

Injeksjonspeler som et alternativ til betongpeler

Stefan Halvardsson Fjellheim

Bygg- og miljøteknikk (2 årig)

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Amund Bruland, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Injeksjonspeler som et alternativ til betongpeler	Dato: 07.06.2012		
	Antall sider (inkl. bilag): 129		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stefan Halvardsson Fjellheim			
Faglærer/veileder: Amund Bruland			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Jon Endre Flåtten			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Hovedproblemet med betongpeling er knyttet til impulsivt støy og rystelser fra ramming. Med dagens krav til ytre miljøpåvirkning vil man i praksis alltid måtte søke om dispensasjon fra lokale myndigheter for de aktuelle periodene man skal arbeide. I den senere tid har man sett et økt fokus på miljøhensyn omkring utførelse og installasjon av peler og en kan ikke lenger se på dispensasjoner for brudd på støy- og vibrasjonskrav, som en god og langsiktig løsning. Det bør derfor utvikles mer miljøvennlige maskiner for ramming, eventuelt sees på andre peletyper som kan erstatte betongpelene. Målet med denne rapporten er å vurdere konkurransedyktigheten til injeksjonspeler som et alternativ.</p> <p>Gjennom rapporten har man kommet frem til at injeksjonspeler er en mer miljøvennlig løsning, både med tanke på støy og rystelser. Det vil derfor være andre faktorer som avgjør om den blir valgt. For å sammenligne løsningene økonomisk, har man gjennomført beregninger av forankringslengde ved ulike laster og grunnforhold. Resultatene viser at injeksjonspeler, forutsatt løse til middels faste sand- og grusmasser, kan oppnå godt over det dobbelte av kraftkapasiteten per meter pel, sammenlignet med betongpeler. Følgende differanse indikerer en betydelig kostnadsbesparelse, både i form av materialforbruk og tid for installasjon. Videre er det brukt et allerede gjennomført byggeprosjekt som analysemetode. Formålet med prosjektgjennomgangen er å vurdere prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø. Med utgangspunkt i det undersøkte prosjektet, normaliserte kostnadsdata, samt ulike referanseprosjekter har man kommet frem til at injeksjonspeler er cirka dobbelt så dyr som betongpeler (kr/meter installert pel). Dette kostnadsestimater gjelder midlere laster i størrelsesorden 600 – 1000 kN.</p> <p>Etter sammenstilling av kostnadsdata og beregningsresultater, er det konkludert med at injeksjonspeler kan være et økonomisk konkurransedyktig alternativ til betongpeler i løse og middels faste sand- og grusmasser.</p>
--

Stikkord

1. Injeksjonspeler
2. Betongpeler
3. Tid og kostnad
4. Kvalitet, SHA og ytre miljø

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet, institutt for bygg, anlegg og transport, våren 2012. Avhandlingen tar for seg en sammenligning av de to fundamentløsningene betongpeler og injeksjonspeler. Oppgaven er i sin helhet skrevet av avgangstudent Stefan Halvardsson Fjellheim.

Masteroppgaven utgjør emnet TBA 4935 Anleggs- og produksjonsteknikk, og teller 100 % av karakteren. Oppgaven dekker hele fagets størrelse på 30 studiepoeng.

Avhandlingen bygger på et samarbeid med firmaet Fundamentering AS, som ønsker å se på en alternativ fundamenteringsløsning til friksjonsbærende betongpeler. I den forbindelse skal man vurdere injeksjonspeler, for å se om dette kan være en konkurransedyktig løsning. Masteroppgaven er en videreføring av et allerede gjennomført fordypningsprosjekt med samme tema.

Arbeidet med masteroppgaven har vært både lærerikt og utfordrende, og jeg føler å sitte igjen med god kunnskap omkring de temaene jeg har jobbet med. Spesielt vil jeg trekke frem tilegnet kunnskap omkring løsningen injeksjonspeler som en ny og viktig erfaring.

Jeg vil begynne med å rette en stor takk til hovedveileder professor Amund Bruland, som har bistått med god rettleiding gjennom hele prosessen. Amund har kommet med flere gode innspill til interessante fokusområder og vinklinger. Jeg vil også rette en stor takk til ekstern veileder Jon Endre Flåtten fra Fundamentering AS, som har vært en meget solid støtte gjennom arbeidet med oppgaven. Tross i en stressende arbeidshverdag har Jon Endre alltid tatt seg god tid til rettleiding og oppfølging. Jeg vil takke Helen Andersson fra Huth & Wien Engineering AS, som har bistått meg i å skaffe mye relevant litteratur omkring temaer presentert i rapporten. Helen har også bistått med god veiledning angående behandling av emner jeg ikke hadde tidligere kunnskap om. Til slutt vil jeg rette en stor takk til min kjæreste Ingun Næve, som har vært en meget god støtte gjennom hele prosessen med masteroppgaven.

Bildet på forsiden er hentet fra brosjyre for TITAN injeksjonspeler (Ischebeck 2005).

Trondheim, NTNU 07.06.2012

Stefan Halvardsson Fjellheim

.....

Sammendrag

Hovedproblemet med betongpeling er knyttet til impulsivt støy og rystelser fra ramming. Med dagens krav til ytre miljøpåvirkning vil man i praksis alltid måtte søke om dispensasjon fra lokale myndigheter for de aktuelle periodene man skal arbeide. I den senere tid har man sett et økt fokus på miljøhensyn omkring utførelse og installasjon av peler og en kan ikke lenger se på dispensasjoner for brudd på støy- og vibrasjonskrav, som en god og langsiktig løsning. Det bør derfor utvikles mer miljøvennlige maskiner for ramming, eventuelt sees på andre peletyper som kan erstatte betongpelene. Målet med denne rapporten er å vurdere konkurransedyktigheten til injeksjonspeler som et alternativ.

Det er utført en litteraturstudie innenfor aktuelle tema tilknyttet problemstillingen. Her gis en teoretisk beskrivelse av bæreprinsipp, installasjonsmetode, utstyr, samt en beskrivelse av prosjektmålene tid, kostnad, kvalitet, SHA og ytre miljø. Årsaken er at betong- og injeksjonspeler er to svært forskjellige løsninger, både med tanke på oppbygning, installasjonsmetode og ofte bruksområde. Man ønsker derfor å ha et teorigrunnlag for videre diskusjon og analyse.

Gjennom rapporten har man kommet frem til at injeksjonspeler er en mer miljøvennlig løsning, både med tanke på støy og rystelser. Det vil derfor være andre faktorer som avgjør om den blir valgt. For å sammenligne løsningene økonomisk, har man gjennomført beregninger av forankringslengde ved ulike laster og grunnforhold. Resultatene viser at injeksjonspeler, forutsatt løse til middels faste sand- og grusmasser, kan oppnå godt over det dobbelte av kraftkapasiteten per meter pel, sammenlignet med betongpeler. Følgende differanse indikerer en betydelig kostnadsbesparelse, både i form av materialforbruk og tid for installasjon. Videre er det brukt et allerede gjennomført byggeprosjekt som analysemetode. Formålet med prosjektgjennomgangen er å vurdere prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø. Med utgangspunkt i det undersøkte prosjektet, normaliserte kostnadsdata, samt ulike referanseprosjekter har man kommet frem til at injeksjonspeler er cirka dobbelt så dyr som betongpeler (kr/meter installert pel). Dette kostnadsestimatet gjelder midlere laster i størrelsesorden 600 – 1000 kN.

Etter sammenstilling av kostnadsdata og beregningsresultater, er det konkludert med at injeksjonspeler kan være et økonomisk konkurransedyktig alternativ til betongpeler i løse og middels faste sand- og grusmasser.

Denne rapporten danner et godt utgangspunkt for videre arbeid innenfor et interessant og aktuelt tema som ellers er lite beskrevet. Ved en eventuell videreføring av arbeidet anbefales det å inkludere flere prosjekter for sammenligning av prosjektmålene tid og kostnad. Data- og informasjonsgrunnlaget som ligger til grunn for konklusjonene i denne rapporten, begrenser seg til kalkyler og produksjonsmålinger fra få prosjekter. Ved å skaffe et bedre erfaringsgrunnlag, som inkluderer analyser av flere prosjekter, samt forskning på andre områder (beskrevet i kapittel 8), er man sikker på at injeksjonspeler kan komme som et godt alternativ til betongpeler.

Abstract

The main problem concerning concrete piling is noise and vibrations during driving. The consequence of today's requirements regarding environmental effects of builds, makes it necessary to apply for exemption at the periods one wishes to work within. There is an increasing focus regarding these issues at the present time, and applying for exemptions is therefore not a satisfying solution. More environmentally friendly solutions regarding machines for driving could be considered, otherwise alternative piles should replace the concrete piles. The aim of this work is to assess the competitiveness of injection piles as an alternative to concrete piles.

A study of available literature concerning the subject of this master's thesis has been conducted. It gives a description of bearing principle, installation method, equipment, and a description of the factors; time, cost, quality, SHE and environmental influence. This has been done because concrete and injection piles are two very different solutions, both regarding pile structure, method of installation, and usage. Based on this, a solid theoretical foundation is needed to be able to compare the two solutions.

This work concludes that injection piles are a more environmentally friendly solution, regarding both noise and vibration during installation. There are however other factors that determine whether this solution is chosen or not. Calculations of anchor length at different loads and ground conditions, were performed to compare the different solutions. The results show that the ultimate bearing capacity of injection piles in loose to medium loose sand and gravels is more than twice as large compared to concrete piles. This indicates a considerable cost reduction, regarding both material consumption and installation time. Based on cost data from different building projects and normalized cost data, injection piles are approximately twice as expensive as concrete piles (NOK/meter installed pile). This estimated cost is related to axial loads between 600 – 1000 kN.

Based on these comparisons, one can conclude that injection piles may be a good alternative to concrete piles in loose to medium loose sand and gravel.

This work is a good starting point for further work, related to an interesting and relevant subject that has not been studied to a great extent. To secure a good outcome of the future work, one should include several projects to better understand the factors of time and cost. One is certain that injection piles will be a good alternative to concrete piles if a broad background experience, including analysis from several projects, and research regarding other relevant subjects (described in chapter 8) is conducted.

Innholdsfortegnelse

Forord	III
Sammendrag	V
Abstract	VII
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn for valg av tema	1
1.2. Definerings av oppgaven.....	1
1.3. Begrensninger knyttet til oppgaven	2
1.4. Rapportens oppbygning	3
2. Metode	5
2.1. Litteraturstudie.....	5
2.2. Beregning av forankringslengde.....	7
2.3. Prosjektgjennomgang	8
3. Pelefundamentering	11
3.1. Injeksjonspeler.....	12
3.2. Betongpeler.....	26
3.3. Beregning av forankringslengde.....	37
4. Bruksområder	43
4.1. Betongpeler.....	43
4.2. Injeksjonspeler.....	47
4.3. Sammenligning av forankringslengde	52
5. Prosjektgjennomgang Statoil – Stjørdal	65
5.1. Prosjektbeskrivelse	65
5.2. Beregning av nødvendig forankringslengde.....	68
5.3. Kostnadssammenligning.....	74
5.4. Tid.....	78
5.5. SHA og ytre miljø.....	80
5.6. Dokumentering av prosess.....	82
6. Diskusjon	83
7. Konklusjon	89

8. Anbefalinger til videre arbeid	91
Bibliografi.....	93

Vedlegg

Vedlegg 1	Generell beskrivelse av masteroppgaven
Vedlegg 2	Beregning og sammenligning av nødvendig forankringslengde
Vedlegg 3	Følsomhetsanalyse
Vedlegg 4	Dimensjonering av injeksjonspeler ved prosjektet Statoil – Stjørdal
Vedlegg 5	Resultater fra dimensjonering, etter forutsatte grunnforhold, Statoil – Stjørdal

1. Innledning

1.1. Bakgrunn for valg av tema

Problemstillingen for masteroppgaven er definert gjennom et samarbeid med entreprenørfirmaet Fundamentering AS. Bakgrunnen for valg av tema er at firmaet ønsker vurdering av en mer skånsom løsning til betongpeler. Ettersom miljøhensyn omkring utførelse og installasjon av peler virker å bli mer og mer viktig i markedet, vil man vurdere konkurranse-dyktigheten til injeksjonspeler som et alternativ.

Injeksjonspeler og -stag har vært anvendt i Norge i over 20 år. Man kjenner metoden best som stagforankring av spuntvegger og jordnagling, men i den senere tid har løsningen fått en større aksept ved normale pelejobber. Entreprenørene går gradvis over til bruk av grovere dimensjoner på injeksjonspelene. Dette som følge av investering i tyngre boreutstyr og at de er blitt mer erfarne og trygge på metoden. Ved å tilrettelegge for bruk av grovere dimensjoner øker man muligheten for utnyttelse av stålet i pelen betydelig, og man kan oppnå meget høy kapasitet. (Andersson 2012 pers. kom.). Dette fremmer muligheten for bruk av injeksjonspeler ved større fundamenteringsprosjekter, hvor betongpeler er en mye brukt løsning.

Som forberedende aktivitet til masteroppgaven er det gjennomført et fordypningsprosjekt, med tittelen "En vurdering av injeksjonspeler som et alternativ til rammede betongpeler i løsmasser". Dette fordypningsprosjektet var en forstudie til masteroppgaven. Prosjektet, formet som en litteraturstudie, bidro til å danne et godt utgangspunkt for videre arbeid, med en mer analytisk tilnærming. Studentens interesse for geoteknikk og fundamenteringslære har også vært avgjørende i valg av tema for masteroppgaven.

Med bakgrunn i dette har studenten kommet frem til følgende tema for masteroppgaven: "Injeksjonspeler som et alternativ til betongpeler".

1.2. Definerings av oppgaven

Problemstilling:

"Under hvilke betingelser er injeksjonspeler et konkurransedyktig alternativ til rammede betongpeler i løsmasser?"

Gjennom dette arbeidet ønsker man å gi en teoribasert beskrivelse av betong- og injeksjonspeler. Disse peletypene er i utgangspunktet to svært forskjellige løsninger, både med tanke på oppbygging, installasjonsmetode og ofte bruksområde. Det er derfor ønskelig å ha et teorigrunnlag for videre diskusjon og analyse. Gjennom analysen brukes et allerede gjennomført byggeprosjekt, hvor begge peleløsningene ble vurdert. Her vil de typiske prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø stå sentralt. Ulike referanseprosjekter brukes for å supplere det man finner i prosjektgjennomgangen. Validering av kostnadsdata og produktivitetmålinger er eksempler på dette.

"Der grunnen er egnet for bruk av betongpeler har det vist seg at betongpeler som oftest er den mest økonomiske pelefunderingsmetoden man har i Norge" (NGF 2001) – kap. 5, s. 3. For å vurdere denne teorien, vil det bli gjennomført en sammenligning av forankringslengde for betong- og injeksjonspeler ved ulike laster og grunnforhold. Følgende resultater vil kunne gi en indikasjon på hvilke jordarter som gir større differanser i nødvendig lengde ved bruk av injeksjonspeler kontra betongpeler, og dermed en kostnadsreduksjon. Med bakgrunn i dette, er målet til slutt å kunne bedømme hvordan injeksjonspeler stiller seg som et økonomisk alternativ til friksjonsbærende betongpeler.

1.3. Begrensninger knyttet til oppgaven

Planlagte begrensninger

I oppgaven er det kun vurdert én type pel som alternativ til rammede betongpeler. Det finnes i utgangspunktet mange ulike peler som kunne vært med i sammenligningen. I samtale med Fundamentering AS har man kommet frem til at injeksjonspeler vil være en interessant og aktuell løsning, og derfor kun valgt å se på denne.

I denne rapporten ser man på injeksjonspeler av typen Ischebeck TITAN. Det finnes i utgangspunktet flere ulike typer injeksjonspeler som kunne vært aktuelle for sammenligning. Dette ville økt oppgaven ut over ønsket omfang, og vil derfor ikke bli gjennomført.

Som problemstillingen poengterer, vurderes injeksjonspeler som et alternativ til betongpeler i løsmasser. Det vil si at det i all hovedsak fokuseres på friksjonsbærende betong- og injeksjonspeler. Her kunne man valgt å gå for en mer generell betraktning hvor spissbæring også ble vurdert.

Man har kun valgt å se på aksialt belastede peler i denne rapporten. Det er ikke gjennomført beregninger på lateralt belastede peler, en eventuell kombinasjon av aksial og lateral lastpåkjenning vil heller ikke bli vurdert.

I rapporten ser man kun på ett prosjekt ved "prosjektgjennomgang". Her kunne man sammenlignet flere prosjekter hvor de aktuelle pelene er brukt. Grunnen til at man ser på det aktuelle prosjektet er at både betong- og injeksjonspeler ble vurdert som fundamentløsning.

Praktiske begrensninger

Det er ikke utført egne grunnundersøkelser i forbindelse med masteroppgaven. Ulike feltnmålinger ved pågående prosjekter ville krevd utstyr og ressurser som ikke var tilgjengelig. Grunnlaget for beregning av forankringslengde baserer seg derfor på geotekniske parametere og faktorer, beskrevet i den anvendte litteraturen. Grunnrapporter fra andre prosjekter kunne vært benyttet, men dette ville hatt liten overføringsverdi for lesere av rapporten, da en slik tilnærming kun hadde vært gyldig for spesielle forhold.

Det var opprinnelig planlagt CASE-studie for et prosjekt i Trondheim, som skulle gå parallelt med masteroppgaven. Dette lot seg ikke gjennomføre da Fundamentering AS gikk glipp av

det tiltenkte prosjektet. Firmaet hadde heller ingen andre prosjekter med direkte relevans ved tidspunktet masteroppgaven ble skrevet.

I forbindelse med oppgaven ble det gjennomført én ukes feltarbeid ved utbygningen av Siemens nye hovedkvarter (Oslo). Arbeidet inkluderte sikring av graveskråning med bruk av jordnagler. Grunnen til at studenten gjennomførte feltarbeidet på dette prosjektet, var at Fundamentering AS ikke hadde noen andre prosjekter med installering av injeksjonspeler. Etersom systemet i prinsippet er helt likt (foruten at man borer skrått) fikk man observert den praktiske delen av utførelsen. Arbeidet ble gjennomført tidlig i masteroppgaven, noe som gav et godt erfaringsgrunnlag. Feltarbeidet inkluderte observasjon av boring og gysing, etterarbeid (montering av stålplater og mutre) og kapasitetstesting av installerte nagler. Studenten fikk også anledning til å spørre anleggsarbeiderne og formann om ulike aspekter tilknyttet gjennomføringsprosessen.

Det skulle i utgangspunktet gjennomføres produktivitetmålinger for installeringen av jordnaglene, men dette ble ikke utført da man anså slike målinger som lite anvendbare. Dersom man skulle ha sammenlignet resultater fra produktivitetmålinger ville dette krevd målinger for boring i ulike grunnmasser, og dermed feltarbeid på flere prosjekter. Man vil ikke fokusere på eventuelle resultater fra feltarbeidet i denne rapporten, men heller bruke den praktiske erfaringen som supplerer i teoridelen.

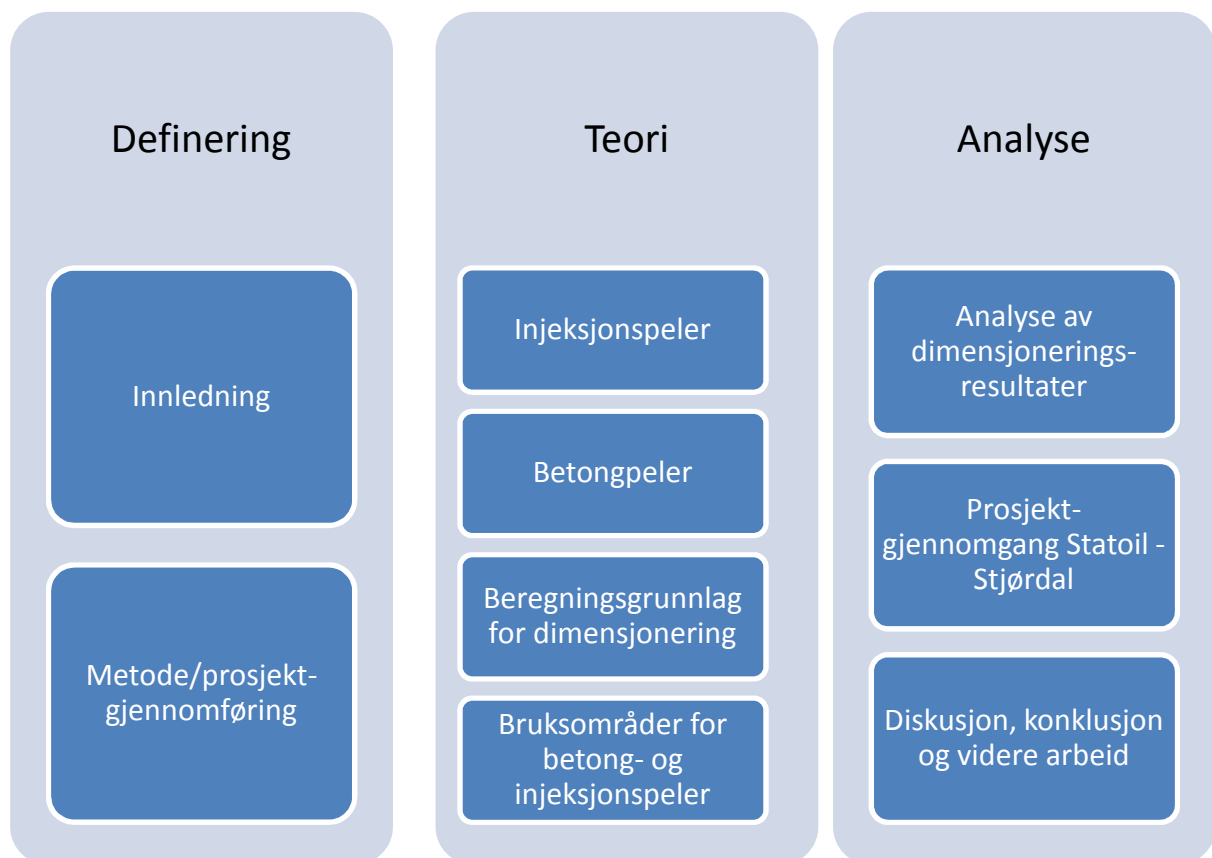
1.4. Rapportens oppbygning

Første del av rapporten beskriver aktuelle metoder som er brukt for å besvare oppgavens problemstilling. De valgte metodene er litteraturstudium, beregning av forankringslengde og prosjektgjennomgang. For litteraturstudien ligger fokus på hvilke fremgangsmåter som er brukt ved innsamling og behandling av kilder. I forhold til beregning av forankringslengde og prosjektgjennomgang vurderes anvendt grunnlagsmateriale, samt ulike metoder som er brukt for innhenting av data. Formålet med kapittelet er å beskrive de begrensninger, styrker og svakheter, samt feilkilder, som er knyttet til de valgte metodene. Dette skal bidra til å gi en kvalitetssikring av arbeidet, samtidig som leseren skal kunne evaluere grunnlaget for vurderingene i rapporten.

Kapittelet "Pelefundamentering" gir en teoretisk beskrivelse av rammede betongpeler og injeksjonspeler. Her fokuseres det på bæreprinsipp, installasjonsmetode, utstyr, kvalitet, tid, kostnad, SHA og ytre miljø ved de to fundamentløsningene. Formålet er å danne et teoretisk grunnlag for videre diskusjon og analyse. I dette kapittelet vil man også gi en beskrivelse av beregningsprinsipper for dimensjonering av betong- og injeksjonspeler. Kapittelet "Bruksområder" gir en beskrivelse av hvilke forutsetninger som bør ligge til grunn for valg av peleløsning. Faktorene som vurderes er type laster, grunnforhold, anleggsteknikk, naboforhold og miljø. Videre vil en sammenligning av forankringslengde, for ulike laster og grunnforhold gjennomføres. Formålet med kapittelet er å vurdere under hvilke forutsetninger de to peletypene egner seg best.

I det siste kapitlet, "Prosjektgjennomgang Statoil – Stjørdal", ser man på et prosjekt hvor både betong- og injeksjonspeler ble vurdert som fundamentløsninger. Her vil man, med bakgrunn i grunndatarapporter, beregne nødvendig forankringslengde for injeksjonspelene. Ettersom dette prosjektet er ferdigstilt, er alle dimensjonerings allerede gjennomført. Egne beregninger vil derfor sammenlignes med det som er gjort av eksterne konsulenter og vurderes deretter. Videre vil man fokusere på prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø. Vurderingene av prosjektmålene gjøres med bakgrunn i tilgjengelige prosjektdata fra Fundamentering AS.

Figuren under gir en overordnet beskrivelse av rapportens oppbygning:



2. Metode

En metodebeskrivelse gjennomføres for at leseren skal kunne vurdere grunnlaget for konklusjonene, som en kvalitetssikring av eget arbeid, samt at andre skal kunne videreføre arbeidet (Olsson 2009). Dette kapitlet beskriver og begrunner valg av metoder, brukt i besvarelse av problemstillingen. Kjente begrensninger, styrker og svakheter, samt feilkilder, tilknyttet metodene vil også bli beskrevet.

2.1. Litteraturstudie

I løpet av høstsemesteret 2011 ble et større fordypningsprosjekt, i faget TBA 4570 Anleggs- og produksjonsteknikk FDP, gjennomført. Problemstillingen i masteroppgaven bygger på samme tema, og har fungert som en videreføring av arbeidet. Ettersom fordypningsprosjektet i all hovedsak var en litteraturstudie av aktuelle tema, var store deler av nødvendig litteratur funnet ved oppstart av masteroppgaven.

Litteraturstudien ble utført ved bruk av universitetsbibliotekets søkeverktøy, som ga tilgang til ulike databaser. De mest brukte databasene var American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Highway Administration (FHWA), Springerlink, Compendex, Scopus og Knowel. Søkemotorene Google og Google Scholar ble også brukt ved innsamling av litteratur. Gjennom søk i presenterte databaser og søkemotorer ble det funnet variert og god litteratur som var relevant for besvarelse av problemstillingen i masteroppgaven. Man har gjennomgående hatt et kritisk syn på anvendte kilder, hentet fra internett. Store deler av litteraturen er gjennom tidligere arbeid vurdert i forhold til troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet. Dette har bidratt til å skille kilder med god informasjon fra kilder med dårlig informasjon.

Foruten bruk av elektroniske kilder er det innhentet mye relevant stoff fra trykte bøker. Med bakgrunn i flere fag innenfor geoteknikk og fundamenteringslære er store deler av litteraturen kjent fra før. Utvalgte lærebøker og kompendier har vært viktige informasjonskilder gjennom hele prosessen.

Under litteraturstudien ble det opprettet kontakt med fagkyndige personer som bidro med mye relevant stoff. Spesielt trekkes Helen Andersson frem som en viktig bidragsyter. Hun bistod med flere gode rapporter og artikler omkring temaet injeksjonspeler. Ettersom store deler av teorien i rapporten bygger på tilsendt litteratur, har studenten forsøkt å være kritisk til kildenes objektivitet og troverdighet. Når det gjelder artikler og rapporter fra Andersson har hun selv gitt sine kildekritiske vurderinger av litteraturen. Med sin dype fagkompetanse innenfor temaet anses dette som tilfredsstillende.

Begrensninger knyttet til litteraturstudien

Ved gjennomføring av en litteraturstudie må det settes begrensninger i forhold til antall brukte databaser og søkemotorer. Dette kan føre til utelatelse av relevant litteratur som finnes andre steder enn der søkene er gjennomført. For denne rapporten er det foretatt en relativt

omfattende litteraturstudie, og man antar å ha fått med seg det meste av sentral litteratur tilknyttet de ulike temaene.

Anvendte bøker og kompendier omhandler ikke emnet injeksjonspeler. Dette er en mindre kjent løsning, noe som gjenspeiles i denne typen kilder. At man ikke har funnet litteratur omkring injeksjonspeler i bøker sees ikke på som en vesentlig begrensning, da man har hatt tilgang på gode rapporter og artikler.

Tilsendt litteratur er begrenset til temaet injeksjonspeler. Man kunne også valgt å forhøre seg med fagpersoner om litteratur tilknyttet betongpeler. Dette er ikke gjort, da man føler å ha funnet tilstrekkelig informasjon omkring temaet i oppsøkt litteratur.

Styrker og svakheter ved litteraturstudien

I forkant av masteroppgaven gjennomførte studenten et teoribasert fordypningsprosjekt med samme tema. Hovedtyngden av litteraturen, presentert i masteroppgaven, støtter seg på kilder funnet i løpet av fordypningsprosjektet. Følgende styrker knyttes til den gjennomførte litteraturstudien:

- Etersom denne masteroppgaven er en videreføring av et allerede gjennomført fordypningsprosjekt, har studenten god forkunnskap omkring diskuterte tema. Dette har vært en nyttig erfaring da man enklere har kunnet velge ut god informasjon fra litteraturen.
- I forbindelse med fordypningsprosjektet fikk studenten oversikt over hvilke søkeord og nøkkelord som gav gode resultater. Dette bidro til å forenkle senere litteratursøk i masteroppgaven.
- Gjennom fordypningsprosjektet fikk man oversikt over ulike forfattere med dyp faglig kompetanse innenfor aktuelle tema. Dette var en viktig erfaring da man senere vurderte kildenes objektivitet og troverdighet.

Følgende svakheter knyttes til den gjennomførte litteraturstudien:

- Hovedtyngden av presentert litteratur støtter seg på kilder funnet i fordypningsprosjektet. Begrenset forkunnskap ved tidligere litteratursøk kan ha ført til unnlattelse av viktige kilder, som burde vært med i masteroppgavens teoridel.
- Store deler av tilsendt litteratur er hentet fra én kontaktperson, hvor innholdet fokuserer på ett tema (injesjonspeler). Denne typen litteraturinnhenting kan medføre subjektive og fargede kilder. Avsenderen har i dette tilfellet lang erfaring innenfor faget, og selv gjort en kildekritisk vurdering av litteraturen. På bakgrunn av dette anses kildene som nøytrale.

2.2. Beregning av forankringslengde

I kapittel 4.3 "Sammenligning av forankringslengde" gjennomføres dimensjonerings av betong- og injeksjonspeler, ved ulike laster og grunnforhold. Hensikten er å avdekke under hvilke forhold man kan få en betydelig reduksjon i forankringslengde. I dette kapitlet vurderes anvendte kilder og litteratur som er lagt til grunn for beregningene.

Det ble brukt ulike beregningsmodeller ved dimensjonering av peleløsningene. Betongpelene ble dimensjonert etter α -analyse, mens injeksjonspelene fulgte en egen metode, utarbeidet spesielt for denne typen pel. Angående betongpelene ble modellen utformet etter beskrivelser i allerede kjent litteratur. I den forbindelse sto kildene "Peleveiledningen 2005" og "Geoteknikk og fundamenteringslære 2" sentralt. Som verifisering, kontrollerte studenten modellen mot beregningseksempler i litteraturen. Metoden for dimensjonering av injeksjonspeler fulgte beskrivelser i "Dimensjoneringsguide/3 – Ischebeck TITAN stag och påle", etter DeNeef (2004). Påliteligheten av beregningsmodellen ble verifisert ved at studenten gjennomførte egne utregninger for virkelige prosjekter, og videre sammenlignet resultatene med konsulents beregninger.

Geotekniske parametere og verdier brukt ved dimensjonering, ble hentet og vurdert fra anvendt litteratur. Grunnen til at studenten ikke valgte å benytte seg av grunndatarapporter var at dette ville hatt liten overføringsverdi for lesere av rapporten. En slik tilnærming ville kun vært gyldig for spesielle forhold, og gitt mindre relevante resultater. Mye av litteraturen var kjent fra tidligere studieemner som studenten hadde gjennomført. I denne sammenheng kan "Peleveiledningen 2005", "Geoteknikk og fundamenteringslære 1", samt "Soil investigations" nevnes. Denne typen kilder anses som troverdig, da litteraturen brukes som grunnlag for læringsformål. Studenten brukte også ulike forskningsrapporter som grunnlagsdata. Flere av rapportene er utarbeidet av kjente kommisjoner, som for eksempel Federal Highway Administration og Pålkommisjonen, hvor dataene baserer seg på et større antall undersøkelser (i forbindelse med virkelige prosjekter).

Begrensninger i metoden

Den største begrensningen med metoden var at studenten ikke fikk testet påliteligheten av resultatene. Normalt gjennomføres prøvepelinger på prosjekter, for verifisering av faktisk bæreevne. I dette tilfellet baserte resultatene seg på antatte geotekniske verdier for ulike jordarter, som ikke var satt i sammenheng med virkelige prosjekter. Verifisering med prøvepelinger var derfor ikke gjennomførbart.

Andre begrensninger ved denne metoden var:

- Undersøkte løsmasser begrenset seg til rene og homogene jordarter av typen leire, silt og sand/grus.
- Undersøkte lastpåkjenninger begrenset seg fra 150 kN – 2000 kN.

Feilkilder

- Ettersom det ikke ble gjennomført prøvepeler for verifisering av beregningene, er resultatene ikke helt pålitelig.
- Studentens begrensede forkunnskap innen peledimensjonering (spesielt injeksjonspeler) kan ha ført til unøyaktige resultater.
- Dimensjoneringen tok utgangspunkt i antatte grunnforhold, og ulike antagelser måtte nødvendigvis gjøres. Foruten antatte geotekniske verdier på jordartene inkluderte dette grunnvannsnivå og homogenitet av grunnmassene.

2.3. Prosjektgjennomgang

Prosjektgjennomgangen tar utgangspunkt i et prosjekt som gjennomføres ved Stjørdal, med Statoil Hydro ASA som byggherre. Årsaken til at akkurat dette prosjektet ble valgt, var at både betong- og injeksjonspeler ble vurdert som peleløsninger. Hensikten med kapittelet er å vurdere prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø ved prosjektet. Målet er å danne et godt utgangspunkt for videre diskusjon, hvor prosjektmålene ses i sammenheng med beskrivelser i teorien.

Tilgjengelig materiale er prosjektdokumenter, kalkyler og grunnundersøkelser fra samarbeidsbedriften Fundamentering AS. Med utgangspunkt i disse data har man sammenlignet kostnader ved bruk av henholdsvis betong- og injeksjonspeler. Kostnadene omfatter alle arbeider til ferdig installert pel. Ved sammenligning har man valgt å benytte seg av referanseprosjekter for verifisering av kostnadsdata. Dette er gjort for å begrense påvirkningen av prosjekt- og markedsavhengige forhold. Med tanke på prosjektmålet tid, har man gjennom dagrapporter beregnet gjennomsnittlig produksjonshastighet/normalproduktivitet ved boring av injeksjonspeler. Angående betongpeler brukte studenten et referanseprosjekt (Sjøholt Næringsbygg) som sammenligningsgrunnlag. Dette prosjektet hadde tilnærmet like grunnforhold og ble derfor valgt. Vurderingen av SHA og ytre miljø ble brukt til å belyse hvordan ulike forskrifter og lovverk påvirket valg av løsning ved prosjektet.

Begrensninger i metoden

- Prosjektgjennomgangen begrenser seg til analyse av ett prosjekt.
- Supplerende referanseprosjekter, for vurdering av prosjektmålene tid og kostnad, begrenser seg til 3 andre prosjekter, to ved kostnadssammenligning, og ett for sammenligning av tid.
- Det er ikke presentert delkostnader ved kostnadssammenligning, da dette er konfidensielle data. Det vil si at stykkpriser, meterpriser og rundsummer for peler og pelekomponeanter, rigger og protokoller ikke tas med. Dette utelukker muligheten for en delkostnadsanalyse.
- En større del av prosjektgjennomgangen inkluderte optimalisering av forankringslengde ved bruk av injeksjonspeler. Dette skulle i utgangspunktet ligge til grunn for beregning av totalt materialforbruk, og videre brukes under kostnadssammenligning. En begrunnelse av hvorfor dette ikke ble gjennomført er gitt i kapittel 5.

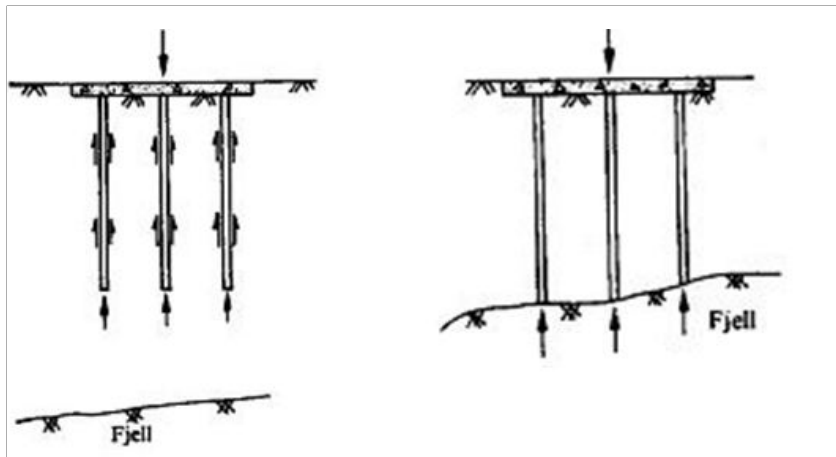
Feilkilder

- Ulike referanseprosjekt er gjennomgående brukt for å validere kostnadsdata og produktivetsmålinger funnet ved prosjektgjennomgang. Man har ikke studert eventuelle prosjektavhengige forhold som kan ha påvirket kostnaden eller produktiviteten på disse prosjektene.
- Det er ikke tatt hensyn til ulik prosjektstørrelse ved sammenligning opp i mot de andre referanseprosjektene. Dette er en faktor som kan påvirke både total kostnad og produktiviteten.

3. Pelefundamentering

Ved oppføring av større konstruksjoner, eller ved bygging på lite bæredyktig jord i de øvre lag, brukes peler for å overføre laster ned til dypere og mer bæredyktig grunnmateriale, eventuelt fjell. Dette omtales ofte som dypfundamentering eller pelefundamentering. Peler er lastbærende elementer som rammes eller bores ned i grunnen. Avhengig av måten pelene overfører lasten til jorda med, skiller man mellom to typer (Aarhaug 2008):

- *Friksjonsbærende peler* (Figur 1) overfører påførte krefter som friksjonskrefter mellom pel og jord i hele pelens lengde. Friksjonspeler har også et spissbærende bidrag som varierer med hvilke grunnforhold pelene fundamenteres i.
- *Spissbærende peler* (Figur 1) overfører den påførte lasten gjennom pelen, via spissen og ned til fast fjell eller hardpakket morene. For spissbærende peler regner man normalt ikke med noe friksjonsbidrag.



Figur 1 Spiss- og friksjonsbærende peler (Aarhaug 2008).

Ved bruk av friksjonspeler svever pelene i løsmasser, eksempelvis sand eller leire. Kraftene som påføres peletoppen opptas av skaffriksjon mellom pelematerialet og omkringliggende jordmasser, samt et varierende bidrag fra spissmotstanden. Spissbærende peler rammes eller bores gjennom løsmasser og ned til fjell eller fast morene. Dermed overføres kraften fra toppen av pelen og direkte ned til det faste laget. (Aarhaug 2008).

Alle typer peler kan videre grupperes etter følgende kategorier: store massefortrengende peler, små massefortrengende peler, samt peler uten massefortrengning. Med store massefortrengende peler menes peler med massivt tverrsnitt, eventuelt hult tverrsnitt med lukket pelespiss. Slike peler rammes eller vibreres ned i grunnen og skaper en massefortrengning av omkringliggende jord. Eksempler er trepeler, betongpeler og lukkede stålrørpeler. Små massefortrengende peler installeres etter samme metode som de overnevnte, men disse har mindre tverrsnitt. Dette kan eksempelvis være profilstål (H- eller I – profiler), hule betongpeler, eller stålrør uten lukket pelespiss. Installering av peler *uten* massefortrengning

skjer hovedsakelig ved boring. Eksempler på slike peler er stålrørspeler, CFA-auger, borede stålrør og borede mikropeler. (Tomlinson and Woodward 2008). I denne rapporten ser man nærmere på de to peletypene injeksjonspeler og betongpeler. I forhold til den overnevnte kategoriseringen faller betongpeler under store massefortrengende peler og injeksjonspeler under små massefortrengende mikropeler.

3.1. Injeksjonspeler

3.1.1. Historie

Utviklingen av mikropeler startet i Italia i etterkrigstiden (1950 – tallet), hvor behovet for refundamentering av historiske byggverk og monumenter, var stort. Det var viktig at man fikk utviklet et fundamentsystem som tålte store laster og som kunne installeres under trange forhold. Samtidig måtte installeringen kunne gjennomføres uten betydelige vibrasjoner, dette for å hindre skader på byggene som ble refundamentert, samt nærliggende byggverk.

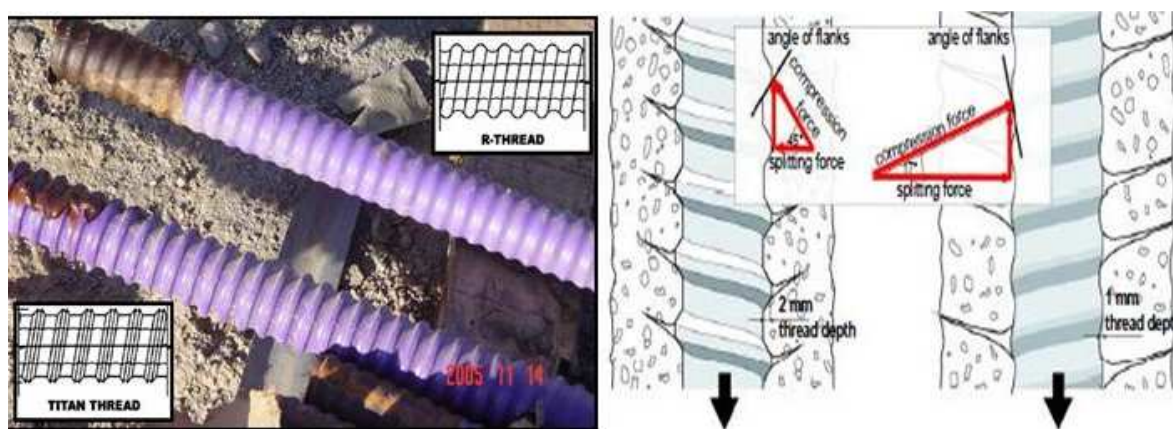
Fernando Lizzie utviklet den såkalte "rot-pelen" (palo radice), en lett armert pel med liten diameter, som ble boret og støpt ut i grunnen. Disse små pelene (cirka Ø 100 mm) krevde mindre borerigger, og man kunne derfor operere under trange forhold. Installasjonen førte dessuten med seg minimalt med vibrasjoner og rystelser. En annen fordel var den gode friksjonsforbindelsen som ble oppnådd ved å injisere betongen etter installering.

Prøvepeler man gjennomførte på denne tiden viste bæreevnekapasitet over 400 kN for mikropeler, sammenlignet regnet man med kapasiteter rundt 100 kN for større peler. (Bruce 1996).

Teknologien omkring mikropeler har vært i stadig utvikling siden den først ble introdusert på 1950 – tallet. Gjennom de siste 20 – 30 årene har utviklingen i boreutstyr og boreteknikk ekspandert, noe som har ført til et utvidet bruksområde for pelene. I den senere tid har mikropelen bidratt til å løse kompliserte problemer hvor fundamenter, med krav til høy kapasitet, kreves installert under trange forhold. Et annet teknisk utviklingsområde er knyttet til pelematerialer. Injeksjonspeler har som eksempel kommet som et nytt produkt på markedet. Uansett om denne typen pel normalt gir høyere materialkostnader enn konvensjonelle mikropeler, har fordelene knyttet til rask installasjon og høy kapasitet, gjort injeksjonspeler til en meget attraktiv løsning. (Cadden *et al.* 2004). Metoden, som innebærer en noe spesiell teknologi, er gjennom flere år blitt utviklet og har fått en økende aksept i markedet. Dette som følge av en fleksibel og rask produksjonsprosess, som gjør installasjon i trange områder mulig. Ut over dette kan det også nevnes at installasjonsprosessen er relativ støy- og rystelsessvak. (Aschenbroich 2005).

3.1.2. Type injeksjonspel

Det finnes per i dag flere produsenter og leverandører av ulike typer injeksjonspeler. Eksempler på peletyper som er etablert i det nordiske markedet er Ischebeck TITAN, MAI og DSI. (Aronsson *et al.* 2004). Forskjellen på de ulike pelene er hovedsakelig knyttet til kvaliteten på stålet, og utformingen på gjengene. I forhold til utforming og kvalitet er det i følge Ischebeck (2010) satt krav om at standardene ASTM A615, EN 10080 og DIN 488 skal tilfredsstilles. Injeksjonspeler leveres, avhengig av produsent, enten med type R-, T- eller TITAN-gjenger. Type R karakteriseres med glatte gjenger, mens type T og TITAN har skarperer gjengekanter. Forskjellen ligger i hvordan rissutviklingen arter seg ved pålasting av pelene (Figur 2). (Aschenbroich 2005, Samtani and Nowatzki 2006).



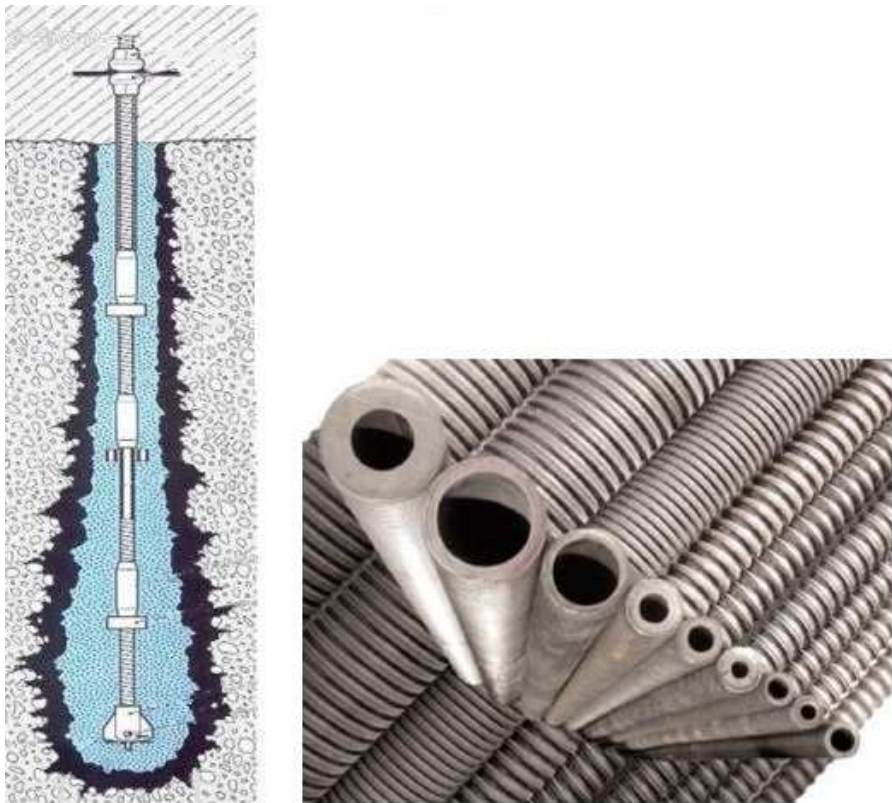
Figur 2 Til venstre vises utformingen på R- og TITAN gjenger (Samtani and Nowatzki 2006). Til høyre illustreres ulik rissutvikling ved pålasting av injeksjonspeler med TITAN-gjenger til venstre og R-gjenger til høyre (Ischebeck 2010).

I denne rapporten fokuseres det på Ischebeck TITAN injeksjonspeler. Ischebeck produserer både med R- og TITAN-gjenger, men i følge Ischebeck (2010) tilfredsstiller ikke injeksjonspeler med R-gjenger de internasjonale stålstandardene ASTM A615, EN 10080 og DIN 488. Dette med hensyn på rissdannelse i betongen, og videre korrosjonsbestandighet, etter pålasting. I Norge følger man standarden NS-EN 14199 "Utførelse av spesielle geotekniske arbeider – Mikropeler". I følge NS-EN 14199 skal stålet oppfylle kravspesifikasjoner etter standarden EN 10080 (CEN 2005). På grunn av dette fokuseres det på injeksjonspeler med TITAN-gjenger.

Andre faktorer som har påvirket valg av type injeksjonspel er samarbeidsbedriftens (Fundamentering AS) kjennskap til produktet. De har mest erfaring med Ischebeck TITAN og det anses som naturlig å ta utgangspunkt i denne typen injeksjonspel. Det er også gjennomført befaring ved produksjonsfabrikken i Ennepetal (Tyskland), slik at man har bedre kjennskap til produktet enn de øvrige peletypene.

3.1.3. Beskrivelse av pel

En injeksjonspjel består av en pel i stål som bores ned i grunnen. Stålet i pelen er hult (Figur 3), noe som gjør det mulig å injisere gjennom pelen og ut borkronen samtidig som man borer. Sementsuspensjonen som injiseres, fungerer som en skylervæske under installeringen og danner en sementbasert kropp rundt stålelementet. Når pelen er boret til endelig dybde kappes stålelementet og man står igjen med en ferdig pel (Figur 3). Denne metoden å installere på, gir meget god friksjon mellom pel og jord, samtidig som man oppnår god korrosjonsbeskyttelse av stålet. Samvirket mellom betong og løsmasser bidrar også til at injeksjonspjeler virker godt både under trykk- og strekkbelastning. (Ischebeck 2002, Samtani and Nowatzki 2006).



Figur 3 Til venstre illustreres en ferdig installert injeksjonspjel (Con-TechSystems 2010). Til høyre vises ulike dimensjoner av stålelement til injeksjonspjeler (Samtani and Nowatzki 2006).

Stålelementet fungerer både som borestreng, armeringsjern og injeksjonskanal. Ettersom stålet er kontinuerlig gjenget kan man kappe og koble sammen elementene til ønsket lengde, noe som reduserer sløsing av materiale under installering. (Aschenbroich 2005).

Injeksjonspjeler leveres i flere ulike dimensjoner. Størrelsene varierer fra 30 - 130 mm, avhengig av produsent, og gjør pelene fleksible (Con-TechSystems 2010). Flexibiliteten kommer av at fundamentløsningen enkelt lar seg optimalisere med hensyn til utnyttelse, da man har mange forskjellige dimensjoner å velge mellom. Kapasiteten til stålelementene varierer med type stålqualität. For Ischebeck TITAN ligger bruddlasten på stålet rundt 8000 kN for de groveste dimensjonene ($130/60 - d_{ytre}/d_{indre}$). (DeNeef 2004).

Sementsuspensjonen som injiseres under boringen danner en friksjonsforbindelse mellom pel og løsmasser, og sikrer god kraftoverføring inn til det bærende stålet. Injeksjonsmassen fungerer også som korrosjonsbeskyttelse for pelen. Typisk v/c-tall for massen er 0,70. Når endelig dybde er nådd bør man skifte til injeksjonsmasse til $v/c = 0,40$ og spyle kontinuerlig inntil hele pelens lengde er dekt med den tykkere massen. Ved å injisere med ca. 15 bar trykk vil man få fjernet vannet rundt pelen og borhullet stabiliseres. Med dette trykket vil betongen trenge inn i løsmassene og man får en god friksjonsforbindelse mellom sementsuspensjon og jord. Injeksjonspeler installeres uten føringsrør, noe som gjør metoden effektiv, da hele operasjonen gjennomføres ved ett produksjonsledd. (Ischebeck 2002, Aschenbroich 2005).

Viktige elementer som inngår i pelekonstruksjonen er vist i Figur 4.



Figur 4 Ulike komponenter som inngår i en injeksjonspeler (TITAN 2010).

Borkroner

For at installasjonsprosessen skal bli så rasjonell som mulig er det viktig å velge en egnet borkrone. Man bør gjøre en vurdering ut i fra grunnundersøkelser, og benytte seg av den typen som antas å være best under de gitte forhold. Det bør også gjøres vurderinger i forhold til diameter på borkrone, ettersom den er direkte knyttet opp mot betongmassens overdekning til stålet, og kapasiteten på pelen. (Samtani and Nowatzki 2006).

Koblinger

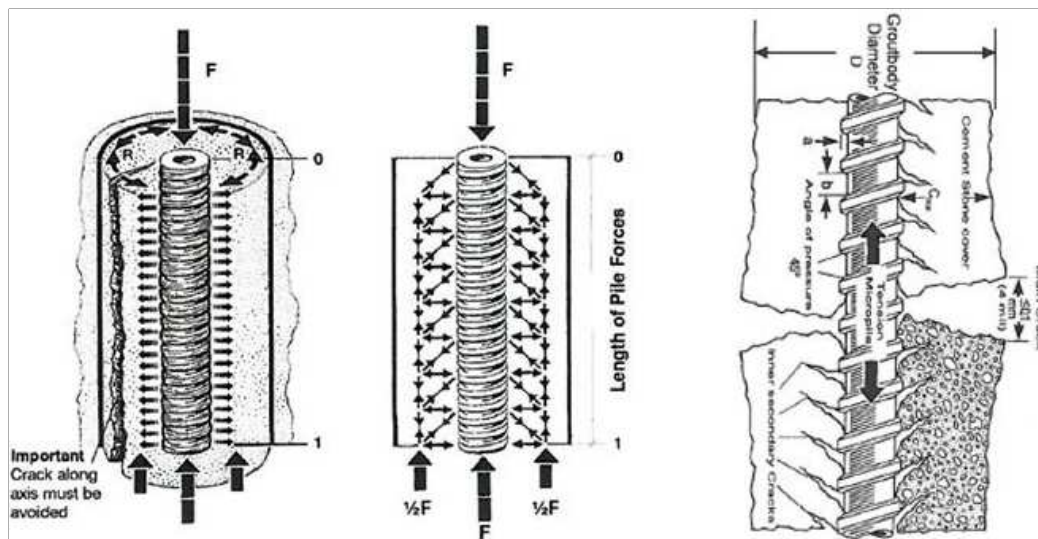
Det settes krav om at styrken til koblingene skal være minst like høy som bruddstyrken til stålet i pelen. Koblingene bør være konstruert og montert slik at man unngår energitap i overgangen mellom stålelementene. Siden gysemasse kontinuerlig spyles gjennom pelen skal koblingene være forseglet slik at lekkasje unngås. (Samtani and Nowatzki 2006).

Senterholdere

Det er satt krav om montering av én senterholder i et intervall på hver 3,0 meter borestreng. Hensikten med senterholderne er å sikre tilstrekkelig betongoverdekning i hele pelens virkelengde, slik at gitte krav i standarden NS-14199:2005 overholdes. (Samtani and Nowatzki 2006, CEN 2005).

3.1.4. Bæreprinsipp

Injeksjonspeler fungerer både som lastbærende element og grunnforsterkningssystem. Når man injiserer betong samtidig som man borer, stabiliseres borhullet samtidig som man øker den opprinnelige styrken/bæreevnen til jordmassene (ved at omkringliggende masser konsolideres). Stålelementet, som brukes til borestreng og injiseringskanal, opptar last samtidig som det fungerer som armeringsjern. (Aschenbroich 2005).

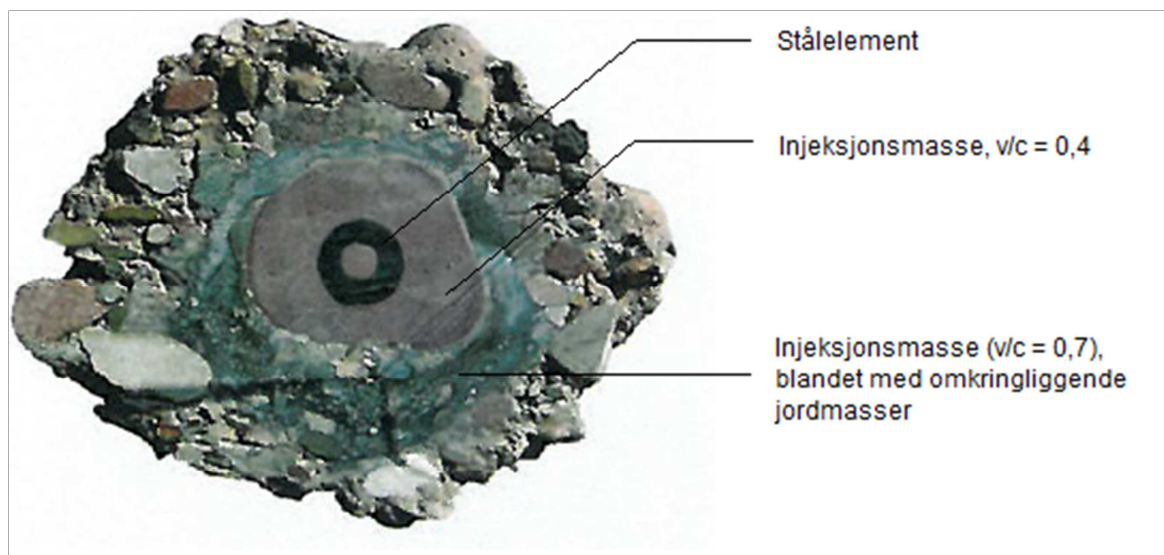


Figur 5 Til venstre illustreres prinsippet for lastfordelingen til injeksjonspeler (Aschenbroich 2005). Til høyre vises riss i betongmasse etter lastpåkjenning (Ischebeck 2008).

Injeksjonspeler danner et sterkere bånd mellom betong- og jordmasser enn konvensjonelle friksjonspeler. Ved å injisere betong med høyt trykk samtidig som man borer, får man stor gjennomtrengning av sementsuspensjon, og dermed en tykk forankringskropp. Dette resulterer i god friksjonsforbindelse mellom injeksjonsmasse og jordmasser. (Samtani and Nowatzki 2006). Pelene er konstruert slik at de skal kunne ta opp både strekk- og trykkrefter. Lastfordelingen skjer fra stålelementet til injeksjonsmassen (deformasjon via

skjærforbindelse) og videre til grenseflaten mellom injeksjons- og jordmasse (friksjon). Stålelementet for Ischebeck TITAN injeksjonspeler er formet slik at man ved 1,25 x dimensjonerende last ikke skal få riss som overstiger 0,1 mm i betongen. Større riss kan medføre friksjonstap og økt fare for korrosjon (Figur 5). For å forhindre dette, er det anbefalt minimum 35 mm betongoverdekning ut til jordmassene. Denne overdekningen bidrar til å balansere spenninger som oppstår i betongen, og reduserer faren for skadelige rissdannelser. Det har vist seg optimalt å bruke gjenger med skuldervinkel rundt 45° (likt kamstål), dette for å sikre en best mulig lastoverføring fra stålet og ut til betongen. Utformingen på gjengene er også avgjørende i forhold til rissdannelser (jfr. kapittel 3.1.2). (Ischebeck 2008).

Fordelingen mellom friksjon- og spissbæring for injeksjonspeler er funnet å være henholdsvis 93 % og 7 % (FOREVER 2004). Disse tallene vil kunne variere avhengig av type injeksjonspeler (produsent), grunnforhold, og gjennomføringen av installasjonsprosessen.



Figur 6 Tverrsnitt av en ferdig installert injeksjonspeler (Aschenbroich 2005).

For å kunne bestemme nødvendig forankringslengde under gitte grunnforhold, er det viktig å kunne estimere størrelsen på friksjonsforbindelsen mellom sementsuspensjon og jordmasser. Ved fundamentering i friksjonsmasser som løs sand og grus har man oppnådd høy kapasitet ved bruk av injeksjonspeler. Dette som et resultat av sementsuspensjonens evne til å trenge gjennom permeable løsmasser og danne gode friksjonsforbindelser. Sammenlignet med konvensjonelle, rammede friksjonspeler får man et forbedret friksjonsbidrag ved å injisere samtidig som man borer, da betongen blander seg med omkringliggende jordmasser (Figur 6). (Samtani and Nowatzki 2006).

tette eventuelle sprekker i grunnen som opptar uakseptabelt mye betong. Rotasjonshastigheten under boring bør ligge mellom 60 – 160 RPM (revolutions per minute). Dette tallet er satt som veiledende verdi for å oppnå ønsket penetrasjonshastighet (rundt 1 meter per minutt). Ved vanskelige grunnforhold kan det være nødvendig med bruk av roterende slagbor. I disse tilfellene vil hastigheten gjerne reduseres. For å oppnå godt samvirke mellom jord og betong, er det anbefalt at man flere ganger i løpet av boreprosessen trekker tilbake borstangen før man fortsetter videre. (Aschenbroich 2005).



Figur 8 Til venstre vises deler av rigg med hydraulisk topphammer og tilkoblet injeksjonsslange. Til høyre vises eksternt blandeverk, samt betongblande og pumpe. (FAS 2010).

Man anbefaler å bruke hydraulisk topphammer (Figur 8), tilpasset de ulike stangdimensjonene, ved installasjon av injeksjonspeler. Minimumskapasitet for rotasjonshastighet og dreiemoment på boreriggene bør være rundt 160 RPM og 2500 Nm, samt en slagenergi på 610 Joule. Vanlige rigger som tilfredsstill disse kravene er TEI, Eurodrill, Klemm, Krupp og Huette. Ved installasjon er det nødvendig med eksterne blandeverk (Figur 8). Optimalt sett bør to betongblandere benyttes, én for den tynnere injeksjonsmassen ($v/c = 0,7$) og én for den tykkere massen ($v/c = 0,40$). En stempelpumpe med kapasitet ca. 120 l/min og 5 – 100 bar trykk er normalt brukt. Dersom man injiserer med for lavt trykk kan man risikere liten overdekning på betongen, og redusert kvalitet på det ferdige produktet. Typiske blandeverk som brukes er av typen Atlas, Häny, Colcrete og Chem-Grout. (Aschenbroich 2005).

Det er viktig at installasjonen gjennomføres av kvalifiserte og erfarne operatører. Grunnen til dette er at materialet må kontrolleres i henhold til de spesifiserte krav, og at mannskapet må være kjent med de vanskeligheter som medfølger installasjonsprosessen. Dette inkluderer blant annet tilstrekkelig overdekning av stålet, og riktig borhastighet for oppnåelse av god friksjonsforbindelse mellom løsmasser og betong. (Samtani and Nowatzki 2006).

3.1.6. Kvalitet

Det er viktig å tenke kvalitet på det endelige produktet ved pelefundamentering. Dette går i all hovedsak på å fremstille et produkt som tilfredsstillende gir krav i standarden (NS-EN 14199 - Mikropeler). For å oppnå dette, er det viktig å fokusere på kvalitet i alle ledd. Dette betyr blant annet nøyaktig prosjektering, valg av riktige materialer, kontroll av materialer, godt gjennomført produksjonsprosess og kapasitetstesting av peler.

Material

Når man får tilsendt pelene på anleggsplassen, bør det foretas en kvalitetskontroll på produktet. Dette innebærer kontroll av peledimensjon, sertifisering av stålqualität, type korrosjonsbeskyttelse, retthet, åpen injeksjonskanal gjennom stålelement, samt 90° kutt på endene. Borkrone bør sjekkes i forhold til størrelse og funksjon. Med funksjon menes om borkronene er tilpasset løsmasseboring eller fjellboring. Det skal foreligge sertifisering på at koblinger har minst like høy styrke som stålelementene for øvrig. Senterholdere skal være tilpasset peledimensjon. Blandingsforholdet av betongen skal bestemmes og regnes ut på forhånd. Det er for øvrig satt krav om v/c-forhold 0,70 ved boring, og overgang til 0,40 når pelen har nådd endelig dybde. (Aschenbroich 2005).

Installering

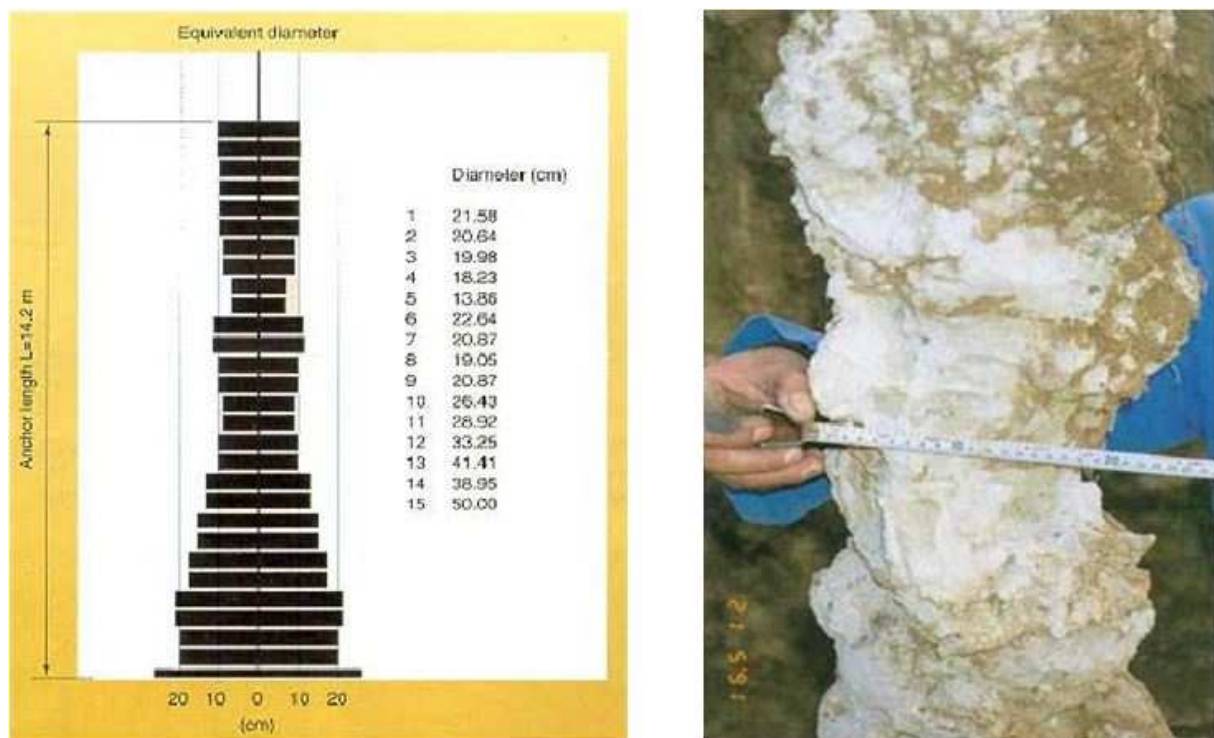
Som forberedende aktivitet bør man forhåndsblende betongmasse i to forskjellige tanker, én med v/c = 0,70 og én med v/c = 0,40. Før man begynner boringen er det viktig å påse tilstrekkelig gjennomstrømning av sementsuspensjon gjennom borestrengen og ut av borkronen. Under boreprosessen skal injeksjonsmassen kontinuerlig flyte ut av borhullet for å sikre tilstrekkelig overdekning av stålet. Ved produksjon er det viktig at rotasjons- og borhastigheten, samt injiseringsstrykket tilpasses grunnforholdene. Dersom man borer i impermeable løsmasser bør injiseringsstrykket økes for å oppnå tilstrekkelig tykkelse på forankringskroppen. Når endelig dybde er nådd skifter man betongblanding fra v/c = 0,70 til v/c = 0,40. Denne massen injiseres, samtidig som pelen dras opp og ned, inntil man ser at den tykkere massen kommer ut borhullet. (Samtani and Nowatzki 2006, Aschenbroich 2005).

Kontrolltesting

En vanlig metode for å undersøke om injeksjonspelen tilfredsstillende gir krav til bæreevne og deformasjon på, er å gjennomføre prøvebelastning. Belastningsforsøkene kontrolleres videre opp mot konstruktørens beregninger. Ettersom man kun tester et utvalg peler, er det viktig at disse er representative for resten av pelene, både med hensyn på grunnforhold og utførelse. Dersom prøvebelastningsforsøkene viser utilstrekkelige resultater, kan man bli nødt til å forandre installasjonsprosedyren, eventuelt rekonstruere fundamentplanen. (FHWA 2000). Under produksjon er det vanlig å kvalitetsteste sementsuspensjonen ved å ta ut betongprøver fra blandeverket, og gjennomføre trykktester på de aktuelle prøvestykkene. Resultatene fra disse testene sjekkes opp mot dimensjonerende verdier. Dersom prøvene ikke tilfredsstillende gir krav til styrke, bør man revurdere blandeforholdet i betongen. (Samtani and Nowatzki 2006).

Utfordringer

Diameteren på forankringskroppen til ferdig installerte injeksjonspeler avhenger av grunnforholdene. Dersom det bores i inhomogen grunn vil man kunne oppleve stor variasjon i betongmassens diameter. En annen faktor som kan gi forskjell, er trykkvariasjon ved injisering. (Eresund 1997). Figur 9 illustrerer hvordan forankringskroppen til en injeksjonspel kan variere med dybden. Dersom variasjonen er stor, kan dette gi problemer i forhold til nødvendig betongoverdekning til stålet i pelen. Liten overdekning kan medføre fare for korrosjon og redusering av pelens bærekapasitet.



Figur 9 Til venstre illustreres registrert variasjon i forankringskropp for en injeksjonspel (Eresund, 1997). Til høyre vises virkelig variasjon i forankringskropp etter utgraving (Con-TechSystems 2011).

Det er ofte usikkerhet knyttet til friksjonsforbindelsen mellom betongmasse og grunnen hvor injeksjonspelene installeres. Denne friksjonsforbindelsen vil kunne variere mye, avhengig av grunnforholdene. Ut over de erfaringstall som allerede foreligger, vil det være nødvendig med ytterligere undersøkelser på dette området. (Andersson 2012 pers. kom.).

3.1.7. Tid og kostnad

Tid er en viktig faktor som knyttes direkte opp mot kostnader i prosjektsammenheng. I dette kapitlet vil man fokusere på tid og kostnad for leveranse, materialer, rigging og produksjon, ved bruk av injeksjonspeler. Grunnen er at disse aktivitetene antas å være de mest tids- og kostnadsgenererende faktorene under produksjonsfasen av et prosjekt.

Materialer

Sammenlignet med betongpeler, stålrørspeler og profilstål er injeksjonspeler dyre ved innkjøp. Materialkostnaden for injeksjonspeler avhenger i stor grad av bearbeiding og kvaliteten på stålet i pelen. Det finnes flere ulike typer injeksjonspeler med varierende stålkvalitet, og man kan oppnå relativt store kostnadsbesparelser ved å benytte seg av billigere løsninger. Dette vil uansett gå ut over kvaliteten på det endelige produktet, og anses ikke som et anbefalt kostnadsbesparende tiltak. (Andersson 2012 pers. kom.). En ferdig installert injeksjonspel består av flere ulike komponenter, som senterholdere, koblinger og borkroner. Kostnaden av disse vil på lik linje med selve pelen avhenge av bearbeiding og kvalitet på materialene.

Leveranse

Sammenlignet med betongpeler, stålrørspeler, profilstål og lignende er injeksjonspeler en mindre utbredt fundamenteringsmetode i Norge. Dette kan føre til dårlig tilgjengelighet på pelematerialer, og dermed økt tidsforbruk ved vareleveranser. Erfaringer fra feltarbeidet viste som eksempel at ulike pelekomponenter måtte ettersendes fra Tyskland. I slike tilfeller forstår man at transporttiden og kostnadene øker. Når dette er sagt, bør det nevnes at injeksjonspeler er små og kan derfor transporteres i store kvantum. Dette bidrar til enklere logistikk for transport både til, og innad på, anleggsplassen.

Rigging

Sammenlignet med større peler vil fundamentering med injeksjonspeler kreve mindre sikkerhetsavstand, det vil bli redusert marktrykk sett i forhold til større pelerigger, og mindre tonnasje blir levert på byggeplass. Dette på grunn av størrelsen på injeksjonspelene, samt boreriggene som brukes under installasjon. Maskiner som brukes til ramming og boring av større peler har høy vekt (40 til 90 tonn), er store og krever mye plass på anlegget. Det er sagt at grunnen for disse maskinene bør bestå av geoduk av god kvalitet under et bærelag av minimum 60 cm pukk og med et lag gode grusmasser på toppen. Sammenlignet har maskiner for installering av injeksjonspeler driftsvekter fra 2 til 25 tonn, og det settes ikke like store krav til grunnforsterkning. (D.N.Pelekomité 2005). Ved å redusere kravene til sikkerhetsavstand og forsterkning av grunn vil dette kunne redusere tids- og kostnadsforbruket i oppriggingsfasen og produksjonsfasen.

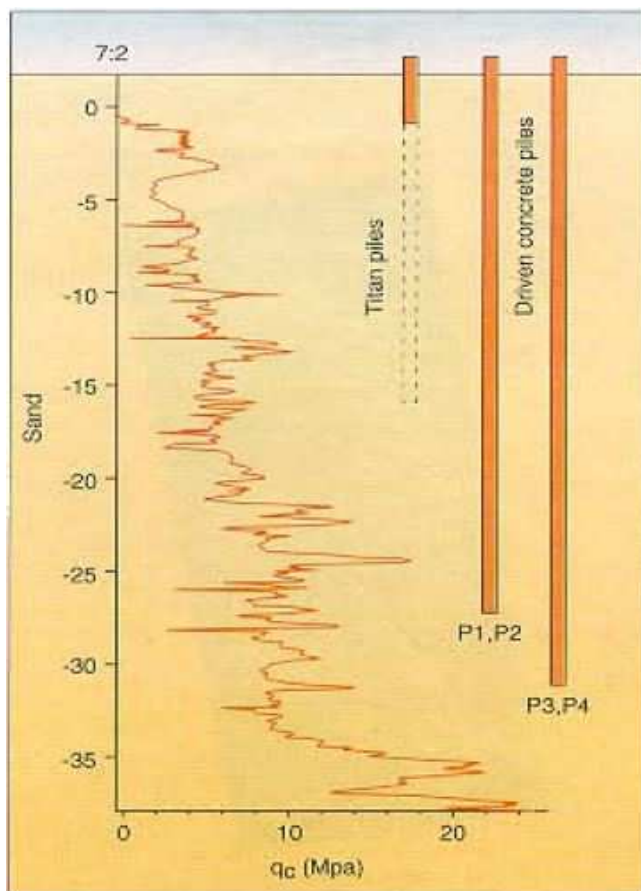
Produksjon

Total produksjonstid er en faktor som avhenger av flere forhold. Plassforhold (størrelse på anlegget), tilgjengelighet på materialer, ramme-/borehastighet og erfaring hos mannskap kan trekkes frem som viktige momenter. Med tanke på plassforhold, vil bruk av injeksjonspeler være spesielt egnet ved trange byggetomter. Dette kommer av små og fleksible rigger for installasjon. Små boremaskiner vil også gjøre det enklere å øke totalproduksjonen med bruk av flere rigger. Med tanke på direkte produksjon er injeksjonspeler normalt raskere enn de konvensjonelle metodene å installere mikropeler på. Dette kommer av at pelene installeres gjennom ett produksjonsledd ved at man ikke trenger føringsrør, samtidig som boring og injisering skjer i samme prosess. (Bennett and Hothem 2010). Normalt ligger borhastigheten

rundt 150 – 250 meter per dag (Flåtten 2012 pers. kom.). Dette er for øvrig produksjonstall som i stor grad avhenger av henviste prosjektforhold (størrelse på anlegg, grunnforhold, tilgjengelighet på materialer, etc.).

Andre tids- og kostnadsaspekter ved bruk av injeksjonspeler

Dersom forholdene ligger til rette kan man sammenlignet med konvensjonelle friksjonspeler få en relativt stor reduksjon i nødvendig forankringslengde. Ved fundamentering i sand- og grusmasser har man registrert dobbelt så høy kapasitet/meter pel for injeksjonspeler sammenlignet med betongpeler (Eresund 1997). Figur 10 viser nødvendig forankringslengde for opptak av tilstrekkelig bærekapasitet ved prosjektet Vårby bro i Sverige.



Figur 10 Sammenligning av nødvendig forankringslengde ved bruk av injeksjons- og betongpeler, for prosjektet Vårby bro i Sverige (Eresund 1997).

Grunnforholdene for dette prosjektet besto av løst lagret sand, og nødvendig forankringslengde viste 15 meter for injeksjonspeler og 27 – 31 meter for betongpeler. (Eresund 1997). Ved å kunne halvere forankringslengden vil man kunne få store kostnadsbesparelser som følge av redusert material- og tidsforbruk.

Til slutt kan det nevnes at injeksjonspeler, grunnet stort antall forskjellige dimensjoner, enkelt lar seg kostnadsoptimalisere. Større peletyper (betongpeler, stålrørspeler, profilstål, etc.)

leveres i et fåtall dimensjoner og man får ofte overkapasitet på hver enkelt pel. Ved å optimalisere utnyttelsen av hver enkelt pel slik at den kun opptar nødvendig bærekapasitet kan man få vesentlige kostnadsbesparelser. (Andersson 2012 pers. kom.).

3.1.8. SHA og ytre miljø

Sikkerhet, helse og arbeidsmiljø er viktige faktorer man må ta hensyn til ved pelefundamentering. Under installering brukes ofte store maskiner, tunge løft kreves ved forflytting av peler og det genereres mye støy under ramme-/borefasen.

Ytre miljø

Det vanligste problemet ved pelefundamentering knyttes til støy og rystelser ved installasjon. Dette gjelder spesielt ved ramming av peler da impulsiv støy genereres, samtidig som man får rystelser/vibrasjoner i grunnen. En stor fordel ved installering av injeksjonspeler er nettopp dens støy- og rystelsessvake gjennomføringsprosess. Dersom arbeidene foregår i tettbebygde områder, samt nær konstruksjoner som er sensitive for vibrasjoner, er metoden godt egnet. (Ischebeck 2002). En støysvak prosess bidrar til et bedre arbeidsmiljø for de ansatte på byggeplass, og verner nærliggende naboer. Ettersom installeringen gir minimale rystelser kan man se bort fra problematikk tilknyttet dette (hovedsakelig setningsskader). En annen fordel, er at myndighetenes krav og restriksjoner til støybegrensning enklere kan overholdes.

Når peler drives ned i grunnen vil jordmasser omkring pelen presses til side eller foran spissen. I finkornige masser som leire og silt, fører denne massefortrengningen til oppbygging av poreovertrykk. Poreovertrykket reduserer de effektive kontaktpenningene mellom kornene i jorda, og skjærstyrken reduseres. Visuelt kan man se dette ved at omkringliggende terreng hever eller beveger seg. Konsekvenser kan være redusert stabilitet i grunnen hvor pelearbeidet finner sted, mindre bæreevne for pelene, samt setninger og skader på nærliggende bygg. (D.N.Pelekomité 2005). Injeksjonspeler er av små dimensjoner, og de bores ned i grunnen. Denne måten å installere på gjør at man kun får en liten massefortrengning ved installering. En annen fordel med systemet er dets evne til å fungere som grunnforsterkningsystem. Ved å injisere betong samtidig som man borer er det ved ulike forsøk påvist en forbedring av jordas bæreevne opp mot 30 %. (Ischebeck 2002).

Hovedmiljøproblemet ved boring av peler er normalt knyttet til utslipp av borslam. I denne forbindelse menes slam fra vann-/luftspyling (ved boring av føringsrør til stålkjernepeler). (D.N.Pelekomité 2005). Ved installering av injeksjonspeler vil ikke utslipp av borslam være aktuelt, derimot vil spill av gysemasse kunne oppleves som et problem. Sementsuspensjon vil i likhet med borslam ikke kunne slippes ut på avløpsnett eller til vann og elver, og man må finne alternative metoder for å kvitte seg med massen.

SHA

Ved pelefundamentering settes det visse krav til plassforhold på anlegget. Dette går på sikkerhetsavstand rundt peleriggene, kraner for løfting og forflytting, samt plass for lagring av peler. Ofte fører dette til meget trange arbeidsforhold, noe som kan gå ut over sikkerheten på byggeplassen.

Installering av injeksjonspeler utføres med små borerigger og med eksterne blandeverk, noe som gjør metoden spesielt egnet på områder med begrenset plass. Pelene er relativt lette, slik at man kan bruke håndmakt for transport og plassering på borerigg. Med tanke på lagring av pelene vil dette sjelden oppleves som et problem grunnet størrelsen på stålelementene. Maskinene som brukes ved installering har driftsvekter fra 2 – 25 tonn. Dette tilsvarer ca. 25 % av vekten til normale pelerigger (til ramming). Sammenlignet med større pelemaskiner vil derfor kravene til sikkerhetsavstand rundt boreriggene reduseres betraktelig. (D.N.Pelekomité 2005). Et potensielt problem kan som nevnt være utslipp og oppsamling av gysemasse. Foruten påvirkning på det ytre miljøet, kan dette skape utfordrende arbeidsforhold for de ansatte på byggeplassen.

Uansett om installasjon av injeksjonspeler er en SHA-vennlig løsning, bør man foreta en SJA – sikker jobbanalyse. Dette bidrar til en sikrere gjennomføringsprosess av arbeidene på anleggsplassen. I denne rapporten velger man å ta utgangspunkt i Fundamentering AS sin beskrivelse av forhold som kan medføre risiko ved boring av injeksjonspeler (FAS 2007a):

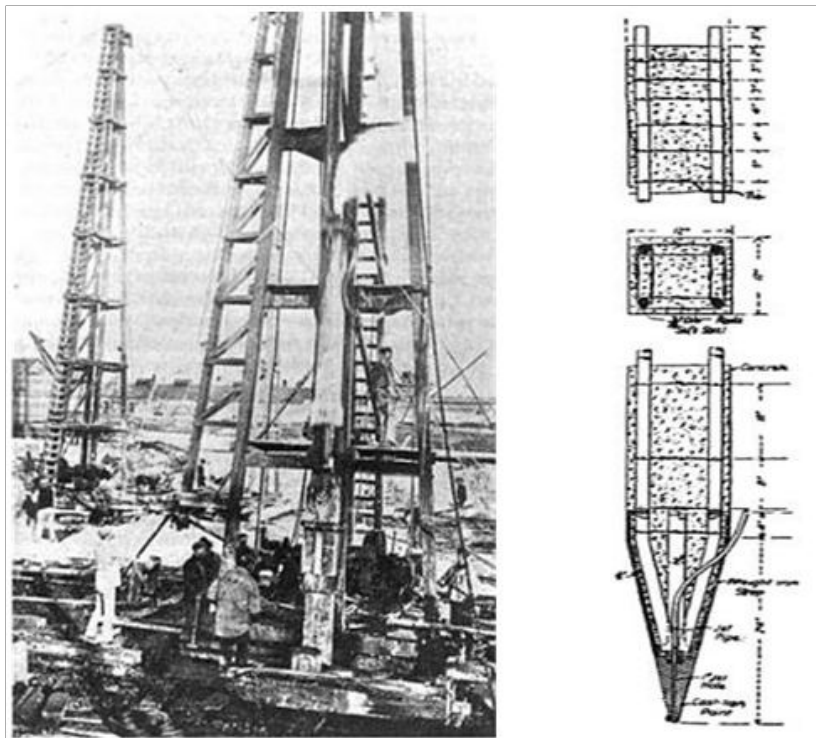
- Skader ved fallende gjenstander fra kranhiv
- Slinger og koblinger ryker ved stort trykk
- Brannskader ved skjæring
- Jekk som slipper ved strekktesting av peler
- Sement på hud ved injiseringsarbeider
- Støy under boring
- Tunge løft ved hendling av materiell og utstyr
- Støv ved bruk av sement
- Klemskader ved produksjon av peler

Overnevnte faktorer, som kan medføre skader på anleggsarbeiderne, analyseres i forhold til sannsynlighet og konsekvens. For å forhindre nevnte faremomenter bør det legges til rette for riktig bruk av verne- og produksjonsutstyr. Kompetanse ved bruk av ulike maskiner og utstyr skal også være en forutsetning, pålagt de ansatte. I etterkant av arbeidene bør arbeidsprosessen dokumenteres. Her skal det legges vekt på eventuelle skader, eller farlige situasjoner som har oppstått i løpet av pelingen. Ved å utforme gode rutiner for gjennomføring og dokumentering, skal dette kunne bidra til å redusere risikoen for skader. Til slutt bør det nevnes at faktorene gjengir generelle beskrivelser av risikoarbeider tilknyttet injeksjonspeling. Det bør også sees på spesielle forhold, tilknyttet hvert enkelt prosjekt, ved utarbeidelse av en SJA.

3.2. Betongpeler

3.2.1. Historie

Utviklingen av betongpeler startet på slutten av 1800 – tallet, da behovet for høykapasitets dypfundamenter gjorde seg gjeldende. Tidligere hadde trepeler vært dominerende som fundamentsystem, men ettersom utbyggingen av større byggverk med tilhørende store laster ble mer vanlig, økte behovet for slike peler. En annen fordel med betongpeler kontra trepeler, var muligheten for ulik utforming, og derav optimalisering ut i fra laster og grunnforhold. (Tomlinson and Woodward 2008). De første betongpelene man kjenner til stammer fra franskmannen Francois Hennebique, derav navnet Hennebique-peler (Figur 11). Med et kvadratisk tverrsnitt, lengde- og bøylearmering, samt pelespiss av stål, var disse relativt lik nåtidens betongpeler. (Sutherland *et al.* 2001).



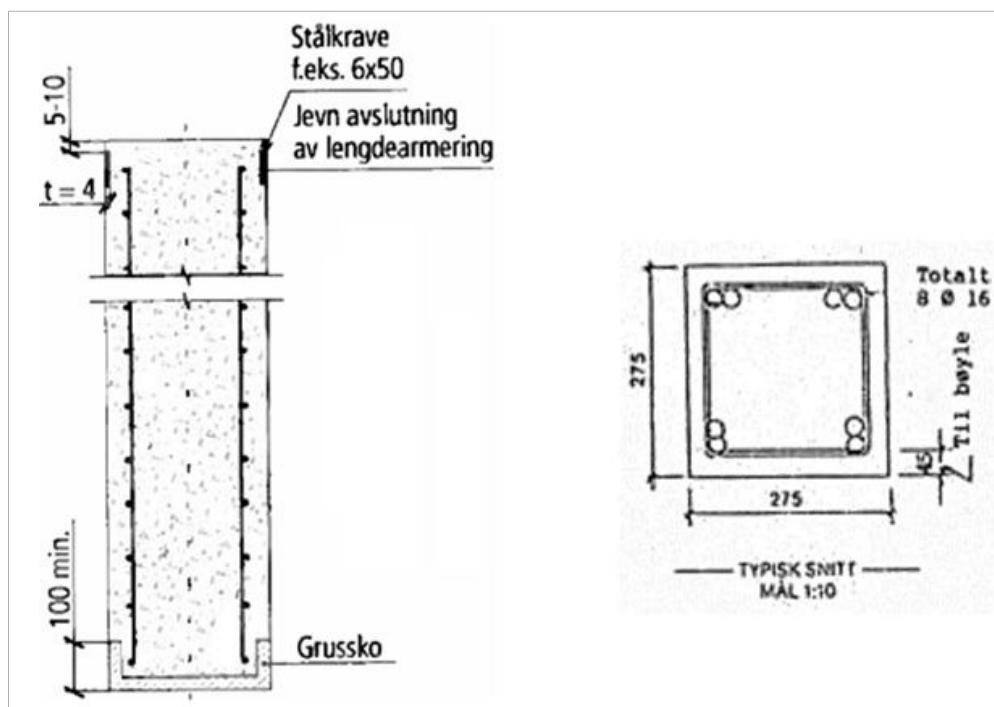
Figur 11 Ramming av Hennebique-pel, Plymouth (1900), samt snitt av samme type pel (Sutherland *et al.* 2001).

Et tidlig kjent britisk eksempel som inkluderte bruk av betongpeler, var fundamentering av et kornlager i Plymouth (tidlig 1900-tall), hvor 10 meter lange Hennebique-peler ble nedrammet (Figur 11). Senere kom flere typer på markedet (Armco-, Considère- og Coignet-peler), og ettersom systemet ble mer kjent ekspanderte bruken av denne fundamentløsningen. (Sutherland *et al.* 2001). I dag anses betongpeler som en godt kjent og utviklet løsning ved dypfundamentering. Pelene er økonomisk sett gunstige og produksjonsprosessen er rask. Dette har ført til at betongpeler brukes over større deler av Europa, og er i dag den mest brukte peletypen i Norge. (NGF 2001).

3.2.2. Beskrivelse av pel

Prefabrikkerte betongpeler skal utføres i høyverdig betong med lengdearmring og bøyle- eller spiralarmering. Pelene kan i prinsippet være slakk- eller spennarmerte. Forspente peler har ved visse grunnforhold vist bedre nedtrengningsevne, samtidig som de har større momentkapasitet og kan brukes dersom opptak av strekkrefter er nødvendig. Tross dette er slakkarmerte peler normalt brukt i Norge. (D.N.Pelekomité 2005, Aarhaug 2008).

Utformingen i peletoppen skal være slik at rammekraften blir jevnt fordelt over hele tverrsnittet, hvor man ønsker å unngå eksentrisk belastning ved nedramming. Dette sikres ved å avrette endeflaten slik at den står vinkelrett i forhold til pelens lengdeakse. Pelehodet bør beskyttes med en stålkrave for å unngå ødeleggelser i form av knekking, avskalling eller oppsprekking under ramming. Spissbærende peler skal ha pelespiss av stål (bergspiss), mens friksjonspeler utformes med grusko (Figur 12) såfremt dette ikke medfører rammetekniske problemer. Skissen under viser ikke peleskjøter, men disse skal dimensjoneres med samme trykkapasitet som pelen for øvrig. Skjøtene har samme krav til skjevhet som peletoppens endeflate, dette for å sikre god kraftoverføring i overgangene. (D.N.Pelekomité 2005).



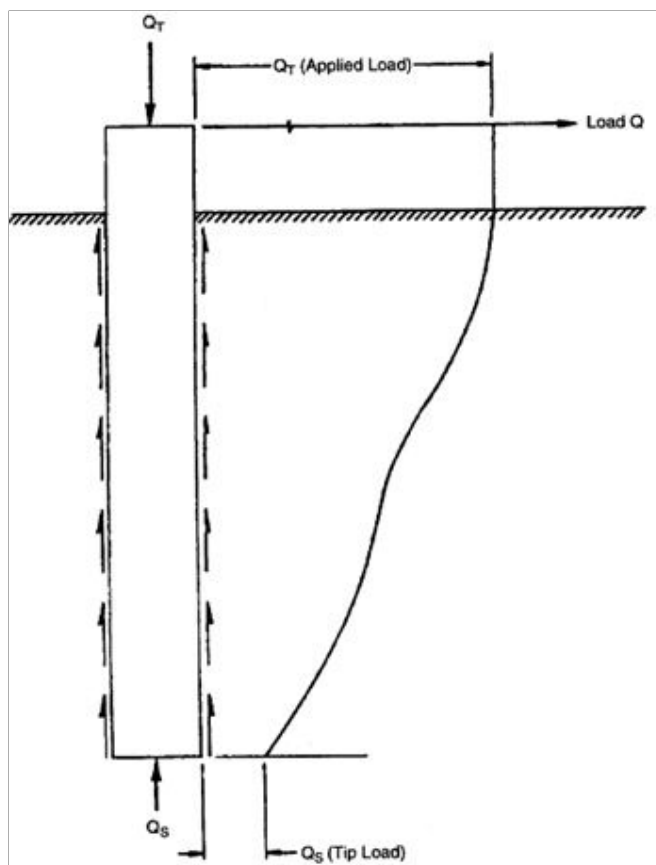
Figur 12 Prinsippskisse for utforming av betongpel, samt tverrsnitt av denne (D.N.Pelekomité 2005).

Standard betongpeler er av typene P230NA, P270NA, P270MA og P345 MA, hvor tallene angir dimensjon i mm, og NA og MA angir krav til overdekning av armering. Pelene har dimensjonerende aksialkapasitet fra 1500kN for P230NA til 3000kN for P345MA. (NGF 2001). Pelene skal produseres ved fabrikk underlagt kontroll og sertifisering av godkjent teknisk organ. Det stilles krav om at elementer som rammes ikke får åpne sprekker bredere enn 0,3 mm, med en lengde større enn halve omkretsen. Peletoppens endeflate skal være

vinkelrett på lengdeaksen hvor tillatt avvik er 1:100. Endeflater ved skjøtene skal maksimalt ha en skjevhet lik 1:150. I forhold til betongkvalitet stilles det krav til fasthetsklasse B45, bestandighetsklasse MF40 og kloridklasse Cl 0,10. (Prosesskode 2 - Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier 2007). Det er ikke lagt inn krav til overkapasitet ut over forutsetningene i prosjekteringsgrunnlaget. Man kan for øvrig velge å bruke betongpeler med større dimensjon enn prosjektert, men ikke mindre. (D.N.Pelekomité 2005). Overnevnte krav og toleranser bidrar til å forhindre skader som oppsprekking og avskalling ved ramming, og gir dermed en mer levedyktig pel.

3.2.3. Bæreprinsipp

En friksjonsbærende betongpel får hovedsakelig sin lastbæring via friksjon langs pelens overflate. En typisk lastfordelingskurve langs en betongpel, og aksialt belastet friksjonspel for øvrig, er vist i Figur 13. Spissbæringen er normalt liten for rene friksjonspeler, dette bidraget varierer med hvilke løsmasser man installerer i. (Reese *et al.* 2006).



Figur 13 Typisk lastfordeling av aksialt belastet, friksjonsbærende betongpel (Reese *et al.* 2006).

Friksjonsbæringen mobiliseres ved en liten relativ bevegelse mellom pel og jord, mindre enn 5 mm (NGF 2001). Selve friksjonskraften avhenger av skjærkreftene (τ_s), langs peleskaftet. Vurderingen av τ_s bestemmes ut i fra de aktuelle grunnforholdene, normalt S_u -korttidsanalyse

for leire og $\alpha\phi$ -langtidsanalyse for sand og leire. Ved ramming i leire vil τ_s være den samme som omrørt rekonsolidert skjærstyrke, mens den for sand avhenger av normalspenningene mot peleskiftet, samt ruhetsforholdet. (Aarhaug 2008).

Man bør være oppmerksom på at negativ friksjon kan forekomme etter betongpelene er installert. Med dette menes at omkringliggende jord fester seg på pelen og gir påhengslaster. Dette kan oppstå dersom omkringliggende jord setter seg mer enn pelen, og kommer i mange tilfeller som en direkte konsekvens av rammingen. Negativ friksjon vil redusere pelens lastbærende evne da den "spiser opp" pelens lastkapasitet. (NGF 2001). Dette er forhold man bør tar hensyn til ved kapasitetsberegning for betongpeler, og friksjonspeler for øvrig, og er av betydning for å unngå brudd eller oppsprekking som fører til tap av bæreevne.

Friksjonsbærende betongpeler vil øke sin bærekapasitet med tiden, dette på grunn av at pelen gror fast i jorda. Størsteparten av økningen skjer i løpet av den første måneden. Normalt vil en rammet betongpel ved installering ha et synkmål omkring 6 – 10 mm per slag, men hvis man etterrammer pelen noen uker senere kan dette målet ha sunket til godt under halvparten. Det er vist at friksjonspeler øker sin kapasitet med 20 – 40 % etter 3 – 4 uker, noe som gir utslag i at man rett etter installasjon har en god del lavere kapasitet enn den endelige bærekapasiteten tilsier. (NGF 2001).

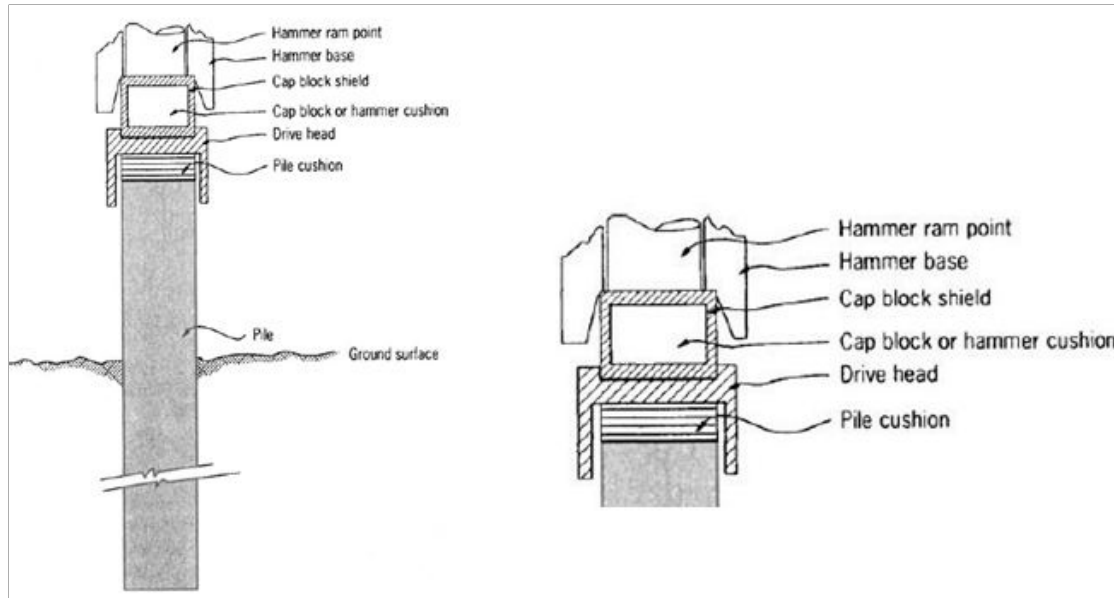
3.2.4. Installasjonsmetode og utstyr

Det er viktig at peler rammes slik at de kommer i riktig posisjon, uten at de skades under installasjonen. Visse forhåndsregler bør tas før man begynner, hovedsakelig for å unngå skjevheter og konsekvenser av dette. Man bør eksempelvis påse tilstrekkelig symmetrisk peleprofil, lokalisere stein eller blokker i grunnen, ha parallell bom under hele rammingen, samt fokusere på sentriske slag. (D.N.Pelekomité 2005). En vanlig rammeprosedyre er i følge NGF (2001):

1. utstikking
2. produksjonsramming
3. kriterieramming (som bør avsluttes med noen lette slag for å forsikre seg mot heving)
4. nivellement
5. etterramming
6. nivellement
7. peler som har beveget seg vertikalt +/- 2 mm skal etterrammes på nytt
8. innmåling
9. godkjennelse av pel
10. kapping

Etterramming brukes som regel kun for spissbærende peler. Figur 14 viser eksempel på anretning som sikrer god overføring av kraften fra falloddet til pelen. Man ser av figuren at pelehodet forsynes med en slaghette (drive head) installert over et mellomlegg (pile cushion). Dette skal sikre god kraftoverføring fordelt over hele tverrsnittet, samt bidra til å unngå

ødeleggelse av peletoppen ved nedramming. Slaghetten beskyttes i toppen mot loddet med en slagpute (hammer cushion). Denne slagputen bidrar til å transportere slagenergien på en effektiv måte. Bruker man denne anretningen på riktig måte, samtidig som man påser at utstyret til enhver tid ikke er skadet eller utmattet, gir dette en god og sikker overføring av energi mellom lodd og pel. (Prakash and Sharma 1990, D.N.Pelekomité 2005).



Figur 14 Anretning for sikring av god energioverføring fra lodd til pel som kan brukes ved ramming av betongpeler (Prakash and Sharma 1990).

Rammingen anses som en kritisk fase ettersom den ofte påfører pelene større påkjenninger enn de senere vil bli utsatt for i byggverket. Dette skyldes at nedramming av betongpeler kan gi utmattelse og reduksjon av betongens fasthet. De viktigste faktorene som forårsaker skader ved ramming er fallhøyde, slagantall og synkmål. (NGF 2001). Tabellen under viser anbefalte maksimale fallhøyder i meter for ramming av betongpeler med fallodd i ulike løsmasser (D.N.Pelekomité 2005).

Tabell 1 Anbefalte maksimale fallhøyder for ramming i ulike masser (D.N.Pelekomité 2005).

Rammeforhold	Stort slagantall	Få slag (< 10)
Meget bløt, sensitiv leire	Fallhøyde avhengig av hvilken strekkraft peleskjøten kan oppta	0,1 – 0,15 m
Middels bløt leire, løst lagret sand	Fallhøyde avhengig av hvilken strekkraft peleskjøten kan oppta	0,15 – 0,3 m
Sand og grus eller fast leire	0,3 – 0,4 m	0,4 – 0,5 m
Stoppslagning mot berg	0,25 – 0,3 m	0,3 – 0,35 m

Erfaringer har vist at flere slag med stor fallhøyde ($> 0,4$ m) og liten synk ($> 2 - 3$ mm) øker faren for skader under installasjon (NGF 2001). I tabellen er det ikke referert til loddvekt. Dette er også en viktig faktor som må tas hensyn til for å unngå skader på pelen. Dersom man følger de gitte anbefalinger for installasjon, skal dette kunne bidra til en kvalitetsmessig god og levedyktig betongpel. Med tanke på produksjonsutstyr- og maskiner, er hydrauliske fallodd av typen Banut eller Junttan normalt brukt i Norge. Figur 15 viser en pelerigg med Junttan hydraulisk fallodd. Pelemaskinene er beltegående og veier som oftest mellom 40 og 90 tonn. Fallvektene varierer mellom 4 – 6 tonn, men kan også leveres større. Loddene har en typisk virkningsgrad rundt 0,85 – 0,90 for vertikale peler, et tall som reduseres for skråpeler. (NGF 2001).



Figur 15 Pelerigg for ramming.

Ved ramming i løsmasser kan det oppstå store strekkspenninger som vil kunne forringe pelens kvalitet, og i verste fall slite den rett av. Under slike forhold bør man vurdere å redusere fallhøyden til loddet (Tabell 1), eventuelt bruke mindre tyngde på falloddet. Dersom man rammer til berg, eller i store steinblokker, kan trykkspenninger knuse pelen. Dette er forhold man bør ta hensyn til før arbeidet starter og produksjonsutstyr velges. (Fleming *et al.* 2009).

3.2.5. Kvalitet

Som for alle typer peler er det viktig å kunne fremstille betongpeler slik at de overholder krav gitt i standardene, NS-EN 12699 og NS-EN 12794 for betongpeler. Valg av riktige peledimensjoner, kontroller etter leveranse på byggeplass, godt gjennomført installasjonsprosess, samt testing etter installering er viktig for å oppnå dette. Videre vil man se på områder det bør rettes fokus mot for å oppnå god kvalitet på en ferdig installert betongpel.

Material

Betongpeler skal produseres ved fabrikk underlagt kontroll og sertifisering av godkjent teknisk kontrollorgan. Her påføres produksjonsdato og teknisk informasjon som sjekkes før installasjon på byggeplassen. Peleelementer som før nedramming har åpne sprekker større enn 0,5 mm eller langsgående sprekker lengre enn 200 mm, skal ikke benyttes. Dette kan gå ut over korrosjonsbestandigheten, og redusere pelens levetid. Endene på betongpelene skal være beskyttet med en skjøtekonstruksjon eller en stålkraue. Dette for å sikre pelene fra å løsne, samt beskytte peletoppen mot ødeleggelse under rammingen. Andre faktorer som bør sjekkes før installasjon, er vinkelrett endeflate ved peleskjøter- og topp, egnet pelespiss for aktuelle grunnforhold, retthet på peleelement, samt eventuell korrosjonsbeskyttelse. (D.N.Pelekomité 2005).

Installasjon

Som referert til i kapittel 3.2.4, er det viktig at pelene anrettes slik at de kommer i riktig posisjon under rammingen. Faktorer man bør være observant på, før og under denne fasen, er i følge D.N. Pelekomité (2005):

- lokalisering av stein og blokker
- symmetrisk peleprofil
- parallell bom under ramming
- sentriske slag (for å unngå utglidning)

Før man starter installeringen, er det viktig å legge til rette for god kraftoverføring mellom lodd og pel. En anretning, som vist i Figur 14, kapittel 3.2.4, vil kunne bidra til dette, samtidig som man sikrer seg mot knekking, avskalling og oppsprekking ved installering. (Prakash and Sharma 1990). Ved ramming av peler er det viktig å optimalisere fallhøyden og slagantallet i forhold til synken. Få slag med liten fallhøyde på loddet har vist seg å være optimalt i forhold til å unngå skader på peleelementene. (NGF 2001). Veiledende verdier, sett opp i mot ulike grunnforhold, kan leses av Tabell 1, kapittel 3.2.4.

Kontrolltesting

Behovet for prøvebelastning av betongpeler er ikke like viktig som for injeksjonspeler (og andre peler som støpes ut i grunnen). Dette kommer av at man kan kontrollere ramme-motstanden under installasjon, og man har derfor god kontroll på friksjonsbæringen. Kontrollramming kan være nødvendig dersom man mistenker påhengslaster på pelene. Dette kan komme som en konsekvens av oppfylling, grunnvannssenking, generell terrengsetning

eller som en følge av rammingen. Påhengslaster reduserer pelens lastbæring, og det kan være nødvendig å kontrollere virkelig kapasitet en tid etter installasjon. Til slutt kan det nevnes at betongpeler med tiden gror fast i jorda, og friksjonsforbindelsen mellom pelen og løsmassene øker. Dersom pelen etterrammes 3 – 4 uker etter produksjonsramming kan synken ha falt til godt under halvparten (derav økt lastkapasitet). (NGF 2001).

Utfordringer

Betongpeler er sårbare for ramming i grove fyllmasser eller gjennom bløte masser der de ikke har sidestøtte. Pelene er ellers mindre egnet på områder det forventes hard og langvarig ramming, eller ramming i veldig sensitive og løse masser. Dersom man rammer til berg, eller treffer store steinblokker på vei ned, kan dette medføre knusing og oppsprekking av pelematerialet. Ved ramming i veldig bløte masser, kan strekkrefter medføre sprekkedannelse i pelen og i verste fall avrivning. Man bør være spesielt oppmerksom på skjøtene dersom høye strekkrefter forventes. Dette er den svakeste delen i pelekonstruksjonen (med tanke på strekk) og man bør rette fokus på å unngå brudd. (Fleming *et al.* 2009). Sprekker kan medføre korrosjon av armering, noe som igjen forringer bærekapasiteten. En annen konsekvens av overramming kan være skade av peletopp eller pelespiss. Dette kan føre til at topp eller bunn av pelen sprekker, skaller av eller knekker. (Fleming *et al.* 2009, D.N.Pelekomité 2005).

3.2.6. Tid og kostnad

Tid er nært knyttet til kostnad i prosjektsammenheng, man velger derfor å se på disse to faktorene samlet. Fokuset vil være tid og kostnad for leveranse, materialer, rigging og installering, ved bruk av betongpeler. Grunnen er at dette anses som de viktigste tids- og kostnadsgenererende faktorene i et prosjekt.

Materialer

I forhold til materialpris er betongpeler en av de billigste pelefunderingsmetodene man har i Norge. Den eneste pelen som økonomisk sett kan konkurrere er HP-peler (profilstål). For normale jobber av middels størrelse kan man regne med følgende enhetspriser for ferdig installerte betongpeler (NGF 2001):

- P230NA: 350 – 400 kr pr. meter installert pel
- P270MA: 430 – 500 kr pr. meter installert pel
- P345MA: 700 – 800 kr pr. meter installert pel

Prisnivået kan variere fra sted til sted avhengig av marked og tilgjengelighet på materialer. Nevnte priser gjelder år 2001, og en kan forvente at dagens priser ligger noe høyere. Betongpeler er grunnet materialkostnaden en økonomisk løsning. Sammenlignet med behandlet stål (eksempelvis stålkjerner og injeksjonspeler) er betong billig. Total pris varierer med type og dimensjon, skjøter, peletopp og pelespiss. Skjøter og pelespiss er dyre komponenter og kan være med på øke den totale materialkostnaden (Karlsen 2011). Type betongpel innebefatter betongkvalitet, dimensjon og overdekning på armering. Her vil kostnaden naturlig nok øke med større dimensjon og bedre kvalitet på betongen.

Leveranse

Ettersom det finnes flere entreprenører som produserer betongpeler selv, gir dette forholdsvis kort leveringstid ut til de fleste anlegg, samtidig som det er økonomisk fordelaktig (D.N.Pelekomité 2005). For å sammenligne kan man se på stålkjernepeler. De kjøpes ofte (på grunn av pris) inn fra utlandet, sendes videre til bearbeiding hvor gjenger, senterholdere, etc. monteres, og leveres til slutt ved byggeplass. Ved å ha produsenter som leverer betongpeler etter norske krav og forhold, vil en slik prosess gå mye raskere. En ulempe med betongpeler, er tyngden på peleelementene. Store og tunge laster krever flere leveranser til byggeplass, større tonnasje levert på anlegget, mer kompleks logistikk, derav og økt tid og kostnad.

Rigging

Ramming av betongpeler krever stort og tungt utstyr, noe som setter visse krav til arbeidsplassen. Dette går på størrelse på byggeplass, kvalitet og bæreevne på grunnen man skal arbeide fra, samt krav til sikkerhetsavstand. Ferdig opprigget har pelemaskinene en bredde opp mot 5m, lengde på 13m og høyde opptil 31m. Størrelsen avhenger av hvilke maskiner man bruker, men generelt er utstyret stort og krever en betydelig plass på anlegget. Ettersom maskinene er tunge (40 – 90 tonn) settes det krav til kvalitet og bæreevne på grunnen man skal arbeide fra. Det er sagt at grunnen, som et minimum, bør bestå av geoduk av god kvalitet under et bærelag av minimum 60 cm pukk, og med et lag gode grusmasser på toppen. (D.N.Pelekomité 2005). Dette kan medføre økt tidsforbruk og store riggekostnader, spesielt ved trange prosjekter, og oppføring av byggverk på sensitiv grunn.

Installering

Dersom det ikke finnes restriksjoner i form av støy-/vibrasjonskrav, setninger i grunnen, eller hinder i grunnen som blokkstein og fyllmasser, er det nesten med unntak alltid økonomisk fordelaktig med rammede betong- eller stålrørspeler (Aronsson *et al.* 2004). Betongpeler har dessuten god lastbæreevne, lang levetid og kort leveringstid (NGF 2001). Tradisjonelt sett har ramming av betongpeler vist seg som en av de raskeste metodene dersom forholdene ligger til rette for det. Installasjonshastigheten ligger normalt rundt 250 – 400 meter per dag (Flåtten 2012 pers. kom., Dybvik 2012 pers. kom.). Den totale installasjonstiden varierer for øvrig med grunnforholdene. Hvis man eksempelvis rammer i sensitiv leire må loddvekten og fallhøyden reduseres for å unngå oppbygging av poreovertrykk, og stabilitetsproblemer som følge av dette. Ved installering i masser som inneholder stor stein, hvor hard og langvarig ramming forventes, er pelene mindre egnet. Dette på grunn av risikoen for skader på pelematerialene. Under slike forhold vil produksjonstiden kunne gå opp. (NGF 2001).

3.2.7. SHA og ytre miljø

SHA og ytre miljø har i den senere tid blitt meget viktige faktorer i gjennomføringsfasen av prosjekter. I forhold til pelearbeider er det største miljøproblemet knyttet til støy og vibrasjoner i grunnen ved produksjon. I dette kapitlet vil man se hvordan installering av betongpeler stiller seg i forhold til dette.

Ytre miljø

Hovedproblemet med betongpeling er knyttet til impulsiv støy, det vil si støy fra ramming med fallodd. Ved bruk av konvensjonelt rammeutstyr vil ekvivalent støynivå ligge rundt 92 – 94 dB ved ramming. Krav om maksimalt støynivå ned mot 75 dB er blitt satt i tettbebygde strøk, noe som i praksis vil si at det alltid må søkes om dispensasjon fra lokale myndigheter for de aktuelle periodene man skal ramme. Den mest åpenbare negative konsekvensen av støy er selvsagt knyttet til dårlig miljø for arbeiderne på byggeplass, og naboer. En sekundær konsekvens er begrensning i arbeidstid, da myndighetene kan begrense hvor lenge man får tillatelse til å drive med arbeidet. (D.N.Pelekomité 2005, NGF 2001).

Et annet kjent problem, relatert til ramming av betongpeler, er vibrasjoner i grunnen og påfølgende fare for nærliggende bygg. Restriksjoner i forhold til tillatt rammekraft og fallhøyde, kan medføre økt tid og kostnad ved at det reduserer produktiviteten. Undersøkelser bør gjennomføres for å kunne forutse høyeste sannsynlige maksimumsverdi av rystelser, og derav etablering av sikkerhetstiltak for beskyttelse av nærliggende bygninger. NS 8141 fokuserer på måling av svingehastighet og beregning av veiledende grenseverdier for å unngå skade. Tross denne standarden har det vist seg vanskelig å forutse hvilke maksverdier som er gjeldende under ramming av betongpeler. (NGF 2001).

Ramming av betongpeler fører til massefortrengning noe som kan gi store negative konsekvenser i områder med ustabile grunnforhold (D.N.Pelekomité 2005). Ved rammefasen tvinger man betongpelene ned i jorda, skaper oppbygging av poreovertrykk, og reduserer skjærstyrken i grunnmassene. Dette kan føre til redusert geoteknisk stabilitet i området rammingen finner sted. (Reese *et al.* 2006). Det er viktig at man i prosjekter med fare for stabilitetsproblemer gjør beregninger og analyser for å se hvor mye poreovertrykk som kan aksepteres. Poretrykket bør måles kontinuerlig under hele rammefasen. Dette gjøres for å kontrollere virkelig poretrykksnivå i massene, slik at pelingen kan stanse om nødvendig. Tiltak som benyttes for å redusere massefortrengningen er opptak av leirpølser eller påfesting av geodren på betongpelene før de installeres. (NGF 2001).

Alle typer byggarbeider som inkluderer bruk av betong, bør vurderes i forhold til materialforbruk. Dette kommer av at produksjon og utvinning av sement genererer betydelige mengder CO₂, som gir konsekvenser for det ytre miljøet. Produksjon av betongpeler står for rundt 3,5 % av den totale andelen betongelementer som produseres i Norge (Gusevik 2011, Betongelementforeningen 2009). Dette tallet er veldig lite sammenlignet med andre betongelementer som normalt brukes i byggverk. En ytterligere utredning av miljøpåvirkning grunnet CO₂-utslipp vil ikke bli gjennomført i denne rapporten.

SHA

Pelearbeider anses som farlige arbeider og det skal lages instruksjoner for hvordan arbeidet utføres på en sikker måte, uten å sette arbeiderne i fare (Andersen 2010). Driving av betongpeler krever bruk av store pelemaskiner og det bør rettes fokus mot å sikre forholdene rundt riggene. Følgende sikkerhetskrav er satt av D.N.Pelekomité (2005):

- Minimum 20 m sikkerhetsavstand rundt pelerigger (sikkerhet mot fall av peler).
- Nedkjøringer til byggegropp skal ikke overstige 15 % (for å hindre velt av pelemaskin).
- Plant og bæredyktig underlag for å sikre oppstilling av rigg.

I forbindelse med forflytting av peler på byggeplass, installering/ramming, og etterbehandling av betongpeler bør det utformes en risikoanalyse. Dette for å legge til rette for en sikker gjennomføringsprosess av arbeidene. En god rutine er å utforme en SJA – sikker jobbanalyse, for å belyse spesielle faremomenter knyttet til pelingen. Generelle forhold som kan medføre risiko ved installering av betongpeler er (FAS 2007b):

- Skader ved fallende gjenstander fra kranhiv
- Tunge løft ved hendling av materiell og utstyr
- Brannskader ved sveising og skjæring
- Støy ved peling
- Sveisegass
- Klemskader ved produksjon

Samtlige faktorer analyseres i forhold til sannsynlighet og konsekvens. For å unngå farlige arbeidssituasjoner bør det legges til rette for riktig bruk av verne- og produksjonsutstyr. Kompetanse for bruk av ulike maskiner og utstyr skal også være en forutsetning pålagt de ansatte. Ved å utforme gode rutiner for gjennomføring og dokumentering skal dette bidra til å redusere risikoen for skader. Det bør også sees på spesielle forhold tilknyttet hvert enkelt prosjekt ved utarbeidelse av SJA.

3.3. Beregning av forankringslengde

Beregning av forankringslengde er viktig for å kunne optimalisere lengden av peler, som er nødvendig for opptak av aktuelle laster for et byggverk. Dersom man sammenligner materialpris (kr/meter pel), er betongpeler en billigere løsning enn injeksjonspeler (Aronsson *et al.* 2004). Man må derfor få en reduksjon i nødvendig lengde på injeksjonspelene, om de kostnadmessig sett skal være konkurransedyktig. I dette kapitlet vil man se på fremgangsmåten for dimensjonering av injeksjonspeler av typen Ischebeck TITAN, og friksjonsbærende betongpeler. Beregningsmodellene brukes som grunnlag ved dimensjonering senere i rapporten.

3.3.1. Geotekniske undersøkelser

I prosjekteringsstadiet av et peleprosjekt må det gjennomføres geotekniske undersøkelser for bestemmelse av lagdeling, tykkelse på løsmasser og geotekniske parametere. Hensikten er å sikre gjennomførbarhet av pelearbeidene, samt å gi grunnlag for valg av teknisk og økonomisk gode løsninger. Løsmassenes art, lagdeling og geotekniske egenskaper er avgjørende for valg av peletype og vurdering av kapasitet. Undersøkelsene vil også kunne gi opplysninger om mulige problemer under utførelsen som utglidninger, setninger eller oppbygging av poretrykk. (D.N.Pelekomité 2005).

Geotekniske undersøkelser for dimensjonering av injeksjonspeler

Injeksjonspeler brukes hovedsakelig som friksjonsbærende elementer i løsmasser. Trykksoneering med poretrykksmåler (CPTU) er en egnet sonderingsmetode, da man får informasjon om jordas spissmotstand, lokal sidefriksjon og poretrykk. Dette kan igjen brukes til å tolke lagdeling, jordart og styrke i grunnen. Gjennom prøvetagninger og påfølgende laboratorieforsøk, kan faktiske jordarter med lagdeling, samt ulike geotekniske parametere bestemmes. For kohesive jordarter som leire og fin silt vil bestemmelse av udrenert skjærstyrke (S_u) være viktig. Dersom man skal dimensjonere injeksjonspeler i sand- og grusmasser, kan dreiesondering brukes for å bestemme jordens relative fasthet. Sammen brukes resultatene til å finne grensemantelfriksjon q_s [kPa], som er størrelsen på friksjonsforbindelsen mellom sementsuspensjonen og løsmassene etter injisering. (Aronsson *et al.* 2004, Karlsen 2011). Det er q_s som danner grunnlaget for videre beregning av nødvendig forankringslengde. Omfanget av grunnundersøkelsene har stor betydning for nøyaktigheten av q_s , og dermed utnyttelsesgraden av pelens bæreevne. Det bør nevnes at man sjelden gjennomfører alle grunnundersøkelsene referert til ovenfor, for hvert prosjekt. Man bør derfor ta utgangspunkt i hva man har tilgjengelig av aktuelle geotekniske data og gjøre en best mulig vurdering der etter.

Ved dimensjonering av injeksjonspeler bør karakteristiske egenskaper til de ulike løsmasselagene i grunnen bestemmes. I forbindelse med dette har man laget en tabell for beskrivelse av grunnforhold og nødvendige geotekniske parametere (Tabell 2).

Tabell 2 Beskrivelser av ulike geotekniske parametere og undersøkelser som kan brukes ved dimensjonering av injeksjonspeler (DeNeef 2004).

Leire og silt	Kote (fra – til)	Kote (fra – til)	Kote (fra – til)
<i>Aktuelle grunnforhold ved angitt dybde</i>	Beskrivelse	Beskrivelse	Beskrivelse
<i>Spissmotstand, q_c (CPT)</i>	Verdi q_c [MPa]	Verdi q_c [MPa]	Verdi q_c [MPa]
<i>Udrenert skjærstyrke S_u</i>	Verdi S_u [kPa]	Verdi S_u [kPa]	Verdi S_u [kPa]
Sand og grus	Kote (fra – til)	Kote (fra – til)	Kote (fra – til)
<i>Aktuelle grunnforhold ved angitt dybde</i>	Beskrivelse	Beskrivelse	Beskrivelse
<i>Spissmotstand, q_c (CPT)</i>	Verdi q_c [MPa]	Verdi q_c [MPa]	Verdi q_c [MPa]
<i>Resultat fra dreiesondering, V_{im}</i>	V_{im} [rotasj./0,2m]	V_{im} [rotasj./0,2m]	V_{im} [rotasj./0,2m]
<i>Friksjonsvinkel for massene, φ</i>	φ (fra – til)	φ (fra – til)	φ (fra – til)

Geotekniske undersøkelser for dimensjonering av friksjonsbærende betongpeler

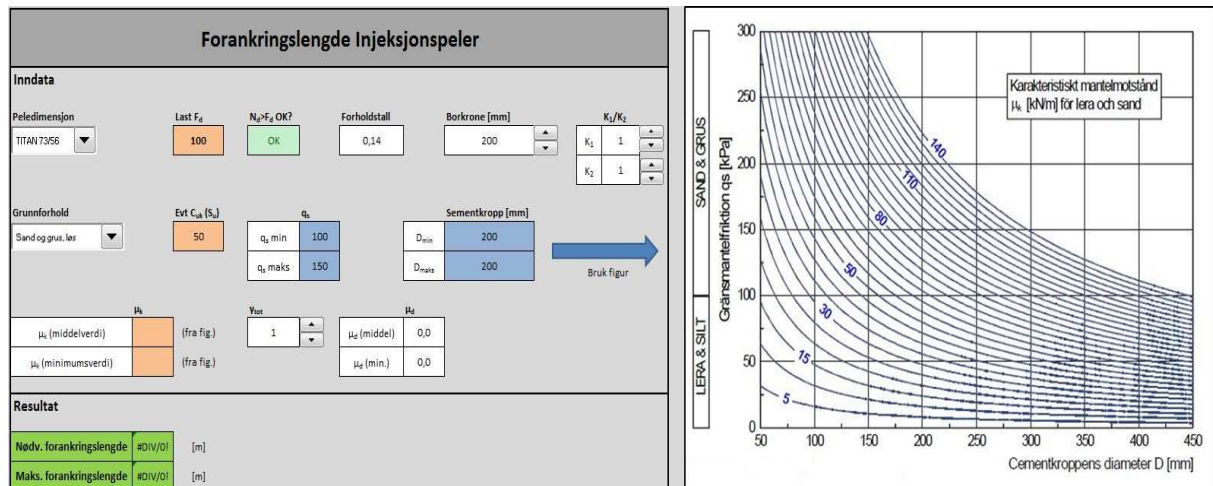
Betongpeler brukes både som spissbærende elementer til fjell eller fast morene, samt friksjonsbærende elementer i løsmasser. I dette kapitlet vil man kun fokusere på aktuelle grunnundersøkelser for friksjonsbærende peler. Betongpelerens bæreevne i sand- og siltmasser kan beregnes ut fra langtidsanalyse, $\alpha\varphi$ -analyse (Aarhaug 2008). Optimalt grunnlag for dimensjoneringen fås ved empiriske korrelasjoner mot trykksondering (CPT), eventuelt supplert med andre sonderinger, samt prøvetaking. Ved prøvetaking kan bæreevnen vurderes på grunnlag av jordklassifisering og måling av styrke- og deformasjonsparametere. Dersom det er gjennomført tidligere grunnundersøkelser og installeringer i området, kan erfaringer herfra brukes. (D.N.Pelekomité 2005). Betongpelerens bæreevne i leire kan beregnes ut fra korttidsanalyse (S_u -analyse) eller $\alpha\varphi$ -analyse (Aarhaug 2008). I denne rapporten velger man å følge dimensjoneringsprinsipp etter $\alpha\varphi$ -analyse. Optimalt grunnlag for dimensjonering fås derfor etter gjennomføring av samme grunnundersøkelser som sand- og siltmasser.

Man kan vise til følgende viktige geotekniske parametere for dimensjonering av betongpeler i leire-, silt- og sandmasser, etter $\alpha\varphi$ -analyse (D.N.Pelekomité 2005, Aarhaug 2008):

- Tyngdetetthet, γ
- In-situ vertikal effektivspenning, σ'_v
- Attraksjon, a
- Mobilisert friksjonskoeffisient, $\tan \varphi$
- Sidefriksjonsfaktor, β
- Bæreevnemfaktor, N_q

3.3.2. Dimensjonering av Ischebeck TITAN injeksjonspeler

I denne rapporten vil man kun fokusere på typen Ischebeck TITAN ved dimensjonering av injeksjonspeler. Det er utformet en egen dimensjoneringsguide (Dimensjoneringsguide/3 – Ischebeck TITAN stag og påle) for denne typen pel. Denne guiden er utgangspunktet for modellen studenten har utformet (Figur 16), for enklere å kunne beregne forankringslengder ved ulike grunnforhold og laster.



Figur 16 Modell for beregning av forankringslengde av Ischebeck TITAN injeksjonspeler.

Videre kommer en beskrivelse av fremgangsmåten for beregning og dimensjonering av injeksjonspeler av typen Ischebeck TITAN (DeNeef 2004):

1. Bestemme dimensjonerende aksiallast F_d [kN] for pelen (påkjent last).
2. Velge peledimensjon som oppfyller kravet $N_i > F_d$. N_i [kN] beskriver dimensjonerende, installert kapasitet for injeksjonspelen og finnes etter følgende formel:

$$N_i = N_d * f_a$$

N_d = Pelens aksialkapasitet med hensyn på stålet

f_a = Reduksjonsfaktor fastlagt etter samlet vurdering av alle forhold som kan påvirke kapasiteten. Settes normalt lik 0,9 for injeksjonspeler grunnet skånsom installeringsmetode (Andersson 2012 pers. kom.).

$$N_d = \frac{P_y}{\gamma_m}$$

P_y = Maksimal strekklast for stålet i pelen

γ_m = Sikkerhetsfaktor for stålmateriale (settes normalt lik 1,15)

3. Vurdere grunnforholdene med utgangspunkt i grunnrapporter (Tabell 2)

4. Velge dimensjon og type borkrone. Utgangspunktet for valg av borkrone gjøres ut i fra en vurdering av lastpåkjenning, peledimensjon og grunnforhold.
5. Bestemme forholdstallene K_1 og K_2 , som beskriver forholdet mellom antatt nedre og øvre diameter på betongkropp og borkrone. Verdien av K_1 og K_2 vil øke i permeable løsmasser (løs sand og grus), mens den vil minke i impermeable masser (fast leire og fast silt).
6. Finne grensemantelfriksjon q_s [kPa], som beskriver friksjonsforbindelsen mellom sement-suspensjon og løsmasser. Grensemantelfriksjonen bestemmes på grunnlag av løsmassenes styrkeparametere (eventuelt erfaringstall).
7. Med utgangspunkt i øvrige punkter bestemmes karakteristisk mantelmotstand μ_k [kN/m], som beskriver hvor stor last pelene kan oppta per meter. Karakteristisk mantelmotstand kan enten bestemmes ved å se på korrelasjon mellom q_s og diameter på installert pel (se grafer Figur 16) eller følgende formel:

$$\mu_k = q_s * \pi * \frac{K_1 + K_2}{2} * d$$

d = diameter på valgt borkrone.

8. Til slutt finnes dimensjonerende mantelmotstand μ_d [kN/m] med utgangspunkt i total sikkerhetsfaktor γ_{tot} :

$$\mu_d = \frac{\mu_k}{\gamma_{tot}}$$

sikkerhetsfaktoren (γ_{tot}) skal vurderes etter grunnlag for anvendt beregningsmetode (D.N.Pelekomité 2005).

Punktene ovenfor gir en kort innføring i de viktigste prinsippene for dimensjonering av Ischebeck TITAN injeksjonspeler.

3.3.3. Dimensjonering av betongpeler etter $a\phi$ -analyse

Ved dimensjonering av betongpeler velger man å følge gitte retningslinjer i Pelevedledningen 2005, samt Fundamenteringslære 2 av Olav R. Aarhaug. Beregningsmodellene referert til i disse kildene er standardmodeller for konvensjonelle rammede friksjonspeler. I denne rapporten ser man kun på standard betongpeler av typene P230NA, P270NA, P270MA og P345MA. Med utgangspunkt i gitte retningslinjer for dimensjonering, etter Aarhaug (2008) og D.N.Pelekomité (2005), er det laget en modell for beregning av nødvendig forankringslengde ved ulike laster og grunnforhold (se neste side).

Forankringslengde betongpeler etter $\alpha\phi$ -analyse						
Inndata						
Peledimensjon	Last F_d	Vurderte forhold	f_a -faktor	N_i	$N_i > F_d$, OK?	γ' (midlere) [kN/m ³]
P230NA	150	Midlere	0,75	1068,75	OK	9
S_a	A_p [m ²]	N_q	a			
0,3	0,0529	25	2,5			
Lengde uten γ_{tot}	γ_{tot}					
7,0	1,6					
Resultat						
Forankringslengde	11,3 [m]					

Figur 17 Modell for beregning av forankringslengde av betongpeler etter $\alpha\phi$ -analyse.

Videre kommer en beskrivelse av fremgangsmåten for beregning og dimensjonering (D.N.Pelekomité 2005, Aarhaug 2008):

1. Bestemme dimensjonerende last F_d [kN] for betongpelen (påkjent last).
2. Velge standard betongpel som oppfyller kravet $N_i > F_d$. N_i [kN] beskriver installert kapasitet for betongpelen å finnes etter formelen:

$$N_i = N_d * f_a$$

N_d = pelens aksialkapasitet

f_a = reduksjonsfaktor fastlagt etter en samlet vurdering av alle forhold som kan påvirke kapasiteten.

3. Gjøre en vurdering av grunnforholdene med utgangspunkt i grunnrapporter. Ut fra dette finnes de nødvendige geotekniske parameterne referert til i avsnitt 3.3.1 "Geotekniske undersøkelser for dimensjonering av friksjonsbærende betongpeler".
4. Bestemme aktuell lengde på pelen med utgangspunkt i formelen:

$$F_d = Q_s + Q_{pn}$$

Q_s = kraften som tas opp gjennom skaftfriksjon

Q_{pn} = kraften som opptas i pelespissen.

Følgende formler for Q_s og Q_{pn} er:

$$Q_s = S_A * (\bar{\sigma} * a) * A_s$$

S_A = skjærspenningskoeffisient

$\bar{\sigma}$ = midlere effektive vertikalspenning langs peleskaftet. Ved homogene forhold er:

$$\bar{\sigma} = \bar{\gamma} * \frac{L}{2}$$

L = pelens lengde

a = midlere attraksjon for området

A_s = peleskaftets overflateareal: $A_s = 4 * s * L$

s = lengden på sidekant av kvadratisk betongpel

$$Q_{pn} = (N_q - 1) * (p' + a) * A_p$$

N_q = bæreevnefaktor

p' = effektiv motlast på pelespissnivå: $p' = \bar{\gamma} * L$

A_p = pelespissens areal: $A_p = s^2$

5. Med utgangspunkt i overnevnte formler finner man et uttrykk for nødvendig pelengde, forutsatt homogene forhold, og at man kjenner de ulike geotekniske parameterne:

$$L = \frac{1}{4S_A s \bar{\gamma}} \left[\sqrt{16S_A^2 s^2 a^2 + 8S_A s \bar{\gamma} F_d + A_p^2 \bar{\gamma}^2 (N_q - 1)^2} - 4S_A s a - A_p \bar{\gamma} (N_q - 1) \right]$$

3.3.4. Verifisering av beregningsmetoder

For å verifisere beregningsmodellen for dimensjonering av injeksjonspeler (kapittel 3.3.2), har studenten innhentet flere reelle dimensjoneringseksempler utført av konsulenter. Videre er modellen kontrollert etter de aktuelle eksemplene. Resultatene stemmer godt overens med konsulentenes beregninger. På bakgrunn av dette anses modellen som anvendbar.

Beregningsmodellen brukt for dimensjonering av betongpeler (kapittel 3.3.3) forutsetter homogene (ikke lagdelte) forhold i hele pelens lengde. En kontroll, med utgangspunkt i reelle dimensjoneringer, lar seg ikke gjennomføre, da man meget sjelden finner slike grunnforhold i faktiske prosjekter. Studenten har derfor kontrollert beregningsmodellen mot lærebøker, hvor forfatteren har forutsatt homogene grunnforhold i sine eksempler. Modellen stemmer godt overens med resultat i bøkene, og anses derfor som anvendbar.

4. Bruksområder

Hvilken type pel en skal velge for et gitt prosjekt avhenger av en rekke faktorer. Det er vanskelig å gi absolutte anbefalinger, da en ideell løsning forutsetter et optimalt samspill mellom statikk, geoteknikk, anleggsteknikk, marked og miljø. Det er knyttet ulike fordeler og ulemper til alle peletyper og det kreves en nøye vurdering av overnevnte punkter for å komme frem til en best mulig løsning. (D.N.Pelekomité 2005). I dette kapitlet vil man fokusere på hvilke forutsetninger som kreves for at betong- og injeksjonspeler skal være godt egnet som peleløsning. Faktorene som vurderes er laster, grunnforhold, anleggsteknikk, naboforhold og miljø. Videre vil det bli gjennomført en sammenligning av forankringslengde med fokus på laststørrelser og grunnforhold.

4.1. Betongpeler

4.1.1. Laster

Ved snakk om lastpåkjenninger av et pelefundament er det viktig å vurdere løsningen i forhold til laststørrelse- og retning. Dimensjonerende aksialkapasitet (uten opptredende moment) for betongpeler varierer fra 1500 – 3000 kN, avhengig av dimensjon. Dette vil si at betongpeler egner seg best ved *moderate* fundamentlaster. Dersom man skal fundamentere byggverk hvor det forventes store laster (10 000 - 15 000 kN for hver pel), er stålrørspeler eller sjaktede peler bedre egnet. (D.N.Pelekomité 2005). Betongpeler kan normalt benyttes ved dybder fra 10 – 45 meter. Så lenge pelene blir installert etter gode retningslinjer og i egnede løsmasser (slik at oppsprekking unngås) er betongpeler relativt korrosjonsbestandige. Dette er en stor fordel kvalitetsmessig sett, da brudd i pelen grunnet armeringskorrosjon unngås. (Das 2004). Det er vanlig at friksjonsbærende betongpeler øker sin bærekapasitet med tiden. Dette kommer som en følge av at pelen gror fast i jorda, og dermed øker friksjonsforbindelsen mellom pelens overflate og løsmassene. En betongpel vil ofte ha stor synk under produksjonsramming, men hvis pelen etterrammes 3 – 4 uker senere kan synken ha blitt redusert til godt under halvparten. Kapasitetstesting av betongpeler bør derfor gjennomføres i etterkant av produksjonen, da bæreevnen ved installasjonstidspunktet vil være for lav. Dette er for øvrig forhold man bør være spesielt oppmerksom på ved fundamentering i sandige masser. (NGF 2001).

Dersom friksjonsbærende betongpeler drives dypt, risikerer man at påhengslaster reduserer pelens bærekapasitet. Dette kan opptre hvis omkringliggende løsmasser setter seg mer enn pelen, og skyldes ofte grunnvannssenkning, oppfylling, terrengsetning eller ramming. Dersom påhengslaster forventes bør man forsøke å redusere omfanget av lastreduksjonen. Dette kan gjøres ved å påføre peleoverflaten et bitumenbelegg. Ved riktig bruk av bitumen kan påhengslastene reduseres opptil 80 – 90 %. (NGF 2001).

4.1.2. Grunnforhold

Betongpeler er mindre egnet dersom det skal rammes gjennom grove fyllmasser eller gjennom vann der de ikke har sidestøtte. Hvis man driver pelene gjennom fyllinger eller blokkstein kan høye rammespenninger føre til oppsprekking eller brudd i pelematerialet. Ved ramming gjennom vann uten sidestøtte kan pelene knekke ut. (Fleming *et al.* 2009).



Figur 18 Skade betongpeler grunnet ramming under vanskelige grunnforhold (Foundation-Engineering 2011).

I finkornige masser som leire og silt kan driving av betongpeler føre til massefortrengning av omkringliggende jord. En følge av dette er dårligere stabilitet i området hvor pelene installeres. Ved prosjekter hvor stabilitetsproblemer forventes, bør parameteranalyser gjennomføres for å vurdere akseptabelt poretrykksnivå. (D.N.Pelekomité 2005, NGF 2001). Dersom man under rammingen møter veldig bløte masser (med liten spissmotstand) kan reflekterende støtbølger danne store strekkrefter i pelematerialet. I verste fall kan dette føre til avriving i skjøtene på pelen. (Fleming *et al.* 2009).

Som et resultat av overnevnte faktorer egner betongpeler seg dersom grunnforholdene:

- Ikke inneholder blokkstein
- Ikke består av grove fyllmasser
- Ikke er under vann (eksempelvis havnefundament)
- Ikke består av sensitive løsmasser
- Ikke inneholder svært bløte masser (kvikkeirelommer)

4.1.3. Anleggsteknikk

Med anleggsteknikk menes blant annet om det skal peles fra terreng eller bunn av byggegrop, hvordan plassforholdene er for peling, og om det peles samtidig med eller nært inntil andre byggeaktiviteter. Med tanke på plassforhold krever installering av betongpeler store rigger, og tyngden på disse forutsetter et bæredyktig underlag for stabil og sikker oppstilling (Figur 19). Sikkerhetsavstanden rundt en pelemaskin bør, grunnet lengden på pelene, minimum være 20 meter i radius. (D.N.Pelekomité 2005).



Figur 19 Bæredyktig underlag som gir sikker oppstilling av pelerigg (FAS 2011).

Betongpeler er relativt store og tunge elementer, og det kreves god plass for lagring og håndtering på anleggsplassen. Ved trange byggeplasser vil oppbevaring av peleelementer kreve stor plass, noe som kan komplisere logistikken på anlegget (Figur 20). Store peleelementer vil også kunne gi vanskeligheter ved forflytting av betongpelene internt på anleggsplassen.



Figur 20 Bildet illustrerer hvor stor plass som kreves for lagring av betongpeler (Lee 2009).

Dersom det peles samtidig med eller nært inntil andre byggeaktiviteter, bør man være spesielt oppmerksom på sikker avstand rundt riggene. Ramming av betongpeler genererer også mye støy, slik at nærliggende byggeaktiviteter kan påvirkes av dette.

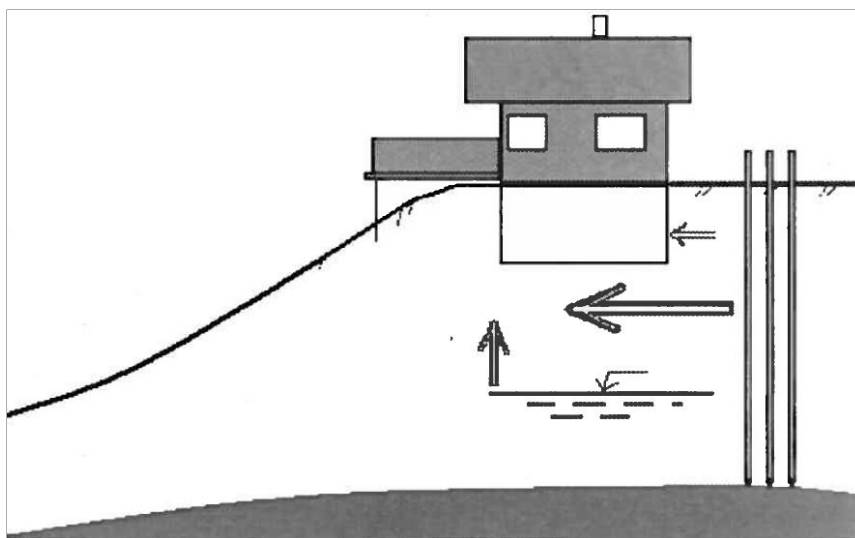
Som et resultat av overnevnte faktorer egner betongpeler seg dersom:

- Det peles fra land (ikke fra flåte)
- Man jobber ved anlegg med god plass (som regel fra terreng, og ikke i en byggegrop)
- Underlaget er bæredyktig slik at stabil oppstilling av pelemaskiner sikres
- Det ikke peles nært til andre byggeaktiviteter

4.1.4. Naboforhold og miljø

Med naboforhold og miljø menes om pelingen gir konsekvenser for nærliggende områder. Dette kan være i form av støy og vibrasjoner, stabilitetsproblemer, setninger på nabokonstruksjoner, samt utslipp av borslam. Ramming av betongpeler vil med dagens krav til støy, overskride aktuelle forskrifter. Arbeidene er derfor avhengig av dispensasjoner for å kunne gjennomføres (spesielt i tettbebygde områder). Ramming av betongpeler gir rystelser i grunnen, og arbeidene bør ikke gjennomføres hvor skader kan forekomme som en konsekvens av dette. (NGF 2001). Dersom det settes strenge krav til utslipp av borslam kan betongpeler være en egnet metode. Slamsøl er knyttet til borede peler og vil ikke forekomme ved ramming som installasjonsmetode.

Når massive peler blir drevet ned i grunnen, vil pelens volum fortrenge eksisterende løsmasser. Denne massefortrengningen kan resultere i at terrenget hever seg, eller det kan bli en sideveis bevegelse mot nærliggende bygg (Figur 21). Dersom det peles i impermeable løsmasser kan det dannes et poreovertrykk. I områder med dårlig grunn kan dette skape en potensiell fare, ved at skråninger raser ut. (Karlsen 2011).



Figur 21 Økt poretrykk kan føre til sideveis bevegelse og videre skader på nabobygg (Karlsen 2011).

Som et resultat av disse faktorene egner betongpeler seg dersom:

- Byggeplassen ikke ligger nær tettbebygde områder
- Det ikke settes strenge krav til vibrasjoner i grunnen
- Det settes strenge krav i forhold til utslipp av borslam
- Det ikke er ustabile grunnforhold
- Det ikke er fare for setninger på nærliggende bygg

4.2. Injeksjonspeler

4.2.1. Laster

Injeksjonspelers lastkapasitet avhenger av kvaliteten og dimensjonen på stålet i pelen, samt jordas geotekniske bæreevne. I forhold til stålets bruddkapasitet (trykk) varierer denne fra 220 kN for dimensjon 30/16 til 7940 kN for dimensjon 130/60 (sikker brukslast ligger 20 – 30 % lavere). Disse tallene gjelder for øvrig Ischebeck TITAN injeksjonspeler. (DeNeef 2004). De større dimensjonene (103/51 og 130/60) brukes sjelden, da disse er dyre (på grunn av høyt andel stål i den ferdig installerte pelen). I følge (Aronsson *et al.* 2004) ligger det karakteristiske lastintervallet for injeksjonspeler normalt mellom 120 – 2700 kN. Dette vil si at pelene egner seg best ved lave til moderate fundamentlaster.



Figur 22 Bildene illustrerer hvordan trykkinjeksjon forbedrer friksjonsforbindelsen mellom sementsuspensjon og jordmasser (Con-TechSystems 2011).

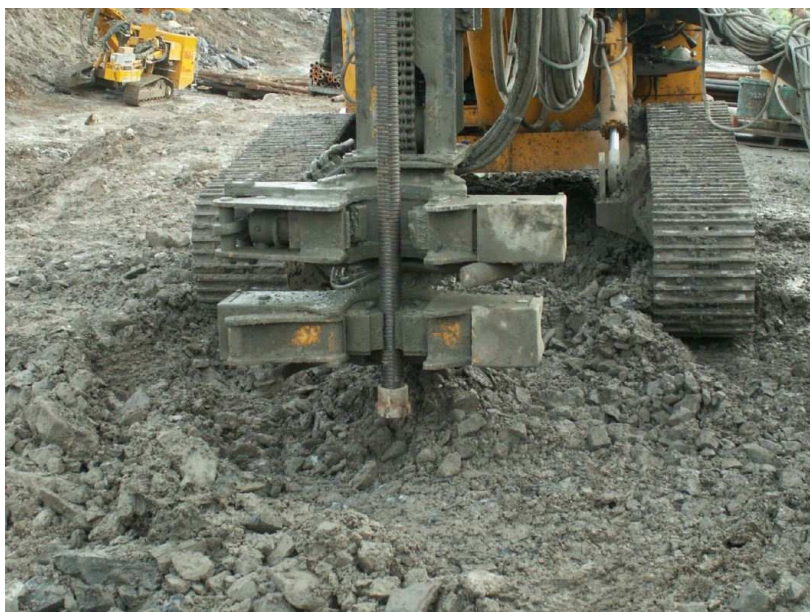
Geoteknisk bæreevne beskriver maksimal lastkapasitet som jordmaterialet kan oppta. For konvensjonelle friksjonspeler er geoteknisk bæreevne proporsjonel med effektiv normalspenning og ruhet. Ettersom injeksjonspeler installeres med trykkinjeksjon bidrar dette til å forbedre normalspenningen mellom grunnmasser og sement (Figur 22). (Aronsson *et al.* 2004,

Samtani and Nowatzki 2006). For trykkinjiserte peler er det ved ulike forsøk påvist en forbedring av jordas bæreevnekapasitet opp mot 30 % (Ischebeck 2002). Ischebeck TITAN injeksjonsstål tar like stor last på trykk som på strekk. Dette kommer av at borstålet ikke oppviser såkalt Bauschinger-effekt etter kaldbehandling (noe som påvirker mange andre stålprodukter). Dette vil si at Ischebeck TITAN injeksjonspeler egner seg på prosjekter hvor høy strekkapasitet på enkeltfundamenter kreves. (Eresund 1997).

Likt som for betongpeler økes injeksjonspeleres lastkapasitet med tiden. Dette kommer hovedsakelig av at sementsuspensjonen trenger tid til å herde i grunnen (samt at pelen gror fast i jorda). På grunn av dette bør det ikke gjennomføres lastforsøk før betongmassen er ferdig herdet (avhengig av grunnforhold, men typisk én uke). Man vil for injeksjonspeler kunne oppleve at større påhengslaster reduserer pelens lastbærende evne. Ettersom injisering med trykk forbedrer friksjonsforbindelsen mellom sementsuspensjon og jord, vil injeksjonspeler være spesielt utsatt for denne typen ekstralast. Her vil man ikke ha noen mulighet for å redusere omfanget av påhengslasten. (Andersson 2012 pers. kom.).

4.2.2. Grunnforhold

Injeksjonspeler egner seg i friksjonsjord eller vanskelige grunnforhold som blokkstein og grove fyllmasser. Ettersom pelene bores ned i grunnen er det enklere å forsere eventuelle steinblokker eller andre hindre i grunnen (sammenlignet med ramming). (Aronsson *et al.* 2004). Dersom man borer gjennom større blokkstein vil man dessuten kunne danne en god forankring for pelen. Ved boring i friksjonsjordarter som silt, sand og grus dannes gode forbindelser mellom sementsuspensjon og jord. Dette kan gi en betydelig reduksjon i nødvendig forankringslengde på installert pel, sammenlignet med konvensjonelle friksjonspeler. Dette gjelder spesielt permeable jordarter som løs sand og grus. (Eresund 1997).



Figur 23 Boring av injeksjonspeler gjennom grove fyllmasser (Irvin 2009).

Dersom det er påvist stabilitetsproblemer i området, er injeksjonspeler en god løsning. Pelene er relativt små og man får kun en svært liten massefortrengning ved driving. I områder hvor det er påvist svært bløte masser kan injeksjonspeler være dårlig egnet. Dette kommer av at man risikerer å få en slank konstruksjon (på grunn av stålets dimensjon). Installerer man i bløte jordarter bør man derfor være spesielt oppmerksom på risikoen for knekking av pelen. (DeNeef 2004).

Som et resultat av overnevnte faktorer egner injeksjonspeler seg dersom grunnforholdene:

- Inneholder friksjonsjord (spesielt permeabel sand og grus)
- Består av vanskelige grunnforhold som grove fyllmasser og blokkstein
- Er sensitiv for ramming
- Ikke inneholder svært bløte masser

4.2.3. Anleggsteknikk

En fordel med installering av injeksjonspeler er at selve boreriggene er små. Riggene har driftsvekter fra 2 til 25 tonn, noe som reduserer behovet for ekstra grunnforsterkning sammenlignet med større pelemaskiner. Mindre rigger krever dessuten mindre sikkerhetsavstand, samtidig som det vil være enklere å øke produksjonen med flere boremaskiner. De er også enkle å manøvrere, samtidig som de kan ha oppstilling på ulendt terreng. Dette muliggjør pelearbeider i trange områder (Figur 24), fra bunn av byggegropen og ofte samtidig med andre byggeaktiviteter. (FHWA 2000).



Figur 24 Installasjon av injeksjonspeler under trange forhold (Aronsson *et al.* 2004).

Ved arbeid på trange områder vil oppbevaring av peleelementer kreve liten plass (Figur 25), noe som forenkler logistikken på anleggsplassen. Størrelsen på injeksjonspelerne bidrar til enklere transport til, og innad på byggeplassen. For større peletyper vil det ofte være nødvendig med kran for intern transport på anlegget, men mindre injeksjonspeler kan løftes for hånd (eventuelt bruk av enkelt transportutstyr) ved forflytting og montering til rigg. Etersom injeksjonspeler installeres gjennom boring, genereres lite støy. Nærliggende byggeaktiviteter vil derfor ikke bli like påvirket av installeringen som ved ramming.



Figur 25 Oppbevaring av injeksjonspeler krever liten plass på byggetomten (DeNeef 2010).

Som et resultat av overnevnte faktorer egner injeksjonspeler seg dersom:

- Man jobber under trange forhold
- Man jobber i ulendt terreng, eventuelt bunn av byggegrop
- Pelene installeres nær andre byggeaktiviteter
- Kran ikke er tilgjengelig på anlegget (eventuelt komplisert byggeplass sett i forhold til internttransport av peler)

4.2.4. Naboforhold og miljø

Installering av injeksjonspeler skjer gjennom boring. Dette gjør metoden egnet i tettbebygde områder, da man unngår vibrasjoner som kan gi setningsskader på nærliggende bygg. En annen fordel er at installeringsprosessen er relativt støysvak. Hovedsakelig kommer støyen fra boring i harde lag, samt fra kompressorene (dersom dette brukes). Disse er relativt enkle å støydempe, og vil derfor ikke skape store problemer. (D.N.Pelekomité 2005). Som et resultat av dette skapes et bedre arbeidsmiljø for de ansatte, samtidig som naboer i nærheten av byggeplassen ikke blir like berørt som ved ramming av peler.

En konsekvens av massefortrengning kan være redusert stabilitet i grunnen hvor pelearbeidet finner sted. Dette gjelder spesielt ved fundamentering i finkornige masser som leire og silt. Resultatet kan være mindre bæreevne for pelene og setningsskader på nærliggende bygg.

(NGF 2001). Ettersom injeksjonspeler er av små dimensjoner, samtidig som de bores ned i grunnen, fås kun en svært liten massefortrengning ved installering.

En negativ konsekvens forbundet med installering av injeksjonspeler er søl av gysemasse. Dette gjelder spesielt arbeid på mindre anlegg, eller i små byggegrop. Figur 26 viser hvordan overskudd av gysemasse kan samle seg i bunn av byggegrop (installering av injeksjonsstag). Metoden for installering av injeksjonspeler er den samme (bare vertikalboring) og man vil ofte oppleve det samme problemet.



Figur 26 Søl av gysemasse kan gi krevende arbeidsforhold. Bildet er tatt i forbindelse med feltarbeidet studenten gjennomførte ved Siemens nye hovedkvarter i Oslo.

På bakgrunn av dette egner injeksjonspeler seg når:

- Byggeplassen ligger i et tettbebygd område
- Det settes strenge krav til vibrasjoner i grunnen
- Man installerer peler i finkornige (og ustabile) masser
- Det er fare for setninger på nærliggende bygg (som følge av vibrasjoner eller massefortrengning)
- Det ikke settes strenge krav til søl av gysemasse

4.3. Sammenligning av forankringslengde

I dette kapitlet vil man med utgangspunkt i omtalte beregningsmetoder (kapittel 3.3), dimensjonere betong- og injeksjonspeler. Hensikten med kapitlet er å avdekke under hvilke grunnforhold man kan få betydelige differanser i forankringslengde mellom peleløsningene.

4.3.1. Grunnlag

Dimensjoneringen tar utgangspunkt i typiske geotekniske verdier for løsmassene leire, silt og sand/grus. Nødvendige geotekniske parametere og verdier er hentet og vurdert fra litteraturen. Grunnen til at det ikke benyttes grunnrapporter, er at dette ville hatt liten overføringsverdi for lesere av oppgaven. En slik tilnærming ville kun vært gyldig for spesielle forhold, medfølgende mindre relevante resultater.

Geotekniske forhold og laster

Det vil ofte være én jordartstype som dominerer grunnen ved dypfundamentering. Med dette menes at man i lagdelt grunn har én slags løsmasse som ligger i tykkere lag enn andre. Målet med resultatene (som presenteres i dette kapitlet) er at de skal kunne benyttes til å gi et estimat på forventet forankringslengde på prosjekter hvor man opplever en dominans av følgende jordarter:

- Bløt, middelfast eller fast leire
- Løs, middelfast eller fast lagret silt
- Løs, middelfast eller fast lagret sand/grus

Pelens lastpåkjenning er en viktig faktor som gir utslag på forankringslengden. Betong- og injeksjonspeler har en øvre dimensjonerende aksialkapasitet rundt 3000 kN (D.N.Pelekomité 2005, Aronsson *et al.* 2004). I denne rapporten vil man se på nødvendig forankringslengde ved flere ulike laststørrelser. Følgende laster på pelefundamentene er valgt:

- Mindre laster: 150 – 300 – 450 kN
- Middels store laster: 600 – 800 – 1000 kN
- Store laster: 1200 – 1500 – 2000 kN

Videre kommer en beskrivelse av hvilke geotekniske parametere som er lagt til grunn for dimensjoneringen.

4.3.2. Forutsatte geotekniske parametere og faktorer

For å kunne beregne forankringslengden av betong- og injeksjonspeler, slik det er gjort i denne rapporten, er det nødvendig med visse forutsetninger. Aktuelle løsmasser med forutsatte geotekniske parametere for dimensjonering av betongpeler, er gjengitt i tabellen under.

Tabell 3 Nødvendige geotekniske parametere for beregning av forankringslengde på betongpeler.

	Parameter	Bløt	Middels fast	Fast
Leire	γ	17 kN/m ³	19 kN/m ³	21 kN/m ³
	a	5 – 15	10 – 20	20 – 30
	$\tan \varphi$	0,35 – 0,45	0,40 – 0,55	0,50 – 0,60
	β	+ 10 til - 10	- 10 til - 20	- 20 til - 30
		Løs	Middels fast	Fast
Silt	γ	19 kN/m ³	20 kN/m ³	21 kN/m ³
	a	5 – 10	10 – 15	10 – 20
	$\tan \varphi$	0,50 – 0,60	0,60 – 0,70	0,70 – 0,80
	β	0 til - 10	- 10 til - 15	- 10 til - 20
		Løs	Middels fast	Fast
Sand/grus	γ	19 kN/m ³	20 kN/m ³	21 kN/m ³
	a	0 – 5	5 – 10	5 – 15
	$\tan \varphi$	0,60 – 0,70	0,70 – 0,80	0,75 – 0,90
	β	+ 10 til - 10	- 5 til - 15	- 15 til - 40

Valgte parameterverdier er hentet, og vurdert fra ulike kilder (Sandven 2005, Aarhaug 2008, D.N.Pelekomité 2005, Aarhaug 1991). Verdiene er i følge kildene typiske for norske forhold.

Det er ikke sagt noe om antatt grunnvannsnivå og poretrykk i denne tabellen. Dette er forhold som varierer stort fra prosjekt til prosjekt. Man antar i dette tilfellet grunnvannsstand ved

terrengnivå, noe som er normalt ved peleprosjekter (spesielt ved arbeider fra bunn av byggegrøp). Dette er også å anse som en konservativ tilnærming ved beregning av forankringslengde. (Flåtten 2012 pers. kom.).

Ettersom beregningsmodellene for dimensjonering av betong- og injeksjonspeler er ulike, vil forutsetningene være forskjellige. Aktuelle løsmasser med forutsatte geotekniske parametere for dimensjonering av injeksjonspeler, er gjengitt i tabellen under.

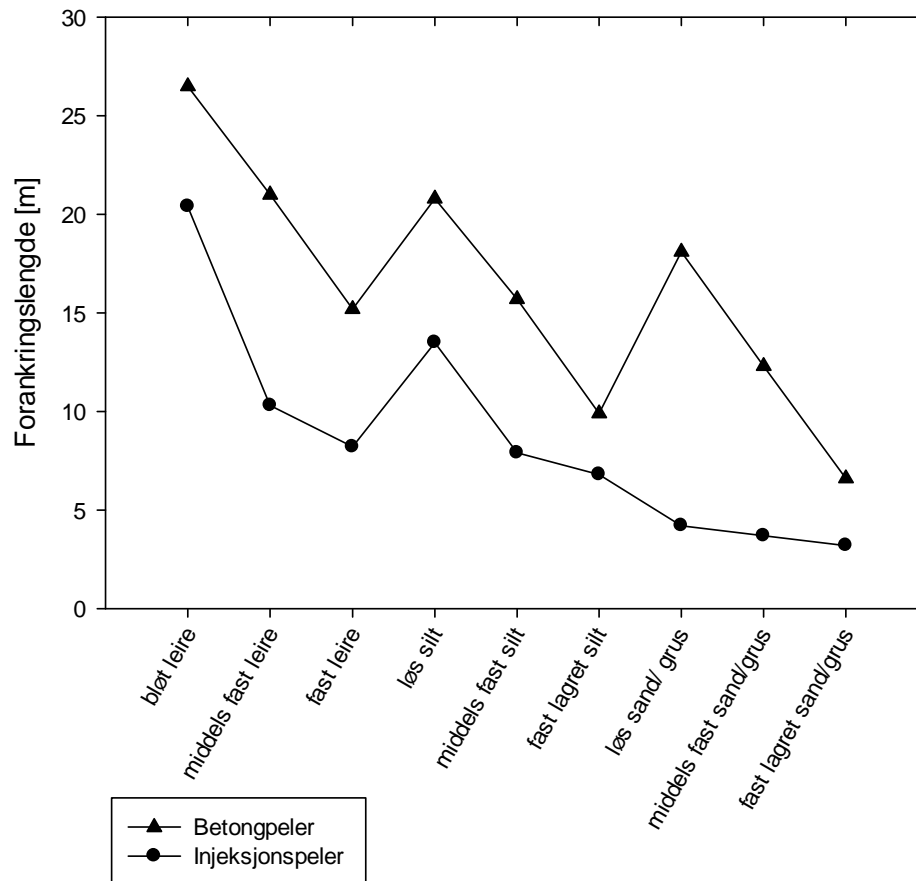
Tabell 4 Nødvendige geotekniske parametere og faktorer for beregning av forankringslengde på injeksjonspeler.

	Parameter	Bløt	Middels fast	Fast
Leire	K_1	1,0	1,0	1,0
	K_2	1,2	1,2	1,2
	$q_s (min)$	32,5 kPa	72,5 kPa	90 kPa
	$q_s (maks)$	72,5 kPa	135 kPa	170 kPa
		Løst lagret	Middels fast	Fast lagret
Silt	K_1	1,4	1,3	1,2
	K_2	1,5	1,4	1,3
	$q_s (min)$	40 kPa	80 kPa	95 kPa
	$q_s (maks)$	80 kPa	140 kPa	180 kPa
		Løst lagret	Middels fast	Fast lagret
Sand/grus	K_1	2,0	1,7	1,5
	K_2	2,2	1,9	1,6
	$q_s (min)$	85 kPa	120 kPa	160 kPa
	$q_s (maks)$	170 kPa	235 kPa	305 kPa

Verdiene er hentet og vurdert fra kildene FHWA (2000), Aronsson *et al.* (2004), DeNeef (2004) og Ischebeck (2002). Faktorene $K_1 - K_2$ og $q_s (min) - q_s (maks)$, varierer noe i den refererte litteraturen. Verdiene er derfor midlet, noe som antas å gi relativt nøyaktige resultater ved videre dimensjonering.

4.3.3. Resultater fra dimensjoneringen

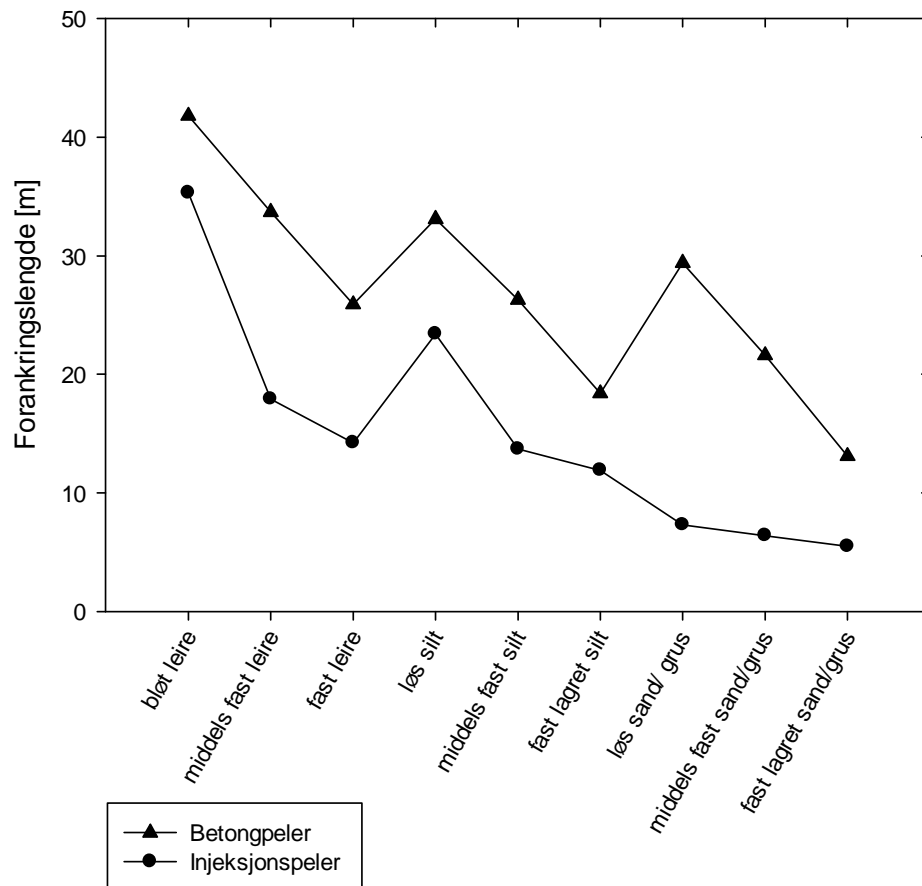
I dette kapittelet vil man gjengi resultatene fra beregning og sammenligning av nødvendig forankringslengde. Grafene som presenteres er et utvalg, ment å være representativt for de ulike laster og grunnforhold. Beregningsverdier og resultater som ligger til grunn for fremstilte grafer, samt øvrige grafer som ikke presenteres i rapporten finnes i Vedlegg 2. En vurdering av resultatene presenteres under hver fremstilling.



Figur 27 Forskjell i nødvendig forankringslengde ved 300 kN aksial lastpåkjenning for ulike grunnforhold; betong- og injeksjonspeler.

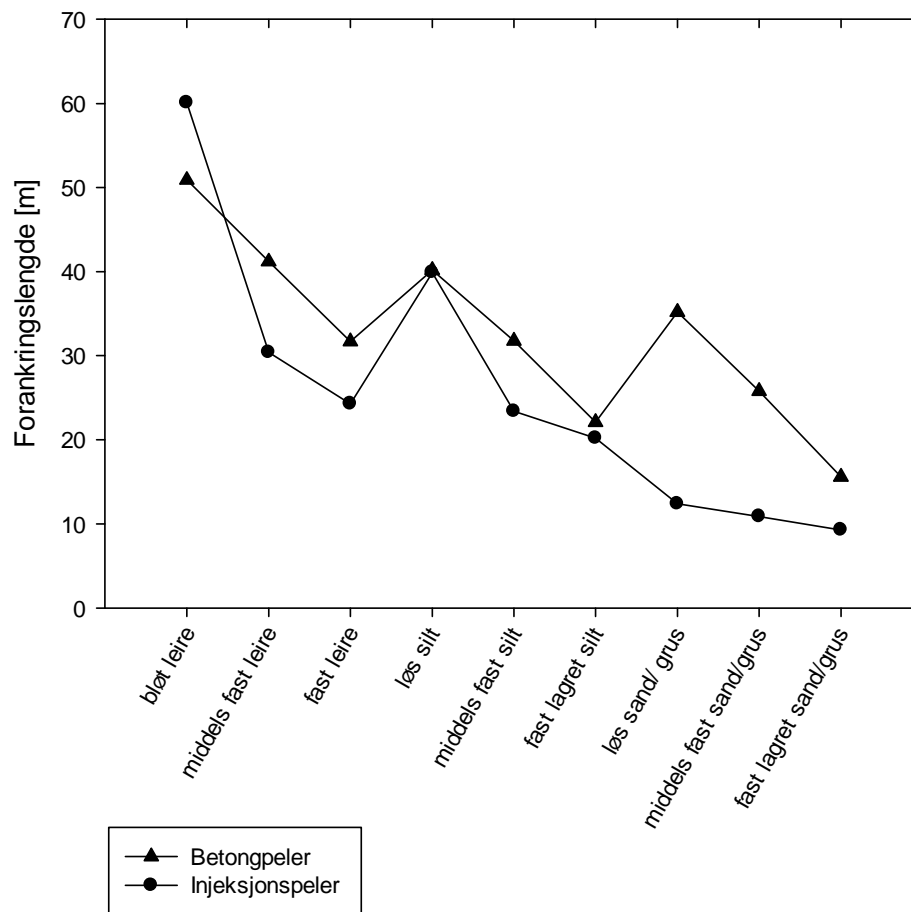
Ved beregning av forankringslengde med en aksial lastpåkjenning lik 300 kN, er det valgt P230NA betongpel og 52/26 Ischebeck TITAN injeksjonspel (130 mm borkrone). Begge peletypene tilfredsstiller kravet $N_i > F_d$ (kapittel 3.3). Man kan av Figur 27 se at lengden på injeksjonspelene ligger lavere enn betongpelene i hele spekteret av løsmasser. En kan spesielt legge merke til differansen i forankringslengde ved grunnforholdene løs sand/grus. Nødvendig lengde ligger her rundt 5 meter for injeksjonspelene, mens den for betongpelene er i underkant av 20 meter. Årsaken til dette er at løs sand/grus har en høy K_1/K_2 – faktor (se Tabell 4), noe som indikerer en permeabel jordart og tilhørende tykk forankringskropp etter injisering. Grensemantelfriksjonen q_s er også relativt høy for denne typen løsmasse. Figur 27

viser også stor differanse i nødvendig forankringslengde ved middels fast leire og middels fast sand/grus. Ved dimensjonering av betongpeler i leirmasser oppnås en relativt lav verdi på bæreevnefaktoren (N_q). Forankringslengden avhenger i stor grad av denne faktoren, og nødvendig pelelengde øker betraktelig ved avtagende verdi. For middels fast sand/grus er årsaken til differansen den samme som ved løs sand/grus.



Figur 28 Forskjell i nødvendig forankringslengde ved 800 kN aksial lastpåkjenning for ulike grunnforhold; betong og injeksjonspeler.

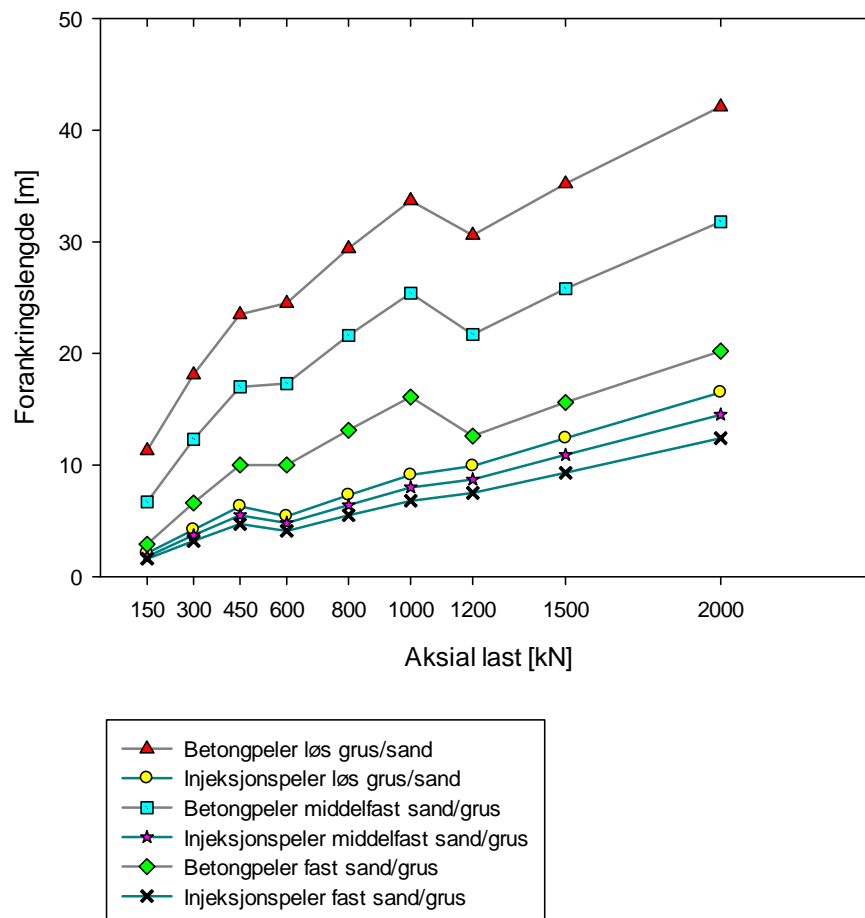
Ved beregning av forankringslengde med en aksial last lik 800 kN, er det valgt P270NA betongpeler og 73/35 Ischebeck TITAN injeksjonspeler (200 mm borkrone). Begge peletypene tilfredsstiller kravet $N_i > F_d$. Som man kan se er Figur 28 nesten identisk med Figur 27. Forskjellen ligger hovedsakelig i økt forankringslengde, grunnet høyere last på fundamentene. Man vil ikke kommentere resultatene ytterligere, da man ser en lik tendens i fremstillingene.



Figur 29 Forskjell i nødvendig forankringslengde ved 1500 kN aksial lastpåkjenning for ulike grunnforhold; betong og injeksjonspeler.

Ved beregning av nødvendig forankringslengde med en aksial last lik 1500 kN, er det valgt P345MA betongpeler og 103/51 Ischebeck TITAN injeksjonspeler (220 mm borkrone). Begge peletypene tilfredsstiller kravet $N_i > F_d$. Ved å sammenligne Figur 29 med foregående figurer, ser man tydelig hvordan differansen mellom forankringslengde reduseres jo høyere aksiallasten er. Man kan spesielt legge merke til at lengden på injeksjonspelene er større enn betongpelene i bløt leire, og like stor som betongpeler i løs og fast lagret silt. Den viktigste årsaken til dette er at anvendt beregningsmodell for dimensjonering av betongpeler tar hensyn til økt horisontal spenning (virker normalt på peleskaftet), ved økt dybde. Dette inkluderer at jo dypere pelen drives, dess høyere blir horisontalspenningen (σ_A), dermed øker skjærspenningene (τ_s) langs peleskaftet (Aarhaug 2008). Forenklet kan man si at kraftopptaket per meter pel blir større dess dypere pelen drives. Dette tas ikke hensyn til i beregningsmodellen for injeksjonspeler, da man regner med samme kraftopptak per meter pel, uavhengig av dybde. En annen årsak til differanse i fremstillingene er økningen i dimensjon på pelene. Betongpelene økes fra 270 x 270 mm til 345 x 345 mm, mens injeksjonspelene, hvis dimensjon kun avhenger av borkronediameter, øker fra Ø 200 mm til Ø 220 mm. Ettersom det

friksjonsbærende arealet for betongpelene øker betydelig mer enn injeksjonspelene, reduseres differansen på forankringslengden.



Figur 30 Nødvendig forankringslengde i løs til fast sand/grus ved ulike aksiale laster; betong og injeksjonspeler.

Figuren viser variasjon i forankringslengde ved ulik aksial lastpåkjenning for betong- og injeksjonspeler i løs til fast sand/grus. For de løse massene har injeksjonspelene en gjennomsnittlig forankringslengde lik 25 – 30 % av betongpelene. Årsaken er som tidligere forklart at permeable jordarter, med høy grensemantelfriksjon (q_s), bidrar til redusert lengde på injeksjonspelene. Av Figur 30 kan man se hvordan nødvendig lengde på betongpelene reduseres med fastere løsmasser. Gjennomsnittlig lengde på injeksjonspelene ligger rundt 50 % av betongpelene for faste sand-/grusmasser. Dette kommer hovedsakelig av at bæreevnefaktoren (N_q) for betongpelene øker jevnt med økt fasthet på massene.

En kan legge merke til at en aksial lastøkning fra 1000 – 1200 kN gir redusert forankringslengde på betongpelene (se knekk i grafer). Dette kommer av økt dimensjon. Overgangen fra P270NA til P345MA påvirker lengden betydelig mer enn overgang fra 73/35 (200 mm borkrone) til 103/51 (220 mm borkrone) som er valgt dimensjon på

injeksjonspelene. Hadde man økt dimensjonen på borkronen fra \varnothing 200 mm til \varnothing 280 mm ville man sett en knekk i grafene til injeksjonspelene, da forankringskroppens tykkelse hadde økt.

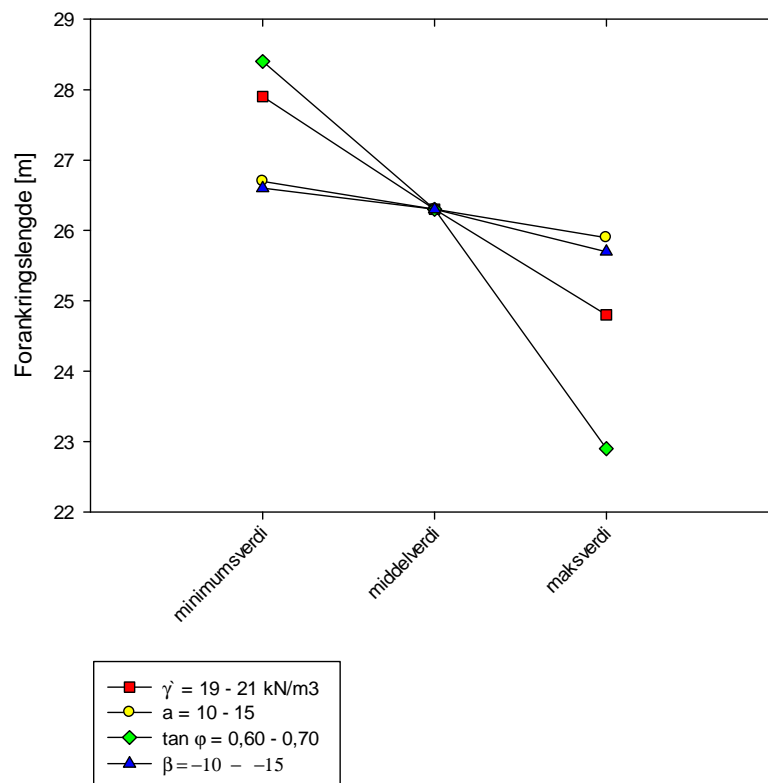
4.3.4. Følsomhetsanalyse

I følgende delkapittel vil man se hvordan forankringslengden på de to peletypene avhenger av ulike geotekniske faktorer. Hittil er dimensjoneringene basert på midlede verdier gjengitt i Tabell 3 og Tabell 4. I denne analysen varieres verdiene fra topp- til bunnverdi for å avdekke hvilke parametere som gir størst utslag på forankringslengden. For betongpeler varieres følgende faktorer:

- Tyngdetetthet, γ
- Attraksjon, a
- Friksjonskoeffisient, $\tan \varphi$
- Sidefriksjonsfaktor, β

For følsomhetsanalysen gjeldende injeksjonspeler, varieres parameterne:

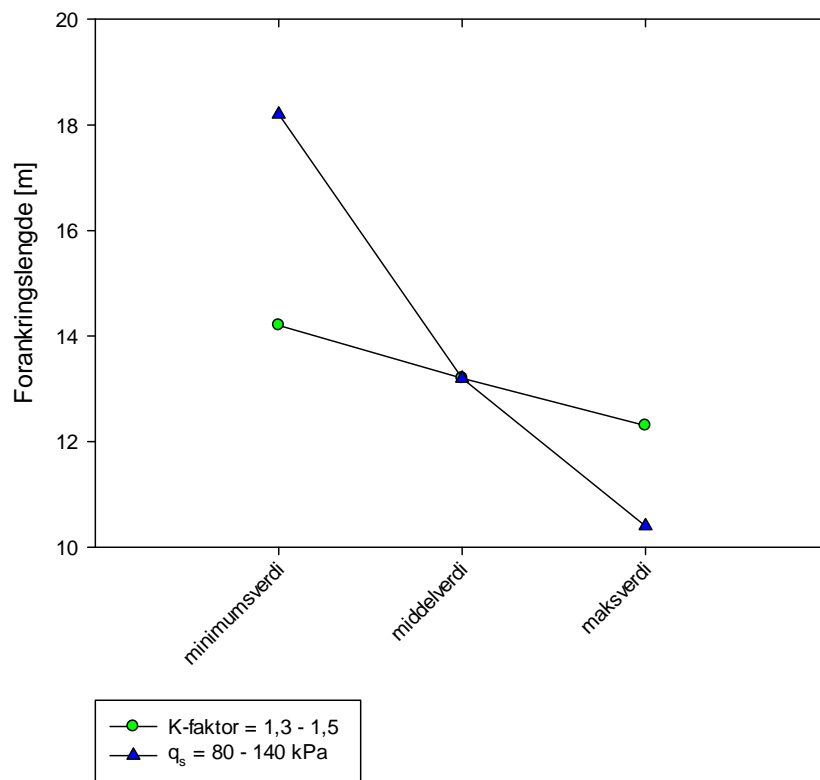
- Forholdstall, K-faktor
- Grensemantelfriksjonen, q_s



Figur 31 Følsomhetsanalyse for betongpeler i middelfast silt ved 800 kN lastpåkjenning.

Man ser tydelig av Figur 31 hvordan forankringslengden er mest følsom for variasjon i friksjonskoeffisienten $\tan \phi$. Intervallet for $\tan \phi$ differerer i følge Aarhaug (1991) og Sandven (2005) normalt mellom 0,60 – 0,70 i middelfast silt (som er undersøkt her). Dette er et relativt lite intervallsprang sett i forhold til at lengden på pelene varierer med rundt 6 meter fra minimum- til maksimumsverdi. Resultatet begrunnes med at både bæreevnefaktoren (N_q) og skjærspenningskoeffisienten (S_A) avhenger av friksjonskoeffisienten ($\tan \phi$). Av disse faktorene er det variasjon i bæreevnefaktoren som gir størst utslag. Videre kan man se hvordan ulik tyngdetetthet (γ) gir en betydelig økning på forankringslengden. Figur 31 gir en variasjon på rundt 4 meter fra minimumsverdi $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ til maksimumsverdi $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$. Økt tyngdetetthet gir høyere vertikal jordtrykksspenning (σ_A) mot peleskaftet, dermed økes skjærspenningene (τ_s) langs peleskaftet, og forankringslengden reduseres. Det bør nevnes at variasjon i peledimensjon også gir utslag på nødvendig lengde. I dette tilfellet brukes P270NA. Ved å erstatte gjeldende dimensjon med P345MA økes pelens overflate- og spissareal, noe som gir redusert lengde på pelen.

Videre presenteres følsomhetsanalysen for injeksjonspeler i middelfast silt, ved en lastpåkjenning lik 800 kN:



Figur 32 Følsomhetsanalyse for injeksjonspeler i middelfast silt ved 800 kN last.

Følsomhetsanalysen for injeksjonspelene gjelder kun de to parameterne K-faktor og grensemantelfriksjon (q_s). Intervallet for grensemantelfriksjonen differerer i følge Armour *et*

al. (2000) og Aronsson *et al.* (2004) normalt mellom 80 – 140 kPa i middelfast silt. Dette er et relativt stort intervallsprang, og noe av grunnen til at q_s gir såpass stor variasjon (rundt 8 meter) i nødvendig forankringslengde (Figur 32). Grensemantelfriksjonen (q_s) angir verdien på den faktiske friksjonsforbindelsen mellom sementsuspensjon og løsmasser, og en større variasjon av denne parameteren vil naturlig nok ha stor betydning for pelens nødvendige lengde. Når det gjelder K-faktoren gir denne en verdi på størrelsesforholdet mellom valgt borkronediameter og diameter på forankringskropp. Med andre ord øker K-faktoren jo mer permeabel jordarten er. I dette tilfellet er en variasjon fra 1,3 – 1,5 valgt. Man kan se at angitt intervallsprang gir en relativt liten differanse i nødvendig pelelengde (Figur 32). Hadde man sett på løsere jordarter ville forankringslengden vært mer følsom for variasjon av K-faktoren, da verdien på denne hadde vært større. Det bør nevnes at variasjon i borkronediameter gir utslag på nødvendig lengde. I dette tilfellet brukes 200 mm borkrone. Ved å erstatte gjeldende dimensjon med en større, økes diameteren på forankringskroppen, noe som gir redusert lengde på pel.

Kapittelet presenterer kun en følsomhetsanalyse for jordarten middelfast silt (ved en lastpåkjenning lik 800 kN). Dette antas å gi en tilstrekkelig oversikt over grunnforholdsparametere som gir større utslag på nødvendig forankringslengde, forutsatt bruk av gjengitte beregningsmetoder ved dimensjonering (kapittel 3.3.2 og 3.3.3). Øvrige resultater av følsomhetsanalyser, gjeldende andre jordarter, finnes i vedlegg 3.

4.3.5. Vurdering av resultater

Valg av faktorer

I første del av dette kapittelet vil man kommentere valg av ulike faktorer brukt ved dimensjonering av pelene. Følgende faktorer vurderes:

- Totalsikkerhetsfaktor, γ_{tot}
- Reduksjonsfaktor, f_a
- Skjærspenningskoeffisient, S_A (gjelder kun betongpeler)
- Bæreevnefaktor, N_q (gjelder kun betongpeler)

Totalsikkerhetsfaktoren, γ_{tot} (også omtalt som partialfaktoren) bestemmes etter grunnlag for anvendt beregningsmetode. Totalsikkerhetsfaktoren brukes ved dimensjonering for å sikre at pelefundamentene tåler den aktuelle lastpåkjenningen (unngå underdimensjonering). I denne rapporten følger man statiske bæreevneformler, og γ_{tot} settes lik 1,6 etter D.N.Pelekomité (2005).

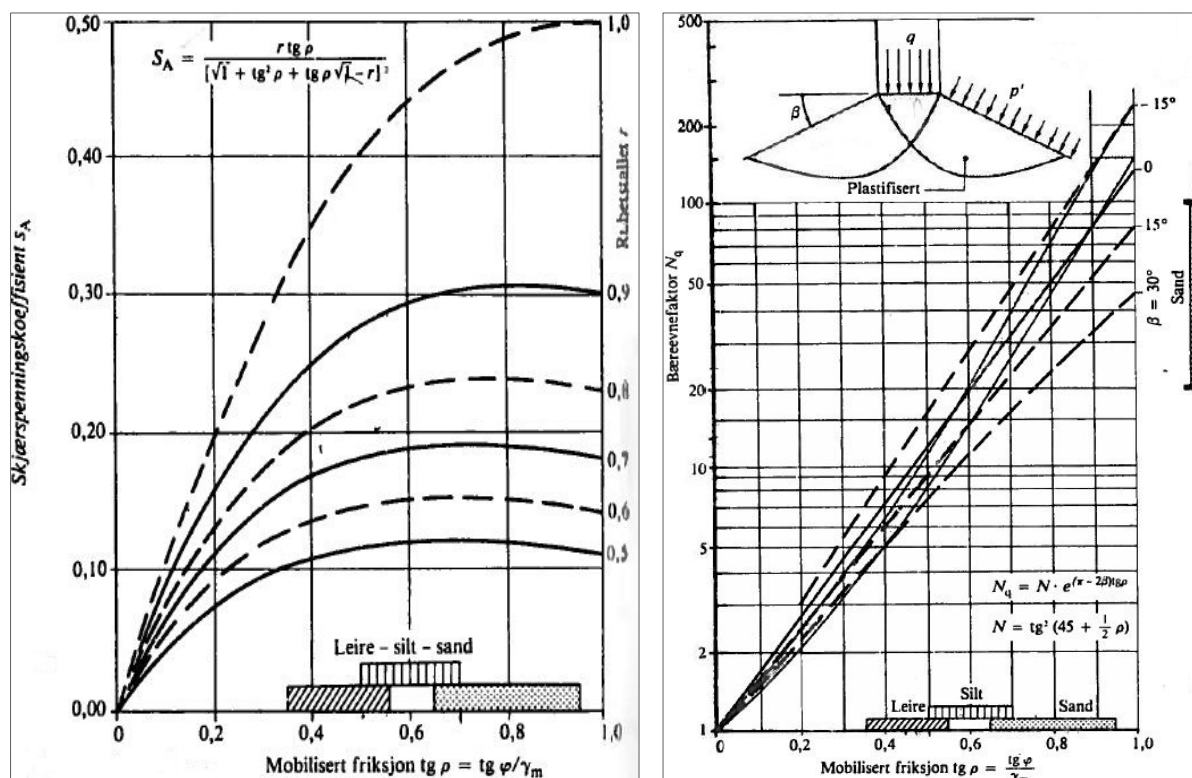
Reduksjonsfaktoren (f_a) bør fastlegges etter en samlet vurdering av alle forhold som kan tenkes å påvirke kapasiteten. Dette omfatter blant annet en vurdering av grunnforhold, grunnundersøkelser, installasjonsmetode og etterkontroll. (D.N.Pelekomité 2005). I denne rapporten brukes følgende verdier på reduksjonsfaktoren:

- Injeksjonspeler: 0,9, grunnet skånsom installasjonsmetode, faktor bestemt og vurdert etter Andersson (2012) og D.N.Pelekomité (2005).
- Betongpeler: 0,75, grunnet mindre gunstig installasjonsmetode, faktor bestemt og vurdert etter D.N.Pelekomité (2005).

Det bør nevnes at reduksjonsfaktoren kun påvirker installert kapasitet på pelene (punkt 2 kapittel 3.3.2 og 3.3.3). Forskjell i valgte f_a -faktorer har derfor ingen betydning for nødvendig forankringslengde på pelene, bortsett fra at valgt dimensjon tåler den aktuelle lasten.

Skjærspenningskoeffisienten (S_A) avhenger av ruhetstallet (r) og mobilisert friksjon ($\tan \rho$). I denne rapporten dimensjoneres pelene etter bruddgrensetilstand, følgende verdier velges derfor; $r = 0,9$ og $\tan \rho = \tan \varphi$, etter Aarhaug (2008). Skjærspenningskoeffisienten finnes ved avlesning av Figur 33.

Bæreevnefaktoren (N_q) avhenger av "plastifiseringsevnen", uttrykt ved vinkel β , og mobilisert friksjon ($\tan \rho$). Likt som for skjærspenningskoeffisienten settes $\tan \rho = \tan \varphi$, mens β varierer med aktuell jordart (Tabell 3). Bæreevnefaktoren finnes etter Figur 33.



Figur 33 Til venstre skisseres graf for avlesing av skjærspenningskoeffisienten, S_A . Til høyre vises graf for avlesing av bæreevnefaktoren, N_q . (Aarhaug 2008).

Lærdom av resultater

Av presenterte grafer (kapittel 4.3.3) ser man at injeksjonspeler, ved sammenligning mot betongpeler, får en betydelig differanse i redusert forankringslengde ved løse til faste sand-/grusmasser. Spesielt for løs sand/grus er pelelengden forskjellig mellom de to løsningene. Dette som et resultat av høy verdi både på K-faktor og grensemantelfriksjon (q_s). Resultatene viser at en for de fleste andre grunnmasser også kan få en større reduksjon i forankringslengde (Figur 27 og Figur 28). Spørsmålet er om differansen vil være tilstrekkelig til å kompensere for kostnadsforskjellen mellom de to løsningene. Ettersom injeksjonspeler er dyrere enn betongpeler (materialmessig sett), vil en betydelig reduksjon i forankringslengde måtte oppnås for at den økonomisk sett skal være konkurransedyktig. Dette temaet vil bli ytterligere diskutert i kapittel 5, hvor man sammenligner kostnader for de to peletypene.

Følsomhetsanalysen gir en indikator på hvilke geotekniske parametere man bør rette fokus mot ved dimensjonering av betong- og injeksjonspeler. Resultatene viser at man ved beregning på betongpeler bør finne nøyaktige verdier av friksjonskoeffisienten ($\tan \varphi$) og tyngdetettheten (γ). Ved dimensjonering av injeksjonspeler bør en rette spesielt fokus mot å finne nøyaktig verdi på grensemantelfriksjonen (q_s). Figur 32 viser at en variasjon mellom 80 til 140 kPa (middelfast silt) ved 800 kN lastpåkjenning, gir hele 8 meter differanse i nødvendig forankringslengde. Dette viser hvor viktig det er med gode data for å kunne begrense pelelengden, og derav kostnadene.

Man skal være forsiktig med å stole blindt på presenterte resultater, da beregningene baserer seg på antatte geotekniske parametere og faktorer for ulike jordarter. Selv om anvendte parameterverdier er funnet og vurdert etter pålitelige kilder, er usikkerheten stor i forhold til hvordan det faktisk vil være. Dette gjelder spesielt med tanke på grensemantelfriksjon (q_s), ved dimensjonering av injeksjonspeler. I reelle prosjekter er verifisering med prøvepelning ofte en nødvendighet, da man ikke har god nok oversikt på faktisk q_s for de ulike jordartene. (Andersson 2012 pers. kom.). Dette gjøres for å kontrollere, samt korrigere beregningene, og bør helst gjennomføres tidlig i dimensjoneringsfasen for å oppnå best mulig resultat på beregningene. Ved tilstrekkelig antall prøvepelinger vil man kunne redusere totalsikkerhetsfaktoren som brukes ved dimensjonering. Ved å følge statiske bæreevneformler settes denne normalt lik $\gamma_{tot} = 1,6$, men ved å gjennomføre et større antall prøvebelastninger kan denne reduseres betraktelig ($\gamma_{tot} = 1,2 - 1,4$ avhengig av typen belastningsforsøk). (D.N.Pelekomité 2005). Økt sikkerhet ved beregninger vil gi kortere dimensjonert lengde på pelene, og dermed reduksjon i nødvendig forankringslengde.

I forhold til dimensjonering av betongpeler gjøres det oppmerksom på at eventuelle unøyaktige avlesninger kan ha påvirket resultatene. Dette gjelder avlesning av bæreevnefaktor og skjærspenningskoeffisient (ved bruk av Figur 33). Usikkerhet i forhold til geotekniske parameterverdier vil også gjelde betongpeler.

Viktige faktorer som ikke er tatt hensyn til i beregningene

- For løse jordarter anbefaler man normalt å bore ned et føringsrør ved bakkenivå (1 – 2 meter). Dette for å sikre sementsuspensjonens kvalitet og tykkelse, minske eventuelle påhengslaster, sikre god overgang mellom grunnplate og pel, samt øke frilengden til stålet i pelen (DeNeef 2004). Man regner normalt ikke med noe friksjonsbidrag fra føringsrøret, og virkelig lengde på pelen blir dermed større enn selve forankringslengden.
- Som beskrevet i rapporten er det normalt å trekke stålet opp og ned ved endelig dybde (i cirka 3 meters lengde). Dette gir en tykkere forankringskropp, samtidig som grensemantelfriksjonen (q_s) øker i denne sonen (Aronsson *et al.* 2004). Man har valgt en konservativ tilnærming, hvor det ikke tas hensyn til dette.

5. Prosjektgjennomgang Statoil – Stjørdal

5.1. Prosjektbeskrivelse

Prosjektgjennomgangen tar utgangspunkt i et prosjekt som gjennomføres av Statoil Hydro ASA (byggherre). Prosjektet innebærer oppføring av tilbygg ved eksisterende kontorlokaler på Tangen ved Stjørdal (Figur 34). Byggeprosjektet hadde oppstart april 2010 og forventes ferdigstilt høsten 2012. I denne rapporten skal man fokusere på fundamenteringsarbeidet, som omfatter å se på de alternative peleløsningene som ble vurdert. Fundamenteringen av byggene var planlagt oppført på 21 000 meter betongpeler. På grunn av Statoil Hydro ASA sitt ønske om å jobbe i eksisterende arbeidslokaler samtidig som fundamenteringsarbeidene fant sted, ble en mer skånsom løsning vurdert. Som erstatning for de allerede planlagte betongpelene så man på injeksjonspeler som et alternativ. En kom til slutt frem til at dette kunne være en god løsning både teknisk sett og med tanke på støy, løsningen ble derfor valgt. Bygget er ved nåværende tidspunkt ferdig fundamentert.



Figur 34 Slik planlegger man det ferdige bygget ved Statoil Stjørdal (Aune 2011).

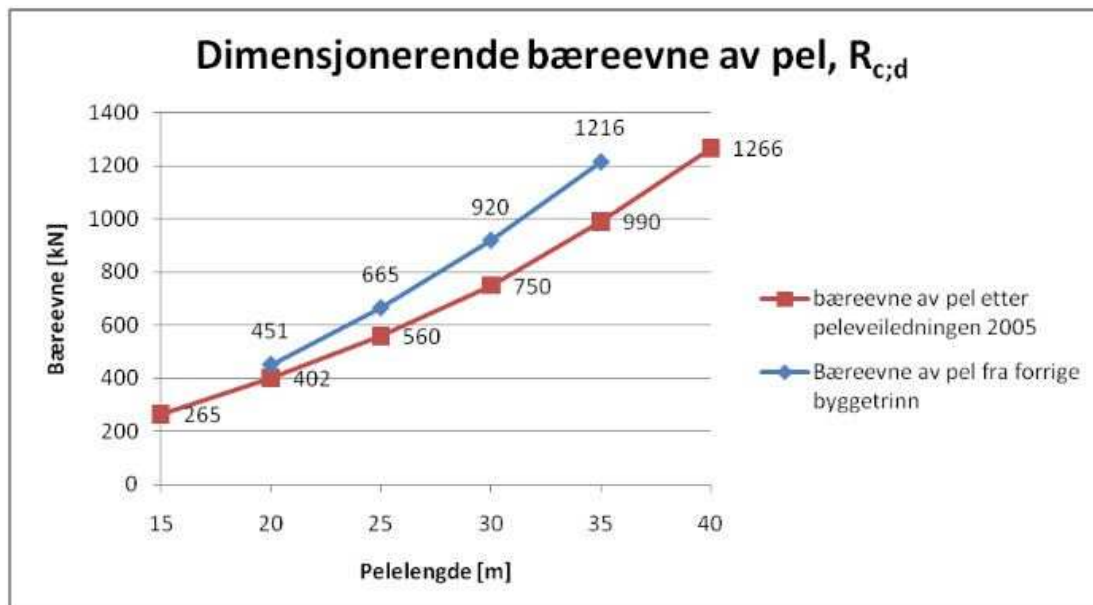
Gjennom rapporten vil man presentere en sammenligning av de to fundamenteringsalternativene for dette prosjektet. Med utgangspunkt i tilgjengelig prosjektmateriale skal man dimensjonere og optimalisere utnyttelsen/lengden av injeksjonspelene. Videre sammenlignes egne resultater med konsulenters dimensjoneringsresultater, samt prøvepeler. Beregning av nødvendig forankringslengde på betongpelene vil ikke bli gjennomført. Man velger heller å følge gitte dimensjoneringsresultater, utformet og dokumentert av eksterne konsulenter. Med bakgrunn i fremkomne resultater vil det gjennomføres en kostnadssammenligning. Her brukes dimensjoneringsresultater og beregninger for å bedømme estimert materialforbruk. Andre kostnader fås gjennom tilbudskalkyler. En vurdering av prosjektmålene tid, kvalitet, SHA og ytre miljø

for de to løsningene vil også bli gjennomført. Tilgjengelig materiale er prosjektdokumenter, kalkyler og grunnundersøkelser fra samarbeidsbedriften Fundamentering AS.

5.1.1. Beskrivelse av bygget og dets laster

Statoil Hydro ASA oppfører et tilbygg på allerede eksisterende kontorlokaler ved Stjørdal. Årsaken er at dagens bygg er blitt for lite for driftsorganisasjonen, og må derfor utvides. Våren 2010 startet Statoil sin utbygging på Tangen der de tre “vingene” som nå påbygges representerer 400 nye kontorplasser (samtlige bygg som vises i Figur 34). Det nye bygget gir 12 000 nye kvadratmeter over tre plan til kontor, kantine, kjøkken, tekniske rom og kjelleretasje. (Aune 2011). Bygget er fundamentert på injeksjonspeler. Ettersom man i denne rapporten skal fokusere på nettopp pelearbeidene, vil en viktig faktor være hvilke laster bygget påfører grunnen. Gjennom prosjektdokumenter er det beskrevet aksiale punktlaster fra byggverket i størrelsesorden 700 – 1000 kN. Ut i fra dette er det utarbeidet en peleplan som viser 26 peler med installert kapasitet 700 kN, 69 med kapasitet 800 kN, og 494 peler med en kapasitet på 1000 kN. Det tas forbehold om at planlagt antall peler forandret seg utover i prosjektprosessen.

Opprinnelig var dypfundamentering med betongpeler planlagt. Konsulentenes dimensjonerer av pelene baserte seg på beregninger fra Peleveiledningen av 2005 (etter rammede friksjonspeler i sandige masser). Dimensjonerende bæreevne på betongpelene ble sammenstilt med bæreevne lagt til grunn ved forrige byggetrinn. Figur 35 viser hvordan resultatene etter sammenligningen differerer.



Figur 35 Dimensjonerende bæreevne på betongpeler ved prosjektet Statoil - Stjørdal. Grafene illustrerer resultater fra forrige byggetrinn, samt beregninger etter Peleveiledningen (2005). (SWECO 2009).

Ettersom ingen ting tydet på at pelene fra forrige byggetrinn var underdimensjonert, ble samme bæreevne lagt til grunn også ved dette prosjektet. På bakgrunn av dette ble følgende dimensjoner og lengder på betongpelene valgt:

- 700 kN aksial last: 28 meters P270MA betongpeler
- 800 kN aksial last: 30 meters P270MA betongpeler
- 1000 kN aksial last: 34 meters P270MA betongpeler

Som tidligere nevnt ble opprinnelig planlagt fundamentløsning med betongpeler, erstattet med injeksjonspeler på prosjektet. Videre skal man dimensjonere injeksjonspelene etter gitte laster (presentert ovenfor). Egne beregninger vil senere sammenstilles med konsulentenes dimensjonerings. Nedenfor beskrives grunnforholdene på prosjektet, som ligger til grunn for beregning av nødvendig forankringslengde.

5.1.2. Grunnundersøkelser og grunnforhold

Vurderingen av grunnforhold tar utgangspunkt i datarapport for grunnundersøkelser, gjennomført av Rambøll, på det aktuelle området (Tangen på Stjørdal). Det er utført dreietrykksonderinger og trykksonderinger på ulike områder av byggetomten, samt én prøveopptaking. Undersøkelsene viser at fyllingsmassene i toppen hovedsakelig består av innpumpede mudringsmasser av sand. I overgangen ned mot original grunn kote -2,0, er det påvist bløtere lag av leirig silt, med rester av humus. Videre består løsmassene av et fast sandlag fra kote -2,0 til kote -4,5. Videre med dybden, ned til avsluttet sondering ved cirka kote -16,0, består massene av middels fast til fast leirig silt og siltig leire. (Rambøll 2009).

Viktige resultater fra grunnundersøkelsene

For å kunne dimensjonere injeksjonspelene er det nødvendig med ulike geotekniske jordparametere og beskrivelser. Med bakgrunn i kapittel 3.3.1 – "geotekniske undersøkelser for dimensjonering av injeksjonspeler" har man ut i fra grunndatarapport vurdert følgende målinger og undersøkelser:

- Trykksondering, CPT
- Bestemmelse av udrenert skjærstyrke, S_u
- Beskrivelse av grunnforhold gjennom laboratorieforsøk og sonderinger

Gjennom trykksonderingsmålingene har man kommet frem til en spissmotstand $q_c \approx 5 - 8$ MPa for massene mellom kote -2,0 til kote -4,5. Mellom kote -4,5 og ned til avsluttet sondering kote -16,0, er en midlere verdi $q_c \approx 1$ MPa funnet. Spissmotstanden (q_c) er vanskelig avlesbar mellom kote 0 til -2,0. Udrenert skjærstyrke S_u er funnet lik 47 kPa for de siltige/leirige massene under kote -4,5. Denne verdien er bestemt gjennom konusforsøk på uforstyrrede prøver mellom kote -5,0 til -12,0. Tabell 5 gir en beskrivelse av grunnforholdene ved ulike kotehøyder, inkludert geotekniske parametere (q_c og S_u), for de aktuelle jordartene.

Tabell 5 Viktige resultater fra grunnundersøkelser gjennomført på Tangen – Stjørdal, etter Rambøll (2009).

	Kote 0 til kote -2,0	Kote -2 til kote -4,5	Kote -4,5 til kote -16
<i>Aktuelle grunnforhold ved angitt dybde</i>	Fyllingsmasser består av innpumpede mudringsmasser av sand (rester av humus i overgang ned mot original grunn)	Løsmassene består av et fast sandlag	Løsmassene består av middels fast til fast leirig silt og siltig leire
<i>Spissmotstand, q_c (CPT)</i>	Resultatene fra CPT er vanskelig avlesbare, men viser $q_c \approx 5 - 8$ MPa	Resultatene fra CPT er vanskelig avlesbare, men viser $q_c \approx 5 - 8$ MPa	Resultatene fra trykksonderingen viser $q_c \approx 1$ MPa
<i>Udrenert skjærstyrke, S_u</i>	Ikke gjennomført konusforsøk på denne kotehøyden	Ikke gjennomført konusforsøk på denne kotehøyden	Konusforsøk viser gjennomsnittlig udrenert skjærstyrke $S_u \approx 47$ kPa

5.2. Beregning av nødvendig forankringslengde

Hensikten med dette kapittelet er å optimalisere utnyttelsen av injeksjonspilene. Utgangspunktet er beregningsmodellen presentert i kapittel 3.3, samt last- og grunnforholdene beskrevet i kapittel 5.1.1 og 5.1.2.

5.2.1. Nødvendige forutsetninger

Følgende forutsetninger vil være nødvendige ved dimensjonering av injeksjonspilene:

- Dimensjonerende laster for pelene F_d
- Valg av totalsikkerhetsfaktor γ_{tot} og reduksjonsfaktor f_a
- Valg av dimensjon og type borkrone
- Bestemmelse av grunnforhold, samt aktuelle geotekniske parametere
- Vurdering av forholdstall K_1 og K_2
- Vurdering av grensemantelfriksjon (q_s) for de ulike jordartslagene

Dimensjonerende laster (F_d) er som tidligere presentert 700 – 800 – 1000 kN. Følgende dimensjoner på injeksjonspilene (samt type og dimensjon på borkronene) velges for de ulike lastpåkjenningene:

- 700 kN: Ischebeck TITAN 73/53 – 73/56, leirborkrone \varnothing 200 mm
- 800 kN: Ischebeck TITAN 73/45 – 73/56, leirborkrone \varnothing 200 mm
- 1000 kN: Ischebeck TITAN 73/35 – 73/56, leirborkrone \varnothing 200 mm

Årsaken til variasjon i dimensjon er at man ønsker å kostnadsoptimalisere utnyttelsen av pelene (kostnaden på pelene avtar med redusert dimensjon). Installert kapasitet (N_i) for 73/56 – stål er 650 kN. Man går derfor over til denne dimensjonen når pelene har nådd en dybde hvor kravet $N_i > F_d = OK$ (Figur 36). Grunnen til at man ikke velger å bruke tre forskjellige dimensjoner er at dette vil være praktisk ugunstig. Logistikken ved installering ville i så tilfelle blitt ytterligere komplisert, derav økt kostnads- og tidsforbruk ved montering. (Rosø 2012 pers. kom.).

Totalsikkerhetsfaktor settes til $\gamma_{tot} = 1,3$ siden det gjennomføres prøvebelastning etter 90 % regelen på prosjektet (D.N.Pelekomité 2005). Reduksjonsfaktor velges til $f_a = 0,9$ grunnet skånsom installasjonsmetode (Andersson 2012 pers. kom., D.N.Pelekomité 2005).

Dimensjoneringen tar utgangspunkt i gjennomførte grunnundersøkelser og vurderingen av disse (kapittel 5.1.2). Videre gis en oversikt over hvilke geotekniske parametere som forutsettes for de ulike jordartene.

Kote 0 til kote -2,0

I denne dybden består grunnen av et bløtere lag leirig silt, med rester av organisk innhold (humus). Ved forankring i slike masser risikerer man tidlig korrosjon på stålet i pelene og reduksjon av bærekapasitet. Man anbefaler derfor å installere et føringsrør ned til kote -2,0 da dette forhindrer aggressive masser i å redusere pelens kvalitet/levetid, samtidig som man får en frilengde for stålet i pelen. Man antar at pelen ikke opptar noen bæring i dette området, en vurdering av q_s og $K_1 - K_2$ vil derfor ikke gjennomføres.

Kote -2,0 til kote -4,5

Ved denne dybden viser sonderingene og prøvetakingen et fast lag bestående av sand. Fra trykksonderingen ser man at spissmotstanden varierer mellom $q_c \approx 5 - 8$ MPa. I følge Aronsson *et al.* (2004) defineres sanden som løs dersom $q_c < 5$ MPa, og som fast dersom $q_c = 8 - 15$ MPa. På bakgrunn av angitte grunnforhold og q_c – verdier forutsettes følgende geotekniske parametere og beskrivelser ved dimensjonering:

- Løs sand
- Grensemantelfriksjon $q_s = 100 - 150$ kPa
- Forholdstall $K_1 = 1,7$ og $K_2 = 1,9$

Grensemantelfriksjonen (q_s) er bestemt på grunnlag av jordartsklassifisering, etter DeNeef (2004) – Dimensjoneringsguide/3 "Ischebeck TITAN stag och påle". Forholdstall $K_1 - K_2$ er bestemt etter sammenstilling av angitte verdier for løs til fast sand/grus hentet fra Aronsson *et al.* (2004) og DeNeef (2004). Valgte verdier anses som konservative i forhold til hva som er anbefalt i anvendte kilder, noe som skal bidra til å forhindre underdimensjonering.

Kote -4,5 til kote -16,0

Løsmassene ved denne dybden beskrives etter grunnrapport som middels fast til fast leirig silt, eller siltig leire. Fra trykksondering (CPT) finner man en midlere verdi $q_c \approx 1 \text{ MPa}$, mens udrenert skjærstyrke etter konusforsøk viser $S_u \approx 47 \text{ kPa}$. I følge DeNeef (2004) defineres leiren/siltten som veldig løs dersom $q_c = 0,1 - 0,8 \text{ MPa}$, og løs dersom $q_c = 0,5 - 2 \text{ MPa}$. På bakgrunn av angitte grunnforhold og q_c – verdier forutsettes følgende geotekniske parametere og beskrivelser ved dimensjonering:

- Veldig løs til løs leire/silt
- Grensemantelfriksjon $q_s = 60 - 105 \text{ kPa}$
- Forholdstall $K_1 = 1,2$ og $K_2 = 1,3$

Grensemantelfriksjonen bestemmes etter vurdering av udrenert skjærstyrke (S_u) for jordarten. I følge DeNeef (2004) settes $q_s = 1,0 - 2,0 * S_u$ for veldig løs leire/silt og $q_s = 1,5 - 2,5 * S_u$ for løs leire/silt. Ettersom man har karakterisert grunnforholdene som veldig løs til løs leire/silt er verdiene på q_s midlet. Angitte verdier (q_s) stemmer for øvrig godt med anbefalte verdier etter FHWA (2000). Forholdstall $K_1 - K_2$ er bestemt etter sammenstilling av verdier for veldig løs til løs leire/silt hentet fra Aronsson *et al.* (2004) og DeNeef (2004). Forutsatte verdier anses som konservative, noe som skal bidra til å forhindre underdimensjonering. Dette gjelder spesielt karakterisering av grunnmassene som ut i fra grunnrapport er definert som middels fast til fast, men som her antas å være veldig løs til løs.

Når endelig dybde er nådd skal man skifte tykkelse på injeksjonsmassen fra $v/c = 0,70$ til $0,40$. Deretter injiserer man kontinuerlig inntil hele pelens lengde er dekt med den tykkere massen. Normalt gjennomføres etterpressing av sementsuspensjon for de siste 3 meterne av pelen. (Aschenbroich 2005). Dette bidrar til en økning av grensemantelfriksjon (q_s) og K – verdi for denne dybden. I følge FHWA (2000) øker verdien på q_s med ca. 20 % ved etterpressing i leire/silt. Det står ikke oppgitt hvilken økning man normalt får på K – verdi, man velger derfor lik økning som for q_s . Med dette som utgangspunkt finnes følgende grensemantelfriksjon og forholdstall (for de 3 siste meterne) ved dimensjonering:

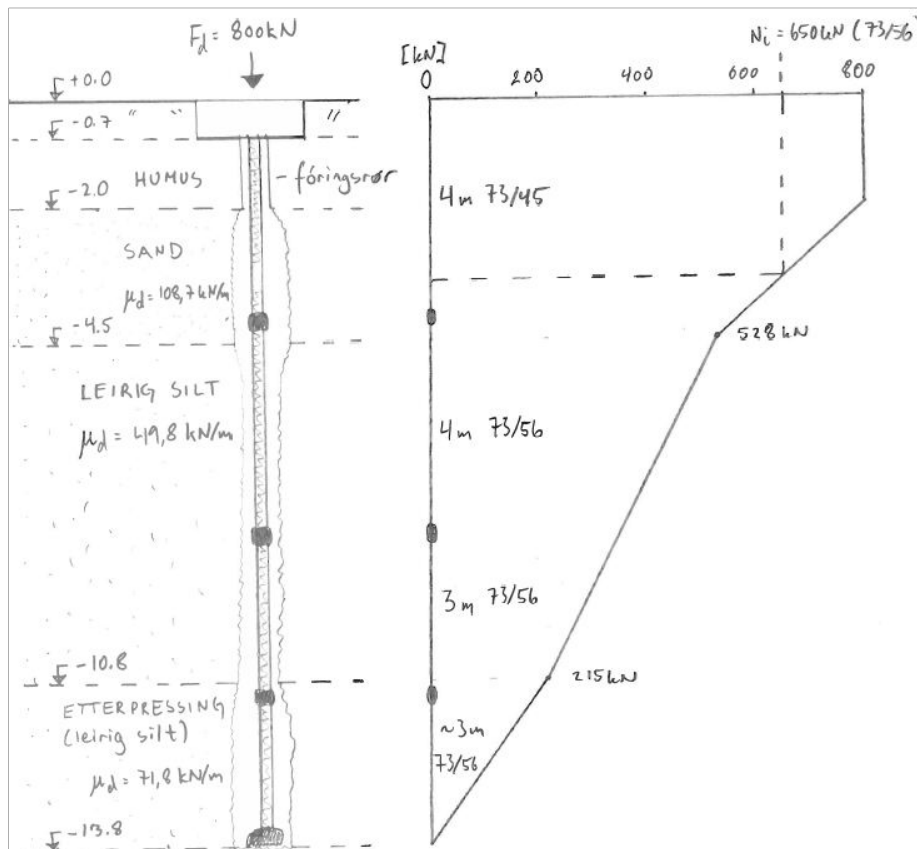
- Grensemantelfriksjon $q_s = 72 - 126 \text{ kPa}$
- Forholdstall $K_1 = 1,4$ og $K_2 = 1,6$

5.2.2. Dimensjonering og optimalisering

Dimensjoneringen av injeksjonspelene er gjennomført etter beregningsmodell presentert i kapittel 3.3.2. Valgte dimensjoner på peler og borkroner, sikkerhetsfaktorer, samt geotekniske parametere for de ulike jordartslagene er gjengitt i kapittel 5.2.1. Ut i fra dette har man beregnet nødvendig forankringslengde ved aksiale laster på $700 - 800 - 1000 \text{ kN}$.

Figur 36 skisserer lastfordeling langs pelene dimensjonert for en aksial last på 800 kN (dimensjoneringsforutsetninger, samt øvrige skisser ved aksiallast 700 kN og 1000 kN finnes i vedlegg 4) Av figuren kan man se at dimensjonerende mantelmotstand (μ_d) er betydelig

høyere for sandmassene sammenlignet med den leirige silten. Dette kommer som et resultat av høyere grensemantelfriksjon (q_s) og K-faktor i dette området. Total lengde på pelene belastet med 800 kN, er beregnet til 13,8 meter, dette inkludert tykkelse på fundamentplate, samt lengde på fôringsrør (Figur 36). Plate og fôringsrør ligger i grunn med organisk innhold (mellom kote 0,0 og kote -2,0), og man regner ikke med noe lastopptak i dette området. En kan merke seg at dimensjonen på pelene varierer med dybden (fra 73/45 til 73/56). Dette kommer at man har forsøkt å optimalisere utnyttelsen av pelene ved dimensjonering. Ved å redusere dimensjonen kan man få en betraktelig kostnadsreduksjon. På prosjektet Statoil – Stjørdal installeres i overkant av 500 peler, og store besparelser kan oppnås. Figur 36 viser hvordan en har variert mellom 3 – 4 meters lengder på injeksjonspelene. Ved bruk av standard lengder reduseres behovet for behandling (hovedsakelig kapping), også dette av kostnadsmessige hensyn.



Figur 36 Dimensjonering av injeksjonspeler ved en lastpåkjenning lik 800 kN.

Samtlige injeksjonspeler er dimensjonert for de ulike lastpåkjenningene 700 – 800 og 1000 kN (vedlegg 4). Gjennomførte beregninger gir følgende forankringslengder:

- 700 kN aksial last: 9,8 meter (73/53 – 73/56, leirborkrone Ø 200 mm)
- 800 kN aksial last: 11,8 meter (73/45 – 73/56, leirborkrone Ø 200 mm)
- 1000 kN aksial last: 15,8 meter (73/35 – 73/56, leirborkrone Ø 200 mm)

Lengdene representerer nødvendig forankringslengde (bærende område), det vil si at man ikke tar med tykkelse på fundamentplate og fôringsrør.

Resultater dimensjonering

Resultatene gjengitt i Tabell 6 viser egne beregninger, konsulents beregninger, samt korrigeringer av konsulents beregninger etter prøvepeling. Presenterte lengder på pelene gjelder UK – fundament, og tar ikke hensyn til tykkelsen på fundamentplate eller lengde på fôringsrør. Det vil si at verdiene kun beskriver forankringslengden, altså det bærende området.

Tabell 6 Differanse i nødvendig forankringslengde for egne beregninger kontra konsulents beregninger.

	700 kN	800 kN	1000 kN
<i>Egen dimensjonering</i>	9,8 m	11,8 m	15,8 m
<i>Konsulents dimensjonering</i>	14,5 m	17,5 m	22,5 m
<i>Korrigering etter prøvepeling</i>	16,0 m	18,5 m	24,5 m

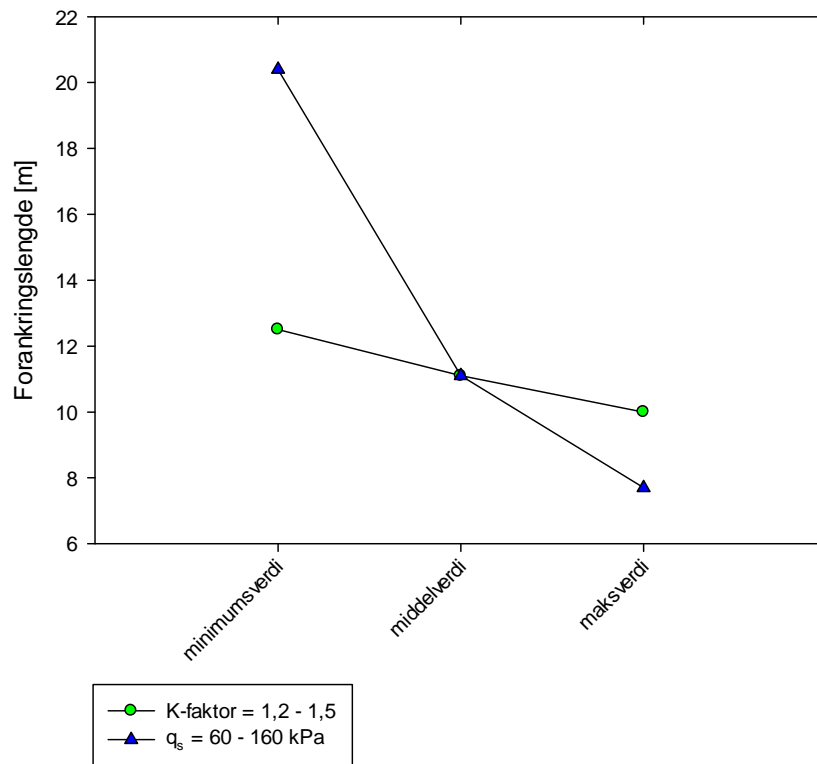
Tabellen viser en stor differanse mellom egen dimensjonering og konsulents dimensjoneringer. Resultatene er basert på samme beregningsmodell, og variasjonen forklares derfor med ulik vurdering av geotekniske parametere. Videre vil man sammenligne beregningene ved å se på hvilke parametere som er vurdert forskjellig. En vil også diskutere andre faktorer som kan ha betydning for dimensjoneringsresultatene.

5.2.3. Sammenligning av egen dimensjonering med opprinnelig dimensjonering

Ved beregning av forankringslengde ble det brukt konservative verdier i forhold til hva som var anbefalt i litteraturen (kapittel 5.2.1). Hensikten med dette var å unngå underdimensjonering. Ettersom studentens og konsulents dimensjoneringer baserer seg på samme beregningsmodell, er det vurderingen av de geotekniske parametere som differerer. For å belyse hvor stor betydning tidlig valg av grensemantelfriksjon (q_s) og K-faktor har, er det utformet en følsomhetsanalyse (Figur 37). Man har valgt å kjøre analysen ved grunnforholdene løs til fast lagret silt, da dette antas å gi de mest representative verdiene for prosjektet. Følgende differanse er valgt for parametere:

- Minimumsverdi: $q_s = 60$ kPa, K-faktor = 1,2
- Middelsverdi: $q_s = 110$ kPa, K-faktor = 1,35
- Maksimumsverdi: $q_s = 160$ kPa, K-faktor = 1,5

Analysen gjelder fundamentene som har en lastpåkjenning lik 800 kN. Valgt borkrone-dimensjon er 200 mm. Resultatet fra følsomhetsanalysen er vist på neste side.



Figur 37 Følsomhetsanalyse ved grunnforholdene løs til fast silt.

Følsomhetsanalysen viser at en variasjon av q_s (60 – 160 kPa) gir en forskjell i nødvendig pelelengde på hele 12 meter. K-faktoren har ikke like stor innvirkning på forankringslengden. På dette prosjektet har konsulenten brukt lave verdier på q_s , sammenlignet med det som er anbefalt i litteraturen. Figur 37 viser at jo lavere verdiene på grensemantelfriksjonen (q_s) er, dess mer følsom er forankringslengden for variasjon. Dette er årsaken til den store differansen mellom egne dimensjoneringer og konsulenters dimensjoneringer.

Tabell 6 viser at konsulenters beregninger og faktisk lengde på de installerte pelene (korrigering etter prøvepeling) differerer. Hittil har man fokusert på de geotekniske parameterne q_s og K-faktor, som årsak til dette. Videre nevnes andre faktorer som kan gi unøyaktig dimensjonering:

- På prosjektet Statoil – Stjørdal ble det påvist meget bløte masser. Dette tas ikke hensyn til i beregningsmodellen. Man antar at dette har betydning ved dimensjonering.
- Det ble kun utført 2 prøvepeling på prosjektet. Man burde gjennomført flere tester for å finne en mer nøyaktig verdi på dimensjonerende mantelmotstand (μ_d).
- Dimensjoneringen tar utgangspunkt i grunndatarapport gjennomført for prosjektet. Dersom sonderingene og prøvetakingene gir feilaktige verdier, blir dimensjoneringsgrunnlaget dårlig. På prosjektet Statoil – Stjørdal er det utført flere trykksonderinger med samsvarende resultater, og dette antas ikke som et problem.

5.3. Kostnadssammenligning

Hensikten med dette kapitlet er å vurdere kostnadsdifferansen mellom betong- og injeksjonspeler ved Statoil – Stjørdal. Sammenligningen tar utgangspunkt i tilgjengelige kostnadsdata og prosjektkalkyler.

5.3.1. Kostnadssammenligning av betong- og injeksjonspeler ved Statoil – Stjørdal

Hensikten med kapitlet er å sammenligne kroner per meter pel (kr/m) og kroner per installerte pel (kr/stk) for begge løsningene. Følgende avsnitt presenterer hvilke kostnader som er tatt hensyn til, og hvilke som er sett bort fra. Man vil ikke presentere delkostnader ved kostnadssammenligning, da dette er konfidensielle data. Med dette menes stykkpriser, meterpriser og rundsummer for peler og pelemekponenter, rigger, protokoller, med mer. Videre presenteres kostnader med beskrivelser lagt til grunn (Prosesskode 2 - Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier 2007):

- *Materialkostnad/levering*: For injeksjonspelene inkluderer dette stålelement (pel), borkroner, skjøtehylser, senterholdere, pelehoder (både trykk og strekk), mutre, samt sementsuspensjon. For betongpeler gjelder dette peleelement og spiss/løsmassesko.
- *Riggkostnad*: Omfatter transport, tilrigging og nedrigging av maskiner og utstyr som trengs for å kunne ramme betongpeler, samt bore injeksjonspeler.
- *Oppstilling*: Omfatter flytting, oppstilling av pelemaskiner, og kostnader forbundet med etablering av målegrunnlag for nøyaktig plassering av pelene.
- *Nedramming/nedboring*: Omfatter nedramming/nedboring, eventuell skjøting, og kontrollnivellering av betong- og injeksjonspeler.
- *Protokoll*: Denne kostnadsposten inkluderer hovedsakelig protokollføring, opptegning av peledata, ramme- og boreobservasjoner, samt dokumentering av prøvepeling.

Man har valgt å se bort i fra kostnader tilknyttet prøvebelastning, samt etablering og drift av kontraktarbeid. Tabellen under viser resultater fra kostnadssammenligningen:

Tabell 7 Kostnadssammenligning av betong- og injeksjonspeler ved Statoil – Stjørdal.

	Total kostnad	Kr/meter installert pel	Kr/stk installert pel
<i>Betongpeler</i>	9 392 197 kr	406 kr/m	18 489 kr/stk
<i>Injeksjonspeler</i>	11 858 614 kr	885 kr/m	23 344 kr/stk

Opprinnelig hadde man planlagt kostnadssammenligning (med aktuelt materialforbruk) fra egne dimensjoner og beregninger. Ettersom resultatene avviker sterkt fra konsulenterens beregninger, og prøvepeling spesielt, baserer kostnadssammenligningen (Tabell 7) seg på faktisk materialforbruk for prosjektet Statoil – Stjørdal. Dette antas å gi de mest relevante kostnadsdata for sammenligning.

Øvrige kommentarer til resultatene

Som en kan se av kostnadssammenligningen (Tabell 7) ble injeksjonspeler en vesentlig dyrere løsning enn betongpeler ved prosjektet Statoil – Stjørdal. Resultatene viser en total kostnadsdifferanse rundt 2,5 millioner kroner. I kapittel 5.6 – "dokumentering av prosess", vil det forklares hvorfor Statoil valgte løsningen på tross av dette.

Kostnadene lagt til grunn for gjennomføring med betongpeler var veldig lave ved dette prosjektet (406 kr/meter installert pel). Dette kan skyldes markedssituasjonen ved tidspunktet prosjektet ble gjennomført. Andre årsaker kan være at firmaet reduserte prisene for å få jobben, samt at prosjektet var veldig stort (større antall peler reduserer enhetsprisen). For normale jobber av middels størrelse kan man i følge NGF (2001) regne med en enhetspris for ferdig installerte betongpeler av typen P270MA (brukt på Stjørdalsprosjektet) på 430 – 500 kr. Dette er verdier fra 2001. Man har ikke funnet nyere kostnadsdata, og refererer derfor til disse tallene. I følge Flåtten (2012 pers. kom.) og Stendahl (2012 pers. kom.) stemmer enhetsprisene oppgitt fra NGF (2001), relativt godt med dagens situasjon. For å validere dette har man beregnet enhetspris for prosjektet "E-18 Melleby – Momarken". Med utgangspunkt i prosjektkalkyle tilgjengelig fra Fundamentering AS, oppnås en enhetspris lik 506 kr/meter installert pel. Kostnadspostene lagt til grunn, er de samme som ved prosjektet Statoil – Stjørdal. Selv om ulike prosjektavhengige forhold kan ha påvirket enhetsprisen, indikerer dette resultatet, samt normalpriser fra NGF, at Stjørdalsprosjektet har lave enhetspriser på betongpelene.

Oppgitte enhetspriser for injeksjonspeler er vurdert opp mot tilbudskalkyle for prosjektet "Trondheim S Plattform". Med utgangspunkt i kalkyle tilgjengelig fra Fundamentering AS, finnes en enhetspris lik 1175 kr/meter installert pel. Kostnadspostene lagt til grunn, er de samme som ved prosjektet Statoil – Stjørdal (peledimensjonene er også like). Årsaken til stor differanse kan delvis skyldes størrelsesforskjellen på de to prosjektene, samt andre prosjektavhengige forhold. Ettersom injeksjonspeler er en lite brukt peløsning i Norge er det få referanseprosjekt å vise til. Usikkerheten i forhold til normal enhetspris er derfor stor.

5.3.2. Endring av grunnforhold

Grunnforholdene på prosjektet Statoil – Stjørdal var på ingen måte ideelle med tanke på injeksjonspeler som fundamentløsning (gjenspeiles i kostnadssammenligningen). Tidligere er det vist til stor differanse i nødvendig forankringslengde mellom betong- og injeksjonspeler (kapittel 4.3). Videre vil man se hvordan injeksjonspeler hadde stilt seg kostnadsmessig, dersom grunnforholdene hadde vært annerledes.

Forutsatte grunnforhold

I følgende beregninger ser man bort fra opprinnelige grunnmasser ved prosjektet. Heretter forutsettes homogene, ikke lagdelte forhold i hele pelens lengde. Jordarten som undersøkes er løs sand/grus.

Tidligere beregninger har gitt tydelige indikasjoner på at bløte masser påvirker grensemantelfriksjonen ved dimensjonering av injeksjonspeler (korrelasjon mellom egne resultater og resultater fra prøvepeling). Grunnet stor usikkerhet, knyttet til estimering av denne parameteren, antar man videre tørre masser i hele pelens lengde. Hensikten med dette valget er at anbefalinger i litteraturen til geotekniske parametere (for ulike jordarter), skal stemme bedre over ens med realiteten.

Følgende geotekniske parametere antas ved dimensjonering av injeksjonspeler:

- Grensemantelfriksjon: $q_{s \text{ min}} = 85 \text{ kPa} - q_{s \text{ maks}} = 170 \text{ kPa}$
- Forholdstall: $K_1 = 2,0 - K_2 = 2,2$

For dimensjonering av betongpeler antas følgende parametere:

- Tyngdetetthet: $\gamma = \gamma' = 16,5 \text{ kN/m}^3$
- Attraksjon: $a = 5$
- Friksjonskoeffisient: $\tan \varphi = 0,70$
- Sidedfriksjonsfaktor: $\beta = -10$

Geotekniske parametere for injeksjonspeler er hentet fra FHWA (2000), Aronsson *et al.* (2004), DeNeef (2004) og Ischebeck (2002). Grunnlagsdata for dimensjonering av betongpeler er hentet fra Sandven (2005), D.N.Pelekomité (2005), Aarhaug (1991, 2008). Henviste parameterverdier er vurdert etter tørr sand/grus (for norske forhold), og avviker noe fra tidligere henvisninger (Tabell 3 og Tabell 4) grunnet tørre masser. Pelene dimensjoneres etter laster aktuelle for prosjektet Statoil – Stjørdal (700 – 800 – 1000 kN).

Dimensjoneringen tar utgangspunkt i presenterte beregningsmodeller for injeksjonspeler (kapittel 3.3.2) og betongpeler (kapittel 3.3.3). Med forutsatte geotekniske parameterverdier lagt til grunn, finnes følgende forankringslengde på pelene:

Tabell 8 Nødvendig forankringslengde for betong- og injeksjonspeler i tørr sand/grus ved en lastpåkjenning lik 700 – 800 – 1000 kN.

	700 kN	800 kN	1000 kN
<i>Betongpeler</i>	12,9 m	14,2 m	16,6 m
<i>Injeksjonspeler</i>	5,4 m	6,2 m	7,7 m

Resultatene fra dimensjoneringen finnes i vedlegg 5.

Kommentarer til resultatene

Resultatene (Tabell 8) viser at nødvendig forankringslengde på injeksjonspelene er 42 – 46 % av betongpelene. Tidligere dimensjonerings viste til sammenligning 25 – 30 %, ved samme lastpåkjenninger (kapittel 4.3.3, Figur 30). Årsaken til differansen kommer hovedsakelig av at man forutsetter tørre grunnforhold. Dette gir økt horisontal jordtrykksspenning som resultat av høyere effektiv vertikalspenning langs peleskaftet (altså; $\gamma = \gamma'$). Man får normalt en økning i friksjonskoeffisient ($\tan \phi$) og attraksjon (a) ved tørre forhold, noe som også bidrar til å redusere nødvendig lengde på betongpelene. Det geotekniske grunnlaget for dimensjonering av injeksjonspelene er relativt likt tidligere, noe som gjenspeiles i resultatene.

Kostnadssammenligning etter endring i grunnforhold

Enhetskostnadene som legges til grunn ved videre sammenligning tar utgangspunkt i beskrevne kostnadsdata for betong- og injeksjonspeler. Med utgangspunkt Stjørdalsprosjektet, normaliserte kostnadsdata, samt ulike referanseprosjekt, legges følgende enhetskostnader til grunn:

- Betongpeler: 460 kr/meter installert pel
- Injeksjonspeler: 1030 kr/meter installert pel

Med bakgrunn i gjennomførte dimensjonerings sammenlignes nødvendig forankringslengde før og etter endring av grunnforhold. Følgende totale lengder (inkludert alle peler) er funnet for de ulike lastpåkjenningene ved Statoil – Stjørdal:

Tabell 9 Opprinnelig total lengde, inkludert alle peler ved Statoil – Stjørdal, samt totale lengder etter forutsatte grunnforhold.

	700 kN	800 kN	1000 kN
<i>Betongpeler opprinnelig</i>	937 m	2649 m	19 579 m
<i>Injeksjonspeler opprinnelig</i>	458 m	1358 m	11 587 m
<i>Betongpeler forutsatt</i>	335 m	951 m	7221 m
<i>Injeksjonspeler forutsatt</i>	140 m	415 m	3350 m

Med utgangspunkt i estimerte enhetskostnader og nye lengder fås følgende totalkostnader for de to løsningene:

- Betongpeler: 3 913 220 kr
- Injeksjonspeler: 4 022 150 kr

Det skal nevnes at resultatene bærer preg av usikkerhet, både med tanke på kostnadsdata og faktisk forankringslengde. Resultatene gir uansett en indikasjon på at injeksjonspeler (forutsatt egnede grunnforhold) økonomisk sett kan sammenstilles med betongpeler.

5.4. Tid

Det er ofte knyttet stor usikkerhet til total produksjonstid ved installering av pelers. Grunnforholdene er i de fleste tilfeller den viktigste faktoren, da det settes begrensninger i forhold til gjennomførbar bore-/rammehastighet. Andre faktorer som kan virke inn er anleggsforhold, tilgjengelighet på materialer, og erfaring hos mannskap. I dette delkapittelet vil man fokusere på fremdriften ved prosjektet på Stjørdal. Hensikten er å finne gjennomsnittlig produksjonshastighet, med fokus på installasjon av pelene.

Det er gjennom dagrapporter beregnet gjennomsnittlig produksjon per dag på anlegget. Beregningene tar utgangspunkt i dager med boring. Det vil si at dager uten installering grunnet vedlikehold av rigg, større heftelser, annet arbeid, etc., ikke tas med i beregningen. Dette antas å gi de mest representative verdiene, da resultatene ikke blir like prosjekt-avhengige. Beregningsgrunnlaget baserer seg på 44 dager med produksjon. I løpet av denne perioden ble 8022,8 meter pelers installert, dette tilsvarer cirka 60 % av den totale produksjonen.

$$\text{Gjennomsnittlig produksjon per dag} = \frac{\text{Total lengde}}{\text{Antall dager med produksjon}}$$

$$\text{Gjennomsnittlig produksjon per dag} = \frac{8022,8 \text{ meter}}{44 \text{ dager}} = 182 \text{ m/dag}$$

I løpet av de 44 dagene er det gjennom dagrapportene registrert en maksimal og minimal produksjon på henholdsvis 345 m/dag og 80 m/dag. Dette er relativt store avvik fra normalproduksjonen på 182 m/dag. Selv om beregningene ikke inkluderer dager uten installering, har ulike heftelser ved flere tilfeller redusert den gjennomsnittlige produktiviteten. Følgende heftelser er registrert:

- Ved flere tilfeller var det mangel på skjøtehyser og andre pelekomponenter.
- Leveranse av manglende pelekomponenter måtte sendes fra Tyskland (produksjonsfabrikk Ischebeck TITAN), derav lang leveringstid.
- Feil kotehøyder førte til at flere pelers måtte senkes.
- Vann i byggegrop forsinket ved flere anledninger fremdriften. Dette førte blant annet til fastkjøring av borerigg.
- Injeksjonsmasse som blandet seg med vannet i byggegropen, satte seg i beltene på riggen, og måtte senere meisles ut.

Av overnevnte punkter bør spesielt mangler på pelekomponenter fremheves. Injeksjonspeler- og komponenter av typen Ischebeck TITAN leveres normalt fra Tyskland. Dersom man ikke planlegger tilsendingene kan forsinkelser føre til betydelig reduksjon på fremdriften, derav nedsatt normalproduksjon. Vann i byggegropen førte i flere tilfeller til fastkjøring av borerigg, samt injeksjonsmasse som satte seg i beltene. På like linje med overnevnte heftelse var dette en faktor som reduserte fremdriften på anlegget. Prosjektet Statoil – Stjørdal er et godt eksempel på hvordan ulike faktorer kan påvirke produksjonen. Differansen mellom maksimal

og minimal produksjon var på 265 m/dag. Denne verdien gir en indikasjon på hvordan en god planleggingsprosess, hvor alle mulige heftelser tas hensyn til, vil kunne gi en betydelig økning i gjennomsnittlig produksjon.

Referanseprosjekt – Sjøholt Næringsbygg

Det ble ikke installert noen betongpeler på Stjørdalsprosjektet, og en god sammenligning av produksjonshastighet vil derfor være vanskelig. Prosjektet er sett opp mot et referanseprosjekt, hvor betongpeler ble brukt. Referanseprosjektet er Sjøholt Næringsbygg, lokalisert i Ørskog kommune. Dette prosjektet er relativt lite, sammenlignet med Statoil – Stjørdal (ramming av cirka 3700 meter betongpeler). Årsaken til at man valgte henviste referanseprosjekt er at grunnforholdene på de to prosjektene er relativt like. Gjennom grunnundersøkelser vises en dominans av løs til middels fast lagret sand/siltig sand. Sammenlignet med grunndata beskrevet for Statoil – Stjørdal er dette tilfredsstillende likt. Gjennom peleprotokoller er det regnet ut gjennomsnittlig produksjon per dag på anlegget. Beregningene tar i likhet med utregning for Statoil – Stjørdal utgangspunkt i dager med produksjon/ramming. Beregningsgrunnlaget baserer seg på 21 dager med produksjon. I løpet av denne perioden ble 3675,5 meter peler installert.

$$\text{Gjennomsnittlig produksjon per dag} = \frac{3675,5 \text{ meter}}{21 \text{ dager}} = 175 \text{ m/dag}$$

Ingen dagsrapporter lå tilgjengelig på dette prosjektet, man kan derfor ikke kommentere eventuelle heftelser som påvirket produksjonen på anlegget.

Sammenligning

Verdiene fra prosjekt Statoil – Stjørdal og referanseprosjekt Sjøholt Næringsbygg viser relativt lik produksjonshastighet. Følgende resultater vil ikke kunne ses på som troverdige i forhold til hvordan situasjonen egentlig er. Erfaringer fra byggebransjen viser at installering av betongpeler i de aller fleste tilfeller er raskere enn injeksjonspeler. (Stendahl 2012 pers. kom.). Tidligere har man vist til gjennomsnittlig installasjonshastighet i størrelsesorden 250 – 400 meter per dag for betongpeler og 150 – 250 meter per dag for injeksjonspeler (Flåtten 2012 pers. kom., Dybvik 2012 pers. kom.). Man antar at dette er mer nøyaktige produksjonstall, som stemmer bedre med realiteten. At man får liten differanse i produksjonshastigheter ved prosjektet Statoil – Stjørdal og Sjøholt Næringsbygg skyldes sannsynligvis prosjektavhengige forhold. Et slikt forhold er at pelene ved Sjøholt Næringsbygg ble rammet til fjell, noe som medførte økt tid ved innmeisling i berg (Flåtten 2012 pers. kom.). Generelt burde man ha sammenlignet flere prosjekter for å kunne øke validiteten og troverdigheten av resultatene. Det bør for øvrig nevnes at presenterte resultater baserer seg på gjennomsnittlig produksjonshastighet for enkeltrigger. Ettersom injeksjonspeler krever mindre rigger for boring (kontra betongpeler for ramming), er det enklere å øke kapasiteten ved bruk av flere rigger på samme anleggsplass. En større reduksjon i nødvendig forankringslengde vil også kunne gi redusert differanse i produksjonstid mellom de to løsningene. Dette kan bidra til å veie opp for en lavere gjennomsnittlig produksjonshastighet.

5.5. SHA og ytre miljø

SHA og ytre miljø har i den senere tid blitt en viktig faktor i gjennomføringsfasen av prosjekter. Det absolutte hovedproblemet ved installering av peler er knyttet til støy. Og da først og fremst impulsiv støy, det vil si støy fra ramming. (NGF 2001). Ved prosjektet på Stjørdal la byggherren (Statoil) spesiell vekt på nettopp en støysvak produksjonsprosess. Det var Oslo Helseråds forskrift av 9. oktober 1974 som ble lagt til grunn ved begrensning av tillatt støynivå. I følge forskriftens Kapittel II. Særbestemmelser om støy i bygge- og anleggsvirksomhet, § 14 gjelder: "*Arbeider som forårsaker impulsiv støy (smell fra sprengning, fallhammer o.l.) må ikke foretas i de områder og til de tider som i Tabell 1 er belagt med støygrenser, uten at helserådet på forhånd har godkjent de støyreducerende forholdsregler som treffes.*" (Lovdata 1974). Henviste tabell viser til maksimalt støynivå lik 70 dB nær forretninger, kontorer og næringsbygg. Ved bruk av konvensjonelt rammeutstyr er ekvivalent støynivå for betongpeler rundt 92 – 94 dB. Med Oslo Helseråds forskrift lagt til grunn, vil man i prinsippet aldri kunne overholde gitte støykrav. Det må derfor i praksis alltid søkes om dispensasjon fra lokale myndigheter for de aktuelle periodene man skal ramme. (D.N.Pelekomité 2005).



Figur 38 Boring av injeksjonspeler nær eksisterende kontorbygg ved prosjektet Statoil – Stjørdal (Andersson 2011).

Riggene som brukes til boring av injeksjonspeler produserer normalt mindre støy enn andre anleggsmaskiner (Haugen 2012 pers. kom.). Produsert støy kommer hovedsakelig fra installeringsprosessen, og da spesielt ved boring gjennom harde lag som sprengstein og

yllingsmasser (D.N.Pelekomité 2005). På prosjektet Statoil – Stjørdal besto grunnforholdene stort sett av finkornige, rene leir-/siltmasser. I slike masser møter man lite motstand gjennom boringen, noe som resulterer i lite støy. Injeksjonspeler var derfor en egnet løsning med tanke på denne typen problematikk.

Et kjent problem, relatert til installering av peler, er vibrasjoner i grunnen og påfølgende fare for nærliggende bygg. Restriksjoner i forhold til tillatte rystelser er bestemt gjennom standarden NS 8141 – "Vibrasjoner og støt i byggverk – Veiledende verdier for sprengnings-induserte vibrasjoner". Standardens gyldighetsområde er for øvrig vibrasjoner fra alle typer grunnarbeider. Standarden beskriver undersøkelser som bør gjennomføres for å kunne forutse høyeste sannsynlige maksimumsverdi av rystelser, og derav etablering av sikkerhetstiltak for beskyttelse av nærliggende bygninger. (NS8141: 2001). Man vil ikke gå i nærmere detalj for hvordan dette finnes i henhold til standarden. For prosjektet Statoil – Stjørdal la byggherren Statoil ASA vekt på en vibrasjonssvak gjennomføringsprosess. Årsaken til dette var i all hovedsak at eksisterende kontorbygg lå nær grunnarbeidene (Figur 38). Med kravene i standarden lagt til grunn, ville det i alle tilfeller være enklere å tilfredsstille disse ved boring fremfor ramming av peler. Dette gjorde injeksjonspeler til en egnet løsning på prosjektet.

Foruten nevnte støy- og vibrasjonsbegrensninger ble det satt strenge krav til sikkerhetsavstand rundt riggene på Stjørdal. Dette på grunn av at installeringen foregikk nær eksisterende bygg, samtidig som underlaget var bløtt og mindre bæredyktig. Ved installering av betongpeler kreves normalt en sikkerhetsavstand lik 20 meter i radius rundt peleriggene. Denne avstanden sikrer mot fall av peler. Skal man sikre seg mot velt av pelerigg, settes krav om 30 – 35 meter, avhengig av høyden på tårnet. Grunnet riggenes størrelse og vekt, settes det også krav om et plant og bæredyktig underlag for sikker oppstilling. (D.N.Pelekomité 2005). Maskiner brukt til boring av injeksjonspeler er både mindre og lettere enn konvensjonelle pelerigger. Dette reduserer krav til sikkerhetsavstand, slik at installasjon kan foregå nær andre byggverk. Normal høyde på tårnene er 7 – 10 meter, derav en sikkerhetsavstand rundt 12 – 14 meter (Flåtten 2012 pers. kom.). Man får også mindre marktrykk som konsekvens av riggenes vekt, noe som reduserer krav til utbedring av underlaget.

5.6. Dokumentering av prosess

Kapittelet vil gi en kort oppsummering på hvorfor injeksjonspeler ble valgt ved dette prosjektet, tross en større kostnadsdifferanse mellom peleløsningene (kapittel 5.3).

Tilbudet for arbeidene, gjeldende dypfundamenteringen av bygget, ble i sin helhet tildelt Fundamentering AS. Firmaet hadde i likhet med andre entreprenører priset betongpeler, men også lagt inn en alternativ løsning med injeksjonspeler. Fundamentering AS vant anbuds-konkurransen med betongpeler. Årsaken til at Statoil ASA i etterkant valgte injeksjonspeler var at de ønsket en støy- og vibrasjonsfri gjennomføringsprosess. På grunn av at eksisterende kontorbygg lå nær inntil grunnarbeidene, var byggherren villig til å legge mye penger i en løsning hvor denne type problematikk kunne unngås. Statoil ASA beskrev blant annet følgende: *"Det legges særlig vekt på at arbeidet skal foregå i umiddelbar av eksisterende kontorbygg som skal være i normal drift i anleggstiden. Dette begrenser muligheten for å foreta støyende arbeid i kontorarbeidstiden. Det forutsettes at arbeidet planlegges og gjennomføres ihht Forskrift om begrensnings av støy – tillegg til helseforskriftene, Oslo kommune"*.

Dersom man hadde gått for betongpeler ville alternativet vært å forskyve arbeidstiden mellom klokken 15.00 – 23.00, fremfor normal arbeidstid 07.00 – 19.00. Følgende konsekvenser ville da vært:

- Redusert effektiv arbeidstid fra 11 til 7,5 timer, og derav forlenget tid for prosjektgjennomføring
- Forøkning i lønnskostnader på grunn av arbeid utenfor normal arbeidstid
- Støyende arbeid ville påvirket naboer ved en uregelmessig tid av døgnet
- Forverret arbeidstid for Fundamentering AS sine ansatte

Dette forklarer i korte trekk hvorfor Statoil ASA var villig til å betale kostnadsdifferansen mellom de to løsningene.

6. Diskusjon

Betongpeler er billige, har relativt god lastbæreevne, lang levetid, er egnet i permanente konstruksjoner, og de har kort installasjons- og leveringstid (NGF 2001). Disse faktorene gjør betongpeler til en meget konkurransedyktig løsning ved valg av dypfundamentsystem for ulike prosjekter. I den senere tid har miljøhensyn omkring installasjon og utførelse kommet mer og mer i fokus. Siden utbyggere ofte tenker kortsiktig økonomisk profitt, har utviklingen av nye og miljøvennlige løsninger blitt nedprioritert. En kan ikke tenke at en god og langsiktig løsning er dispensasjoner for brudd på støy- og vibrasjonskrav. Man bør derfor fremme mer miljøvennlige maskiner for ramming, eventuelt se på andre peletyper som kan erstatte betongpelene.

SHA og ytre miljø

I følge NGF (2001) er hovedproblemet med betongpeling tilknyttet impulsiv støy fra rammingen. Konsekvenser er dårlig miljø for de ansatte på byggeplassen, og begrensning i arbeidstid, da myndighetene ofte vil redusere hvor lenge utover dagen man får tillatelse til å drive med arbeidet. Foruten støy, medfører rammingen rystelser i grunnen og påfølgende fare for nærliggende bygg. Dersom rystelsene overstiger krav til maksverdier, oppgitt i NS 8141, kan dette gi varige skader. Betongpeling fører også til massefortrengning ved driving. Konsekvenser som følge av dette, kan være redusert stabilitet der pelearbeidet finner sted, mindre bæreevne, samt setninger og skader på byggverk i nærheten av anlegget. (Reese *et al.* 2006, D.N.Pelekomité 2005).

I denne rapporten har man sett på injeksjonspeler som en alternativ fundamentløsning. De største fordelene med denne typen pel er en støy- og rystelsessvak installasjonsprosess. Boring av injeksjonspeler utføres med små rigger og eksterne blandeverk, noe som gjør løsningen spesielt egnet på anlegg med begrenset plass. Sammenlignet med større pelemaskiner vil man få reduserte krav til grunnforsterkning og sikkerhetsavstand rundt riggene. Peleelementene er relativt lette, slik at man kan bruke håndmakt eller lettere transportutstyr for forflytting og plassering på borerigg. Mindre størrelse på pelene gir dessuten redusert tonnasje levert på anlegget, og frigjør plass på byggetomten.

I kapittel 5 – "prosjektgjennomgang", gis et eksempel på hvordan miljø omkring peling kan påvirke valg av fundamentsystem. På tross av en vesentlig høyere kostnad på injeksjonspelene kontra betongpelene (cirka 25 %), var byggherren villig til å legge mye penger i en miljøvennlig løsning. Den totale differansen mellom løsningene syntes å være stor, men kostnader som følge av redusert effektiv arbeidstid og forøkning i lønnskostnader ble ikke tatt i betraktning. Dersom byggherren hadde valgt betongpeler på dette prosjektet ville konsekvensen, i følge Stendahl (2012 pers.kom.), vært en kostnadsøkning på cirka 50 kr/meter installert betongpel. Prosjektet var i utgangspunktet planlagt gjennomført på 20 000 meter betongpeler, noe som ville tilsvart rundt 1 000 000 kr. I følge Andersson (2012) er det vanskelig å gi en kostnadmessig vurdering av ytre miljøpåvirkning. Dersom man hadde rettet større fokus mot synliggjøring av slike kostnader, kunne man oppnådd en økt aksept for injeksjonspeler. Foreløpig er det slik at direkte kostnader pålegges størst vekt ved valg av fundamentsystem. Løsningen må være synlig økonomisk konkurransedyktig for å få

gjennomslag, da økonomi som oftest går foran SHA og ytre miljø. Videre diskuteres hvordan injeksjonspeler stiller seg med hensyn til dette.

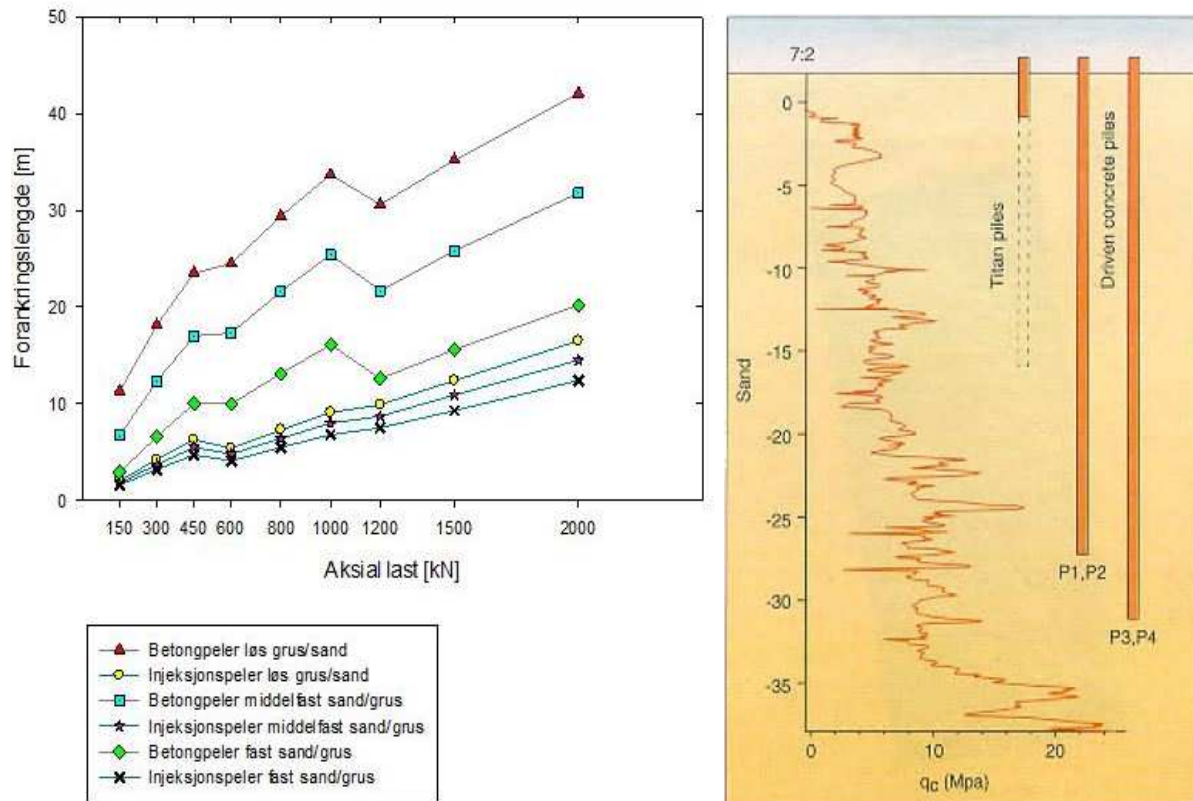
Kostnad

Innledningsvis viste man til følgende sitat fra NGF (2001): "*Der grunnen er egnet for bruk av betongpeler har det vist seg at betongpeler som oftest er den mest økonomiske pelefundamenteringsmetoden man har i Norge*". Litteraturen beskriver at betongpeler er en av de billigste løsningene på markedet. Dette gjelder særlig materialpris, men også ofte under produksjon. Bruken av betongpeler er utbredt over hele landet og er en godt kjent og utviklet metode. Dette gir utslag i flere entreprenører som utfører jobbene, noe som normalt sikrer god konkurranse, med tilhørende gunstige priser for byggherre. (D.N.Pelekomité 2005).

Ved å følge teoribeskrivelsene (kapittel 3) kan man anta at enklere logistikk for transport, behov for mindre maskiner, reduksjon av vibrasjoner og støy, samt fleksibilitet i systemet, kan gi injeksjonspeler en økonomisk fordel. Besparelser i form av logistikk for transport, kommer av størrelsen på injeksjonspelene. Dette gjelder både transport til, og innad på byggeplassen. Ramming av betongpeler krever stort og tungt utstyr, noe som setter visse krav til arbeidsplassen. Dette går hovedsakelig på størrelse av anlegget og bæreevne på grunnen man skal arbeide fra. Sammenlignet vil installering av injeksjonspeler kreve mindre sikkerhetsavstand, det vil bli redusert marktrykk (på grunn av små borerigger) og mindre tonnasje levert på byggeplass. Flexibiliteten kommer av at fundamentløsningen enklere lar seg optimalisere med hensyn til utnyttelse, da man har mange forskjellige dimensjoner å velge mellom. Betongpeler leveres i et fåtall dimensjoner, noe som ofte fører til overkapasitet på enkeltpeler. Ved å optimalisere utnyttelsen av hvert peleelement, kan man oppnå betydelige kostnadsbesparelser.

Gjennom rapporten er det gjennomført beregninger på nødvendig forankringslengde ved ulike laster og grunnforhold. Formålet med dette var å belyse under hvilke forhold injeksjonspeler kan ha fordel av redusert pelelengde som et kostnadsbesparende tiltak. Resultatene (kapittel 4.3) viser at man i jordartene løs til middels fast sand/grus kan få en betydelig differanse i lengde på pel.

I følge Eresund (1997) har man ved fundamentering i løse sand- og grusmasser registrert dobbelt så høy kapasitet per meter pel for injeksjonspeler sammenlignet med betongpeler (Figur 39). Eresunds arbeid baserer seg på et prosjekt (Vårbyn bro) i Sverige, hvor begge fundamenteringsløsningene ble testet og vurdert. Resultater presentert her (Figur 39) viser til sammenligning at injeksjonspelene har cirka tre ganger kapasiteten til betongpelene, forutsatt samme lastpåkjenninger. Det er vanskelig å gi et godt svar på denne differansen, men én faktor kan skyldes forutsetninger av homogene, ikke lagdelte masser i beregningene. Man opplever sjelden slike masser ved virkelige prosjekter, og det er grunn til å tro at dette heller ikke er tilfelle ved nevnte referanseprosjekt. En annen årsak kan skyldes studentens valg av geotekniske verdier for den aktuelle jordarten (løs sand/grus). En videre diskusjon av anvendte beregningsmodeller og grunnlagsdata presenteres i neste delkapittel.



Figur 39 Til venstre vises studentens beregninger av forankringslengde i løs sand/grus. Til høyre skisseres dimensjonert lengde for betong- og injeksjonspeler ved Vårbyn bro i Sverige ved tilsvarende like grunnforhold (Eresund 1997).

I kapittel 5 – "prosjektgjennomgang", er en kostnadsdifferanse mellom de to peleløsningene presentert. Med utgangspunkt Stjørdalsprosjektet, normaliserte kostnadsdata, samt ulike referanseprosjekter har man kommet frem til at injeksjonspeler er cirka dobbelt så dyr som betongpeler (kr/meter installert pel). Refererte kostnader baserer seg på kalkyldata, noe som medfører usikkerhet i forhold til troverdigheten til resultatene. Dette gjelder også antallet undersøkte prosjekter, som med fordel kunne vært større. Ser man bort fra dette, og følger de presenterte enhetskostnadene, kan man se at injeksjonspeler i hvert fall bør halvere forankringslengden for at de økonomisk sett skal være konkurransedyktig. Ved å sammenstille kostnadsdata med beregningsresultater, ser man at injeksjonspeler kan være et økonomisk konkurransedyktig alternativ til betongpeler i løse og middels faste sand- og grusmasser.

Beregningsmodeller og grunnlagsdata

Man velger å gi en kort vurdering av anvendte beregningsmodeller og grunnlagsdata, da det er avdekket en del svakheter ved disse. En slik vurdering er ikke av direkte relevans til problemstillingen, men antas som nødvendig. Følgende svakheter er funnet:

- Datagrunnlaget for dimensjonering av injeksjonspeler virker ikke å ta hensyn til bløte masser. Dette gjelder spesielt ved bestemmelse av grensemantelfriksjon (q_s), som er av stor betydning for den endelige forankringslengden (kapittel 4.3.4).
- Ved beregning av betongpeler tas det hensyn til økt vertikalspenning med dybde. Med dette menes at jo dypere pelen drives, dess større blir horisontalspenningen, dermed øker skjærspenningene langs peleskaftet, og kraftopptaket blir større. Dersom man hadde tatt hensyn til dette ved dimensjonering av injeksjonspeler, ville sannsynligvis den prosjekterte lengden blitt redusert.
- Beregningsmodellene tar ikke hensyn til økt bæreevne med tid (gjelder begge modellene). Ved dimensjonering av injeksjonspeler tas det heller ikke hensyn til bæreevnebidrag fra spissmotstanden.

Av overnevnte punkter gjøres det spesielt oppmerksom på svakheten tilknyttet datagrunnlag for dimensjonering av injeksjonspeler. Rapporten baserer seg på data fra kildene FHWA (2000), Aronsson *et al.* (2004), DeNeef (2004) og Ischebeck (2002). Selv om man har antatt konservative antagelser på de ulike parameterne (K-faktor og q_s), virker resultatene å bli unøyaktige. Som eksempel henvises til kapittel 5.2, hvor man dimensjonerte injeksjonspeler på Stjørdalsprosjektet. Her ble det påvist stor differanse mellom egen dimensjonering og konsulenter dimensjoneringer. Resultatene baserte seg på samme beregningsmodell, og variasjonen forklares derfor med ulik vurdering av geotekniske parametere. På bakgrunn av funn i rapporten mener studenten at det kreves mer forskning på hvordan bløte masser påvirker grensemantelfriksjonen, ved installering av injeksjonspeler.

Anvendt beregningsmodell for dimensjonering av injeksjonspeler tar ikke hensyn til økt vertikalspenning med dybden. Rapporten påviser ikke hvor stor betydning dette har for beregningsresultatene. En mener uansett at dette burde vært innført ved en eventuell korrigering av allerede eksisterende modell.

Tid

Tradisjonelt sett har ramming av betongpeler vist seg som en av de raskeste drivemetodene ved dypfundamentering. Produksjonshastigheten ligger normalt rundt 250 – 400 meter per dag. Sammenlignet ligger hastigheten for injeksjonspeler rundt 150 – 250 meter per dag. (Flåtten 2012 pers. kom., Dybvik 2012 pers. kom.). Det bør nevnes at en større reduksjon i nødvendig forankringslengde vil kunne gi redusert differanse i produksjonstid. Dette kommer av at pelene ikke må drives like dypt, og gjelder spesielt grunnforholdene løs til middelfast sand/grus.

Generelt sett er total produksjonstid er en faktor som avhenger av flere forhold. Plassforhold, tilgjengelighet på materialer, og erfaring hos mannskap er viktige momenter. Med tanke på plassforhold vil bruk av injeksjonspeler være spesielt egnet ved trange byggetomter. Dette

kommer av små og fleksible rigger for installasjon. Ramming av betongpeler krever i motsetning stort og tungt utstyr, noe som setter visse krav til anleggsplassen. Sammenlignet vil fundamentering med injeksjonspeler kreve mindre sikkerhetsavstand, det vil bli redusert marktrykk sett i forhold til større pelerigger, mindre tonnasje blir levert på byggeplass, og det vil være enklere å øke totalproduksjonen med bruk av flere rigger. Det finnes flere entreprenører som produserer betongpeler selv, noe som normalt gir kort leveringstid ut til de fleste anlegg. Injeksjonspeling er en adskillig mindre utbredt fundamenteringsmetode i Norge, noe som kan gi utslag i redusert tilgjengelighet på materialer. Dette er forhold som delvis kan oppveies ved enklere logistikk for transport, da injeksjonspeler kan transporteres i adskillig større kvantum. I følge Flåtten (2012 pers. kom.) er leveringstid normalt ikke noe problem, så lenge man har en godt gjennomført planleggingsprosess.

Gjennom arbeidet har man sett på gjennomsnittlig produksjonshastighet ved to ulike prosjekter. Funn i rapporten viser følgende resultater ved driving av henholdsvis betong- og injeksjonspeler:

- Betongpeler: 175 m/dag (Sjøholt Næringsbygg)
- Injeksjonspeler: 182 m/dag (Stjørdalsprosjektet)

I følge Stendahl (2012 pers.kom.) viser erfaringer fra byggebransjen at installering av betongpeler i de aller fleste tilfeller er raskere enn injeksjonspeler. Dette stemmer dårlig overens med funn i rapporten, som viser at injeksjonspeler er en hurtigere løsning. Man antar at avvikende resultater kommer av et begrenset antall undersøkte prosjekter. Et forslag til videre arbeid er å sammenligne produksjonshastigheten ved flere prosjekter. Dette vil gi et bedre datagrunnlag, og bidra til økt validitet på resultatene. Kortere pel gir mindre tid.

Kvalitet

Betongpeler er dårlig egnet for ramming i grove masser og veldig sensitive jordarter. Dersom man treffer store steinblokker ved driving, kan dette medføre knusing og oppsprekking av pelematerialet. Ramming i veldig bløte masser kan medføre rissdannelse, og i verste fall avrivning som følge av strekkrefter. Sammenlignet, installeres injeksjonspeler ved boring og injisering i samme prosess. Faren for oppsprekking vil ikke i like stor grad avhenge av installasjonen, men heller komme som følge av pålastingen. Oppsprekingsgraden avhenger av utformingen på stålet, og det er oppnådd ulike resultater for forskjellige typer injeksjonspeler. Ved snakk om kvalitet er det viktig at pelene overholder gitte krav i standarden. Dette for å sikre valg av riktig materiale, overholde gitte kravspesifikasjoner, samt å kunne sikre en god gjennomføringsprosess. For betongpeler gjelder standardene NS-EN 12699 og NS-EN 12794, mens injeksjonspeler dekkes under Mikropelestandarden NS-EN 14199.

Denne rapporten tar for seg to vidt forskjellige peletyper, noe som gjør det vanskelig å gi en god sammenligning av kvalitet. Man velger avslutningsvis å gi en kort oppsummering på hvordan kvaliteten kan sikres i gjennomføringsfasen (fremfor en direkte sammenligning). For betongpeler er det viktig med en forberedende kvalitetssjekk av pel, lokalisering av stein og blokker i grunnen, følge en god rammeprosedyre, samt fokusere på riktig fallhøyde og slagkraft. Ved installasjon av injeksjonspeler bør man fokusere på valg av riktig stålkvalitet,

egnet borkrone, tilpasset rotasjonshastighet og injeksjonstrykk, samt å oppnå tilstrekkelig betongoverdekning. Ved å følge disse retningslinjene, samt overholde gitte krav i standarden, skal man i utgangspunktet kunne produsere peler med god sluttkvalitet og lang levetid.

7. Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å avdekke under hvilke betingelser injeksjonspeler kan være et konkurransedyktig alternativ til friksjonsbærende betongpeler. Gjennom arbeidet har man kommet frem til at injeksjonspeler er en konkurransedyktig løsning under følgende forhold:

- Dersom det settes strenge krav til en støy og rystelsessvak gjennomføringsprosess.
- Installeringen av pelene skjer i løse til middels faste sand- og grusmasser.
- Det er påvist grove fyllmasser og blokkstein i grunnen, gjerne i kombinasjon med sand- og grusmasser.
- Fundamenteringen foregår under trange arbeidsforhold, eller på lite bæredyktig grunn.

Denne masteroppgaven svarer på problemstillingen fra en produksjonsteknisk vinkel. Med dette menes at det legges størst vekt på prosjektmålene tid, kostnad, kvalitet, SHA og ytre miljø. Gjennom rapporten har man kommet frem til at injeksjonspeler er en mer miljøvennlig løsning, både med tanke på støy og rystelser. Det vil derfor være andre faktorer som avgjør om den blir valgt. For at injeksjonspeler økonomisk sett skal kunne konkurrere med betongpeler, er det nødvendig med en betydelig reduksjon i forankringslengde. Gjennom arbeidet er det påvist en stor differanse ved løse til middels faste sand- og grusmasser. Ved å sammenstille kostnadsdata med beregningsresultater, ser man at injeksjonspeler kan være et økonomisk konkurransedyktig alternativ ved fundamentering i denne type jordart. Dette gjelder også sand- og grusmasser i kombinasjon med blokkstein og grove fyllmasser. Ved ramming gjennom slik grunn risikerer man oppsprekking og skade av betongpeler, mens injeksjonspeler enkelt penetrerer massene, samtidig som man oppnår en forbedret friksjonsforbindelse.

Erfaringer fra byggebransjen viser at installering av betongpeler i de aller fleste tilfeller er raskere enn injeksjonspeler. Rapporten presenterer normale produksjonshastigheter i størrelsesorden 150 – 250 meter per dag for injeksjonspeler, og 250 – 400 meter per dag for betongpeler. Dersom installasjonen foregår under trange arbeidsforhold, eller på lite bæredyktig grunn, kan denne differansen reduseres. Bruk av små og fleksible borerigger begrenser behovet for grunnforsterkning, samtidig som krav til sikkerhetsavstand rundt riggene reduseres. Dette vil også gjøre det enklere å øke totalproduksjonen med bruk av flere enheter. Dersom man oppnår en større reduksjon i nødvendig forankringslengde vil differansen i produksjonstid mellom de to løsningene kunne reduseres. Dette kommer av at pelene ikke må drives like dypt, og gjelder spesielt installasjon i løs til middelfast sand/grus.

8. Anbefalinger til videre arbeid

Injeksjonspeler er en relativt ny fundamenteringsmetode, sett ut i fra et historisk perspektiv. Dette gjenspeiles i en noe begrenset litteraturbeskrivelse av løsningen. Tematikk tilknyttet fokusområder for masteroppgaven er generelt lite beskrevet, og i denne sammenheng kan teori omkring tid og kostnad trekkes frem. Gjennom arbeidet med rapporten har man fått innsikt i ulike temaer som krever ytterligere vurdering. Noe av dette kan sannsynligvis finnes gjennom en mer omfattende litteraturgjennomgang, mens andre områder krever testing og analyse.

1. Denne oppgaven har blant annet fokus på produksjonshastighet. Vurderingene er basert på sammenligning av to prosjekter, hvor ett ble gjennomført med betongpeler og ett med injeksjonspeler. En anbefaling til videre arbeid er å skaffe bedre og grundigere felldata, enten ved inkludering av flere prosjekter, eller gjennomføring av produktivitetmålinger på byggeplass.
2. Kostnadene er basert på kalkyledata fra ett prosjekt, supplert med noen få referanseprosjekter, noe som medfører stor usikkerhet til resultatenes validitet. En anbefaling til videre arbeid er å få et bedre kalkylegrunnlag, ved å se på flere prosjekter.
3. Tilgjengelige teoribeskrivelser for bestemmelse av grensemantelfriksjon (q_s), virker å være noe diffust. Med dette menes at litteraturen presenterer q_s -verdier med stor differanse (som eksempel henvises til Tabell 4 som angir følgende q_s -verdier for fast sand og grus: 160 – 305 kPa). Det anbefales å skaffe et bedre erfaringsgrunnlag, inkluderende mer spesifikke verdier for ulike jordarter.
4. Man anbefaler å gjennomføre et arbeid hvor korrelasjonen mellom bløthet i massene og grensemantelfriksjonen beskrives. Årsaken til dette er at samsvaret mellom teoretiske og faktiske verdier virker å stemme dårlig over ens ved beregning av nødvendig forankringslengde (kapittel 5.2).
5. Det bør utarbeides en beregningsmodell som tar hensyn til økt horisontalspenning med dybden, ved dimensjonering av injeksjonspeler. Rapporten viser ikke hvor stor betydning dette har for beregningsresultatene, men det antas å ha en viss effekt. Dette burde vært innført ved en eventuell korrigerende av allerede eksisterende modell.
6. Analysere sammenhengen mellom ytre miljøpåvirkning og kostnader. Det foreligger lite erfaringsgrunnlag på kostnadseffekten dette har. Man burde synliggjøre hvilke besparelser byggherrer kan forvente ved å velge en støy- og rystelsessvak løsning.
7. Optimalisere utnyttelsen av en pelegruppe (fundamenteringen av hele bygget), fremfor å sammenligne enkeltpeler, slik det er gjort i denne rapporten.

Bibliografi

- AARHAUG, O. R. 1991. *Geoteknikk og fundamenteringslære 1*, NKI Forlaget.
- AARHAUG, O. R. 2008. *Geoteknikk og fundamenteringslære 2*, NKI Forlaget.
- ANDERSEN, F. 2010. *Vg2 Anleggsteknikk, Produksjon*, Byggenæringens Forlag AS.
- ANDERSSON, H. 2011. Gjennomføring av pelearbeider på prosjektet Statoil - Stjørdal.
- ANDERSSON, H. 2012 pers. kom. *RE: Direkte kommunikasjon med Helen Andersson (HWE) omkring ulike aspekter ved injeksjonspeling*. Type to FJELLHEIM, S.
- ARONSSON, S., EDSTAM, T. & SVENSSON, U. 2004. Injekterade pålar, Rapport 102. Linköping: Commision on Pile Research.
- ASCHENBROICH, H. 2005. Recommendations for installation, QA & QC and testing of injection bored hollow bar micro piles and soil nails. 13.
- AUNE, K. A. 2011. Statoil dobler på Tangen. *Stjørdals-nytt*.
- BENNETT, J. K. & HOTHEM, N. L. 2010. Hollow bar micropiles for settlement control in soft soils.
- BETONGELEMENTFORENINGEN 2009. "Statistikk 2009 under ett". Tilgjengelig etter direkte kontakt med John-Erik Reiersen.: Betongelementforeningen.
- BRUCE, D. A. 1996. Micropiles for structural support and in situ reinforcement. *Presented at the 1996 Oregon Section Geotechnical Seminar, Portland, OR, November 6, 26*.
- CADDEN, A., GÓMEZ, J., BRUCE, D. & ARMOUR, T. 2004. Micropiles: Recent Advances and Future Trends. 142, 27.
- CEN, T. C. 2005. NS-EN 14199:2005. *Utførelse av spesielle geotekniske arbeider - Mikropeler*. Standard Norge.
- CON-TECHSYSTEMS 2010. Introduction to micropile analysis, design, and construction with TITAN Micropiles. *Arizona Ram Jack Seminar*.
- CON-TECHSYSTEMS 2011. Overview of the Titan Hollow Bar System. *DFI-GSE Seminar*. Edmonton Alberta: Con-Tech Systems.
- D.N.PELEKOMITÉ 2005. *Peleveiledningen 2005*, [Oslo], Norsk geoteknisk forening.
- DAS, B. M. 2004. *Foundation Engineering 5. edition*, California State University, Sacramento, Brooks/Cole - Tomilson Learning.
- DENEEF 2004. Dimensjoneringsguide Ischebeck TITAN stag och påle.
- DENEEF 2010. Ischebeck TITAN - Boreteknikk og installasjon.
- DYBVIK, D. 2012 pers. kom. *RE: Direkte samtaler med Dagfinn Dybvik, avdelingsleder ved peleavdelingen på Fundamentering AS*. Type to FJELLHEIM, S.

- ERESUND, S. 1997. Titan piles supporting Swedish motorway bridge. *Ground engineering*.
- FAS 2007a. HMS-system for Fundamentering AS. Risikoanalyse, borearbeider (SJA). Fundamentering AS.
- FAS 2007b. HMS-system for Fundamentering AS. Risikoanalyse, pelearbeider (SJA). Fundamentering AS.
- FAS 2010. Prosjekt Statoil Stjørdal.
- FAS 2011. Installasjon av ulike peletyper.
- FHWA 2000. Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual Priority Technologies Program (PTP) Project. *Priority Technologies Program (PTP) Project*, 380.
- FLEMING, W. G. K., WELTMAN, A., RANDOLPH, M. & ELSON, K. 2009. *Piling engineering*, London, Taylor & Francis.
- FLÅTTEN, J. E. 2012 pers. kom. RE: *Direkte samtaler med Jon Endre Flåtten (FAS)*. Type to FJELLHEIM, S.
- FOREVER 2004. Synthèse des resultants et recommandations du Project national sur les micropieux (FOREVER). Presses Ponts et chaussées.
- FOUNDATION-ENGINEERING. 2011. *Concrete piles damaged by difficult driving conditions* [Online]. Available: <http://osp.mans.edu/deepfoundation/ch3.htm> [Accessed 21.04 2012].
- GUSEVIK, S. 2011. Oversikt over betongpeler i Norge 1984 - 2010. Jærbetong AS.
- HAUGEN, S. R. 2012 pers. kom. RE: *Direkte samtale med Stein Robert Haugen, Formann ansatt ved Fundamentering AS*. Type to FJELLHEIM, S.
- IRVIN, C. 2009. Self-drilled hollow bar micropiles - applications, corrosion protection and specialist measures required for load testing. *9th ISM Workshop*. London, England: Dywidag-Systems International.
- ISCHEBECK 2005. Brochure Ischebeck UK Micropiles. Ischebeck TITAN.
- ISCHEBECK, E. F. 2002. Innovative foundation techniques using titan self drilling, dynamic grouting hollow micro piles.
- ISCHEBECK, E. F. 2008. Designed free length of pre-stressed strand anchors, effective free length lapp and estimated displacements of tension, composite micropiles in comparison. 14.
- ISCHEBECK, E. F. 2010. THE DESIGN AND EXECUTION OF DRILLED AND FLUSH-GROUTED TITAN MICROPILES IS GOVERNED IN EUROPEAN UNION (EU) BY NATIONAL TECHNICAL APPROVAL Z-34.14-209 (DIBT). *International Society for Micropiles 10th International Workshop on Micropiles*. Washington, DC, USA.

- KARLSEN, J. 2011. *Geoteknikkboka*, byggesaken.
- LEE, H. 2009. *What is piling* [Online]. Pile Driving. Available: <http://pile-driving.com/what-is-piling/> [Accessed 17.05. 2012].
- LOVDATA 1974. Forskrift om begrensning av støy - tillegg til helseforskriftene, Oslo kommune, Oslo. Oslo: Oslo Helseråd.
- NGF 2001. Pelefundamentering i praksis. *Norske Sivilingeniørers forening*.
- NS8141: 2001. Vibrasjoner og støt - Måling av svingehastighet og beregning av veiledende grenseverdier for å unngå skade på byggverk. Standard Norge.
- OLSSON, N. 2009. Praktisk rapportskrivning. Institutt for byggekunst, prosjektering og forvaltning.
- PRAKASH, S. & SHARMA, H. D. 1990. *Pile Foundations in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- Prosesskode 2 - Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier. 2007. Oslo: Vegdirektoratet.
- RAMBØLL 2009. Datarapport fra grunnundersøkelse. Statoil Hydro ASA, new office building, Stjørdal. Trondheim: Divisjon Geo & miljø.
- REESE, L. C., ISENHOWER, W. M. & WANG, S.-T. 2006. *Analysis and design of shallow and deep foundations*, Hoboken, N.J, Wiley.
- ROSØ, R. 2012 pers. kom. *RE: Direkte samtale med Robert Rosø, BAS ansatt ved Fundamentering AS*. Type to FJELLHEIM, S.
- SAMTANI, N. C. & NOWATZKI, E. A. 2006. Hollow-core soil nails State-of-the-practice. 55.
- SANDVEN, R. 2005. *Soil investigations: geoteknikk, materialeegenskaper : utstyr, prosedyrer og parameterbestemmelser : kompendium*, [Trondheim], NTNU, Faggruppe for geoteknikk.
- STENDAHL, K. 2012 pers. kom. Direkte samtale med Kjetil Stendahl, daglig leder på Fundamentering AS.
- SUTHERLAND, J., HUMM, D. & CHRIMES, M. 2001. *Historic Concrete: The Background to Appraisal*.
- SWECO 2009. Dimensjonerende pelekapasitet for betongpeler for NOBS prosjektet (Statoil - Stjørdal).
- TITAN, I. 2010. Small diameter micro piles as foundation for transmission towers, mobile phone masts and wind turbines. Johannesburg.
- TOMLINSON, M. J. & WOODWARD, J. 2008. *Pile design and construction practice*, London, Taylor & Francis.

Oversikt vedlegg

Vedlegg 1

Generell informasjon om masteroppgaven.

Vedlegg 2

Tabellen viser resultater fra dimensjonering av betong- og injeksjonspeler, utført i forbindelse med masteroppgaven (kapittel 4.3.3). Verdiene som er gitt i denne tabellen danner grunnlaget for fremstillingene av Figur 27, 28, 29 og 30 i rapporten.

Figurene/grafene i vedlegg 2 viser en sammenstilling av beregnet forankringslengde for betong- og injeksjonspeler, etter ulike lastforhold og ulike grunnforhold. Verdier som ligger til grunn for fremstillingene finnes i henvisne tabell (samme vedlegg).

Vedlegg 3

Tabellen viser resultater fra følsomhetsanalysen for betong- og injeksjonspeler, utført i forbindelse med masteroppgaven (kapittel 4.3.4). Verdiene som er gitt i denne tabellen danner grunnlaget for fremstillingen av Figur 31 og 32 i rapporten.

Figurene i vedlegg 3 viser følsomhetsanalyse ved variasjon av ulike geotekniske parametere for betong- og injeksjonspeler. Fremstillingene gjengir analyser for middelfast leire og middelfast sand/grus, ved en aksial lastpåkjenning lik 800 kN. Verdier som ligger til grunn for grafene finnes i henvisne tabell (samme vedlegg).

Vedlegg 4

Tabellen viser resultater fra dimensjoneringen av injeksjonspelene ved prosjektet Statoil – Stjørdal. Resultatene som er gjengitt i denne tabellen danner grunnlaget for fremstillingen av Figur 36 i rapporten (kapittel 5.2.2).

Figurene i vedlegg 4 illustrerer nødvendig forankringslengde for injeksjonspelene ved prosjektet, med lastpåkjenninger lik 700 og 1000 kN. Grunnforholdene er som beskrevet i rapporten (kapittel 5.2.1). Verdier som ligger til grunn for grafene finnes i henvisne tabell.

Vedlegg 5

Tabellen viser resultater fra dimensjoneringen av injeksjonspelene, forutsatt nye grunnforhold (kapittel 5.3.2) ved prosjektet Statoil – Stjørdal. Resultatene som er gjengitt i denne tabellen danner grunnlaget for de nye pelelengdene gjengitt i kapittel 5.3.2.

MASTEROPPGAVE

(TBA4935 Anleggs- og produksjonsteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2012

for

Stefan Halvardsson Fjellheim

Injeksjonspeler som et alternativ til betongpeler

BAKGRUNN

Problemstillingen for masteroppgaven er definert gjennom et samarbeid med entreprenørfirmaet Fundamentering AS. Bakgrunnen for valg av tema er at firmaet ønsker vurdering av en mer skånsom løsning til betongpeler. Ettersom miljøhensyn omkring utførelse og installasjon av peler virker å bli mer og mer viktig ute i markedet, vil man vurdere konkurransedyktigheten til injeksjonspeler som et alternativ.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

For å besvare problemstillingen har man valgt å ta utgangspunkt i følgende tre forskningsmetoder:

- Litteraturstudie
- Beregning av forankringslengde
- Prosjektgjennomgang

Litteraturstudien danner grunnlaget for teoridelen i rapporten, hvor bæreprinsipp, installasjonsmetode, utstyr, tid, kostnad, kvalitet, SHA og ytre miljø for de to peletypene beskrives. Gjennom metoden; Beregning av forankringslengde, dimensjoneres de to peletypene ved ulike last- og grunnforhold. Hensikten er å avdekke under hvilke forhold injeksjonspeler kan dra fordel av redusert forankringslengde ved sammenligning mot betongpeler. Prosjektgjennomgangen tar utgangspunkt i et reelt prosjekt hvor begge peletypene ble vurdert som fundamentløsning. Formålet med dette kapittelet er å vurdere prosjektmålene kostnad, tid, SHA og ytre miljø ved prosjektet, og sammenstille fremstilte resultater med teoribeskrivelsene.

Målsetting og hensikt

Hensikten med oppgaven er å avdekke under hvilke forhold injeksjonspeler kan være et konkurransedyktig alternativ til betongpeler.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

Under hvilke betingelser er injeksjonspeler et konkurransedyktig alternativ til rammede betongpeler i løsmasser?

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- forord
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- innholdsfortegnelse inklusive oversikt over figurer, tabeller og vedlegg
- om nødvendig en liste med beskrivelse av viktige betegnelser og forkortelser benyttet
- hovedteksten
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger.
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.
- besvarelsen skal ha komplett paginering (sidenummerering).

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel. Arbeidet leveres da også med rapportforside og tittelside og om nødvendig med vedlegg som dokumenterer arbeid utført i prosessen med utforming av artikkelen.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport». Finnes på <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om

det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.

Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursionsjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Innleveringsfrist:

Arbeidet med oppgaven starter 16. januar 2012

.

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 11. juni 2012 kl 1500.

Faglærer ved instituttet: Amund Bruland

Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Jon Endre Flåtten

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 07.06.2012

Underskrift

Faglærer

Faktorer betongpeler	
f _a -faktor	0,75
γ _{tot}	1,6
ruhet, r	0,9
γ _m	1

Betongpeler

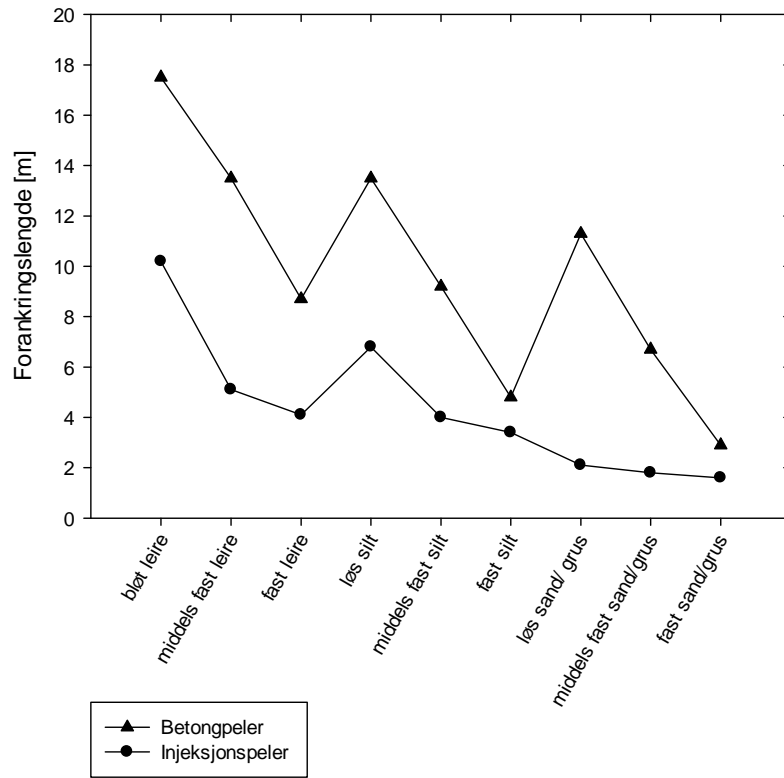
	Lengder på betongpelene ved ulike laster og grunnforhold														
	P 230NA					P 270NA					P 345MA				
	Små laster					Midlere laster					Høye laster				
Grunnforhold	tan φ	γ' (midl.) [kN/m ³]	S _A	β	N _q	a	150 kN	300 kN	450 kN	600 kN	800 kN	1000 kN	1200 kN	1500 kN	2000 kN
bløt leire	0,4	7	0,25	0	7,1	10	17,5	26,5	33,4	35,5	41,8	47,2	45	50,9	59,6
middels fast leire	0,475	9	0,272	-15	9	15	13,5	21	26,8	28,5	33,7	38,4	36,2	41,2	48,5
fast leire	0,55	11	0,283	-25	17	25	8,7	15,2	20,2	21,3	25,9	29,9	27,3	31,7	38,1
løst lagret silt	0,55	9	0,283	-5	12,5	7,5	13,5	20,8	26,5	28	33,1	37,7	35,3	40,2	47,3
middels fast silt	0,65	10	0,3	-12,5	24	12,5	9,2	15,7	20,8	21,7	26,3	30,4	27,4	31,8	38,3
fast lagret silt	0,75	11	0,305	-15	50	15	4,8	9,9	14,2	14,4	18,4	21,9	18,3	22,1	27,7
løst lagret sand/grus	0,65	9	0,3	0	25	2,5	11,3	18,1	23,5	24,5	29,4	33,7	30,6	35,2	42,1
middels fast sand/grus	0,75	10	0,305	-10	46	7,5	6,7	12,3	17	17,3	21,6	25,4	21,7	25,8	31,8
fast lagret sand/grus	0,825	11	0,307	-30	90	10	2,9	6,6	10	10	13,1	16,1	12,6	15,6	20,2

Faktorer injeksjonspeler	
f _a -faktor	0,9
γ _{tot}	1,6
Borkrone 52/26	130 mm
Borkrone 73/35	200 mm
Borkrone 103/51	220 mm

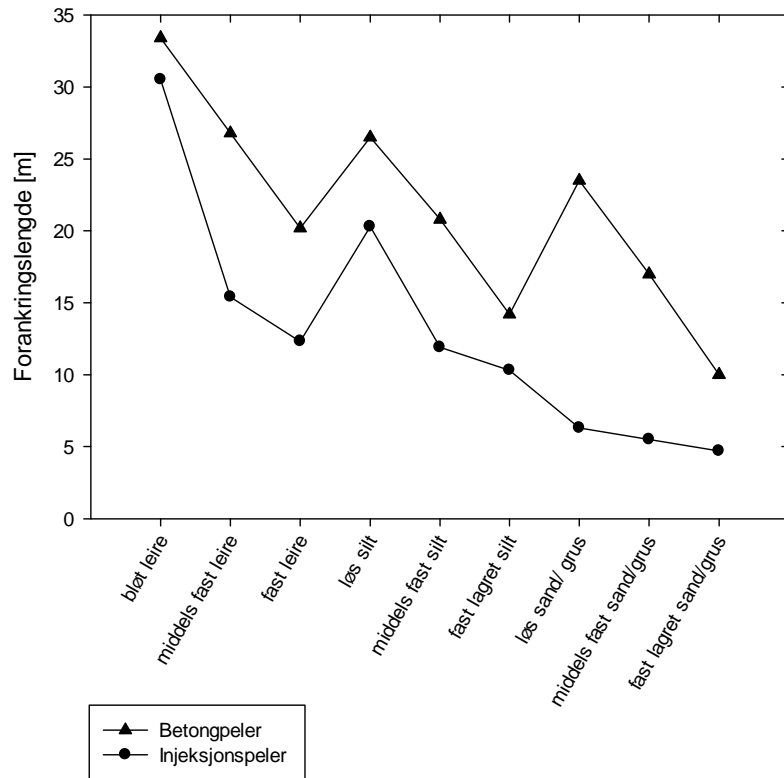
Injeksjonspeler

	Lengder på injeksjonspelene ved ulike laster og grunnforhold													
	52/26					73/35					103/51			
	Små laster					Midlere laster					Høye laster			
Grunnforhold	K ₁	K ₂	q _s maks	q _s min	150 kN	300 kN	450 kN	600 kN	800 kN	1000 kN	1200 kN	1500 kN	2000 kN	
bløt leire	1	1,2	32,5	72,5	10,2	20,4	30,5	26,5	35,3	44,1	48,1	60,1	80,2	
middels fast leire	1	1,2	72,5	135	5,1	10,3	15,4	13,4	17,9	22,3	24,3	30,4	40,6	
fast leire	1	1,2	90	170	4,1	8,2	12,3	10,7	14,2	17,8	19,4	24,3	32,4	
løst lagret silt	1,4	1,5	40	80	6,8	13,5	20,3	17,6	23,4	29,3	31,9	39,9	53,2	
middels fast silt	1,3	1,4	80	140	4	7,9	11,9	10,3	13,7	17,1	18,7	23,4	31,2	
fast lagret silt	1,2	1,3	95	180	3,4	6,8	10,3	8,9	11,9	14,8	16,2	20,2	26,9	
løst lagret sand/grus	2	2,4	85	170	2,1	4,2	6,3	5,4	7,3	9,1	9,9	12,4	16,5	
middels fast sand/grus	1,7	1,9	120	235	1,8	3,7	5,5	4,8	6,4	8	8,7	10,9	14,5	
fast lagret sand/grus	1,5	1,7	160	305	1,6	3,2	4,7	4,1	5,5	6,8	7,5	9,3	12,4	

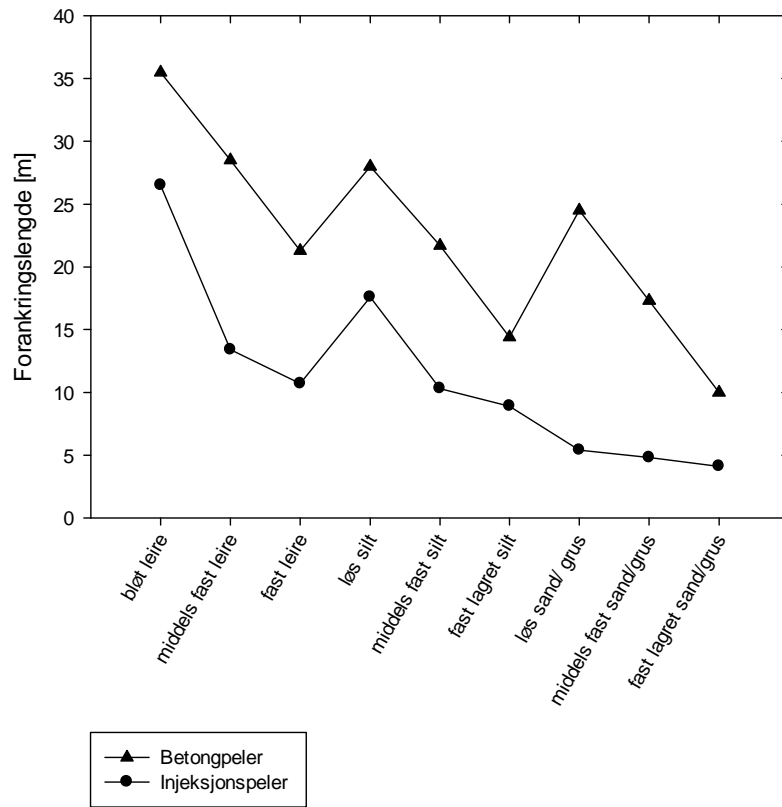
150 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



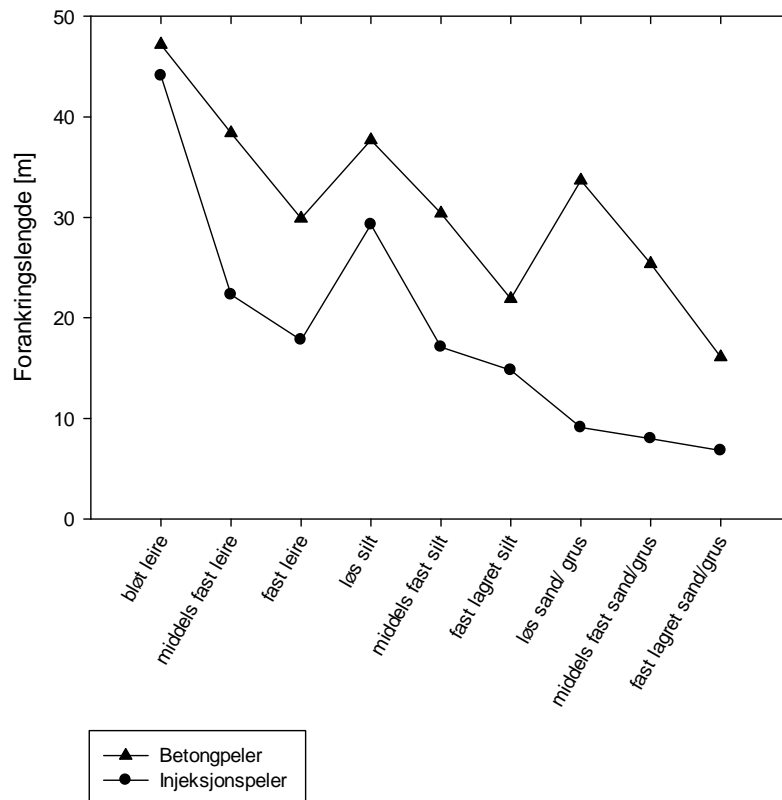
450 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



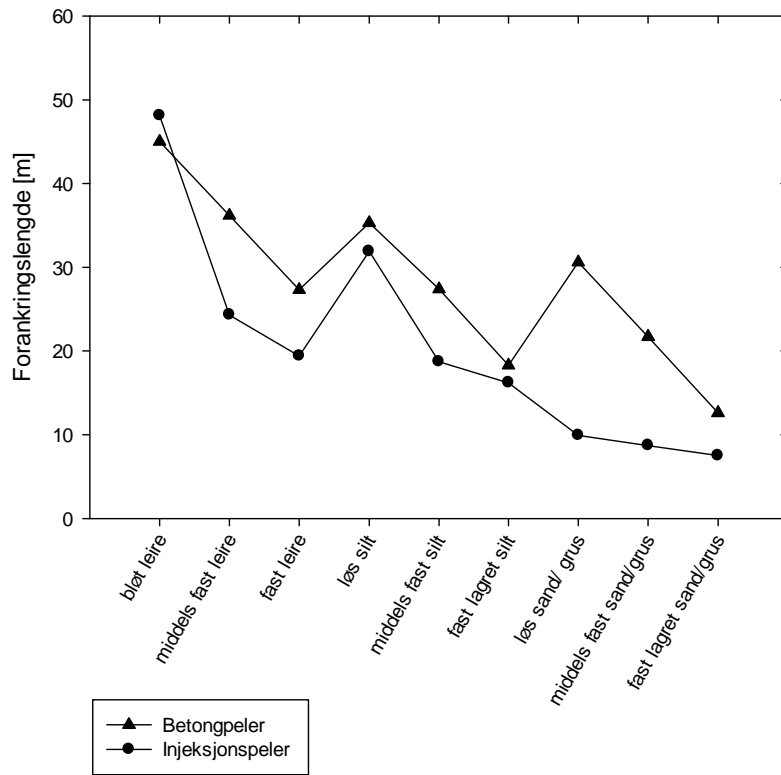
600 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



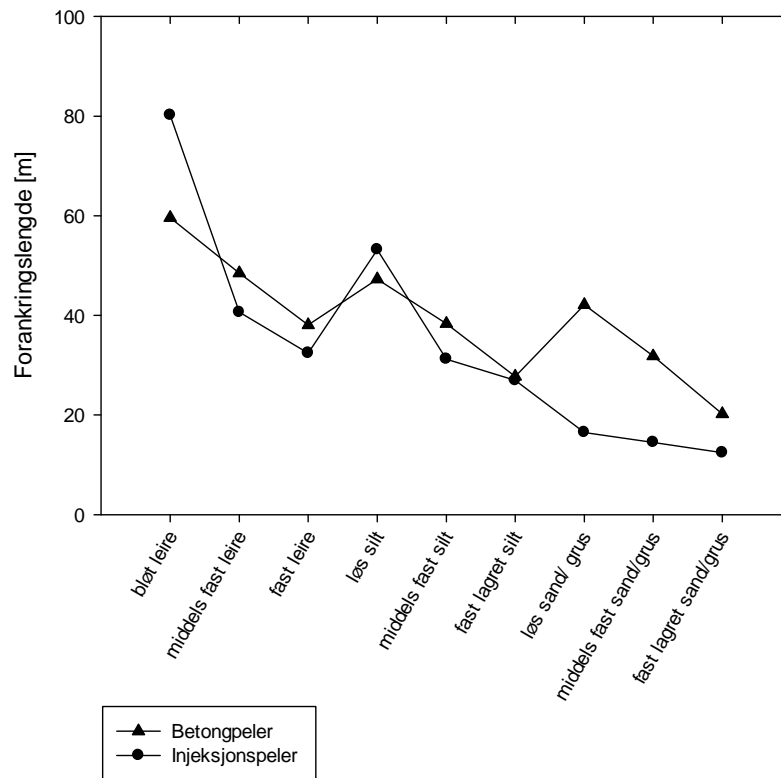
1000 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



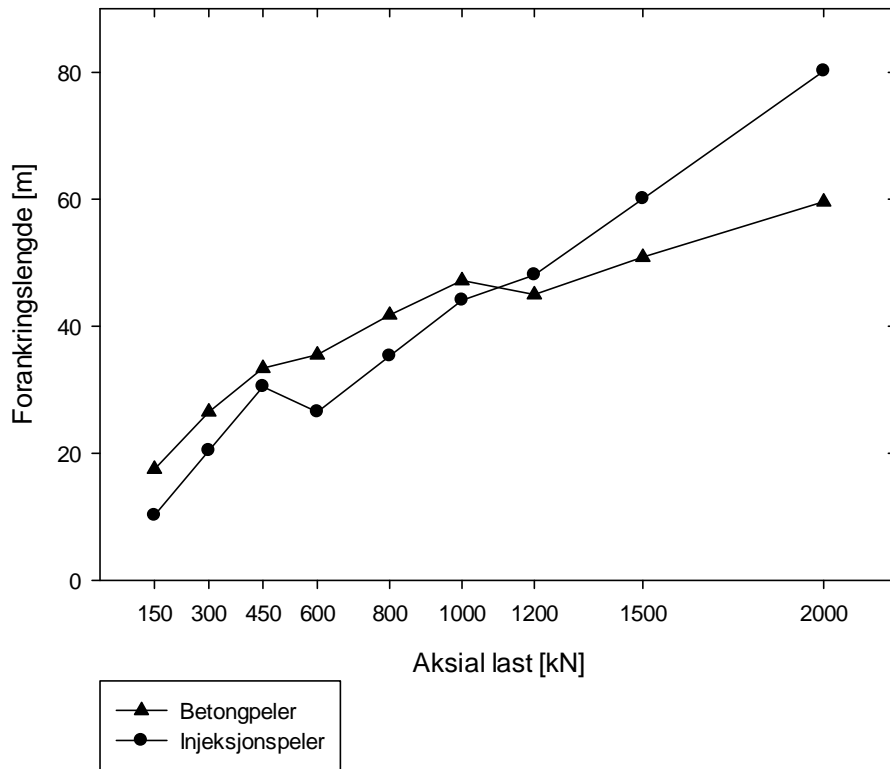
1200 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



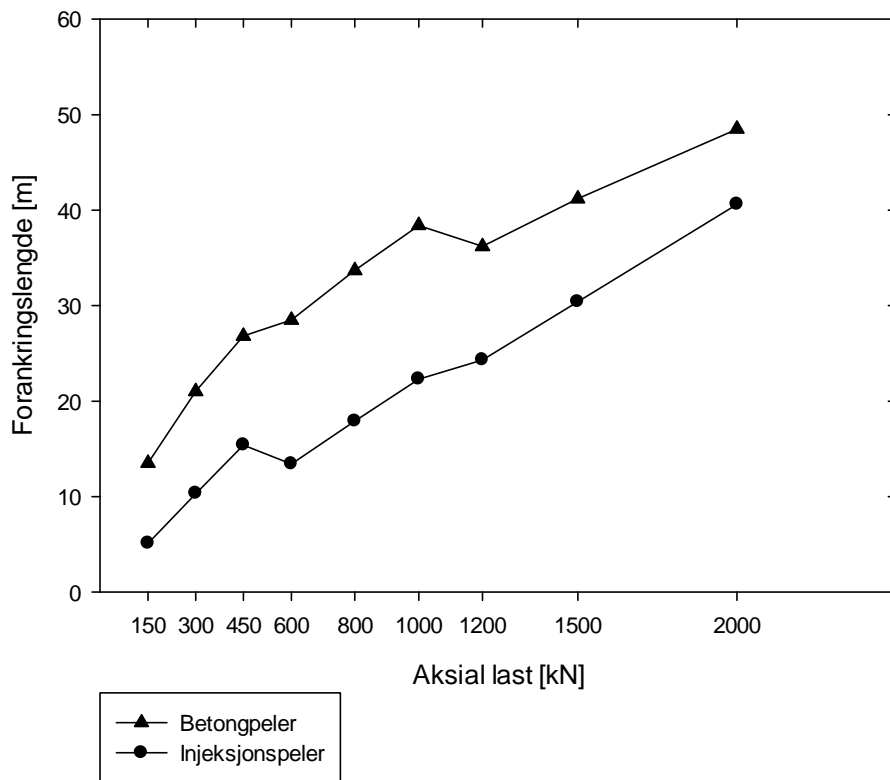
2000 kN last - forankringslengde for ulike grunnforhold



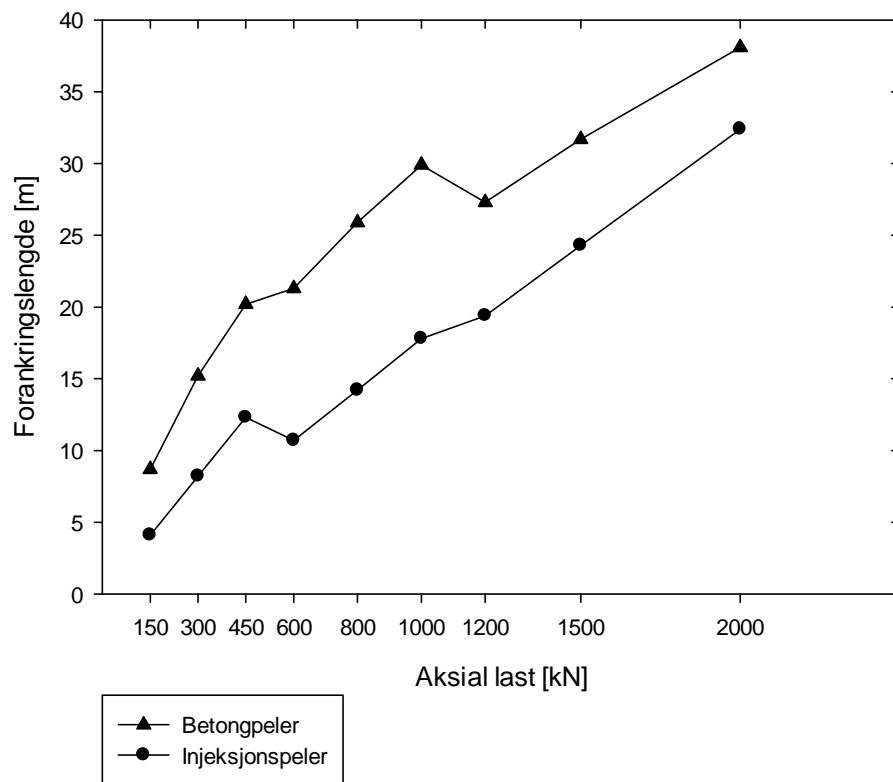
Bløt leire - forankringslengde for ulike lastforhold



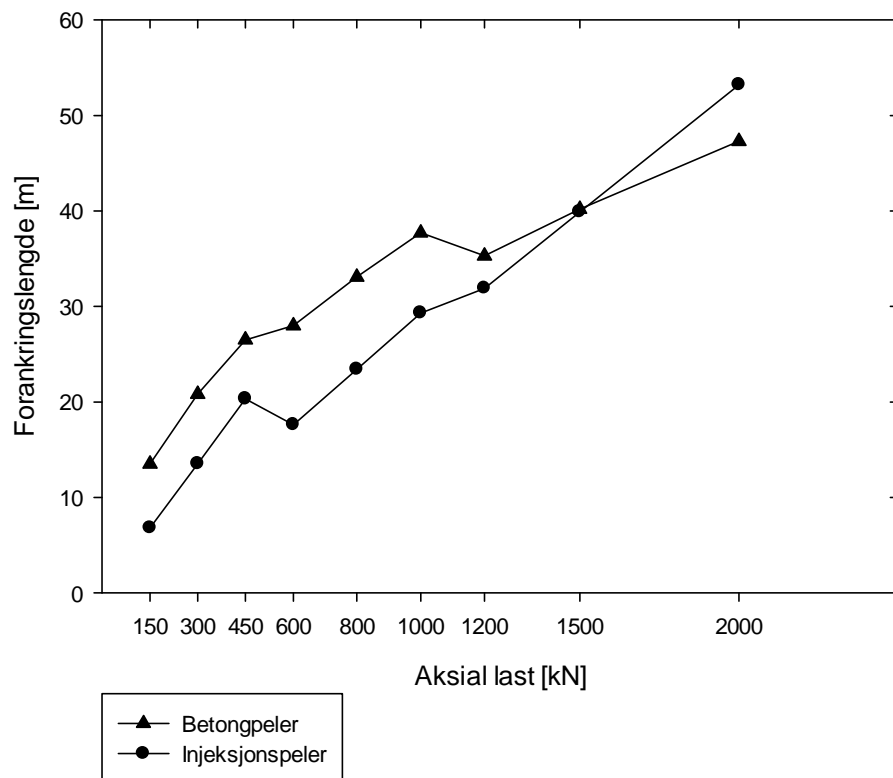
Middelfast leire - forankringslengde for ulike laster



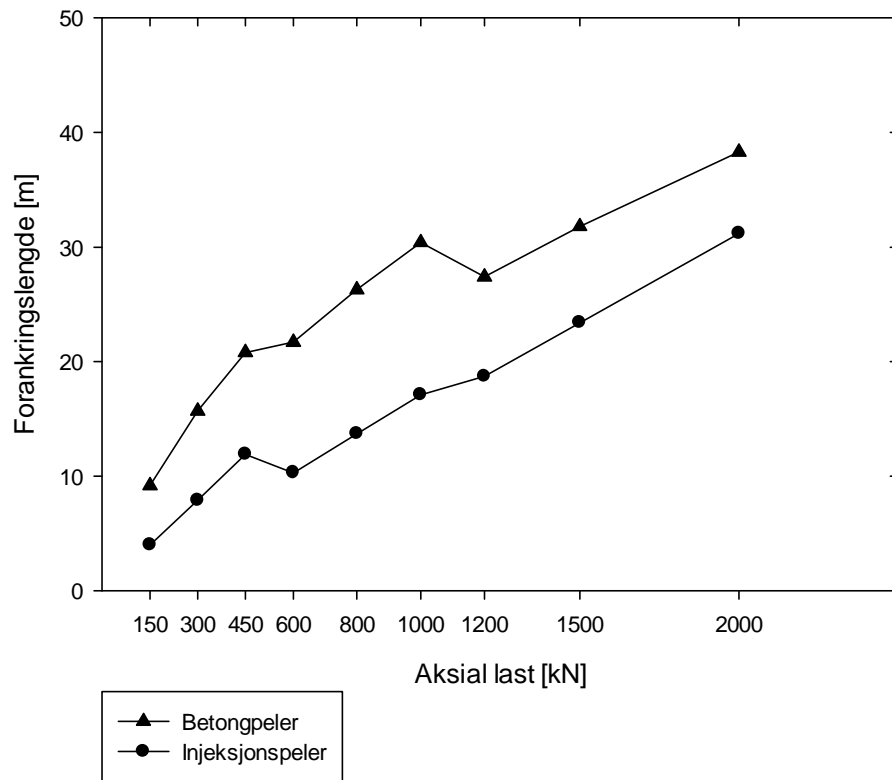
Fast leire - forankringslengde for ulike laster



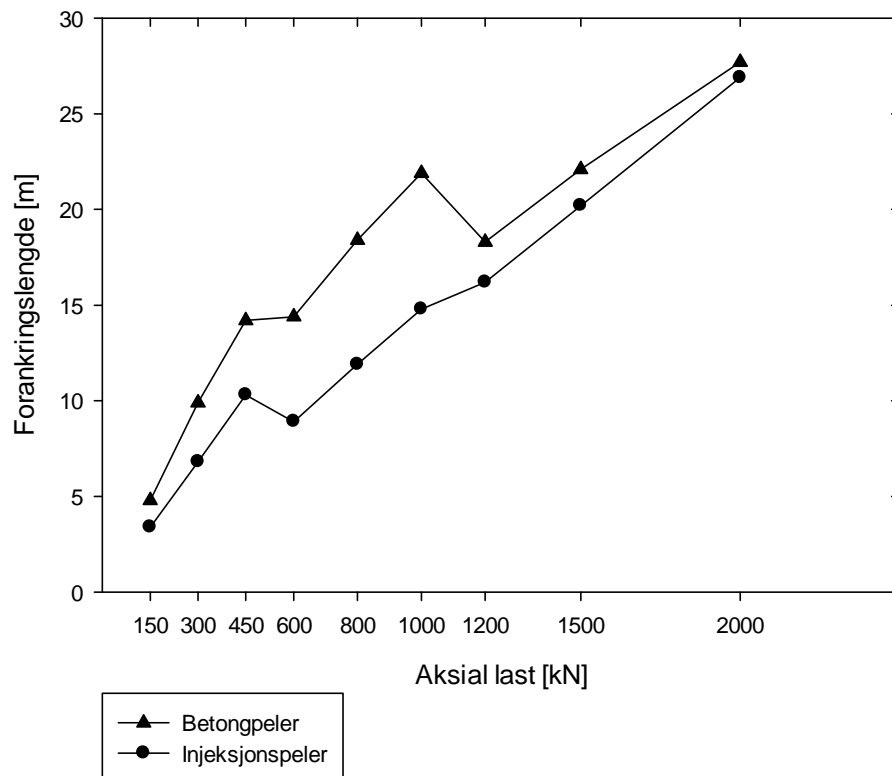
Løst lagret silt - forankringslengde for ulike laster



Middelfast silt - forankringslengde for ulike laster



Fast lagret silt - forankringslengde for ulike laster



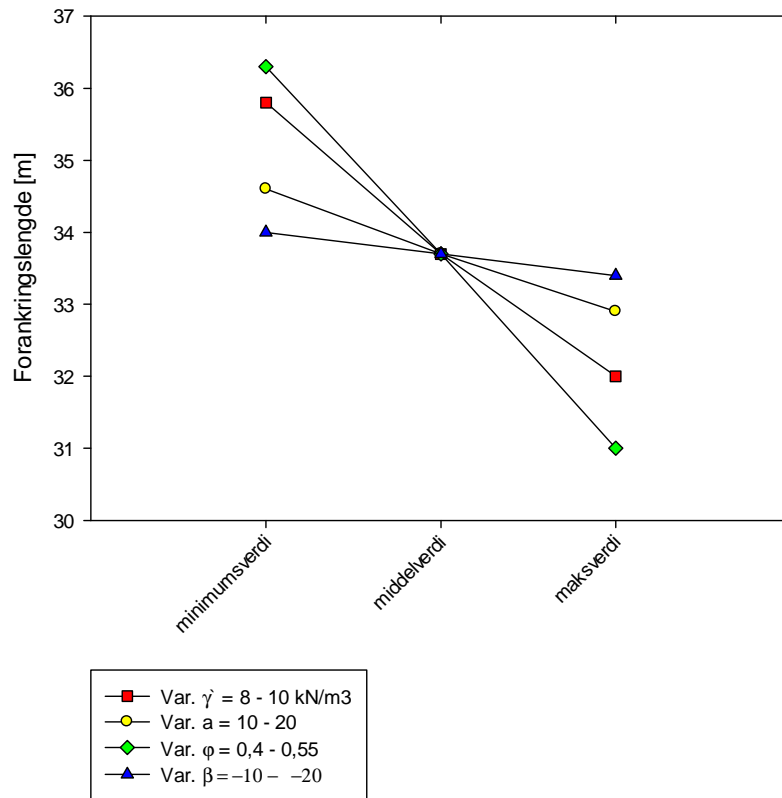
Parameteranalyse betongpeler

Lengder ved følsomhetsanalyse											
800 kN											
	\dot{V} (midl.) [kN/m ³]	attraksjon, a	$\tan \varphi$	β	$S_A(\varphi)$	$N_q(\varphi)$	$N_q(\beta)$	Lengde, var γ	Lengde, var a	Lengde, var φ	Lengde, var β
	8	10	0,4	-10	0,25	6,2	8,4	35,8	34,6	36,3	34,0
middelfast leire	9	15	0,475	-15	0,272	9	9	33,7	33,7	33,7	33,7
	10	20	0,55	-20	0,283	15	10	32,0	32,9	31,0	33,4
	9	10	0,6	-10	0,29	18	23	27,9	26,7	28,4	26,6
middelfast silt	10	12,5	0,65	-12,5	0,3	24	24	26,3	26,3	26,3	26,3
	11	15	0,7	-15	0,303	37	26	24,8	25,9	22,9	25,7
	9	5	0,7	-5	0,303	35	40	23,2	22,0	24,1	22,9
middelfast sand	10	7,5	0,75	-10	0,305	46	46	21,6	21,6	21,6	21,6
	11	10	0,8	-15	0,306	60	51	20,2	21,2	18,9	20,6

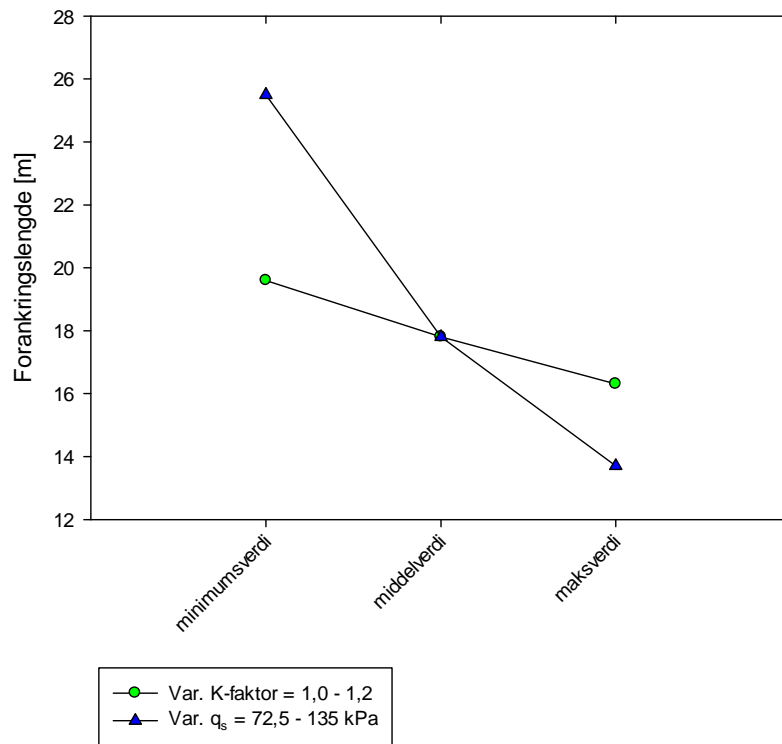
Parameteranalyse injeksjonspeler

Lengder ved følsomhetsanalyse		
800 kN		
	q_s	Lengde, var q_s
K-faktor		
1,0	72,5	19,6
1,1	104	17,8
1,2	135	16,3
1,3	80	14,2
1,4	110	13,2
1,5	140	12,3
1,7	120	6,8
1,8	177,5	6,4
1,9	235	6,0

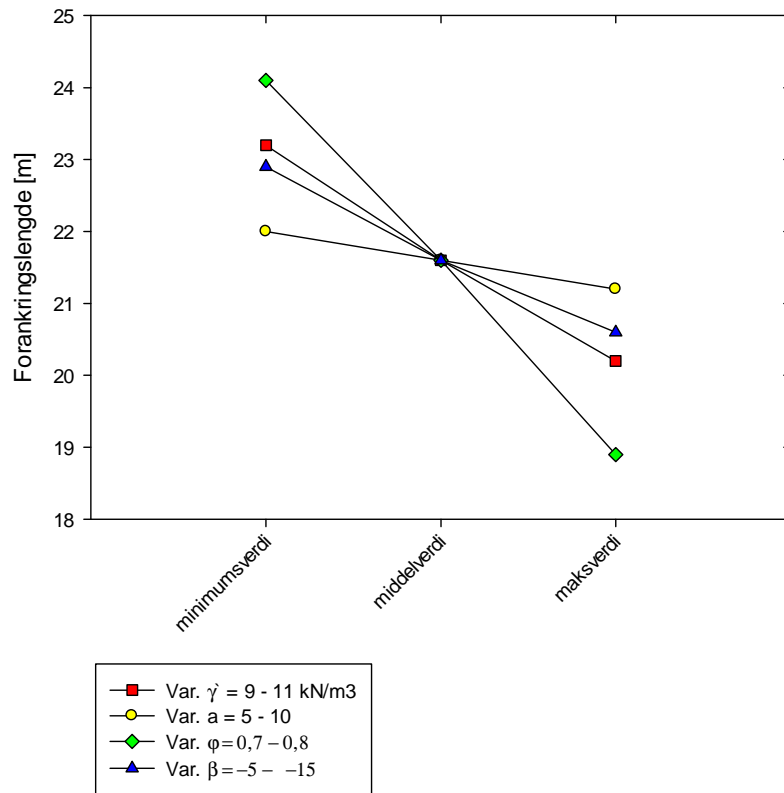
Følsomhetsanalyse for betongpeler i middelfast leire



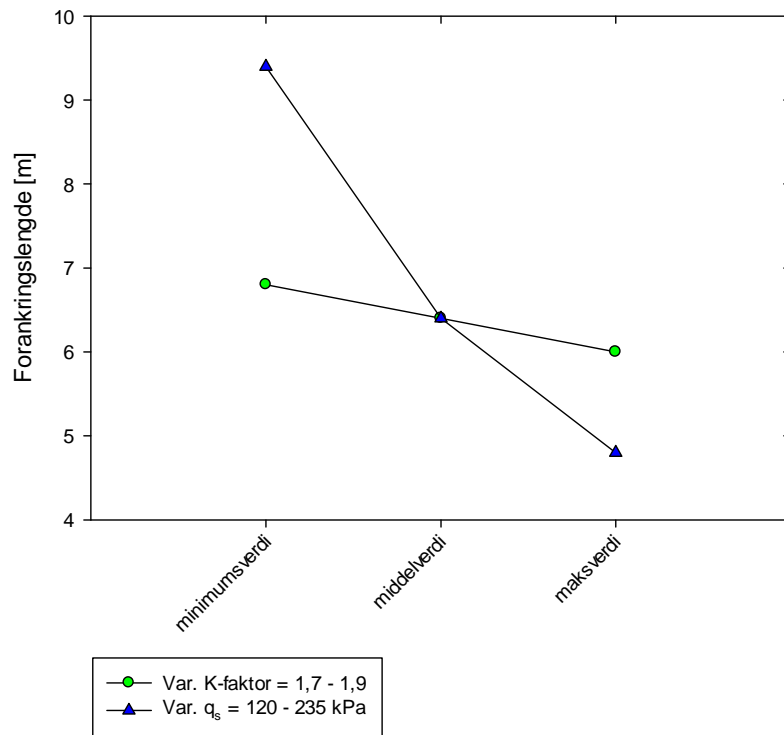
Følsomhetsanalyse for injeksjonspeler i middelfast leire



Følsomhetsanalyse for betongpeler i middelfast sand/grus



Følsomhetsanalyse for injeksjonspeler i middelfast sand/grus



Inndata

Middels fast sand	
Lengde sand	2,5 m
K ₁ sand	1,7
K ₂ sand	1,9
q _s min	150 kPa
q _s maks	200 kPa
D _{min}	340 mm
D _{maks}	380 mm
μ _k middel	141,3 kN/m
μ _d middel	108,7 kN/m
Leire og silt, løs til veldig løs	
Lengde	L _{tot} -L _{sand} -L _{etterpr.}
K ₁ silt/leire	1,2
K ₂ silt/leire	1,35
C _{uk} /S _u	47 kPa
q _s min	60 kPa
q _s maks	105 kPa
D _{min}	240 mm
D _{maks}	260 mm
μ _k middel	64,7 kN/m
μ _d middel	49,8 kN/m
Etterpressing	
Lengde	3 m
K ₁ etterpressing	1,4
K ₂ etterpressing	1,6
q _s min	72 kPa
q _s maks	126 kPa
D _{min}	280 mm
D _{maks}	320 mm
μ _k middel	93,3 kN/m
μ _d middel	71,8 kN/m

700 kN - dimensjon: 73/53 til 73/56		
Kote	Gjenst. last [kN]	Dimensjon
0	700	73/53
-1	700	73/53
-2	700	73/53
-3	591,3	73/53
-4	482,6	73/56
-5	403,35	73/56
-6	353,55	73/56
-7	303,75	73/56
-8	253,95	73/56
-9	204,15	73/56
-10	132,35	73/56
-11	60,55	73/56
-12	-11,25	73/56
-13		
-14		
-15		
-16		
-17		
-18		
-19		
-20		

Total lengde 700 kN		
hva	lastoptak [kN]	lengde [m]
L _{sand} =	271,75	2,5
L _{leire/silt} =	212,85	4,3
L _{etterpr.}	215,4	3
L _{føringsrør} =	0	1,3
L _{forankr.plate} =	0	0,7
L _{tot} =	700	11,8
L _{forankr.i.}	700	9,8

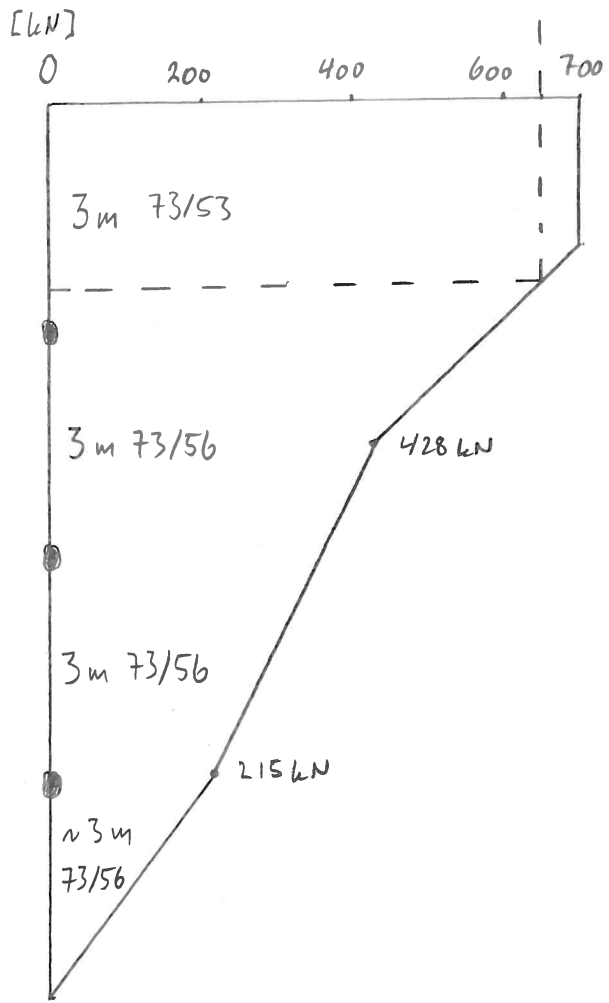
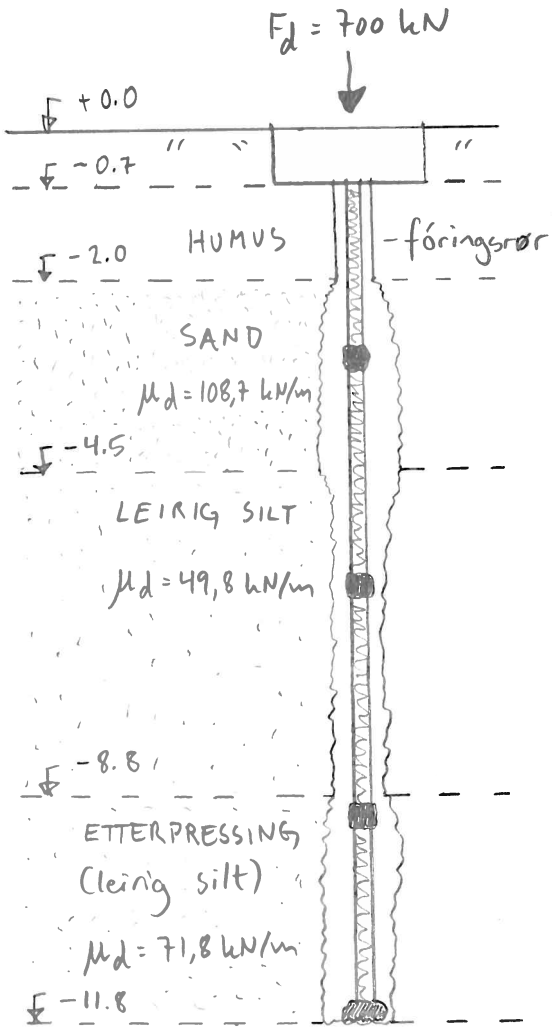
800 kN - dimensjon: 73/45 til 73/56		
Kote	Gjenst. last [kN]	Dimensjon
0	800	73/45
-1	800	73/45
-2	800	73/45
-3	691,3	73/45
-4	582,6	73/45
-5	503,35	73/56
-6	453,55	73/56
-7	403,75	73/56
-8	353,95	73/56
-9	304,15	73/56
-10	254,35	73/56
-11	204,55	73/56
-12	132,75	73/56
-13	60,95	73/56
-14	-10,85	73/56
-15		
-16		
-17		
-18		
-19		
-20		

Total lengde 800 kN		
hva	lastoptak [kN]	lengde [m]
L _{sand} =	271,75	2,5
L _{leire/silt} =	312,85	6,3
L _{etterpr.}	215,4	3
L _{føringsrør} =	0	1,3
L _{forankr.plate} =	0	0,7
L _{tot} =	800	13,8
L _{forankr.i.}	800	11,8

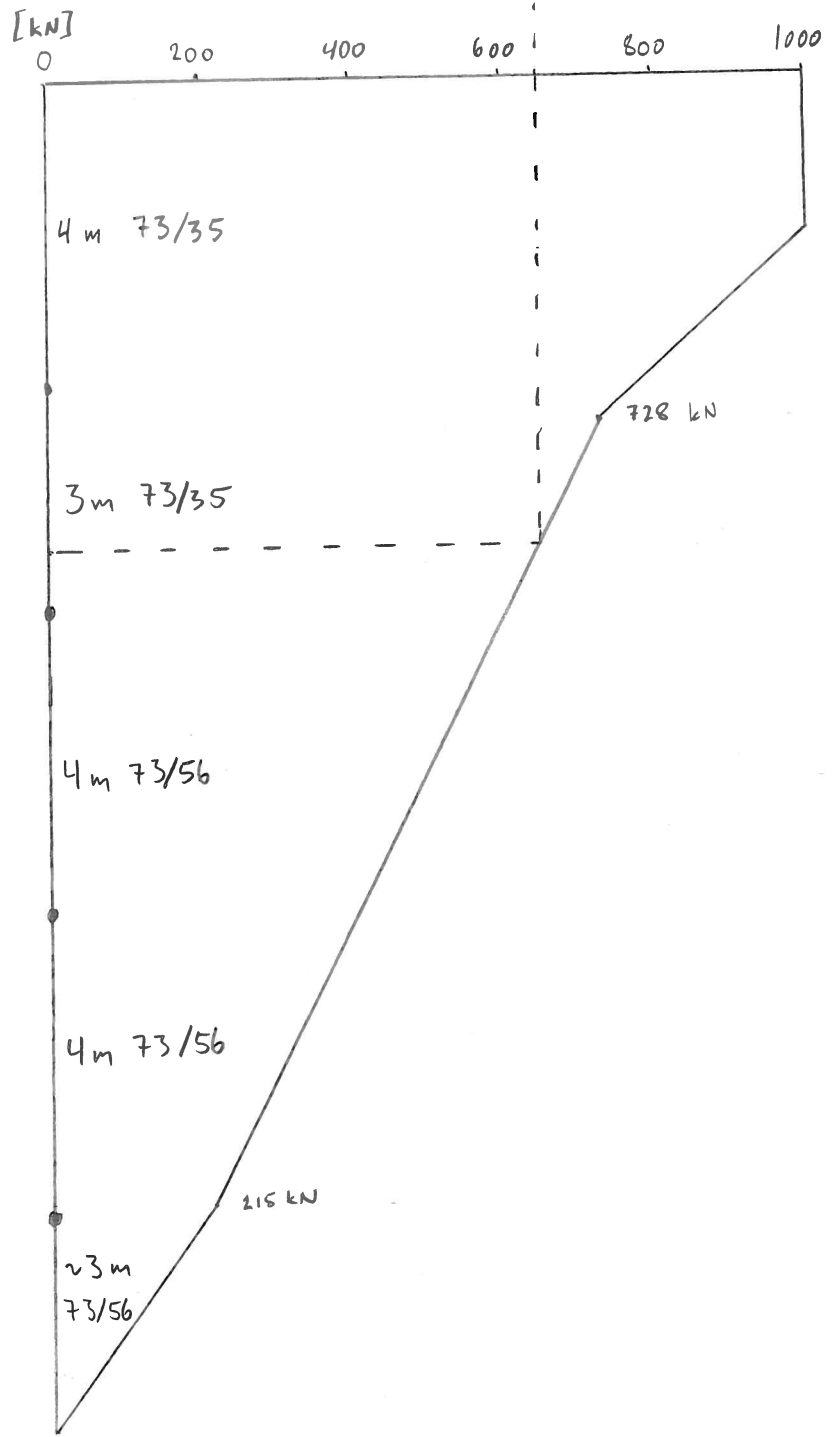
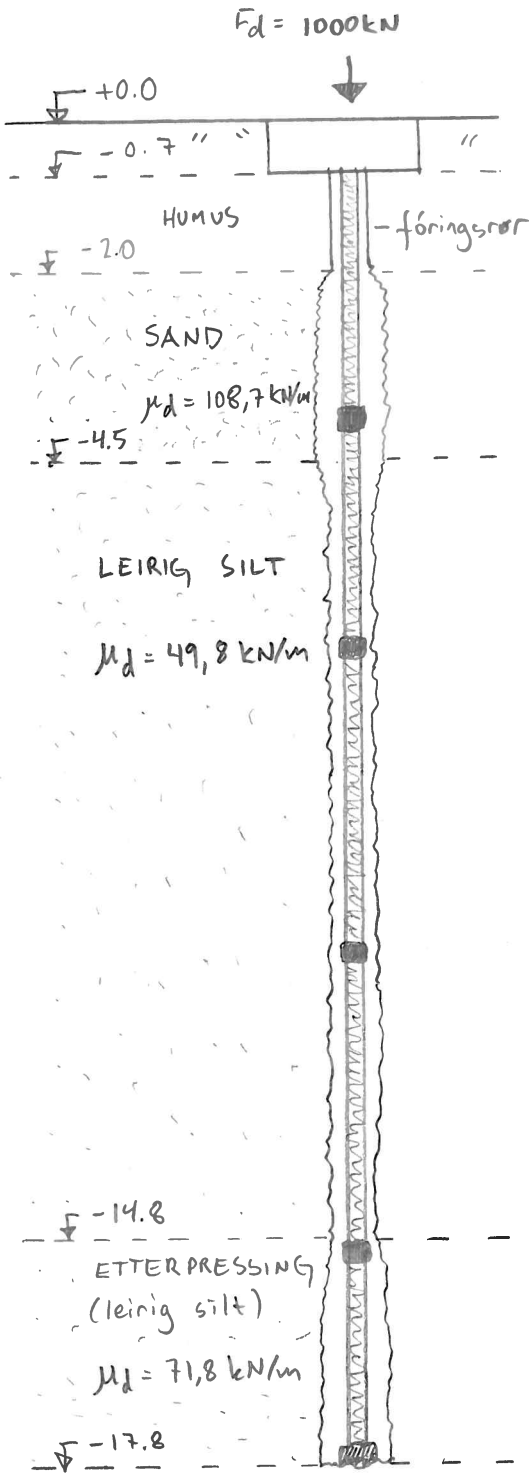
1000 kN - dimensjon: 73/35 til 73/56		
Kote	Gjenst. last [kN]	Dimensjon
0	1000	73/35
-1	1000	73/35
-2	1000	73/35
-3	891,3	73/35
-4	782,6	73/35
-5	703,35	73/35
-6	653,55	73/35
-7	603,75	73/35
-8	553,95	73/56
-9	504,15	73/56
-10	454,35	73/56
-11	404,55	73/56
-12	354,75	73/56
-13	304,95	73/56
-14	255,15	73/56
-15	205,35	73/56
-16	133,55	73/56
-17	61,75	73/56
-18	-10,05	73/56
-19		
-20		

Total lengde 1000 kN		
hva	lastoptak [kN]	lengde [m]
L _{sand} =	271,75	2,5
L _{leire/silt} =	512,85	10,3
L _{etterpr.}	215,4	3
L _{føringsrør} =	0	1,3
L _{forankr.plate} =	0	0,7
L _{tot} =	1000	17,8
L _{forankr.i.}	1000	15,8

$$N_i = 650 \text{ kN (73/56)}$$



$$N_i = 650 \text{ kN (73/56)}$$



Vedlegg 5

	Forutsetninger
fa-faktor	0,75
ytot	1,3
ruhet r	0,9
ym	1

Betongpeler

Lengder betongpeler [m]
P 230MA
Laster

Grunnforhold	tan φ	γ' (midl.) [kN/m ³]	SA	β	Nq	a	700 kN	800 kN	1000 kN
løst lagret sand/grus	0,7	16,5	0,305	-10	35	5	12,9	14,2	16,6

	Forutsetninger
fa-faktor	0,9
ytot	1,3
Borkronediameter	200 mm
	leirborkrone

Injeksjonspeler

Lengder injeksjonspeler [m]
73/35
Laster

Grunnforhold	K1	K2	qs maks	qs min	700 kN	800 kN	1000 kN
løst lagret sand/grus	2,0	2,2	85	170	5,4	6,2	7,7