

Forslag til krav til dokumentation af stålskruepæle-projekter

Ibsen, Lars Bo; Sørensen, John Dalsgaard; Andreasen, Daniel Kristian

Publication date:
2025

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Ibsen, L. B., Sørensen, J. D., & Andreasen, D. K. (2025). *Forslag til krav til dokumentation af stålskruepæle-projekter*. (1 udg.) Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILT), Aalborg Universitet. DCE Technical Memorandum Nr. 328

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Forslag til krav til dokumentation af stålskruepæle-projekter.

**Professor Lars Bo Ibsen
Professor John Dalsgaard Sørensen
Daniel K. Andreasen**

Build
Aalborg Universitet
Geoteknik

DCE Technical Memorandum No. 328

Forslag til krav til dokumentation af stålskruepæle-projekter.

Professor Lars Bo Ibsen
Professor John Dalsgaard Sørensen
Daniel K. Andreasen

30 Juni 2025

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmaterial udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad. Siden 2015 har Aalborg Universitetsforlag udgivet universitets ph.d.-afhandlinger i serier under det respektive fakultet. E-bogen hostes i AAU Ph.D.-portal, hvor man også finder reference til alle tidligere udgivet ph.d.-afhandlinger ved AAU.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2025 af
Build
Aalborg Universitet
Thomas Manns Vej 23
DK-9220 Aalborg Ø, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-7278
DCE Technical Memorandum No. 328

Contents

1	Formål	2
2	Normative referencer	3
2.1	Termer og definitioner	4
2.2	Særligt for skruepæle	4
3	Geotekniske undersøgelser	5
3.1	Generelt.....	5
4	Materialer og egenskaber	6
4.1	Generelt.....	6
4.2	Præfabrikerede skruepæle.....	6
4.3	Korrosionsbeskyttelse	6
5	Designmæssige overvejelser	8
5.1	Generelt.....	8
5.2	Strukturel bæreevne	8
5.3	Installation	9
5.4	Geoteknisk bæreevne	11
5.5	Moment til bæreevne	12
6	Udførelse	13
6.1	Generelt.....	13
6.2	Konstruktionstolerancer.....	13
6.3	Udstyr og metode	14
6.4	Instrumenteringskrav	15
7	Tilsyn, overvågning og test	15
7.1	Tilsyn	15
7.2	Verifikation af placering og hældning	16
7.3	Krav til test.....	16
7.4	Belastningsforsøg.....	16
8	Dokumentation	18
8.1	Dokumentations- og kontrolplan for skruepæle projekter	18
8.2	A-serie – Designgrundlag.....	18
8.3	B-serie – Kontrolplan og udførelsesdokumentation	18
8.4	Verifikation af placering	20
9	Bibliography.....	21

1 Formål

I takt med, at byggebranchen har fået øget fokus på bæredygtighed og CO₂-reduktion – især ved opførelsen af enfamiliehuse – er interessen for skruepæle som alternativ til konventionelle funderingsmetoder steget markant, og vi ser ind i en anvendelse også for modulbyggeri i flere etager.

Trods deres potentiale, og selv om metoden har været i anvendelse gennem lang tid, har skruepæle haft vanskeligt ved at opnå bred anvendelse i dansk byggeri, hovedsageligt grundet mangel på veldokumenteret viden om deres bæreevne. Da installationsprocessen i høj grad bestemmer en skruepæls bæreevne, er det afgørende med klare retningslinjer for, hvordan pælene installeres og dokumenteres. Indtil nu har der ikke eksisteret danske standarder eller anvisninger, som sikrer, at skruepæle opfylder samme krav til strukturel sikkerhed som traditionelle løsninger.

Dette dokument er udarbejdet med det formål at udfylde denne mangel ved at give tekniske retningslinjer for design, installation og dokumentation af skruepæle i dansk byggeri og udformet som en vejledning.

Denne vejledning bygger på resultater fra forskningsprojektet Day to Day Foundation – Innovative og omkostningseffektive løsninger til fremtidens boligbyggeri med brug af skruefundamenter, som er gennemført med støtte fra Innovationsfonden (bevilling nr. 9090-0051A). anbefalingerne tager udgangspunkt i både forskningsdata og praktiske erfaringer fra fuldskalaforsøg med forskellige pæletyper og jordbundsforhold.

<https://innovationsfonden.dk/da/i/historier/skruefundamenter-skal-goere-byggeri-mere>

I rapporten "Recommendation: Execution of special geotechnical works- Steel Screw Piles". Ibsen L.B, Sørensen J.D and Andreassen D.K [2025] præsenterer den bagved liggende evidens og argumentation for de dokumentationskrav, der anbefales i dette dokument.

Formålet er at understøtte ingeniører, entreprenører og myndigheder med en teknisk sammenhængende ramme for de krav der bør stilles til dokumentation af et skruepæle projekt så det opfylder de normale krav til strukturel pålidelighed og sikkerhed.

2 Normative referencer

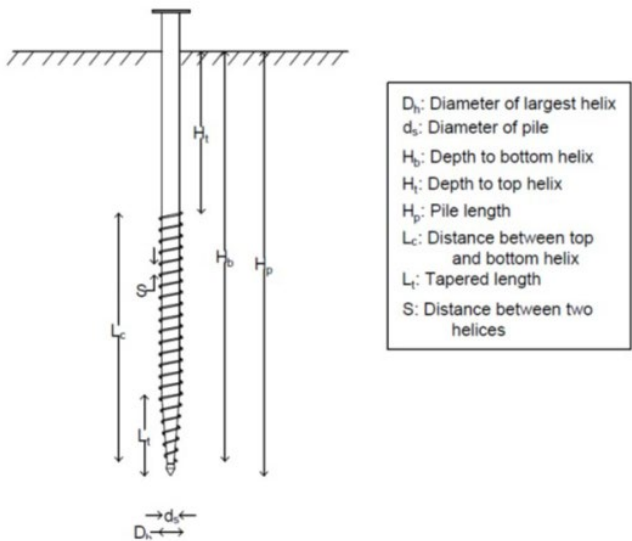
Et skruepæleprojekt skal behandles på samme måde som et konventionelt pælefundamentprojekt og skal dimensioneres i overensstemmelse med de danske nationale annekser til Eurocode 7:

- Bygningsreglementet (BR18)
- DS/EN 1990:2023 Eurocode 0: Grundlag for konstruktion og geoteknisk dimensionering
- DS/EN 1990 DK NA:2024 – Nationalt annekse til Eurocode 0: Grundlag for dimensionering af konstruktioner
- DS/EN 1993-1-1 DK NA:2019 – Stålkonstruktioner – Generelle regler og regler for bygninger
- DS/EN 1993-5 DK NA:2015 – Stålkonstruktioner – Del 5: Pæle
- DS/EN ISO 1461:2022 – Varmforzinkede belægninger på færdige jern- og stål emner – Specifikationer og prøvningsmetoder
- EN 10210 – Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Technical delivery conditions.
- EN 10219 – Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels – Technical delivery conditions
- EN ISO 11960 – Petroleum and natural gas industries – Steel pipes for use as casing or tubing for wells.
- EN ISO 12944 – Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems.
- DS/EN 1997-1 DK NA:2021 – Geoteknisk dimensionering – Del 1: Generelle regler
- EN 1997-2 DA NA:2013 – Geoteknisk dimensionering – Del 2: Jordbundsundersøgelser og prøvning
- EN ISO 22477-1:2018 – Geoteknisk undersøgelse og prøvning – Prøvning af geotekniske konstruktioner – Del 1: Prøvning af pæle: statisk trykprøvning
- EN ISO 22477-2:2023 – Geoteknisk undersøgelse og prøvning – Prøvning af geotekniske konstruktioner – Del 2: Prøvning af pæle: statisk trækprøvning
- EN ISO 22477-10:2016 – Geoteknisk undersøgelse og prøvning – Prøvning af geotekniske konstruktioner – Del 10: Prøvning af pæle: hurtig belastningsprøvning

Geotekniske borer og styrkebestemmelse skal udføres. Skruepælefundamenter skal dimensioneres efter geoteknisk kategori 2 (GC2). Boringerne skal have en dybde, der sikrer tilstrækkelig viden om jordbundsforholdene under pælens spidsniveau. Dette er nødvendigt for korrekt vurdering af bæreevne, negativ overfladefriktion og sætninger.

Enfamiliehuse, rækkehuse og sommerhuse placeres i konsekvensklasse CC2 og henføres ifølge bygningsreglementet (BR18) normalt til konstruktionsklasse KK1 – også når de funderes med skruepæle.

2.1 Termer og definitioner

Cylindrisk forskydningsmetode:	Pælens lodrette bæreevne beregnes ved at medtage overfladefriktionen langs jordvolumen mellem Helix pladerne samt spidsbæreevne af den nedre Helix plade.
Friktionskorrelations faktoren (K_c):	Sammenhængen mellem installationsmoment og bæreevne beskrives ved friktionskorrelations faktoren.
Helix:	skruebladet/ bæreblade svejst på et cylindrisk stålrør.
Individuelle bæremetode:	Pælens lodrette bæreevne beregnes ved at summere spidsbæreevne af de enkelte Helix plader.
Skruejournal:	Grafisk plot af kontinuerlige målinger af Penetrationsraten (PR), Rotationshastighed og Installationsmoment som funktion af penetrationsdybden.
Kontinuerlige skruepæle:	Pæle uden samlinger.
Penetrationsraten (PR):	Vertikal penetration per omdrejning/ skruebladsstigning.
Pitch:	Stigningen af skruebladet pr omgang også kaldet gevindstigningen.
S/D_h	forholdet mellem den ydre diameter og afstanden mellem vinger
Skruepælen:	 D_h: Diameter of largest helix d_s: Diameter of pile H_b: Depth to bottom helix H_t: Depth to top helix H_p: Pile length L_c: Distance between top and bottom helix L_t: Tapered length S: Distance between two helices

2.2 Særligt for skruepæle

En skruepæl karakteriseres som en fortrængningspæl, og dokumentationen af sikkerhedsniveau for et skruepæleprojekt kan ske i overensstemmelse med DS/EN 1990:2023, "Bilag D – Design ved hjælp af prøvning".

Dette skyldes primært to forhold:

1. De geostatistiske beregningsmetoder kan ikke i tilstrækkelig grad håndtere den store variation i skruepæles design. Geotekniske beregninger skal udføres med udgangspunkt i det konkrete pæledesign for at kunne repræsentere brudmekanismen – og dermed bæreevnen – med tilstrækkelig sikkerhed. Kalibreringen skal baseres på statiske belastningsforsøg med konstant deformationshastighed – både i tryk og træk – og i de faktiske jordtyper.
2. En skruepæl fungerer i princippet som et jordbor og løsner den omgivende jord, hvis den ikke installeres korrekt. Korrekt installation forudsætter, at skruepælens penetrerer pr. omdrejning (PPR = penetration per round) svarende til skrueslagets stigning (pitch).

Bæreevnen af en skruepæl i et givent projekt kun kan dokumenteres, hvis der under installationen foretages kontinuerlige målinger af penetrationsraten (PR), Rotationshastighed og Installationsmoment. Disse målinger skal dokumenteres i en digital installationslog. Dette muliggør verifikation af, at skruepælene er korrekt installeret, og at skruepælen er installeret i bæredygtige lag.

DS/EN 1990:2023, Eurocode – Grundlag for konstruktion og geoteknisk dimensionering, afsnit 7.3, angiver:

- Fysiske forsøg må anvendes til bestemmelse af parametre til brug i dimensionering.
- Forsøg kan anvendes til at bestemme en konstruktions eller en konstruktionsdels bæreevne, som specificeret af relevant myndighed eller, hvis ikke specificeret, som aftalt mellem projektets parter.

Note: Fysiske forsøg anvendes f.eks. i følgende tilfælde:

- a) Når tilstrækkelige beregningsmodeller ikke foreligger.
- b) Til at kontrollere de forudsætninger, der er lagt til grund i dimensioneringen.

Dette er netop gældende for alle skruepæleprojekter.

3 Geotekniske undersøgelser

3.1 Generelt

3.1.1

Geotekniske undersøgelser skal opfylde kravene angivet i EN 1997-1 DK NA:2021 og EN 1997-2 DK NA:2013.

3.1.2

Undersøgelsens dybde og omfang skal være tilstrækkelige til at identificere alle jordlag og formationer, som kan have betydning for konstruktionen. Dette inkluderer bestemmelse af relevante geotekniske egenskaber og verifikation af jordbundsforholdene. For eksempel, hvis pælene skal overføre last til et bæredygtigt lag ved spidsbæring, skal det dokumenteres, at dette lag ikke umiddelbart underlejres af svagere jordlag, som kan medføre gennemlogging eller uacceptable sætninger.

3.1.3

Erfaring fra tidligere funderingsprojekter under sammenlignelige jordbundsforhold – især i nærområdet – bør inddrages ved fastlæggelsen af undersøgelsens omfang. Henvisning til tidligere erfaring kan accepteres,

forudsat at den understøttes af passende verifikationsmetoder, såsom SPT, CPT, Pressuremeter tests (PMT) eller lignende in-situ prøvninger.

Bemærk: EN 1997-2 giver anbefalinger til undersøgelsesdybder og vejledning til indhold.

3.1.4

Den geotekniske rapport skal være tilgængelig rettidigt for at sikre en pålidelig dimensionering og udførelse af fortrængningspæle.

3.1.5

Det skal verificeres, at den geotekniske undersøgelse er tilstrækkelig i forhold til design og udførelse af fortrængningspæle.

3.1.6

Hvis undersøgelsen vurderes som utilstrækkelig, skal der udføres supplerende geotekniske undersøgelser.

4 Materialer og egenskaber

4.1 Generelt

4.1.1

Alle materialer og produkter skal opfylde kravene fastsat i de respektive europæiske standarder, de gældende bestemmelser på anvendelsesstedet samt projektets specifikationer.

4.1.2

Alle leverandørkilder til de enkelte materialer skal dokumenteres og må ikke ændres uden forudgående meddelelse.

4.2 Præfabrikerede skruepæle

Materialer og fremstilling af stålspæle skal som minimum være i overensstemmelse med:

EN 1993-1, EN 1993-5, EN 10210 eller EN 10219 eller EN ISO 11960, når der anvendes hule sektioner (f.eks. stålspæle).

4.3 Korrosionsbeskyttelse

Belægninger og forbindelser til korrosionsbeskyttelse skal overholde designkravene. Beskyttelsen skal være intakt, især nær samlingselementerne, og opfylde projektets specifikationer.

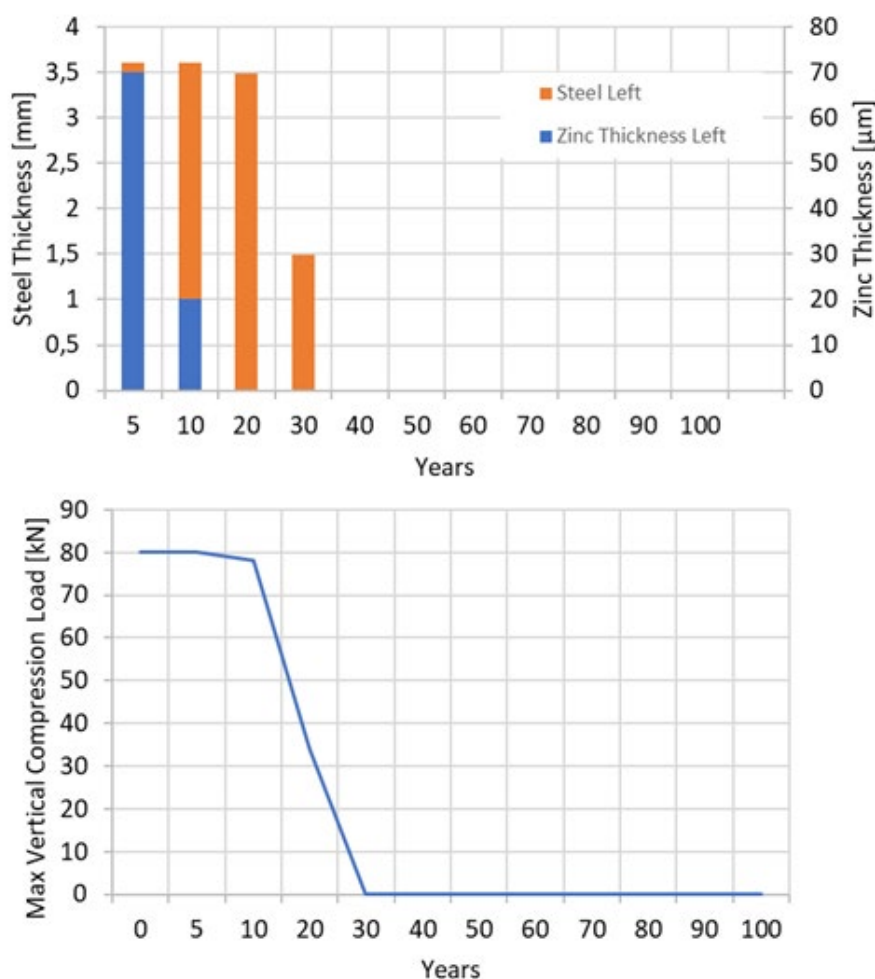
Valget af beskyttelsesmetode bør baseres på den miljømæssige eksponeringsklasse (i henhold til EN ISO 12944 eller nationale standarder) samt den tilsigtede levetid (typisk 50 eller 100 år). Den mest effektive beskyttelse opnås ofte ved en kombination af metoder (f.eks. strukturel overdimensionering + belægning + offeranoder). Brug af ekstra godstykkelse som "korrosionsbeskyttelse" (Sacrificial thickness) må kun bruges for stål med flydespænding $f_y \leq 500$ MPa i henhold til EC3-5.

For stålspæle er korrosion en afgørende faktor for bæreevnen af både skrueblade og stålspæle. Bæreevnen af disse strukturelle elementer skal dokumenteres gennem beregninger.

Note: Eksempel på krævet beregning af levetids og indre bæreevne af galvaniseret stålør $\varnothing 76$ og godstykkelse 3,6 mm. Røret er galvaniseret med 70 μm zink. Der regnes med dobbelt siddet tæring. Den lodrette indre bæreevne for skruerpælen er beregnet til 80 kN med en excentricitet lastpåvirkning på 20mm og ingen horisontal last. I Figur 4-1 ses beregning af pælen installeret i saltholdig jord som ofte forekommer i sommerhusområder og langs kysterne. Desuden ses reduktionen af pælens indre bæreevne som funktion af levetid. I Tabel 4-1 er pælens levetid beregnet i forskellige miljøpåvirkninger hvis design lasten er hhv. 30 kN og 50 kN.

Tabel 4-1 Beregning af levetiden for galvaniseret stålør $\varnothing 76$ mm med en godstykkelse på 3,6 mm under en vertikal konstruktionslast på 30 kN og 50 kN i forskellige miljøforhold.

Vertikal belastning	30 kN	50 kN
Vandholdig, neutral pH	50 år	38 år
Lav pH < 5	30 år	20 år
Saltholdig	21	16 år



Figur 4-1. Beregning af levetid og indre bæreevne af galvaniseret stålør $\varnothing 76$ og godstykkelse 3,6 mm. Røret er galvaniseret med 70 μm zink og der anvendes dobbelt siddet korrektion.

5 Designmæssige overvejelser

5.1 Generelt

5.1.1

Dimensioneringen skal baseres på de relevante bestemmelser i EN 1990 til EN 1999 (Eurocodes 0 til 9), som angivet i afsnit 2.

5.1.2

Denne rapport indeholder bestemmelser for design relateret til udførelsesaspekter, som ikke er dækket af 5.1.1, men som kan påvirke projektering eller detaljering af skruerpæle.

5.1.3

Beregninger skal fastlægge typen og dimensionerne for skruerpælene og verificere, at den valgte installationsmetode er egnet til de specifikke jordbundsforhold og miljømæssige begrænsninger.

Note: Dette kan ofte bekræftes ud fra erfaring fra lignende projekter.

5.1.4

Uden tilstrækkelig erfaring med installationsmulighederne skal der gennemføres én eller flere prøveinstallationer på lokaliteten før igangsætning af hovedarbejdet.

Note: Prøveinstallationer giver indsigt i nødvendigt installationsmoment, nødvendigt udstyr og installationsmetoder. De hjælper også med at vurdere pælens indflydelse på jordens opførsel og det omkringliggende miljø. Derudover kan disse forsøg fastlægge installationskriterier og give indledende estimater for pælelængde og bæreevne.

5.1.5

Eventuelle design- eller specifikationskrav vedrørende brug af assisterende installationsteknikker skal overvejes ved vurdering af pælens nedskruningsevne.

5.2 Strukturel bæreevne

5.2.1

Den strukturelle bæreevne af pælen og dens samlinger skal fastlægges under hensyntagen til den excentricitet, der opstår ved de maksimale tilladelige placeringstolerancer og de vertikale, horisontale og momentbelastninger, der virker på pælehovedet. De strukturelle elementer omfatter skaft, koblinger og skruerblade. Forventet stålkorrosion ved slutningen af designlevetiden vil medføre en reduktion i det effektive ståltværsnit.

5.2.2

Stålskruerpæle installeres ved samtidig påføring af moment og nedadrettet tryk. Det skal derfor dokumenteres, at pælens torsions- og tryk-styrke er tilstrækkelig til at modstå installationspåvirkning.

5.2.3

Geometriske tolerancer skal specificeres for skruepælen og skal indgå i den strukturelle dimensionering herunder verifikation af eventuel søjlevirkning og 2. ordensmoment.

5.2.4

Hvis de faktiske installations og geometriske tolerancer overskrider de specificerede grænser, skal mulige overbelastninger af strukturelle komponenter vurderes. Korrigerende foranstaltninger bør implementeres, f.eks. installation af supplerende pæle.

Note: Horisontale og vertikale afvigelser kan påvirke den lastrelaterede excentricitet af pælehovedet og derved søjlevirkning og 2. ordensmoment.

5.3 Installation

5.3.1

Hvis skruepæle ikke installeres korrekt, men overskrues, fungerer de i praksis som jordbor og løsner den omgivende jord. Korrekt installation kræver, at pælen nedbringes per omdrejning (PPR) svarer til skruebladens stigning (Pitch) fra det jordlag, som forventes at bidrage til skruepælens bæreevne. Dette svarer til et Penetrationsraten (PR) på 1,0.

Penetrationsraten (PR) – den vertikale nedtrængning pr. omdrejning i forhold til skruebladsstigningen – er den primære parameter der styrer både installationskvalitet og bæreevne. Hvis pælen "overskrues", bliver $PR < 1,0$. Selv hvis $AR < 1,0$, kan pælen dog stadig betragtes som en skruepæl og besidde en vis bæreevne.

Skruepæle, der installeres med en PR, som afviger mere end $\pm 0,1$ fra gennemsnittet af de installerede pæle, anses ikke for at tilhøre samme population. Defineres en population med større spredning end $\pm 0,1$, skal partialkoefficienter og korrelationsfaktorer bestemmes ud fra principperne i DS/EN 1990:2023, "Anneks D – Design ved hjælp af prøvning".

For at kunne sammenligne bæreevner for pæle installeret i samme geotekniske enhed – dvs. pæle der tilhører samme population – skal rotationshastigheden være ensartet, dvs. inden for ± 5 omdrejninger per minut (RPM). Ved nedtrængning af den heliske del i bærelaget bør rotationshastigheden ligge i intervallet 5 til 15 RPM. Pæle installeret med forskellig rotationshastighed kan have forskellig torsionsmodstand (moment), men samme bæreevne. Derfor kan torsionsmodstanden ikke sammenlignes, hvis rotationshastigheden varierer mere end den givende tolerance.

5.3.2

For at sikre pålidelig bæreevne skal penetrationsraten overvåges kontinuerligt med dybden og aktivt kontrolleres gennem hele installationen.

5.3.3

Skruepæle bør installeres med en penetrationsrate mellem 0,8 og 1,1 i det område, hvor skruebladene interagerer med den bæredygtige jord.

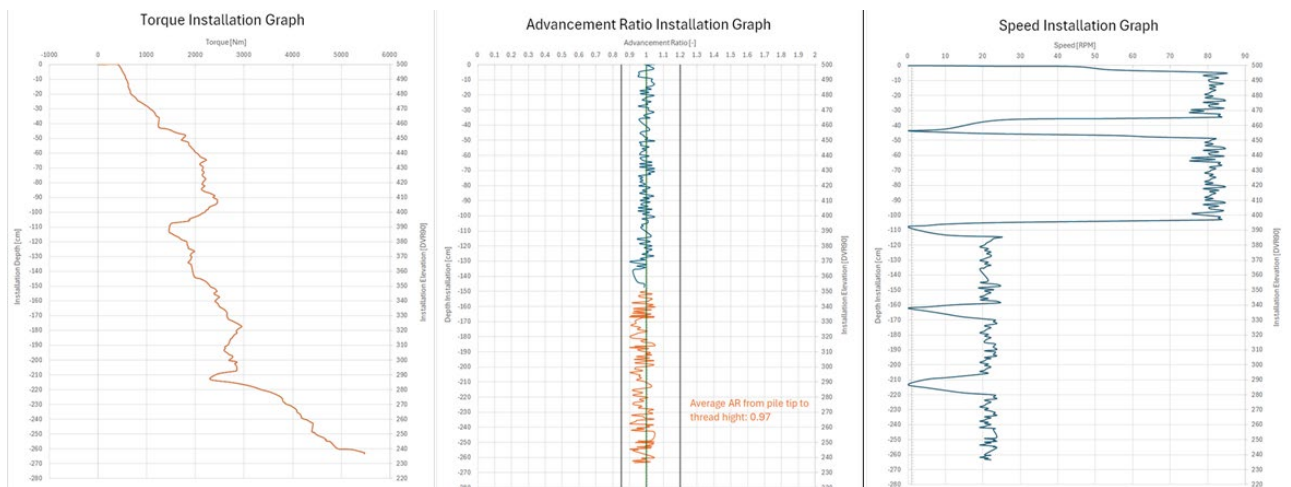
Note: Dette interval svarer til en estimeret variation på $\pm 10\%$ i trykbæreevne. Denne variation anses som acceptabel og er i overensstemmelse med anbefalinger fra CCC (2012), New York City Building Code (2014) og BS 8004 (2015).

5.3.4

Skruepælenes bæreevne kan kun dokumenteres, hvis der under installationen foretages kontinuerlige målinger af penetrationsrate, rotationshastighed og installationsmoment, og disse dokumenteres i et installationslog der betegnes skruejournal.

Skruejournalen skal bekræfte, at hver pæl er korrekt installeret og overholder installationskravene i 5.3.1 Loggen fungerer som en pendant til rammejournalen og danner grundlag for bæreevneverifikation gennem statiske eller dynamiske forsøg på 5 % af de installerede pæle. Dette er i overensstemmelse med gældende praksis for konventionelle pælefundamenter.

Note: Eksempel på skruejournal:



Figur 5-1. Eksempel på skruejournal: Grafisk plot af kontinuerlige målinger af Installationsmoment, Penetrationsraten (PR), og Rotationshastighed som funktion af penetrationsdybden.

5.3.5

Hvis en skruepæl delvist afinstalleres eller drejes op i det bæredygtige jordlag, skal den geninstalleres, så spidsen føres under den forstyrrede zone. For at sikre pålidelig lastoverførsel og korrekt dokumentation af installationen skal én af følgende korrigerende foranstaltninger iværksættes:

1. Pælen forlænges, så hele skruebladssamlingen befinder sig under den tidligere forstyrrede jordzone.
2. Alternativt skal pælen statisk eller dynamisk prøves for at verificere dens bæreevne.

5.4 Geoteknisk bæreevne

5.4.1

Installationsprocessen er afgørende for skruepælens geotekniske bæreevne, herunder spidsbæreevne og overflademodstand. Geostatistiske beregninger kan derfor kun anvendes som indledende estimater for pælelængde og bæreevne og kan ikke anvendes til at verificere eller dokumentere den ultimative bæreevne.

5.4.2

Den styrende brudmekanisme, som afhænger af afstanden mellem skruebladene (S/D_h), afgør den relevante designmetode for den pågældende pæl.

Ved kontinuerlige skruepæle er skruebladsafstanden så lille, at pælen skal dimensioneres ved hjælp af den cylindriske forskydningsmetode.

For $S/D_h > 2$ skal aksial bæreevne bestemmes både ved den individuelle bæremetode og den cylindriske forskydningsmetode, og den laveste værdi anvendes i dimensioneringen.

For pæle med én skrueplade skal bæreevnen udelukkende bestemmes ved den individuelle bæremetode.

5.4.3

Ved kontinuerlige stålpæle kobles forlænger- og spidselementer typisk sammen med bolteforbindelser. Bolthovederne rager ofte 5 – 30 mm ud over skaftets diameter, hvilket medfører, at jorden omkring afskæres med en større diameter end skaftet.

Hvis bolte eller koblinger rager uden for skaftdiameteren, eller hvis koblingen omslutter skaftet, skal skaftfriktionen på forlængersegmenterne ikke medregnes i beregningen af aksial modstand.

Note: Sådanne koblinger forstyrrer jorden under installationen, da udstående bolte eller koblinger skærer i borehulsvæggen. Dette kan føre til en løs zone omkring pælen, som forhindrer direkte kontakt mellem pælen og jorden.

Det anbefales derfor at anvende indbyggede eller indvendige koblinger, der ikke overstiger skaftets diameter, for at sikre jordkontakt og dermed forudsat overfaldemodstand.

5.4.4

Små skaftdiametre (50–150 mm) begrænser skruepæles evne til at overføre horisontale laster. Kræves horisontal lastoverførsel, skal den verificeres ved beregning eller forsøg.

Hvis udstående bolte eller store koblinger anvendes, skal forlængersegmenter over spidselementet anses for ikke-støttede i horisontal lastoverførsel, da jordmodstanden først mobiliseres ved store forskydninger. Dette gælder også firkantede rørpæle.

Konsekvens:

- Ingen horisontal bæreevne må dokumenteres ved beregning for disse segmenter.
- Bæreevnen skal verificeres ved statisk test i begge horisontale retninger.

I henhold til DS/EN 1997-1:2007, afsnit 7.8(5), kræves der normalt ikke verifikation af søjlevirkning for pæle i jord med udrænet forskydningsstyrke $c_u > 10$ kPa. Det bliver der lavet om på med ny EC7-3, 6.6.2.5 (6). Men der er hjælp af få i EC7-3, Annex C.12 og C.13.

Men hvis kontakt mellem pæl og jord ikke forefindes, kan denne passive støtte ikke antages, og skal medtages i dimensioneringen af pælens strukturelle bæreevne.

5.5 Moment til bæreevne

5.5.1

Moment-til-bæreevne-metoden er en direkte tilgang til at estimere skruepæles aksiale bæreevne og svarer til CPT-baserede designmetoder for konventionelle pæle.

Installationsmomentet afspejler den friktions modstand, som pælen møder under installation. Sammenhængen mellem installationsmoment og bæreevne beskrives ved friktionskorrelations faktoren (K_c), som kan anvendes til sammenligning af installerede pæle tilhørende samme population, dvs. samme geoteknisk enhed.

Hvis installationsmomentet skal anvendes som mål for bæreevnen, skal pælene tilhøre samme population med hensyn til installationsprocedure (rotationshastighed, Penetrationsraten) og overholde kravene beskrevet i afsnit 5.3.

For at bestemme friktionskorrelationsfaktoren K_c mellem installationsmoment og trykbæreevne, skal der gennemføres minimum tre statiske belastningstest på pæle fra samme population, men med forskellige endelige installationsmomenter.

5.5.2

For at verificere bæreevne skal K_c -faktoren kalibreres specifikt til projektlokaliteten og gælder kun pæle med samme pælegeometri, jordprofil, penetrationsrate og rotationshastighed.

Denne kalibrering skal baseres på statiske eller dynamiske tests på installationsstedet for at sikre validering af den beregnede bæreevne.

5.5.3

Selvom K_c -værdierne implicit inkluderer effekten af penetrationsraten, kan lav PR føre til betydelige deformationer.

5.5.4

De partialkoefficienter, der anvendes med moment-til-bæreevne-metoden, skal bestemmes i henhold til enten bilag D i DS/EN 1990:2007 eller bilag F i det danske nationale anneks (DK NA) til DS/EN 1990. eller i henhold til DS/EN 1997-1 DK NA.

6 Udførelse

6.1 Generelt

6.1.1

Før installationsarbejdet påbegyndes, skal der udarbejdes og godkendes en udførelsesplan. Denne plan skal beskrive:

- Den anvendte installationsmetode og det valgte udstyr.
- Den overordnede sekvens for pæleinstallation.
- Det overvågningssystem, der dokumenterer installationsparametre (f.eks. moment, penetrationsrate, rotationshastighed).

Alle overvågningssystemer, der anvendes til installationskontrol, skal:

- Kalibreres i henhold til gældende nøjagtighedskrav (se Tabel 6.1),
- Verificeres for korrekt funktion inden installationen påbegyndes,
- Dokumenteres som en del af udførelsesprotokollen.

Kalibreringscertifikater skal være tilgængelige for inspektion på byggepladsen.

Tabel 6.1: Minimumskrav til målenøjagtighed for overvågningsudstyr.

Parameter	Krævet nøjagtighed	Målemetode	Bemærkninger
Moment	± 2 % af fuld skala	Kalibreret torsionstransducer baseret på strain gauge	Olietrykbaserede systemer er ikke acceptable pga. lav opløsning og høj fejlrate
Penetrationsrate	1-2% af pitch dog min ± 1 mm (vertikal pr. omdrejning)	Kontinuerlig måling af dybde og rotation vha. encoder	PR = penetration pr. omdrejning/gevindstigningen
Rotationshastighed	± 1 RPM	Internmaskinen encoder eller ekstern rotationssensor	Vigtigt for at undgå overvurdering af moment ved høj installationshastighed

6.1.2

Hvor det er muligt, bør nedskrueningsforsøg udføres tæt ved jordbundsundersøgelser. Kombineret med prøvebelastninger (statiske eller dynamiske) kan sådanne forsøg fastlægge installationskriterier og give indledende estimater for pælelængde og bæreevne.

6.1.3

Effekten af opadgående jordtryk (jordhævning) på tidligere installerede pæle skal kontrolleres.

6.2 Konstruktionstolerancer

6.2.1

Medmindre andet er angivet, skal stålskruepæle på land installeres inden for følgende geometriske afvigelser:

Planplacering af lodrette og skrå pæle (målt ved arbejdsniveau):

- $e \leq 0,02 \text{ m}$

Hældning for lodrette pæle:

- $i \leq i_{\max} = 0,04 \text{ (0,04 m/m)}$

hvor i er tangens til vinklen mellem pælens projekterede og udførte centerlinje.

6.3 Udstyr og metode

6.3.1

Det nødvendige moment, rotationshastighed og påført nedadgående kraft skal vælges således, at pælen kan installeres til den foreskrevne dybde eller opnå den krævede friktionsmodstand uden at forårsage skader på pælen eller uacceptabel jordforstyrrelse.

6.3.2

Måling af installationsmoment skal ske ved en direkte metode. Dette indebærer brug af et in-line torsionsmålingssystem placeret mellem drivhoved og skruerpæl. Disse enheder er typisk udstyret med intern elektronisk belastningscelle og digital aflæsning eller dataloger, hvilket muliggør præcis og realtidsbaseret måling. Fordelen er, at aflæsningen er uafhængig af hydrauliksystemets hvor olietrykket varierer og giver fejlmåling af installationsmomentet.

6.3.3

Indirekte måling baseret på hydraulisk olietryk må ikke anvendes, da denne metode ikke giver tilstrækkelig nøjagtig eller pålidelig angivelse af det reelle installationsmoment.

6.3.4

Pælenes penetration skal måles ved hjælp af et system, der er uafhængigt af maskinens bevægelser.

6.4 Instrumenteringskrav

For at sikre datakvalitet og sammenlignelighed på tværs af projekter, skal følgende minimumsnøjagtighed overholdes:

Tabel 6.2: Instrumenteringskrav.

	Målemetode	Maksimal tilladt fejl
Moment	Kalibreret, isoleret system (f.eks. strain gauge)	± 2 % af max værdien
Penetrationsrate	Dybde vs. rotation, liveberegnet	± 1 mm
Rotationshastighed	Integreret sensor eller encoder	± 1 RPM

Anvendelse af olietryk eller ikke kalibrerede sensorer er uacceptabelt på grund af manglende nøjagtighed og sporbarhed.

7 Tilsyn, overvågning og test

7.1 Tilsyn

7.1.1

Udførelsen af enhver type skruepæl kræver omhyggeligt tilsyn og overvågning.

Note 1: Dette inkluderer tilsyn samt specificeret overvågning af omkringliggende konstruktioner.

Note 2: Afsnit 8 angiver yderligere krav, der skal medtages i udførelsesspecifikationen for tilsyn, kontrol og prøvning af pæle.

7.1.2

Kontrol af udførelse skal ske i henhold til projektets specifikationer og være i overensstemmelse med EN 1997-1, EN 13670, EN 1090-2 og dette dokument's anbefalinger.

7.1.3

Følgende forhold skal kontrolleres i de forskellige faser:

a) Forberedende arbejde før udførelsesfasen:

- Placering af pæle
- Materialer

b) Pæleinstallation:

- Skruejournal hvoraf der fremgå materiel og kurver for moment, nedtræk (thrust) og penetration per omdrejning, koter m.v
- Placering (dybde, position)

7.2 Verifikation af placering og hældning

Efter installation skal entreprenøren dokumentere:

- Afvigelse i x/y-position.
- Afvigelse i hældning, målt i forhold til lodret eller projekteret hældning.

Pæle, der overskrider disse tolerancer, skal rapporteres til projektets statiker. Den strukturelle dimensionering skal tage højde for eventuel øget excentricitet for at sikre stabilitet under fuld designlast.

7.3 Krav til test

Hvis installationen er dokumenteret som beskrevet, kan antallet af krævede statiske eller dynamiske prøvebelastninger reduceres til 5 % af de installerede pæle (minimum 3 testpæle), forudsat at:

- Pælene har identisk geometri.
- Er installeret med samme metode og udstyr.
- Er placeret i ensartede jordbundsforhold.

Ved variation i jordtype eller pæletype skal hver kombination opfylde 5 %-kravet (minimum 3 tests).

Tabel 7.1: Krav til prøvebelastning.

Jordbundsforhold	Antal prøvebelastninger
Sand	5 % af det forventede antal pæle, dog er minimum 3 stk.
Ler	5 % af det forventede antal pæle, dog er minimum 3 stk.

Hver test skal afspejle de faktiske forhold og inkludere både tryk- og trækforsøg, hvis relevant.

7.4 Belastningsforsøg

7.4.1

To testmetoder er tilladt for verifikation af skrue- og Helix pæles bæreevne: statisk belastningsforsøgt og, under visse betingelser, dynamisk belastningsforsøg.

To typer statiske belastningsforsøg kan anvendes:

- For trykprøvning
- For trækprøvning

Afstanden til modhold/modholdspæle skal overholde kravene i EN ISO 22477-1. for mikropæle dvs. minimum 1,5m eller 2,5 x Helix diameteren.

7.4.2

Trykprøvning kan udføres som:

Brud forsøg: Bruges til kalibrering af analytiske modeller, moment-til-bæreevne modeller og dynamiske modeller samt til fastlæggelse af partialkoefficienter. Prøvebelastningen udføres med konstant deformationshastighed (mm/min) og belastes til enten:

- 10 % af pælediameteren (gevinddiameteren).
- Minimum 100 mm sætning (højeste værdi anvendes)

Brudbæreevnen bestemmes ud fra disse arbejdskurver under hensyntagen til den overliggende konstruktion. Pæle, som ikke overstiger tilladelig sætning og holder sig inden for designlast, kan genanvendes.

Egnethedsforsøg: Anvender trinvis belastninger (typisk 25 %, 50 %, 75 %, 100 % af den karakteristiske last) med fastholdelse og deformationsmåling ved hvert trin. Pælen kan forblive en del af fundamentet hvis funktionskravet verificeres.

7.4.3

Trækprøvning kan udføres som:

Brud forsøg: Udføres med konstant deformationshastighed (mm/min), indtil trækbrud opstår. Disse pæle må anvendes i den blivende konstruktion.

Egnethedsforsøg: Udføres i henhold til EN ISO 22477-2 med trinvis belastninger (25 %, 50 %, 75 %, 100 %, af karakteristiske last). Hver belastning fastholdes for at observere deformation, krybning eller brud. Pælen kan forblive en del af fundamentet hvis funktionskravet verificeres.

Valg af belastningsforsøg skal koordineres med geoteknisk og strukturel ingeniør baseret på projektklasse, pælens genanvendelse og konstruktionens vigtighed.

7.4.4

Dynamiske prøvebelastninger kan kun anvendes, hvis de valideres mod tidligere statiske brud forsøg udført på samme pæletype, i tilsvarende jordforhold og med samme installationsmetode. Korrelationsforholdet skal dokumenteres og vise pålidelig sammenhæng mellem dynamiske og statiske bæreevneværdier.

Bestemmelsen af partialkoefficienter og korrelationsfaktorer skal overholde principperne i DS/EN 1990:2023, "Anneks D – Design ved hjælp af prøvning".

Hvis en sådan fastlæggelse ikke foreligger, skal verifikation af bæreevne udelukkende ske ved statiske tests.

8 Dokumentation

8.1 Dokumentations- og kontrolplan for skruepæle projekter

Dette afsnit giver et fuldstændigt overblik over den krævede dokumentation for skrue- og Helix pæle projekter, struktureret efter Bygningsreglement BR18 og med reference til SBI Anvisning 271 og DS/EN-standarder. Dokumentationen dækker alle konstruktionsklasser (KK1, KK2, KK3, KK4) og opdeles i A-serie (Designgrundlag), B-serie (Kontrolplaner og udførelsesdokumentation) samt ansvarsfordeling (installatør vs. rådgivende ingeniør).

8.2 A-serie – Designgrundlag

Tabel 11.1: A-serie – Designgrundlag

Dokument	Titel	Ansvarlig part	Beskrivelse
A1.1	Designgrundlag	Rådgivende ingeniør	Beskriver lastforudsætninger, designmetoder, jordbundsforhold og standardhenvisninger
A2.1	Geoteknisk rapport	Geoteknisk specialist	Geoteknisk kategori (GC2), lagfølge, CPT/SPT-logs
A3.1	Statisk beregning – strukturel bæreevne	Installatør / producent	Dokumentation af aksial-, bøjning- og forskydningskapacitet inkl. korrosion og tolerancer
A3.2	Statisk beregning – samlingskapacitet	Installatør / producent	Dokumentation af alle bolte-/svejseforbindelser. Inkl. forskydning, huludtræk, komponentstyrke og moment
A3.3	Statisk beregning – geoteknisk tværbæreevne	Rådgivende ing. / geotekniker	FEM- eller P-Y-baseret dokumentation med jordprofiler. Inkl. gruppeeffekter og excentriske laster
A3.4	Geostatisk beregning- Geoteknisk aksial bæreevne	Rådgivende ing. / geotekniker	Beregning af pælelængder og diameter under hensyntagen til overside af bæredygtigt lag og styrkeforsøg udført i jordprofilet.

8.3 B-serie – Kontrolplan og udførelsesdokumentation

Tabel 11.2: B2 – Kontrolplaner

Dokument	Titel	Ansvarlig part	Beskrivelse
B2.1.2	Statisk kontrolplan – design	Rådgivende ingeniør	Overblik over alle kontrolaktiviteter i designfasen. Henvisning til A-serien.
B2.2.1	Statisk kontrolplan – udførelse	Installatør / rådgivende ing.	Beskriver tilsyn, teststrategi (statisk/dynamisk), tolerancer mv.

Tabel 11.3: B3 – Komponent- og materialesporbarhed

Dokument	Titel	Ansvarlig part	Beskrivelse
B3.1	Identifikation og mærkning af pæle	Installatør / producent	Overblik over anvendte pæletyper med batchnumre og serienumre
B3.2	Sporbarhed af samlingskomponenter	Installatør / producent	Bolte, koblinger eller svejsninger logges pr. pæle-ID
B3.3	Materiale- og modtagejournaler	Installatør	Bekræftelse af leverede materialer mod designspecifikationer
B3.4	Certifikatregister	Installatør	Indeks til B4.1.1–B4.1.3, refereret pr. pæle-ID/batch

Tabel 11.4: B4 – Udførelsesdokumentation

Dokument	Titel	Ansvarlig part	Beskrivelse
B4.1.1	Materialecertifikater – stål	Installatør	Batchcertifikater inkl. flydespænding, forlænger mv.
B4.1.2	Svejsedokumentation	Installatør / producent	WPQR eller beregning af svejsekapacitet
B4.1.3	Galvaniseringscertifikat	Installatør / producent	Dokumentation iht. DS/EN ISO 1461 eller tilsvarende
B4.2.1	Kalibreringsjournal – målesystemer	Installatør	Kalibreringscertifikater for moment, AR og RPM-sensorer
B4.2.2	Installationslogs (skruejournal)	Installatør	Data fra digital enhed (moment, AR, hastighed) pr. pæl
B4.2.3	Pæleplan (projekteret)	Rådgivende ingeniør	Overblik over forventet pæleplacering og længder
B4.2.4	Som-udført pæleplan og kommentarer	Installatør	Sammenligning med projekteret. Inkl. ændringer, dybder, forhindringer

Tabel 11.5: B5 – Testrapporter

Dokument	Titel	Ansvarlig part	Beskrivelse
B5.1.1	Statisk belastningstest	Rådgivende ing. / installatør	Opsætning, fotos, deformation og brudstype. EN ISO 22477-1/-2
B5.1.2	Dynamisk belastningstest	Rådgivende ing. / installatør	Opsætning, udstyr, hammerens effektivitet. EN ISO 22477-10
B5.1.3	Korrelation statisk–dynamisk test	Installatør	Sammenligning af testdata ved samme pæletype og jordprofil
B5.1.4	Vurdering af negativ overflademodstand	Rådgivende ingeniør	Ved brug af geostatistiske formler, hvor relevant

8.4 Verifikation af placering

- Alle pæle skal kontrolleres for:
 - x/y-afvigelse
 - Hældning
- Rådgivende ingeniør skal vurdere, om afvigelserne er inden for projektets forudsætninger.

9 Bibliography

Andreasen, D. K., Ibsen, L. B., & Koterass, A. K. (2024). Evaluating the reliability of existing methods for predicting installation torque of screw piles in saturated sand: a comparative study. I N. Guerra, M. Matos Fernandes, C. Ferreira, A. Gomes Correia, A. Pinto, & P. Sêco e Pinto (red.), *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society: PROCEEDINGS OF THE XVIII EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING* (1st Edition pp. 315-319). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-32>.

Andreasen, D.K. and Ibsen, L.B. (2025). Full-scale laboratory investigation of installation effects and advancement rate for tapered continuous helical and helical piles in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*.

BS 8004:2015+A1:2020. British standard – Code of Practice for Foundations.

Begemann, H.K.S [1965]. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, Montreal 1*, 17-20.

CCC (2012). *Construction Code Communicator*, New Jersey Department of Community Vol. 24.

Hoyt, R.M. and Clemence, S.P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil. *Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, vol. 2*, pp. 1019-1022.

Lutenegger, A.J., (2009). Cylindrical shear or plate bearing: Uplift behaviour of multi-helix screw anchors in clay. In: *Contemporary Topics in Deep Foundations*. American Society of Civil Engineers, USA, pp. 456–463.

Mitsch, M. and Clemence, S. [1985]. The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand', *American Society of Civil Engineers* pp. 26–47.

Mohajerani, A., Bosnjak, D. and Bromwich, D. [2016]. Analysis and design methods of screw piles: A review, *Soils and Foundations* 56(1), 115–128. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2016.01.009>.

New York City Building Code (2014). New York City.

Rao, S.N and Prasad, Y.V.S.N [1993]. Estimation of uplift capacity of helical anchors in clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 119, No. 2

Sakr, M. [2009]. Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal* 46(9), 1046–1061. *Bibliography*.

Perko, H.A. (2009). *Helical piles: a practical guide to design and installation*. Wiley, Hoboken.

Tappende, K.M and Sego, D.C (2007). Predicting the axial capacity of screw piles installed in Canadian soils. *OttawaGeo2007 conference*

Zhang, D., et al. (1998). The role of CPT tests in determining soil properties for helical piles.