

PÅLKOMMISSIONEN
Teknisk PM 1:2026

**Omgivningspåverkan vid borrhning
av pålar, spont och stag**

Utförd av

Olle Kwick
Oscar Ögren

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Förord

Denna Tekniska PM har utarbetats och sammanställts av en arbetsgrupp bestående av:

Olle Kwick	Geoteknologi
Oscar Ögren	NCC Teknik

Arbetet har kommenterats av en referensgrupp bestående av:

Rasmus Ahlund, Implenia
Peter Alheid, Hercules Grundläggning
Fredrik Beyer, GMT
Håkan Eriksson, Geomind
Fredrik Larsson, COWI
Johannes Tornborg, Peab
Olle Båtelsson, Trafikverket/Pålkommissionen

Peter Alheid har varit uppdragsledare hos Pålkommissionen för detta projekt.

Vi vill ge ett stort tack till Einar John Lande, NGI för att under lång tid engagerat sig i det aktuella ämnet samt varit generös med information om deras pågående forskning inom området i Norge (Begrens Skade-projektet).

Projektet har helt finansierats av Pålkommissionen.

Stockholm, 2026-03-06

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

1 Innehållsförteckning

1	<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....</u>	3
2	<u>SAMMANFATTNING</u>	4
3	<u>ABSTRACT</u>	5
4	<u>INLEDNING.....</u>	6
5	<u>BORRMETODER</u>	6
5.1	<u>HAMMARBORRNING</u>	7
5.1.1	TOPPHAMMARBORRNING	7
5.1.2	SÄNKHAMMARBORRNING	9
5.2	<u>ROTATIONSBORRNING</u>	14
5.2.1	DIAMANTBORRNING	14
6	<u>FÖRDELAR MED BORRNING SOM INSTALLATIONSMETOD.....</u>	15
7	<u>RISK FÖR OMGIVNINGSPÅVERKAN VID BORRNING.....</u>	16
7.1	<u>GENERELL PROBLEMSTÄLLNING</u>	16
7.2	<u>JORDVOLYMFÖRLUST VID UPPSPOLNING</u>	16
7.3	<u>PORTRYCK OCH GRUNDVATTEN.....</u>	18
7.3.1	MASSUNDANTRÄNGNING OCH PORTRYCKSÖKNING	18
7.3.2	PORTRYCKSREDUKTION OCH GRUNDVATTENSÄNKNING.....	19
7.4	<u>GRUMLING AV GRUNDVATTEN</u>	20
7.5	<u>REKONSOLIDERING AV OMRÖRD LERA RUNT PÅLAR OCH STAG.....</u>	21
7.6	<u>LUFT – ELLER VATTENINTRÄNGNING I OMGIVANDE JORDSTRUKTURER</u>	22
8	<u>FÖREBYGGANDE ÅTGÄRDER.....</u>	23
8.1	<u>FÖRSTÅELSE FÖR JORDENS UPPBYGGNAD</u>	23
8.2	<u>ÅTGÄRDER FÖR ATT REDUCERA JORDVOLYMFÖRLUST VID UPPSPOLNING</u>	23
8.3	<u>ÅTGÄRDER FÖR ATT REDUCERA MASSUNDANTRÄNGNING OCH PORTRYCKSÖKNING.....</u>	25
8.4	<u>ÅTGÄRDER FÖR ATT REDUCERA LÄCKAGE OCH SÄNKNING AV GRUNDVATTEN</u>	26
8.5	<u>INSTRUMENTERING/KONTROLLPROGRAM.....</u>	27
8.6	<u>PROVBORRNING OCH UTPROVNING AV BORRMETOD.....</u>	27
8.7	<u>PROJEKTERING</u>	28
8.8	<u>UTBILDNING AV OPERATÖRER.....</u>	28
9	<u>REFERENSER.....</u>	29

2 Sammanfattning

Det finns idag omfattande dokumentation på fall där borrar av stag, spont och pålar har orsakat skador på omgivningen i form av grundvattensänkning, sättningar och stabilitetsproblem. Inom grundläggningsbranschen har det länge funnits en uppfattning om att borrar alltid är den skonsammaste metoden med avseende på omgivningspåverkan trots den dokumentation som på senare år har publicerats.

Användningen av borrarade stålrörspålar har ökat markant under perioden 2011–2024, från cirka 70 000 meter till omkring 350 000 meter installerade pålar. År 2024 utgör dessa ungefär 28 % av den totala mängden installerade pålar (Pålkommisionen, 2025).

De huvudsakliga orsakerna till omgivningspåverkan vid borrar kan delas in i följande kategorier:

- Jordvolymförlust vid uppspolning
- Massundanträngning och portrycksökningar
- Avsänkning av grundvattentryck
- Störning av jordvolym runt pålen
- Luft- eller vatteninträngning i omgivande jordstruktur

Ofta uppstår skador som en kombination av flera av ovanstående mekanismer, vilket främst kan leda till sättningar och stabilitetsproblem i omgivande mark och konstruktioner.

Tidigare publicerad information visar att vattenspolning vid borrar i finkorniga jordar (lera, silt och finsand) minskar risken för påverkan på omkringliggande jord jämfört med konventionell luftspolning. Vattenspolning rekommenderas därför användas i känsliga miljöer när det är tekniskt möjligt.

Det har tidigare saknats riktlinjer för hur skonsam borrar ska utföras och därför har omfattningen av omgivningspåverkan vid borrar varit varierad givet samma geotekniska förhållanden. Idag finns delvis riktlinjer med avseende på borrhastighet, spoltryck och generellt utförande som beskrivs vidare mer i detalj under kapitel 8.

En korrekt bedömning av risken för omgivningspåverkan samt val av lämplig borrar metod kräver god kännedom om jordens egenskaper och lagerföljd. Med denna information, i kombination med kännedom om närliggande riskobjekt, kan en välgrundad metodbedömning göras för det aktuella projektet.

En central del i arbetet med att hantera risker för omgivningspåverkan är att upprätta ett kontrollprogram för uppföljning av effekterna av utförd borrar. Programmet bör inledningsvis omfatta provpålning i ett område där risken för skador på omgivningen är begränsad.

3 Abstract

There is currently extensive documentation of cases where drilling for anchors, sheet piles and piles has caused damage to the surrounding environment in the form of groundwater drawdown, settlements and stability problems. Within the foundation engineering industry, there has long been a perception that drilling is always the most environmentally gentle installation method, despite documentation published in recent years showing otherwise.

The use of drilled steel pipe piles has increased significantly during the period 2011–2024, from approximately 70,000 metres to about 350,000 metres of installed piles. In 2024, these piles accounted for approximately 28% of the total number of installed piles (Pålkommisjonen, 2025).

The main causes of environmental impact associated with drilling can be divided into the following categories:

- Loss of soil volume during flushing
- Soil displacement and excess pore pressure generation
- Groundwater pressure drawdown
- Disturbance of the surrounding soil volume
- Air or water intrusion into the surrounding soil structure

Damage often occurs as a result of a combination of several of the mechanisms listed above, which may primarily lead to settlements and stability problems in the surrounding ground and structures.

Previously published information shows that water flushing during drilling in fine-grained soils (clay, silt and fine sand) reduces the risk of impact on the surrounding soil compared with conventional air flushing. Water flushing is therefore recommended in sensitive environments when technically feasible.

Previously, there has been a lack of guidelines on how low-impact drilling should be performed, which has resulted in varying levels of environmental impact during drilling under similar geotechnical conditions. Today, partial guidelines exist regarding drilling rate, flushing pressure and general execution, which are described in more detail in Chapter 8.

A proper assessment of the risk of environmental impact, as well as the selection of an appropriate drilling method, requires good knowledge of the soil properties and stratigraphy. With this information, in combination with knowledge of nearby risk objects, a well-founded method assessment can be made for the specific project.

A key component in managing risks related to environmental impact is the establishment of a monitoring programme to follow up the effects of the drilling works. The programme should initially include test piling in an area where the risk of damage to the surroundings is limited.

4 Inledning

Djupa schakter i lera är välkända för att orsaka betydande sättningar i omkringliggande mark, vanligtvis mellan 0,5 och 2% av schaktdjupet (Peck, 1969); (Andresen & Karlsrud, 2008). Nya erfarenheter visar dock att borrarade stag och pålar som installeras inifrån en schakt kan leda till betydligt större sättningar än 2% (Langford et al. 2015). I tätbebyggda områden medför sättningar av denna storlek en betydande risk för skador på närliggande byggnader och konstruktioner.

Ett exempel på detta är Götatunneln, där Kullingsjö (2007) rapporterade sättningar på upp till 40 mm bakom sponten, vilket kopplades till jordvolymförlust vid uppspolning av friktionsjord nära bergytan. Även Veslegård et al (2015) mätte upp sättningar på 20 – 100 mm i samband med borrarning av pålar i Gladengen Park i Oslo. Fullskaleförsök med borrarning av stag och pålar av både Ahlund & Ögren (2016) och Lande E. et al. (2020) visar tydliga sättningar och ökade portryck i samband med borrarning, där resultaten visar att användning av vatten i stället för luft för att driva borrarhammaren och som spolmedel minskade sättningarna betydligt.

Trots att det idag är väldokumenterat att borrarning av pålar och stag kan påverka omgivningen saknas tydliga riktlinjer för hur borrarning bör utföras på ett sätt som minimerar skador och markrörelser. Syftet med denna rapport är att öka förståelsen för hur borrarning påverkar marken, portryck och grundvattentryck, samt att ge exempel på åtgärder som kan minska de negativa effekterna.

Vilken installationsmetod som är mest skonsam för jord och grundvatten beror dock på flera faktorer, såsom jordens och grundvattnets egenskaper samt installationsprocessen. För att minimera påverkan krävs att borrarningen utförs på ett optimalt sätt som minimerar massundantängning, portrycksökningar, omrörning och jordvolymförlust vid uppspolning (Veslegård, Lande, & Schram Simonsen, 2015).

I denna PM avser termen borrarning installation genom borrarning av stålörspålar, spont, foderör samt dragstag. Insitu-pålar omfattas inte av denna definition och behandlas därför inte som borrarade pålar i föreliggande sammanhang. Erfarenheter och rekommendationer som redovisas baseras främst på påldimensioner i intervallet 115–406 mm, men de beskrivna fenomenen bedöms vara representativa även för grövre dimensioner.

5 Bormetoder

I detta kapitel beskrivs de vanligaste bormetoderna som idag används inom svensk grundläggning. Olika bormetoder har sina för- och nackdelar och är ofta anpassade för specifika ändamål och förhållanden.

De olika bormetoderna kan delas in i två huvudkategorier, hammarborrarning och rotationsborrarning.

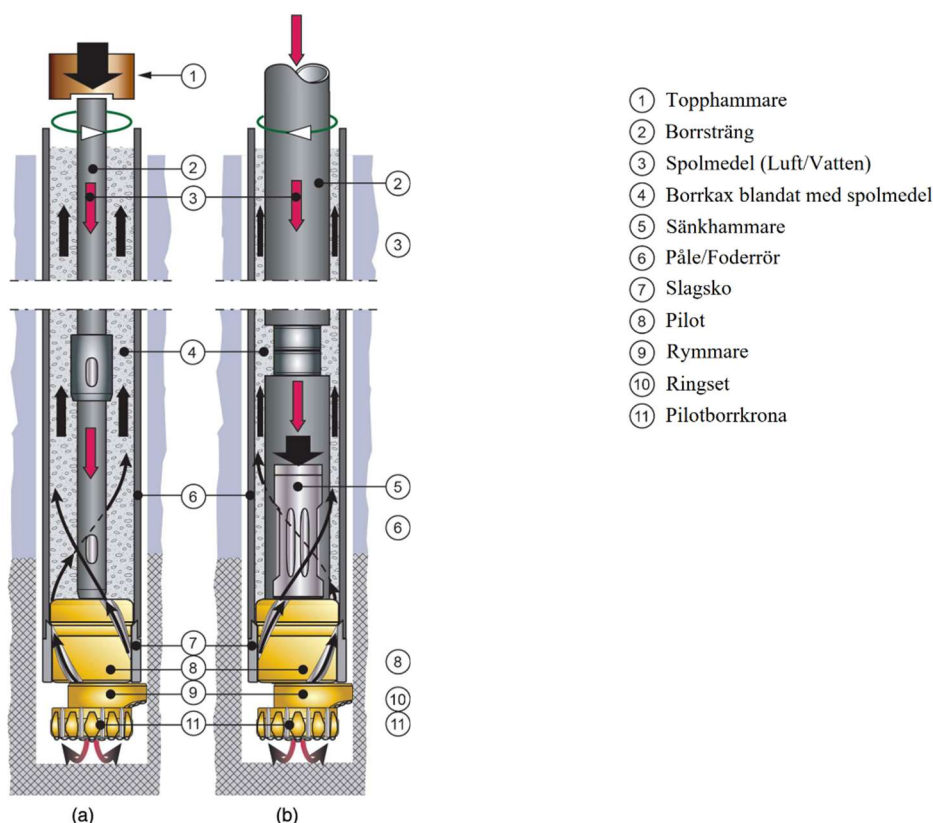
PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

5.1 Hammarborrning

Vid hammarborrning drivs borrhningen av en slaghammare och hammarborrning är den absolut vanligaste typen av borrhning inom grundläggning i Sverige idag. Gruppen hammarborrning kan i sin tur delas in i två undergrupper, topphammarborrning och sänkhammarborrning beroende på vart i systemet slaghammaren är placerad. De två undergrupperna har olika för och nackdelar vilket redovisas i respektive underkapitel.

Principerna för de två metoderna redovisas i Figur 5-1 och beskrivs vidare i kapitel 5.1.1 och 5.1.2.



Figur 5-1 Figuren visar mekanism för topphammarborrning (a) och sänkhammarborrning (b). (Lande E. , Karlsrud, Langford, & Nordal, 2020)

5.1.1 Topphammarborrning

Vid topphammarborrning är hammaren monterad på borrhiggen och styr både slag och rotation. Slagenergin och rotationen överförs till toppen av borrhstålet. Slagenergin fortplantas sedan genom borrhstålet ned till borrhkronan. Spolning utförs vanligtvis med luft, vatten eller injekteringsbruk. Idag används i huvudsak hydrauliska topphammare.



Figur 5-2 Topphammarborrning av självborrande stag. Foto: Oscar Ögren

Topphammarborrning är vanligast vid borring av självborrande stag men kan också utföras för borrade rörpålar med utvändig diameter upp till 168 mm och 30 m längd (Bredenberg, o.a., 2010).

Nackdelarna med topphammarborrning är att slagenergin i borrhakrönan reduceras på grund av effektförluster när borrhakrönan blir längre. Den reducerade slagenergin leder till minskad drivningshastighet och minskad möjlighet att borra i fastare jordar, block och berg, framför allt då bergytan är sluttande (Fogelberg, 2018).

Risken för borrhålsavvikelse är större än vid sänkhammarborrning. Eftersom hammaren är monterad på borrhakrögan är bullernivån också högre än vid sänkhammarborrning.

Fördelen med topphammarborrning är att det är en enkel och billig metod.

5.1.1.1 Självborrande stag och pålar

Självborrande stag och pålar installeras med en borrhakröna och gängade stänger som kvarlämnas i jorden och utgör bärande delen i pålen eller staget. Staget/pålen är ihålligt och möjliggör injektering eller luft/vattenspolning genom borrhakrönan samtidigt som man borrar.

Självborrande pålar och stag kan installeras med kontinuerligt utflöde av injekteringsbruk bestående av en cementsuspension men det går även att använda vatten eller luftspolning vid borring och byta till cementsuspension för injektering av förankringskropp i berg eller jord (Veslegard & Schram Simonsen, 2013).

5.1.1.2 Rörborrning med topphammare

Topphammarborrning för foderrör eller rörpåle kan utföras med antingen centrisk eller excentrisk borring. Vid centrisk borring används en ringborrhakröna och en pilotborrhakröna och

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

vid excentrisk borrarning enbart en pilotborrkrona. Pilotborrkronan är monterad på skarvbara borrarstål. Slagenergin från topphammaren fördelas med denna metod både på rör och borrarstål. Pilotborrkrona och borrarstål lyfts ur röret när man nått önskat djup och kan sedan återanvändas.

Vanligtvis verkar pilot och ringborrkrona tillsammans, men dessa borrarb Kronor kan arbeta oberoende varandra för en förbättrad borrarning. I fallet med oberoende rotation av pilot och rör roteras dessa normalt i omvända riktningar (motsols/medsols) som möjliggör en högre penetrationshastighet och minskar risken för att borkax fastnar mellan pilot och rör som blockerar returflödet (Sabatini, Tanyu, Armour, Groneck, & Keely, 2005).

5.1.2 Sänkhammarborrarning

Sänkhammarborrarning utförs med slaghammare längst ner på borrarsträngen. Det finns två huvudtyper av sänkhammare, luftdriven och vattendriven sänkhammare där slagkolven i hammaren drivs antingen med luft eller vatten. Rotationen är skild från hammaren och sitter uppe på borrhjulen.



Figur 5-3 Sänkhammarutrustning utan utanpåliggande rörpåle. Foto: Olle Kvick

Den stora fördelen med sänkhammaren är att energiförlust mellan borkrona och hammare är minimal vilket ger en större precision i borrarningen samt möjliggör borrarning till större djup.

PÅLKOMMISSIONEN

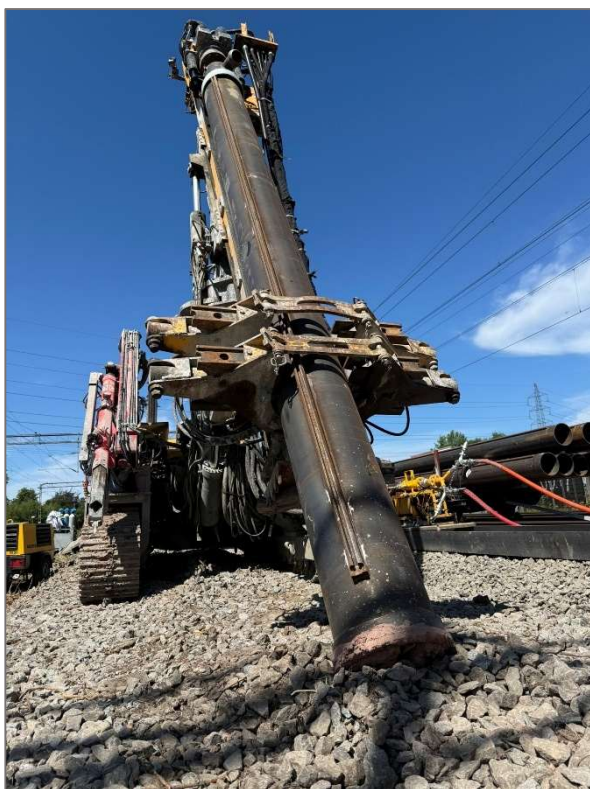
Commission on Pile Research

Jämfört med topphammarbörning är rotationshastigheten mycket lägre vilket ger minskade vibrationer orsakade av börningen (Bruce, Lyon, & Swartling, 2013).

5.1.2.1 Luftdriven hammare

Luftdriven hammare är den idag vanligaste typen av sänkhammarbörning och drivs, som namnet avslöjar, med komprimerad luft. I hammaren är slagkolven den enda rörliga delen. Kolven drivs genom att komprimerad luft växelvis trycks in under och över slagkolven. Luft trycks sedan ut genom borrkronan för att också spola bort borkax från borrytan upp till markytan.

Vid börning med luftdriven hammare kan vattenspolning användas för att skölja borrhålet och avlägsna borkax även om hammaren drivs av tryckluften (Bredenberg, o.a., 2010). Tryckluften som driver hammaren kommer dock ändå ut till borrytan och blandar sig med spolvattnet.



*Figur 5-4 Borrigg för sänkhammarbörning för installation av pålvägg med ringborkkrona.
Foto: Olle Kvick*

5.1.2.2 Vattendriven hammare

En vattendriven sänkhammare använder inte bara vatten som spolmedium utan ger även energin för att driva slagkolven. Hammaren drivs normalt sett med arbetstryck mellan 100 - 180 bar men vattnet kan även flöda fritt genom hammaren i vissa situationer och trycket beror då på motståndet i formationen. När vattnet släpps fram genom borkkronan och ut till borrytan återgår vattnet snabbt till hydrostatiskt tryck på grund av vattnets inkompressibla natur (LKAB Wassara, 2024). Vattnet transporteras sedan upp till markytan tillsammans med

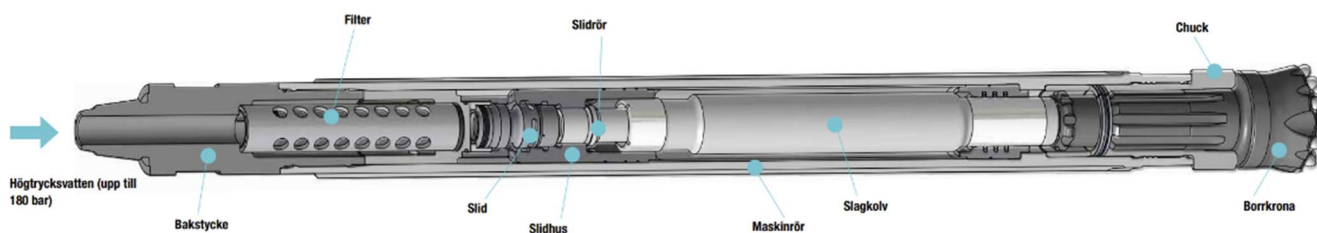
PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

borrkax. I dagsläget finns hammardimensioner upp till 12-tum som är kapabel att borra påldimensioner med ytterdiameter upp till 508 mm.

Jämfört med luftdriven borrarning krävs en mycket lägre hastighet på spolmaterialet för att lyfta borkkaxet till markytan, 30-60 m/min för vatten jämfört med ca 2100 m/min för luft. Vattenspolningen minskar även slitage på utrustningen (Bruce, Lyon, & Swartling, 2013).

Vattnet trycks sedan tillbaka upp genom borkkronans spolkanaler för att få upp borkkax och vatten till ytan. Nackdelen med vattendriven borrarning är att det krävs stora mängder vatten och att allt returvatten måste hanteras. Hur stora mängder vatten som behövs beror på storlek på hammare och varierar från 130–350 l/min för en 4-tums hammare till 1100 - 1600 liter/min för en 12-tums hammare.



Figur 5-5 Typutseende på vattendriven sänkborkrhammare, (LKAB Wassara, 2024).

5.1.2.3 Borkrsystem

Sänkborkrhammare nyttjas i olika typer av borkrsystem med olika för- och nackdelar. Dessa borkrsystem redovisas under.

5.1.2.3.1 Ringborkrsystem

Ringborkrsystem innebär att en ringborkrkrona samverkar med en pilotborkrkrona vid borrarning. På pålspetsen monteras en ringborkrkrona genom svetsning som hjälper borkrkronan att borra ut den yttre delen av hålet så att stålroret kan drivas nedåt. Ringborkrkronan roterar medan stålroret är fixerat.

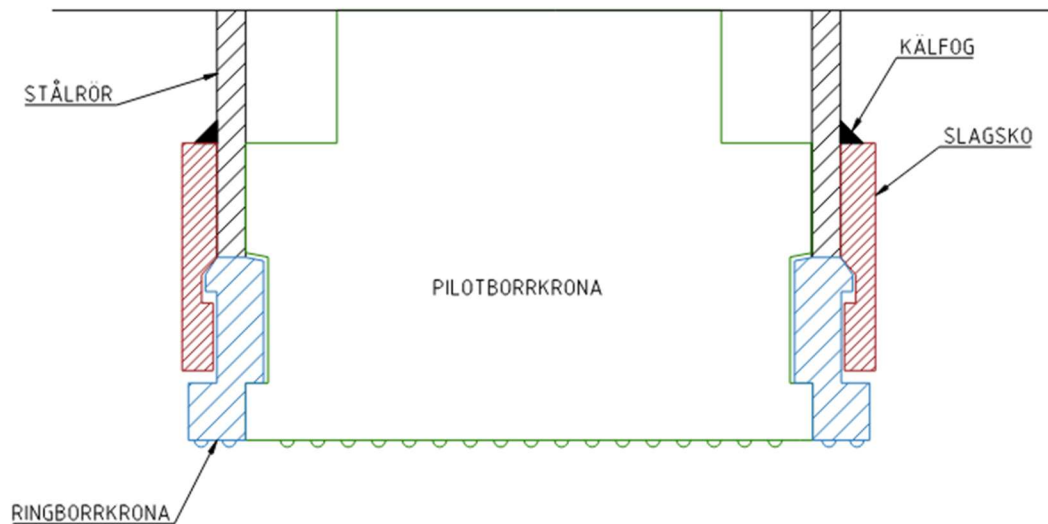


Figur 5-6 Typutseende på sänkborkrhammare med ringborkrkronesystem, (Robit PLC, 2025). Förklaringstext är tillagd av författarna.

PÅLKOMMISSIONEN

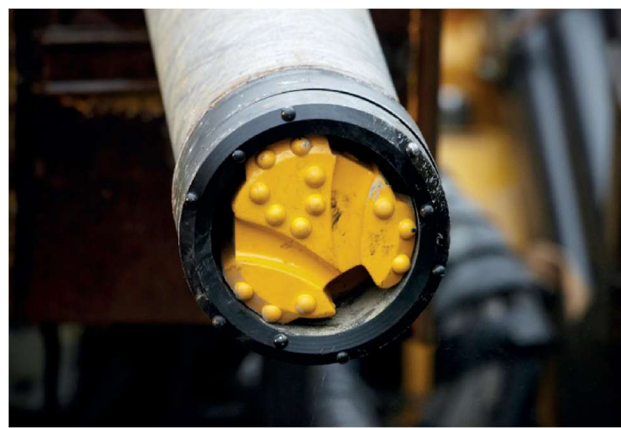
Commission on Pile Research

Ringborrkronan har en klack på insida rör, så kallad slagsko, som överför slaghammarens kraft till stålroret och drar med sig stålroret nedåt. Ringborrkronan blir en del av pålen och lämnas kvar i jorden medan den invändiga pilotborrkronan lyfts upp efter borrhning (Bredenberg, 2010).



Figur 5-7 Principskiss på typiskt utseende av ringborrkrona, slagsko och pilotborrkrona.

Varje leverantör har sin egen utformning på pilotborrkrona och flera leverantörer har i försök att minska risken för omgivningspåverkan vid borrhning försökt anpassa utformningen för att bli så skonsam som möjligt. Däribland kan nämnas Terraroc Elemex och Mincon Spiral Flush. Elemexkronan är utformad så att luftflödet sker vinkelrätt borrrytan genom att ena sidan av piloten har utspolningkanaler för luft och motsatt sida har öppna kanaler dit luften ska tillbaka.



Figur 5-8 T.v. Spiral flush från Mincon (Mincon, 2026). T.h. Elemex från Terraroc (Terraroc, 2026).

Spiral Flush trycker ut luften genom centrum av borrkronan varpå borrkax och luft transporteras ut genom kanaler i borrkronans ytterkant. För rördimensioner upp till 170 mm har ett

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

system som kallas Spiral Flush Mini utvecklats med liknande utformning på borrytan som Spiral Flush. Skillnaden är att luften som behövs för spolning av borrytan skiljs åt från den luft som driver hammaren. På så sätt når endast den luft som behövs för spolning borrytan vilket är betydligt mindre mängd än det som krävs för att driva hammaren.

5.1.2.3.2 Excentriska borrarssystem (ODEX)

I excentriska borrarssystem monteras en borrar på röränden vid pålspetsen innan borring. Borrarrens uppgift är att överföra slaghammarens kraft till stålröret för att driva det nedåt. Borrkronan förs ner nedanför pålspetsen och roterar samt rör sig excentriskt under neddrivningen så att ett större hål än pålens diameter borrar upp. Efter att borring utförts till slutligt djup tas borrkronan upp och röret måste drivas ner ytterligare till kontakt med berg i.o.m att borrkronan har underborrat hålet. Excentriska system används idag främst vid foderrörborring.

5.1.2.3.3 Vingborrarssystem

Vingborrarssystem är en typ av excentriskt borrarssystem men pilotborrkronan rör sig inte i ett cirkulärt mönster under pålens ände. Vingborrkronor har utfällbara vingar som fälls ut under änden på pålröret. Slagsko monteras på pålen. Borrkrona, borrarsträng och vingar roterar och borrar likt ett centriskt system. Slagskon blir en del av pålen och lämnas kvar i marken.



Figur 5-9 Vingborrarssystemet Steel Fist från Robit

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

bergborrning för att inspektera kärnorna. Spolning är separerad från borrarbningen och huvudsyftet med spolningen är att transportera borrhax till markytan. Metoden är vanlig i extremt känsliga miljöer då den har liten påverkan på omgivningen i och med att den i princip endast verkar med rotation och vattenspolning med lågt tryck. (Swedish Diamondtool Consulting AB, 2024). Buller- och vibrationsnivåer är lägre vid diamanthörning jämfört med borrarbning som utförs med borrhammare.



Figur 5-11 Borrhax och foderrör för diamanthörning, bildkälla: www.sdcab.se

6 Fördelar med borrarbning som installationsmetod

Borrarbning av pålar har flertalet fördelar jämfört med installation genom slagning. Det absolut vanligaste argumentet för att välja borrarbning i stället för slagning är för att kunna säkerställa drivning till berg. Där en slagen påle tar stopp eller ändrar riktning p.g.a kollision med sten/block kan en borrarad påle ta sig igenom hindret utan större vinkelavvikelse.

Med borrarbning kan pålen borraras in i "friskt" berg för att säkerställa en hög geoteknisk bärförmåga på pålen. En borrarad påle blir generellt rakare än en slagen påle vilket ökar pålens strukturella bärförmåga.

En annan fördel med borrarbning som installationsmetod är minskning av den massundantäring som fås vid installation. En slagen påle tränger undan en jordvolym motsvarande hela sin volym medan en borrarad påle i teorin inte tränger undan någon jordvolym på grund av att jordmaterialet spolas upp genom pålen (Bredenberg, o.a., 2010). I praktiken tränger dock pålen undan jordmassor om inte jord spolas upp i samma hastighet som pålen borraras.

Vid arbete nära vibrationskänsliga konstruktioner är borrarbning en fördelaktig installationsmetod jämfört med slagning. Detta beror på att borrarbning genererar betydligt mindre vibrationer, vilket minskar risken för skador på närliggande strukturer.

7 Risk för omgivningspåverkan vid borrarbning

7.1 Generell problemställning

En av de största utmaningarna vid installation av borrade pålar och stag är att få bort den jord som fanns på plats innan installationen på ett skonsamt sätt. Jorden kommer antingen transporteras upp till markytan eller tryckas ut från pålen. För maskinoperatören innebär det att den måste hitta balansen mellan borrhastigheten (sjunkhastigheten) och mängden uppspolad jord, där målet är att få upp den volym som ersätts med pålmaterial och luft (inuti pålen).

Enligt Lande & Karlsrud (2015) finns det tre huvudsakliga risker vid borrarbning i lera:

1. **Jordvolymförlust vid uppspolning:** Överuttag av jordmassor runt borkronan som kan orsakas av undertryck, erosion från spolmedel och/eller grundvattenflöde in i fodderröret vilket kan leda till stora okontrollerade sättningar.
2. **Påverkan på jordens portryck:** Portrycksändringar till följd av spolning med luft eller vatten under borrarbningen. I vissa fall kan installerade pålar fungera som dräneringsvägar, vilket påverkar portrycket över tid.
3. **Mekanisk störning:** Den omgivande leran kan störas genom mekanisk påverkan och massundanträngning vilken kan leda till oönskade jordrörelser som påverkar omgivande konstruktioner.

För friktionsjord är risken störst för jordvolymförlust av finkorniga massor vid uppspolning. Störst risk för jordvolymförlust är det då friktionsmaterial överlagras av lera där vattentrycksnivån i friktionsmaterialet är högre än den nivå borrarbningen utförs ifrån.

Dessa aspekter behandlas i detalj i respektive kapitel nedan.

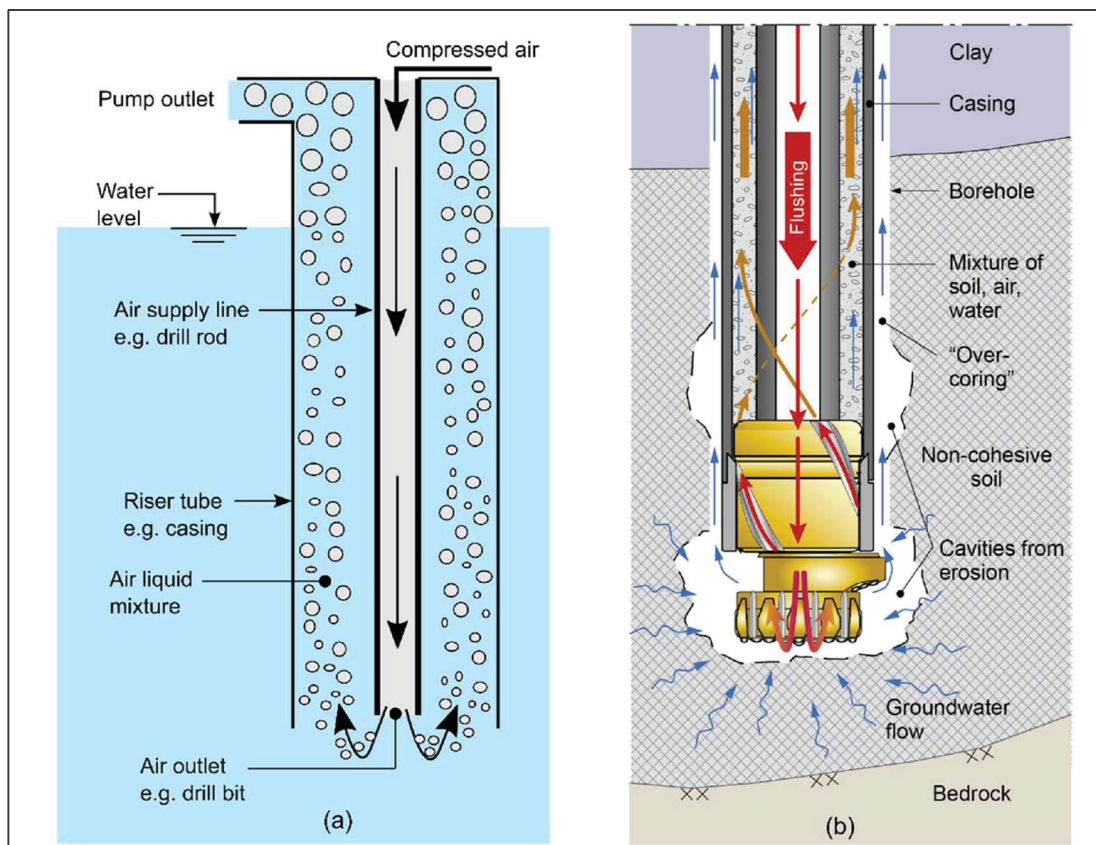
7.2 Jordvolymförlust vid uppspolning

I både Sverige och Norge finns dokumenterade erfarenheter av jordvolymförluster i samband med sänkhammarbollarbning. Veslegard, Lande och Schram Simonsen (2015) beskriver att problemet med uppspolning av för stor mängd jordmaterial och den efterföljande jordvolymförlusten främst är kopplat till bollarbning med luftspolning i friktions- eller mellanjordar.

När luftspolning används kan det uppstå en så kallad "Venturi-effekt" (även kallad "Mammutpump-effekt"). Sandene, Lande, & Nöst (2023) beskriver att fenomenet uppstår när komprimerad luft pressas ut i pålspetsen vilket minskar densiteten i blandningen av luft och vatten. Det skapar ett lägre tryck inuti röret än vattentrycket utanför. Tryckskillnaden kan skapa ett stort vattenflöde som samtidigt transporterar med sig omgivande lättroderat jordmaterial till markytan. Materialtransporten leder i sin tur till erosion och hålrum runt det borrade röret.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 7-1. Beskrivning av fenomenet jordvolymförlust vid uppspolning/Venturi-effekten. (Sandene, Lande, & Nöst, 2023)

Fenomenet är särskilt riskfyllt vid borrning i erosionskänsliga, finkorniga och vattenförande jordar som silt, finsand eller morän. I tjocka moränlager, där sjunkhastigheten är långsam och borrhöjden med luftspolning förlängs, ökar risken för att ett överskott av massor sugs upp. Risken för jordvolymförlust är dessutom högre när borrning sker mot ett vattenövertryck, exempelvis vid borrning från botten av en schaktgrop med en nivå lägre än rådande grundvattenstrycknivån.

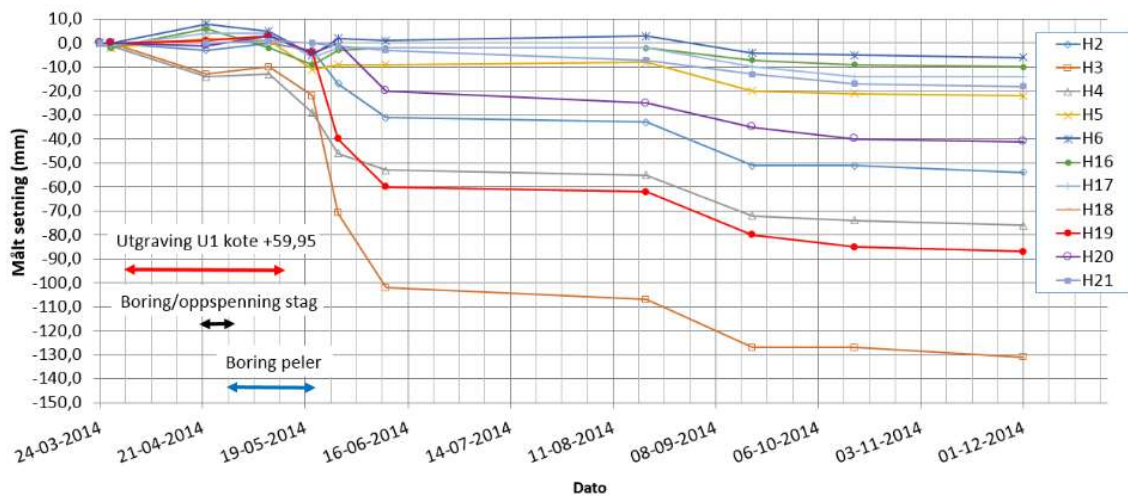
Enligt Bredenberget (2010) är denna effekt vanligast i finkorniga jordar. Kullingsjö (2007) studerade markrörelser bakom en spontvägg vid Göta tunneln och kunde visa att majoriteten av sättningarna som uppstod bakom sponten uppkom i jorden närmast berget i områden där stagen träffade berget. Dessa sättningar orsakades sannolikt av erosion och jordvolymförlust vid uppspolning av massor till följd av användningen av luftspolning. Totalt bedömdes borrningen orsaka sättningar på ca 40 mm vilket motsvarar ca 0,4 % av schaktdjupet.

I projektet Gladengen Park i Oslo genomfördes sättningsmätningar i samband med borrning av pålar. Vid borrning av vissa pålar nära spontväggen uppstod stora problem. Under skarvningen av pålarna läckte silt in i borrhöjden och täppte till spolkanalerna. För att rensa borrhöjdens spolkanaler användes högt lufttryck, vilket sannolikt ledde till en okontrollerad utblåsning av material och ett överskott av insugna massor vid borrhöjden. Detta resulterade i omedelbara sättningar i området, med en storlek på 20–100 mm. Sättningarna fortsatte dessutom att öka i cirka fyra månader efter avslutad borrning, vilket i BegrensSkade-projektet

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

förklaras som en följd av rekonsolidering av den störda leran kring pålarna (Veslegard, Lande, & Schram Simonsen, 2015).



Figur 7-2 Sättningsmätningar i projektet Gladengen Park, Oslo (Veslegard, Lande, & Schram Simonsen, 2015)

7.3 Portryck och grundvatten

7.3.1 Massundanträngning och portrycksökning

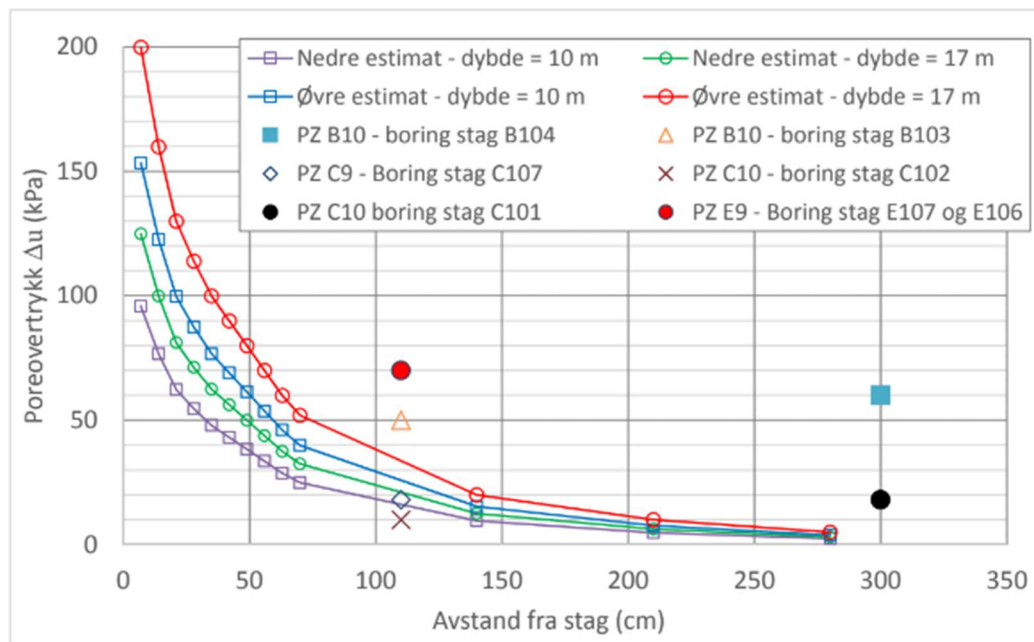
Vid installation av slagna pålar finns det flera verktyg och metoder för att bedöma effekterna från massundanträngning i marken, men motsvarande verktyg saknas för borrarade pålar och stag, trots att liknande fenomen kan förekomma. Vid borrar, särskilt i lös lera, sker borrarningen ofta med hög sjunkhastighet vilket innebär att effekterna i vissa fall kan liknas vid den massundanträngning som sker vid slagning av pålar, eftersom returspolningen inte hinner transportera bort tillräckligt med lerjord från pålspetsen som i stället trycks åt undan.

I en fältstudie genomförd i Fredrikstad jämförde Lande & Karlsrud (2015) teorierna kring massundanträngning för slagna pålar med de uppmätta effekterna vid borrar. Resultaten visade en betydligt större ökning av portryck än vad som förväntades utifrån beräkningar för en fullt massundanträngande slagen påle. Författaren föreslår att den kraftigare ökningen i portryck vid borrar berodde på en kombination av hög sjunkhastighet (motsvarande full massundanträngning) och användning av högt spoltryck (5-15 bar) för vattenspolning.

I studien installerades stag B104, B103, E107 och E106 med en sjunkhastighet på cirka 5 sek/m genom leran, medan stag C101, C102 och C107 borrarades med en betydligt långsammare hastighet på 30-60 sek/m. I Figur 7-3 redovisas portrycksutveckling för respektive stag jämfört med beräknat portryck för fullt massundanträngande påle. Mätningarna visar att de stag som borrarats med långsammare hastighet genererat betydligt mindre porövertäck än de stag som installerats med en högre hastighet.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 7-3. De heldragna linjerna visar den prognostiserade portrycksutvecklingen vid full massundanträngning, medan punkterna representerar de uppmätta portrycksvärdena vid borring av stag. (Lande, 2015)

Merparten av portrycksökningarna kan till stor del förväntas försvinna under första dagarna efter installation. Resterande portrycksökning avtar långsamt under rekonsolideringsprocessen som kan pågå i flera månader (Lande E. J., 2024).

7.3.2 Portrycksreduktion och grundvattensänkning

Vid borring från marknivåer som ligger lägre än nivå för grundvattentrycket i friktionsjorden under leran, kan det uppstå dräneringsvägar runt eller i pålen. Detta kan leda till långvariga grundvattensänkningar, vilket i sin tur kan orsaka konsolideringssättningar i leran. Riskerna är störst vid excentrisk borring som skapar ett större hålrum mellan påle och jord.

I projektet Gladengen Park i Oslo observerades betydande portryckssänkningar i samband med ODEX-borring av foderrör för stål kärnepålar. Mätningar av portrycket i närliggande områden visade en reduktion på upp till 75 kPa. Författaren menar att detta berodde på den luftspolning som användes, särskilt när borringen passerade genom sand och morän ner till berggrunden. Venturieffekten skapade ett inflöde av vatten från den omgivande jorden, vilket orsakade sänkningen av portrycket. Dessa portrycksändringar var dock kortvariga, med en återhämtning på ungefär ett dygn. (Veslegard, Lande, & Schram Simonsen, 2015)



Figur 7-4 Inläckage av vatten efter foderörsborrning, Foto taget vid projektet "Dubbelspår Sandvika – Asker", Norge (Karlsrud, K., Langford, J., Lande, E. J., Baardvik, B., 2015)

7.4 Grumling av grundvatten

Vid borrning i finkorniga jordar föreligger risk för grumling av grundvattnet. Det har vid provborrning/pålning med ODEX-borrssystem (excentrisk borrning) med luftspolning inom ett vattentäktsområde observerats en betydande påverkan på vattenkvaliteten i samband med borrning. Den undersökta vattentäkten är belägen i ett område med åsmaterial bestående av sand, silt och lera. Under kontrollmätningar i provbrunnar i samband med borrningen uppmättes turbiditetsnivåer som överskred gränsvärdena för tjänligt dricksvatten. Dessutom noterades att halterna av nitrat, fluorid och klorid ökade med cirka 100 % i mätningarna.

ODEX-borrning med luftspolning anses som en av de mer oförsiktiga metoderna vid borrning. Det har i samband med provpålningen inte utretts hur stor påverkan mer skonsamma bormetoder har på vattenkvaliteten.

Liknande effekter bör kunna förväntas vid sjö- och havsnära borrning.

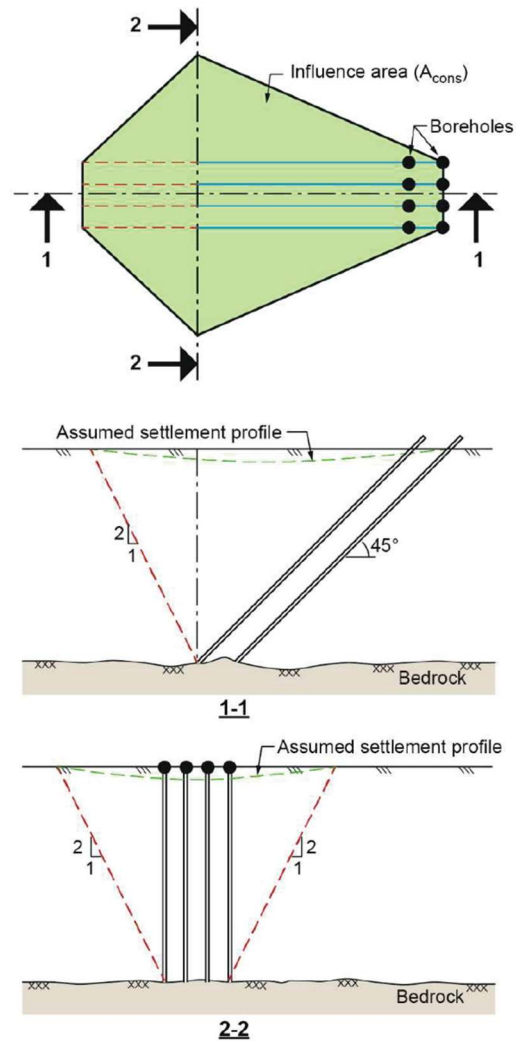
PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

7.5 Rekonsolidering av omrörd lera runt pålar och stag

Vid borring av stag och pålar påverkas den omgivande jorden av spännings- och töjningsförändringar inom ett begränsat influensområde runt staget eller pålen (Lande & Karlsrud, 2015). Antaget influensområde och sättningsprofil redovisas i Figur 7-5.

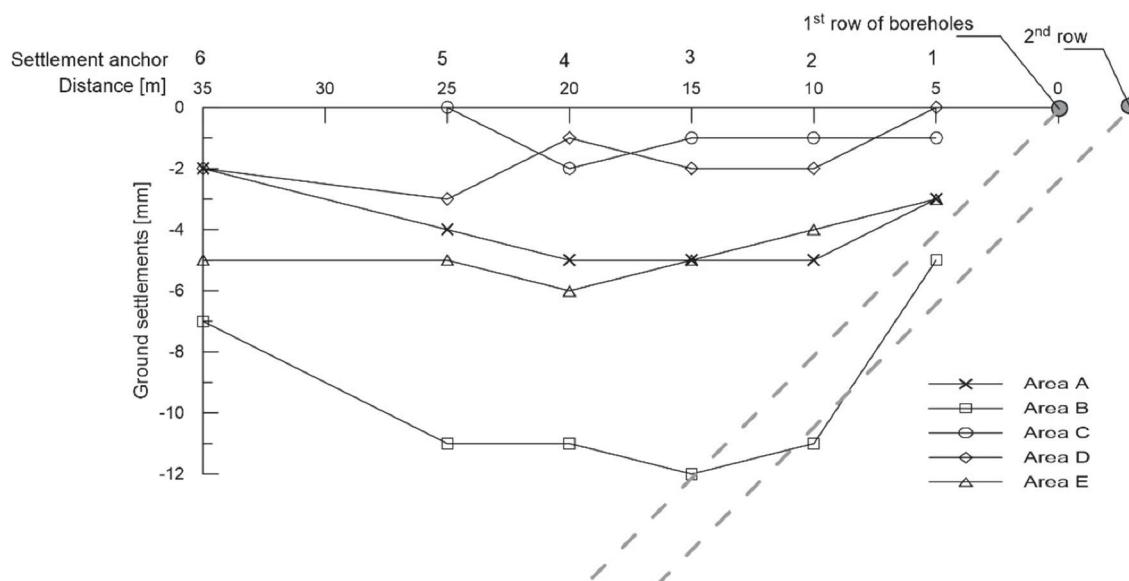
Dessa antaganden testades i fältförsöket med stagborring beskrivet i kapitel 7.3.1. Borring utfördes med olika bormetoder och viss variation i penetrationshastighet. 6 månader efter avslutad borring var uppmätta sättningar mellan 0-12 mm vilket redovisas i Figur 7-6.



Figur 7-5 Förväntad sättningsprofil och influensområde pga rekonsolidering efter borring av stag eller pålar (Lande & Karlsrud, 2015).

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



Figur 7-6 Sättningar i markyta på olika avstånd från borrhälsrad ca 6 månader efter avslutad borrhälsrad vid borrhälsrad igenom lera ner i berg (Lande & Karlsrud, 2015).

Rönning och Haugen (2015) genomförde CPT-sonderingar efter installationen av en borrhälsrad på Møllenberg i Trondheim. Sonderingarna, som utfördes nära borrhälsrad med en diameter på 610 mm, visade relativt små portrycksökningar men betydande omrörning i den omkringliggande kvickleran, cirka 0,5 meter från pålen.

Karlsrud (2012) visade genom fältförsök att en störd zon bildas runt installerade massundantäckande pålar. När poröverttrycket minskar, sker rekonsolidering av leran, vilket leder till volymminskning och kan orsaka sättningar. Sättnings storlek beror på faktorer som skjuvtöjning, effektivspänning, sensitivitet och vattenkvot.

7.6 Luft – eller vatteninträngning i omgivande jordstrukturer

Veslegard, Lande och Schram Simonsen (2015) påpekar att när luftspolning används vid sänkhammarborrning i lera eller silt, finns det en risk för att luft tränger in i omgivande jordformationer. Detta kan leda till omrörning eller volymförlust, särskilt om leran är sensitiv. Spolmedlet söker alltid vägen med minst motstånd, vilket inte alltid är upp genom foderröret. Det är vanligt att tryckluft och lerslam i stället tränger upp längs utsidan av foderröret eller från hålrum i närliggande redan installerade pålar. Vid borrhälsrad i sluttande terräng finns dessutom risken för horisontell luftinträngning om tryckmotståndet mot slutningen är lägre än mot markytan. Om en sådan kanal öppnar sig kan det leda till omfattande volymförluster av jordmassor.

8 Förebyggande åtgärder

Genom att sammanställa den tillgängliga informationen från både Sverige och, framför allt, Norge samt Finland, framträder några åtgärder som är allmänt vedertagna för att reducera omgivningspåverkan vid borrhning. Många av dessa rekommenderade åtgärder kan vara kostnadsdrivande, vilket gör det viktigt att ha en geoteknisk grundförståelse för att bedöma när de olika åtgärderna bör tillämpas.

8.1 Förståelse för jordens uppbyggnad

För att välja rätt metod och åtgärd för att minska omgivningspåverkan vid borrhning är det avgörande att förstå hur jorden reagerar på massundanträngning och andra effekter av borrhning. Bedömningen bör ta hänsyn till om det finns risk för jordvolymförlust vid uppspolning av returflöde, eller om jordens egenskaper gör detta mindre sannolikt.

En annan aspekt att beakta är grundvattentrycksnivån i förhållande till borrhningsnivån. Det är nödvändigt att överväga om borrhningen kan skapa ett vattenflöde som transporterar material.

Det är därför viktigt att ha en god bild av jordlagerföljd, jordtyper, permabilitet, grundvattentryck m.m. för att kunna bedöma risk för omgivningpåverkan och val av borrhmetod.

8.2 Åtgärder för att reducera jordvolymförlust vid uppspolning

Den största risken för jordvolymförlust förekommer vid luftdriven borrhning i finkorniga, erosionskänsliga jordar under grundvattennivån. I känsliga omgivningar där sättningar kan orsaka skador bör riskerna med användning av luftdriven borrhning utvärderas baserat på aktuella förhållanden för projektet.

Enligt Begrens Skade (2015) bör vattenspolning användas vid borrhning med luftdriven hammare i lera, silt och löst lagrad sand för att minimera risken för omgivningspåverkan. Vattenmängden, som bör anpassas efter pålens diameter och djup, är en central parameter. Rekommenderade flöden för enbart vattenspolning ligger mellan 60-350 l/min med ett tryck på 3-15 bar (Lande E. J., 2024). (Finnish Road Administration, 2003) föreslår dock i motsats till detta att spoltrycket bör vara minst 20 bar för att undvika igensättning av spolkanalerna.

Jordrörelser i samband med borrhning kan även orsakas av rekonsolidering av lerlager, vilket kan ske vid omrörning eller porttrycksreduktioner i sensitiv lera. Vid störning av sensitiv lera kan det också uppstå jordvolymförlust på grund av uppspolning av jordmaterial genom Venturi-effekten när leran blir flytande.

För att minska risken för jordvolymförlust och uppspolning av omgivande jordstruktur bör antal borrhstopp, som exempelvis vid skarvning och andra pauser i arbetet, hållas till ett minimum. Stillestånd innebär en ökad risk för att spolkålen sätter igen, och igensatta spolkålen måste öppnas med övertryck från luft eller vatten. Denna process är kritisk och kan leda till jordvolymförlust samt inträngning av luft eller vatten i den omgivande jordstrukturen.

För att minska risken för stopp i borrhkronans spolkanaler, framförallt vid borrhning i silt, så kan röret fyllas med vatten i samband med skarvning eller andra pauser för att minska inträngande vatten i borrhkronan. Det inträngande vattnet från jorden kan annars ta med sig siltpartiklar som sedan fastnar i spolkanalerna.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Flera leverantörer har tagit fram borrarssystem som ska vara mer skonsamma för luftdrivna sänkhammare som exempelvis Elemex (Terraroc) och Spiral Flush (Mincon), se kap. 5.1.2.3.5. Bredenberg et al. (2014) har beskrivit att sättningarnas storlek i ett projekt beläget i Stockholm minskade med 30-50% vid byte till Elemex-system. Generellt kan sägas att centriska borrarssystem med ringborrkorna ger mindre överborrningsvolym än excentriska system.

Lande E. J. (2024) har i sin doktorsavhandling tagit fram ett normaliserat spolflöde och normaliserad massa av borkkax utifrån modellförsök på borrar i sand för att kunna jämföra uppspolat jordmaterial mot borrarparametrar.

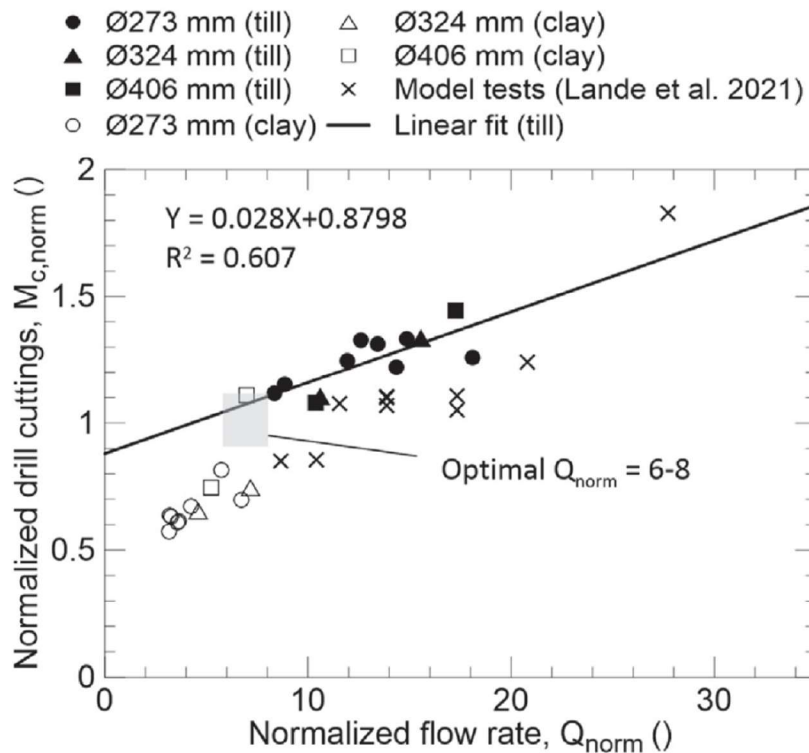
$$Q_{norm} = \frac{Q}{A_{pile} * V_{pen}}$$

Där Q är spolflöde i m^3/min , A_{pile} är tvärsnittsarea för pålen i m^2 och V_{pen} är sjunkhastighet i m/min .

$$M_{c,norm} = \frac{M_c}{M_{pile}}$$

Där M_c är massan av uppspolat borkkax och M_{pile} är den teoretiska massan som pålen tar upp.

Värden på $M_{c,norm}$ mindre än 1,0 indikerar att pålen tränger undan jord och värden större än 1 innebär ett överuttag av jordmaterial. Genom att mäta och spela med borrarparametrarna i modellförsök samt fältförsök har Lande tagit fram nedanstående diagram på förhållandet mellan Q_{norm} och $M_{c,norm}$. Diagrammet är begränsat för vattendriven sänkhammarbörning och föreslagna optimal Q_{norm} gäller för borrar i morän (Lande E. J., 2024).



Figur 8-1 Förhållande mellan normaliserat spolflöde och uppspolad jord. (Lande, 2024)

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Kontroll av mängden borrhax och massor från returflödet kan också vara nödvändig i känsliga områden, se . Uppspolat material bör motsvara den installerade pålens volym, det kan dock vara svårt att mäta mängd uppspolat material. Ett sätt att kontrollera mängd massor i returflödet är att samla upp materialet i uppsamlingskärl, se exempel i Figur 8-2. Den mest pålitliga metoden för kontroll av uppspolat material är RC-borrning där borrhaxet leds upp till markytan i ett slutet system.

I de fall returflödet sätter igen/stryps under borring, bör borringen stoppas omedelbart och spolkanalerna rensas för att förhindra att spolmedlet trycks ut i omkringliggande jordformation.



Figur 8-2 Uppsamlingskärl från provborring som visar exempel på ett uppsamlingskärl. Bilderna visar före och efter borring utförd borring som en del i av dokumentation under provpållning. Foto: Besab.

8.3 Åtgärder för att reducera massundanträngning och portrycksökning

Begrens Skade-projektet i Norge rekommenderar i Delrapport 3.4 (Veslegård, Lande och Simonsen, 2015) att vattendriven sänkhammare och centrisk borring bör användas vid borring i lera, särskilt när leran har en hög sensitivitet.

Enligt Begrens Skade och vidare analyser av Lande et al (2020) bör sjunkhastigheten anpassas så att spoltryck och flöde hinner med att transportera bort borrarat material för att borringen ej ska bli massundanträngande. För att minimera påverkan rekommenderas en maximalt sjunkhastighet på 1 m/min i lera. Om sjunkhastigheten är för låg kan det istället leda till överdriven uppspolning av massor (Lande E. , Karlsrud, Langford, & Nordal, 2020).

Utifrån modellförsök i sand och vattendriven sänkhammarboring i närheten av Oslo har (Lande E. J., 2024) tagit fram en rekommendation för förhållande mellan spolflöde och sjunkhastighet för borring i morän för att optimera massbalansen så att borringen inte ska leda

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

till vare sig massundanträngning eller överborrning. Optimal Q_{norm} , som definieras i kapitel 8.2, är enligt Lande ett värde på 6-8 och ger då indirekt rekommendation på sjunkhastighet beroende på vilket spolflöde som används.

Vid val av borrar metod bör centrisk borrar (exempelvis med ringset och pilotborrkrona) föredras framför excentrisk borrar. Excentrisk borrar medför både större överborrning och mindre kontroll över returspolningen, vilket bekräftas av provborrningar på Onsöy, sammanfattade i Lande & Karlsrud (2015).

8.4 Åtgärder för att reducera läckage och sänkning av grundvatten

Den mest tillförlitliga åtgärden för att utesluta risken för vattenflöde längs pålen är att borra pålen från en nivå som ligger över grundvattnets trycknivå. På så sätt kan den ”överborrade” och omrörda zonen utanför pålen med tiden rekonsolidera och täta utrymmet mellan påle och omgivande jord utan att påverkas av ett pågående uppåtriktat vattenflöde.

Efter installationen kan pålen gutas i underkant för att förhindra invändigt vattenflöde. Detta möjliggör att pålen senare kan kapas på en nivå som ligger under den rådande trycknivån i grundvattnet utan risk för läckage.

Om trycknivån i det underliggande grundvattenmagasinet är högre än i det ovanliggande grundvattenmagasinet kan borrar trots detta orsaka en trycksänkning i det undre magasinet, till följd av läckagevägar runt pålen. I dagsläget finns ingen allmänt beprövad metod för att helt täta en eventuell glipa mellan jorden och rörens ytterkant och därigenom förhindra en sådan trycksänkning.

En möjlig åtgärd är injektering under tryck i botten av röret, där injekteringsmedlet pressas upp längs rörens ytterkant. Metoden beskrivs mer utförligt av Veslegard, Lande och Schram Simonsen (2015).

I ett projekt i Göteborgsregionen uppstod problem med uppströmmande grundvatten (artestiskt) runt pålen efter borrar med en rördiameter på 323 mm. För att stoppa flödet slogs ett rör med diameter på 500 mm ner runt pålarna. Därefter spolades materialet mellan rören bort och läckagevägen tätades genom gjutning. Lösningen var både kostsam och tidskrävande vilket visar vilka svårigheter och kostnader som kan bli aktuella om det krävs tätning i efterhand.

För att motverka grundvattensänkning orsakade av borrar kan andra åtgärder vidtas som exempelvis infiltrationsbrunnar utanför schakten eller området. Att utföra borrar inom en tätskärm kan också vara ett alternativ för att reducera flödesmängden.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

8.5 Instrumentering/Kontrollprogram

Eftersom omgivningspåverkan vid borrning kan ha flera olika konsekvenser är det avgörande att noggrant bedöma de specifika riskerna. Genom att på förhand analysera möjliga fenomen och risker kan ett effektivt kontrollprogram upprättas med lämplig instrumentering för att övervaka och hantera dessa risker.

Möjlig instrumentering av marken:

- Porttryckmätare
- Sättningspegel på markytan
- Inklinometer
- Grundvattenrör
- Extensometer
- Sättningspegel på olika djup / Bälgslang

Observationer vid borrning:

- Mätning av uppspolad jordvolym
- Kontroll av returflöde
- Kontroll av ev. luft/vattenflöden i omkringliggande mark orsakade av borrning

Uppföljning/dokumentation:

- Manuellt eller automatisk borrarprotokoll med dokumentation av:
 - Starttid
 - Sluttid
 - Ev. Stopptid
 - Spoltryck
 - Spolflöde
 - Sjunkhastighet
 - Rotationshastighet
 - Matningstryck
 - Jordart
 - Oförutsedda observationer

8.6 Provborrning och utprovning av bormetod

I projekt med strikta krav på omgivningspåverkan är provpålning ett viktigt verktyg för att minska riskerna. Syftet är att säkerställa att vald bormetod och utförande inte orsakar större påverkan än vad projektet tillåter. Provpålning kan både utföras i ett projekteringsskede men är oftast logistiskt enklare att utföra i samband med produktionsstart.

Provpålning utförs med fördel i ett område med liknande geotekniska förhållanden som riskområdet, men där konsekvensen av omgivningspåverkan är av mindre betydelse.

Inför provpålningen specificeras utförandet i detalj, till exempel val av spolmedel och sjunkhastighet. Samtidigt instrumenteras området och ett kontrollprogram tas fram. Det är fördelaktigt att samma borroperatör som ska genomföra produktionen även utför provpålningen för att resultatet ska bli representativt.

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Genom uppföljning med protokoll, loggbok, mätningar och kontroller fås ett test i full skala på den förväntade omgivningspåverkan under kontrollerade former. Resultaten visar inte bara om metoden är lämplig, utan ger också underlag för eventuella justeringar av utförandet.

Provpålningen fungerar därmed som en kontroll där risker identifieras och hanteras innan fullskalig produktion startar. Detta skapar trygghet för beställare och angränsande fastighetsägare samt möjliggör en kostnadseffektiv produktion med minskad risk för skador på omgivande byggnader och installationer.

8.7 Projektering

Vid projektering finns ett antal faktorer att tänka på gällande val av installationsmetod och anvisningar för utförandet.

Beroende på vilka risker som identifierats i aktuellt projekt kan det i projekteringen behövas ges anvisningar om följande:

- Installationsnivå för borrade stag eller pålar
- Borrmotod
- Begränsning på sjunkhastighet vid borrning av pålar eller stag
- Huruvida borrning av ett element får återupptas under nästkommande skift eller inte
- Kravställning på skarvlängder för stålrör
- Om pålar ska igengjutas med betong för att undvika grundvattenflöde
- Om dragförankring i en spontkonstruktion kan ersättas med invändiga strävor

Det ska noteras att alla anvisningar/styrda metodval som görs i projekteringen kan ge en merkostnad i tid och/eller pengar för projektet och bör vara noggrant genomtänkta för att matcha den risknivå som projektet har.

8.8 Utbildning av operatörer

Trots de åtgärder som tidigare nämnts är det avgörande att påpeka att borrning av pålar och stag i hög grad är ett hantverk där operatörens skicklighet spelar en central roll för slutresultatet. En mindre försiktig operatör kan orsaka betydande skador, även om alla andra förhållanden är optimala.

Vid upphandling ska krav ställas på dokumenterad erfarenhet hos ansvarig operatör. Upphandlingsformer och kravställningar bör utformas på ett sådant sätt att incitament att maximera installerade pålmetrar per skift undviks, eftersom detta ofta leder till ökad påverkan på omgivningen.

Det kan också vara lämpligt att ställa krav på manuell kontroll av borrningen för att undvika överdriven beroende av automatiska inställningar, som kan leda till mindre uppmärksamhet från operatörens sida.

9 Referenser

- Ahlund, R., & Ögren, O. (2016). *Pore pressures and settlements generated from two different pile drilling methods*. Stockholm: Royal Institute of Technology, KTH.
- Andresen, L., & Karlsrud, K. (2008). Design and performance of deep excavations in soft clays. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 9. Arlington, VA: Missouri University of Science and Technology.
- Bredenberg, H. I., Jönsson, M., Larsson, M., & Larsson, L.-E. (den 27 Januari 2014). Borrteknik för minimering av marksättningar vid borrarad grundläggning. *Bygg & Teknik*.
- Bredenberg, H., Berglars, B., Rankka, W., Holberg, G., Eronen, S., & Jokiniemi, H. (2010). *Rapport 104 - Borrade stålrörspålar*. Linköping: Pålkommissionen.
- Bruce, D., Lyon, R., & Swartling, S. (2013). An Introduction to Water-Powered Down-The-Hole Drilling in Speciality Geotechnical Constructions. *Deep Foundations Institute 38th Annual Conference*, (s. s.7). Phoenix, AZ.
- Finnish Road Administration. (2003). *Instructions for drilled piling*. Helsinki: Edita Prima OY.
- Fogelberg, L. (2018). *Implementering av sänkhammarborrning som geoteknisk undersökningsmetod*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Harslan Pty Ltd. (den 17 Oktober 2025). *What is Reverse Circulation Drilling*. Hämtat från Harslan Pty Ltd- webbplats: <https://www.harslan.com.au/what-is-rc-drilling/>
- Haugen, T., & Rønning, S. (2015). *SVV Region midt - Strindheimstunnelen, Rörspunt Möllenberg*. Begrens Skade.
- Imset, T., & Rønning, S. (2015). *DP3 Videreutvikling av metoder for å begrense skader*. Begrens Skade.
- Karlsrud, K. (2012). *Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on interpretation of load test results*. Trondheim: NTNU.
- Lande, E. J. (2024). *Limitation of damage from overburden drilling for piles and tieback anchors*. Trondheim: NTNU.
- Lande, E. J., & Karlsrud, K. (2015). *Delrapport 4.1 - Feltforsøk stagborrning. Dokumentasjon av effekter ved boring i leire*. Begrens Skade.
- Lande, E., Karlsrud, K., Langford, J., & Nordal, S. (2020). *Effects of Drilling for Tieback Anchors on Surrounding Ground: Results from Field Tests*. J. Geotech. Geoenviron. Eng.
- Leif, J. (2019). Shear resistance during and after installation of driven piles in soft clay. *XVII ECSMGE-2019*. Reykjavik: International society for soil mechanics and geotechnical engineering.
- LKAB Wassara. (den 23 Septemeber 2024). *Data Download Center*. Hämtat från LKAB Wassara- webbplats: <https://www.wassara.com/downloads/>
- Mincon. (den 06 februari 2026). *Mincon Spiral Flush*. Hämtat från <https://mincon.com/product/spiral-flush/>
- Peck, R. (1969). Deep excavations in tunneling in soft ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ss. 225-290). London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Pålkommissionen. (2025). *Pålstatistik för Sverige 2024*. Stockholm: Pålkommissionen.
- Robit PLC. (den 18 september 2025). *Robit Group*. Hämtat från <https://www.robitgroup.com/wp-content/uploads/2022/08/Robit-Geotechnical-Catalogue-08-2022.pdf>

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

- Sabatini, P. J., Tanyu, B., Armour, T., Groneck, P., & Keely, J. (2005). *Micropile Design and Construction*. Woodbury: Federal Highway Administration, US Department of Transportation.
- Sandene, T., Lande, E., & Nöst, H. (2023). Calculation of soil volume loss caused by drilling of anchors. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Imperial Collage, London.
- Swedish Diamondtool Consulting AB. (den 23 September 2024). *Diamantborrad Grundförstärkning*. Hämtat från Swedish Diamondtool Consulting AB-webbplats: <https://www.sdca.se/produkter/bergprodukter/grundforstarkning/>
- Terraroc. (den 06 februari 2026). *TerraRoc Elemex*. Hämtat från <http://terrarocdrilling.com/wp-content/uploads/2023/02/TerraRoc-Elemex-WEB.pdf>
- Veslegard, G., & Schram Simonsen, A. (2013). *DP1 + 2 Erfaringsinnsamling og analyse av skadeårsaker*. BegrensSkade.
- Veslegard, G., Lande, E. J., & Schram Simonsen, A. (2015). *DP3 Vidareutvikling av metoder for å begrense skader*. Norge: BegrensSkade.