PROJEKTNR. 13971

Statisk provbelastning av instrumenterad kohesionspåle

Tvådygnsförsök och lastimpulser – fjädrar och styvheter

Michael Sabattini och Johannes Pettersson
Peab Anläggningsteknik

2023-06-20

FÖRORD

Denna rapport utgör slutrapportering av forskningsprojektet SBUF (13971) och Trafikverket (TRV 2021/25560), övriga finansiärer till projektet är Peab Anläggning och Peab Grundläggning. Vi vill tacka våra finansiärer som gjort detta projekt möjligt, vi vill även tacka vår referensgrupp för kloka råd och tips.

Referensgruppen för projektet bestod av:

Peter Alheid, Hercules

Jonas Axelsson, Trafikverket

Gunnar Holmberg, Skanska

Leif Jendeby, Cowi

Då ämnet är relativt specialiserat läggs nivån i rapporten på att läsaren är geotekniker eller konstruktör.

Michael Sabattini och Johannes Pettersson

Peab Anläggningsteknik

Juni 2023

SAMMANFATTNING

Vid lastnedräkning av t ex ett hus eller en bro läggs oftast en påle in som en eller flera fjädrar i en modell, dessa är relativt okända då få liknande försök gjorts vilket gör att lasten kanske inte alltid landar där beräkningen visar. Detta projekt innefattar en provbelastning av en mantelburen påle i postglacial lera. Syftet är öka förståelsen för pålens beteende tillsammans med jorden, främst styvhet och kapacitet i detta fall även som en funktion av tiden. Pålen är 50m lång och sitter i ca 90m lera i Göteborg. Den är instrumenterad med töjningsgivare för bedömning reaktioner i pålen mot djupet. Pålen finns kvar från ett tidigare utvecklingsprojekt rapporterad i (Sabattini, 2020), (Fellenius, Edvarsson, Pettersson, Sabattini, & Wallgren, 2019) samt (Pettersson & Fredrik Edvardsson, 2018).

Till skillnad från försöket 2018, då pålen lastades upp mer ”standardiserat” till brott om ca 15 steg a 15 minuter, belastades nu pålen upp till 65% av brottbärförmågan uppmätt 2018 (1820kN) och därefter hölls lasten i två dygn, för att se hur reaktionerna längs med pålen varierar med tiden och för att bestämma styvheterna för olika reaktioner.

Resultaten tyder på att styvheterna ökar rejält mot djupet. Fjäderstyvheterna varierar kraftigt med belastningstiden och amplituden samt att bärförmågan ökat marginellt från försöket 2018.

INNEHÅLL

1 INLEDNING 5

2 GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR 6

3 PÅLE, UTRUSTNING OCH UTFÖRANDE 10

3.1 INSTRUMENTERING 10
3.2 PÅLDRIVNING 12
3.3 SKYDDSRÖR 13
3.4 PROVTRYCKNINGSANORDNING 15
3.5 RESIDUALSPÄNNINGAR 16

4 RESULTAT OCH ANALYS PROVTRYCKNING 16

4.1 UPPLASTNINGSFÖRFARANDE 16
4.2 GEODETISK MÄTNING 17
4.3 KORTTIDSBELASTNING, DEL A 21
4.3.1 Töjningar, del a 21
4.3.2 Påltoppsrörelser del a 23
4.3.3 Analys del a 25
4.4 LÅNGTIDSBELASTNING, DEL B 26
4.4.1 Töjningar, del b 26
4.4.2 Påltoppsrörelser, del b 28
4.4.3 Analys, del b 29
4.5 LASTIMPULSER, DEL C 29
4.5.1 Töjningar del c 29
4.5.2 Påltoppsrörelser, del c 30
4.5.3 Analys 31

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER 35

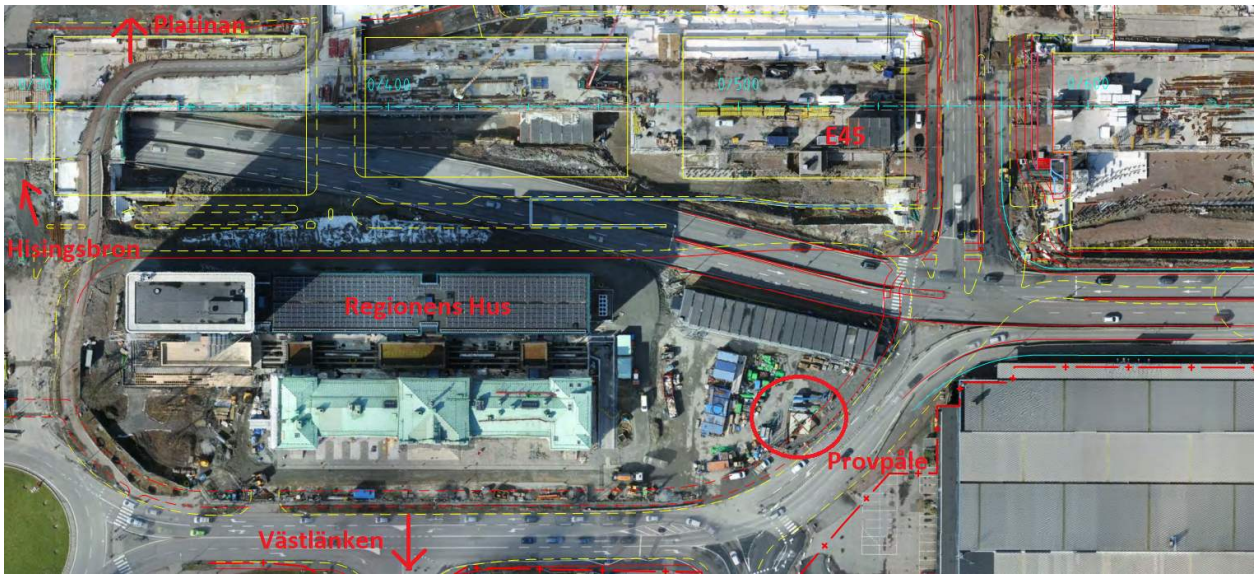
5.1 RESIDUALSPÄNNINGAR 35
5.2 GEOTEKNISK BÄRFÖRMÅGA 35
5.3 PÅLENS OCH JORDENS AXIELLA STYVHET 36

6 REFERENSER 39

1 INLEDNING

Inom projektet E45 Lilla Bommen-Marieholm har en instrumenterad påle slagits och provtryckts. Pålen har statiskt provbelastats upp till brott för att utreda beteendet och den geotekniska bärförmågan.

Projektet är lokaliserat precis i centrala Göteborg, några hundra meter norr om centralstationen. Området är omgiven av pålningsintensiva projekt så som sänkningen av E45, Regionens Hus, Platinan, Hisingsbron och Västlänksetappen E02-Centralen.



Figur 1. Placering av den instrumenterade provpålen.

En statisk provbelastning utfördes på samma påle år 2018 där korttidsbelastningen undersöktes. Första gången utfördes testet ”standardiserat” med korta (15minuters) laststeg. Resultaten från det försöket har legat till grund för detta projekt som undersöker styvheten för en mantelburen påle i lera.

Valet av långtidsbelastning på 60-65% är för att ligga något lägre än studien av (Yannie, 2016) kunde se betydande kryp och risk för krypbrott.

Frågeställningarna inför detta försök var:

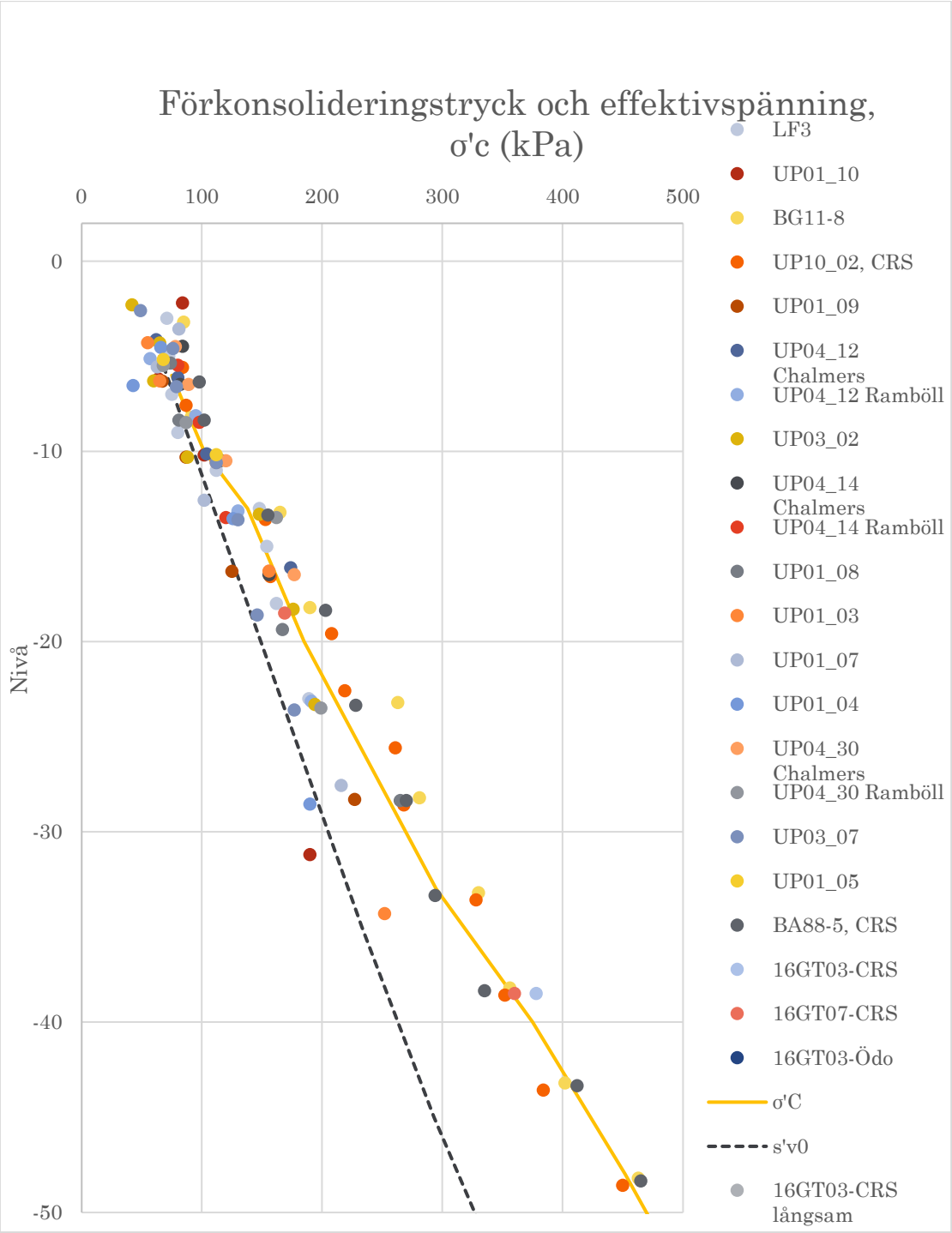
- Hur förändras styvheten med lasten?
- Hur förändras styvheten med tiden?
- Hur är styvheten vid på och avlastning?
- Har brottlasten förändrats sedan försöket 2018?

2 GEOTEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

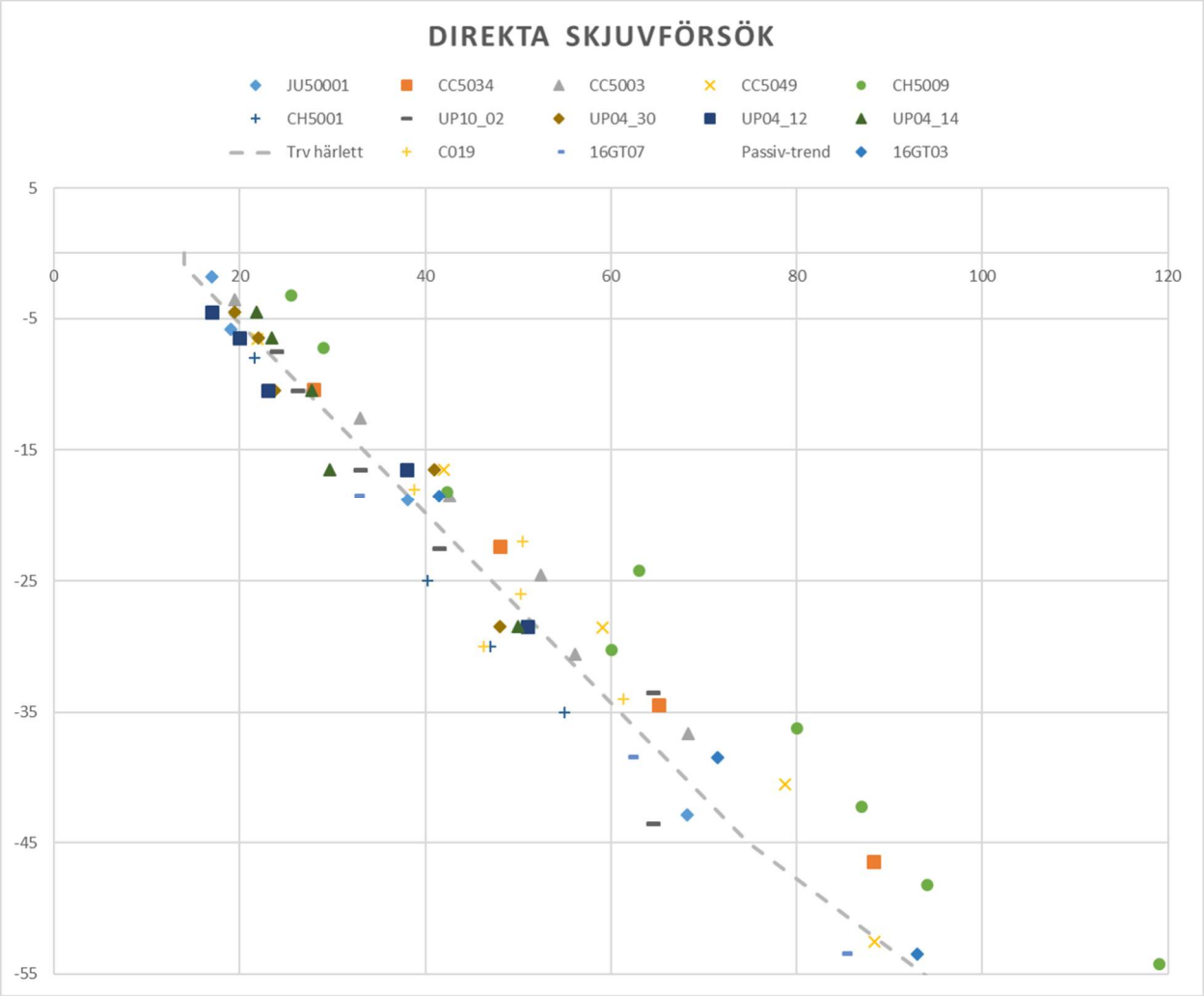
Vid läget för provpålen består jordlagerföljden av ca 1m överbyggnad följt av 2-3m fylld lera och sedan lera ner till ca 90m djup. Portryckssspetsar i leran och grundvattenrör i undre akvifären i tyder på artesiskt grundvatten med en ökning på ca 10 kPa/m, vilket ger ca 2m övertryck på 100m djup med en gravitationskonstant på 9.81m/s^2. Pålen är kapad strax över markytan och har en brunnsring kring sig (för att skydda mätutrustningen). Vilket gör att den har kontakt med leran efter ca en meter.

Effektivspänningar och förkonsolideringstryck framgår av Figur 2 nedan. Odränerad skjuvhållfasthet är mycket låg i övre delen av profilen, till hög mot djupet, vilket framgår av figurerna nedan.

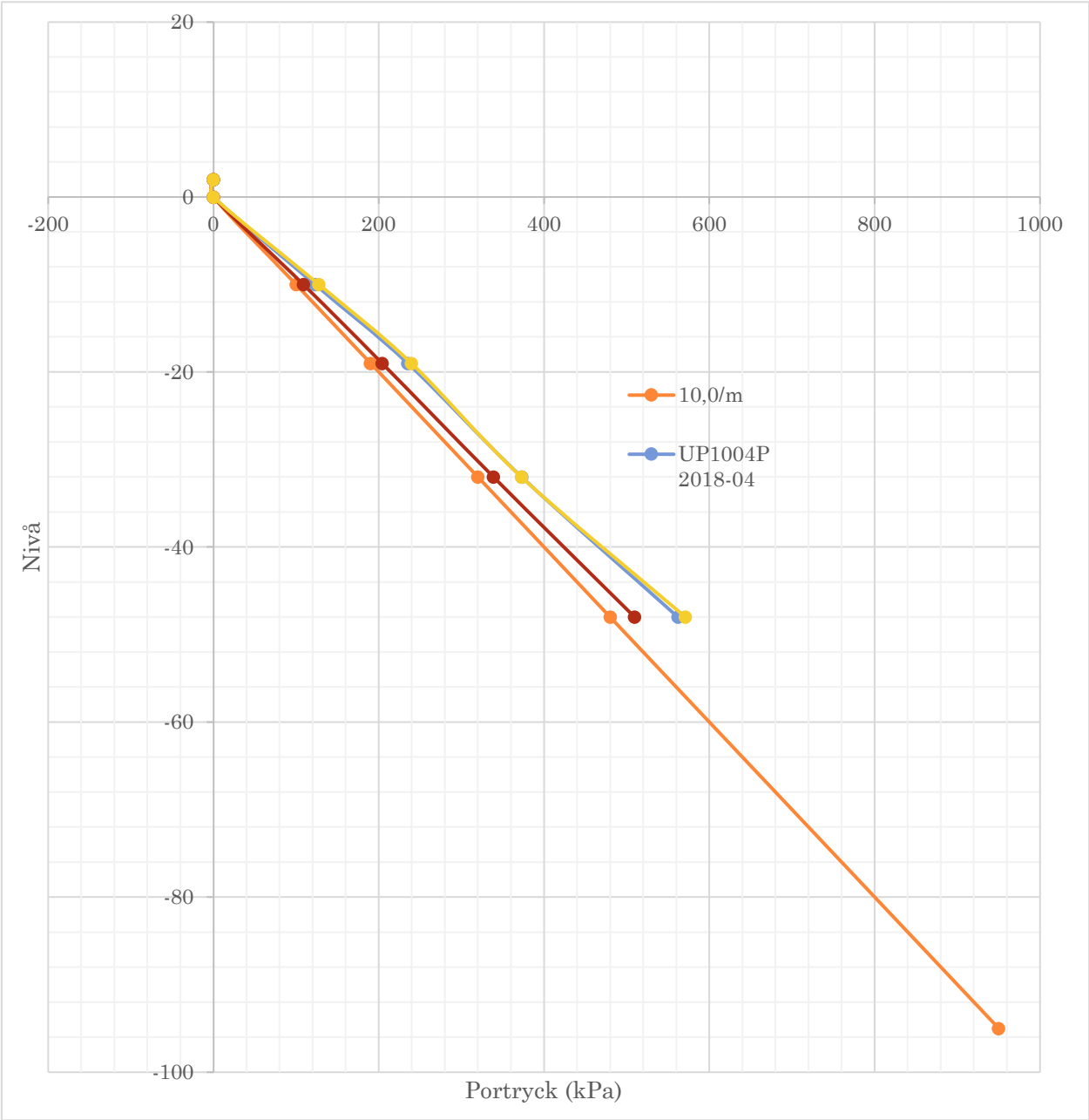
Portrycken är ej mätta vid pålen utan vid en ”närbelägen” portrycksstation något närmare pålningens centrum, ca 100m ifrån pålen. En uppskattning av dessa portryck presenteras nedan i figur 3 och 4. Portrycken är något högre än försöket 2018 i denna mätstation. Värt att notera är att denna station ligger radiellt närmare projektet Platinan än försökspålen. På Platinan utfördes pålning mellan dessa försök, så området vid pålen har antagligen inte fått samma ökning av portryck.



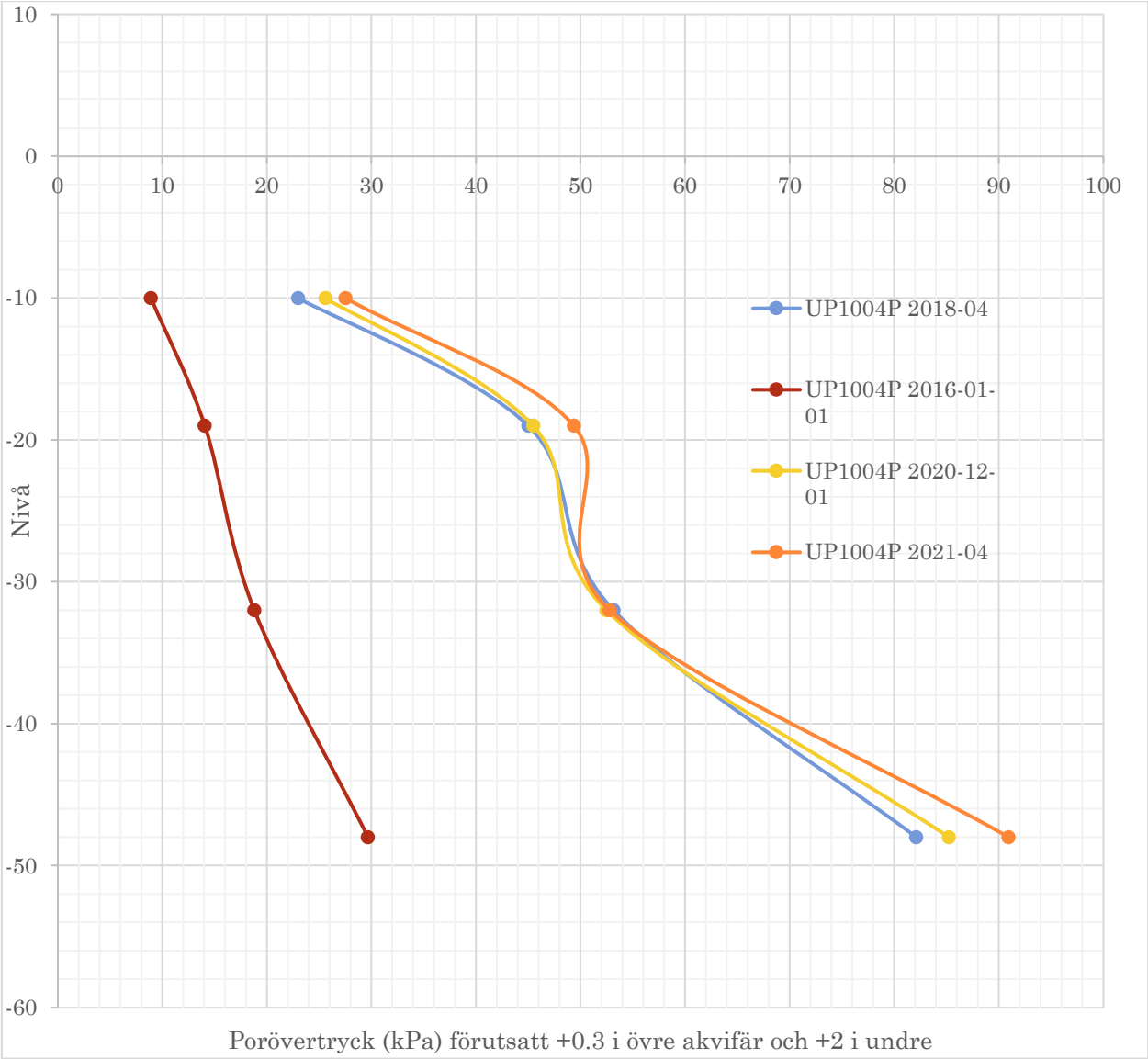
Figur 2. Förkonsolideringstryck och effektivspänningar, streckat svart polylinje: utvärderad effektivspänning, orange polylinje utvärderad förkonsolidering baserat på CRS-försöken (vilka skiljer sig något från utvärdering från stegvisa ödometerförsök och triaxialförsök mot djupet).



Figur 3. Odränerad skjuvhållfasthet från närbelägna direkta skjuvförsök. Grå streckad polylinje avser valda värden.



Figur 4. Portryck innan pålning samt "0" värde 10kPa/m förutsatt ett portryck på +2 på 100m djup och g=9.81m/s²



Figur 5. Porövertryck innan pålning i området påbörjades för projektet samt vid provtryckningstillfällena i punkt UP1004P. Orange färg är vid datumet för provtryckning två och blå är första provtryckningen.

3 PÅLE, UTRUSTNING OCH UTFÖRANDE

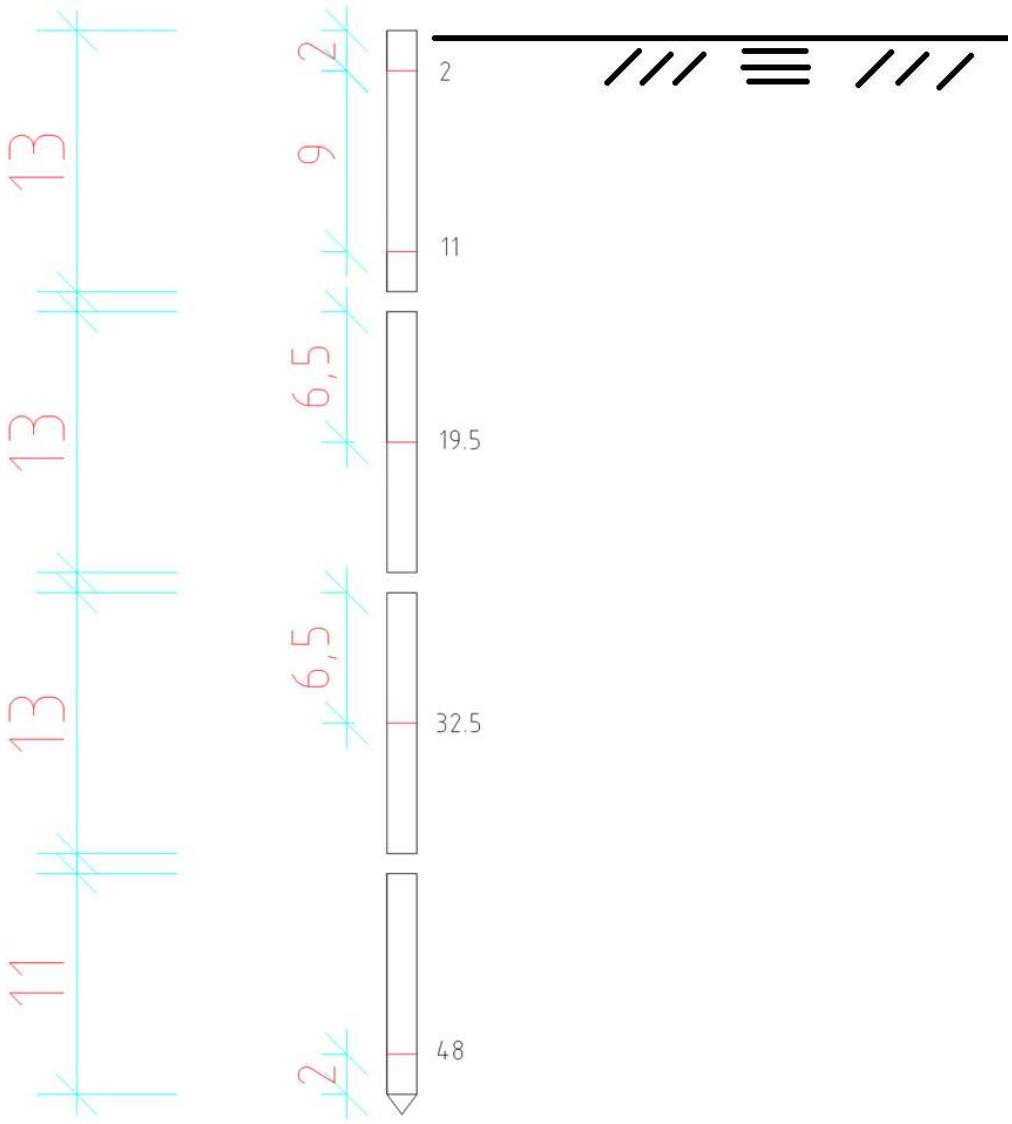
Testriggen bestod av 4 st 39m betongpålar som mothållspålar. Själva testpålen är en 50m lång, 275x275mm påle med 12 st Φ16mm som huvudarmering. Betongkvalitet C60/75, med specialförstärkta skarvar för att säkerställa att geotekniskt brott sker före konstruktivt brott.

3.1 Instrumentering

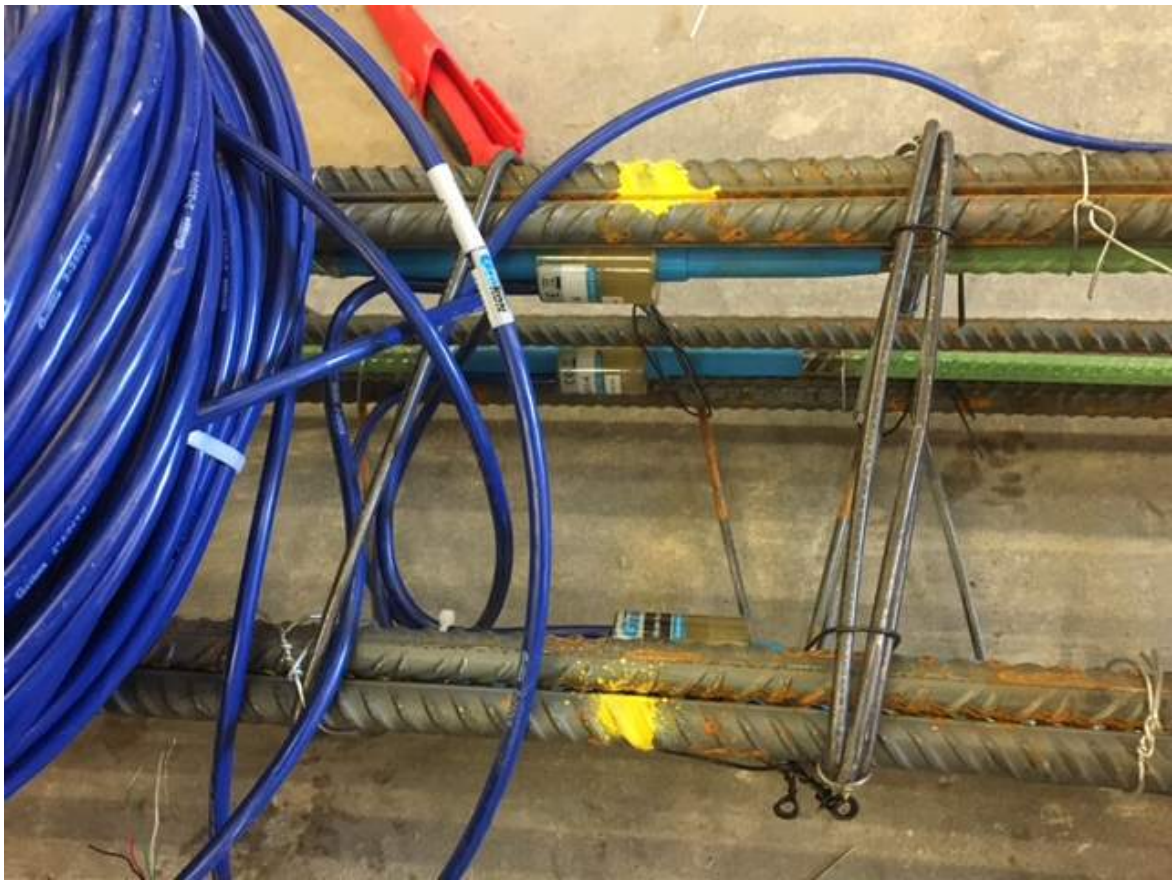
På fem nivåer installerades töjningsgivare av typen ”svängande sträng”. ”Sister bars” innebär att töjningsgivarna sitter förmonterade på en kort armeringsstång (914mm) som sedan fästs vid längsgående armering med najtråd. För att se på både kraft och moment i varje nivå installerades givarna en i varje hörn av pålen. ”Sister barsen” är modell 4911A av Geokon. Figuren nedan visar läget för givarna längs med pålen. Varje givare har en egen 4-ledarkabel (töjning och temperatur) så totalt 80 ledare ligger i kabelskyddet.

Töjningsgivare av typen svängande sträng fungerar som en gitarrsträng och ger ifrån sig en ton, denna ton fångas av en ”gitarrstämmare” som läser av tonens frekvens och töjningen kan därefter beräknas utifrån nollvärdet på frekvensen.

Figur 6 nedan visar installationen vid en av nivåerna i pålen innan gjutning.



Figur 6. Skiss över pålelementen som visar de instrumenterade djupen



Figur 7. Sister bars i armeringskorgen till pålelementen

3.2 Påldrivning

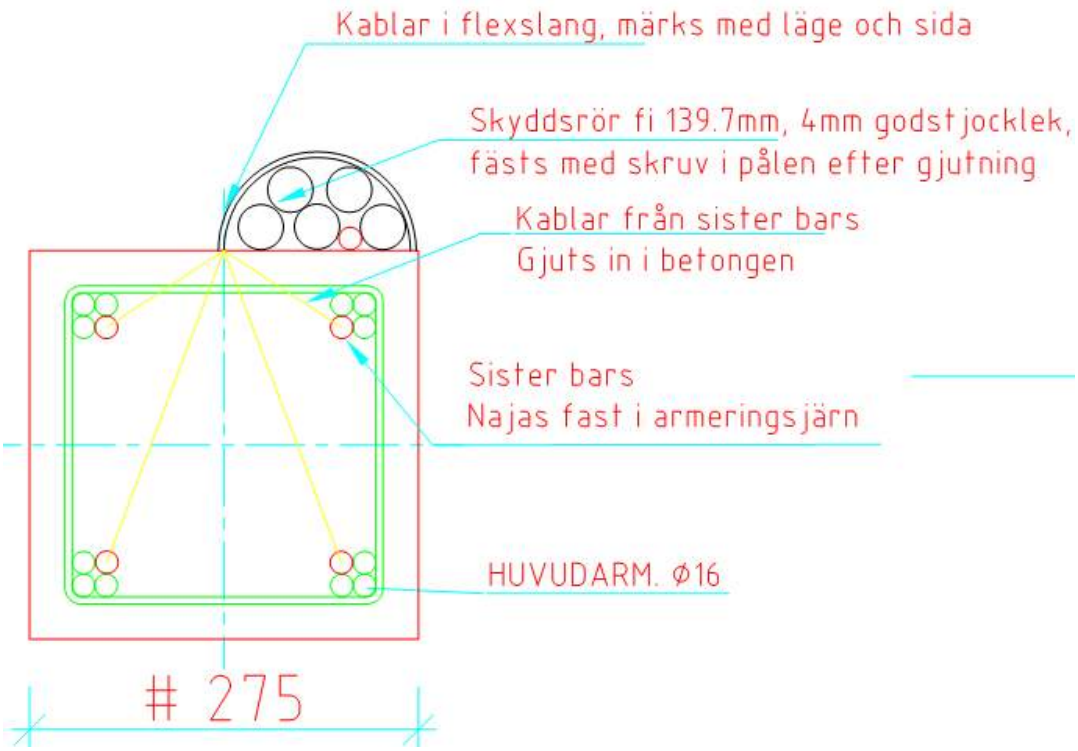
Slagningen av pålen utfördes 7-8 september 2017 med en Junttan PM23 pålkran utrustad med 5 tons accelererande hejare.

Själva drivningen var lätt: två understa elementen trycktes ner och mellanpåle 2 behövde 519 slag, med 2kNm slagenergi samt översta elementet: 655 slag med i snitt 4kNm slagenergi.

Figur 8. Skarvning av pålelement

3.3 Skyddsrör

För att skydda de 80 kablarna som är kopplade till trådtöjningsgivarna och temperaturgivarna i pålen sitter ett halvt 140mm skyddsrör på utsidan av pålen. Detta är fäst i pålen med svets i pålsko och skarvar samt med expanderbult c/c 2m längs med pålen.



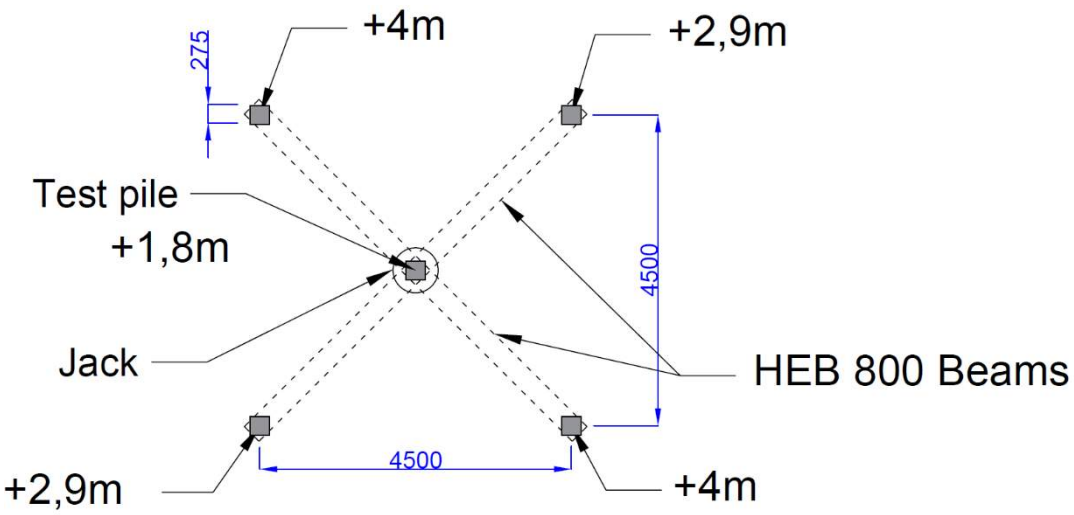
Figur 9. Tvärsnitt av pålelementet, samt skyddsanordning för kablarna

Figur 10. Skyddsrör vid pålsko

3.4 Provtryckningsanordning

För att hålla emot trycket från domkraften sitter fyra, 39m långa, mothållspålar kring testpålen. Över dessa svetsades ett kors av HEB800 balkar. Se figurerna nedan.

Kring pålarna gjöts 15cm grovbetong, även testpålen gjöts fast med en form mellan grovbetongen och pålen, detta för att pålen skulle vara sidostöttad i toppen. Själva domkraften går upp till 320 ton och var kalibrerad direkt innan försöket. Tryckgivare fanns installerat för att hålla trycket under nätterna.

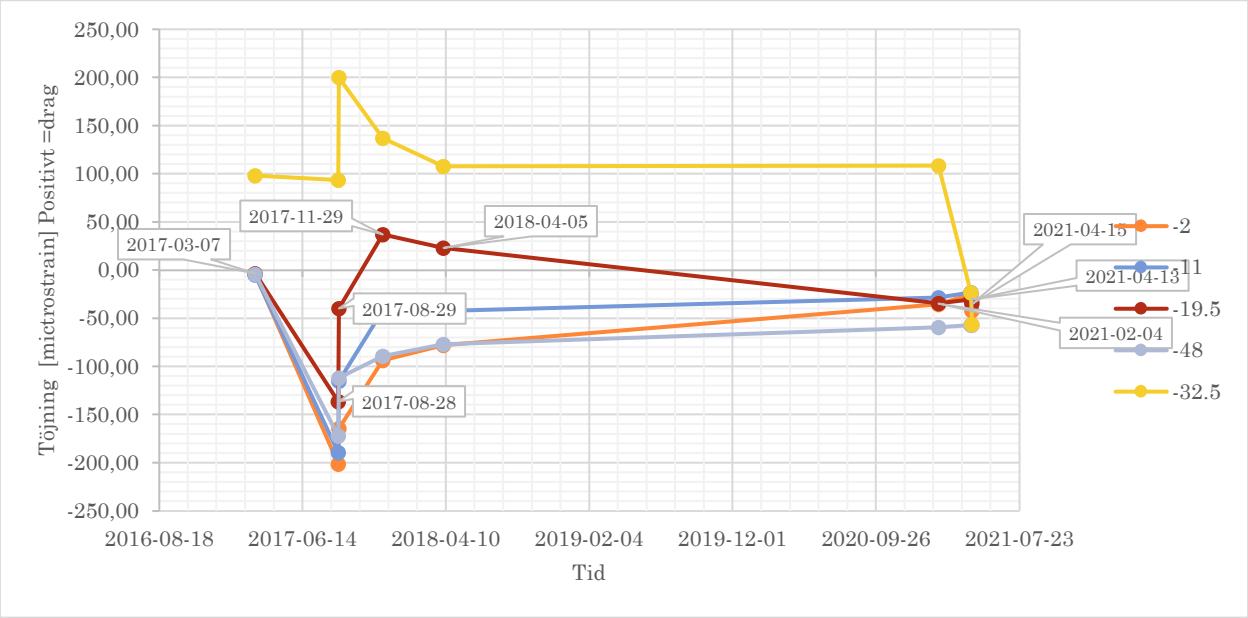


Figur 11. Testriggen

Figur 12. Bild på testriggen under försöket

3.5 Residualspänningar

Innan provbelastningen mättes givarna ett antal gånger: Innan gjutning, efter gjutning, innan slagning (2017-08-28), efter slagning (2017-08-29) och ytterligare 5 gånger innan testet utfördes 2021-04-15. Figur 13 Visar töjningsförändringen över tid sedan pålens gjutning 2017-03-07, positiva töjningar= drag.



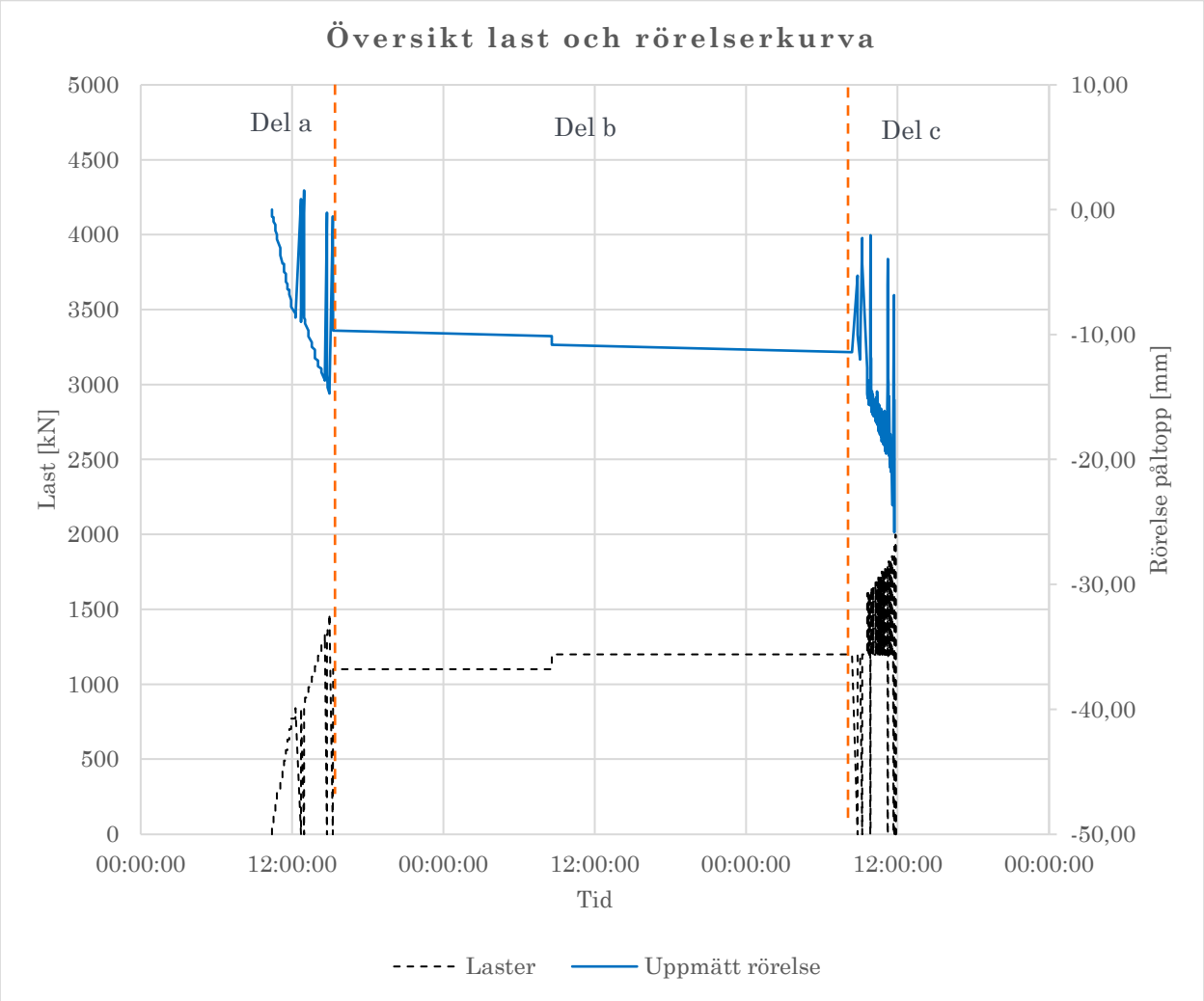
Figur 13 Visar resultat från töjningsmätning över tid för givare på nivå -2, -11, -19,5 och -48

4 Resultat och analys provtryckning

4.1 Upplastningsförfarande

Provtryckning kan delas in i tre delar för provbelastningen som illustreras i figuren nedan.

a) Korttidsbelastning likt den 2018, dock endast till 1460kN istället för 1820kN då brottlast ej är primärt för denna studie.
b) ”Långtidsbelastning”; Först applicerades en last på 1100kN som sedan efter ett dygn ökades till 1200kN för att undersöka om pålen kröp något.
c) Lastimpulser, för att simulera vindstötar, bromslaster med mera, då detta misstänktes ha ett styvare beteende.



Figur 14. Upplastningsförfarande pållagd kraft i övre grafen och deformation i nedre grafen för samma tidpunkt.

4.2 Geodetisk mätning

I första försöket, 2018, noterades att marken hävde sig något kring pålarna. För att minska denna felkälla sattes prismor på provpålen, mätbalken och mothållsbalkspelet. Se figurerna nedan. Mätningarna utfördes med totalstation vid fyra mättillfällen.

1. Direkt innan start
2. Efter långtidsförsöket
3. Under impulsförsöket
4. Efter ”brott” uppstått

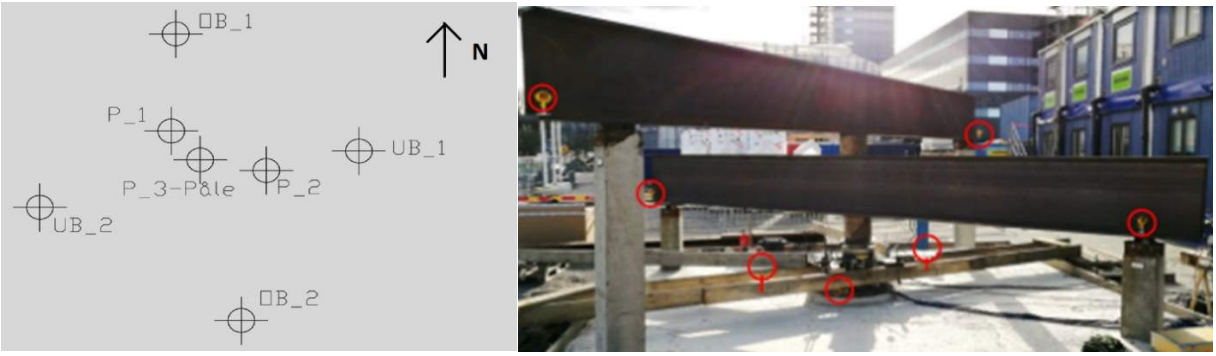
Förloppet kan sammanfattas så här: vid tryck på provpålen trycks samtidigt balkspelet uppåt och drar i mothållspålarna. Mothållspålarna mobiliserar skjuvspänning och för över denna till jorden, som i sin tur lyfter upp marken närmast. Detta påverkar träreglerna som används som referensbalk och alla värden från denna behöver därav justeras för denna effekt. Figur 16 visar mätresultatet från mätning på balkar och reglar.

En oväntad effekt uppstod, mätbalkarna satte sig under långtidsförsöket och uppvisade sättning på ca 1cm. Dessa två punkter motsäger prismat på pålen som jämfört med mätklockorna på pålen

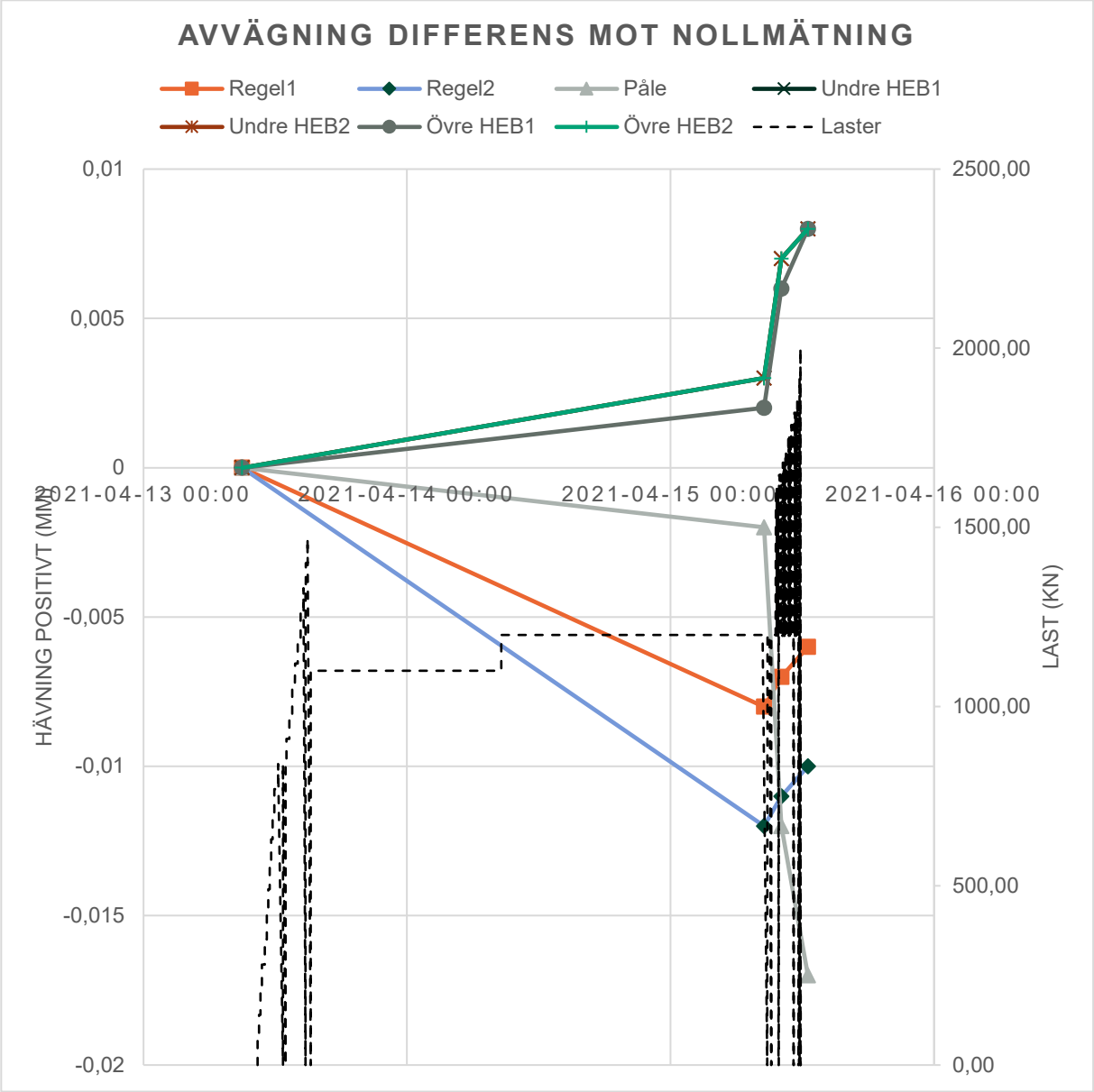
endast indikerade på en sättning motsvarande 2mm. Vad sättningen beror på skulle kunna vara att pålarna krupit något egenvikten och det långa upplaget eller faktumet att reglarna var skarvade.

Korrigeringarna i rapporten baseras på att sättningen av balken endast var 2mm över de två första dygnen, likt pålens differens mot mätklockorna. För övrigt fås en god överstämmelse på mätningarna.

Under provbelastningens gång noterades sprickbildning i grovbetongen kring mothållspålarna vilket tyder på en hävning i närområdet kring provpålen, se figur 17.



Figur 15. Geodetiska mätpunkter



Figur 16. Deformation mot tid på primäraxeln till vänster. Last i påltopp mot tid illustreras i svart streckat mot sekundäraxeln till höger

Figur 17 Att det var en rörelse blev tydligt i slutet av sista försöket där grovbetongen sprack något närmast mothållspålarna.

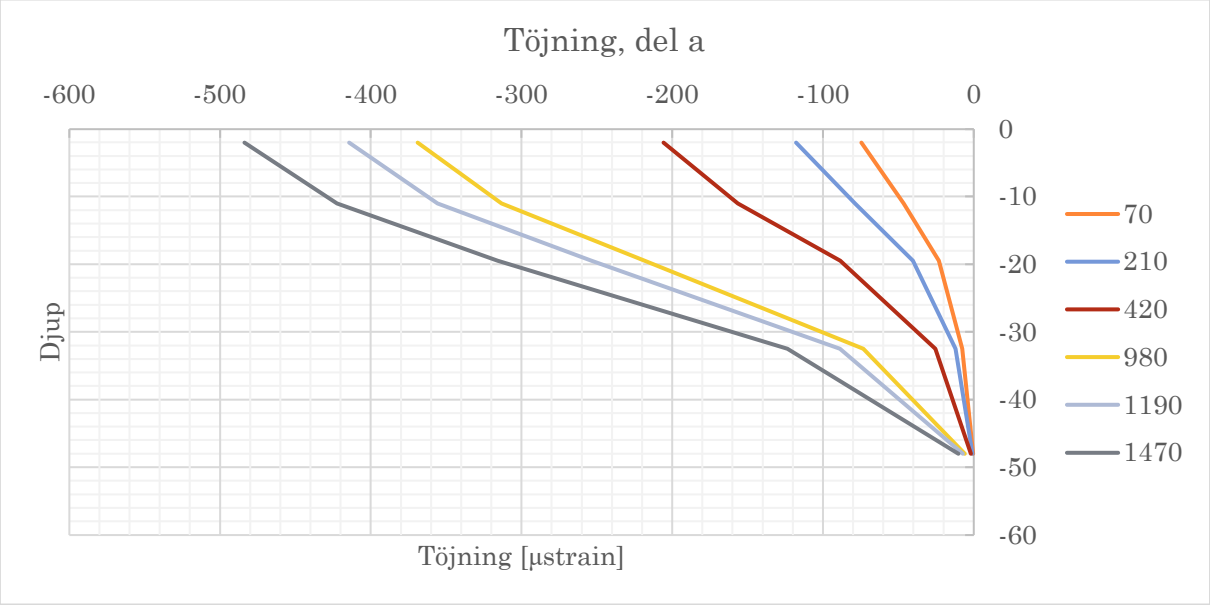
4.3 Korttidsbelastning, del a

Syftet med denna belastning var att se om styvheten hade förändrats något över de tre år pålen varit i leran sedan senaste belastningen. Upplastningen till 1470 kN skedde etappvis med laststeg om 70 kN som hölls i 7 minuter vardera innan nästa laststeg påbörjades

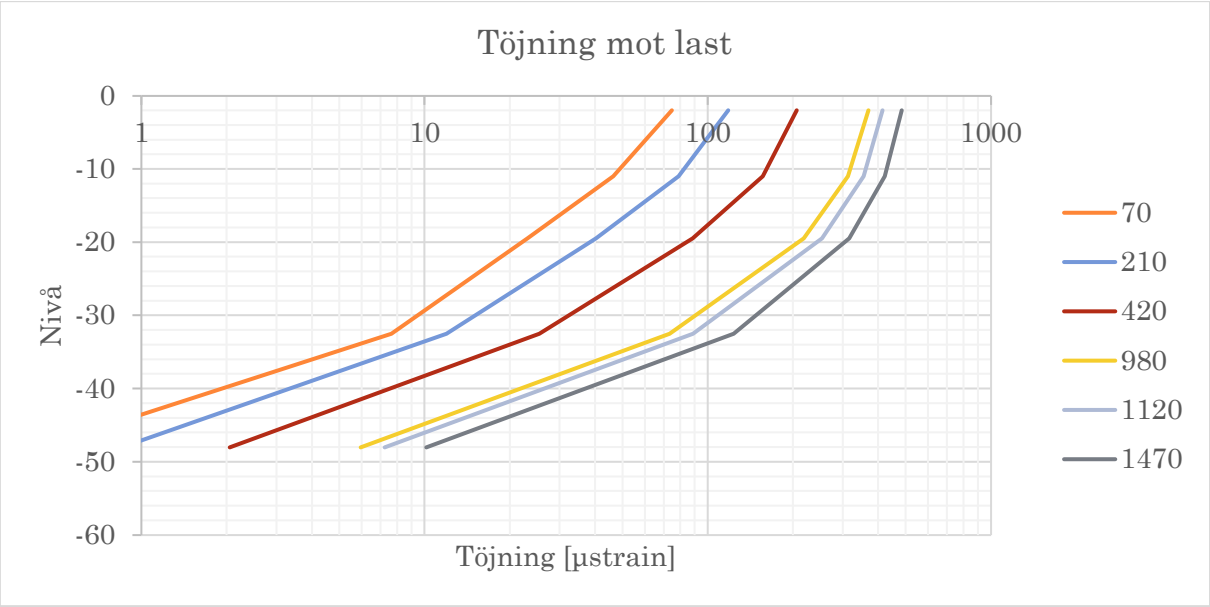
4.3.1 Töjningar, del a

Figur 18 visar töjningarna under upplastningen mellan 0 kN -1470 kN. Lasten mobiliseras först i toppen och sedan nedåt. Vid 1470 kN är fortfarande töjningarna i nivå -48m små, ca 10 µ-strain jämfört med nivå -2 med töjningar på ca 480 µstrain. Figur 19 visar töjningarna i logaritmisk skala att tydliggöra små töjningar mot djupet.

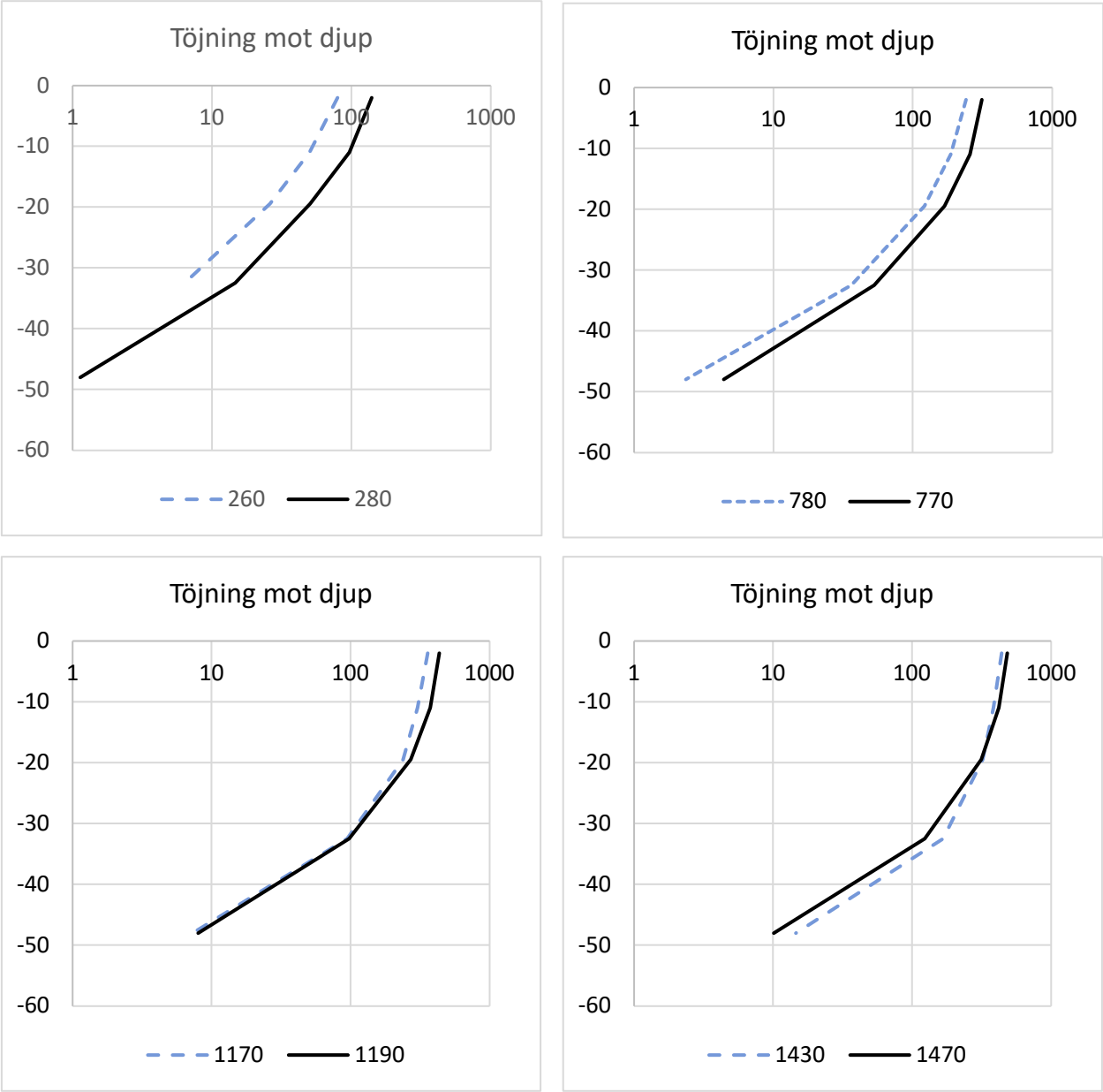
Figur 20 nedan illustrerar töjning i µ-strain mot djupet vid fyra lastfall från detta test och provbelastningen från 2018.



Figur 18. Töjningar [µ%] mot djupet för olika laststeg i [kN]



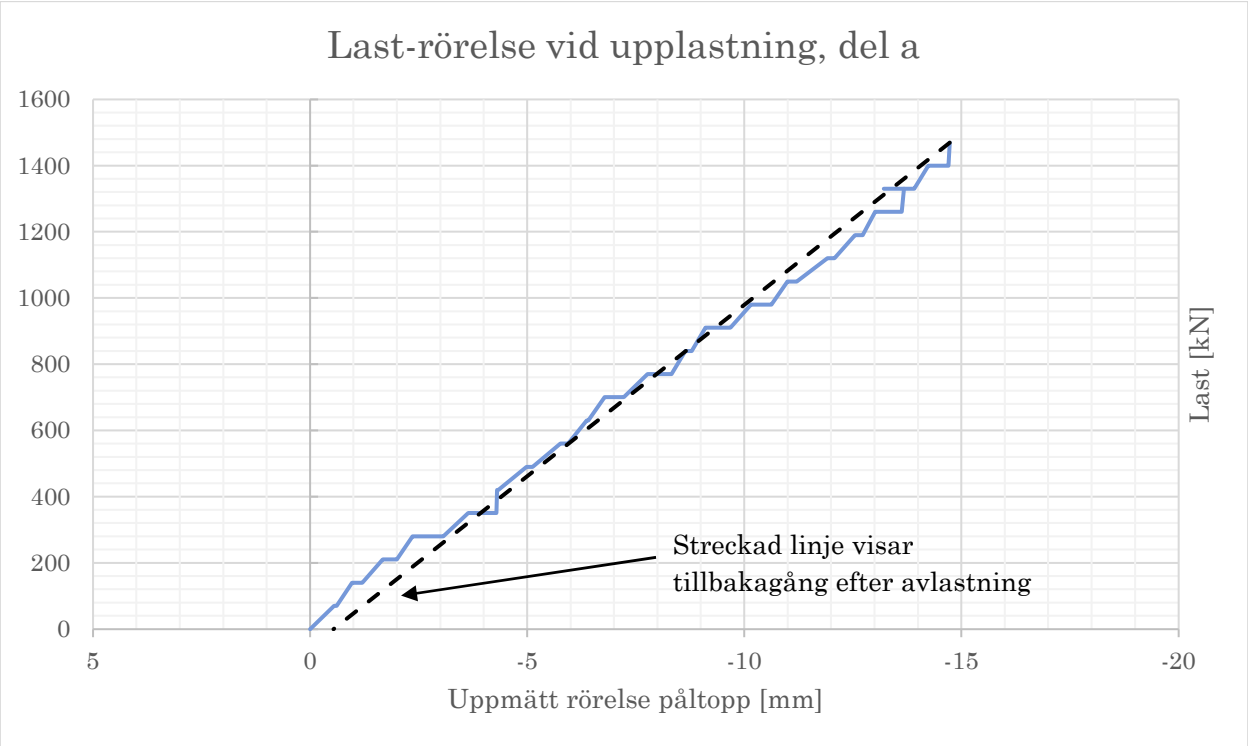
Figur 19. Töjning [µ%] mot last i [kN] för del a i logaritmisk skala för att se tydligare på de djupare nivåerna.



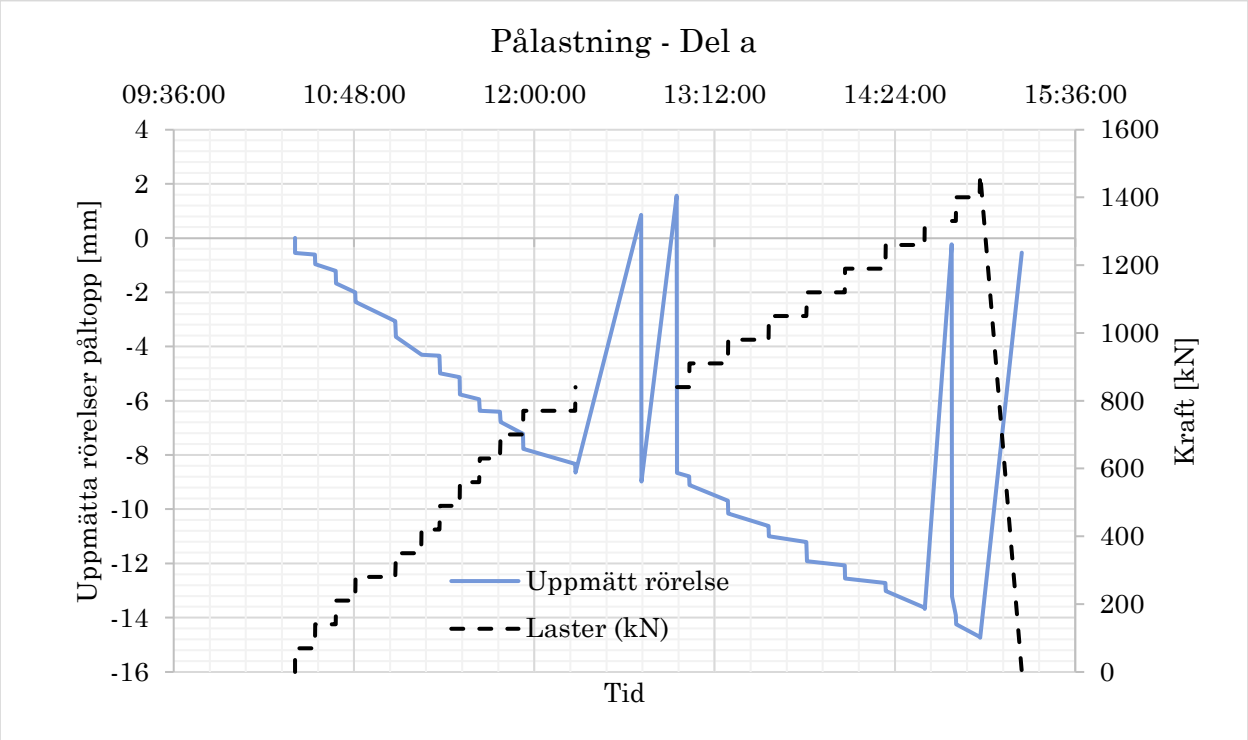
Figur 20 Töjning i µstrain mot djup för fyra laststeg. Svarta linjer är resultat från 2021. Blåstreckade linjer är resultat från 2018.

4.3.2 Påltoppsrörelser del a

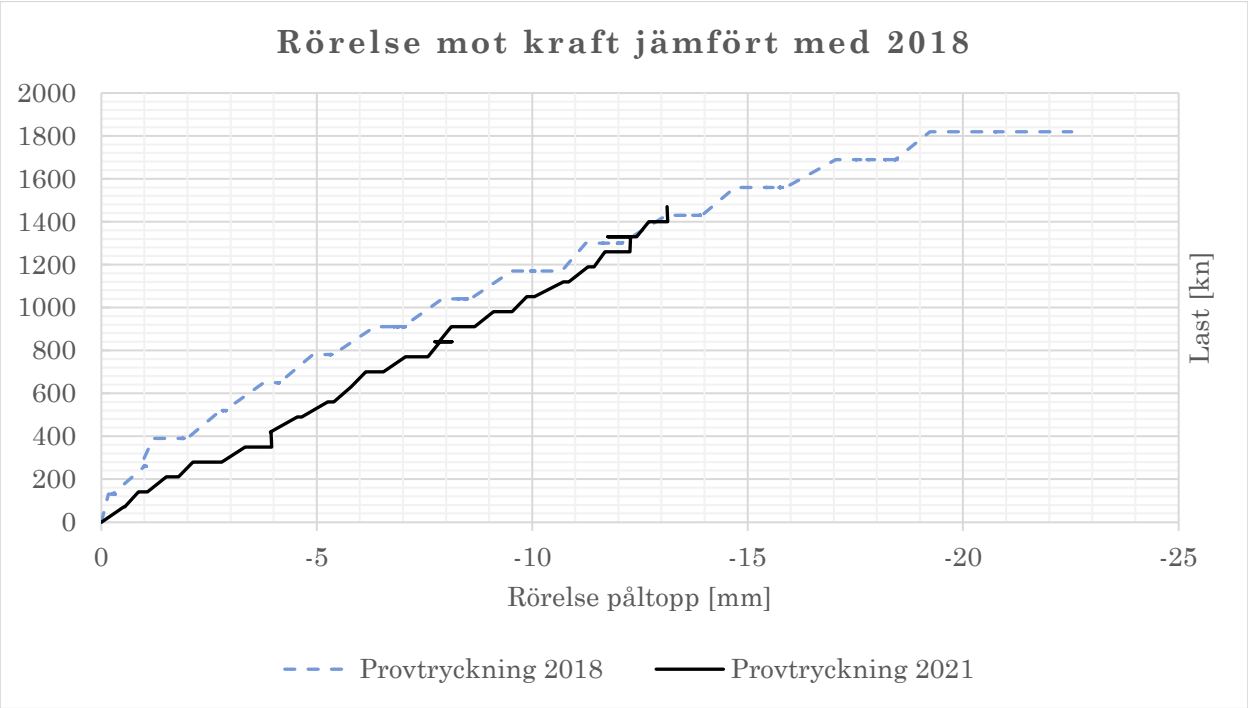
Figur 21 och 22 visar påltoppens vertikala uppmätta förskjutning för alla laststeg under uppkastningen del a. Påltoppens sjunkning vid sista upplastningssteget uppmättes till 14 mm. Avslutningsvis under del a avlastades pålen helt, mätningarna visar då en kvarvarande förskjutning i påltopp på 0,5mm, dvs en permanent sjukning i påltopp. Figur 23 jämför påltoppens rörelse vid upplastning med provbelastning 2018.



Figur 21. Belastning mot påltoppsrörelse för del a



Figur 22. Belastning mot last och tid.



Figur 23. Jämförelse av påltoppsrespons med försöket 2018.

4.3.3 Analys del a

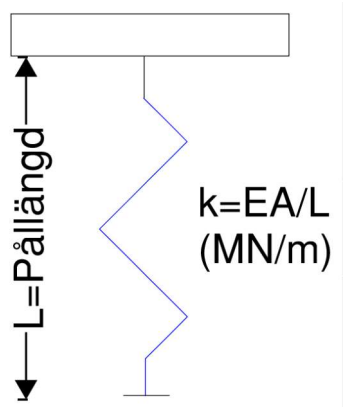
Även om laststegen för provbelastningen 2018 och 2021 skiljer sig åt visar analysen av töjningarna att pålen vid provbelastningen 2021 har ett vekare beteende än 2018 vid små laster. Detta verifieras även vid analys av rörelserna i påltopp vid provbelastningen, båda analyserna tenderar till liknande styvheter och rörelser först vid ca 1470 kN last i påltopp.

Sjunkningen som kvarstår efter upplastningen på ca 0,5 mm beror troligtvis på komprimering av sprickor och skarvar.

Fjäderstyvheten för intervallet 0kN-1470kN ligger för dessa laststeg på:

$$k := \frac{E \cdot A}{L} = 100.41 \ \frac{MN}{m}$$

Vilket motsvarar ungefär L/2 med E=35GPa. Vald definition av fjäderstyvhet illustreras i figur 24.



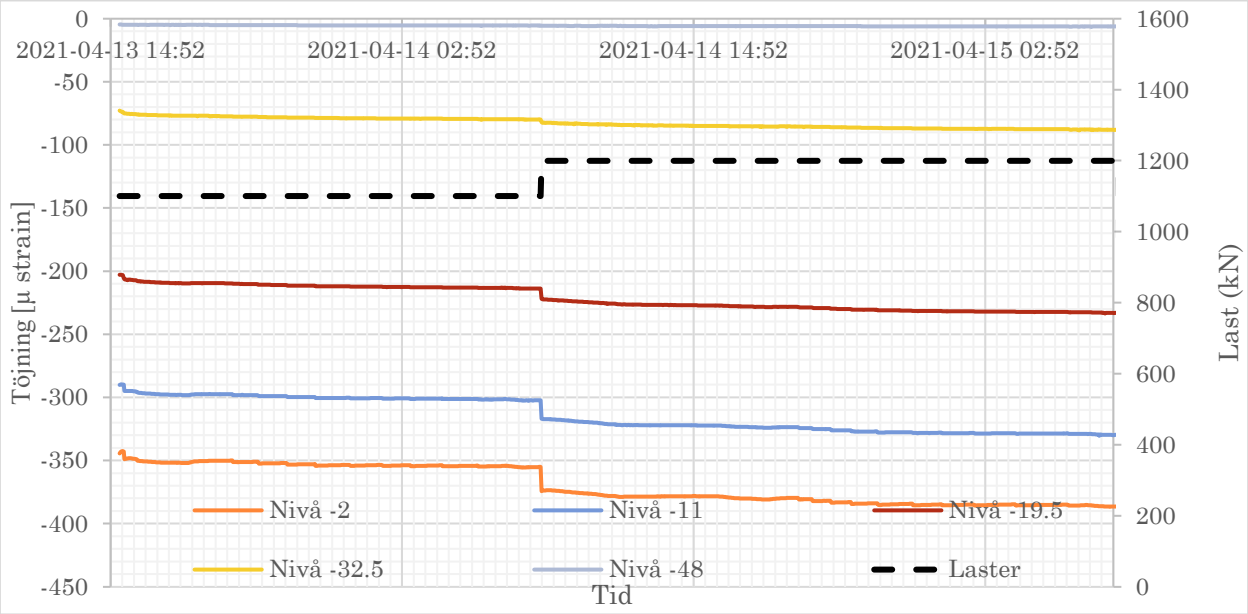
Figur 24. Vald definition av fjäderstyvhet

4.4 Långtidsbelastning, del b

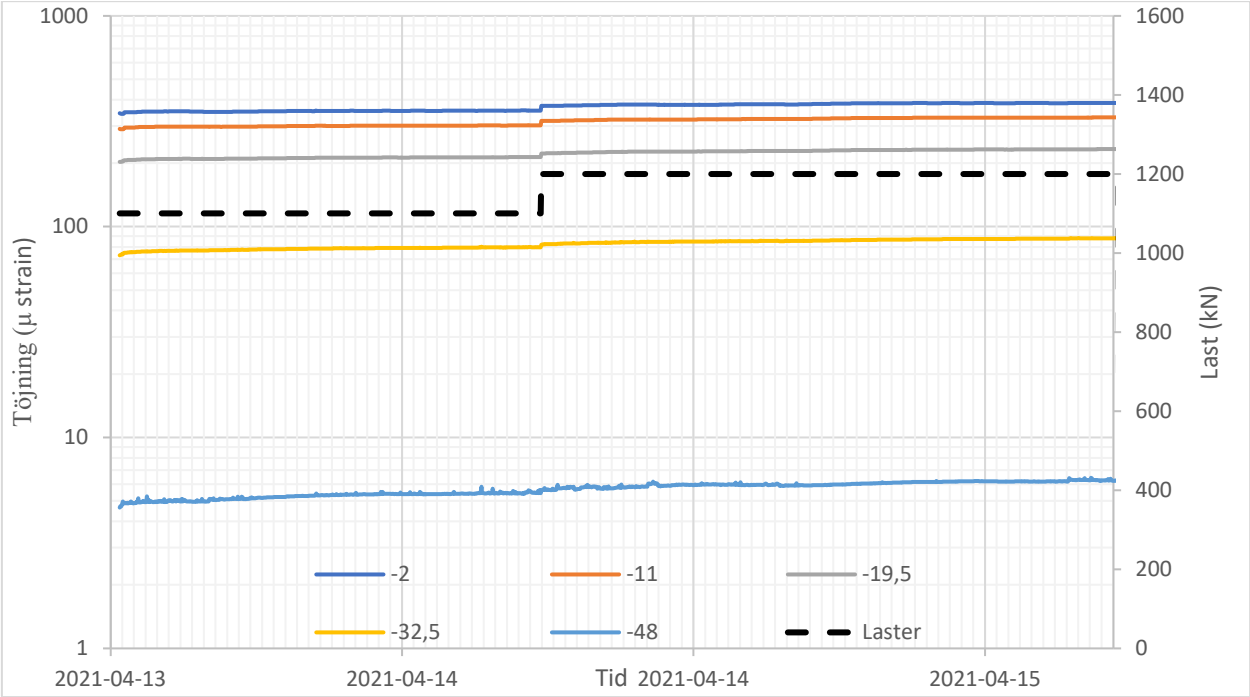
Syftet med detta försök är att undersöka om pålen kryper med belastningar kring 55-65% av dimensionerande last, något som kan inträffa för en riktig produktionspåle med säkerhetsfaktorer. Vidare syftar långtidbelastningen till att se om lasterna kryper nedåt i pålen med Lasten hölls totalt nästan två dygn. Först en dag (17.5h) med 1100kN, varpå små deformationer uppstod. Därefter ökades lasterna till 1200kN. Denna hölls som en plattform där impulserna i del c utgick ifrån.

4.4.1 Töjningar, del b

Töjningarna visade på kryp framför allt för steget med 1200kN. Se figurerna nedan, där första grafen presenterar en linjär skala och andra grafen är logaritmisk för att belysa de djupare töjningsgivarna där styvheten är betydligt högre.



Figur 25 Töjningar mot tid på olika nivåer. Hacket som ses ungefär i mitten är där lasten ökar från 1100kN till 1200kN



Figur 26 Logaritmiska töjningar (microstrain), med logaritsmisk skala blir töjningarna och krypet tydligare för -48 och -32.5

Kryptöjningarna har studerats på två olika sätt. Först har den totala kryptöjningen sammanställts för 1100-1200kN stegen, detta visar på att töjningarna är ca 40% större för 1200kN-laststeget jämfört med 1100kN se tabellen nedan. Värt att notera är att den totala tiden för laststeg 1100kN är ca 17.5h jämfört med 24h för 1200kN laststeget. Andra studien beträffar kryphastigheten de sista två timmarna. Detta presenteras i Tabell 2 och visar på 2-3ggr större kryphastighet för 1200kN jämfört med 1100kN-steget.

Tabell 1: Total töjning per laststeg, (17.5h på 1100kN och 24h på 1200kN)

	Totaltöjning per hela laststeget (µ%)				
Last (kN)	**-2**	**-11**	**-19,5**	**-32,5**	**-48**
1100	-6,8	-7,3	-6,5	-4,5	-0,5
1200	-12,7	-12,6	-10,7	-5,5	-0,6

Tabell 22: Kryphastighet sista två timmarna för varje laststeg

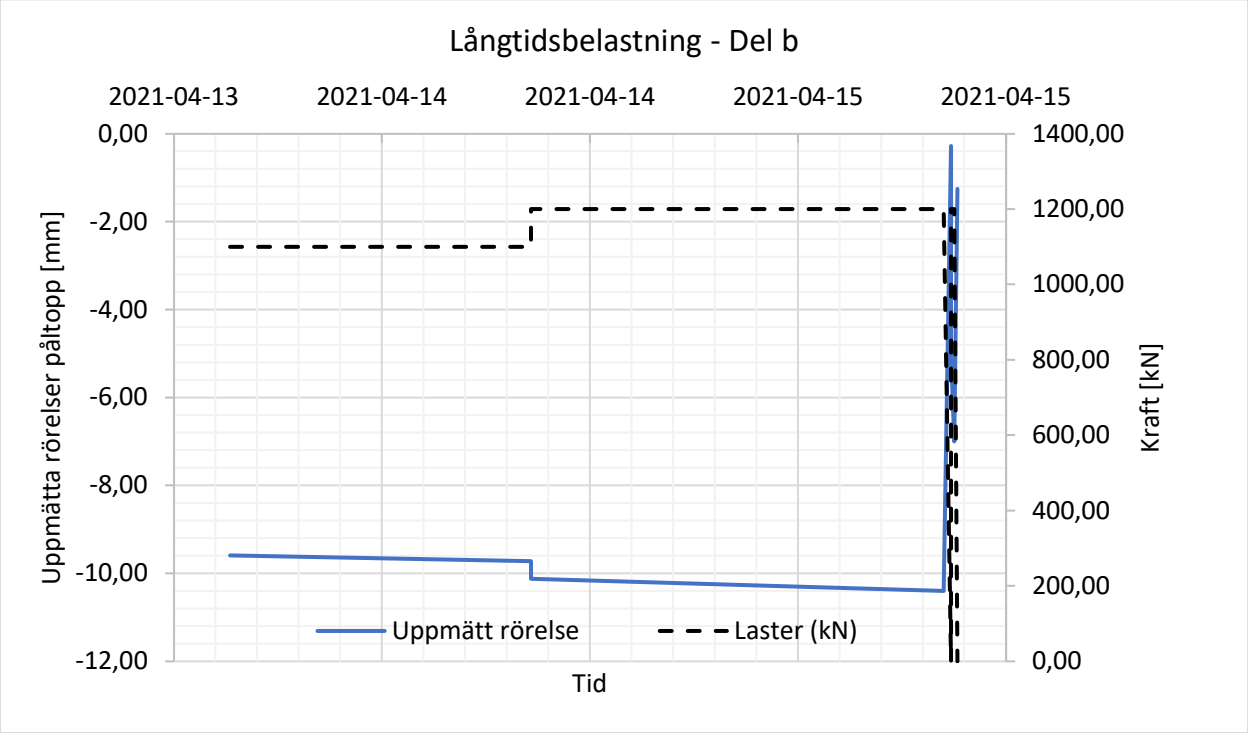
	Kryphastighet (µ%/h)				
Last (kN)	**-2**	**-11**	**-19,5**	**-32,5**	**-48**
1100	-0,31	-0,37	-0,22	-0,10	-0,01
1200	-0,72	-0,62	-0,44	-0,31	-0,02

4.4.2 Påltoppsrörelser, del b

De geodetiska mätningarna noterade en del ”oväntade” effekter. En sättning på påltoppen med ca 1mm samt en sättning på träbalkarna på ca 8-10mm, vilket är orimligt. Värdena justeras för en sättning på 2mm pga nedböjning av träbalkarna (samtidigt som en generell hävning av markytan skett).

Då vi endast har en geodetisk mätning innan och en mätning i slutet av långtidsförsöket där vi fångat hävningen av mätbalken, är denna interpolerad med tiden Mätklockrörelserna fångade i figuren nedan är kompenserade för denna effekt.

I figuren nedan kan det ses att lasten 1100kN ger ca 9.6mm påltoppsdeformation. Efter ca 17.5h har denna ökat till 9.7mm, 0.006mm/h. Varpå lasten ändras till 1200kN, initialt ger detta 10.1mm som på ett dygn kryper till 10.4mm, 0.011mm/h.



Figur 27 Last mot påltoppsrörelse och tid mätt med mätklockorna, kompenserat för sättning av mätbalk

4.4.3 Analys, del b

Resultaten tyder på att kryphastigheterna är betydligt större för 1200kN jämfört med 1100kN. För de understa nivåerna är töjningarna små och lasten har inte krupit nedåt än. Däremot tyder kryphastigheterna på att lasterna omfördelas djupare ner i profilen.

En viktig felkälla för denna del av försöket är att mothållspålarnas mobilisering har hävt omkringliggande mark inklusive referensbalken och att mätbalken böjt ner av den långa spännvidden. Fler mättillfällen hade varit önskvärt nu i efterhand för att korrigera för denna effekt.

Axiell fjäderstyvhet för två dagars last på 1100 och 1200kN ger en fjäder på: $k := \frac{E \cdot A}{L} = 105 \frac{MN}{m}$
Vilket motsvarar ungefär ½ av pålens längd med E=35GPa.

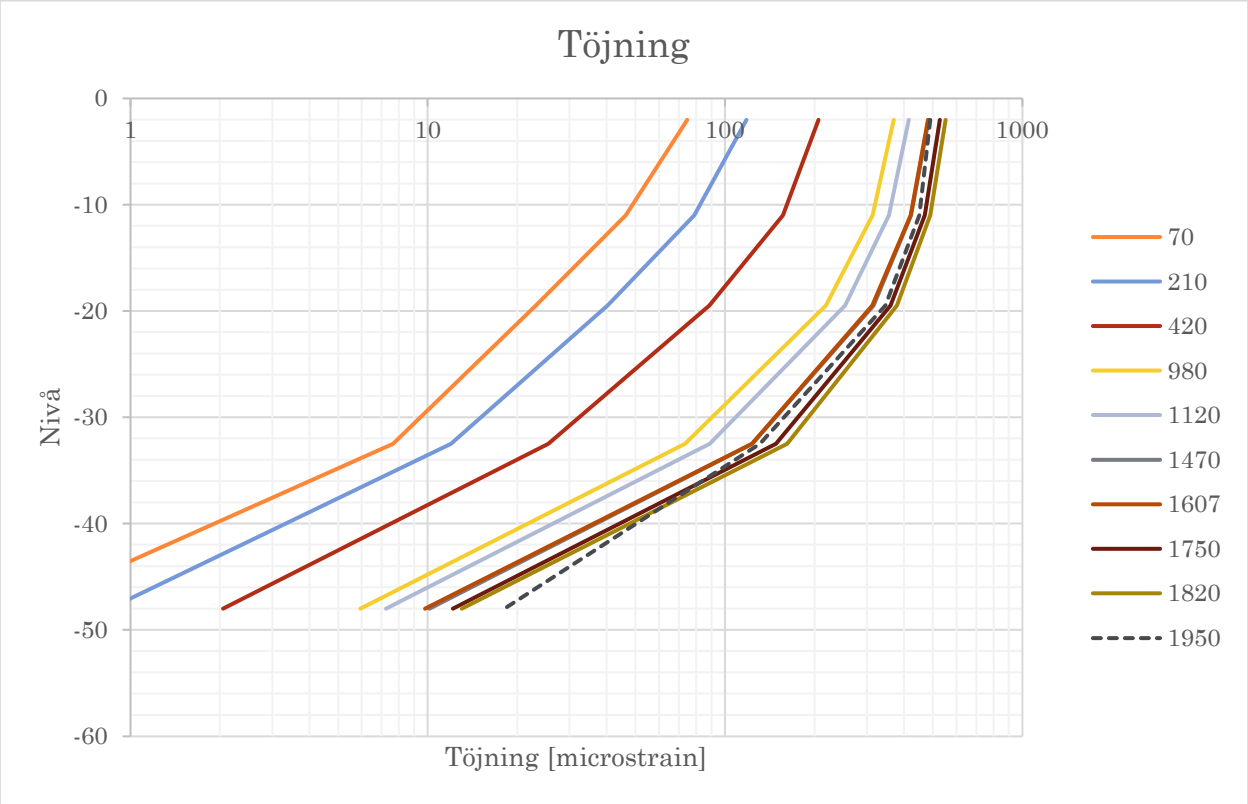
4.5 Lastimpulser, del c

Syftet med denna del av provtryckningen är att undersöka hur styvheterna ser ut för korta upprepade på och avlastningar, som kan simulera en variabel last med kort lastvaraktighet, exempelvis en vindstöt. Lastvaraktigheten är i dessa steg endast ca 1 minut.

4.5.1 Töjningar del c

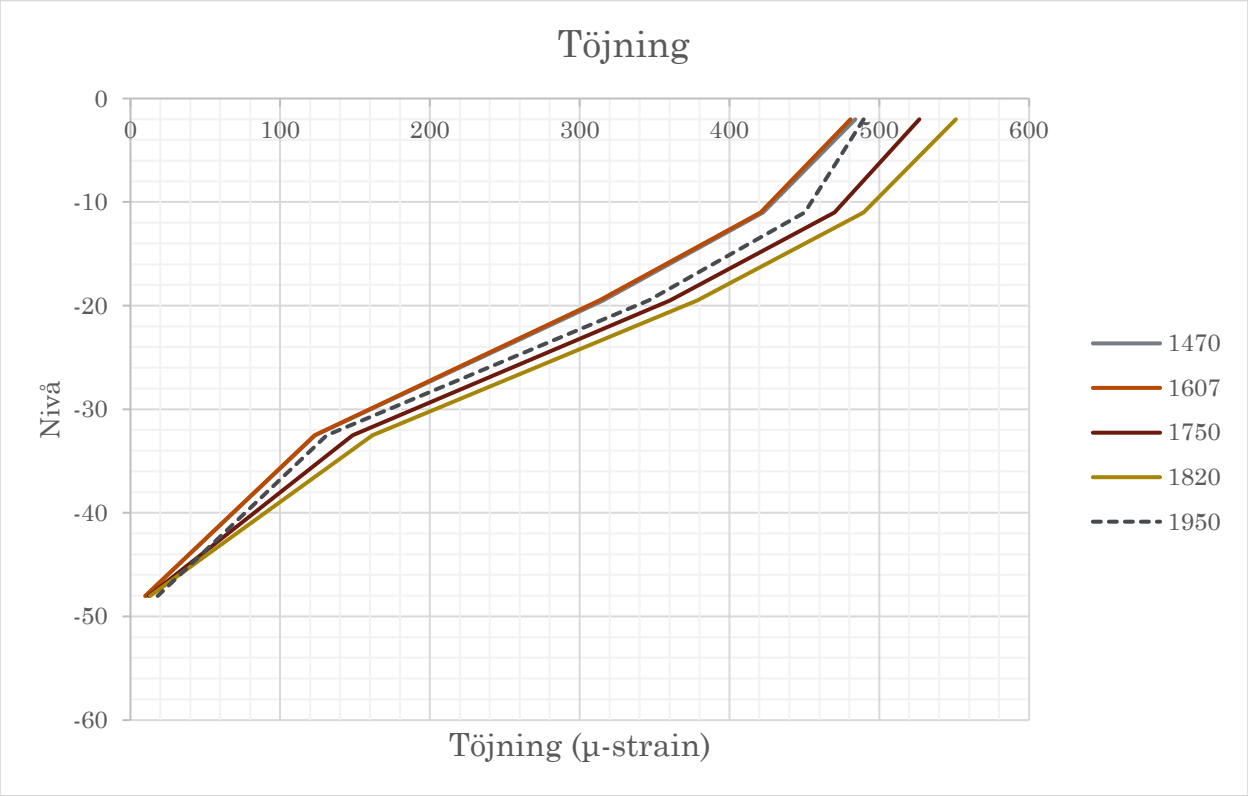
Det enda som med säkerhet kan sägas om fördelningen mot djupet är töjningarna då den axiella styvheten är relativt okänd mot djupet, därmed är den faktiska lasten i varje nivå omöjlig att precisera.

Töjningen ökar generellt med lasten och mobiliserar först i toppen och sedan nedåt. Vid brottlasterna nära 1950kN minskade töjningen på några nivåer vilket tyder på ett töjningsmjuknande beteende, i samtliga laststeg ökade töjningarna förutom detta. Se figuren nedan.



Figur 28 Töjning, µ-strain mot nivå, notera att töjningarna är logaritmiska för att lyfta fram de nedre nivåerna som är betydligt styvare.

De sista impulsstegen presenteras i linjär skala i figuren nedan:

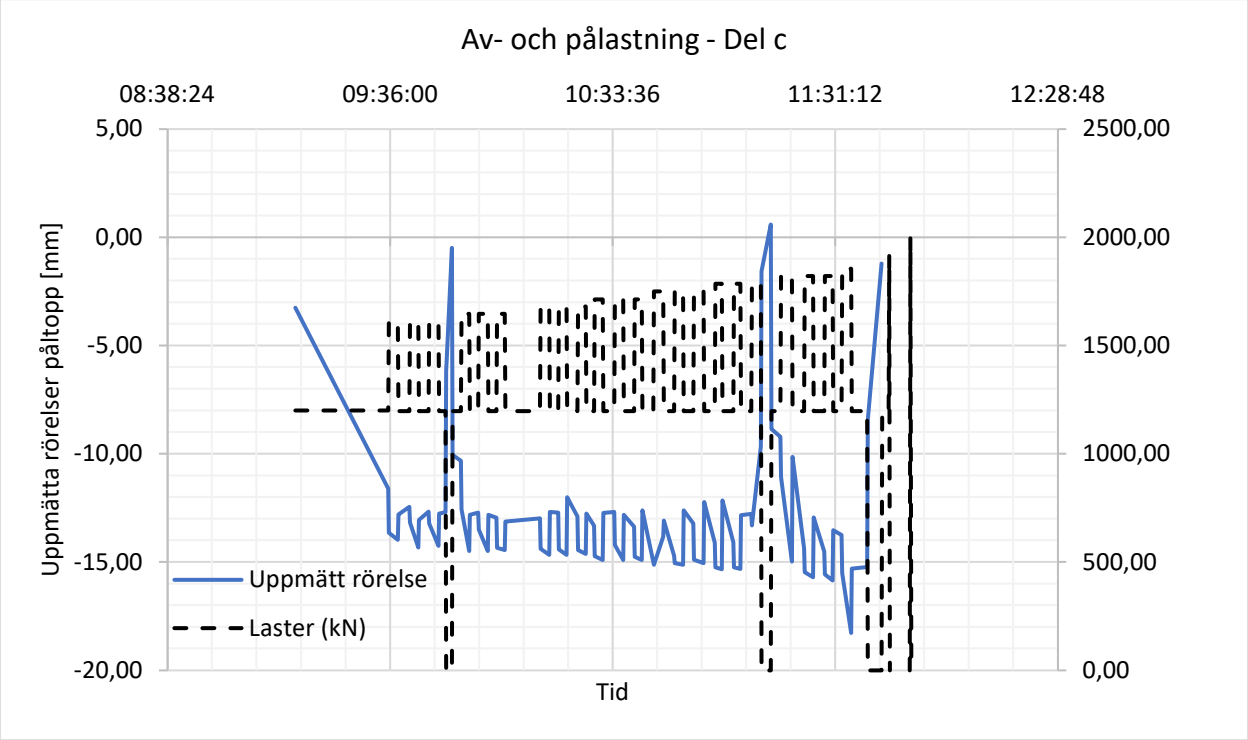


Figur 29. Töjningar mot djup per laststeg

4.5.2 Påltoppsrörelser, del c

Balkrörelserna tyder på en sättning på ca 2mm fram till slutet av långtidsförsöket och för impulssteget en hävning med ca 2mm i slutet av försöket.

Rörelserna är uppmätta med mätklockorna, kompensation för rörelser av är enligt ovan. Med ökad last fås för samtliga steg en ökad plastisk deformation i påltoppen. Storleksordningen på den plastiska delen är dock fortsatt små upp till ca ”1800kN stötarna”.



Figur 30. Rörelser av påltoppen för del c, med impulslaster om ca 1 minut och sedan avlastning ner till 1200kN

4.5.3 Analys, del c

Styvheten för impulserna är väldigt hög på de korta på och avlastningarna.

Impulserna i spannet 1200kN->1712kN erhålls en axiell styvhetsfjäder på:

$$k := \frac{E \cdot A}{L} = 205 \ \frac{MN}{m}$$

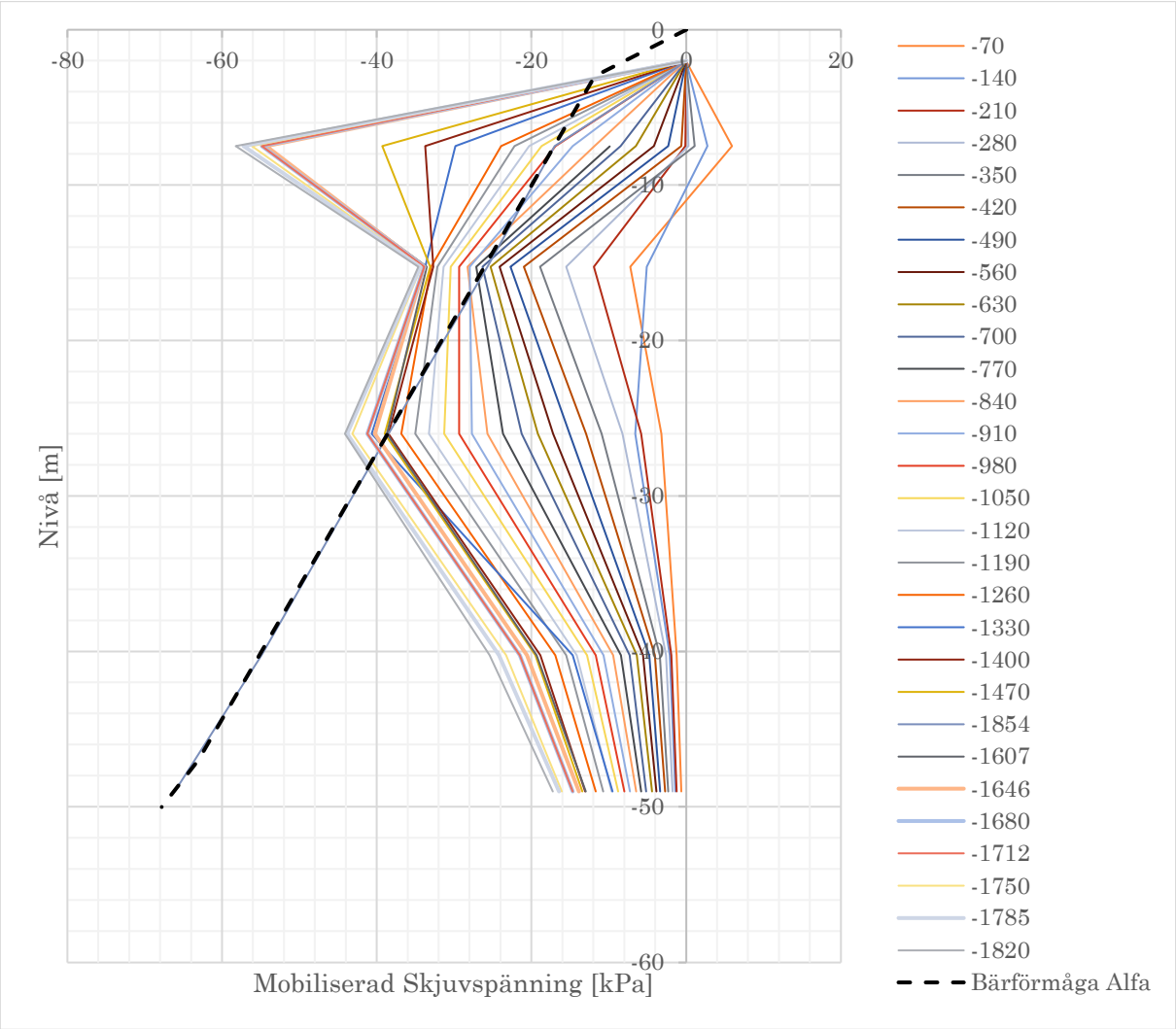
Detta innebär med E=35GPa att ca L/4 används. Lasten kryper delvis nedåt men jorden är styvare vid korta belastningar vilket ger en betydligt rappare respons.

Av och pållastning från 0-1785kN ger en styvhet som är lägre, motsvarande ca E=80GPa med L=50m.

$$k := \frac{E \cdot A}{L} = 121 \ \frac{MN}{m}$$

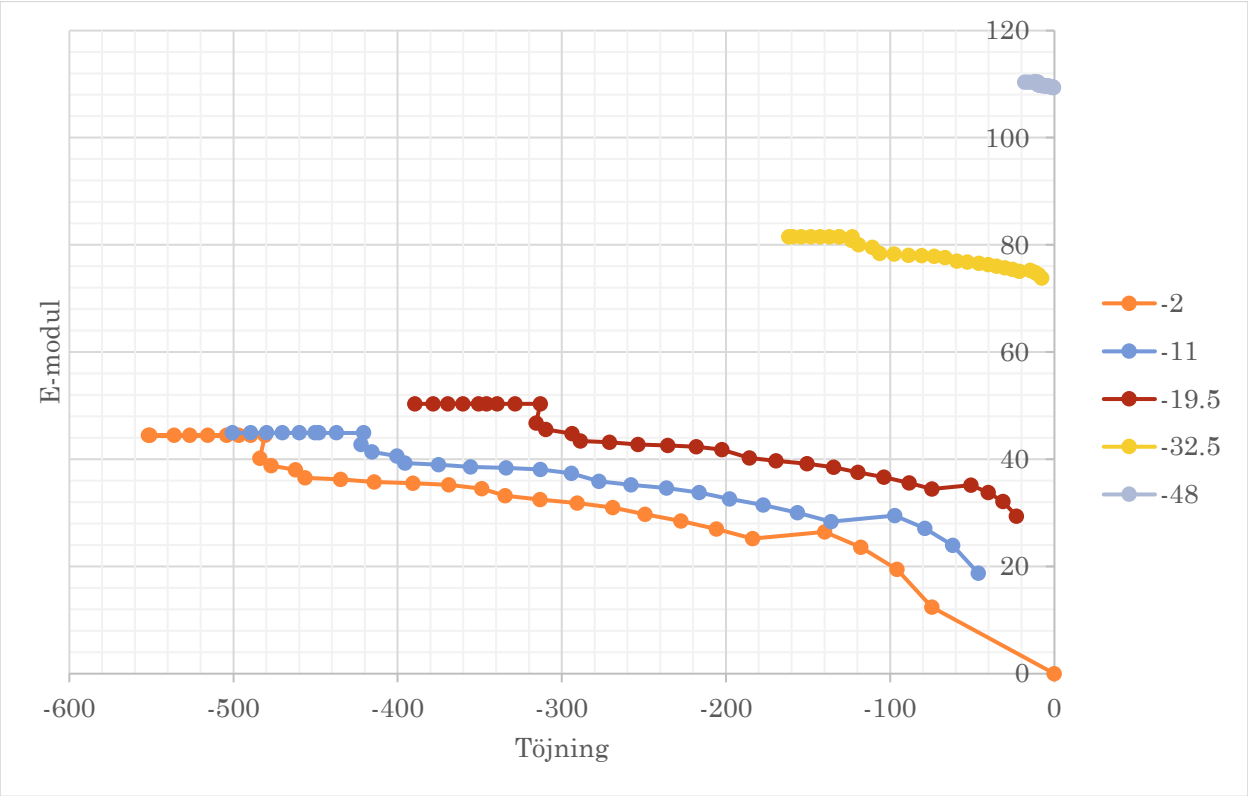
För att analysera den faktiska lastupptagningen i alla nivåer behövs ett antagande om styvheten i pålen. I själva verket är denna styvhet en kombination av pålens och jordens styvhet, råhet, tid, töjning, area för brottvärsnittet. I denna analys förenklas styvheten till pålens E-modul och Area för påltvärsnittet.

Initialt utfördes analysen med konstant E-modul 35 GPa för alla nivåer. Resultatet visade orimligt små laster i pålens lägre nivåer trots att pålens geotekniska bärförmåga i stort sett var överskriden på strax över 1850 kN. Det resulterar då i att majoriteten av lasten i alla laststeg under geotekniskt brott måste tas upp i pålens högre nivåer för att pålen i teorin inte ska sjunka. Figur 31 visar mobiliserad skjuvspänning för samtliga laststeg med antagen E-modul på 35 GPa. Streckad linje motsvarar brottlinje för beräkning med α-metoden mot direkta skjuvförsök. α-faktorn är reducerad till 0,76 för att motsvara ett brott på 1854 kN. Samtliga laststeg efter 700kN bryter brottlinjen vilket innebär att pålen bär mer last än vad den geotekniskt klarar av.

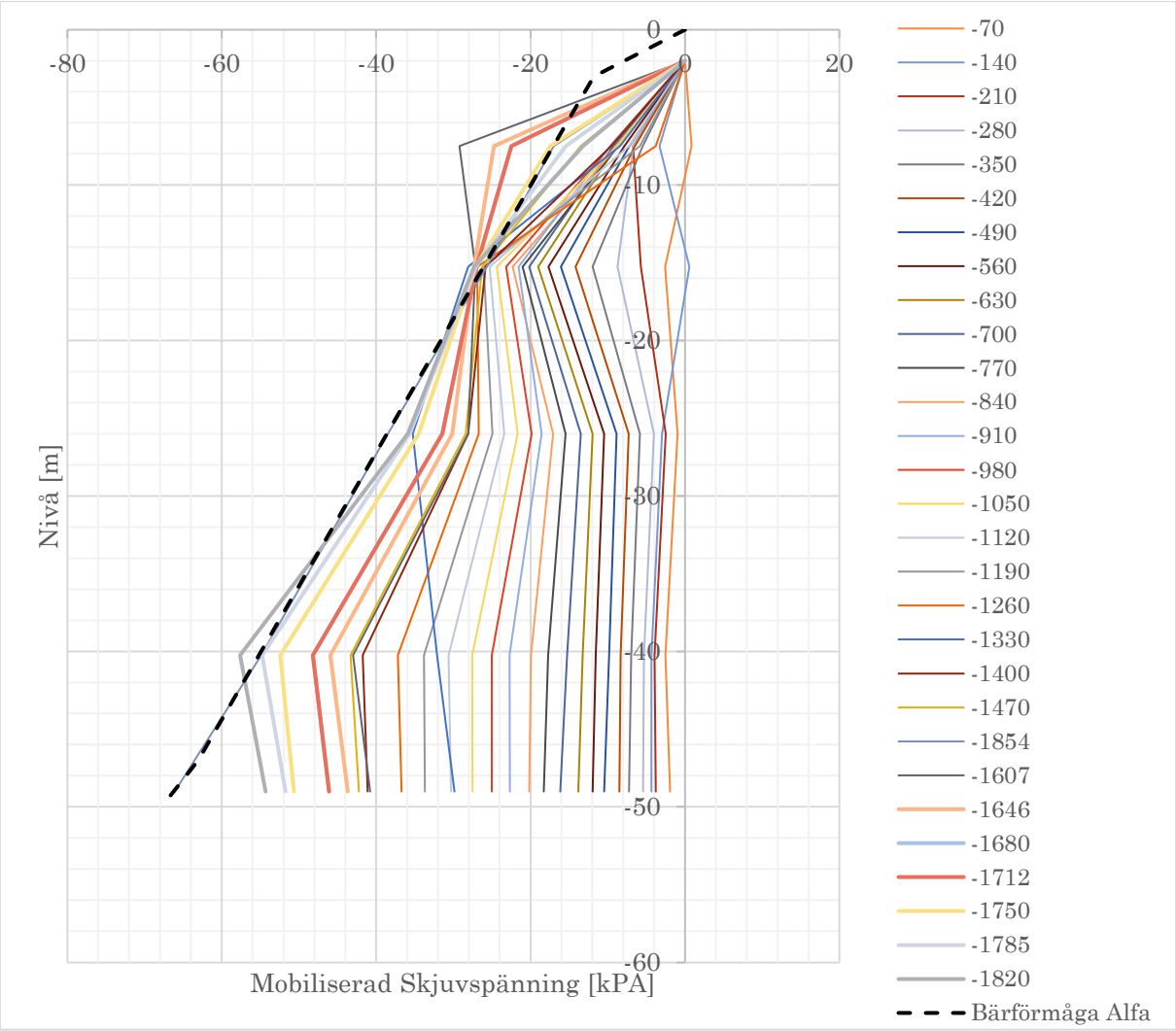


Figur 31. Spänningsfördelning med konstant E-modul mot djupet.

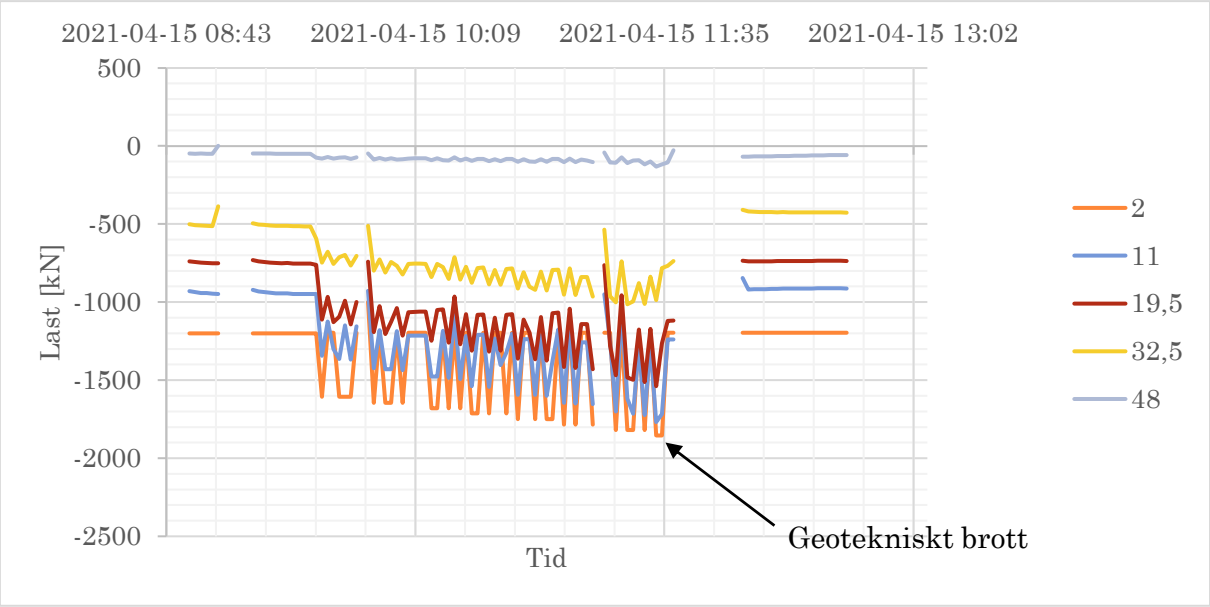
Med ovanstående metod landar orimligt mycket last ovanför ”brottlinjen” och ett mer rimligt tillvägagångsätt att bestämma styvhet är att utgå från laststeget 1854kN, vilket är steget innan omfattande töjningsmjukning uppstår. Vid detta laststeg kan då antagandet göras att alla nivåer mobiliserat hela sin skjuvhållfasthet till fullo. Med detta går det att bestämma en axiell styvhet för varje nivå. Denna har i efterföljande analyser satts som konstant oberoende töjning för impulsstegen, och för de lägre laststegen interpolerats med avseende på dε/dσ. Denna funktion av styvheten ger ett beteende som inte avsevärt skjuter över ”brottlinjen” för något laststeg. Styvheterna presenteras i figur 32 nedan och resultaten av mobiliserad skjuvning mot djupet i figur 33. Figur 34 beskriver lasten mot tiden för varje nivå för del C. För vissa låga laststeg är fortfarande funktionen något för styv, vilket också går att se på -2 nivån som är den enda vi faktiskt kan bakräkna för hela lastspannet.



Figur 32. Funktion för E-modul eller axiell styvhet per nivå. Orange linje motsvarar bakräknad modul från pålagd last i nivå -2. Övriga funktioner är interpolerade.



Figur 33. Mobilserad skjuvspänning per laststeg med E-modul utvärderad från skjuvförsök jämfört med brottlasten.



Figur 34. Last mot nivå och tid för del C.

5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

5.1 Residualspänningar

Före försöket erhölls stora tryck vid gjutning, varpå sedan bli stora drag vid drivningen. Dessa drag skulle kunna bero på hydraulisk uppsprickning av pålarna vid drivningen. ”hydraulic fatigue” se t ex pålkommissionens rapport 88, (Bernander, 1992), detta ”fenomen” inträffade för samtliga fyra monitorerade pålar i projektet E45 som mättes mellan varje skarv. Det finns begränsat av information inget i litteraturen om detta fenomen förutom för pålar i vatten, men författarnas tes är att pålarna skapar en zon kring sig där jorden är så störd/sönderslagen, vid drivning med litet spetsmotsstånd skapas en dragvåg vid drivningen, vilket skulle kunna innebära att lera/vatten sugs in i pålen när dragvågen går igenom den. När sedan nästa tryckvåg kommer spräcks pålen och små mikrosprickor uppstår längs med pålen.

Efter drivningen ökade dragpåkänningarna något en period där det var lite massundanträngning som påverkade (hävde marken). Dessa dragpåkänningar påvisades även för pålarna under konstruktionen i E45, i pågående exjobb på Chalmers av Staxäng och Stafström. Spänningarna har sista åren minskat något, troligtvis påhängslast, när marken har börjat återsätta sig.

Ca 50 pålar slogs under perioden mellan försök ett och försök två mätperioden inom 100m.

5.2 Geoteknisk bärförmåga

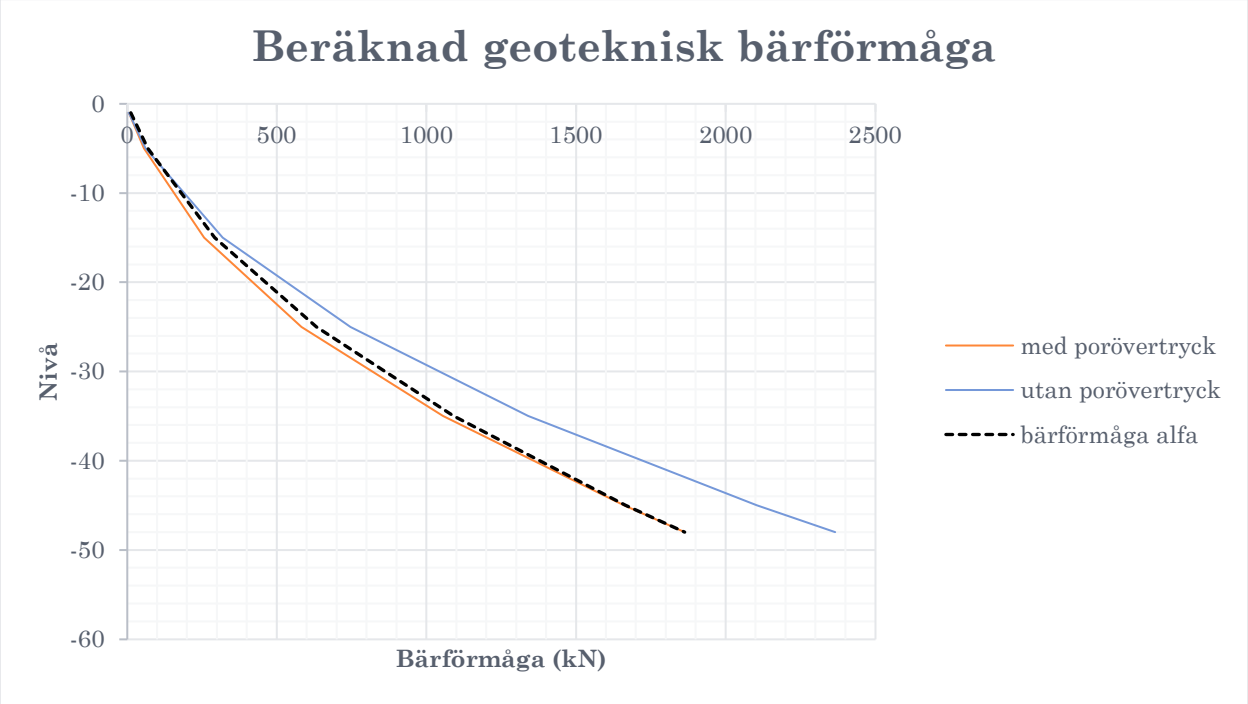
Resultatmässigt blev bärförmågan något högre än första försöket 2018. Maximal last var ca 1950kN i detta försök under 1 minut att jämföra med ca 6 minuter på 1820kN vid försöket 2018. På laststeget 1950kN uppstod tydliga plastiska deformationer och lasten var mycket svår att hålla, vid denna last uppstod dessutom tydligt töjningsmjuknande beteende för de övre nivåerna. Ytterligare ett försök gjordes för att öka ytterligare till 2MN, men då klämdes hydraulslangen av pga stora deformationer, och lasten nåddes aldrig. Den marginellt ökade bärförmågan kan bero på flera faktorer:

- Högre effektivspänning, vilket portrycksspetsarna ca 100m därifrån inte tyder på, snarare tvärt om.
- Att pålen har en fiktivt större area då fastare lera kan ha bildats utanför pålen när betongen bränt. Då töjningarna är likartade 2018 tyder inget på detta.
- Kortare belastningssteg
- Bättre kompressor och bättre möjlighet att hålla trycket på rätt nivå jämfört med försöket 2018.

Kanske den viktigaste faktorn är att belastningstiden var betydligt kortare i detta andra försök, endast ca 1min/impuls.

Sätts bärförmågan för 15min till 1850kN ungefär ger detta en bakåtberäknad α-faktor landar på ca 0.77 när val av odränerad skjuvhållfasthet görs strikt med hjälp av direkta skjuvförsök.

Med effektivspänningsanalys fås en ß-faktor på ca 0.25 för försöket förutsatt portryck enligt UP1004P. Se figuren nedan för bakåtberäknade bärförmågor mot djupet.



Figur 35. Bakåtberäknad bärförmåga med α-metoden i svart samt β-metoden i blått och orange.

Något som troligtvis haft stor effekt på resultatet är att ca 200 000 m pålar slagits i närområdet, portrycket kan mycket väl vara högre än det antagna. Portrycksspetsar finns i området men tyvärr ej nära provpålen. De portrycksspetsar som finns tyder på ett porövertryck från innan pålningen startade med ca 0-20kPa och hela 0-90kPa vid provtillfället. Detta skulle innebära en ytterligare tillgänglig bärförmåga på ca 500kN teoretiskt, med de långa dräneringsvägar i kombination med den låga permeabiliteten för leran som är rådande kommer detta dock ej inträffa inom konstruktionens livslängd då full dränering av detta porövertryck tar överslagsmässigt ca 10 000 år.

Ytterligare en tänkbar felkälla är halvröret som sitter på utsidan av betongpålen. Detta ger en något större tvärsnittsarea men lägre friktion. Halvröret är ej lika styvt som pålen och kan ha deformerats mer och därmed ej fört över lika mycket last till leran som det betongtvärssnittet under skulle ha gjort.

Därför hade det varit intressant att provtrycka pålar utan foderrör.

5.3 Pålens och jordens axiella styvhet

Styvheten har varit svår att bakåträkna för denna fortsättning då försöket har så olika laststeg och lastvaraktighet. Styvheten beror på många faktorer.

- Lastsituationen i pålen (draget eller tryckt tvärsnitt)
- Styvheten i jorden (som ökar rejält mot botten av pålen)
- Varaktigheten i lasten, där för korta belastningar lasten tas högre upp i manteln till större del.
- ”Arean”, tidigare försök har visat på att brottet för uppdragna pålar inte går mellan betong och påle utan en bit utanför. Denna kanske varierar med djupet.

De enda säkra slutsatserna som kan dras från dessa försök är baserat på vilka töjningar som uppstått på olika nivåer, allt annat är baserat på antaganden om moduler.

Pålen som är gjuten med C60/75 betong och kraftigt armerad, baserat på stålets (kända modul) och försök av provkuber vid gjutning borde en medel- E-modul fås på minst 46GPa för tvärsnittet.

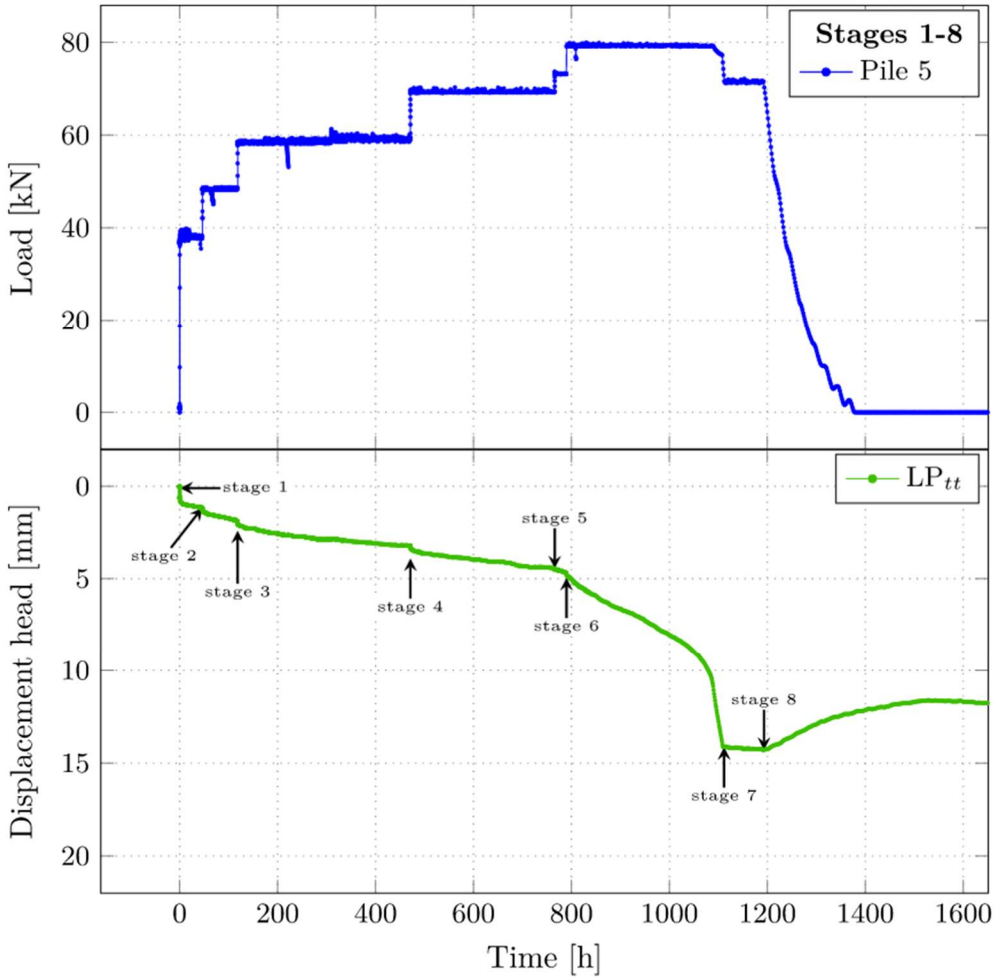
Den axiella styvheten för 2m nivå är för låga belastningar betydligt lägre än för försöket utfört 2018. Ingen rimlig förklaring till detta har i studien identifierats.

Bakåträknade moment i påltopp var först stora och upplastningen fick göras om några gånger för att momenten inte skulle bli orimligt stora och riskera konstruktivt brott i pålen.

Detta försök, som är uppdelat i korta och långa belastningar, är svårt att direkt jämföra med försöket 2018, då hela lastspannet ej finns för någon typ. Det vi kan vara säkra på är att impulserna antagligen har liknande moduler för sitt spann medan de långa belastningarna har betydligt lägre styvhet.

Med en konstant modul (vilket egentligen ska ses som en fjäder, eller axiell styvhet E*A) ger detta att lastkoncentrationen i påltoppen blir väldigt stor och nästan igen last landar i botten. Bakåtberäkningar mot töjningarna vid geotekniskt brott jämfört med odränerade skjuvförsök ger att styvheten för nedersta nivåerna måste vara mångfaldigt högre än de översta. Vilket också är rimligt då den odränerade skjuvhållfastheten är ca 5-6ggr så hög på 48m djup jämfört med 2m djup. Detta ger ett betydligt mer troligt utseende på lastfördelningen.

Lasterna som hölls på 1100 respektive 1200kN ger betydande krypning, det är dock stora osäkerheter i dessa mätningar med mätfel för prismamätning med totalstation samt att marken hävde sig samtidigt. Kryphastigheterna sista 2h extrapolerat till 1 år skulle innebära 5 respektive 10 cm sättning på ett år. Om mätningarna gjorts en längre tid är det också troligt att kryphastigheten hade avklingat något med tiden, se figur nedan från (Yannie, 2016).



Figur 36. Figur från (Yannie, 2016) där lasterna ges ovan och deformationen i grafen nedan.

Fjäderstyvheterna i påltopp varierar kraftigt.

För impulserna motsvarande vindlast/bromslast med en varaktighet om 1 min fås en fjäderstyvhet kring 200MN/m medan för ”långtidsförsöket” landade styvheten på ca 100MN/m.

Hänsyn till detta bör tas vid dimensionering av pålar, då ”lasten tar styvaste vägen”. Så kanske någon konstruktionsdel riskerar bli överbelastad för att den är för styv om inte styvheterna varieras vid lastnedräkning.

6 Referenser

American Petroleum Institute. (2002). *Planning, Designing and Constructiong Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design: API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD.* Washington D.C: American Petroleum Institute.

Bernander, S. (1992). Pålkommissionen rapport 88: Sprickbildning i betongpålar slagna i vatten eller i jordarter med hög permeabilitet. Göteborg.

Fellenius, B. H., Edvarsson, F., Pettersson, J., Sabattini, M., & Wallgren, J. (2019). Prediction, Testing, and Analysis of a 50 m Long Pile in Soft Marine Clay. *Deep foundation Institute Journal*, VOL XIII: 2.

Karlsrud, K. (2012). *NTNU 2012:97 Perdiction of load-displacement behaviour and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results.* Trondheim: NTNU.

Pettersson, J., & Fredrik Edvardsson. (2018). Geotechnical response of an axially loaded floating pile in soft soil - An analysis in evaluating pile response at static load, including a prediction event for practising engineers. Göteborg: Chalmers University of Technology / Department of Architecture and Civil Engineering. Retrieved from https://odr.chalmers.se/items/c8098253-fea0-4f44-9c6d-7f7bdc4c75fc/full

Pålkommissionen. (2004). *Rapport 100.* Linköping: Pålkommissionen.

Sabattini, M. (2020). *Provbelastning av kohesionspåle i lös lera, teknisk rapport provbelastning*. Retrieved from https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1747297/FULLTEXT01.pdf

Yannie, J. (2016). *On the long-term behaviour of tension loaded piles in natural soft soils : a field study and numerical modelling.* Göteborg: Chalmers University of Technology.

Växjö/Göteborg 2023-06-20

Utfört av:

Johannes Pettersson och Michael Sabattini

Peab Anläggningsteknik