

# TERMISKA PÅLAR I LÖS LERA



Anders Bergström

2018-05-09

# FÖRORD

Detta utvecklingsprojekt har haft tyngdpunkten på genomförandet av ett fältförsök för att studera effekterna av cykliska termiska belastningar på lös lera. Pålarna i försöket har samtidigt belastats statiskt, och avslutningsvis även belastats till brott. Projektet har huvudsakligen utförts inom ramarna för en licentiat-anställning på Chalmers. SBUF, NCC och Formas har varit huvudfinansiärer. Vidare har Hercules grundläggning bidragit ekonomiskt samt med material, installation och transporter m.m. NCC har även tillhandahållit försöksyta för ett fältförsöket. Chalmers har bidragit med utveckling av termisk försöksutrustning, praktiskt arbete i fält och laboratorium, handledning m.m. Hans Alexandersson på Pemtec har deltagit med kunnande såsom leverantör av kollektorslangar till projektet. Projektet initierades ursprungligen av Tara Wood, NCC. Tack till samtliga inblandade!

Licentiatarbetet har utförts av Anders Bergström på NCC teknik och finns redovisat i licentiatavhandlingen *In-situ testing of floating thermal piles in soft sensitive clays* (Chalmers 2017).

Handledare har varit Jelke Dijkstra på Teknisk geologi och geoteknik samt Saqib Javed på Installationsteknik, Chalmers. Handledare från byggtreprenörsidan har varit Tobias Larsson, NCC.

Göteborg i maj 2018

Anders Bergström

# SAMMANFATTNING

Termiska pålar, eller energipålar, är pålar som utöver att utgöra konstruktionselement för grundläggningen även utnyttjas för att värmeväxla energi till jordvolymen där de installerats. I detta projekt har ett fältförsök utförts med energipålar som installerats i lös sensitiv lera i Göteborg. Försökspålarna är 28 m långa kohesionspålar och de har belastats såväl cykliskt som statiskt. Den cykliska belastningen har utgjorts av 7 sekvenser med kontrollerad värmning och kylning av en testpåle. Temperaturintervallet har varit mellan ca 5-30 °C. Lerans temperatur före försöket var ca 8 °C. Den statiska belastningen har utgjorts av betongelement på en stålram. Lastnivån har motsvarat pålarnas belastning i bruksgränstillstånd, ca 85 kN. Efter genomförda termiska försök ökades slutligen den statiska belastningen tills pålarna gick till brott, ca 165 kN.

Syftet med fältförsöket har varit att följa och samla representativa mätdata om hur en energipåle och omgivande lera påverkas då pålen värms och kyles, exempelvis vad gäller bärförmåga och krypning.

Lerans geotekniska egenskaper i försöksområdet har bestämts med omfattande undersökningar. Undersökningarna har omfattat såväl traditionella provtagningar, men också t.ex. blockprovtagning, detta för att undersöka störningseffekter vid provtagningen. Mätutrustning för registrering av portryck, temperatur och vertikala rörelser har, efter omfattande kalibrering, installerats i jorden på olika nivåer och olika avstånd från provpålarna. För att förse pålen med reglerbar önskad effekt vid värmning och kylning har en mobil värme-/kylmaskin konstruerats.

Försökspålarna installerades april-maj 2016. De termiska belastningarna utfördes mellan december 2016-mars 2017. Det avslutande statiska provbelastningsförsöket utfördes i juni 2017.

Vid de cykliska termiska belastningarna kunde temperaturens utbredning från pålen och utåt i leran mätas, samtidigt som tillförd värme- eller kyleffekt loggades. Även temperaturen i olika delar av pålen samt kollektorslangarna inuti pålarna mättes kontinuerligt, bl.a. med fibermätning längs hela slangens längd. Portrycket i leran mättes i samma punkter som temperaturen. Mätrespons kunde konstateras upp till några få meters avstånd från pålen vid försöken, men effekten av de cykliska belastningarna (max 20 dygns varaktighet) var tydlig främst i leran intill pålen, inom en radie av ca 0,5 m. Vid analysen konstaterades att detta involverar ungefär samma lervolym som även påverkas mest påtagligt vid slagning/installationen av pålarna. Slagning av pålar medför en total omlagring av leran längs pålens mantel vilket t.ex. påverkar lerans konsoliderings- och krypegenskaper.

Vid fältförsöket kontrollmättes vertikala rörelser i påltopp samt i leran på olika djup. Mätresultaten visade obetydliga eller mycket små sättningar, generellt inom mätnoggrannheten.

Det statiska provbelastningsförsöket utfördes på med stegvis pålastningar var 15 minut i enlighet med normalt svenskt förfarande. Jämfört med beräknad bärförmåga gick försökspålarna till brott för en relativt låg last, motsvarande en alfa-faktor ca 0,65. Resultatet var detsamma både för energipålen som för en intilliggande referenspåle som aldrig exponerats för termisk belastning.

# INNEHÅLL

INLEDNING.....	4
UTFÖRANDE .....	4
RESULTAT OCH SLUTSATSER .....	7
LITTERATUR OCH PRESENTATIONER: .....	9

## INLEDNING

Energipålar/termiska pålar som koncept utvecklades redan under 1970-talet. Genom att installera kollektorslangar inuti en påle kan man låta en värmebärande vätska cirkulera och pålen kan därmed utnyttjas för värmeväxling mellan pålen och den omkringliggande jordens volym. Denna teknik används redan idag i ett antal länder jorden runt, men är än så länge en ovanligt i Sverige.

Eftersom grundläggning med slagna pålar i lös lera är dominerande i Sverige konstaterades ett behov att skaffa mer kunskap. Internationellt är pålinstallation in-situ vanligt förekommande och jordlagren utgörs ofta av styvare jordar än den lera som är vanligt t.ex. längs svenska västkusten. Vid installation av slagna pålar störs intilliggande jord kraftigt. Detta i kombination med lösa och ibland även sensitiva leror utgör en osäkerhet. Att addera värme och kyla påverkar dessutom t.ex. portrycket i leran och är sedan tidigare känt att påverka lerans konsoliderings- och krypegenskaper.

Det finns en osäkerhet om hur lera kring slagna pålar i lös lera påverkas av upprepad värme- och kylning. Därför initierades ett forskningsprojekt, som har involverat kompetenser inom såväl geoteknik som installationsteknik. Nedan presenteras kortfattat det geotekniska arbetet, som finansierades inom detta forskningsprojekt och bestod av genomförandet av ett fältförsök. På Chalmers Teknisk geologi och geoteknik utförs även ett parallellt forskningsprojekt i laboratorieskala och modellering. Detta arbete utförs av Yanling Li som ett doktorandprojekt. Vidare arbetar Saqib Javed på Installationsteknik med utvärderingen av de termiska försöken och hur mätresponser från fältförsöket skall översättas till termiska egenskaper på jordprofilen.

Under 1970-talet utfördes omfattande forskning av Jordvärmegruppen på Chalmers, vilket utmynnade i ett stort antal rapporter och erfarenheter, som bl.a. bidrog till utveckling och nyttjandet av värmepumpar. I forskningsarbetet ingick även två installationsfält med vertikala kollektorslangar installerade i lös lera. Vid dessa försök konstaterades att den termiska cykliska belastningen genererade rörelser i marken, såväl sättning som hävning.

Frysning av lera medför en total omstrukturering av leran struktur. Då leran åter tinar kollapsar lerstrukturen med mycket stora sättningar som följd. Leran får alltså under inga omständigheter tjäla runt pålarna.

## UTFÖRANDE

Fältförsöket planerades för att utföras som ett försök med pålar i dimensioner som används praktiskt i Sverige. I forskningssammanhang används ibland modellpålar, med fördelen att de kan hanteras i laboratoriemiljö med kontrollerad omgivning. Vid försök med lera är det däremot praktiskt komplicerat att transportera och återskapa en representativ jordprofil från fält till labb.

I fältskala med riktiga pålar blir mätinsatsen snabbt omfattande och begränsningar måste därför göras i antalet mätpunkter, antalet pålar m.m. Vidare medför fältförhållandena att mätutrustningen måste tåla att exponeras för markfukt och de påfrestningar som förekommer vid installation. Slutligen är det förstås även en fråga om budget. Fältförsöket planerades därför att utföras med 4 stycken provpålar, två i stål ( $\text{Ø}115$  mm) och två i betong (270x270 mm). Provpålarna var 28 m långa och mantelbärande. De termiska försöken skulle utföras på en stål- respektive en betongpåle. De övriga två pålarna skulle användas som referenspålar. För statisk

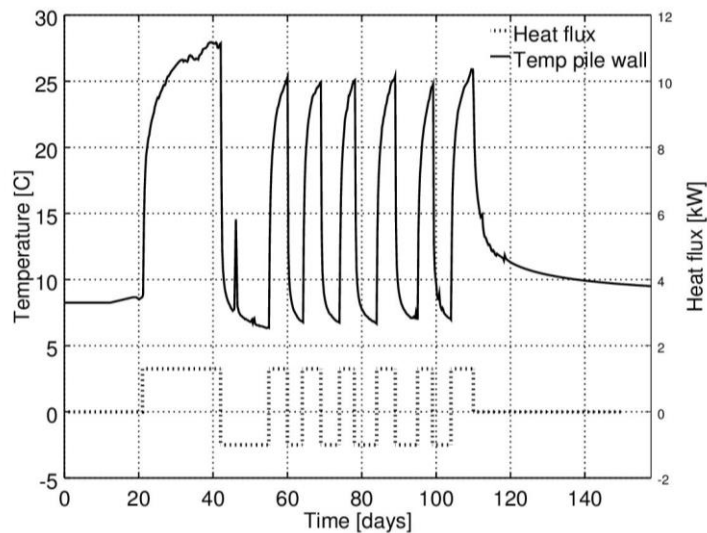


Figur 1. Pålastning av statisk belastning motsvarande brukslast. Betongelementen är 5 m långa. Försökspålar av stål finns under den högra kanten av lastriggen. Försökspålar av betong står utanför bild.

belastning av pålarna valdes en stålram som belastades med betongmoduler till önskad vikt, se Figur 1. Fördelen med detta, jämfört med t.ex. stagförankring till berg, var att lasten enkelt kunde hållas konstant. Nackdelen var att för att belasta betongpålarna till dimensionerande brukslast skulle det krävas en mycket stor last. I fältföröket begränsades därför den statiska belastningen till att endast omfatta stål-pålarna.

De termiska försöken utfördes på den ena av stål-pålarna och på en av betong-pålarna. Eftersom stål-pålens mindre volym och högre värmeledning medförde en snabbare respons var det praktiskt att fokusera de cykliska termiska försöken endast till stål-pålen, totalt 7 cyklar med värmning och kylning. Temperaturintervallet vid försöken har varit mellan ca 5-30 °C. Lerans temperatur före försöket var ca 8 °C. Den första cykeln var utökad i tid till ca 20 dygn för att bedöma responsen mot ett stabilt läge med låg värmegradient från påle till jorden ("steady state"). De efterföljande cyklerna var kortare, ca 5 dygn var, och utfördes för att studera responsen av upprepad värmning och kylning, se figur Figur 2. Det termiska försöket i betong-pålen utfördes som ett parallellt försök för att jämföra den termiska responsen i en stål-påle med en motsvarande lång betong-påle. Den tillförda värmeeffekten motsvarade ca 50 W per meter påle.

Instrumenteringen för mätning av den termiska responsen i pålarna (tillförd vs värmväxlad effekt till jordprofilen) hanterades i en testrigg som konstruerats inför försöket. Inom provmätning av bergvärmebrunnar används ofta ett etablerat provförfarande med s.k. termiska responstest. Vid fältförsöket utfördes ett utvecklat responstest eftersom testriggen även kunde leverera kyla under kontrollerade former.



Figur 2. De termiska cyklerna med värmning/kilning uppmätt på vid pälens mantel på 14 m djup, med början 2016-12-01 (Time=0). Tillförd effekt (kW) framgår schematisk som streckad linje.

Instrumentering för mätning av responsen i leran utfördes i mönster som en vertikal matris med mätsensorerna på ett antal olika djup och olika avstånd från provpälarna, totalt i 17 punkter, se Figur 3. Instrumenteringen i leran inkluderade mätning av temperatur, portryck samt vertikala rörelser. Även mätning av horisontella rörelser efterstävades men valdes bort eftersom det inte fanns någon etablerad mätutrustning med tillräcklig mätnoggrannhet.



Figur 3. Mätsensorernas placering i jordprofilen mellan de två försökspälarna av stål (bruna i figuren). Sensorerna för temperatur och portryck är markerade med horisontella tvärstreck, sammanlagt 17 st. De vertikala gula linjerna motsvarar placeringen av bägslangarna för sättningsmätning.

Ett statistiskt provbelastningsförsök utfördes avslutningsvis på stålpålarna för att bestämma bärförmåga vid brott. Försöket utfördes med stegvis pålastningar var 15 minut i enlighet med normalt svenskt förfarande.

## RESULTAT OCH SLUTSATSER

Fältförsök är komplicerade att genomföra och det finns en betydande risk att utfallet inte blir som avsett. I detta fall får ändå konstateras att försöket fungerat tillfredsställande och att mätresultaten var relevanta. Töjningsgivarna i pålen förlorade tyvärr sin funktion redan i samband med påslagningen och även någon enstaka portrycksmätare i leran bedömdes som opålitlig efter några månaders loggning. Men generellt levererades data som bedöms spegla förloppet i samband med värmning och kylning av pålarna, se exempel i Figur 4. Vid värmning expanderar vattnets volym och ett ökat portryck genereras som fortplantas radiellt utåt från pålen. På motsvarande sätt medför en kylsekvens att portrycket intill pålen sjunker. De största skillnaderna begränsas till ett avstånd ca 0,5 m runt provpålen även om förändringar kan skönjas ända ut till en radie av 3,5 m.

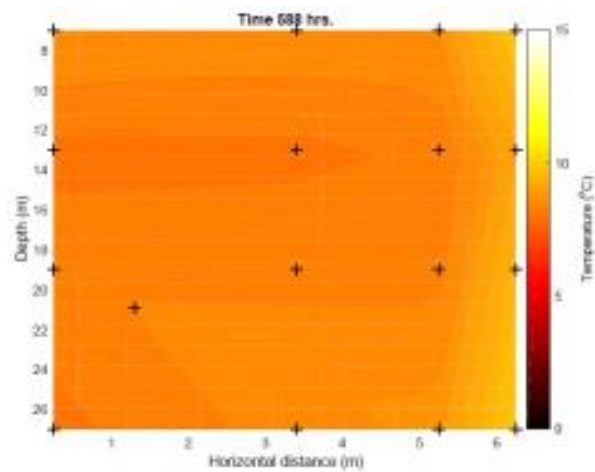
Kontrollmätning har utförts av vertikala rörelser av pålhuvud samt på varje meters djup i leran med hjälp av bälgslangar. Inga klara sättningrörelser kunde konstateras, utöver det mätbrus som framkommer vid de kontinuerliga mätningarna och mätmetodernas begränsade noggrannhet. Eventuella rörelser under mätperioden, totalt ca 1 år varav 3 månader var med termiska cykler, bedömdes vara <2 mm.

Vid installation av en slagen påle påverkas leran kraftigt inom en radie motsvarande ca 2-5 påldiametrar. Leran förloras då sin tidigare struktur. Den omrörda leran blir samtidigt mindre känslig för temperatureffekter. Detta skulle kunna förklara varför de uppmätta rörelserna visade sig vara relativt små.

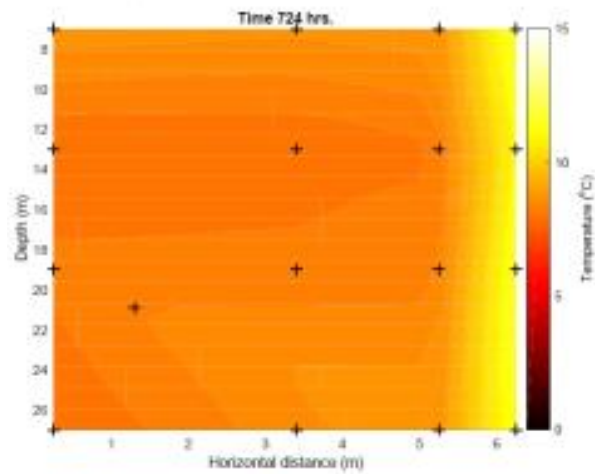
Resultat från utvärdering av de termiska responstesten för pålarna jämfört med mätresultatet på lerprover i laboratoriet visar att ett responstest utfört enligt rutin överskattar lerans värmekonduktivitet med upp till 25 %. Detta bedöms bero bl.a. på att ett responstest normalt utförs under endast några dygn. En längre försöksperiod ger bättre resultat. Vidare konstaterades att avvikelsen var större för utvärderingen av betongpålen än för stålpålen, sannolikt en konsekvens av betongpåle's högre värmekapacitet.

Vid det avslutande statiska provbelastningsförsöket överskreds den geotekniska bärförmågan för en oväntat låg last, motsvarande en alfa-faktor ca 0,65. Pålhuvudets sättning före brott var ca 3-4 mm. Därefter sjönk pålen fritt. Resultatet var dock detsamma både för energipålen som för en intilliggande referenspåle, och således påverkades provpålarnas geotekniska bärförmåga inte av om leran exponerats av de termiska cyklarna eller ej, se Figur 5.

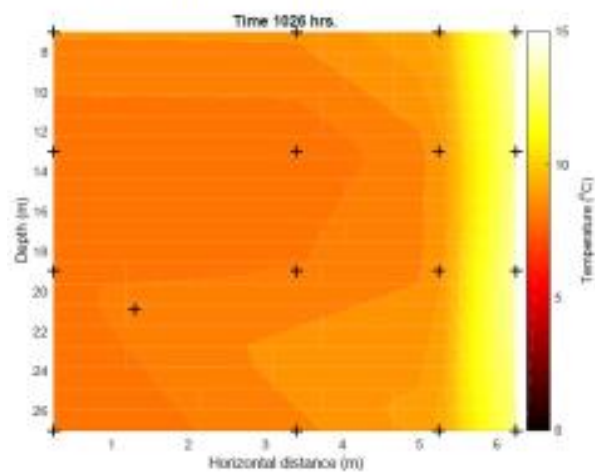




(a) Start heating. (22/12 -16)

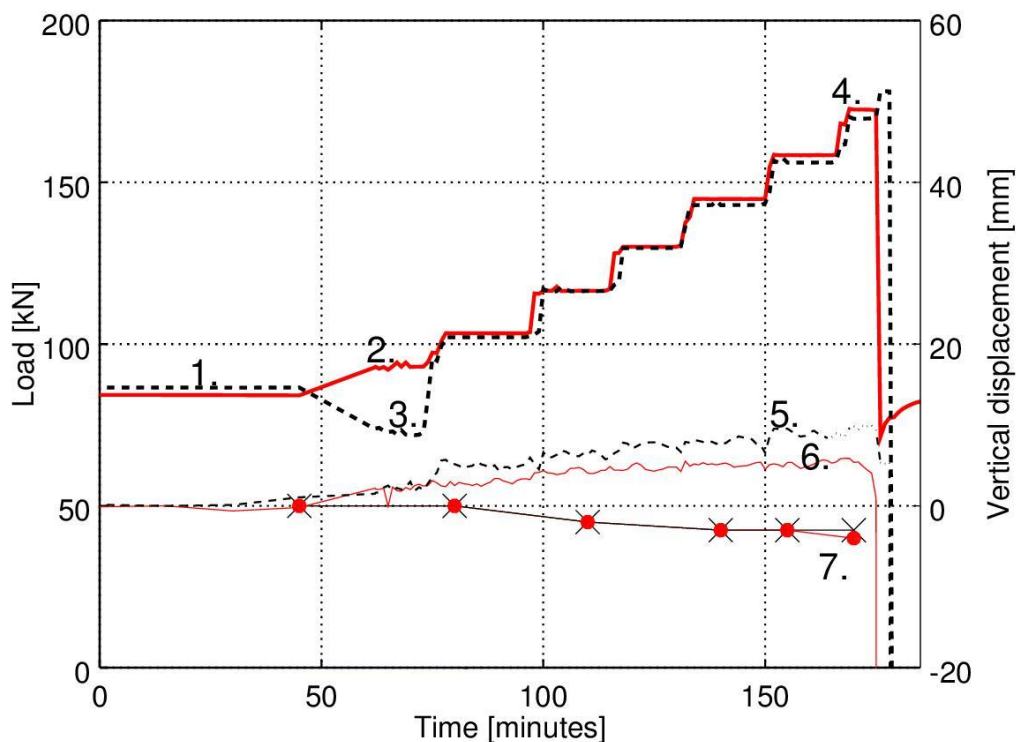


(b) Heating for 8 days. (30/12 -16)



(c) Heating for 31 days. (12/1 -17)

Figur 4. Temperaturen utbredning vid tre tidpunkter under den första cykelns värmefas. Försökspålen sitter i högre kanten av respektive figur. Temperatur- och porttryckssensorerna är markerade med svarta kors. Breddskalan är ca 7 m och djup skalan ca 28 m i respektive figur.



Figur 5. Mätresultatet från det statiskbelastningsförsöket för bestämning av stålplårens geotekniska bärförmåga. Före försöket hade plåren varit belastade med den beräknade brukslasten 84-87 kN (1.) under ett drygt år. Svart streckad linje representerar referensplåren (3.) och röd heldragen linje den försöksplåre som använts för de termiska cyklerna (2.). Vid det statiska belastningsförsöket ökades lasten stegvis var 15 minuter till brott, som uppkom vid lasten ca 165 kN (4.). Manuell avvägning av plårhuvudena visade 3-4 m sättningar för brott (7.). Rörelser uppmätta via lutningsgivare och omräknad till vertikala rörelser framgår av (6.) och (7.) för respektive plåre.

## LITTERATUR OCH PRESENTATIONER:

Försöksutförandet, mätresultat, litteraturstudie och referenslista redovisas detaljerat i licentiatavhandlingen *In-situ testing of floating thermal piles in soft sensitive clays*. Licentiatarbetet presenterades på ett seminarium 2017-12-15 och lic-avhandlingen finns att ladda ner från Chalmers biblioteks hemsida:

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/500040/500040.pdf>

En omfattande litteraturlista finns i ovanstående länk.

Projektet har även presenterats på Grundläggningdagen, Stockholm, 2017-03-16

(<https://research.chalmers.se/publication/248656>)