

Munk Dunk

Munksjöbron var planerad att grundläggas på friktionspålar med spetsen i fast eller mycket fast lagrad sand. Men efter den inledande påslagningen fick pålarnas funktion kraftigt omvärderas. Vid slagning av de första pålarna noterades ovanligt stor fjädring och låg bärförmåga. Dessutom uppstod fenomenet ”falska stopp”.

Munksjöbron är en stål-balksbro med 6 spann och 5 mellanstöd i vatten. Det största vattendjupet längs brosträckningen är 20 m i sjömitt. Varje mellanstöd är grundlagd på två stycken pålgrupper med vardera 4 stycken grova stål-rörspålar med en diameter på 813 mm. Jönköpings kommun är byggherre och Skanska valdes till huvudentreprenör. Bron utförs som en funktionsentreprenad där Skanska Teknik är ansvarig för brons underbyggnad och grundläggning. Bron var planerad att grundläggas på friktionspålar med spetsen i fast eller mycket fast lagrad sand (dvs. mantel- och spetsbärande). Men efter den inledande påslagningen fick pålarnas funktion kraftigt omvärderas.

Pålslagning

Enligt förfrågningsunderlaget består jorden under Munksjön av sand till mycket stort djup (hur stort anges dock ej) och sanden blir gradvis fastare lagrad med djupet. Vid slagning av de första pålarna



Figur 1. Påslagning för ett av mittstöden.

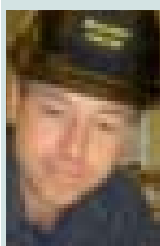
för stöd 5 (figur 1) uppvisade däremot pålarna ett beteende som tydligt indikerade att det inte var frågan om sand, bland annat noterades ovanligt *stor fjädring* och *låg bärförmåga*. När drivningsmotståndet blev så högt att pålen med svårighet kunde drivas vidare uppstod dessutom fenomenet ”*falska stopp*”. Detta inträffade i det jordlager som förfrågningsunderlaget beskrev som fast till mycket fast lagrad sand. Men redan nästa dag kunde pålarna med relativ lätthet drivas vidare, i alla fall en kort stund, tills det höga drivningsmotståndet (sjunkning per slag) återigen byggdes upp. Exempelvis så stoppslogs en påle till en sjunkning på 25 mm per 10 slag, men vid en kontroll redan efter en timme hade sjunkningen ökat till 90 mm per 10 slag med samma fallhöjd. Vid påslagningen noterades ett beteende

Efter den inledande påslagningen fick pålarnas funktion kraftigt omvärderas

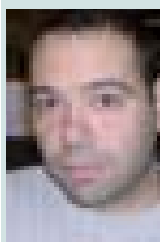
som kraftigt avvek från vad man kan förvänta sig i en fast till mycket fast lagrad sand. Bärförmågan enligt stötvägmätning och Capwap-analyserna var dessutom bara en tredjedel av vad som krävdes. Problemet med ”falska stopp” uppstod i mittenstöden 4 och 5. Hög fjädring och låg spetsbärförmåga noterades dessutom i stöd 2, 3 och 6.

Åtgärder

Denna artikel kommer för tydlighetens skull fokusera på händelserna och åtgärderna i ett av stöden där falska stopp noterades, nämligen stöd 5. En kompletterande geoteknisk undersökning genomfördes med bland annat CPT-sondering. Vidare togs jordprover upp från pålspetsnivån, samt ovan och under denna nivå. Det visade sig inte vara sand utan istället en *siltig lera* som pålarna hade stoppslagits i. Hela



Gary Axelsson,
civ ing C88,
tekn dr,
Skanska
Teknik



Razvan Ignat,
civ ing, Co2,
Skanska
Teknik



Sven Liedberg,
civ ing SVR,
C82, tekn dr,
Skanska
Teknik

pålgrundläggningen fick därmed dimensioneras om. I det här fallet valdes en ny dimensioneringsmetod som baserades på den kompletterande sonderingen och provtagningen. För att kunna utvärdera *tidsberoende bärförmågetillväxt* hos pålarna utfördes dessutom dynamisk provbelastning med stötvägs-mätning vid flera olika tidpunkter.

Orsaken till "falska pålstopp"

Med "falskt pålstopp" menas att pålen vid stoppslagningen uppvisar ett större drivningsmotstånd än vid efterslagning (för samma slagen-ergi). Det höga drivningsmotståndet vid stoppslagningen motsvarar alltså inte någon hög statisk bärförmåga. Redan efter några timmar efter avslutad slagning kan drivningsmotståndet ha minskat till den grad att pålen med relativ lätthet kan drivas vidare. Man kan däremot räkna med att drivningsmotståndet successivt ökar igen under den fortsatta slagningen tills en skenbar stoppslagning återigen sker. Återkommande "falska stopp" som leder till hård drivning är ett av de allvarligaste problemen som kan uppstå vid slagning i friktionsjord. Orsaken till "falska stopp" anses bero på att ett *negativt porvatten-tryck* byggs gradvis upp kring pålspetsen på grund av dilatation. Detta gör att kornen pressas hårt mot varandra, dvs en förhöjd effektiv-

spänning som ger jorden en tillfälligt högre hållfasthet, vilket leder till ett större drivningsmotstånd, se figur 2. Normalt brukar det förutsättas att "falska stopp" kan ske i *fast lagrad silt och finsand*. Här, vid Munksjön, har alltså fenomenet påträffats i *överkonsoliderad siltig lera*.

Geotekniska förhållanden

Geologiskt är Munksjön en del av Vätternsänkan. Ungefär 1 km nordöst från broläget, vid Vätterns strand, finns det *största jorddjup* som borrarats i Sverige, *195,5 m*. Jorddjupet vid broläget bedöms vara ca 80-100 m. Jordlagerföljden beskrivs som mycket komplex och består av morän i växellagring med issjö- och isälvsediment. I den ursprungliga geotekniska beskrivningen som presenterades i förfrågningsunderlaget baserades jordartsbedömningen och bedömningen av jordens relativa fasthet för jorddjup större än ca 15 m endast på hejarsondering. Hejarsonderingarna uppvisade ett gradvis ökande sonderingsmotstånd med djupet upp till $N_{20} = \text{ca } 40\text{-}50$ innan sonderingsstopp på ca 25 m djup under sjöbotten. Inga provtagningar utfördes på dessa djup.

Kompletterande geoteknisk undersökning

Med hänsyn till de avvikande pål-lagensförhållandena utfördes en

kompletterande geoteknisk utredning vid stödläge 4 och 5 som omfattade:

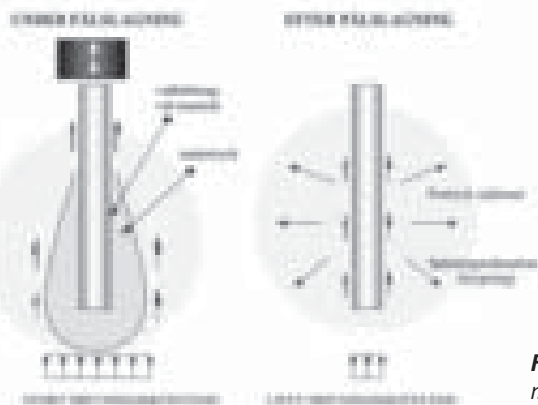
1. En CPT-sondering (inkl porutjämningsförsök).
2. Provtagning med kannprovtagare på fem nivåer.
3. Installation av porttryckspets strax ovanför spetsnivån.
4. Labbanalys av jordprover (analys av jordart, vattenkvot, konflytgräns, tvättsiktning och sedimentationsanalys av finjord).

Med hänsyn till dimensionering och utförande av pålgrundläggningen är följande värt att notera:

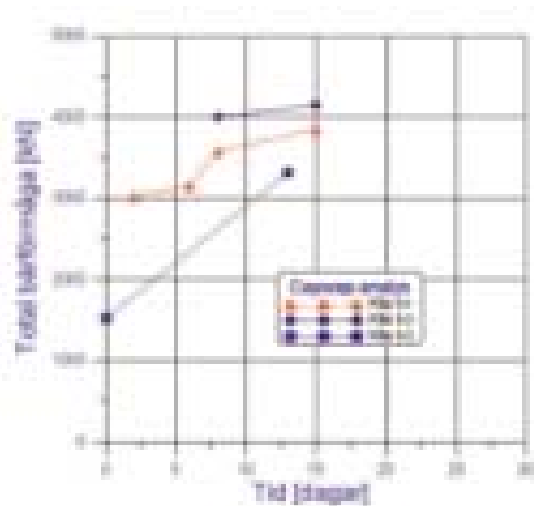
1. Både CPT-sondering och provtagning visar att det förekommer siltig lera från 25 m djup under sjöbotten.
2. Leran vid pålspetsnivån innehåller inslag av silt (36%) och sand (7%) och klassificeras som en siltig lera. Provtagning ca 5 m under spetsnivån visar däremot en grövre lera som klassificeras som en sandig siltig lera och innehåller 53 % silt och 26 % sand.
3. Leran är fast, överkonsoliderad ($\text{OCR} \approx 2$) och med en odränerad skjuvhållfasthet på ca 80-100 kPa, den är låg- till mellansensitiv och har en låg vattenkvot på 19-40 %.
4. Porttrycksmätaren uppvisade ett mycket högt porövertryck i leran under pågående pålslagning. Maximalt porövertryck uppmättes till strax över 400 kPa.

Bestämning av pålarnas bärförmåga

Den geotekniska bärförmågan för respektive pålgrupp beräknas som summan av de enskilda pålarnas geotekniska bärförmåga. För stöd 5 gäller att den dimensionerande geotekniska bärförmågan per pålgrupp om 4 st pålar minst skall vara 10 600 kN. Stötvägs-mätning har utförts på 2 st pålar under neddrivningen och på 4 st pålar vid efterslagning 1 till 15 dygn efter avslutad nedrivning. För att få en noggrannare bestämning av bärför-



Figur 2. Förklaringsmodell för "falska stopp".



Figur 3. Bärformåga enligt Capwap som funktion av tiden.

mågan har Capwap-analys utförts för samtliga mätta pålar. Pålarna är till övervägande del mantelburna. Pålarna är nedslagna 7 m i organisk jord, 18 m i friktionsjord (huvudsakligen sand) samt 9 m i siltig lera.

Pålarnas bärformåga bestäms utifrån en kombination av stötvågsmätning och geostatiska beräkningar. För att kunna tillgodoräkna sig den långsiktiga mantelbärformågan (efter rekonsolidering) i den siltiga leran bestäms denna genom en geostatisk beräkning. Den geostatiska beräkningen är utförd enligt ICP-metoden (Jardine et al, 2005) och är baserad på CPT-sondering samt resultat från provtagning och labbanalyser. Även spetsbärformågan i den siltiga leran bestäms genom geostatisk beräkning på basis av CPT-sondering. Bärformågan i friktionsjorden har bestämts med stötvågsmätning och Capwap-analys. För tre av pålarna redovisas den uppmätta bärformågan som funktion av tiden i figur 3. En verifiering av den långsiktiga bärformågan gjordes i stöd 4. Här provbelastades pålarna efter 2 månader och en genomsnittlig bärformåga på 6300 kN uppmättes, vilket ger en mycket god korrelation till de beräknade värdena.

Bärformågetillväxt

Mantelburna pålar uppvisar ofta en stor ökning av bärformågan

med tiden. Generellt beror en ökning av mantelbärformågan i en friktionsjord på spänningsomlagringar (kollaps av spänningsvalv) samt en ökning av jordens hållfasthet pga av partikelomlagringar (sk jordåldring). Denna tillväxt pågår under mycket lång tid men den största delen av ökningen sker redan inom den första månaden. I kohesionsjord däremot, beror ökningen av bärformåga på en rekonsolidering efter portrycksutjämning och en konsolidering pga av ökade horisontalspänningar. Rekonsolideringsprocessen i leran runt stålpålar brukar antas ta ca 6 månader. Vid bestämning av bärformågan med stötvågsmätning endast några dygn (i vårt fall maximalt 15 dygn) efter nedslagning kommer därför bara en liten andel av lerans slutliga mantelbärformåga att kunna registreras. I friktionsjorden däremot, kan man räkna med att ca 70-85 % av den slutliga bärformågan (vid brons invigning) har uppnåtts efter 15 dygn.

Slutsatser

Ur geoteknisk synvinkel kan följande slutsatser dras från projektet:

- En vanlig uppfattning bland många geotekniker har varit att hela Jönköping vilar på ett mäktigt sandlager. Vid den kompletterande geotekniska undersökningen för mittstöden upptäcktes att det istället förekommer en överkonsoliderad siltig lera under friktionsjorden.
- "Falska stopp" anses normalt ske i fast lagrad silt och finsand. I detta fall uppstod "falska stopp" i en siltig lera.
- Hejarsondering är en mycket osäker metod att bedöma jordart och relativ fasthet. Mantelmotståndet kan ha stark inverkan på sonderingsmotståndet. Reduktionen som görs med hänsyn till uppmätt vridmoment gäller endast vid sondering i sand.
- Pålgrundläggningen dimensionerades med en kombination av geostatisk beräkningsmetod (för mantelmotståndet i lera) samt stötvågsmätning och Capwap-analys (för mantelmotståndet i sand).
- Genom att använda en utpräglad "aktiv design" procedur vid projektering och utförande av pålgrundläggningen kunde den kritiska situationen lösas effektivt, med ett minimum av extrakostnader och inga förseningar som följd.
- Det hela slutade med, trots de allvarligt försämrade geotekniska förutsättningarna, att pålarna endast blev ca 5 m längre.

Referenser

- Jardine R.J., Chow F.C, Overy R.F and Standing J.R. (2005), "ICP design methods for driven piles in sands and clays", Thomas Telford Publishing.
- Möller B. (1991), "Falskt pålstopp" SGI Varia no. 342.