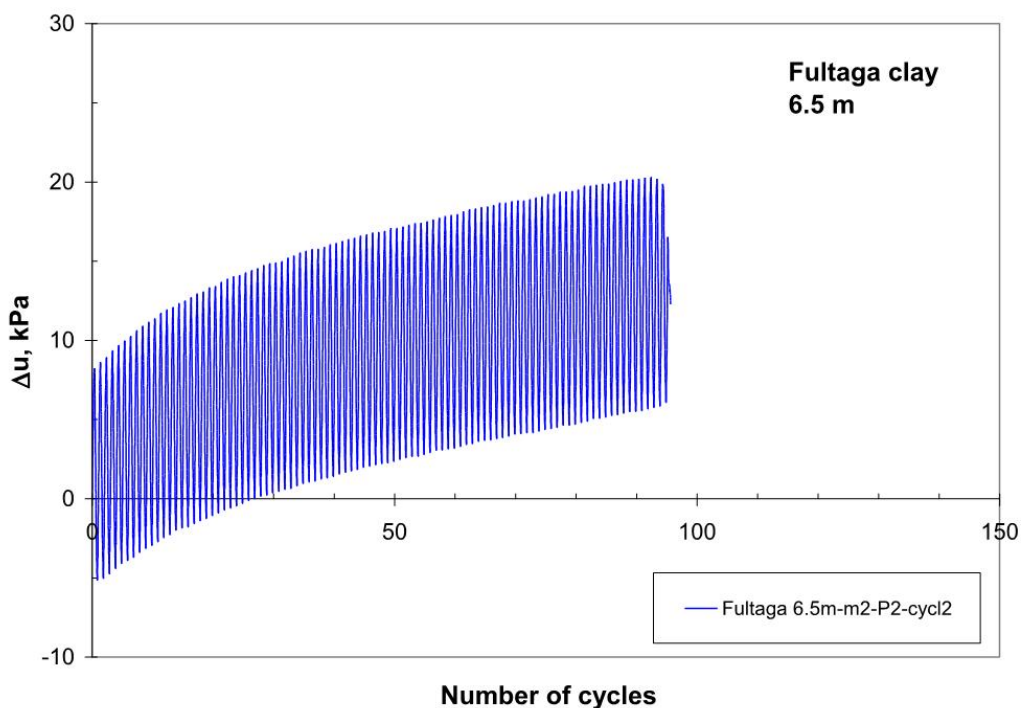
Den stora nedbrytningen av mantelfriktionen som vi kommer att diskutera i det följande avsnittet beror således på en succesiv ökning av förskjutningen $d(z)$ på grund av en minskning av mantelfriktionen D_{τ} . Denna ökning av förskjutningen av manteln $d(z)$ leder därefter till en ytterligare minskning av mantelfriktionen D_{τ} . Beroende på jordförhållandena och lasten P_m och P_c kan en sådan cyklisk belastning ge brott efter N cykler.



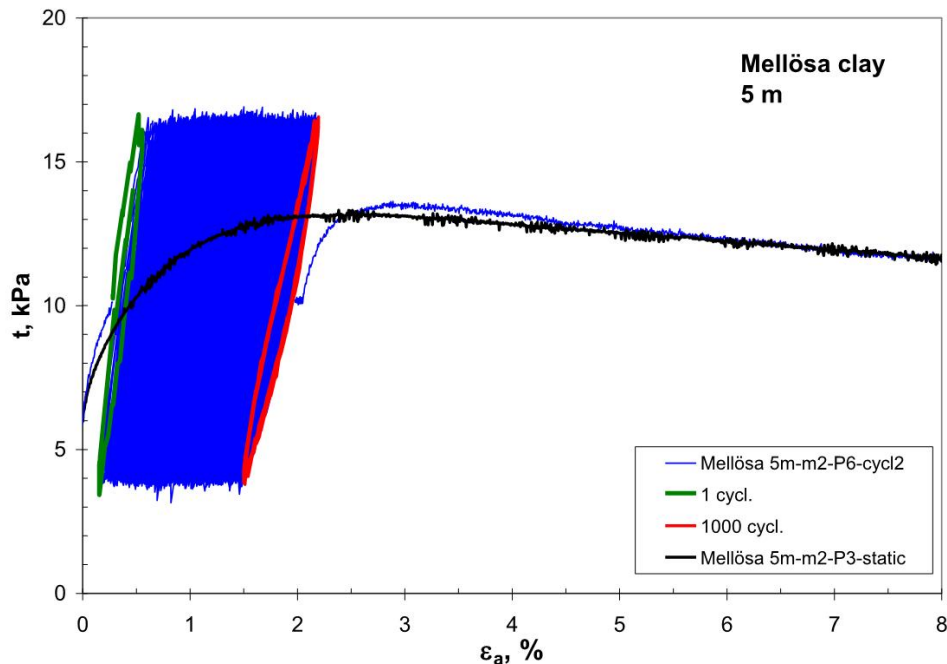
Figur 6.3. Cyklisk nedbrytning av mantelfriktion $f_c(z)$ vid konstant förskjutning d .

6.4. Cyklisk skjuvning av lera

För lera är den cykliska maximala mantelfriktionen $f_{c,amx}$ större än den statiska maximala mantelfriktionen f_s , vid snabb belastningshastighet, (Karlsrud et al, 1986). Vid cyklisk belastning sker en ökning av portrycket samtidigt som lerans tidigare struktur bryts ner, (Karlsrud et al, 1986). I varje lastcykel sker en ökning och minskning av portrycket beroende på lasten, vilket resulterar i ett ökat medelportryck i varje cykel. Detta visas i Figur 6.4 vid cykliska triaxialförsök på lera. Är den cykliska belastning tillräckligt stor sker brott efter N lastcykler, vilket visas i Figur 6.5.

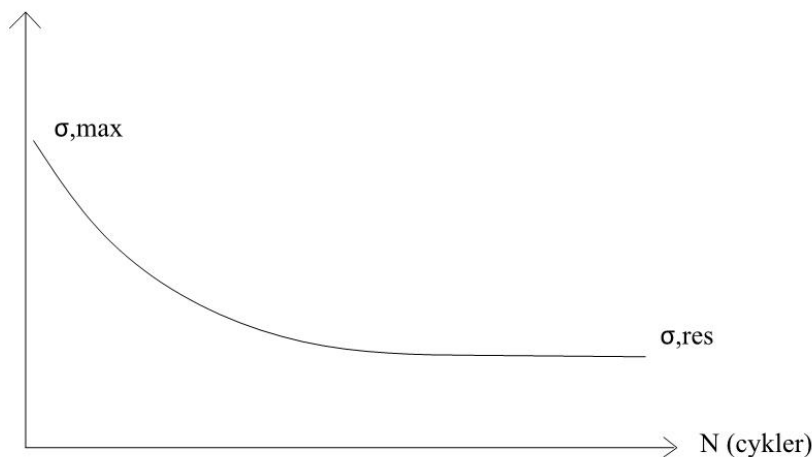


Figur 6.5. Portrycksförändring vid cyklisk belastning av lera i triaxial-försök, (Larsson & Åhnberg, 2012).



Figur 6.5. Cykliska triaxial-försök utfört på lera, (Larsson & Åhnberg, 2012). Notera att den cykliska maximala mantelfriktionen $f_{c,max}$ överstiger den statiska mantelfriktionen f_s .

Kontakttryck mot påle (kPa)



Figur 6.6. Minskning av normalspänning vid cyklisk belastning av friktionsjord.

6.5. Cyklisk skjuvning av friktionsjord

Vid cyklisk belastning med relativt låga lastfrekvenser av pålar i friktionsjord med relativt hög permeabilitet råder huvudsakligen dränerade förhållanden med små ökningar av porvattryck, (Jardine & Standing, 2000). Detta gör att den cykliska maximala bärförmågan inte blir större än den statiska bärförmågan, (Poulos, 1988). Om mycket snabb belastning råder och permeabiliteten är relativt låg kan dock odränerad belastning ske. Vid tillräcklig mobilisering av mantelfriktionen når jorden brottskjuvspänning τ enligt Mohr-Coulombs brottvillkor:

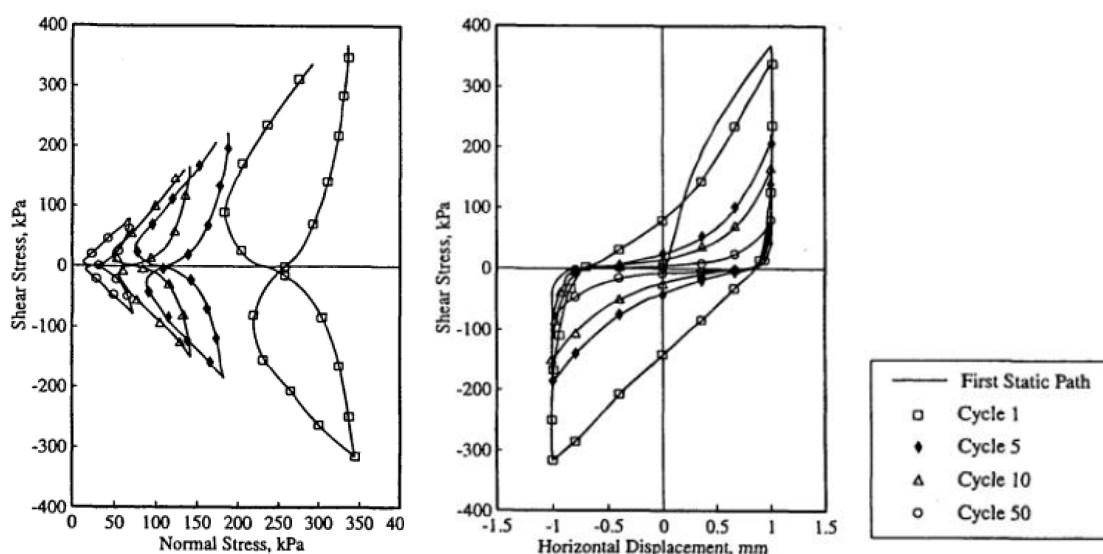
$$\tau = \tan \delta \cdot \sigma'_n$$

Där $\tan \delta$ är friktionsvinkel mellan manteln och jorden, och σ'_n är normalspänningen mellan manteln och jorden. Vid ett ökande antal cykler sker en minskning av normalspänningen σ'_n , enligt Figur 6.6.

Efter ett visst antal cykler är således den cykliska mantelfriktionen f_c betydligt mindre än den statiska mantelfriktionen f_s . Denna nedbrytning av normalspänningen visas vid skjuvning av manteln mot friktionsjord som modelleras i cykliska skjuvförsök, t.ex. CNS-försök (Constant Normal Stiffness). Figur 6.7 visar resultat av ett CNS-skjuvförsök på friktionsjord från Tabucanon et al, 1995. Dessa figurer visar att normalspänningen mot manteln succesivt minskar, vilket ger en lägre mantelfriktion med ökat antal lastcykler, eftersom mantelfriktionen är beroende av normalspänningen. Vid varje lastcykel kommer alltså mindre mantelfriktion att mobiliseras. Detta kan beskrivas med ett empiriskt samband från (Jardine & Standing, 2000):

$$\frac{\sigma'_{n,cy}}{\sigma'_{n,s}} = A \cdot \left(\frac{t_{cy}}{f_s} + B \right) \cdot N^C$$

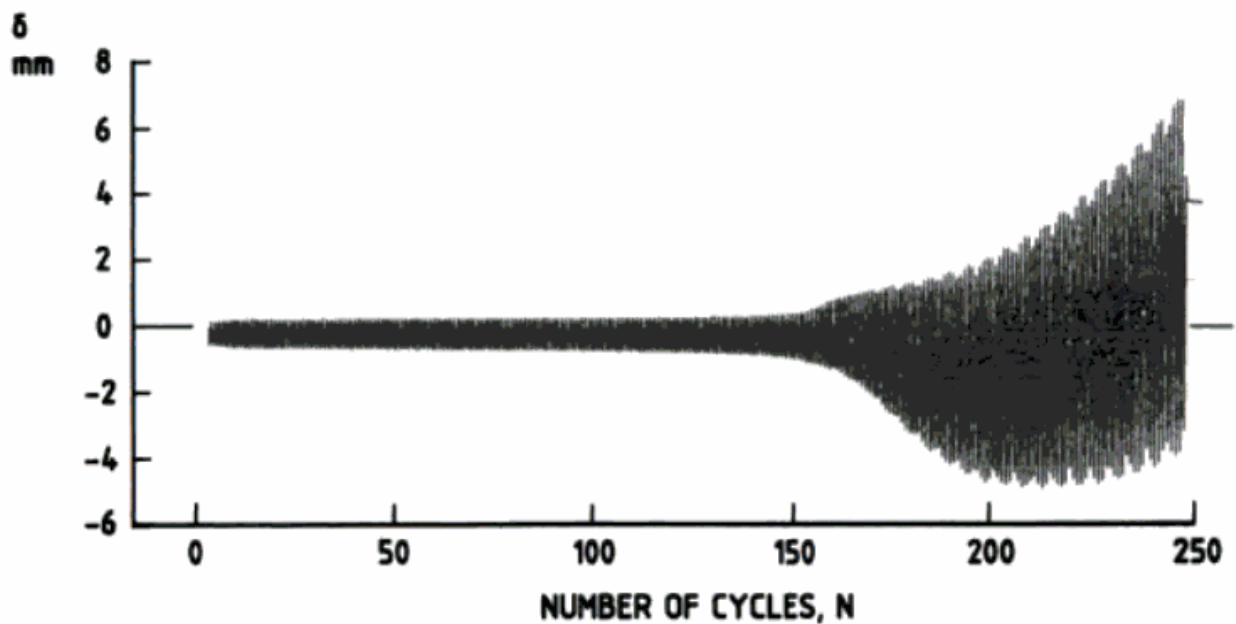
Där $\sigma'_{n,cy}$ är normalspänningen efter N cykler, $\sigma'_{n,s}$ är normalspänningen vid statisk belastning, och där A , B och C är empiriska konstanter beroende på jordens egenskaper. Dessa uttryck måste kalibreras med fält- eller laborieförsök, och är således relativt omständiga att använda, men torde gå att använda vid normal friktionsjord, som motsvarar egenskaperna i de cykliska skjuvförsöken.



Figur 6.7. Cykliska skjuvförsök i CNS-apparat på friktionsjord (Tabucanon et al, 1995)

6.6. Belastningstyp

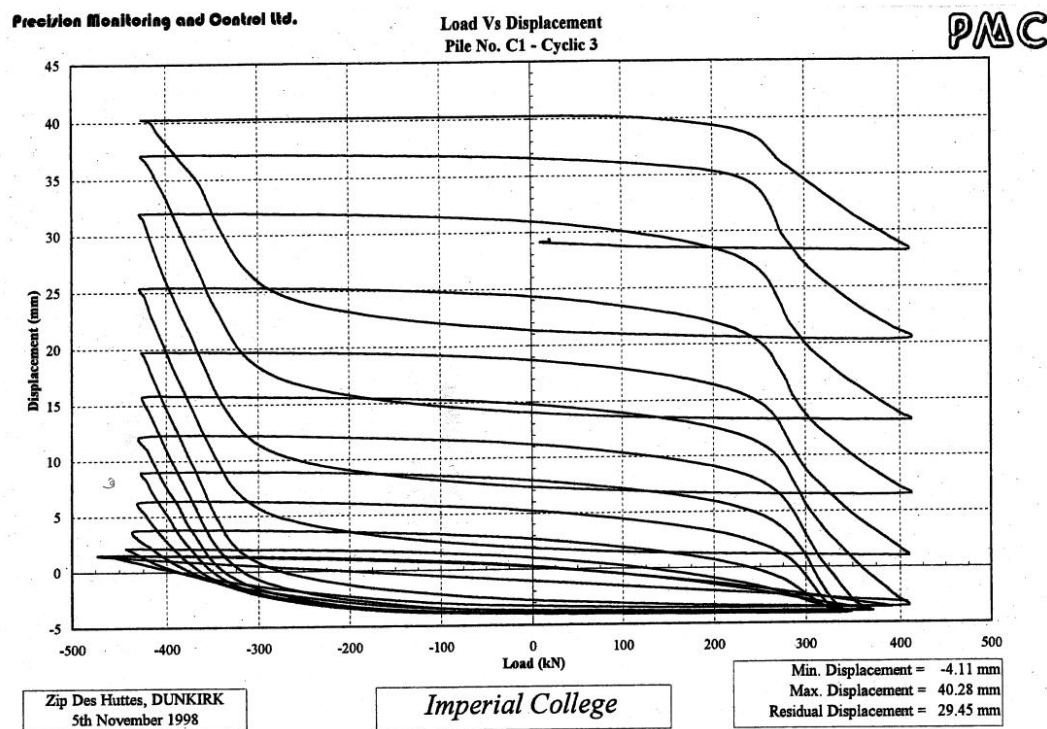
Fält- och laborieförsök har visat på skillnaden i pålens styvhet och nedbrytning av mantelfriktion mellan 1-vägs och 2-vägs belastning, (Briaud & Felio, 1986). Last-rörelse samband vid 1-vägs cykler har tidigare visats, och ett exempel på 2-vägs cykler visas i Figur 6.8. Det är tydligt att styvheten minskar betydligt med ökad cyklisk belastning i 2-vägs cykler, medan förändringen är liten för 1-vägs cykler. Vid 1-vägs belastning sker brott främst genom att den ackumulerade sättningen ökar, (Karlsrud et al, 1986), och pålen går till brott liknande statiskt provbelastning, där den genomsnittliga sättningen ökar till bruks- eller brottkriteriet nås. Detta beror på att pålen hela tiden belastas i tryck eller drag, vilket innebär att jordens struktur inte förändras när jorden avlastas,



Figur 6.8. Påldeformation vid 2-vägsbelastning i lera, (Karlsrud et al, 1986).

Vid 2-vägs belastning kan en ökning av pålens rörelse i båda riktningarna ske. Pålens styvhet och bärförmåga minskar därmed, och pålen blir mer och mer instabil och uppvisar stora rörelser vid ytterligare last, vilket visas i Figur 6.8 för lera och i Figur 6.9 för friktionsjord.

Det är inte klarlagt hur mycket av pålens styvhet återfås efter en viloperiod t_{vila} , men eftersom liknade deformationer sker under installation av pålen är det sannolikt att om pålen får genomgå en viloperiod kommer bärförmågan och även styvhet att växa till igen, (Axelsson & Baker, 2007).

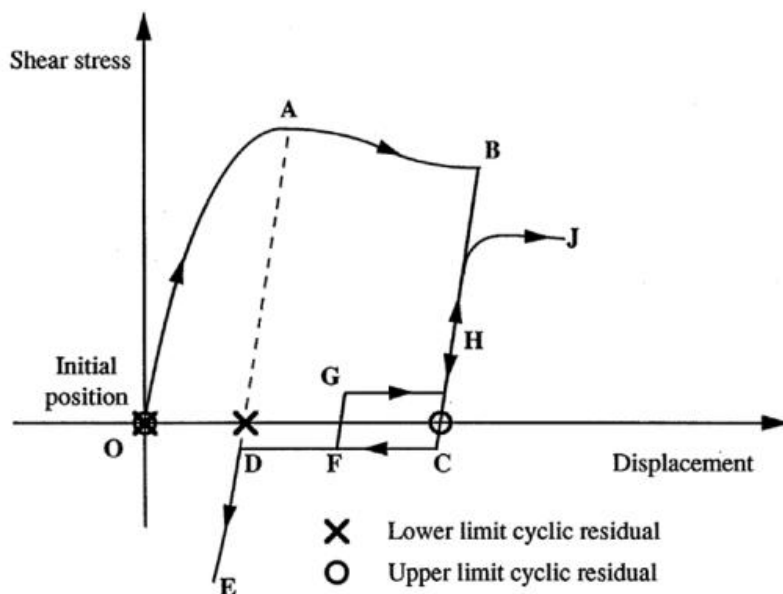


Figur 6.9. Last-rörelse samband vid 2-vägsbelastning i friktionsjord, (Jardine & Standing, 2000).

7. BERÄKNINGSMETODER

Det är i dagsläget komplicerat att beräkna last-rörelse samband för axiellt cykliskt belastade pålar, p.g.a. det stora antalet cykler i lastserier, samt svårigheten i att formulera nedbrytnings-samband från laboratorieförsök, (Jostad et al, 2014). Förenklade metoder används således. Exempel på överslagsberäkningar ges bl.a. i EA-Pfäle, (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2014). Dessa är översiktliga, grundas på cykliska stabilitetsdiagram och syftar till att säkerställa att den belastade pålen inte får för stor ackumulerad sättning vid olika mängder cykler N_{tot} . Rekommendationerna grundas på försök genomförda i fält och laboratorium på mantelburna pålar, (Baumbach, 2012, Jardine & Standing, 2000, Schwarz, 2002).

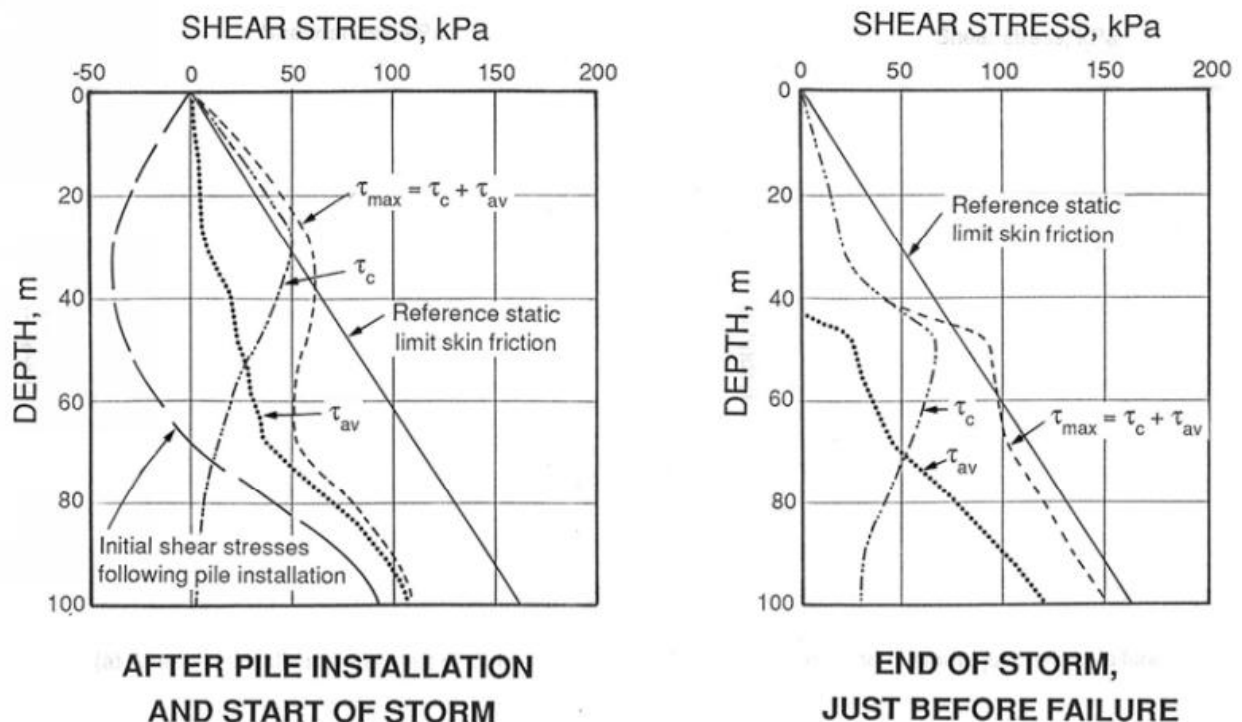
Vid projektering måste dock bedömning av påverkan av cyklisk last genom översiktlig beräkning genomföras, speciellt för bedömning av möjlig cyklisk lastpåverkan då pål- och jordtyper som inte tidigare analyserats används. Den mest använda metoden för numerisk analys av axiellt belastade pålar är så kallade "t-z" balk-fjäder modeller, (Erbrich et al, 2010), visad i Figur 1. Dessa motsvarar de "p-y" balk-fjäder modeller som används för analys av plan knäckning av pålar för beräkning av strukturell bärförmåga. I sådana modeller modelleras jordens vid pålens mantel av elasto-plastiska fjädrar, som motsvarar last-rörelse sambandet upp till brott, (Bredenberg & Hintze, 1990).



Figur 7.1. Fjädermodell för cyklisk belastning, (Erbrich et al, 2010).

Sådana balk-fjäder-modeller har även anpassats till cyklisk belastning, (Erbrich, 2010, Karlsrud et al, 1990, Manzoochi, 2000). Jord på olika djup simuleras i modellen med fjädrar, och materialegenskaperna för dessa fjädrar kan hämtas från cykliska skjuvförsök, (Erbrich et al, 2010). I sådana fjädrar bestäms nedbrytningen av jordens mantelmotstånd med antalet cykler och mobiliserat mantelmotstånd ($\tau(z)/\tau_{max}(z)$). Ett exempel på cyklisk fjäder visas i Figur 7.1. Beräkningsar med dessa modeller kan ge en bra beskrivning av lastfördelningen i pålen, pålens förskjutning, och mobilisering av mantelfriktion längs pålen, vilket visas i Figur 7.2, från Karlsrud et al, 1990. I denna figur visas fördelning av mobiliserad mantelfriktion längs en påle innan cyklisk belastning och efter cyklisk belastning.

Alternativt kan finita-element (FEM) program användas för modellering and cykliska beteendet. Modeller för cyklisk belastning av jord innefattar UDCAM och PDCAM som är utvecklat av NGI, (Jostad et al, 2014). Dessa modeller har använts för simulering av cyklisk belastning av pålar i lera och sand. Användningsområdet är främst horisontell cyklisk belastning av pålar, eftersom samverkan mellan jorden och pålens mantel vid pålens yta är svår att modellera, (Jardine et al, 2012). För horisontell cyklisk belastning är det främst jorden inom ett större avstånd från pålen som belastas, och skjuvningen mellan påle och jord har mindre påverkan på pålens respons vid ren axiell cyklisk belastning. Modeller som simulerar axiell belastning av pålar i finita element måste således ha mycket avancerade formuleringar av jordmodeller vid cyklisk belastning, (Erbrich et al, 2010). För praktisk dimensionering är dessa beräkningar troligtvis för komplicerade.



Figur 7.2. Beräkning av mobiliserad mantelfriktion vid cyklisk belastning i lera, (Karlsson et al, 1986).

8. CYKLISK PROVBELASTNING.

8.1. Konventionell provbelastning

Cyklisk provbelastning har huvudsakligen genomförts med hjälp av olika typer av speciellt anpassade provuppställningar för statisk provbelastning, (Jardine & Standing, 2000, Karlsrud et al, 1986, McAnoy et al, 1982). Sådana uppställningar är kostsamma och tidskrävande. Exempel på hur en sådan provbelastning kan utformas visas i Figur 8.1. I allmänhet krävs motvikt med tyngder eller dragpålar, vilket gör att metoden även kräver en stor yta.



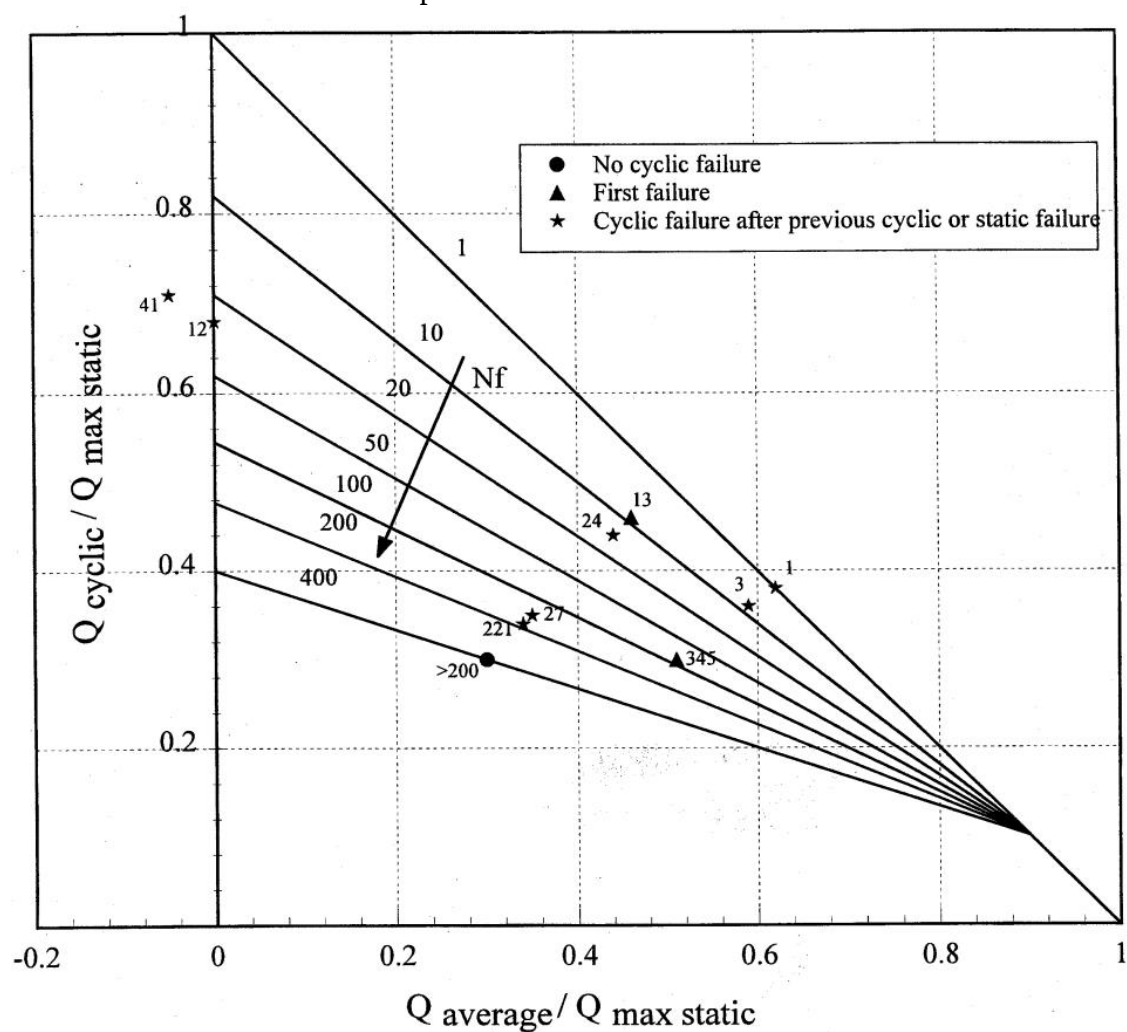
Figur 8.1. Fältuppställning av mätning av cyklisk bärförmåga genom konventionell provbelastning, (Puech, 2013).

Fördelen är med cyklisk provbelastning är att man erhåller en tydlig beskrivning av det cykliska last-rörelsesambandet, (Goulois, 1982). Detta kan sedan redovisas som ett cykliskt stabilitetsdiagram, visat i Figur 8.2, från (Jardine & Standing, 2000). Fältmätningar redovisade i denna litteraturstudie kommer från sådana fältförsök.

8.2. Dynamisk provbelastning

I Sverige är statisk provbelastning av pålar relativt ovanligt, istället används huvudsakligen dynamisk provbelastning med stötvågsmätning och efterföljande analys av de signalbehandlade mätningarna. Dynamisk provbelastning har inte tidigare använts för bestämning av pålars cykliska bärförmåga, vilket gör att en ny metodik måste utvecklas för att använda metoden. Dock finns det tidigare exempel på hur cyklisk belastning av pålar resulterar i en nedbrytning av mantelmotståndet för huvudsakligen mantelburna pålar vid analys av stötvågsmätning i CAPWAP, (Hussein, et al 1988). En sådan dynamisk provbelastning skulle kunna bestå av successiva slag av pålen vilket kompletteras med kontinuerlig stötvågsmätning. Nedbrytning av pålens bärförmåga skulle då översiktligt kunna bedömas. Denna metod har dock tydliga svagheter: belastningshastigheten bör vara densamma som vid trafiklast. Denna består av variabel och fast last, och vid dynamisk provbelastning sker endast en variabel last. Det är inte klarlagt hur detta påverkar resultatet av en upprepad dynamisk provbelastning av en påle. Dock ger dynamisk provbelastning även vissa fördelar. Bärförmågan för pålar i t.ex. lera beror på belastningshastigheten, (Poulos, 1989). Vid dynamisk provbelastning är belastnings-

hastigheten betydligt större än för statiskt belastade pålar. En bedömning av mantelfriktionens viskösa motstånd måste då göras, (Bredenberg & Hintze, 1989). Detta bör utredas vidare innan denna metod kan användas praktiskt.



Figur 8.2. Cykliskt stabilitetsdiagram konstruerat från cyklisk provbelastning, (Jardine & Standing, 2000).

9. CYKLISK BELASTNING AV PÅLGRUPPER

Den vetenskapliga litteraturen behandlar huvudsakligen enskilda pålar under axiell belastning, och inte fullständiga pålgrupper. Detta beror troligtvis på svårigheten att utföra fält- och laboratorieförsök på cykliskt belastade pålgrupper. Däremot finns både laboratorie- och fältförsök redovisade för horisontellt cykliskt belastade pålgrupper, t.ex. Brown et al, 1987.

För dimensionering av enbart axiellt cykliskt belastade pålgrupper antas sålunda att summan av de enskilda pålarnas bärförmåga motsvarar den totala bärförmågan, (API, 2011). För vindkraftverk används huvudsakligen stora separata pålar, vilket gör analys av gruppeffekter onödigt. Som tidigare diskuterats har befintliga normer få rekommendationer för cykliskt belastade pålar, och det finns därför lite information om pålgrupper, (Karlsrud, 2012).

Möjlig påverkan från cyklisk belastning beror dels på hur pålarna samverkar med jorden, samt hur bottenplattan samverkar med pålgruppen. För relativt små variabla laster och stora avstånd mellan pålarna bör pålarna kunna beaktas som separata pålar, eftersom lastöverföringen mellan pålar troligtvis är relativt liten. Vad gäller tätt sittande pålar kommer dessa troligen påverkas av närliggande pålar, och inverka på pålgruppens bärförmåga.

Även samverkan mellan bottenplattan och pålarna kommer ha stor inverkan på hur stor nedbrytning av bärförmågan som kommer att kunna ske. För styva bottenplattor kommer cyklisk nedbrytning av bärförmågan att resultera i omfördelningen av överliggande last till omkringsliggande pålar. Om dessa har tillräcklig bärförmåga som ännu inte är mobiliserad bör påverkan bli relativt ringa.

Sker däremot cyklisk belastning som inte kan omfördelas i bottenplattan kan pålgruppen troligen utsättas för större rörelser. Är ett fåtal pålar i en pålgrupp 2-vägsbelastade kan nedbrytning av bärförmåga göra att pålarnas styvhet sänks betydligt, något som visas för en påle i lera i Figur 6.9. Detta kan göra att de pålstyvheter som antas i en pålgruppsberäkning i själva verket blir betydligt lägre under cyklisk belastning, vilket gör att pålgruppen rör sig mer än beräknat. Risk för detta föreligger när ett fåtal pålar, som t.ex. upptar horisontella krafter i en riktning, blir utsatta för 2-vägsbelastning och övriga pålar har liten bärförmåga i motsvarande riktning.

Någon typ av numerisk analys av pålgrupper grundat på analys av cyklisk bärförmåga från fältförsök med enskilda pålar är troligen en rimlig metod för att analysera ett sådant lastfall. Det går även att genomföra analys av pålgruppens statiska bärförmåga med avseende på bortfall av påle eller minskad pålstyvhet, för att göra en bedömning av påverkan från cyklisk belastning. Detta gäller då företrädesvis relativt små pålgrupper med laster i flera riktningar.

10. DYNAMISK RESPONS VID CYKLISK BELASTNING

Dimensionering av broar avsedda för höghastighetståg innefattar dynamisk analys av konstruktionens dynamiska respons. Detta utförs för standardiserade typer av tåg vid bestämda hastigheter, (Trafikverket, 2014). Syftet är att minska risken för resonans i brokonstruktionen vilket kan leda till stora rörelser av konstruktionen när ett höghastighetståg passerar.

Grundläggningens dynamiska respons har stor inverkan på konstruktionen. Analys av egenfrekvenser hos en bro kan genomföras med s.k. modalanalys, (Trafikverket, 2014). Bron modelleras då i ett FEM-program med linjära element och egenfrekvenser för systemet beräknas från det resulterande ekvationssystemet. Brostöd modelleras antingen som fasta upplag eller som fjädrar med en bestämd linjär styvhet. Detta är naturligtvis en stor förenkling av det dynamiska systemet men möjliggörs överblick över konstruktionens dynamiska beteende med begränsade beräkningsresurser.

Tidigare kapitel har visat att dynamisk belastning kan resultera i lägre bärförmåga för cykliskt belastade pålar, och betydligt lägre styvhet för pålar belastade med 2-vägs-cykler. Betydelsen av detta beror på pålgruppens utformning, t.ex. kan minskad styvhet av lutande pålar leda till stora rörelser i konstruktionen. Det kan troligen påverka hela konstruktionens styvhet och därmed också egenfrekvenser.

Det är oklart hur förändringen av pålars styvhet kan användas i modalanalyser av broar avsedda för höghastighetståg. Ett möjligt tillvägagångssätt är att genomföra en iterativ analys, där riktningen på fjäderkraften bestäms, och styvheten på dessa pålar ändras. Det är troligt att omfattande forskning krävs för att bedöma om detta har någon stor betydelse för interaktionen mellan grundläggning och överbyggnad, samt analys av pålgrupper.

11. DISKUSSION – DIMENSIONERING AV CYKLISK BELASTADE PÅLAR

11.1. Cyklisk belastning på pålar i dimensionering

Fält- och laboratorieförsök har visat att cyklisk belastning påverkar bärförmåga och sättning av pålar. Bärförmågan kan drastiskt sänkas vid hög andel cyklisk last. Sättning sker främst genom ackumulerad sättning över en stor mängd lastcykler. Fält- och laboratorieförsök av cyklisk belastning på pålar i både lera och friktionsjord har visat att både 1-vägs och 2-vägs cykler från både tryckta och dragna pålar har påverkan på pålarnas bärförmåga, ackumulerad sättning, samt styvhet. Bestämning av reduktion av bärförmåga har genomförts i fältförsök och beräkning, men kunskapen om ackumulerad sättning är begränsad. Den tidsberoende mantelfriktionen, både vad gäller tillväxt av mantelbärförmåga i friktionsjord, och porttrycksförändringar i lera, gör en analys av pålar över hela livslängden komplicerad.

11.2. Anpassning till svenska förhållanden

Som påvisats i avsnitt 1 har projektering av cyklisk belastade pålar främst utförts för offshore-konstruktioner (oljeplattformar, vindkraftverk). För sådana konstruktioner har oftast relativt utförliga fält- samt laboratorieförsök utförts, beskrivna i t.ex. Erbrich et al, 2010 och Merritt et al, 2012. Konstruktionerna består också av relativt få, men mycket stora pålar, (Jardine et al, 2012). Jordförhållanden är således välkända, och byggkostnad och projekteringskostnad för varje påle och ytenhet jord är hög, (Jardine & Standing, 2000).

Vid projektering av konventionell infrastruktur för svenska förhållanden kommer en stor mängd små och korta pålar (ofta < 10 m) att användas över mycket stora områden längs konstruktionen. Över detta område uppvisar jordförhållandena även betydande variation, (Axelsson & Baker, 2007). På grund av den stora variationen av jordlager där pålgrundläggning är aktuell sker sällan mer än en översiktlig beskrivning av de lösa jordlagren. Variation i bergyta gör även att det inte går att veta pållängden innan slagning. Det är således inte möjligt att utföra en detaljerad analys av pålarnas bärförmåga tidigt i projekteringen. För stora offshore-konstruktioner är brottgränstillståndet av huvudsakligt intresse vid dimensionering, (Randolph, 2013). För svensk infrastruktur är troligtvis bruksgränstillståndet vid relativt små sättningar av störst intresse, enligt Trafikverkets krav för höghastighetståg, (Trafikverket, 2014).

11.3. Dimensionering i brottgränstillstånd

Det mest praktiska tillvägagångssättet för analys av cyklisk belastning av pålar är troligtvis att använda cykliska stabilitetsdiagram som kompletteras av någon beräkningsmetod för att analysera följder av varierande jordlagerföljd och pållängd. Dessa diagram kan indikera om pålar kommer att uppvisa stabilt, meta-stabilt, eller instabilt beteende, och tillåtna laster bör väljas så att pålen är stabil vid cyklisk belastning. Detaljnivån är beroende av vilken fas projektet befinner sig i; från överslagsvärden från cykliska stabilitetsdiagram, till mer noggranna analyser av pålgrupper beroende på avvikelser i längder som påverkar lastfördelning i pålgruppen.

11.4. Dimensionering i bruksgränstillstånd

Beräkning av sättningar har tidigare genomförts med balk-fjäder diagram och olika typer av fjädrar som representerar jordens cykliska respons. Dessa modeller har tidigare använts på pålar som är betydligt längre än de pålar som behandlas i denna litteraturstudie, och där en större del av bärförmågan hänförs från mantelfriktion, men torde vara möjliga att använda. Alternativt kan beräkning med FEM-program med lämplig jordmodell (t.ex. UDCAM och PDCAM) användas.

11.5. Provbelastning

Cyklisk provbelastning har huvudsakligen genomförts med hjälp av olika typer av speciellt anpassade provuppställningar för statisk provbelastning. Metoden är mycket kostsam men man erhåller en detaljerad bild över last-rörelsesambandet. Även dynamisk provbelastning kan användas för cyklisk belastning och för att mäta upp hur mantelmotståndet succesivt bryts ned vid upprepad belastning.

11.6. Pålgrupper utsatta för cyklisk belastning

Den vetenskapliga litteraturen behandlar huvudsakligen enskilda pålar under axiell belastning, och inte fullständiga pålgrupper. Detta beror troligtvis på svårigheten att utföra fält- och laborieförsök på cyklistiskt belastade pålgrupper. Numerisk analys av pålgrupp bör användas, men det finns ännu inte någon metodik för att genomföra detta för cyklisk belastning av pålgrupp.

12. REFERENSER

Alheid, P., Axelsson, G., Berggren, B., Berglars, B., Hermansson, I. & Sarvell, F., (PKR 106), (2014), Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod, Rapport 106, IVA Pålkommission

API RP2GEO, (2011), API Recommended Practice, Geotechnical and Foundation design consideration, 1st ed, American Petroleum Institute

Andersen, K.H., Puech, A.A., Jardine, R.J., (2013), Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering, ICSMFE2013, Paris

Axelsson, G. & Baker, S. (PKR 103), (2007), Slagna friktionspålar, Rapport 103, IVA Pålkommissionen

Axelsson, G., (2008), IEG Tillämpningsdokument Rapport (:2008, Rev 2, EN-1997-1, Kapitel 7, Pålgrundläggning, Implementeringskommissionen för Europastandarder inom Geoteknik, IEG

Baumbach, J., (2012), Results of field tests on micropiles in clay under axial cyclic loading (one-way and two-way), BAW Mitteilungen No. 95, 2012

Benzaria, O., Puech, A. & Le Kouby, (2013a), Cyclic axial load tests of bored piles in over-consolidated Flanders clay, ICSMFE2013, Paris

Benzaria, O., Puech, A. & Le Kouby, (2013b), Cyclic axial load tests of bored piles in dense sand, ICSMFE2013, Paris

Bredenberg, H. & Hintze, S., (PKR 83), (1990), Beräkning av pålars last-rörelsesamband med utgångspunkt från sonderingsdata, Rapport 83, IVA Pålkommission

Briaud, J-L. & Felio, G.Y., (1986), Analysis of existing cyclic vertical load tests for piles in clay, Offshore technology conference, OTC 5224

Brown, D. A., Reese, L. C., & O'Neill, M. W. (1987). Cyclic lateral loading of a large-scale pile group. Journal of Geotechnical Engineering, 113(11), 1326-1343.

Chen, R.P., Ren, Y., Zhu, B. & Chen, Y.M., (2013), Deformation behavior of single pile in silt under long-term cyclic axial loading, ICSMFE2013, Paris

Chin, J. T., & Poulus, H. G., (1991). A "TZ" approach for cyclic axial loading analysis of single piles. Computers and Geotechnics, 12(4), 289-320.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, (EA-Pfähle), (2014), Recommendations on Piling, EA-Pfähle, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.

Erbrich, C. T., O'Neill, M. P., Clancy, P., & Randolph, M. F., (2010). Axial and lateral pile design in carbonate soils, Proc. 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia (pp. 125-154).

Fahey, M., Jewell, R.J., Randolph, M.F. & Korshid, M.S., (1993), Parameter selection for pile design in calcareous sediments, Predictive soil mechanics, Thomas Telford

Goulois, A.M., (1982), Contribution to the study of tension piles under cyclic loading, avhandling, 1982, MIT

Hussein, M., Rausche, F. & Likins, G., (1988), Bearing capacity of piles and conductors by dynamic analysis, Proceeding, Engineering for calcareous sediments, Jewell & Korshid, Eds.

Jardine, R.J. & Standing, J.R., (2000), Pile load testing performed for HSE Cyclic loading study at Dunkirk, France, HSE, Offshore technology report OTO-2000/008

Jardine, R.J. & Standing, J.R., (2012), Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand, Soils and Foundations

Jardine, R.J., Puech, A. & Andersen, K.H., (2012), Cyclic loading of offshore piles: potential effects and practical design, SUT conference

Jostad, H.P., Grimstad, G., Andersen, K.H., Saue, M, Shin, Z. & Zou, D., (2014), A FE Procedure for Foundation Design of Offshore Structures, - Applied to study a potential OWT Monopile foundation in the Korean Western Sea, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, **45(4)**, December 2014, ISSN 0046-5828

Karlsrud, K., & Haugen, T. (1983). Cyclic loading of piles and pile anchors-field model tests. Final report. Summary and evaluation of test results. Norwegian Geotechnical Institute, NGI Report, (40010-28).

Karlsrud, K., Nadim, F. & Haugen, T., (1986), Piles in clay under cyclic axial loading – Field tests and computational modelling, proceedings conference on Numerical methods in offshore piling, IFP/LCPC

Karlsrud, K., & Nadim, F. (1990). Axial capacity of offshore piles in clay. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.

Karlsrud, K, (2012), Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results, NTNU, Trondheim

Li, Z., Bolton, M. D., & Haigh, S. K. (2012). Cyclic axial behaviour of piles and pile groups in sand. Canadian Geotechnical Journal, 49(9), 1074-1087.

Manzocchi, M, (2000), Cyclic degradation of offshore piles, Offshore technology report, OTO-2000/013

McAnoy, R.P.L, Cashman, A.C. & Purvis, O., (1982), Cyclic tensile testing of a pile in glacial till, Proc. 2nd Int. Conference on numerical methods in offshore piling

Merritt, A.S., Schroeder, F.C., Jardine, R.J., Stuyts, B., Cathie, D. & Cleverly, (2012), Development of pile design methodology for an offshore wind farm in the North sea, SUT conference

Poulos, H. G. (1988), Cyclic stability diagram for axially loaded piles. Journal of geotechnical engineering, 114(8), 877-895.

Puech, A., (2013), Advances in axial cyclic pile design: Contribution of the SOLCYP project, ICSMFE2013, Paris

Puech, A. & Jezequel, J-F., (1980), The effects of long time cyclic loading on the behaviour of a tension pile, Offshore Technology Conference, OTC 3870

Randolph, M.F., (2013), McClelland Lecture – Analytical contributions to offshore geotechnical engineering, ICSMFE2013, Paris

Schwarz, P., (2002), Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung, avhandling , Technische Universität München

Tomlinson, M. J. (2001). Foundation design and construction. Pearson education.

Tabucanon, J. T., Airey, D. W., & Poulos, H. G. (1995). Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests. Geotechnical Testing Journal, 18

Trafikverket, (2014), Teknisk systemstandard för höghastighetsbanor, TDOK 2014:0159

Åhnberg, H. & Larsson, R., (2012), Strength degradation of clay due to cyclic loadings and enforced deformations, SGI Varia 617