

Andreas Aure

Bæreevnen til utvidbare friksjonsbolter ved varierende installasjonstrykk, borehullruhet og borehulldiameter. Basert på uttrekkstester fra betongblokk og utviding av bolter i friluft

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Charlie Chunlin Li

Medveileder: Gunnar Vistnes

Mars 2022

Andreas Aure

**Bæreevnen til utvidbare
friksjonsbolter ved varierende
installasjonstrykk, borehullruhet og
borehulldiameter. Basert på
uttrekkstester fra betongblokk og
utviding av bolter i friluft**

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Charlie Chunlin Li
Medveileder: Gunnar Vistnes
Mars 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

18 uttrekkstester ble utført på utvidbare friksjonsbolter installert i en betongblokk. Boltene er av Swellex-typen som installeres med vanntrykk, og ikke behøver mørtel eller polyester. Ved uttrekkstestene ble deformasjonen og boltens bæreevne målt kontinuerlig. Formålet med testene var å observere hvordan bæreevnen påvirkes av ulike installasjonsvariabler, og å sammenligne dette med eksisterende analytiske teorier. Variablene som ble undersøkt var installasjonstrykk, borehullruhet og borehulldiameter.

Ved å benytte et pumpetrykk på 24 MPa og 30 MPa viste uttrekkstestene at et økende vanntrykk ved installasjon ga en økende bæreevne. Fra 30 MPa til 24 MPa falt bæreevnen med 20%. For berg av en tilsvarende hardhet stemmer dette godt overens med eksisterende analytisk teori og tidligere testerfaring.

Ved å benytte både diamantbor og slagbor til boring av boltehullene ble bæreevne målt mot overflateruhet i hullveggen. Hullene boret med slagbor hadde en høyere ruhet og ga høyere bæreevner for alle de benyttede hulldiameterne. Fra slagbor til diamantbor falt bæreevnen med mellom 37% og 43%. Dette samsvarer med den analytiske modellen som også angir økende bæreevne ved økende ruhet.

Ved å benytte tre ulike borehulldiameterer ble boltens bæreevne og primære kontaktpenning målt mot boltens utfoldingsgrad. De to største diameterne i det anbefalte spekteret viste en økende bæreevne ved økende borehulldiameter. Fra 37 mm til 33 mm falt bæreevnen med mellom 28% og 42%. Dette sammenfaller med de teoretiske antagelsene og tidligere testing. Derimot ga den minste diameteren en høyere bæreevne enn den midterste. Dette oppsto trolig da boltens tunge, som gir en lav radiell stivhet, her var lukket og dermed ikke bidro til å svekke bolten.

Åtte bolter ble utvidet i friluft uten begrensning fra et omkransende borehull. Ved å måle den elastiske deformasjonen under på- og avlastning ble den radielle stivheten til bolten estimert. Testene ga mot forventning en hovedsakelig synkende stivhet ved økende boltomkrets. Det benyttede testoppsettet dømmes lite egnet til å observere den forventede økte radielle stivheten ved semisirkulær og sirkulær tverrsnittform.

Abstract

18 pull-out tests were done on expandable friction rockbolts installed in a concrete block. The bolts are of the Swellex type that is installed with pressurised water and has no need for a grouting agent. During the pull-out tests the load and displacement were measured throughout. The purpose of the testing was to observe how the ultimate load of the bolt is affected by different installation variables, and to compare the results with existing analytical theories. The variables in question were installation pressure, borehole roughness, and borehole diameter.

By using a pump pressure of 24 MPa and 30MPa the pull-out tests showed that increasing the water pressure during installation increased the ultimate load of the bolt. From 30 MPa to 24 MPa the ultimate load decreased with 20% on average. This is compatible with existing analytical theories and previous results for a rock mass of similar quality.

By using both a diamond core drill and a pneumatic hammer drill the ultimate load was compared to the roughness of the borehole wall. The hammer drilled holes had a higher roughness and gave a higher ultimate load for all the hole diameters. From hammer drilling to diamond core drilling the ultimate load decreased with 37% to 42%. This is in line with the analytical model which proposes that an increase in borehole roughness will give an increase in ultimate load.

By using three different borehole diameters the primary contact stress and general load capacity was compared to the unfolding degree of the bolt. The two larger diameters were in the recommended range and showed an increase in ultimate load with an increasing borehole diameter. From 37 mm to 33 mm the ultimate load decreased with 28% to 42%. This is in line with previous results and the analytical model. However, the smallest diameter resulted in a higher ultimate load than that of the middle diameter. This likely occurred as a result of the bolt tongue, that usually provides a low radial stiffness, in this case being closed and therefore not weakening the bolt.

Eight bolts were expanded in free air with no surrounding borehole. By measuring the elastic displacement during loading and unloading cycles the radial stiffness of the bolt was estimated. Counter to expectations the tests gave a mostly decreasing stiffness with increasing borehole size. The utilized test setup is judged to be unsuitable to observe the expected increase in radial stiffness accompanying bolts with semi-circular and circular cross sections.

Forord

Denne oppgaven ble gjennomført ved Institutt for geovitenskap og petroleum hos Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet høsten 2021 og våren 2022. Oppgaven er en Masteroppgave og virker som den avsluttende innleveringen for undertegnedes mastergrad ved linjen Tekniske Geofag. Oppgavens laboratoriearbeid ble gjennomført i Berglaboratoriet med utstyr tilhørende NTNU og SINTEF. NTNU står som sponsor for oppgaven mens New Concept Mining har bidratt med samtlige stålbolter testene ble utført på. Oppgaveteksten er utformet av Charlie Chunlin Li, professor i bergmekanikk ved NTNU, som også står som hovedveileder for masteroppgaven. Gunnar Vistnes har vært medveileder for laboratoriearbeidet til oppgaven. Formålet med oppgaven har vært å sammenligne laboratorieresultater med de analytiske teoriene utviklet av Charlie C. Li og Ulf Håkansson, samt å generelt øke vår forståelse av installasjonsvariablenes påvirkning av utvidbare bolters bæreevne.

Jeg vil utrette en stor takk til Gunnar Vistnes og Jon Runar Drotninghaug for deres essensielle bidrag ved utførelsen av laboratorietestene til denne oppgaven. Uten deres gavmilde bruk av tid og kunnskap ville laboratoriearbeidet på langt nær latt seg gjennomføre. Videre vil jeg takke Greig Knox fra New Concept Mining for konsultasjon om de benyttede boltene og leveranse av nødvendig testutstyr. Til slutt vil jeg takke Charlie C. Li for stadig godt humør og god faglig veiledning fra hans bunnløse kunnskapsbrønn om alle aspekter av bergbolting.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	v
Abstract	vi
Forord	vii
Innholdsfortegnelse	viii
Figurliste	x
Tabelliste	xiii
Symboler og forkortelser.....	xiv
1. Innledning.....	1
2. Teori.....	4
2.1. Introduksjon av utvidbare friksjonsbolter.....	4
2.2. Analytisk modell for utvidbare friksjonsbolter	6
2.3. Teori uttrekkstest	8
2.4. Teori friluft utvidelsestest	11
2.5. Teori tilt test.....	14
2.6. Teori enaksialt trykkforsøk.....	16
3. Metode	17
3.1. Benyttede materialer	17
3.2. Metode installasjon.....	18
3.3. Metode uttrekkstest	20
3.4. Metode friluft utvidelsestest.....	22
3.5. Metode tilt test	23
3.6. Metode enaksialt trykkforsøk	24
4. Resultater	27
4.1. Resultater installasjon	27
4.2. Resultater uttrekkstest.....	27
4.3. Resultater boltens kontakt med hullveggen	33
4.4. Resultater friluft utvidelsestest.....	34
4.5. Resultater tilt test.....	39
4.6. Resultater enaksialt trykkforsøk.....	40
5. Diskusjon	41
5.1. Diskusjon installasjon	41
5.2. Diskusjon uttrekkstest	41

5.2.1. Fall i bæreevne ved uttrekking.....	41
5.2.2. Påvirkning av bæreevne fra Installeringsstrykk.....	43
5.2.3. Påvirkning av bæreevne fra borehullruhet.....	44
5.2.4. Påvirkning av bæreevne fra borehullstørrelse.....	46
5.3. Diskusjon boltens kontakt med hullveggen.....	49
5.4. Usikkerhet og ukontrollerte variabler.....	50
5.5. Diskusjon friluft utvidelsestest.....	51
5.6. Diskusjon tilt test og enaksialt trykkforsøk.....	55
6. Konklusjon.....	56
Referanser.....	58
Vedlegg.....	I
Vedlegg A: Installerings av bolter.....	I
Vedlegg B: Slipemerker på et utvalg bolter.....	IV
Vedlegg C: Friluft utvidelse bildeserie.....	XI
Vedlegg D: Tilt test.....	XVI
Vedlegg E: Enaksialt trykkforsøk.....	XVII

Figurliste

Figur 1. 1: Utvidbar friksjonsbolt.....	2
Figur 2. 1: Utvidbar friksjonsbolt bilde.....	4
Figur 2. 2: Tverrsnitt av utvidbar bolt installert	4
Figur 2. 3: RS bolt fra NCM	5
Figur 2. 4: Eksempel på q_1 mot E-modulus med varierende installasjonstrykk.....	7
Figur 2. 5: Eksempel på q_1/p_i mot E-modulus med varierende hull diameter	7
Figur 2. 6: Last-deformasjon diagram for sterke, duktile og energiabsorberende bolter.....	9
Figur 2. 7: Last mot deformasjon ved uttrekkstest av Super Swellex.....	9
Figur 2. 8: Boltetestrigg fra SINTEF/NTNU	10
Figur 2. 9: Konsept for måling av deformasjon av omkrets ved utviding av bolt i friluft	11
Figur 2. 10: Typisk kurve for vanntrykk og diameter mot tid ved friluft utvidelsestest.	12
Figur 2. 11: Typisk kurve for vanntrykk mot diameter i friluft utvidelsestest	12
Figur 2. 12: På- og avlastningsyklus ved en friluft utvidelsestest.....	14
Figur 2. 13: Tilt test av tre kjerner med illustrerte krefter og vinkler	15
Figur 3. 1: Utvidbar friksjonsbolt av typen X-Pandabolt produsert av NCM	17
Figur 3. 2: Vannpumpe av typen «High Pressure Airpump» fra NCM	17
Figur 3. 3: Plan for hullplassering i betongblokk og ferdig installerte bolter	18
Figur 3. 4: Kjerneboring med diamantbor og slagboring med knemater	19
Figur 3. 5: Hullåpning til hull boret med diamantbor og Slagbor	20
Figur 3. 6: Gjengestag heftet på boltene for å utføre uttrekkstest.....	20
Figur 3. 7: Konsept for testoppsett med ekstensometer (Ikke skalert).....	21
Figur 3. 8: Bilde av testoppsett med ekstensometer	21
Figur 3. 9: Konsept for friluft utvidelsestest og bilde av benyttet testrigg.....	22
Figur 3. 10: Rigg til tilt test. Betongkjerner og boltsegment plassert i riggen	23
Figur 3. 11: Måling av diameter av bolt i omegaform	24
Figur 3. 12: Benyttet last-maskin GCTS RTR-4000, utsnitt av prøve installert i maskinen og betongprøven i plasthylse	25
Figur 4. 1: Installasjonstrykk mot tid for bolter i hull av tre ulike diametere	27
Figur 4. 2: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 1 og bolt nr. 2.....	28
Figur 4. 3: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 3 og bolt nr. 4.....	29

Figur 4. 4: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 5, 6, 15 og 16.....	29
Figur 4. 5: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 7 og bolt nr. 8.....	30
Figur 4. 6: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 9, 10, 17 og 18.....	30
Figur 4. 7: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 11 og bolt nr 12.....	31
Figur 4. 8: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 13 og bolt nr. 14.....	31
Figur 4. 9: Maksimal bæreevne fra 18 uttrekkstester av utvidbare friksjonsbolter.....	32
Figur 4. 10: Slipemerkene på bolten angir kontakten mellom bolten og hullveggen	33
Figur 4. 11: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 32, 37, 38 og 39.....	34
Figur 4. 12: Friluft utvidelsestest ved tid T1 (10 sekunder) og T2 (50 sekunder).	35
Figur 4. 13: Friluft utvidelsestest ved tid T3 (54 sekunder) og T4 (59 sekunder).	35
Figur 4. 14. Friluft utvidelsestest ved tid T5 (63 sekunder) og T6 (75 sekunder).	35
Figur 4. 15: Friluft utvidelsestest ved tid T7 (88 sekunder) og T8 (147 sekunder).	36
Figur 4. 16: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 33. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser	36
Figur 4. 17: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 34. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser.	37
Figur 4. 18: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 35. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser.	37
Figur 4. 19: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 36. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser.	38
Figur 4. 20: Utsnitt av vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest Bolt 36 ...	38
Figur 4. 21: Beregnet radiell stivhet K_b mot estimert diameter ved friluft utvidelse	39
Figur 5. 1: Maksimal bæreevne plottet mot installeringstrykk	43
Figur 5. 2: Forankringskapasitet plottet mot installeringstrykk. Fra (Bjurholt, 2007)	44
Figur 5. 3: Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 30-31 mm.....	45
Figur 5. 4: Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 33-33,5 mm.....	45
Figur 5. 5: Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 36-37 mm.....	46
Figur 5. 6: Maksimal bæreevne plottet mot borehulldiameter for diamantborede hull	47
Figur 5. 7: Maksimal bæreevne plottet mot borehulldiameter for slaghammerborede hull .	47
Figur 5. 8: Tverrsnitt av bolter installert i tre ulike hullstørrelser	48

Figur 5. 9: Tverrsnitt av utvidet bolt inndelt i seksjoner med ulik grad av kontakt med hullveggen. Basert på slipemerker	49
Figur 5. 10: Fordeling av kontaktspenning mellom en installert bolt og hullveggen. Numerisk modellering (Kim, et al., 2017).....	50
Figur 5. 11: Vanntrykk mot bolt diameter fra Li (2016) og tester utført ved denne oppgaven	52
Figur 5. 12: Skisser av tverrsnitt ved ulike stadier (T1-T8) i friluft utvidelse	52
Figur 5. 13: Vanntrykk og estimert diameter mot tid. T1-T8 angitt på diameter-kurven	53
Figur 5. 14: Vanntrykk mot estimert diameter. T1-T8 angitt på kurven.....	53
Figur 5. 15: Skisser av tverrsnitt ved estimerte diametere fra friluft utvidelse sammenlignet med tverrsnitt av bolter installert i tilsvarende borehulldiametere.....	54

Tabelliste

Tabell 3. 1: Testplan for antall borehull og benyttet installeringsstrykk, hulldiameter og boremetode.....	18
Tabell 3. 2: Diameter til boltseksjonene og betongsylindene benyttet til tilt testen.	24
Tabell 3. 3: Vinkel β for de tre benyttede boltseksjonene ved tilt testen.	24
Tabell 3. 4: Diameter, lengde, vekt og lydshastighet for betongsylindene benyttet til enaksialt trykkforsøk.....	25
Tabell 4. 1: Oversikt over resultater og kommentarer for uttrekkstester.....	28
Tabell 4. 2: Målte friksjonsvinkler.....	40
Tabell 4. 3: Målt UCS beregnet E_t fra enaksialt trykkforsøk.	40
Tabell 5. 1: Forholdstall $K_{F/L}$ for endring av bæreevne over endring av forankret lengde.	42

Symboler og forkortelser

α	Vinkel mellom tilt test oppsett og horisontalplanet [°]
β	Vinkel mellom N og N' i tilt test [°]
ϵ	Tøyning
$\Delta\epsilon_{a,50\%}$	Endring av aksiell tøyning ved 50% av UCS
λ	Koeffisient for boltens radielle glidning
$\Delta\sigma_{a,50\%}$	Endring av aksiell spenning ved 50% av UCS [MPa]
φ_{3k}	Friksjonsvinkel fra 3-kjerne tilt test [°]
ϕ_b	Grunnleggende friksjonsvinkel [°]
φ_b	Grunnleggende friksjonsvinkel ved enkeltforsøk [°]
c	Deformasjon av omkrets bolt ved friluft utvidelsestest [mm]
D_s	Diameter betongsylinder UCS [mm]
d	Estimert diameter bolt ved friluft utvidelsestest [mm]
Δd	Endring av estimert diameter ved elastisk deformasjon [mm]
d_0	Profildiameter til bolt [mm]
E	Youngs elastisitetsmodulus [GPa]
E_t	Tangentbasert Youngs elastisitetsmodulus [GPa]
F	Bæreevne bolt [kN]
F_{maks}	Maksimal observert bæreevne bolt [kN]
F_{min}	Bæreevne ved testslutt [kN]
g	Gravitasjonsakselerasjon [m/s^2]
i	ruhetsvinkel borehull [°]
K_b	Radiell stivhet til bolt [MPa]
$K_{F/L}$	Koeffisient for bæreevnefall ved uttrekkstest
K_r	Bergmassens radielle stivhet [MPa]
L	Effektiv forankret lengde [mm]
ΔL	Deformasjon ved uttrekkstest av forankret lengde [mm]
L_s	Lengde betongsylinder UCS [mm]

l	Opprinnelig lengde [mm]
Δl	Elastisk deformasjon [mm]
N	Normalkomponent av W_g i tilt test [N]
N'	Normalkomponent av W_g i tilt test fordelt på to kjerner [N]
n	Antall forsøkgjennomføringer
p_i	Trykk på borehull ved installasjon [MPa]
p_{p0}	Vanntrykk i pumpe [MPa]
Δp_{p0}	Endring av vanntrykk i pumpe ved elastisk deformasjon [MPa]
p_{pm}	Makstrykk ved installering [MPa]
q	Kontaktspenning mellom bolt og borehull [MPa]
q_1	Primær kontaktspenning [MPa]
q_2	Sekundær kontaktspenning [MPa]
R^2	Bestemmelseskoeffisient for trendlinjer
R_b	Profilradius til bolt [mm]
R_r	Radius til betongsylinder tilt test [mm]
r_n	Borehullradius [mm]
T	Skjærkomponent av W_g i tilt test [N]
u_b	Radiell boltedeformasjon ved fjerning av vanntrykk [mm]
u_{bq}	Radiell boltedeformasjon fra bergmassekompresjon [mm]
W	Masse til boltseksjon [kg]
x	Glidningslengde bolt [mm]
ISRM	International Society for Rock Mechanics
NCM	New Concept Mining
NS	Norsk Standard
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
SA	Standardavvik
UCS	Uniaxial Compressive Strength

1. Innledning

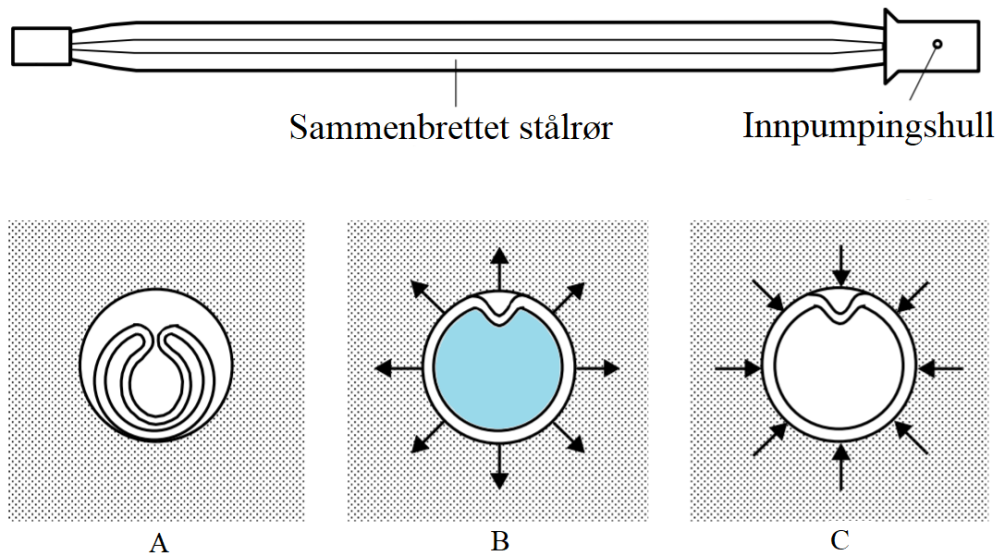
Med et stadig økende transportnett, bebyggelse og gruvedrift er sikring av bergmasser et konstant behov. Sikring gjøres eksternt, på overflaten eller internt i bergmassen. Den viktigste sikringskomponenten som benyttes til formålet i dag er bergbolter og kabler (Li, 2017). Bergboltene utgjør en intern sikring ved å forankres på bergveggen og inne i berget. Den ytre delen av bolten belastes av løst eller deformerende berg mens den indre delen forankrer det eksponerte berget til bergmassen.

Bolter kan benyttes som sikring i alle situasjoner med eksponert berg. Eksempler på dette er tunneler, bergrom, veiskjæringer, byggegrop, gruver og naturlige skrånninger. I disse varierte situasjonene finner vi ulike bergmekaniske forhold. I dype tunneler finner vi høye spenninger, i bergrom med lite overdekning kan vi oppleve vannlekkasje, i naturlige skrånninger kan vi ha svake forvitrede bergarter. I tillegg til forholdene bolten installeres i er det også ulike krav til sikring. En arbeidssikring har en kort behøvd virketid, og kan derfor være enklere enn en permanent sikring. Videre er kravene til sikring i en vanntunnel eksempelvis lavere enn i en høytrafikkert vegtunnel.

Siden det eksisterer en rekke ulike bergmekaniske forhold og ulike krav til sikring er det utviklet en rekke ulike bolter. Bolten som er fokuset i denne teksten, er en friksjonsbolt som utvides ved hjelp av vanntrykk. Friksjonsbolter oppnår bæreevne ved å indusere en spenning mellom bolten og borehullveggen. Forankringen, som strekker seg langs hele bolten, kommer både av mekanisk sammenlåsning og kontaktspenning mellom hullveggen og bolten (Li, 2017).

Den første friksjonsbolten ble introdusert på 70-tallet og var en *Split Set* bolt (Scott, 1976). Deretter ble Swellex-bolten introdusert på 80-tallet (Wijk & Skogberg, 1982). Swellex-bolten var den første friksjonsbolten som benyttet vanntrykk for å etablere forankring til bergmassen. Etter dette har en rekke ulike produsenter lansert ekspanderende friksjonsbolter med det samme generelle designet. Eksempler på dette er DSI Omega bolten produsert av DSI Underground (Turner & Green, 2007), EX300 av Sandvik (Bjurholt, 2007), X-Pandabolt av New Concept Mining (NCM) (NCM, 2021a), M3 Expandable Rock Bolt av Jenmar (Jenmar, 2022) og Expandable Rock Bolt av SSAB (SSAB, 2022).

Bolten er et stålrør som bøyes til en omegaform og forsegles i begge ender, vist i Figur 1. 1. Ved innpumping av vann vil røret utvide seg og presse mot hullveggen. Deretter slippes vannet ut og etterlater bolten formet etter hullets overflateruhet samt i kontaktspenning med borehullveggen (Li, 2016). Dette tilsvarer bolt-designet i X-Pandabolten produsert av NCM som vil benyttes i forsøkene i denne teksten. Et alternativt design er funnet i Hydrabolten av NCM der vanntrykket beholdes i bolten. Denne bolten gir på denne måten en stivere sikring (Ayres & Gardner, 2014).



Figur 1. 1: Øverst: Utvidbar friksjonsbolt. Under: Tverrsnitt av bolt før (A), under (B) og etter (C) vanninjeksjon. Figur modifisert fra (Li, 2016).

Siden den utvidbare bolttypen ble introdusert er det gjort ulike tester i laboratoriet og i felt (Turner & Green, 2007), (Li, 2016), (Hagen, et al., 2019). Ofte testes bolten når en ny boltvariasjon introduseres (Wijk & Skogberg, 1982), (Scolari, et al., 2017), eller bolten testes og sammenlignes med andre bolttyper (Grasselli, 2005), (Bjurholt, 2007), (Player, et al., 2009). Mindre utbredt er testing av boltens bæreevne med hensyn til installering og borehullets egenskaper (Håkansson & Li, 1997), (Soni, 2000). Motivasjonen til å se på de sistnevnte kommer fra den teoretiske utredningen om boltens bæreevne.

Analytiske modeller av boltens oppførsel ble påbegynt av Wijk & Skogberg (1982) og videreutviklet av Håkansson og Li (1997), Li og Håkonssen (1999) og Li (2016). Denne teksten vil hovedsakelig knyttes opp mot disse analytiske modellene. Fremtredende blant disse er bæreevnens avhengighet av installasjonsvantrykk, hullstørrelse, hullruhet, radiell-boltstivhet og bergartens stivhet.

For å forklare og forstå boltens oppførsel er også enkelte numeriske modeller blitt lagt frem (Grasselli, 2005), (Carranza-Torres, 2009). Et mer nylig eksempel er den numeriske modelleringen av Kim et al. (2017) som tok for seg boltetungens påvirkning på fordelingen av kontaktspenningen rundt bolten. Deres modell viste at den analytiske antagelsen om jevn spenningsfordeling er en forenkling, samtidig som den underbygget den analytiske konklusjonen om synkende kontaktspenning ved høyere stivhet i bergarten (Kim, et al., 2017).

Kim et al. (2017) så hovedsakelig på bergets stivhet, og påpekte at flere studier burde gjennomføres om de andre faktorene som påvirker bæreevnen nevnt av Li (2016). De anbefalte videre arbeid både numerisk og ved laboratorieundersøkelser der betong kan simulere bergarten. Videre, som påpekt av Li (2016), har testing av Gramström på 80 tallet og Soni (2000), gitt noe ulike resultater angående boltens bæreevne som funksjon av borehullstørrelse.

På bakgrunn av dette foreligger det dermed motivasjon til å gjennomføre laboratorietesting med fokus på elementene, illustrert av de analytiske modellene, som påvirker boltens bæreevne. Dette med mål om å gi et bilde på modellens overenstemmelse med virkeligheten.

For å sammenligne den teoretiske påvirkningen av de ulike faktorene, nevnt av Li (2016), med påvirkningen man opplever i praksis vil det her gjennomføres laboratorieforsøk på ekspanderende friksjonsbolter. Testene vil være uttrekkstester (pull-out tester) der lastbæreevnen til boltene vil måles. Ved å endre på installeringsstrykk, hullruhet og hulldiameter, for deretter å sammenligne resultatene, skal følgende forskningsspørsmål undersøkes:

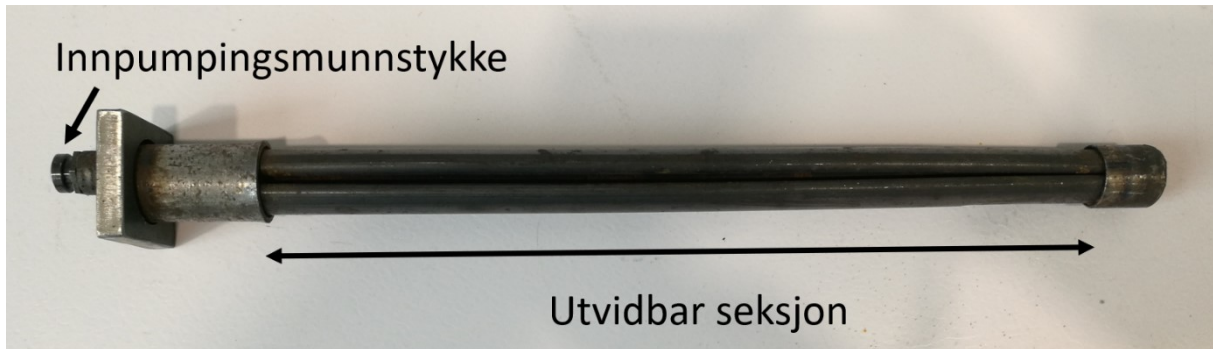
- Påvirkning av bæreevne fra installasjonstrykk. Ved endring av installeringsstrykk og bruk av slaghammerboring.
- Påvirkning av bæreevne fra borehullets overflateruhet. Ved sammenligning av slaghammerhull og diamantborhull.
- Påvirkning av den primære kontaktspenningen (q_1) fra utfoldingsgraden til boltene. Ved endring av hulldiameter og bruk av diamantbor.
- Påvirkning av bæreevne fra utfoldingsgraden til boltene. Ved endring av hulldiameter og bruk av slaghammerboring.
- Påvirkning av boltens radielle stivhet fra utfoldingsgraden til boltene. Ved utviding av bolt i friluft og måling av på- og avlastingssykluser.

Tekstens neste del vil omhandle teori rundt ekspanderende friksjonsbolter samt relevant teori til uttrekkforsøkene. Det vil også gjennomgå teori knyttet til de andre forsøkene som er nødvendige for å etablere materialparameterne til boltene og betongmassen som benyttes. Etter teoridelen følger metodebeskrivelse til de utførte forsøkene. Denne vil inneholde en testplan for uttrekkstestene, og beskrivelser av de benyttede materialene. Metodedelen etterfølges av en resultatdel med observasjonene fra forsøkene. Deretter vil resultatene drøftes i diskusjonsdelen, og forskningsspørsmålene besvares i konklusjonsdelen.

2. Teori

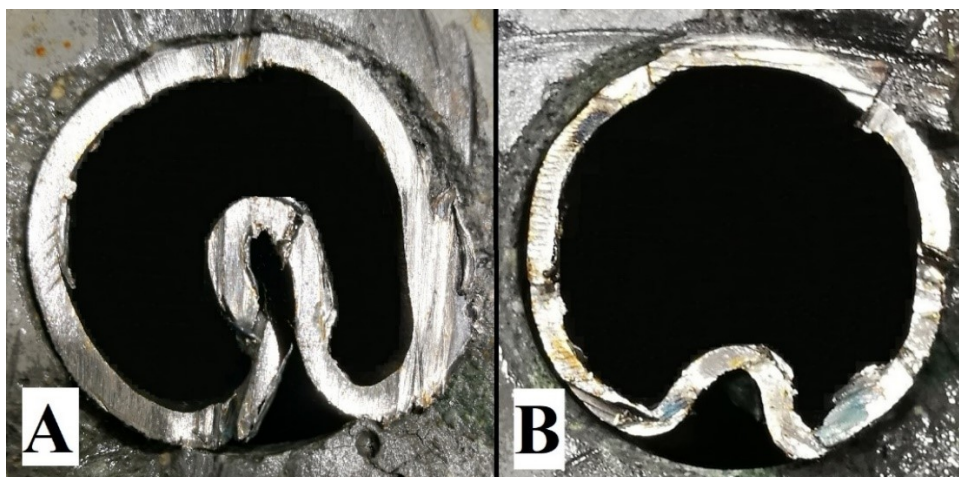
2.1. Introduksjon av utvidbare friksjonsbolter

I denne teksten vil det utføres laborietesting på en friksjonsbolt. Friksjonsbolten er oppblåsbar/utvidbar/ekspanderbar ved hjelp av vanntrykk, og tilsvarer designet til Swellex-bolten. Bolten er et stålrør som er klemt sammen til en omegaform og tett i begge ender med mulighet for vanninnpumping, se Figur 2. 1.



Figur 2. 1: Utvidbar friksjonsbolt.

Den opprinnelige diameteren til stålrøret defineres her som originaldiameteren til bolten. Diameteren til den sammenklemt omegaformen vil her defineres som profildiameteren. Ved installering pumpes vann inn i bolten og det resulterende vanntrykket utvider bolten til den presser mot borehullveggen. Som vist i Figur 2. 2A og Figur 2. 2B bør borehulldiameteren være mindre enn originaldiameteren til bolten, og dermed skape en «tunge-form» i stålet.



Figur 2. 2: Tverrsnitt av utvidbar bolt installert i nedre (A) og øvre (B) sjikt av anbefalt størrelse.

Et fullt utbrettet stålrør vil være radielt sterkere, men en hulldiameter større enn originaldiameteren vil føre til at bolten mister kontakt med hullveggen, og bæreevnen blir lik null. Et slikt tilfelle bør tas høyde for i svake bergarter der bolten kan utvide hullet og slik miste kontakten (Li, 2017). Blir hullet derimot mindre blir tungen større, boltens stivhet

mindre, og dermed bæreevnen lavere, se Figur 2. 2A. Dermed oppgis det et anbefalt spekter for borehulldiameter for en gitt bolt.

Sett opp mot andre bolttyper er fordelene til en friksjonsbolt den relativt raske og enkle installeringen. Ved installering behøves ikke mørtel eller polyester (men istedenfor vann), og boltene gir umiddelbar sikring. Friksjonsbolter kan også ta opp store deformasjoner i bergmassen og likevel opprettholde bæreevne (Li, 2017). Dermed løser den hovedproblemet til faststøpte bolter der deformasjon kan føre til høy spenningskonsentrasjon og brudd i boltene. Boltene kan ta opp deformasjonen ved å gli langs borehullet og beholder bæreevnen på grunn av residualspenningen mellom boltene og hullveggen. Dog hvis boltene er lange, og den samlede bæreevnen stor, vil brudd i selve boltkroppen kunne inntreffe før boltene begynner å gli.

For å oppnå glidning ved friksjonsbolter ønsker man altså å holde seg under kritisk forankret lengde. Kritisk forankret lengde er den maksimale forankrede lengden en bolt kan ha der den kan trekkes ut uten å gå i brudd (Li, 2017). For en innstøpt bolt ønsker man istedenfor en lengde lengere enn kritisk lengde slik at boltens fulle styrke blir utnyttet før brudd.

En annen fordel er at grunndesignet gir mulighet for fleksibilitet. Et eksempel på dette er den nevnte Hydraboltene der vann under høyt trykk fra oppblåsingen forblir i boltene permanent. Dette medfører et større trykk mellom berget og boltene, og dermed en stivere sikring som kan bære høyere last. En annen variasjon er den såkalte RS-bolten produsert av NCM som er en utvidbar friksjonsbolt med en 45° bøy på midten, vist i Figur 2. 3 (NCM, 2021b). Ved RS-bolten utnyttes dermed rørets tøyelighet, og muliggjør installering av lange bolter i trange bergrom.



Figur 2. 3: RS bolt fra NCM. Figur fra (NCM, 2021b).

Den tydeligste ulempen ved boltene er den lave bæreevnen. For å oppnå tøyeligheten til å utvides ved vanntrykk er tverrsnittarealet av stålboltene redusert. I tillegg må boltene som

nevnt holde seg under kritisk lengde hvis man ønsker å oppnå glidning. Dette betyr at stålets fulle styrke ikke utnyttes i det tilfellet. Det må likevel bemerkes at bolten godt kan oppnå en relativt høy bæreevne og gå i brudd uten glidning.

Fravær av mørtel og polyester fører også til en ulempe ved bolten. Den direkte kontakten mellom berg og stål gir mulighet for vannkontakt på et stort overflateareal. Da bolten allerede har tynne stålvegger kan bæreevnen raskt synke når disse svekkes (Hadjigeorgiou, et al., 2019). For å forhindre dette kan boltene dekkes med korrosjonsresistente materialer som gir varierende beskyttelse i varierende kjemiske miljø (Hadjigeorgiou, et al., 2019).

2.2. Analytisk modell for utvidbare friksjonsbolter

For å beskrive boltens oppførsel er det utviklet analytiske modeller. Mest sentralt for arbeidet i denne teksten er estimering av boltens bæreevne. Wijk og Skogberg (1982) gir at kraften nødvendig for å trekke ut bolten tilsvarer kontaktspenningen mellom bolten og hullveggen multiplisert med arealet denne spenningen virker over, samt en ruhetskoeffisient for kontakten. Håkansson og Li (1997) gir en videreutviklet versjon vist i ligning 2.1.

$$F = 2 * \pi * r_h * L * q * \tan(\phi_b + i) \quad (2.1)$$

Der F er den maksimale lasten bolten kan bære, r_h er radiusen til borehullet, L er den effektive boltlengden, q er kontaktspenningen mellom bolten og borehullet, ϕ_b er grunnleggende friksjonsvinkel (Basic friction angle) mellom bolten og borehullet, og i er ruhetsvinkelen til borehulloverflaten.

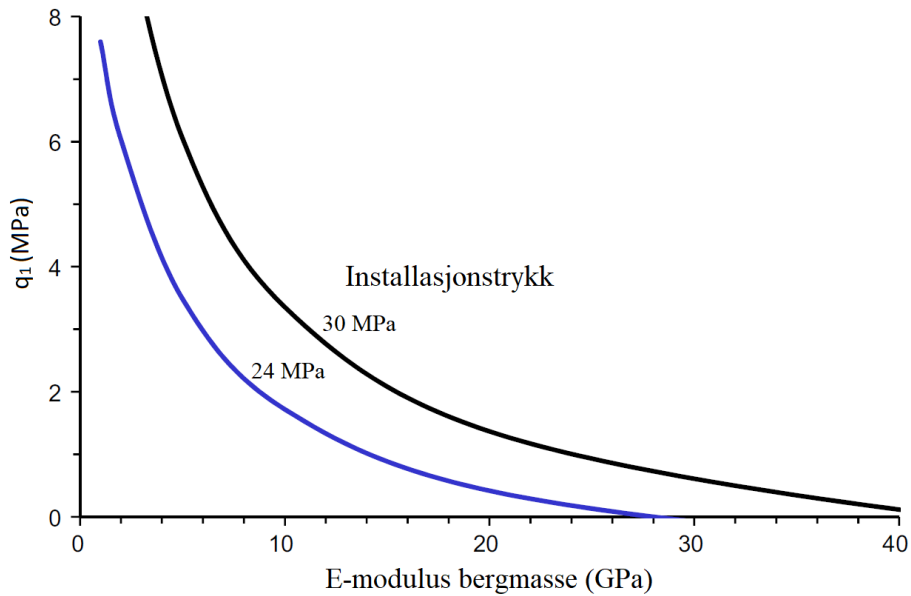
Kontaktspenningen q kan deles opp i to deler q_1 og q_2 (Li, 2017). q_1 er den primære kontaktspenningen som skapes når bolten installeres. q_2 er den sekundære kontaktspenningen som skapes av overflateruheten til borehullet ved glidning av bolten.

Ved installasjon av bolten induseres et vanntrykk som utvider bolten og deretter deformerer bergmassen rundt borehullet. Når vanntrykket slippes ut, vil bergmassen og bolten elastisk deformerer radielt innover mot borehullsentrum. Dersom den elastiske deformasjonen til bergmassen er størst, oppstår det en kontaktspenning q_1 (Li, 2016). Dermed blir q_1 avhengig av bergartens stivhet, siden en bergart med en høy elastisitetsmodulus vil bli mindre radielt deformert av det induserte trykket. Videre vil vanntrykket som skaper denne deformasjonen også påvirke q_1 . Boltens deformasjon vil avhenge av dens radielle stivhet (K_b). Den analytiske modellen som her vil benyttes ble utledet av Li (2016) og forenklet av Li (2017). I ligning 2.2 gis et analytisk uttrykk for q_1 .

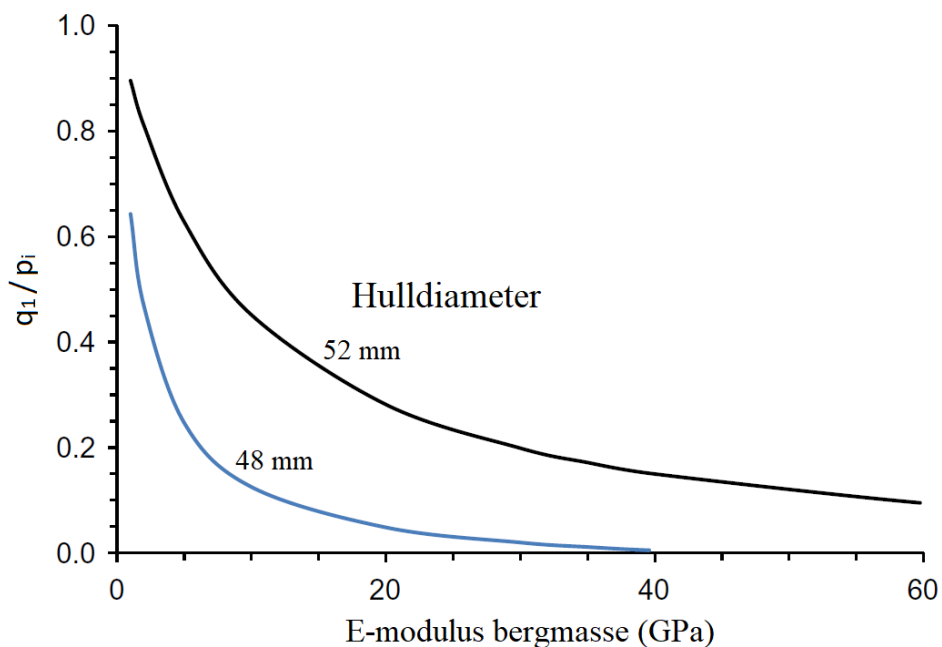
$$q_1 = \frac{p_i(K_b - \lambda K_r)}{K_b + K_r} \quad (2.2)$$

Der p_i er trykket på borehullveggen ved installasjon, K_b er Boltens radielle stivhet, K_r er bergmassens radielle stivhet, og λ er en koeffisient som beskriver hvor fritt bolten kan gli langs tverrsnittet av borehulloverflaten når den krymper. λ går fra 0 til 1 som henholdsvis tilsvarer fullstendig sammenlåsing og fri glidning.

Med denne modellen, som baserer seg på en rekke av bergets, stålets, og installasjonens egenskaper, kan man estimere hvilke faktorer som påvirker kontaktspenningen og dermed bæreevnen. I de følgende grafene, gjengitt fra Li (2017), vises påvirkningen fra installasjonstrykk, borehulldiameter og stivhet til bergarten (E-modulus) på q_1 .



Figur 2. 4: Eksempel på q_1 mot E -modulus med varierende installasjonstrykk. Figur modifisert fra (Li, 2017).



Figur 2. 5: Eksempel på q_1/p_i mot E -modulus med varierende hulldiameter. Figur modifisert fra (Li, 2017).

Grafene bekrefter at modellen angir lavere q_1 ved økende bergmassestivhet. Figur 2. 5 viser at en økende hull diameter i en tenkt situasjon gir høyere q_1 . Hulldiameteren er i modellen innbakt i K_b utledet av Li (Li, 2016). I tillegg til bidraget fra q_1 vil en økt hull diameter gi et økt kontaktareal og dermed videre øke bæreevnen. Merk at modellen ikke tar høyde for at bæreevnen vil bli null hvis borehullet blir så stort at bolten ikke oppnår kontakt. Figur 2. 4 viser at modellen gir økende q_1 ved økende installasjonstrykk.

Når bolten utvides ved installering, vil stålet forme seg etter uregelmessighetene i borehullveggen. Dette gir en mekanisk sammenlåsning som danner grunnlaget for den sekundære kontaktpenningen q_2 (Li, 2016). q_2 induseres når bolten trekkes ut og de to uregelmessige overflatene til bolten og borehullet tvinges mot hverandre. Li (2017) gir at q_2 kan beskrives av ligning 2.3.

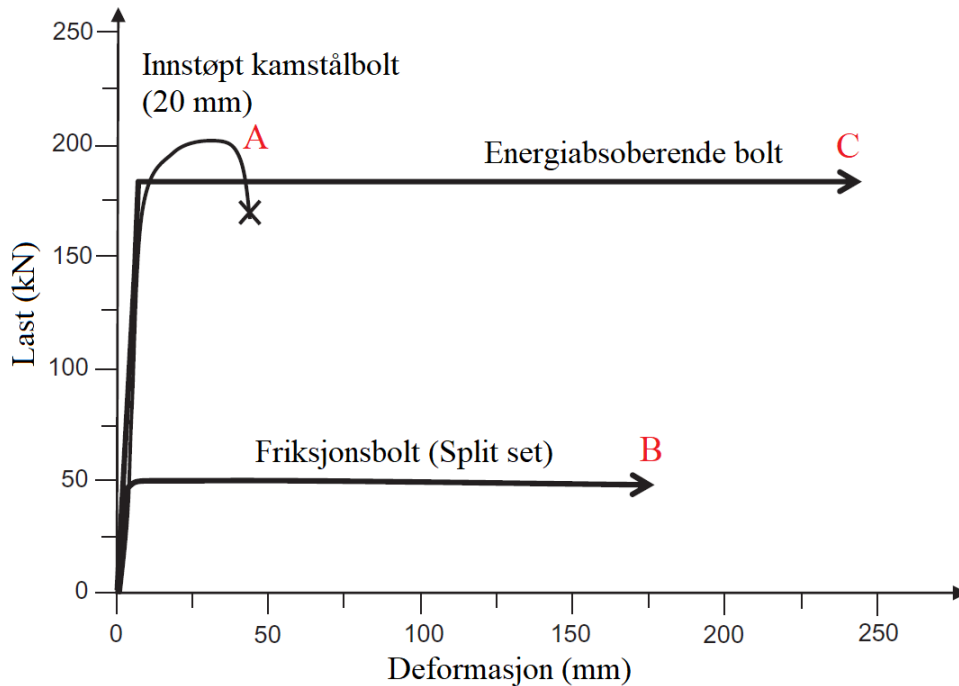
$$q_2 = \frac{xK_b \tan(i)}{r_h} \quad (2.3)$$

Der x er glidningslengden, i er hullets gjennomsnittlige ruhetsvinkel og r_h er borehullets radius. Dermed angir den analytiske modellen at økende ruhet i borehullet gir en økende bæreevne. Merk at denne ligningen gjelder for små deformasjoner. Ved uttrekning av bolten vil q_2 stige, slik modellen tilsier, frem til plastisk deformasjon av ujevnheter ved knusning fører til at q_2 igjen synker. Denne knusningen av ruheten til bergarten kan i svake bergarter forekomme allerede ved installering av bolten. For harde bergarter vil q_2 likevel være signifikant etter stor deformasjon (Li, 2016). Dette medfører at q_1 er dominerende for svake og myke bergarter, mens q_2 er dominerende for sterke og harde bergarter (Li, 2016).

I uttrekkstestene gjennomført for denne teksten vil det fokuseres på om modellens generelle konklusjoner stemmer for parameterne: installasjonstrykk, hullruhet og hull diameter.

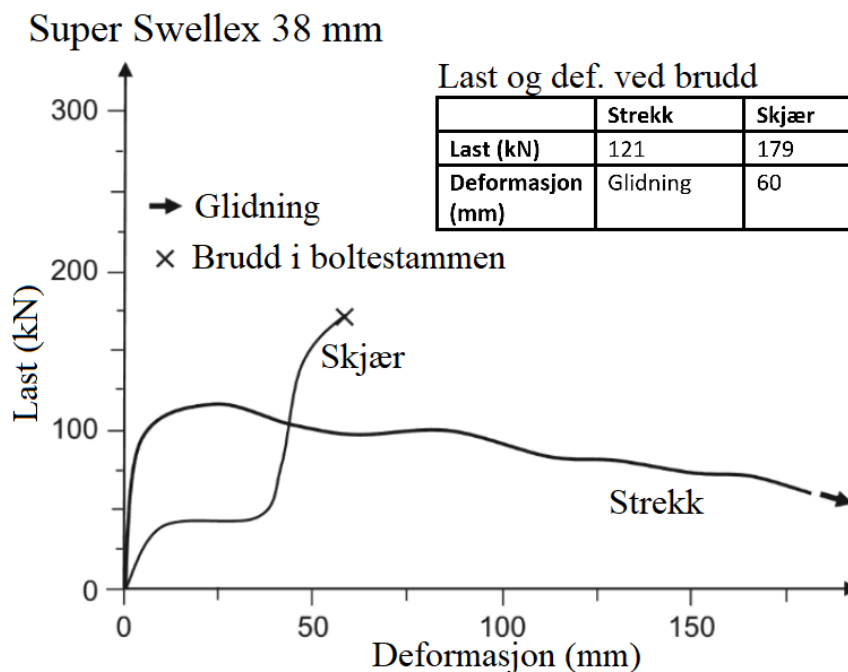
2.3. Teori uttrekkstest

Sentrale mål for en bolts prestasjon er den maksimale lasten den kan bære og hvor stor deformasjon bolten kan ta opp før brudd. For å måle disse verdiene kan man benytte uttrekkstester (Pull-out test). Testene kan gjøres statisk med jevnt økende belastning eller dynamisk der høy belastning påføres over kort tid for å simulere bergslag eller sprakberg (ASTM, 2008a). Ved å plote den påførte lasten mot den målte deformasjonen får man en last-deformasjonskurve. I Figur 2. 6 gis slike last deformasjonskurver for ulike bolte kategorier.



Figur 2. 6: Last-deformasjon diagram med typiske kurver for sterke (A), duktile (B) og energiabsorberende bolter. Figur modifisert fra (Li, 2017).

Med utgangspunkt i disse kurvene deler Li (2010) bolter inn i kategoriene: sterke (A), duktile (B), og energiabsorberende (C). De sterke boltene har høy bæreevne, men lav deformasjonsevne. De duktile har høy deformasjonsevne, men lavere bæreevne. De energiabsorberende boltene forsøker å oppnå både høy deformasjon- og bæreevne. Tidligere testing viser at en utvidbar friksjonsbolt som oppnår glidning passer best i den duktile kategorien som vist i Figur 2. 7.

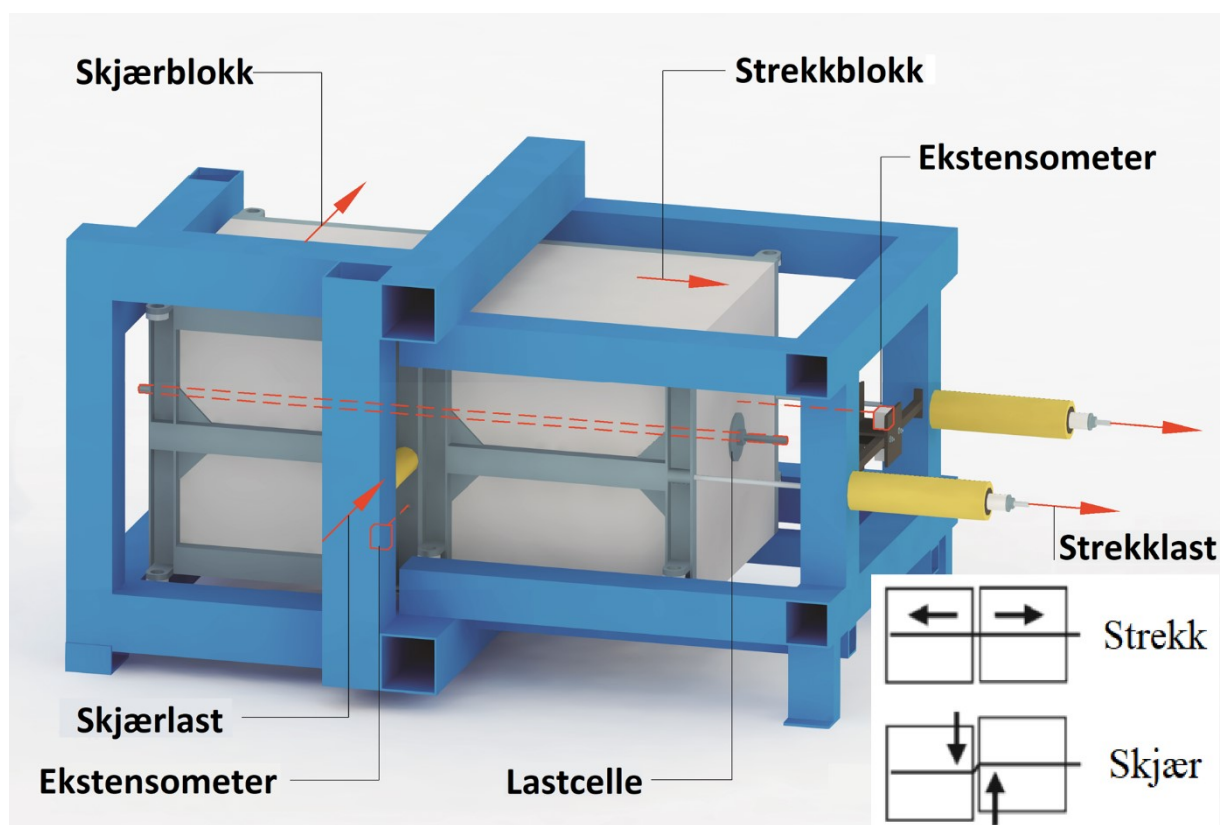


Figur 2. 7: Last mot deformasjon ved uttrekkstest av Super Swellex bolt utført av Bjurholt (2007). Figur modifisert fra (Li, 2017).

Figuren, basert på testing av Bjurholt (2007), viser en typisk last- og deformasjonskurve for en vannutvidet friksjonsbolt. Bolten oppnår en middels bæreevne og en stor deformasjon ved glidning. Bæreevnen synker noe, som kombinasjon av knusning av uregelmessigheter i hulloverflaten samt at forankringsarealet til bolten gradvis synker når bolten trekkes ut av hullet. Figuren viser også boltens oppførsel utsatt for skjær, der den først klemmes flat og deretter oppnår en deformasjon og bæreevne som grovt tilsvarer en tilsvarende test av en standard innstøpt kamstålbolt.

Testingen i eksempelet over ble, i likhet med testingen utført for denne teksten, utført som en statisk test. ASTM har tidligere gitt testoppsett for slik statisk testing både i lab og i felt (ASTM, 2008a), (ASTM, 2008b). Laboratorietesting benytter et stålrør som fylles med mørtel eller polyester. Ulempen med denne testen er at den ikke gir en god simulering av kontakten mellom forankringen og bergmassen. Siden nettopp denne kontakten er essensiell i variablene som her vil undersøkes er denne metoden uegnet. Feltesting gir på sin side en god simulering av en in situ installasjon (Hadjigeorgiou & Tomasone, 2018). Hovedproblemene med feltesting er at bergmassekvaliteten er vanskelig å kontrollere og dermed introduseres som en variabel, samt at bolter sjelden testes til brudd in situ (Hadjigeorgiou & Tomasone, 2018).

Hagen et al. (2019) argumenterer at mangelen på simulering av hullruhet og svakhet i simulering av den radielle stivheten til bergarten gjør laboratorieoppsettet til ASTM mindre egnet for bolter som forankres av friksjon og mekanisk sammenslåing. I stedet for foreslås det å benytte testoppsettet utviklet av SINTEF og NTNU vist i Figur 2. 8.



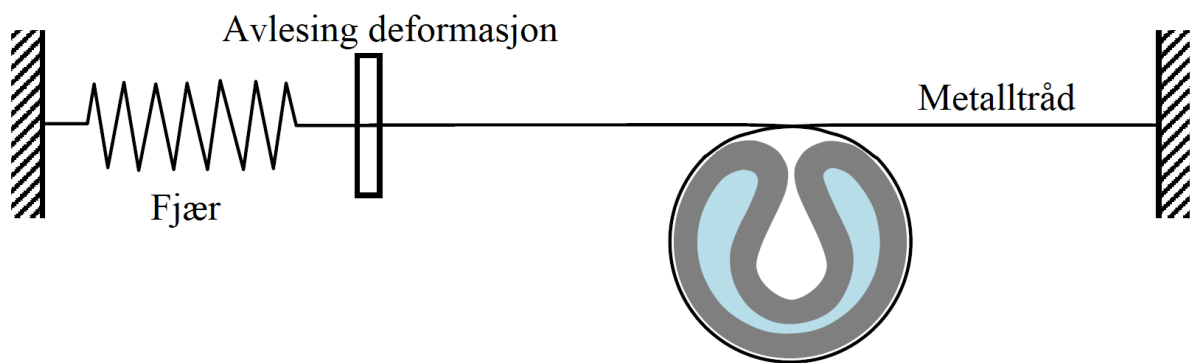
Figur 2. 8: Boltetestrigg fra SINTEF/NTNU. Figur modifisert fra (SINTEF, u.d.) og (Li, 2017).

Oppsettet, som ble benyttet i testene vist i Figur 2. 6 og Figur 2. 7, består av to betongblokker på ca. en kubikkmeter som kan beveges for å indusere skjær- og strekkbelastning på en installert bolt. Boltene installeres i hull som bores inn i betongblokken.

Testene i denne teksten vil følge prinsippene til testing i SINTEF/NTNU-riggen men benytte bare én betongblokk på grunn av kort lengde på bolter. Testoppsettet vil introduseres nærmere i metodedelen.

2.4. Teori friluft utvidelsestest

For å forstå boltens oppførsel under installering kan man gjennomføre en utviding av bolten med vanntrykk i friluft. Som beskrevet av Li (2016) kan en tråd føres rundt tverrsnittet av en bolt og festes i en fjær, se Figur 2. 9.



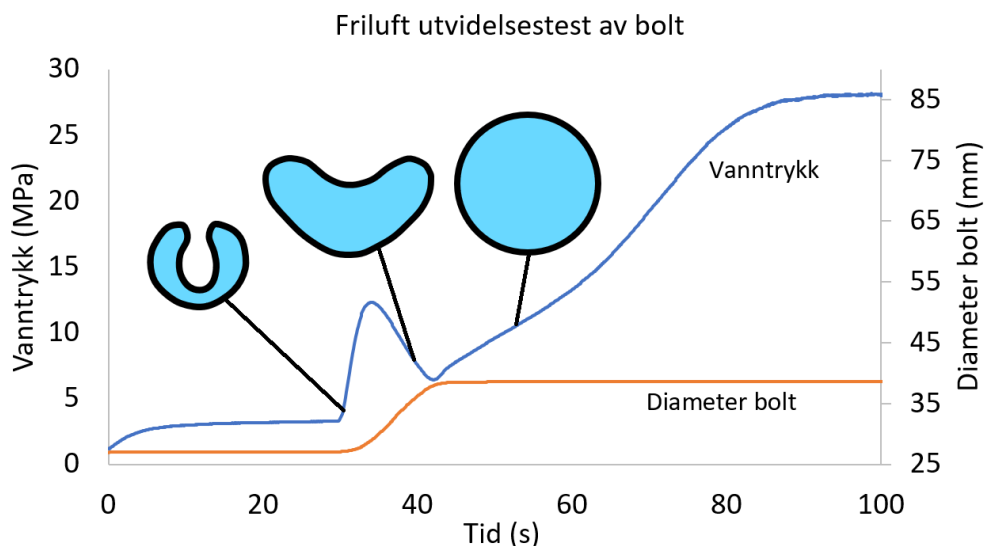
Figur 2. 9: Konsept for måling av deformasjon av omkrets ved utviding av bolt i friluft. Figur modifisert fra (Li, 2016).

Når bolten blåses opp måles vanntrykket samt bevegelsen til fjæren. Fjæren i oppsettet kan erstattes med et fjærbasert trådekstensometer og dermed gi en elektronisk samtidsmåling av bevegelsen. Bevegelsen i tråden tilsvarer endring i omkretsen til bolten. Dermed kan boltens diameter estimeres med ligning 2.4.

$$d = d_0 + \frac{c}{\pi} \quad (2.4)$$

Der d er boltens estimerte diameter, c er den observerte deformasjonen av omkretsen, og d_0 er profildiameteren altså diameteren til den sammenklemte bolten.

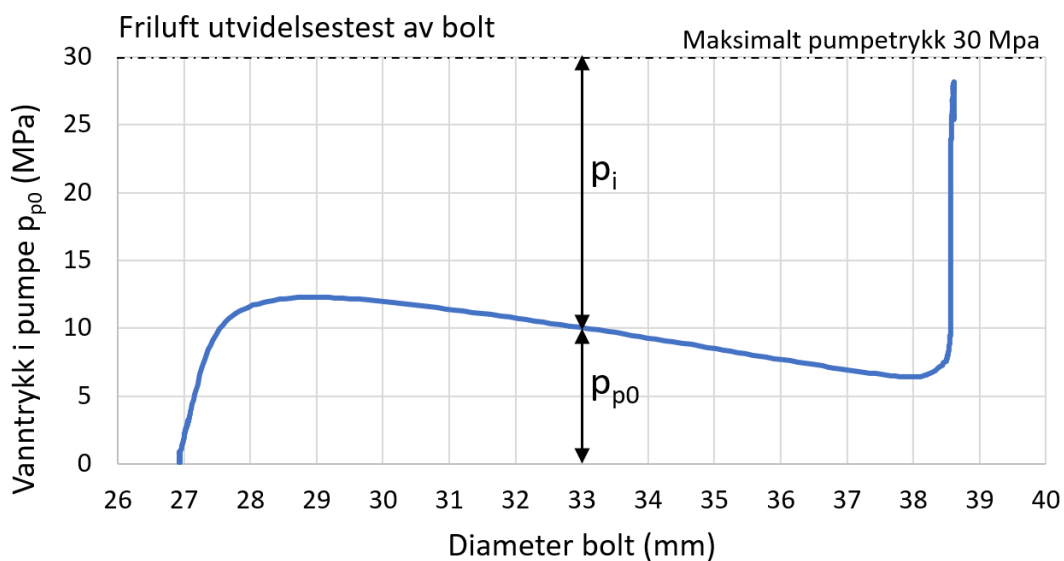
Ved å plote den utregnede diameteren og vanntrykket i pumpen mot tid kan boltens oppførsel ved utvidelse observeres. Figur 2. 10 viser en typisk kurve for en kort bolt.



Figur 2. 10: Typisk kurve for vanntrykk og diameter mot tid ved friluft utvidelsestest.

I eksempelet over settes først vanntrykket til ca. 3 MPa som ikke gir deformasjon av bolten. Når vanntrykket deretter økes, begynner deformasjonen etterfulgt av et fall i vanntrykket. Vanntrykket faller siden det på dette tidspunktet kreves mindre spenning for å plastisk deformere bolten. Vanntrykket faller til bolten oppnår originaldiameteren, og øker deretter mot makstrykket. Lignende kurver ble funnet av Li i 2016 og av Håkansson i 1996 (Li, 2016). Li (2016) illustrerer at en lengere bolt vil gi en flat seksjon på vanntrykkskurven der originaldiameteren er oppnådd. Dette er fordi bolten utvides på midten først og i denne flate seksjonen utvides i den resterende lengden.

Ved å plote den beregnede diameteren mot vanntrykket kan man observere at det først kreves et relativt høyt trykk for å initialisere deformasjon av bolten, etterfulgt av det synkende trykket når diameteren øker. Når bolten oppnår originaldiameteren til stålrøret, øker igjen trykket til det bestemte trykkmaksimum. En typisk progresjon vises i Figur 2. 11.



Figur 2. 11: Typisk kurve for vanntrykk mot diameter i friluft utvidelsestest. p_{p0} er pumpetrykket, p_i angir trykket på hullveggen fra bolten.

Denne grafen kan benyttes til å bestemme trykket på hullveggen fra bolten under installasjon (p_i) nevnt ovenfor. For en gitt diameter vil en del av vanntrykket fra pumpen (p_{pm}) gå med til å etablere tøyning av stålbolten (p_{p0}) (Håkansson & Li, 1997). I eksempelet i Figur 2. 11 kan man altså for diameter lik 33 mm lese av p_{p0} . Da er p_i gitt av ligning 2.5.

$$p_i = p_{pm} - p_{p0} \quad (2.5)$$

Der p_{pm} er det maksimale vanntrykket benyttet ved installasjon av bolten. Grafen viser at p_i øker ved økende borehulldiameter da mindre vanntrykk behøves for å deformere bolten. Gitt modellen for q_1 i ligning 2.2 vil dermed kontaktspenningen ha et positivt bidrag fra p_i ved økende diameter.

Også den radielle stivheten til bolten (K_b) påvirkes av borehulldiameteren. Hovedsakelig avhenger dette av formen på tungen i den sammenbrettede bolten. En lite åpnet tunge kan lettere deformeres radielt enn et sekulært rør. Det er derfor ønskelig å estimere den radielle stivheten for ulike borehulldiameter. I Li (2017) gis K_b ved ligning 2.6 og 2.7.

$$K_b = \frac{\lambda p_i r_h}{u_b} \quad (2.6)$$

$$K_b = \frac{q_1 r_h}{u_{bq}} \quad (2.7)$$

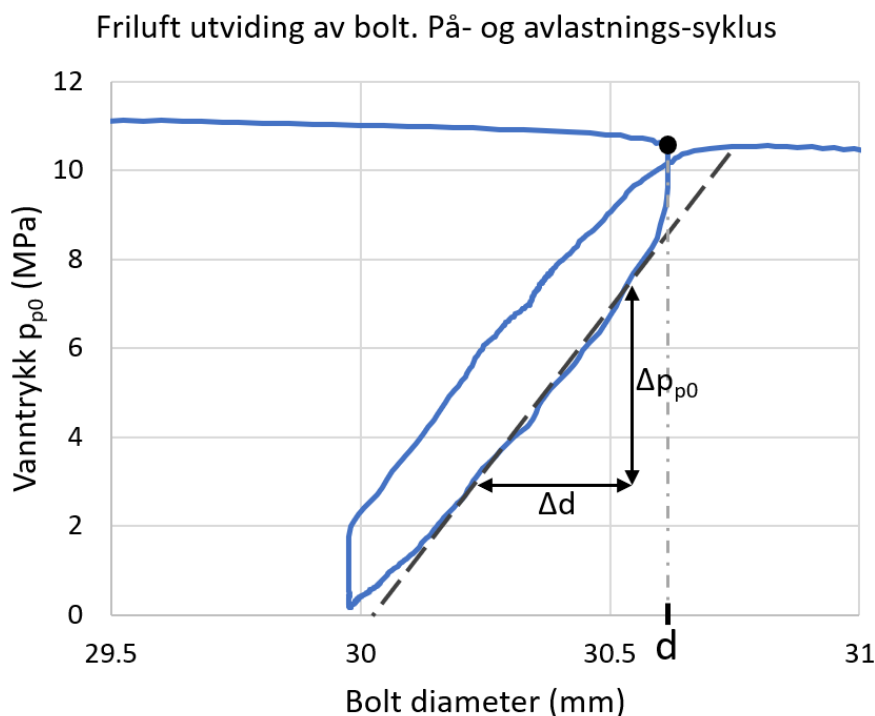
Der u_b er deformasjonen til bolten når vanntrykket fjernes, og u_{bq} er deformasjonen til bolten skapt av bergmassen som oppnår trykket q_1 . Ved å omformulere ligningene ser vi at begge formlene er en påført kraft (p_i, q_1) delt på en tøyning. Tøyning (ε) gis av elastisk deformasjon over opprinnelig lengde, gitt i ligning 2.8.

$$\varepsilon = \frac{\text{deformasjon}}{\text{oprinnelig lengde}} = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.8)$$

Den omformulerte ligning 2.7 illustrerer hvordan K_b etableres fra kraft over tøyning i ligning 2.9.

$$K_b = \frac{q_1}{\frac{u_{bq}}{r_h}} = \frac{\text{kraft}}{\text{tøyning}} \quad (2.9)$$

Vi ønsker å benytte friluft-utvidelsesforsøket til å estimere K_b i ulike stadier av utvidelsen av bolten. For å oppnå dette må vi altså ha både en påført kraft og en elastisk tøyning. I dette tilfellet er kraften det påførte vanntrykket p_{p0} . For å finne den elastiske tøyningen for en gitt diameter må vanntrykket fjernes når denne diameteren er oppnådd, og den elastiske sammentrekningen av bolten kan måles. Dette kan gjøres i friluft-oppsettet ved såkalte på- og avlastninger, der vanntrykket slås på og av mens boltens plastiske deformasjon samt elastiske regresjon måles. Figur 2. 12 gir et eksempel på en på- og avlastningscyklus i friluft.



Figur 2. 12: På- og avlastningssyklus ved en friluft utvidelsestest. Vanntrykk plottes mot beregnet diameter. Også oppgitt er Δd og Δp_{p0} fra den lineære seksjonen av syklusen, samt diameteren (d) der syklusen ble igangsatt.

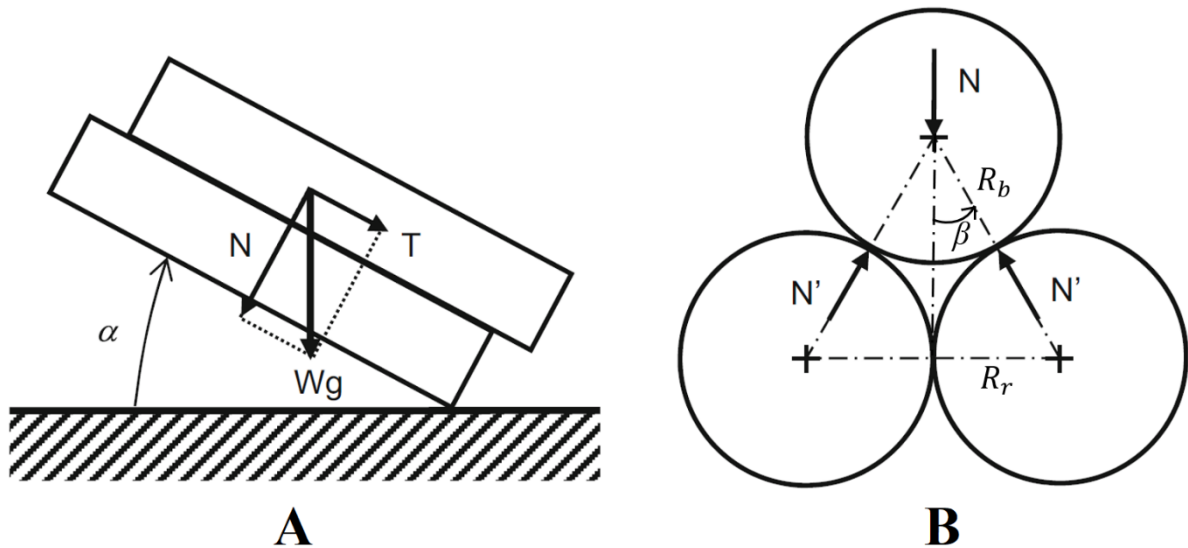
Kurven viser at tøyningen mot trykket er ujevnt i topp og bunn. Derfor benyttes den lineære delen av avlastningsseksjonen til å finne stigningstallet. Dermed kan K_b etableres ved ligning 2.10.

$$K_b = \frac{\Delta p_{p0}}{\frac{\Delta d}{d}} = \frac{\Delta p_{p0} * d}{\Delta d} \quad (2.10)$$

Der Δp_{p0} er endring i vanntrykk i den lineære delen av den elastiske deformasjonen ved avlastning. Δd er tilsvarende endringen i boltens estimerte diameter i den lineære delen av avlastningsdeformasjonen. d tilsvarer den estimerte diameteren til bolten som oppnås rett før avlastning, og gis av ligning 2.4.

2.5. Teori tilt test

Friksjonsboltens bæreevne avhenger av skjærstyrken til kontakten mellom bolten og hullveggen. En verdi som gjerne benyttes for å estimere skjærstyrke er grunnleggende friksjonsvinkel (ϕ_b). For å finne den grunnleggende friksjonsvinkelen til kontakten mellom boltstålet og betongen i hullveggen ble det her gjennomført tilt tester. Metoden benyttet tilsvarer metoden for friksjonsvinkel mellom tre steinkjerner beskrevet i ISRM standarden (Alejano, et al., 2018) og benyttet av Li et al. (2019). I motsetning til standarden er kjernene og bolten av ulik størrelse, slik at formelen benyttet der må justeres noe. Figur 2. 13 viser testens oppsett og kjernenes geometri. Her introduseres vinkel β som vil avvike fra 30° som er teststandard.



Figur 2. 13: Tilt test av tre kjerner med illustrerte krefter og vinkler sett fra siden (A) og fra front (B). Figur modifisert fra (Li, et al., 2019).

Der R_r er betongkjernenes radius, R_b er boltens profil-radius og α er vinkelen til hele testoppsettet ned til det horisontale planet. Figuren viser også de relevante kreftene som virker på systemet. Wg er boltens masse og gravitasjonsakselerasjon, T er skjærkomponenten til Wg , N er normalkomponenten fra Wg som virker ned mot betongkjernene, og N' er denne normalkomponenten fordelt normalt på de to kjernene. Disse er gitt ved følgende ligninger:

$$T = Wg \sin(\alpha) \quad (2.11)$$

$$N = Wg \cos(\alpha) \quad (2.12)$$

$$N' = \frac{Wg \cos(\alpha)}{2 \cos(\beta)} \quad (2.13)$$

Siden radius til de to betongkjernene samt radius til stålbolten er kjent gir trigonometri at:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_r}{R_r + R_b}\right) \quad (2.14)$$

Den maksimale friksjonsmotstanden tilsvarer skjærkraften T (Li, et al., 2019). Slik at:

$$2N' \tan(\varphi_{3k}) = Wg \sin(\alpha) \quad (2.15)$$

Der φ_{3k} er friksjonsvinkelen gitt av ISRM for metoden med 3 kjerner. Ved å sette ligning 2.13 inn i ligning 2.15, og løse for φ_{3k} får vi:

$$\varphi_{3k} = \arctan(\tan(\alpha) * \cos(\beta)) \quad (2.16)$$

Her vil det også benyttes justeringen etablert av Li et al. (2019), for å samsvare den resulterende vinkelen med en standard tilt test. Dermed er friksjonsvinkelen φ_b for et gitt forsøk lik ligning 2.17.

$$\varphi_b = \varphi_{3k} - 3^\circ \quad (2.17)$$

Ved flere utførte tester vil den endelige grunnleggende friksjonsvinkelen φ_b gis som gjennomsnitt ($\overline{\varphi_b}$) av verdiene inkludert standardavvik (SA). Standardavviket angir spredningsgraden til verdiene, og gis av ligning 2.18. n tilsvarer antall forsøk.

$$SA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_{b,i} - \overline{\varphi_b})^2} \quad (2.18)$$

2.6. Teori enaksialt trykkforsøk

Bæreevnen til en utvidbar friksjonsbolt er avhengig av kontaktspenningen mellom boltene og hullveggen, samt mekanisk sammenlåsning mellom borehullveggenes ruhet og boltene som formes etter disse ruhetene. I myke bergarter kan vanntrykket ved boltinstallasjon føre til knusning av ujevnheter i hulloverflaten og dermed senke bidraget fra den mekaniske sammenlåsningen (Li, 2017). Er derimot berget sterkere, kan ujevnheter i overflaten bestå og boltene kan forme seg etter disse. Dermed er bergets styrke innvirkende på boltens bæreevne. For å kategorisere styrken til betongen som benyttes i forsøkene i denne teksten ble det utført enaksiale trykkforsøk. En sylinder belastes i lengderetningen, og deformasjonen fra belastningen måles. Her måles UCS som er det maksimale trykket sylindere tåler før den går i brudd, samt Youngs elastisitetens modulus (E). Youngs modulus angir stivheten til materialet ved elastisk deformasjon. Tangentversjonen av Youngs modulus (E_t) benyttes som vist i ligning 2.19.

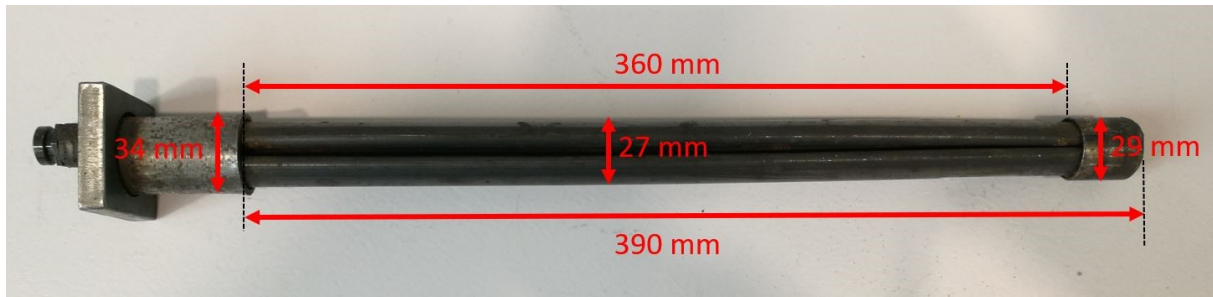
$$E_t = \frac{\Delta\sigma_{a,50\%}}{\Delta\varepsilon_{a,50\%}} \quad (2.19)$$

Der $\Delta\sigma_{a,50\%}$ er endringen av den aksielle spenningen ved 50% UCS, og $\Delta\varepsilon_{a,50\%}$ er endringen av den aksielle tøyningen ved 50% UCS. Ved presentasjon av data beregnes tøyningen (ε) som deformasjon (Δl) over opprinnelig lengde (l) som gitt i ligning 2.8.

3. Metode

3.1. Benyttede materialer

Til samtlige av forsøkene som inneholder en bergbolt benyttes den samme bolten. Bolten er en utvidbar friksjonsbolt av typen X-Pandabolt produsert av NCM. Bolten er produsert i kort lengde beregnet for testing. Den utvidbare seksjonen er 360 mm lang. Tykkelsen til stålet er 2 mm i rørseksjonen. Bolten med mål gis i Figur 3. 1.



Figur 3. 1: Utvidbar friksjonsbolt av typen X-Pandabolt produsert av NCM. Utvidbar lengde er her 36 mm.

Den gjennomsnittlige profildiameteren er 27,0 mm og den gjennomsnittlige originaldiameteren er 38,5 mm. Produsenten anbefaler en hulldiameter på 32-36 mm for bolten, og et pumpetrykk på 27-30 MPa (NCM, 2021a).

For å blåse opp bolten benyttes en vannpumpe vist i Figur 3. 2. Pumpen er av typen «High Pressure Airpump» fra NCM, med et maksimalt anbefalt vanntrykk på 30 MPa (NCM, 2021c). Pumpen tar inn vann og trykkluft, og gir ut vann under trykk. Slangen med vanntrykket passerer en trykkventil som kan justeres til et ønsket maksimalt trykk. Slangen kobles på munnstykket på bolten. Koblingen blir vanntett når trykket settes på. For å måle vanntrykket kobles en trykkmåler til vannslangen.



Figur 3. 2: Vannpumpe av typen «High Pressure Airpump» fra NCM. Figur fra (NCM, 2021c).

For å simulere en bergmasse med få variabler benyttes betong som matriks for installasjon av boltene. Det benyttes en kubisk betongblokk med sider på 95 cm. Blokken er støpt av høystyrke betong (ca. 110-120 MPa UCS) med minst 28 dagers herdetid (Li, et al., 2016),

(Hagen, et al., 2019). Resultater fra USC-tester fra den benyttede blokken gis i resultatdelen. Blokken tilsvarer blokkene benyttet i den tidligere nevnte SINTEF/NTNU-bolteriggen. Diameteren til tilslaget i betongen rangerte mellom ca. 5 mm og 20 mm. Det ble observert relativt store luftbobler i betongen på opp mot 1 cm³.

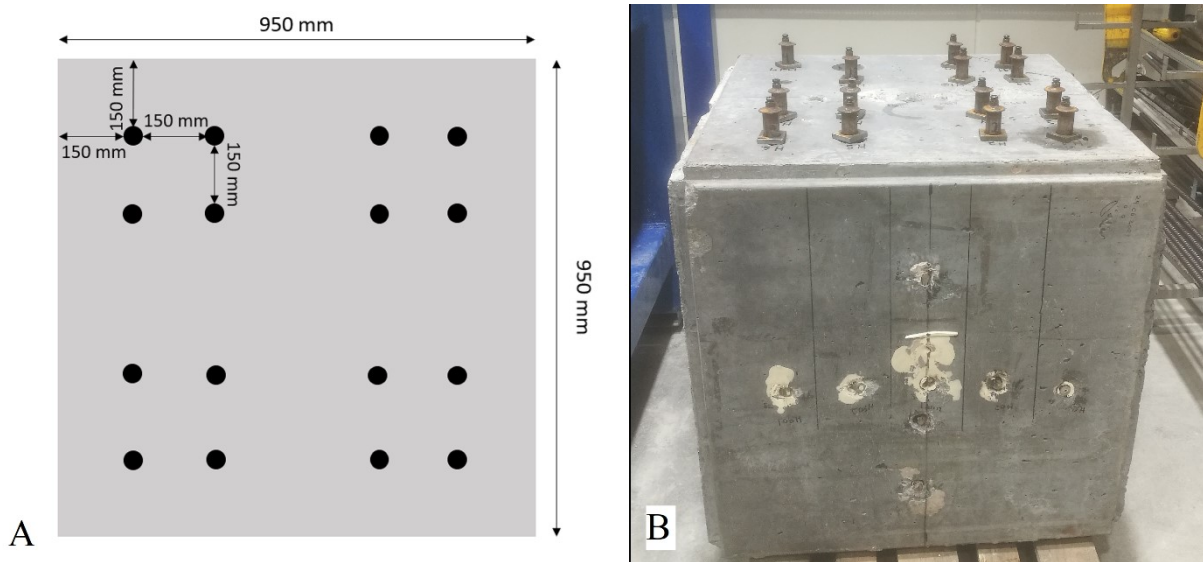
3.2. Metode installasjon

I Tabell 3. 1 gis en testplan over uttrekkstestene av boltene med antall, installeringsstrykk, hulldiameter og boremetode.

Tabell 3. 1: Testplan for antall borehull og benyttet installeringsstrykk, hulldiameter og boremetode.

Antall	Hulldiameter (mm)	Boremetode	Installeringsstrykk (MPa)
4	36	Slaghammer	30
4	36	Diamantbor	30
2	36	Slaghammer	24
2	33	Slaghammer	30
2	33	Diamantbor	30
2	30	Slaghammer	30
2	30	Diamantbor	30

Borehullene plasseres med en avstand på 150 mm, som anses som tilstrekkelig for at nabohullene ikke påvirker en bolt som trekkes ut, og ikke tar skade ved installering av bolter. Konsept for bolteplassering samt ferdig installerte bolter gis i Figur 3. 3.

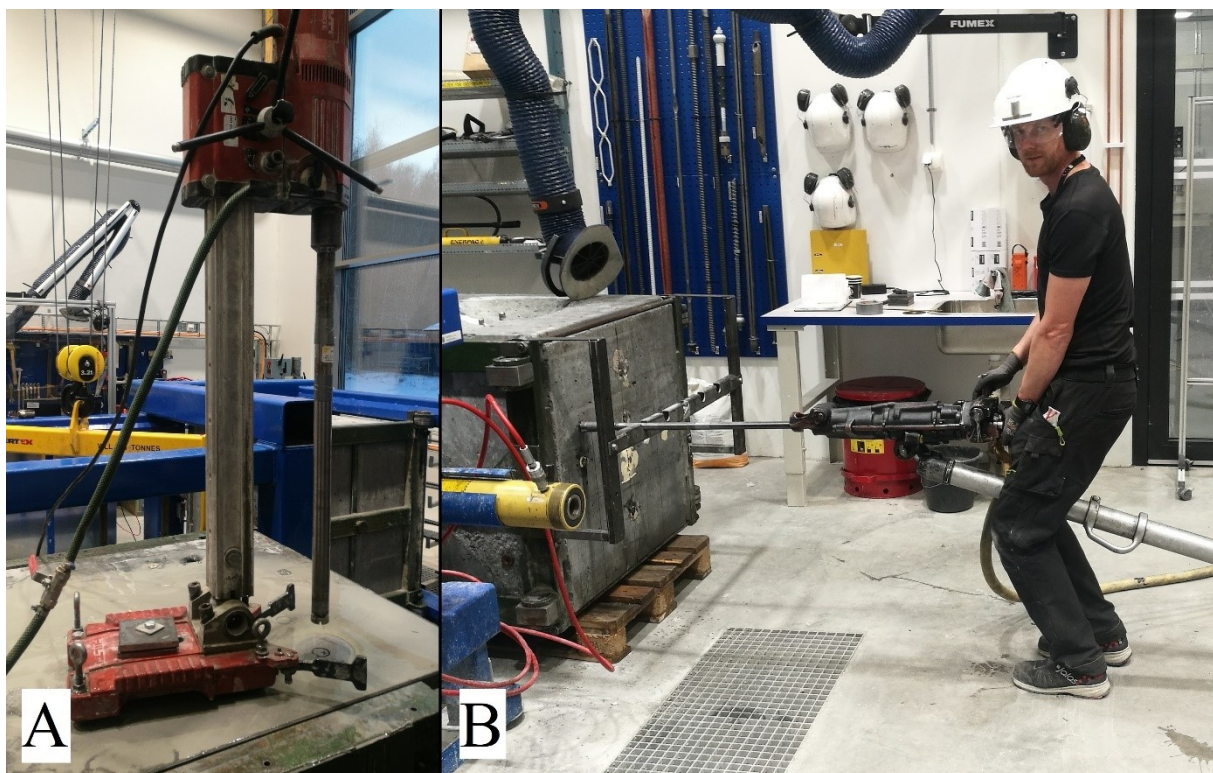


Figur 3. 3: Plan for hullplassering i betongblokk (A) og ferdig installerte bolter (B).

For å se på bæreevnens avhengighet av installeringsstrykk ble to bolter installert i 36 mm hull med et lavt vanntrykk på ca. 24 MPa. Bæreevnen til disse boltene, med installeringsstrykk under den anbefalte verdien, kan dermed sammenlignes med tilsvarende bolter installert med 30 MPa.

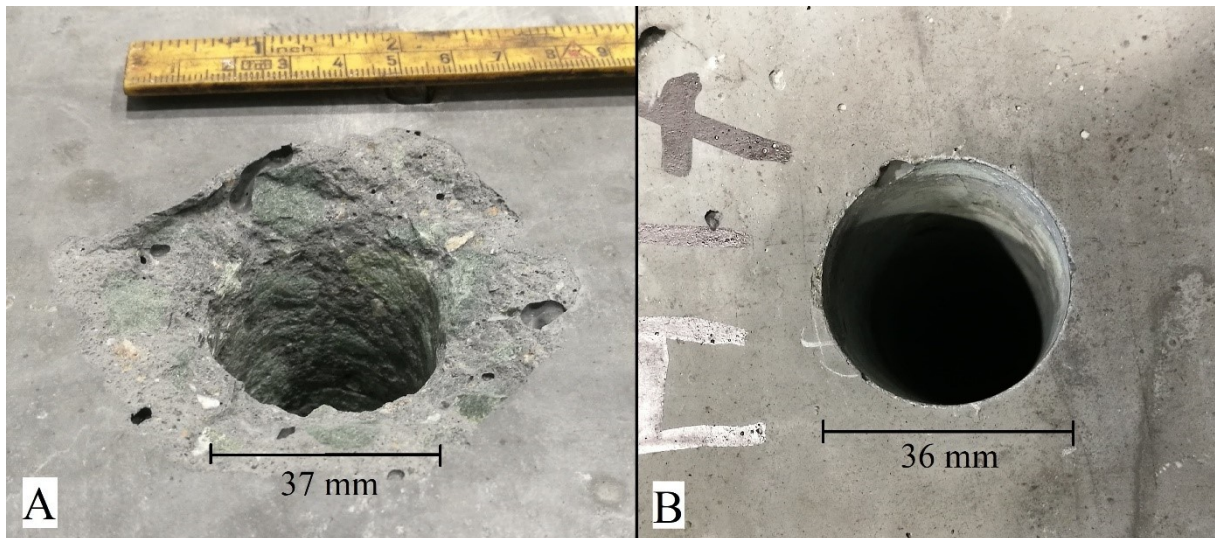
Under installering var trykkventilen, som styrer det maksimale vanntrykket, tidvis upålitelig i dens trykkjustering. Ventilen ble kalibrert til korrekt trykk, men tendenserte til å gi lavere trykk ved gjentatte installasjoner. Ventilen ble derfor jevnlig kalibrert for å unngå dette. Likevel ble to 30 MPa-bolter installert med trykk ned mot 28,3 MPa og 28,6 MPa. Når vanntrykket nådde sitt maksimum ble dette trykket vedlikeholdt i ca. 60-80 sekunder, med unntak av bolt nr.1 med ca. 30 sekunder. Trykket ble opprettholdt delvis for å sikre fullstendig oppblåsing av bolten og forming etter borehullet, men hovedsakelig for at det angitte makstrykket skulle oppnås. Alle oppnådde makstrykk gis i Tabell 4. 1 i resultatdelen.

For å se på påvirkningen fra hullruhet på boltens bæreevne benyttet det to ulike boremetoder. Et glatt borehull oppnås ved å benytte et diamantbor som etterlater en sylinderkjerne. For å oppnå et borehull med høy ruhetsgrad som tilsvarer et in situ borehull benyttes slaghammerboring (slagboring) med en såkalt «knemater». Diamantboremaskinen drives av strøm, og slaghammerboret er trykkluftdrevet. Boring av hull vises i Figur 3. 4.



Figur 3. 4: Kjerneboring med diamantbor (A) og slagboring med knemater (B). Boring av overingeniør Vistnes.

For å finne bæreevnens avhengighet av hullstørrelse velges det tre ulike diametere, 30 mm 33 mm og 36 mm. Av disse er 30 mm så liten diameter som mulig, og også under den anbefalte størrelsen for denne bolten. Slaghammerboret ga hull som var gjennomsnittlig 0,5-1 mm større enn den planlagte størrelsen, mens diamantboret ga relativt nøyaktig diameter. Dette godtas da det er urealistisk å oppnå en større nøyaktighet enn 1mm med det benyttede utstyret. Diameteren til slagborehullene varierer med ca. 2mm på grunn av ruheten. Forskjellen i borehullenes karakter illustreres i Figur 3. 5.



Figur 3. 5: Hullåpning til hull boret med diamantbor (A) og Slagbor (B).

Grunnet installeringens natur ble flere av hullene fylt med vann før boltene ble installert. Der dette var tilfellet nevnes dette også i Tabell 4. 1 i resultatdelen. Vanntrykk mot tid ved innstallering gis for alle bolter i Vedlegg A: Installering av bolter. Ferdig installerte bolter vises i Figur 3. 3B over. Boltene ble installert i lik høyde slik at den forankrede lengden forble konstant mellom alle testene.

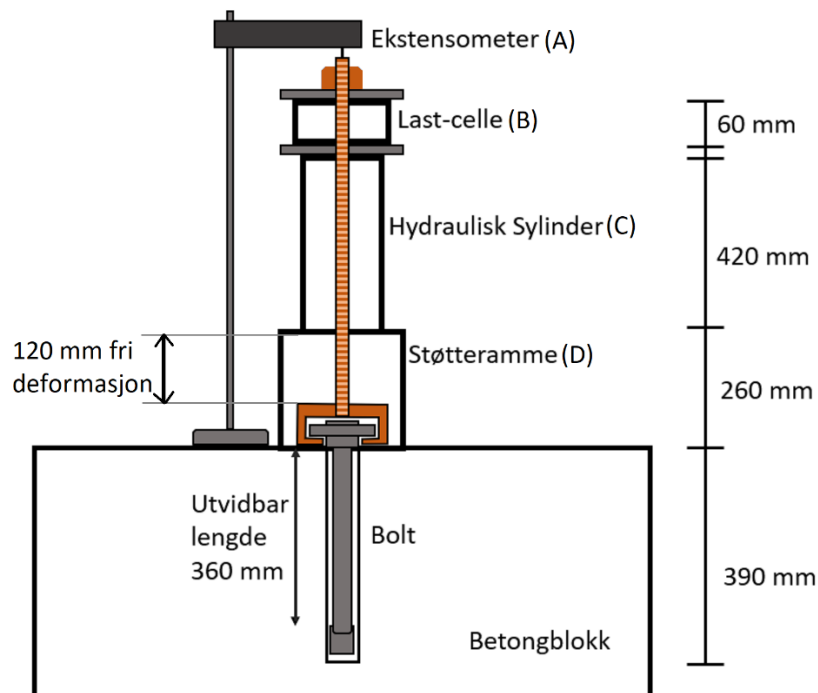
3.3. Metode uttrekkstest

For å kunne trekke ut boltene er de installert med en metallskive. Et gjengestag hektes på boltene som vist i Figur 3. 6.

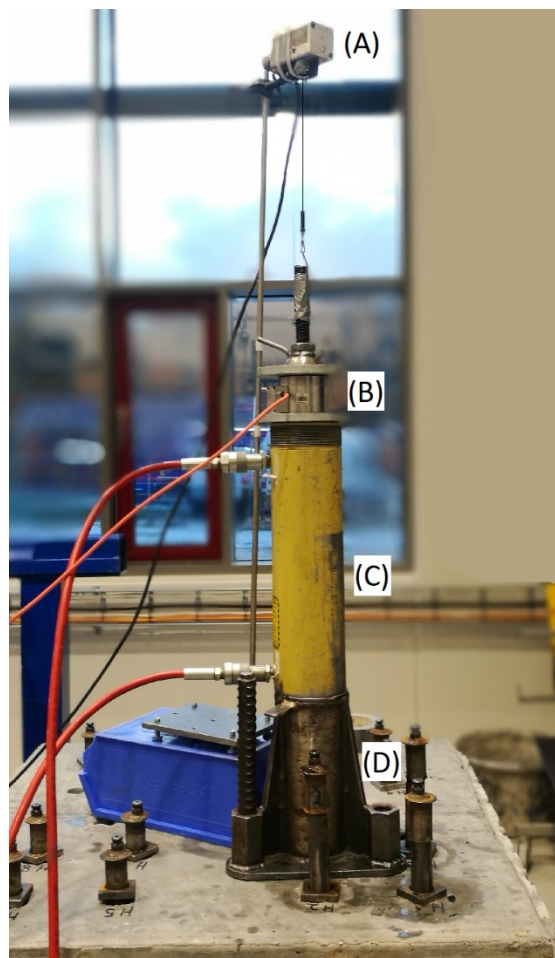


Figur 3. 6: Gjengestag heftet på boltene for å utføre uttrekkstest.

En konsepttegning av testoppsettet gis i Figur 3. 7. Bilde av benyttet testoppsett gis i Figur 3. 8.



Figur 3. 7: Konsept for testoppsett med ekstensometer (A), last-celle (B), hydraulisk sylinder (C) og støtteramme (D) som gir 120 mm deformasjon. (Ikke skalert).



Figur 3. 8: Bilde av testoppsett med ekstensometer (A), last-celle (B), hydraulisk sylinder (C) og støtteramme (D) som gir 120 mm deformasjon.

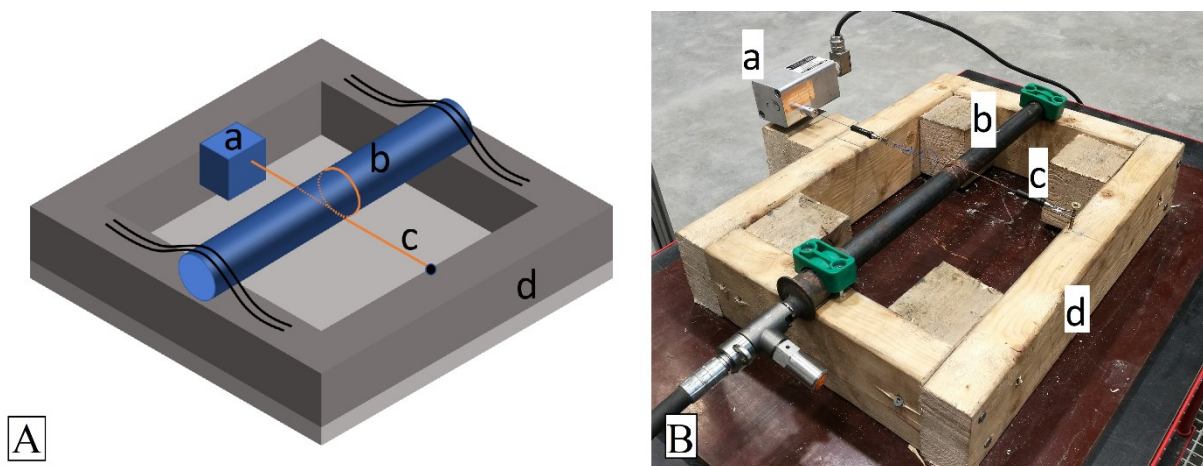
Oppsettet består av et gjengestag som hektes på toppen av bolten og skyves oppover. Støtterammen i bunnen av oppsettet tillater 120 mm fri deformasjon. På støtterammen står den hydrauliske sylinderen som er driveren til uttrekkingen. Denne sylinderen drives av oljetrykk som økes av en elektronisk pumpe. Den samme sylinderen benyttes i SINTEF/NTNU riggen og har en kapasitet på 300 kN (Hagen, et al., 2019). Over sylinderen plasseres en stålplate og deretter en last-celle som måler trykket bolten belastes med. Over last-cellen plasseres en stålplate og en mutter som forbinder trykket med gjengestaget og dermed bolten. Øverst plasseres et trådeksensometer som måler den totale deformasjonen i testoppsettet.

Testene ble utført med et jevnt økende oljetrykk, med unntak av bolter nr. 1-6 som hadde et relativt raskt stigende oljetrykk. Testene ble gjennomført med en totaldeformasjon på ca. 120 mm, med unntak av bolt nr. 1 som ble trukket ca. 80 mm. Deformasjonen til bolt nr. 1 var likevel tilstrekkelig til å observere både maksimal bæreevne og bæreevnens avtagelse.

Uttrekkstestene ble hovedsakelig gjennomført 5-7 dager etter installasjon med et unntak på en gruppe bolter (nr. 15-18) trukket ut tre uker etter installasjon. Antall dager mellom installasjon og uttrekning gis i Tabell 4. 1 i resultatdelen.

3.4. Metode friluft utvidelsestest

For å måle boltens deformasjon mot vanntrykk ved installasjon ble det utført tester i friluft. I dette forøket er det altså ikke et borehull som omkranser bolten og påvirker utvidelsen. Oppsettet består av en ramme som holder bolten, og en metalltråd festet til et trådeksensometer. Konsepttegning og bilde av benyttet oppsett vises i Figur 3. 9.



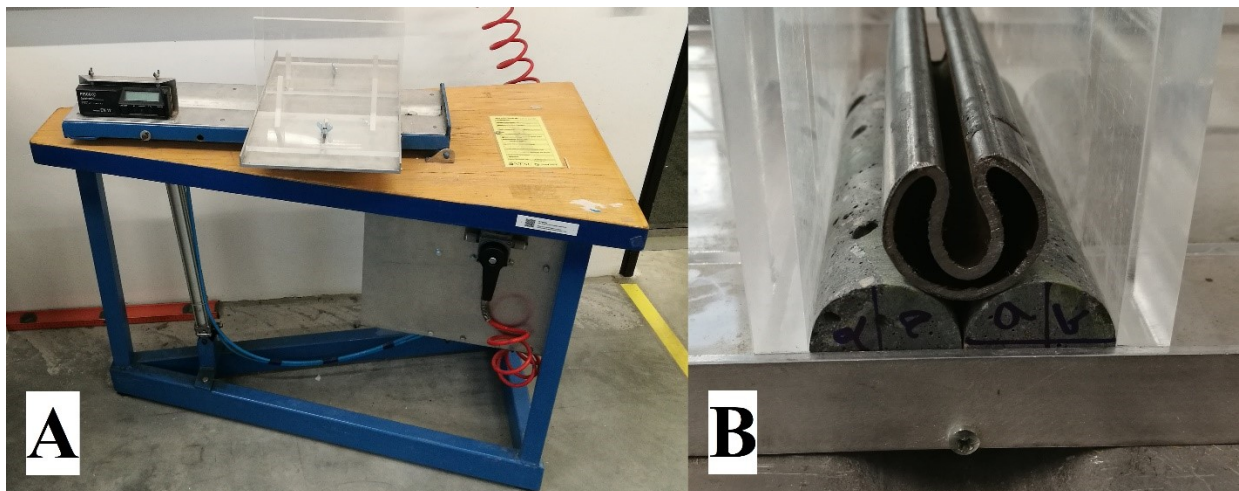
Figur 3. 9: Konsept for friluft utvidelsestest (A) og bilde av benyttet testrigg (B). Med trådeksensometer (a), bolt (b), tråd (c) og ramme (d).

Vanntrykket og den resulterende utvidelsen av bolten fører til at boltes omkrets øker. Denne deformasjonen måles med en stiv tråd som går én runde rundt bolten og festes i trådeksensometeret. For å minimere friksjonen mellom tråden og bolten påføres det et kobberbasert smøremiddel.

Det ble utført 4 tester for å observere deformasjon mot vanntrykk samt utviklingen av boltens form ved oppblåsing. Det ble i tillegg utført 4 tester med en serie av på- og avlastninger. I de sistnevnte testene økes trykket frem til plastisk deformasjon inntreffer, deretter kuttes vanntrykket slik at bolten trekkes sammen elastisk. Vanntrykket settes på igjen, en større diameter oppnås og på- og avlastningscyklusen gjentas. På denne måten ble 4 til 8 på- og avlastninger utført pr. bolt. Det observeres at avlastningscykluser som gjennomføres nær boltens maksimale utvidelse gir upålitelige data. Også ved full oppblåsing vil bolten elastisk deformere seg, men det benyttede testoppsettet er ikke i stand til å måle den lave deformasjonen. Deformasjons- og vanntrykk-kurver for samtlige tester gis i resultatdelen.

3.5. Metode tilt test

Den benyttede metoden tilsvarende tilt testen med 3 kjerner fra Alejano et al. (2018) også benyttet av Li et al. (2019). I stedet for tre steinkjerner benyttes det her en seksjon av utvidbar friksjonsbolt øverst og to betongsylindre nederst, som vist i Figur 3. 10B.



Figur 3. 10: Rig for tilt test (A). Betongkjerner og boltsegment plassert i riggen (B).

Betongkjernene ble boret ut av betongklossen benyttet til uttrekkstestene med et diamantbor. Dermed er overflaten deres tilsvarende steinkjerner i teststandard. Boltene benyttet er X-Pandabolten i omegaform, da denne har en diameter som best tilsvarer betongsylindrene. Testen gjennomføres på testoppsettet vist i Figur 3. 10A. Kjernene i bunnen holdes fast av plastveggene og boltene kan gli fritt en kort lengde. Testoppsettet tillater en automatisk og jevn økning av vinkelen. Når glidning inntreffer, kan den elektroniske vinkelangiveren stoppes og leses av. I samsvar med ISRM standarden gjennomføres det 5 iterasjoner av gliding pr. overflate. Deretter roteres kjernene og boltseksjonen erstattes. Antallet iterasjoner pr. overflate holdes lavt slik at glidningen ikke skaper sliping og støv som kan endre oppførselen til skjærstyrken.

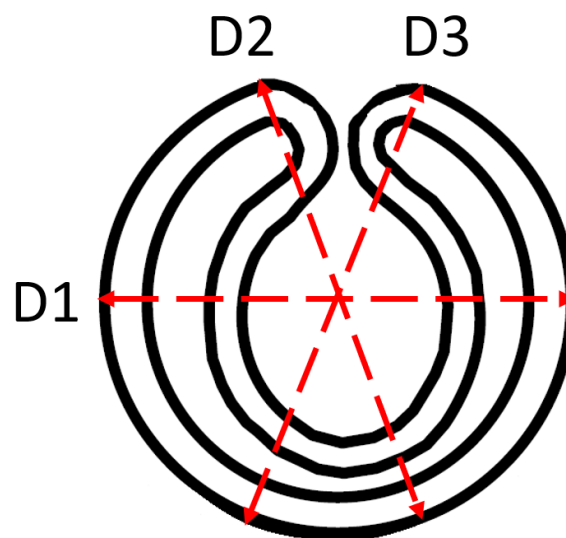
Til sammen ble det utført 20 tester. Av disse ble 5 fra samme serie forkastet da de inneholdt en unormalt stor variasjon. Boltseksjonen til denne serien ble observert å ha en fysisk ujevnheter som antas å ha ført til de anormale verdiene.

I Tabell 3. 2 gis den gjennomsnittlige diameteren for de 3 godkjente boltseksjonene samt gjennomsnittsdiameteren til betongsylinerne.

Tabell 3. 2: Diameter til boltseksjonene og betongsylinerne benyttet til tilt testen.

Objekt	Boltseksjon 2	Boltseksjon 3	Boltseksjon 4	Betongsyliner 1	Betongsyliner 2
Diameter (mm)	26,85	26,98	26,93	26,62	26,60

For boltene ble tre diametere målt på tre punkter langs bitens lengde, totalt 9 målinger. For betongsylinerne ble to diametere målt på tre punkter langs sylinderens lengde. Disse målingene, samt vekt og lengde oppgis i Vedlegg D: Tilt test. Siden bolten har en irregulær form måles boltens diameter, som vist i Figur 3. 11, og gjennomsnittet av verdiene benyttes.



Figur 3. 11: Måling av diameter av bolt i omegaform. Figur modifisert fra (Li, 2016).

Ved å sette disse verdiene inn i ligning 2.14 gis vinkelen β for de tre boltseksjonene, gjengitt i Tabell 3. 3. Verdiene er altså svært nær standarden på 30° .

Tabell 3. 3: Vinkel β for de tre benyttede boltseksjonene ved tilt testen.

β_2	$29,85^\circ$
β_3	$29,77^\circ$
β_4	$29,80^\circ$

3.6. Metode enaksialt trykkforsøk

For å etablere betongblokkens styrke utføres det enaksiale trykkforsøk. Siden betongen representerer en bergmasse tas det her høyde for både ISRM sin standard for testing av bergarter, og norsk standard (NS) for prøving av herdet betong (Bieniawski & Bernede, 1979), (Norsk Standard, 2019), (Norsk Standard, 2021). Til forsøkene bores det ut to betongsylinger fra betongblokken med diamantbor. Prøvestykkene har diameter 79 mm og lengde 182 mm. Dermed er forholdet mellom lengde og diameter (L_s/D_s) ca. 2,3. Dette faller dermed mellom ISRM standarden som tilsier at sylinderens lengde skal være 2,5-3 ganger

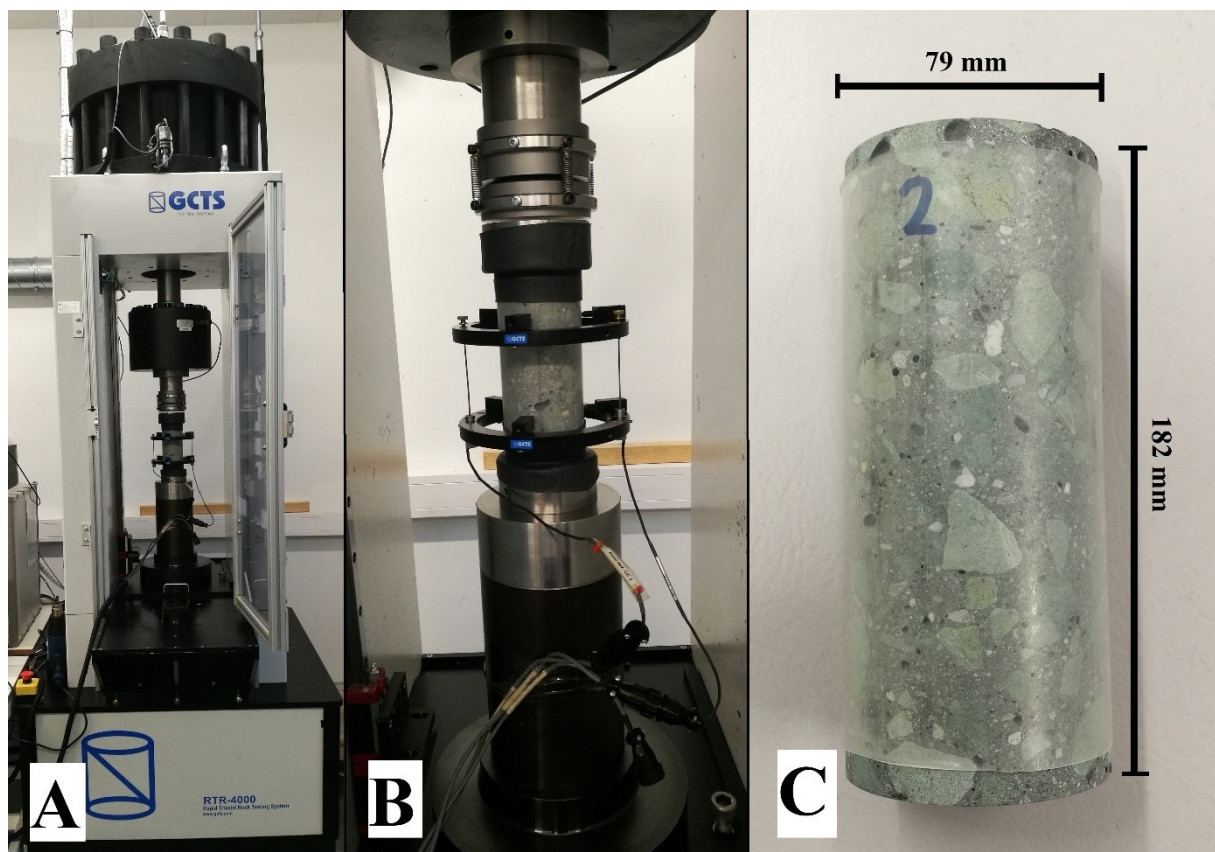
diameteren, og NS standarden som tilsier at L_s/D_s maksimalt skal være 2,1 (Norsk Standard, 2021). Videre bør diameteren ifølge ISRM være over 54 mm, mens NS foreslår en diameter over 90 mm (Norsk Standard, 2021). Her velges den største diameteren som er tilgjengelig og praktisk for diamantboringen. ISRM anbefaler en diameter 10 ganger større enn bergartens største korn. Her benyttes betong med tilslag; slik at NS standarden på diameter 3,5 ganger større enn største tilslag er mer relevant (Norsk Standard, 2021). Tilslaget i den benyttede betongen har en diameter på 5 mm til 20 mm, dermed innenfor anbefalingen.

Før testen, slipes sylindrens topp og bunn for å oppnå en helt jevn overflate. Sylinderne sine diametere, lengder, vekter og lydshastigheter (fra målt gangtid) gjengis i Tabell 3. 4.

Tabell 3. 4: Diameter, lengde, vekt og lydshastighet for betongsylinderne benyttet til enaksialt trykkforsøk.

UCS-sylinder	Diameter (mm)	Lengde (mm)	Vekt (g)	Lydshastighet (m/s)
1	78,86	182,38	2189,22	4903
2	78,81	182,53	2209,47	4974

Testen ble gjennomført i en maskin av typen *GCTS RTR-4000* der sylinderen plasseres i en plathylse vist i Figur 3. 12.



Figur 3. 12: Benyttet last-maskin *GCTS RTR-4000* (A), utsnitt av prøve installert i maskinen (B) og betongprøven i plathylse (C).

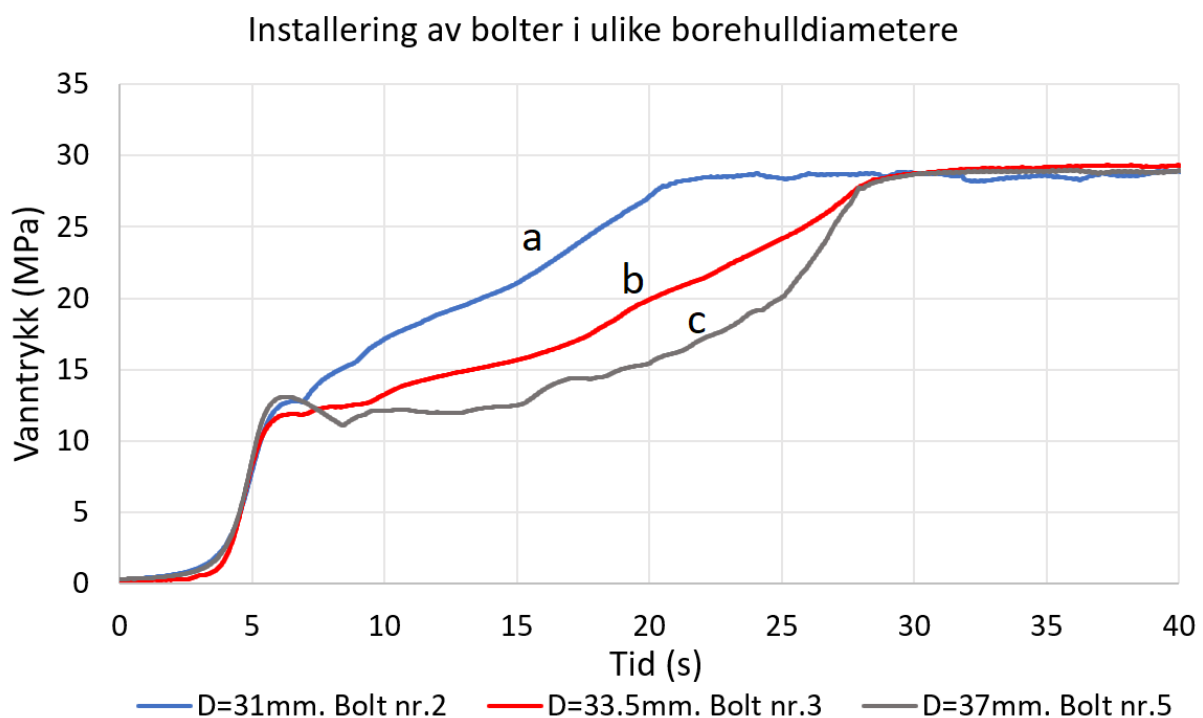
Under testen belastes sylindren i lengderetningen med en jevn belastningsrate på 0,6 MPa/s som er innenfor ISRM og NS anbefalingene (Bieniawski & Bernede, 1979), (Norsk Standard, 2019). Den påførte lasten samt den aksielle deformasjonen måles. Prøven belastes til brudd inntreffer.

At det ble benyttet to prøvestykker er et avvik fra ISRM standarden som anbefaler 5 prøver eller flere der dette er praktisk gjennomførbart. Avviket skyldes det praktiske tilgjengelige materiale fra betongblokken, og godtas da testen gjøres for å sette den benyttede matriksen i perspektiv heller enn å finne dens nøyaktige styrke.

4. Resultater

4.1. Resultater installasjon

Boltene ble suksessfullt installert, men med enkelte makstrykk under den angitte verdien. Alle makstrykk gis under i Tabell 4. 1. Ved å plote vanntrykket mot tid kan installasjonen observeres. Diameteren underveis er ikke målt, men ved å sammenligne den generelle kurveformen med kurvene i Figur 2. 10, kan boltens utvidelse estimeres. Det observeres at formen på vanntrykk-tid kurvene varierer med diameteren på borehullet. I Figur 4. 1 gis representative kurver for de tre ulike borehulldiameterne, samtlige kurver gis i Vedlegg A: Installering av bolter.



Figur 4. 1: Installasjonstrykk mot tid for bolter i hull av diameter 31mm (a), 33,5 mm (b) og 37 mm (c). Merk at makstrykket ble opprettholdt i 60-80 sekunder.

Figuren illustrerer hvordan den største borehulldiameteren gir en vanntrykkkurve som ligner mest på en friluft oppblåsingskurve. I de mindre borehullene blir prosessen avbrutt tidligere når boltene treffer hullveggen. Dermed stopper deformasjonen og trykket øker.

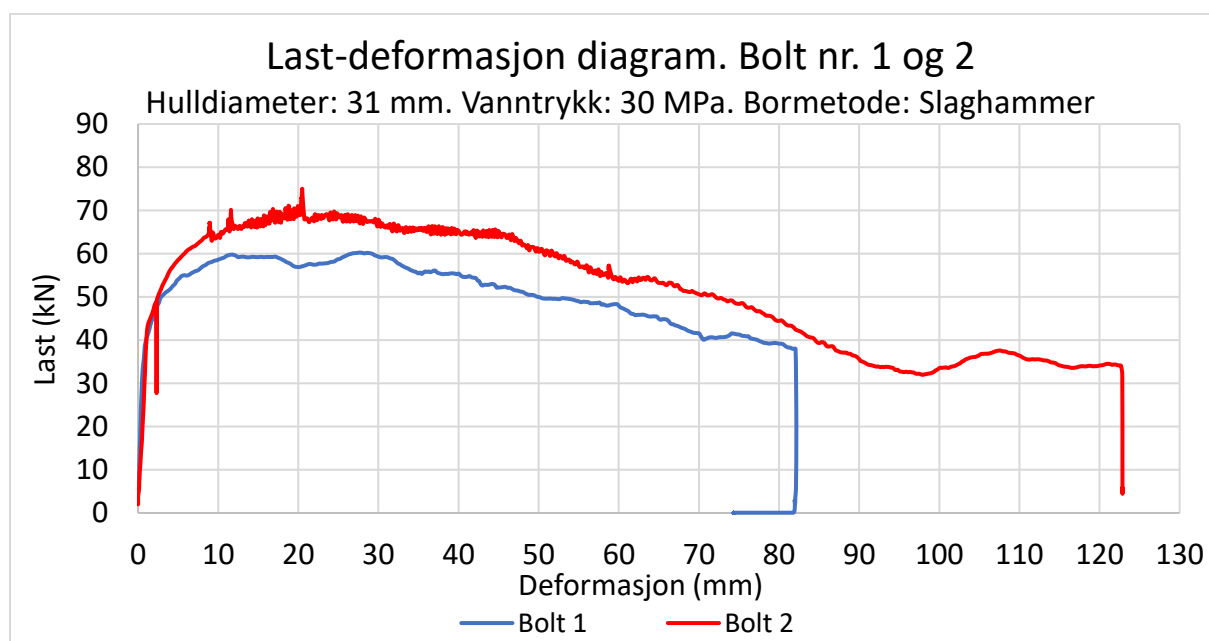
4.2. Resultater uttrekkstest

18 bolter ble trukket ut av betongblokken. En oversikt over resultater og relevante verdier gis i Tabell 4. 1.

Tabell 4. 1: Oversikt over resultater og kommentarer for uttrekkstester.

Bolt nr.	Diameter borehull (mm)	Boremetode	Installerings-trykk (MPa)	Kommentar relativ ruhet hull	Kommentar installering	# Dager fra installering til uttrekk	Maks bæreevne (kN)
B1	31	Slaghammer	28,260	Middels	Vått	6	60,242
B2	31	Slaghammer	29,718	Høy	Vått	6	75,012
B3	33,5	Slaghammer	30,186	Middels	Vått	6	46,608
B4	33,5	Slaghammer	30,173	Middels	Vått	6	44,802
B5	37	Slaghammer	29,602	Middels	Tørt	6	84,335
B6	37	Slaghammer	29,175	Middels	Tørt	7	78,680
B7	37	Slaghammer	24,768	Høy	Vått	5	63,489
B8	37	Slaghammer	24,773	Middels	Tørt	5	62,073
B9	36	Diamantbor	29,181	Middels	Vått	7	56,984
B10	36	Diamantbor	28,643	Lav	Vått	7	44,377
B11	33	Diamantbor	30,201	Lav	Vått	7	28,608
B12	33	Diamantbor	30,239	Lav	Vått	7	35,474
B13	30	Diamantbor	29,557	Høy	Vått	7	47,824
B14	30	Diamantbor	30,373	Middels	Vått	7	37,427
B15	37	Slaghammer	30,142	Middels	Tørt	21	78,373
B16	37	Slaghammer	29,853	Høy	Tørt	21	73,674
B17	36	Diamantbor	29,519	Lav	Vått	21	39,576
B18	36	Diamantbor	29,878	Lav	Vått	21	37,316

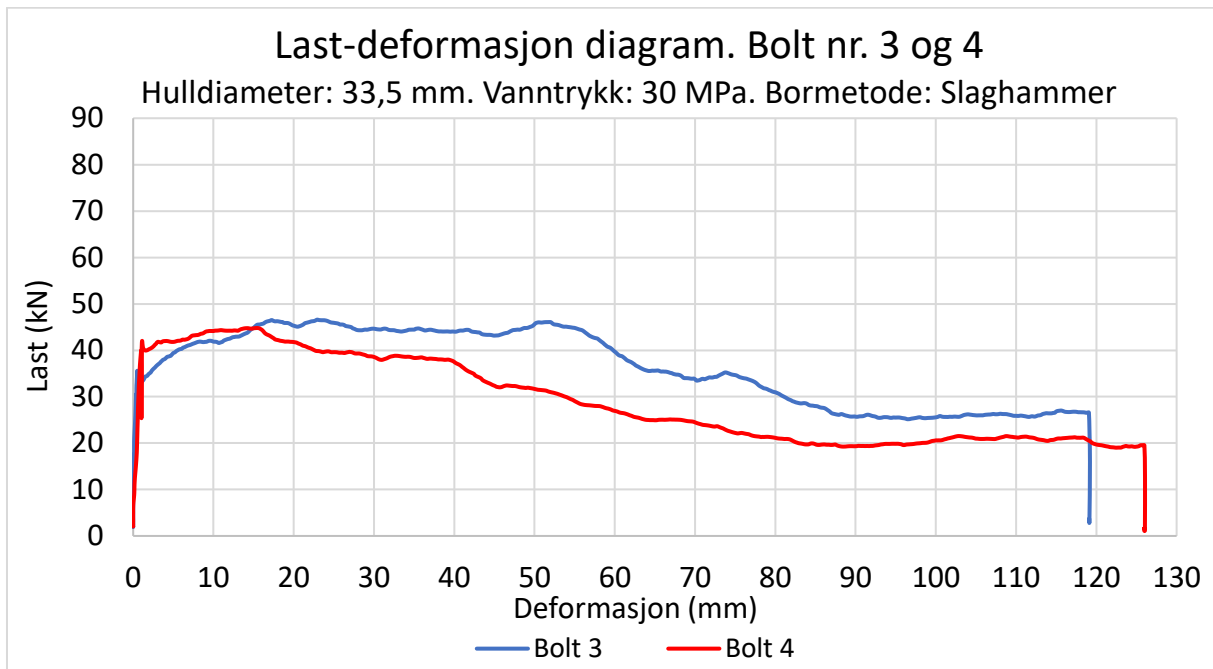
For alle testene ble trekklasten (kN) og deformasjonen (mm) målt. I den følgende seksjonen presenteres samtlige last-deformasjonskurver i Figur 4. 2 til Figur 4. 8. Kurvene fra tester utført med samme borehulldiameter, boremetode og installasjonstrykk gis sammen.



Figur 4. 2: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 1 og bolt nr. 2.

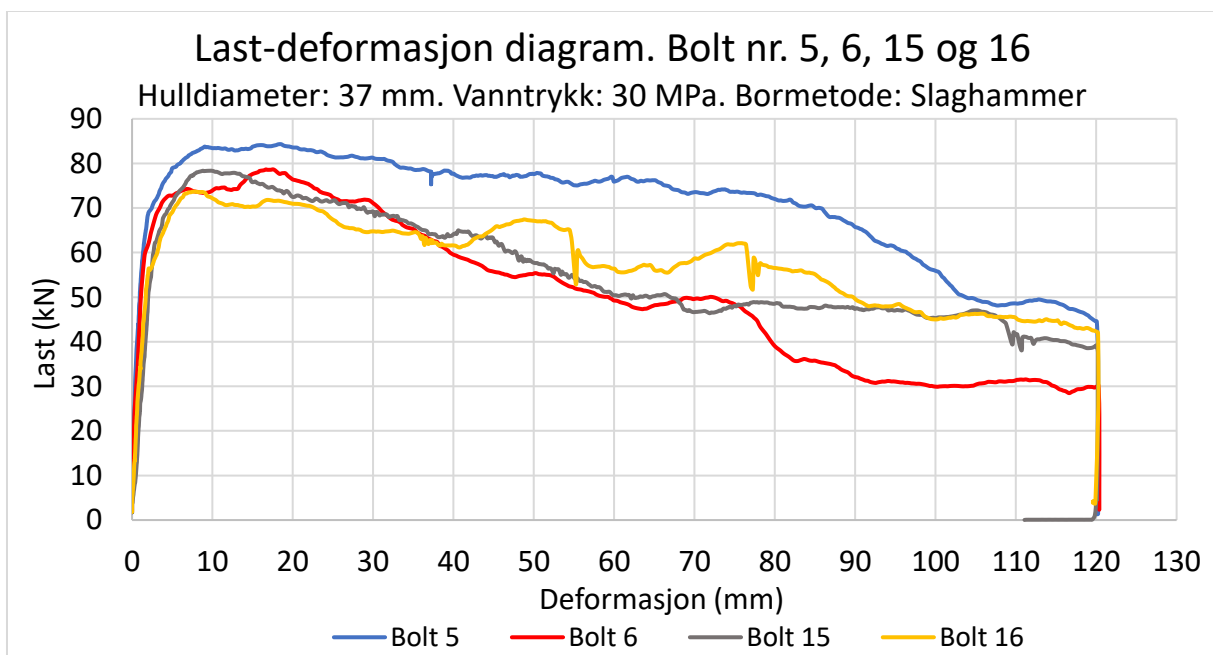
Figur 4. 2 viser den lineær-elasticke deformasjonen som etterfølges av plastisk deformasjon. Lasten øker i den plastiske seksjonen og når et maksimum rundt 10 mm til 30 mm deformasjon. Deretter går bæreevnen ned. Det kraftige haket ved ca. 2 mm deformasjon

hos Bolt 2 skyldes feil ved trykkpålastningen, og ikke boltens oppførsel. Også avslutningen av Bolt 1 ved 80 mm er på grunn av testutføring. Den piggete fremtoningen av kurven til Bolt 2 skyldes at bæreevnen bygges opp og brått slippes på grunn av initialfriksjonen mellom bolten og borehullet. Dette gir enkelte store topper, men det kan også forekomme vedvarende vibrasjon med mange mindre hakk/glipp.

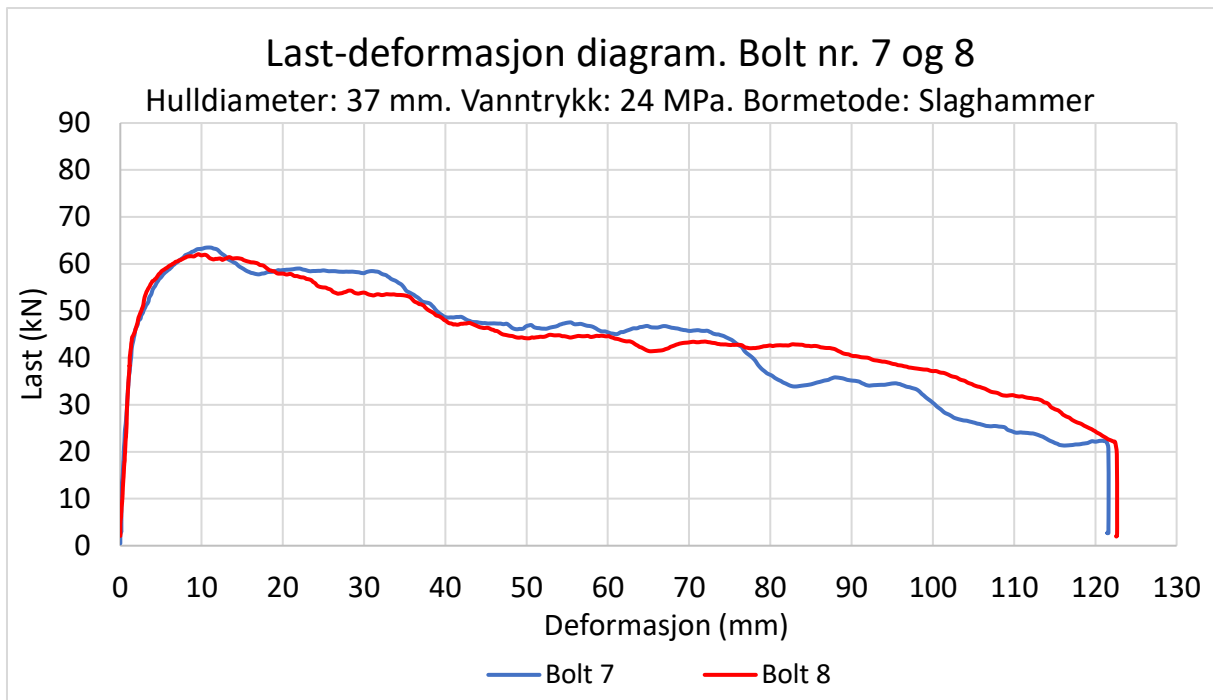


Figur 4. 3: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 3 og bolt nr. 4.

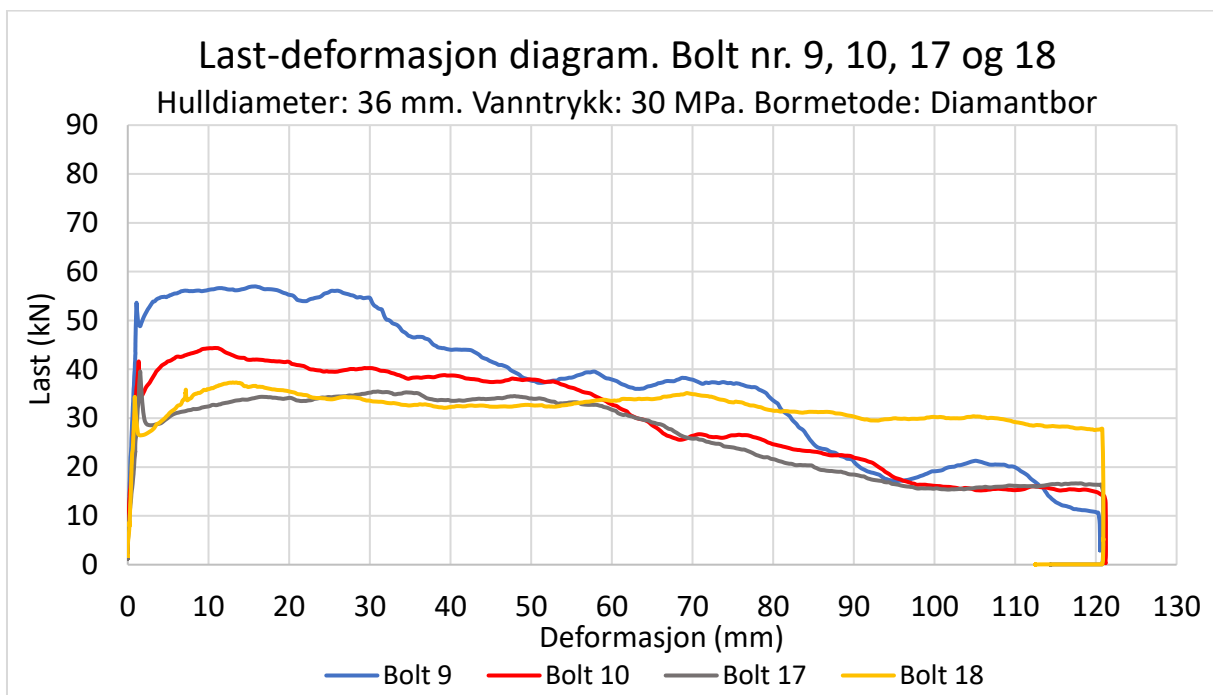
I Figur 4. 3 ser vi at den initiale friksjonen kan bygge opp en last-topp før friksjonen overkommes og lasten synker. Likevel forekommer den maksimale bæreevnen senere ved en deformasjon på ca. 20 mm. videre ser vi at bolten potensielt kan opprettholde en høy bæreevne helt ut mot ca. 50 mm + deformasjon.



Figur 4. 4: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 5, 6, 15 og 16.

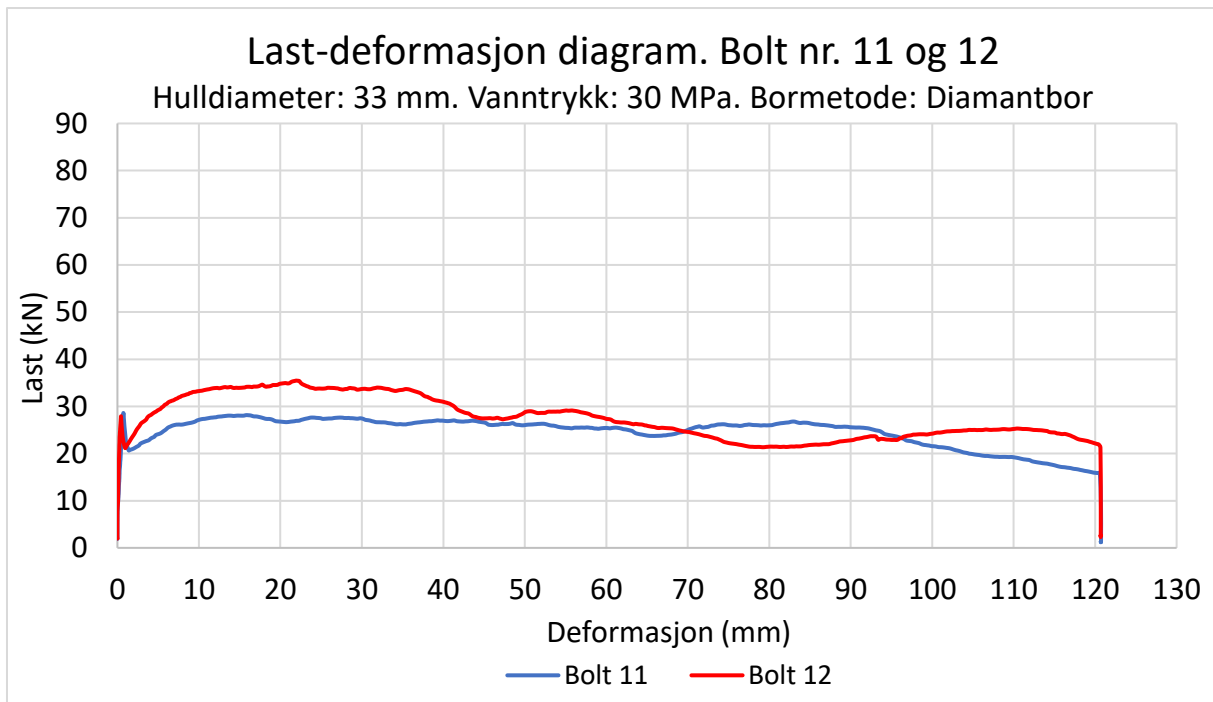


Figur 4. 5: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 7 og bolt nr. 8.

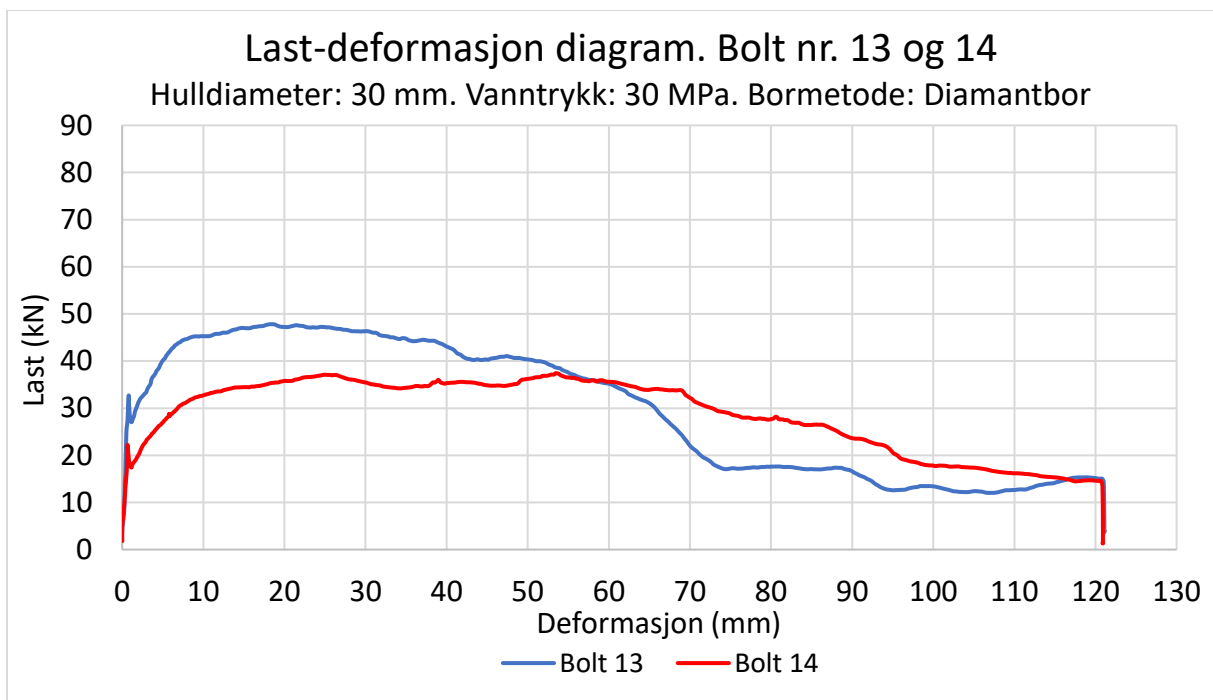


Figur 4. 6: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 9, 10, 17 og 18.

Kurven til Bolt 17 i Figur 4. 6 viser et eksempel der den maksimale bæreevnen forekommer som resultat av initialfriksjonen. Bolt 18 viser muligheten for at bæreevnen kan holdes nærmest konstant helt til 120 mm deformasjon.



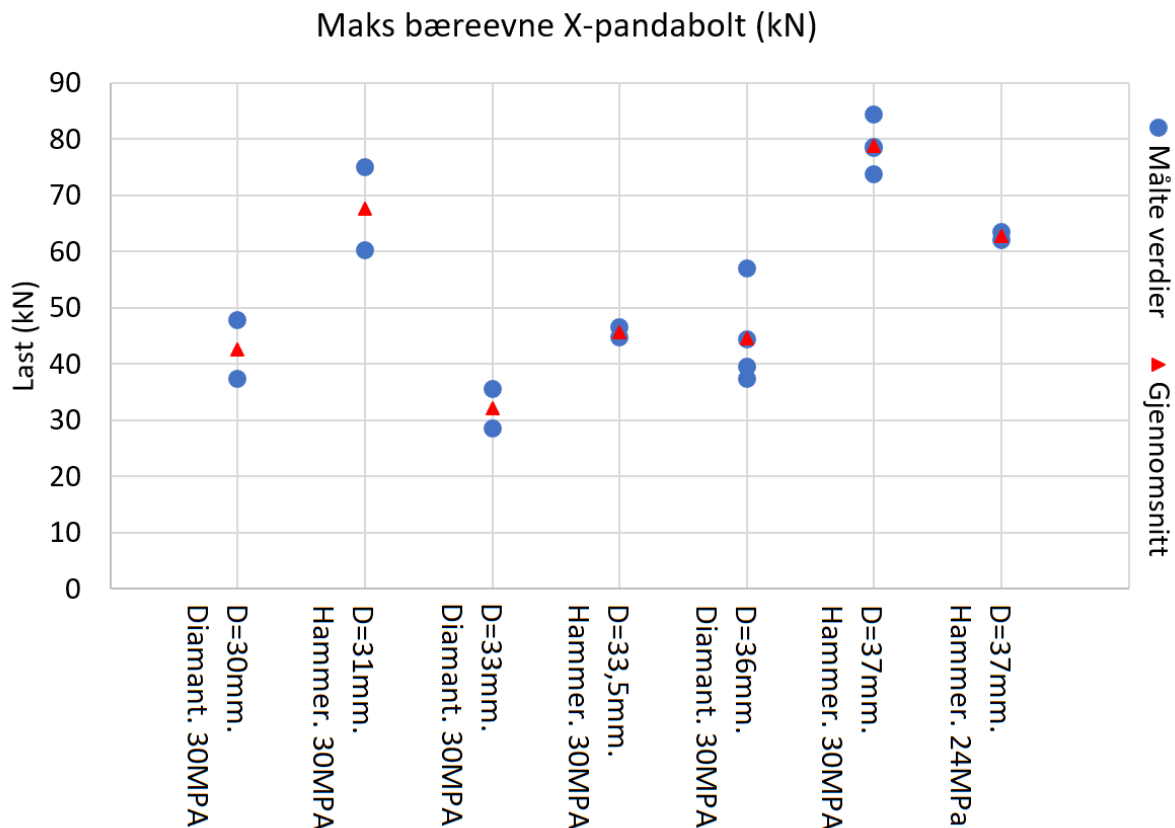
Figur 4. 7: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 11 og bolt nr. 12.



Figur 4. 8: Last mot deformasjon ved uttrekkstest for bolt nr. 13 og bolt nr. 14.

Merk at installasjonstrykk nevnt i diagrammene tilsvarer kategoriene 30 MPa og 24 MPa, ikke de faktiske oppnådde trykkene. Den generelle formen til uttrekkforsøkene består av en elastisk deformasjon fulgt av en maksimal bæreevne i den plastiske sonen ved ca. 10 mm til 30 mm.

Den klart mest uventede observasjonen er at de midterste diameterne (33 mm og 33,5 mm) ser ut til å gi den laveste styrken. For å sammenligne bidraget fra de ulike variablene gis de maksimale bæreevnene i Figur 4. 9.



Figur 4. 9: Maksimal bæreevne fra 18 uttrekkstester av utvidbare friksjonsbolter. Testene utført under de samme forholdene er samlet i hver sin kategori. Også gitt er gjennomsnittsverdi for hver kategori.

Figuren gir alle de 18 målte maksimalverdiene samt en gjennomsnittsverdi for hver kategori. Målingene er samlet tilsvarende kuvene i Figur 4. 2 til Figur 4. 8 slik at bolter med lik borehullstørrelse, boremetode og installasjonstrykk utgjør én kategori.

Ifølge samtlige maksverdier stemmer den teoretiske antagelsen at en høyere ruhet gir en høyere bæreevne. De målte verdiene gir også at et høyere installasjonstrykk gir en høyere bæreevne. I motsetning til den teoretiske antagelsen gir observasjonene at den laveste bæreevnen oppnås av borehullene med den midterste størrelsen. Disse observasjonene vil omtales nærmere i diskusjonsdelen. Figur 4. 9 gir også at ingen av de observerte variablene gir en særdeles dominerende effekt. Med dette menes det at endringen i bæreevne som følge av borehulldiameter, installeringstrykk og borehullruhet er av relativt lik magnitudo (her ca. 10 kN til 30 kN).

4.3. Resultater boltens kontakt med hullveggen

Ved å observere slipemerker på de uttrukne seksjonene av boltene kan man estimere boltens kontakt med borehullveggen. Slipemerkene dannes der kontakten mellom boltene og betongen har gitt riper i boltestålet. I Figur 4. 10 gis bilder av bolt nr. 2 som representerer en typisk bolt etter en uttrekkstest. Flere eksempelbilder gis i Vedlegg B: Slipemerker på et utvalg bolter.

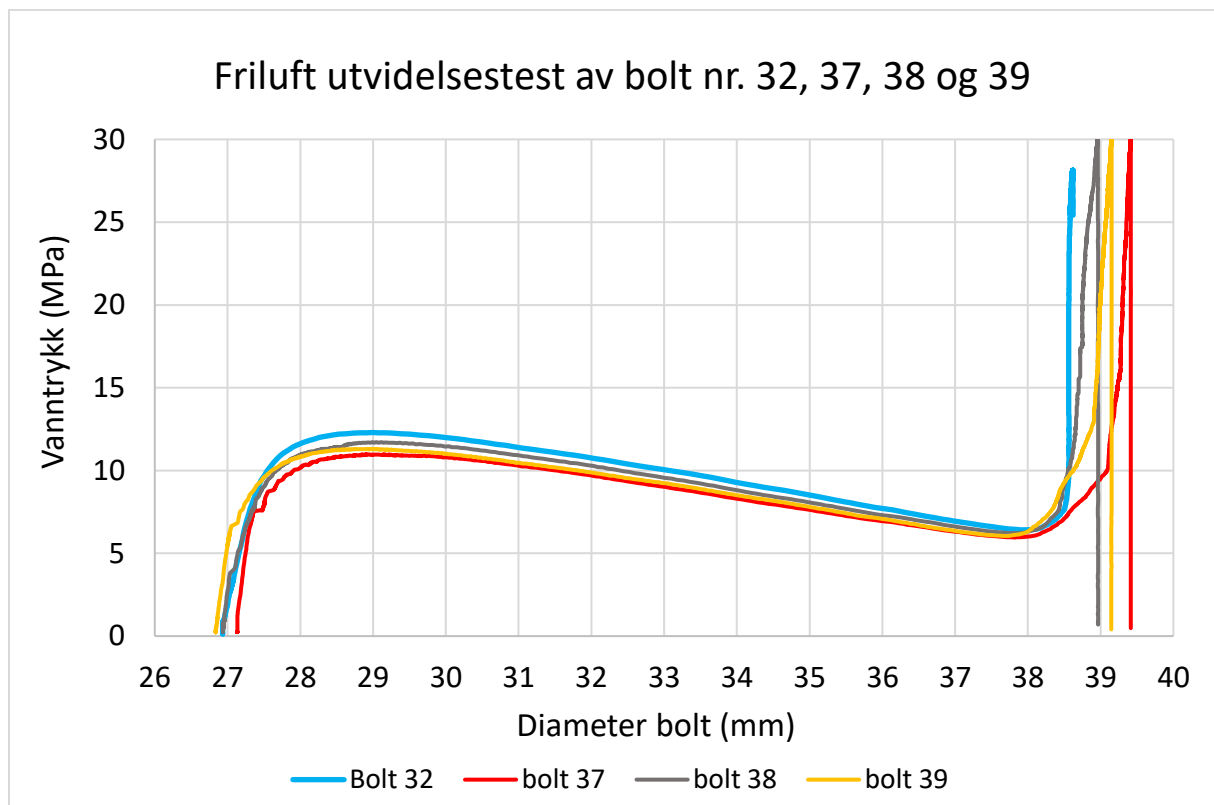


Figur 4. 10: Slipemerkene på bolten etter uttrekkstest angir kontakten mellom boltene og hullveggen. Det observeres seksjoner og striper uten kontakt.

Bildene viser at det ikke oppnås fullstendig kontakt mellom bolten og hullet. Den beste kontakten forekommer på hver side av tungen. På motsatt side av tungen oppnås en ujevn kontakt. Det observeres også ca. 15mm til 30mm uten kontakt på grunn av overgangen fra boltens smale ende til den oppblåste seksjonen.

4.4. Resultater friluft utvidelsestest

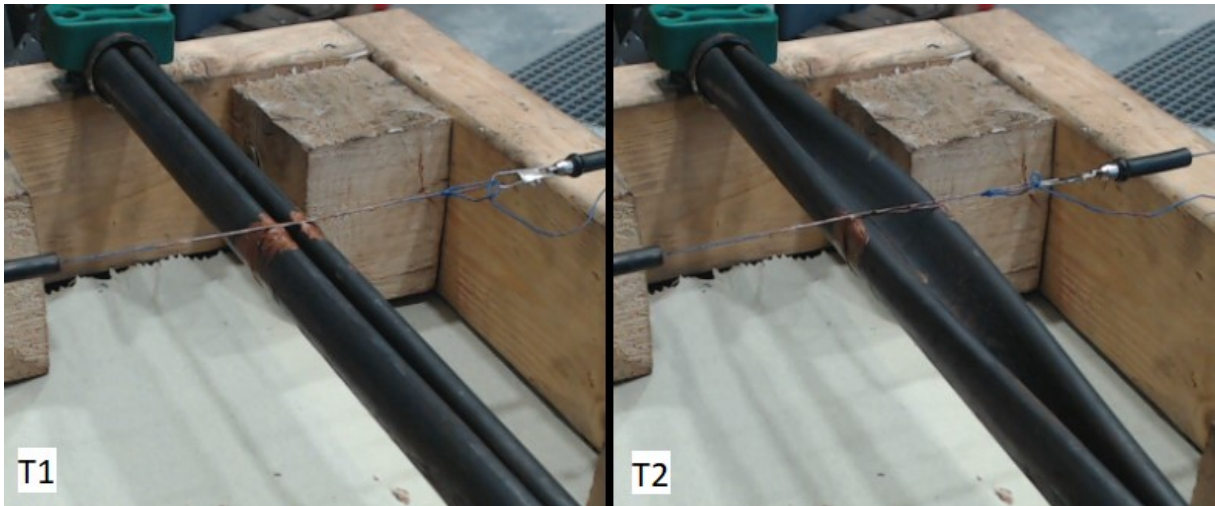
Åtte X-Pandabolter ble utvidet med vanntrykk i friluft. Fire tester ble gjennomført med en jevn vanntrykkbelastning og fire tester ble gjennomført med på- og avlastningscykluser. I Figur 4. 11 gis kurver for de fire førstnevnte testene. I forsøket måles endring av boltens omkrets, og denne omregnes til boltens estimerte diameter ved ligning 2.4. Den beregnede diameteren plottes mot vanntrykket i pumpen.



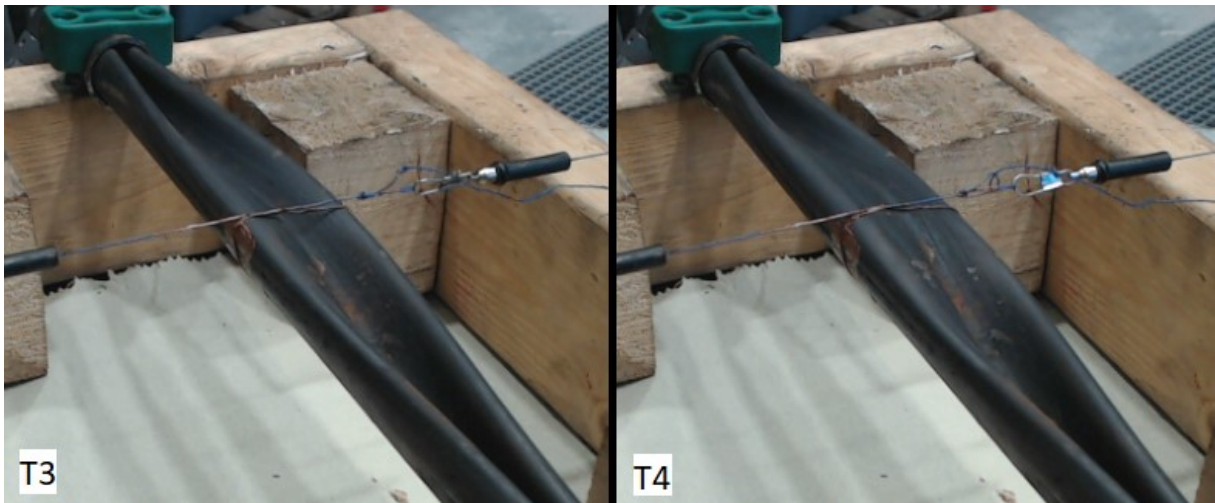
Figur 4. 11: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 32, 37, 38 og 39.

Testen viser først den elastiske deformasjonen ved økende vanntrykk etterfulgt av plastisk deformasjon der vanntrykket oppnår en foreløpig maksverdi. Boltene utfoldes deretter med fallende vanntrykk. Når diameteren nærmer seg boltens originaldiameter, øker vanntrykket til et forutbestemt maksimum.

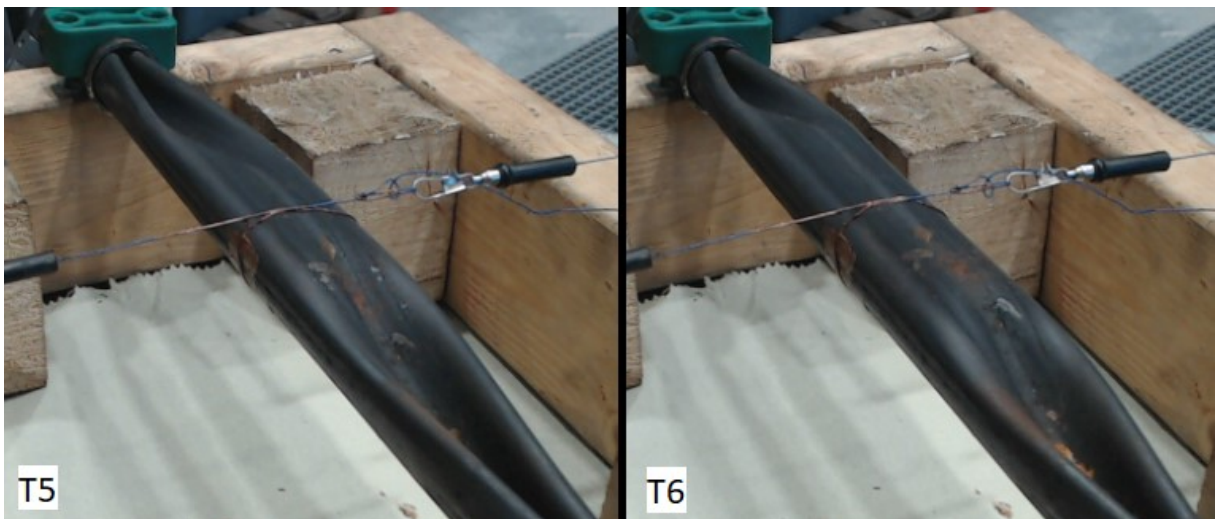
For å observere boltens form under oppblåsing ble enkelte tester filmet. Dermed kan boltens form knyttes til ulike stadier på kurvene i Figur 4. 11. Figur 4. 12 til Figur 4. 15 er en bildeserie fra det filmede forsøket ved åtte ulike tidspunkt T1-T8. Bildene er valgt for å representere ulike stadier i utvidelsen. Flere bildeserier gis i Vedlegg C: Friluft utvidelse bildeserie.



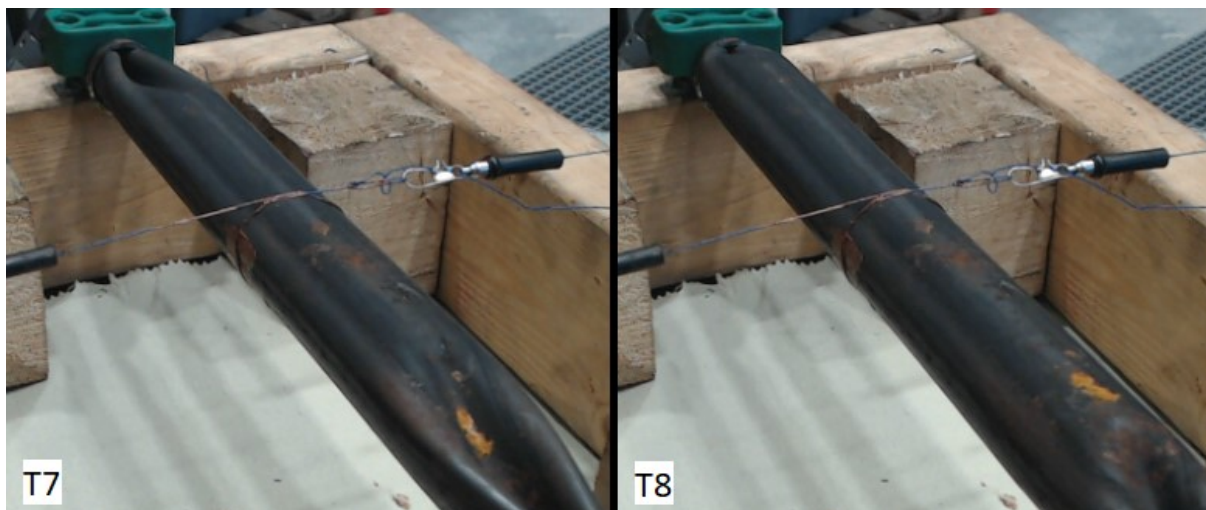
Figur 4. 12: Friluft utvidelsestest ved tid T1 (10 sekunder) og T2 (50 sekunder).



Figur 4. 13: Friluft utvidelsestest ved tid T3 (54 sekunder) og T4 (59 sekunder).



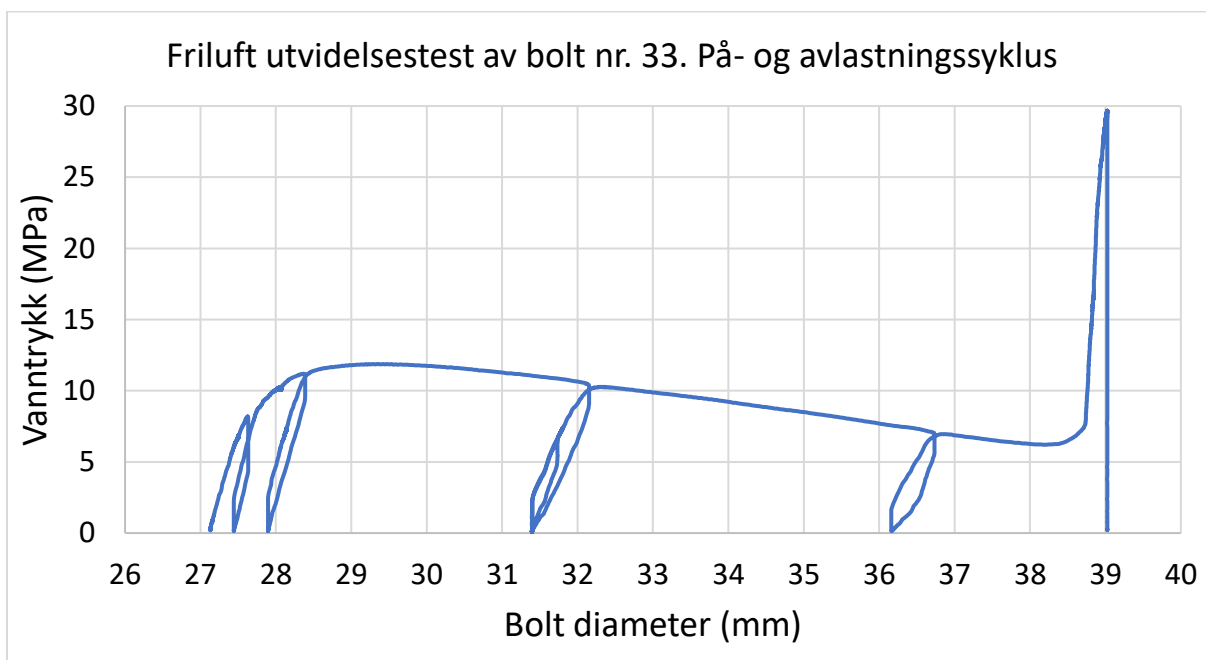
Figur 4. 14. Friluft utvidelsestest ved tid T5 (63 sekunder) og T6 (75 sekunder).



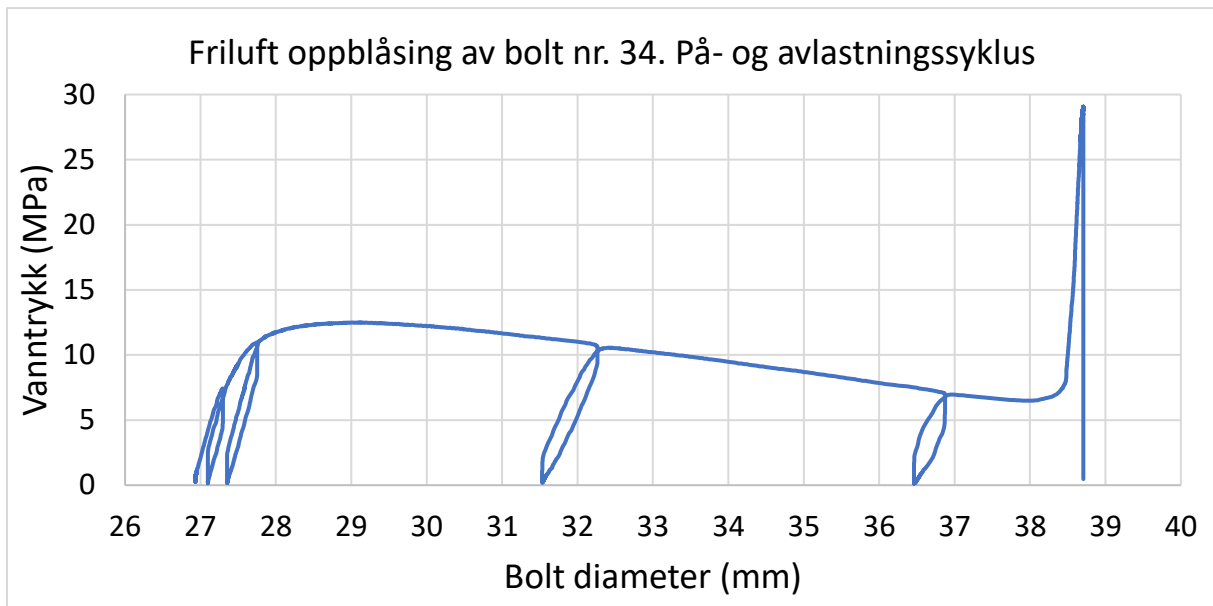
Figur 4. 15: Friluft utvidelsestest ved tid T7 (88 sekunder) og T8 (147 sekunder).

T1 viser boltens opprinnelige sammenbrettede form. Mellom T1 og T2 folder bolten seg ut i en form som kan beskrives som en «båt-form» eller en «trau-form». Fra T2 til T3 heves bunnen av «båten». Ved T4 ligner bolten en halvsirkel og oppnår en bredde målt til ca. 45 mm. Bredden er altså langt større enn originaldiameteren til det opprinnelige stålrøret på 39 mm. Fra T4 til T6 får bolten en mer og mer sirkulær form. Bildene for T7 og T8 viser hvordan midten utvides først før utvidelsen propagerer utover mot endene av boltens.

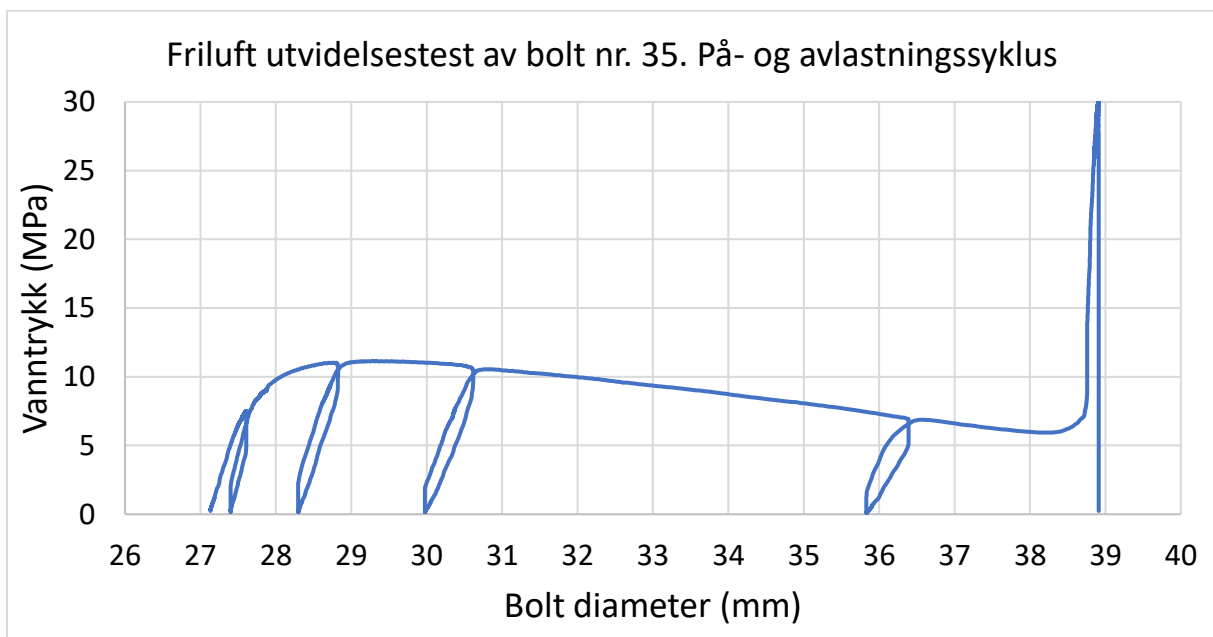
Fire bolter ble testet med såkalte på- og avlastningscykluser der utvidelsen avbrytes og igangsettes en rekke ganger i løpet av testen. Når vanntrykket synker måles den elastiske deformasjonen ved den gitte tverrsnitts-formen. Figur 4. 16 til Figur 4. 19 gir vanntrykk mot utregnet bolt diameter for de fire testede X-Pandaboltene.



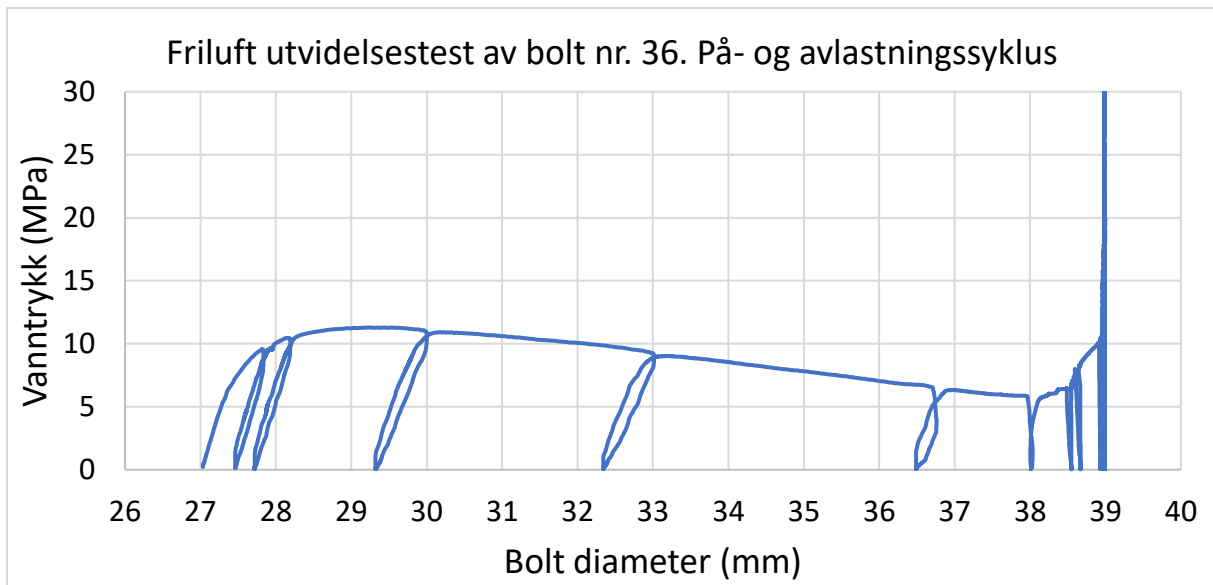
Figur 4. 16: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 33. Testen inneholdt på- og avlastningscykluser. Merk at den ekstra sløyfen ved ca. 31,5 mm er på grunn av testutføring og ikke boltens oppførsel.



Figur 4. 17: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 34. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser.



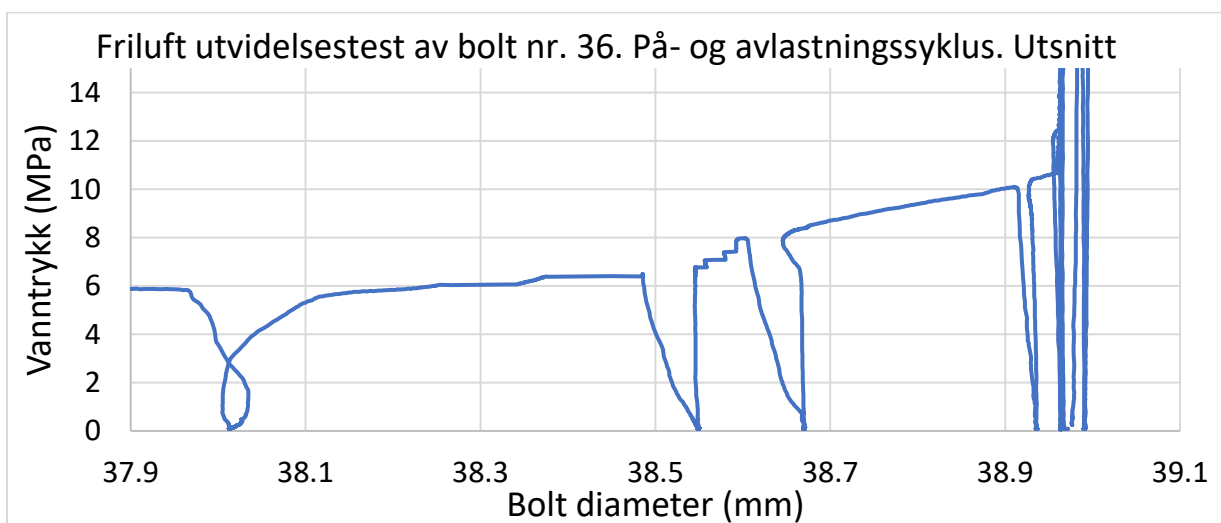
Figur 4. 18: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 35. Testen inneholdt på- og avlastningssykluser.



Figur 4. 19: Vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 36. Testen inneholdt på- og avlastningscykluser.

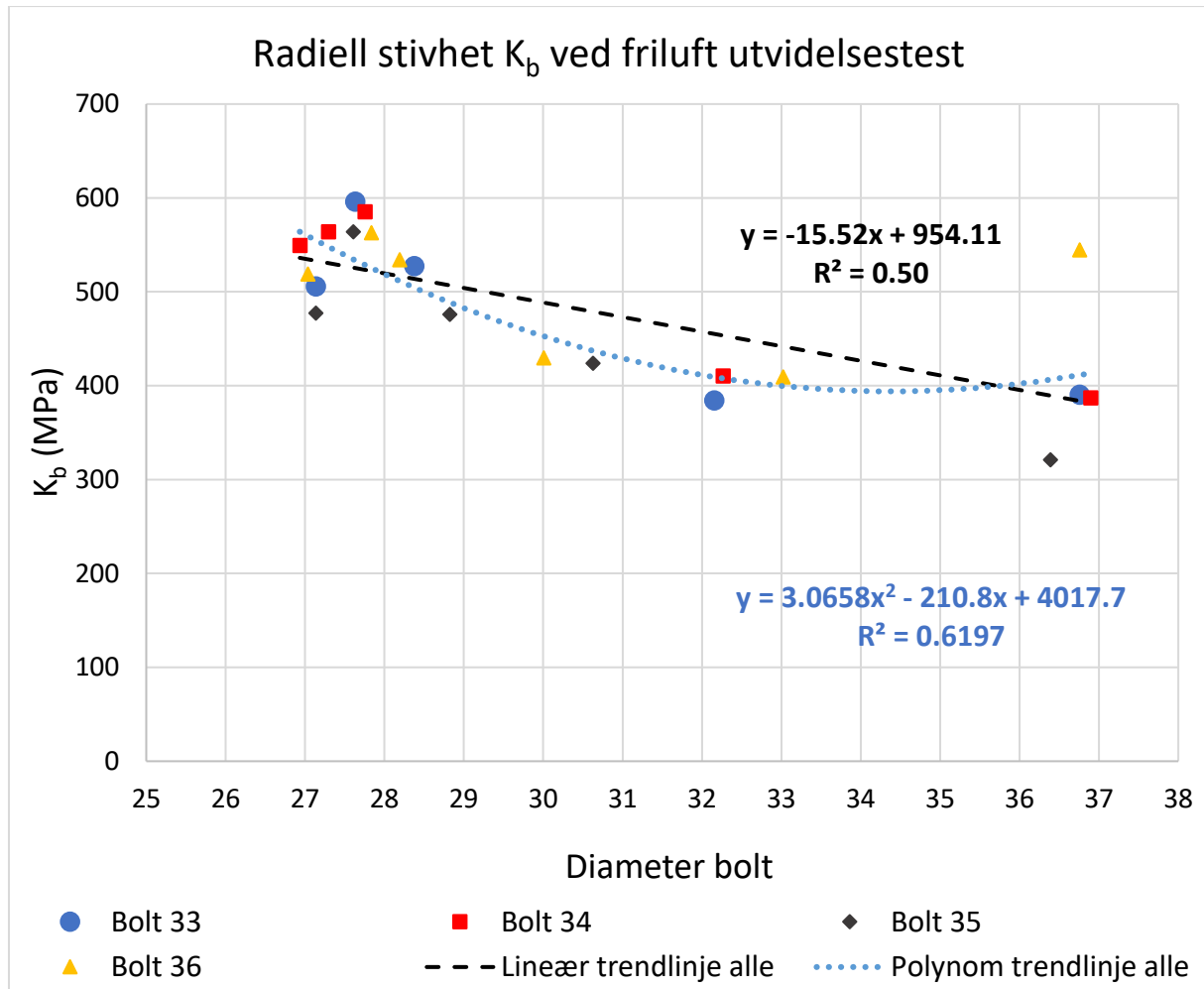
Figurene viser at boltene oppnår en lineærelastisk deformasjon både ved avlastning og pålastning. De to er tilnærmet parallelle, men her vil kurven ved avlastning benyttes til videre utregninger. Som nevnt i teoridelen er deformasjonen ikke lineær i toppen og bunnen av syklusene. Dette er skapes av måleutstyret som gir litt friksjonsmotstand når retningen på deformasjonen endres. På grunn av denne «slarken» benyttes bare de lineære delene av avlastningscyklusene.

På bolt nr. 36 ble det gjennomført avlastninger nært boltens maksimale diameter. Utsnittet vist i Figur 4. 20 illustrerer at disse målingene ikke oppnår en lineærelastisk krympende deformasjon. Avlastningene ved en diameter over 37 mm oppnår ikke den ønskede kvaliteten og vil ikke benyttes til videre utregning. Merk at de største beregnede diametererne som gir gode målinger tilsvarer ca. T3 i figurene over. Dette medfører at boltens oppførsel i en sirkulær eller nær sirkulær form ikke observeres her.



Figur 4. 20: Utsnitt av vanntrykk mot estimert diameter ved friluft utvidelsestest av bolt nr. 36. På- og avlastningscyklusene ved diameter over 37 mm gir ikke godkjente målinger.

Med de vellykkede avlastningssyklusene beregnes den radielle stivheten til boltene (K_b) ved ligning 2.10. Den initiale elastiske deformasjonen ved testens start benyttes til å finne K_b ved boltens profildiameter. De beregnede verdiene plottes mot deres respektive bolt-diameterer i Figur 4. 21.



Figur 4. 21: Beregnet radiell stivhet K_b mot estimert diameter ved friluft utvidelse med på- og avlastningssykluser for bolt nr. 33-36. Også gitt er en lineær trendlinje og en polynom-trendlinje basert på alle K_b -verdiene.

Figuren viser at den radiale stivheten til boltene i friluft-opplåsing synker i det målte spennet fra profildiameter til ca. 37mm utregnet diameter. Dette bekreftes av den lineære trendlinjen som baseres på alle de gitte verdiene. Likevel viser polynom-trendlinjen en liten økning av stivhet mot de største diameterne. For ordens skyld oppgis linjenes formler og bestemmelseskoeffisienter (R^2). R^2 går fra 0 til 1 og beskriver hvor mye en endring av boltens diameter ser ut til å påvirke K_b .

4.5. Resultater tilt test

15 tester ble vellykket gjennomført i tre serier på 5 tester. I Tabell 4. 2 oppgis vinkel ved glidning (α), φ_{3k} utregnet med ligning 2.16 og φ_b utregnet med ligning 2.17.

Tabell 4. 2: Målte friksjonsvinkler.

Boltseksjon. Test nr.	Sylinderseksjon	α (°)	φ_{3k} (°)	φ_b (°)
2.1	b	15,7	13,70	10,70
2.2	b	21,2	18,59	15,59
2.3	b	15,8	13,79	10,79
2.4	b	16,9	14,76	11,76
2.5	b	15,7	13,70	10,70
3.1	c	22,8	20,05	17,05
3.2	c	24,0	21,13	18,13
3.3	c	22,9	20,14	17,14
3.4	c	22,3	19,60	16,60
3.5	c	23,6	20,77	17,77
4.1	d	20,4	17,89	14,89
4.2	d	15,2	13,27	10,27
4.3	d	18,7	16,37	13,37
4.4	d	17,9	15,66	12,66
4.5	d	17,4	15,21	12,21

Dermed blir gjennomsnittet og standardavviket til den grunnleggende friksjonsvinkelen: $\phi_b = 13,97^\circ \pm 2,79^\circ$.

4.6. Resultater enaksialt trykkforsøk

Begge prøvene ble vellykket belastet til brudd. UCS, Youngs modulus E_t , lasten ved tangentpunktet, og intervallet for spennings- og tøyningendringen for de to prøvene gis i Tabell 4. 3.

Tabell 4. 3: Målt UCS beregnet E_t fra enaksialt trykkforsøk.

UCS-sylinder	UCS (MPa)	E_t (GPa)	Tangentpunkt (MPa)	Intervall (MPa)
1	103,7	35,08	51,8	9,8
2	114,0	35,67	57,0	10,9

Komplette spenning-tøyning diagram for forsøket gis i Vedlegg E: Enaksialt trykkforsøk.1. Bruddets karakter kan beskrives som en generell bruddsone diagonalt gjennom prøven med en rekke andre mer kaotiske sprekker og oppspaltinger. Prøvene etter brudd vises i relativt uforstyrret form i Vedlegg E.2 og Vedlegg E.3. For å illustrere den generelle bruddsonen illustreres også prøvene i forstyrret form.

5. Diskusjon

5.1. Diskusjon installasjon

Vanntrykk-kurvene fra installeringen viste en mer markert seksjon med trykkfall i de større borehulldiameterne. Dette stemmer med observasjonene fra kurvene fra friluft oppblåsingstesten der man ser et tydelig trykkfall når bolten har begynt sin plastiske deformasjon. I de små borehullene avbrytes denne prosessen slik at vanntrykket stiger tidligere. Testing utført i friluft på 4 meter lange Swellex-bolter av Håkansson viste et tilsvarende vanntrykkfall (Håkansson & Li, 1997). Disse testene viste også at bolten ble utvidet på midten først, før utvidelsen spredde seg ut mot boltens ender. Under denne spredningen vedvarte det lave vanntrykket. Bildeserien fra friluftforsøkene i denne teksten viste likeledes at utvidelsen begynner ved boltens midtpunkt. Bolten oppnår en tilnærmet sirkulær form før utvidelsen spres mot bolteendene.

5.2. Diskusjon uttrekkstest

Last-deformasjonskurvene angir at bolten først deformeres elastisk, og deretter oppnår en maksimal bæreevne ved ca. 10 mm til 30 mm deformasjon. Bolt 14 oppnår sin maksimale bæreevne ved 50 mm, men har dog en nesten tilsvarende bæreevne ved 25 mm. Etter at den maksimale bæreevnen er oppnådd går lasten ned. Denne nedgangen er tidvis uryddig og kan være kraftig, som for Bolt 9, eller av liten størrelse, som for Bolt 18. En rekke av boltene ga en kraftig kurve-topp ved enden av den elastiske deformasjonen. Dette er et resultat av den initiale friksjonen som muliggjør lastens oppbygging. En interessant observasjon er at de fleste kurvene med denne formen stammer fra bolter installert i de glatte diamantborehullene. Unntaket på dette er borehullene på 33,5 mm boret med slaghammer. En alternativ vinkling er at denne formen forekommer i testene med lave maksimale bæreevner (under 57 kN). Kurvene viser også at det er en klar variasjon i kurvenes form og maksimalverdi selv for tester med samme utgangspunkt.

5.2.1. Fall i bæreevne ved uttrekking

Last-deformasjonskurvene fra uttrekktestene viser at boltenes bæreevne faller ved økende glidning. Dette er forventet siden boltens bæreevne er avhengig av kontaktflaten mellom bolten og borehullveggen. Når bolten trekkes ut og oppnår glidning blir arealet til kontaktflaten gradvis mindre. Fra ligning 2.1 ser vi at boltens bæreevne er proporsjonal med den forankrede lengden (L). Gitt denne ligningen vil altså en prosentvis endring av forankret lengde bidra med en lik prosentvis endring av bæreevne. For å sammenligne bidraget fra endringen av L med det totale observerte bæreevnefall kan vi etablere forholdstallet $K_{F/L}$ gitt av ligning 5.1. $K_{F/L}$ gir et forenklet bilde på hvor mye bæreevnen faller sammenlignet med den forankrede lengden.

$$K_{\frac{F}{L}} = \frac{\frac{\text{maks bæreevne} - \text{minste bæreevne}}{\text{maks bæreevne}}}{\frac{\text{deformert lengde}}{\text{total lengde}}} = \frac{\frac{F_{maks} - F_{min}}{F_{maks}}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (5.1)$$

Det deles på den totale bæreevnen og den totale forankrede lengden slik at de ulike testene kan sammenlignes. $K_{F/L}$ kan beskrives som forholdet mellom prosentvis endring av bæreevne og prosentvis endring av forankret lengde, og er dimensjonsløs. Det forventede bidraget fra endring av L gir en verdi lik 1. Verdier over 1 angir her at testen ga et større fall i bæreevne enn forventet fra bare L. En verdi lik 2 angir eksempelvis at fallet i bæreevne er dobbelt så stort som det forventede bidraget fra endringen av L. Ved å lese av de registrerte kurvene fra uttrekkstestene kan $K_{F/L}$ etableres for de 18 forsøkene. Verdiene gis i Tabell 5. 1.

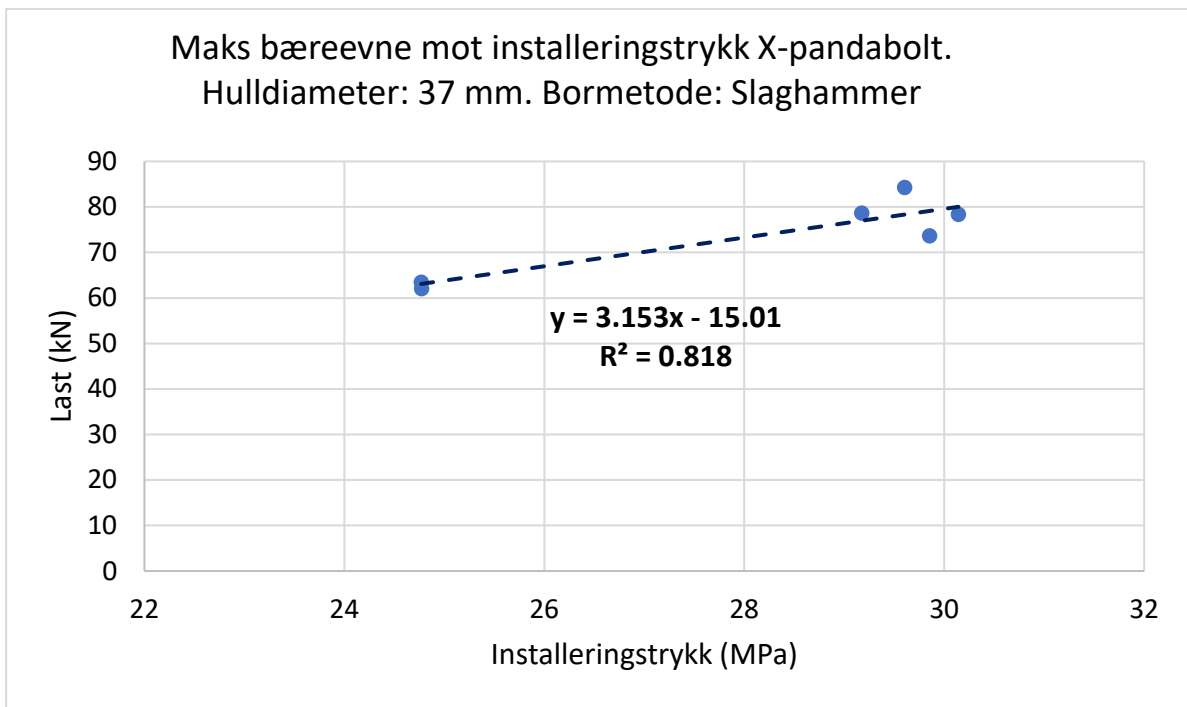
Tabell 5. 1: Forholdstall $K_{F/L}$ for endring av bæreevne over endring av forankret lengde.

Bolt nr.	F maks (kN)	F min (kN)	Deformasjon (mm)	$K_{F/L}$
1	60,24	37,92	82,07	1,625
2	75,01	34,01	122,70	1,604
3	46,61	26,59	119,07	1,299
4	44,80	19,51	125,98	1,613
5	84,33	44,51	120,07	1,416
6	78,68	30,00	120,10	1,855
7	63,49	20,74	121,60	1,993
8	62,07	22,05	122,43	1,896
9	56,98	10,60	120,30	2,436
10	44,38	12,63	121,20	2,125
11	28,61	15,80	120,59	1,337
12	35,47	21,27	120,65	1,195
13	47,82	14,28	121,02	2,086
14	37,43	14,57	120,57	1,823
15	78,37	39,12	120,01	1,502
16	73,67	41,99	120,22	1,288
17	39,58	14,68	120,88	1,873
18	37,32	27,74	120,58	0,766

Det observeres at nesten samtlige bolter gir en verdi større enn bidraget fra L. Gjennomsnittet og standardavviket av $K_{F/L}$ er henholdsvis 1,652 og 0,3913. Fra dette kan vi se at de andre elementene i ligning 2.1, som ruhet og kontaktspenning ikke forblir konstante. Et stort bidrag til dette er oppknusning av ujevnheter i borehulloverflaten som gir en senket ruhet ved uttrekning av bolten. Den synkende ruheten påvirker også den sekundære kontaktspenningen, som igjen bidrar til synkende bæreevne. Det observeres at bolt nr. 18 har en svært jevn lastkurve og dermed har en endring i bæreevne mindre enn bidraget forventet fra bare L. Andre bolter opplever verdier over 2 som angir et større fall i forankringsevne. Observasjonene viser at komponentene i ligning 2.1 endres når bolten trekkes ut, men det oppnås ikke her å skille ut bidraget til de enkelte elementene. Merk at den etablerte $K_{F/L}$ er et svært forenklet bilde av bæreevnefallet, og benyttes for å illustrere nettopp bidraget fra endringen i ruhet og endringen i kontaktspenningen, i tillegg til det mer trivielle bidraget fra endringen av forankret lengde.

5.2.2. Påvirkning av bæreevne fra Installeringsstrykk.

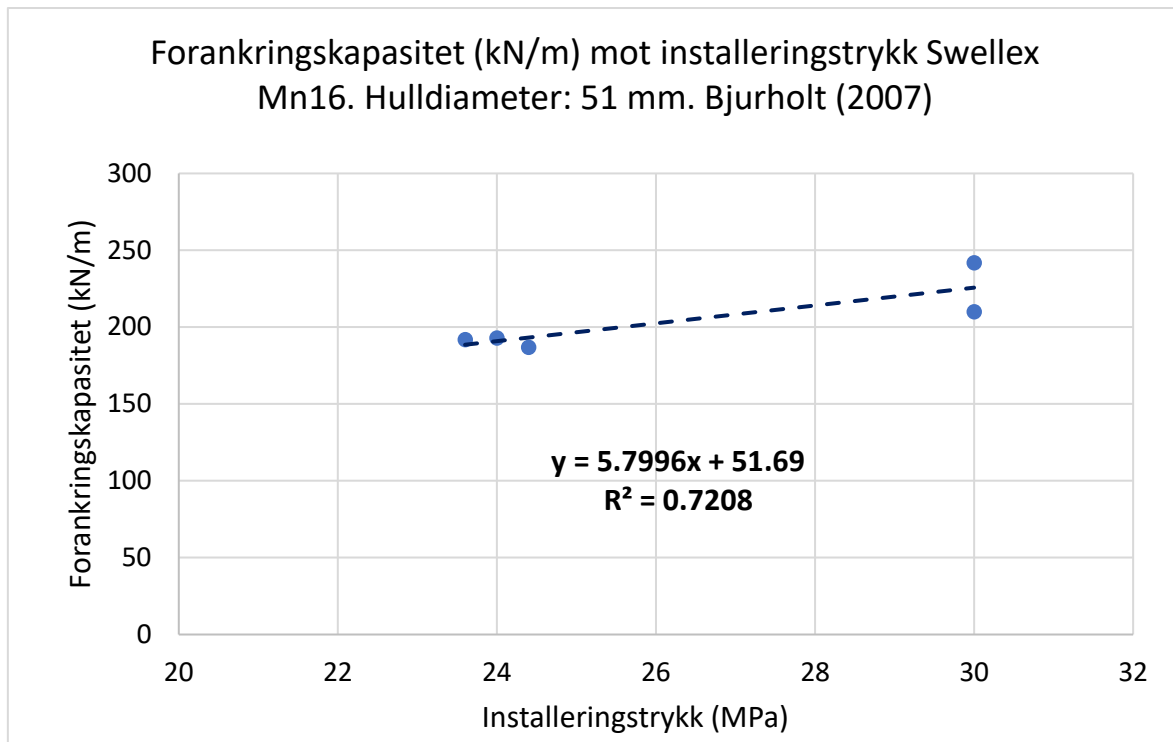
For å se på endringen av bæreevnen som resultat av enkeltvariabler vil verdiene i Figur 4. 9 med samtlige maksimale bæreevner her deles opp. Resultatene presenteres slik at én av variablene: borehulldiameter, installeringsstrykk eller boremetode varieres, mens de andre holdes konstant. I Figur 5. 1 gis de maksimale lastverdiene for bolter i borehull på 37 mm boret med slaghammer. Dette inkluderer bolter installert med vanntrykk på både 30 MPa og 24 MPa.



Figur 5. 1: Maksimal bæreevne plottet mot installeringsstrykk. En lineær trendlinje angir økende bæreevne ved økende vanntrykk.

Bæreevnen plottes mot installasjonsstrykket og viser en klart høyere bæreevne for boltene installert med høyere vanntrykk. Også oppgitt er en lineær trendlinje og R^2 for punktene. Merk at de fire boltene installert med ca. 29.1 MPa til 30.1 MPa ikke gir en tydelig sammenheng mellom vanntrykk og bæreevne for seg selv. Altså er usikkerheten i testen for stor til å måle endringen i bæreevne over et så lite spenn (1 MPa) i vanntrykk. Endringen mellom 24 MPa og 30MPa er derimot tydelig på ca. 16 MPa som tilsvarer et omtrentlig fall på 20% fra boltene installert med 30 MPa. Det anbefalte trykket for disse boltene fra produsenten er 27-30 MPa.

Bjurholt 2007 utførte tester på Swellex Mn16 bolter installert i Kirunagruven. Testene utført i en porfyr-bergart på bolter installert i borehull med 51 mm diameter gis i Figur 5. 2.



Figur 5. 2: Forankringskapasitet (kN/m) plottet mot installeringstrykk. En lineær trendlinje angir økende bæreevne ved økende vanntrykk. Data fra (Bjurholt, 2007).

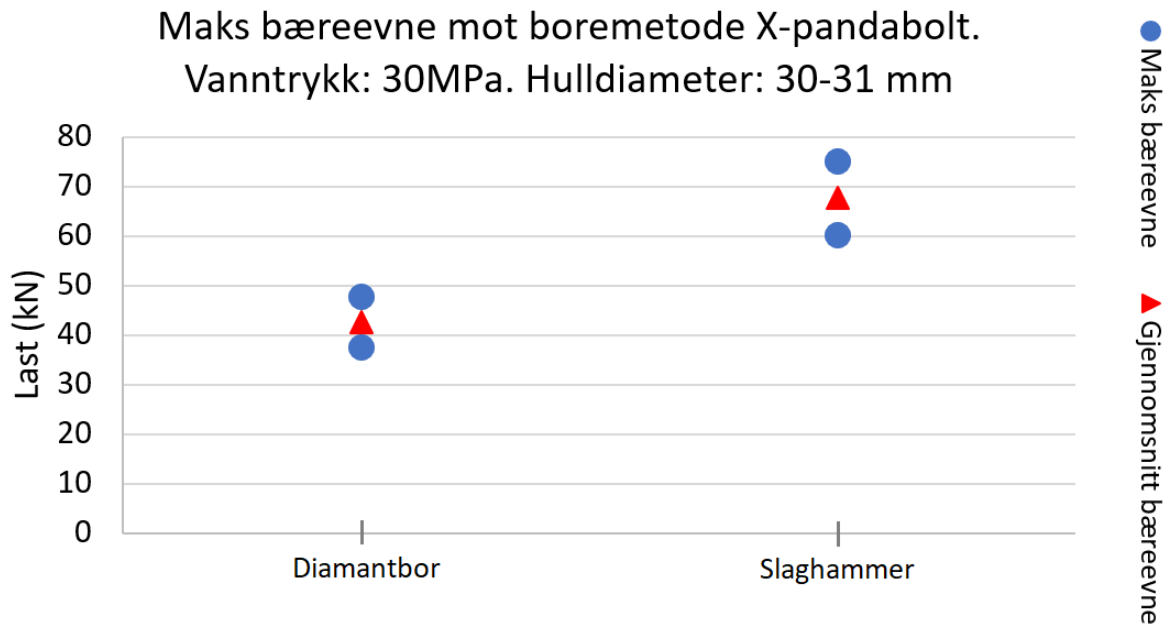
Testene angir en økende forankringsevne ved økende installeringstrykk. Det benyttes bæreevne pr. meter da boltene var av noe ulik lengde. For ordens skyld ville stigningstallet til den lineære kurven i X-Pandaforsøket i kN/m være lik **8,7583** mot Bjurholts **5,7996**. Dette er dog en sammenligning mellom bolter av ulik størrelse i ulike matriks.

Soni (2000) samlet resultater fra en rekke uttrekkstester på Swellex-bolter in situ. Med et datagrunnlag på 97 bolter fant Soni (2000) en sterk sammenheng mellom økende pumpetrykk og økende bæreevne. Dette var mindre synlig der bolter gikk i brudd, men svært tydelig hos bolter som oppnådde glidning. Bolter som går i brud er lite egnede til dette formålet siden variablene som her testes ikke påvirker selve boltens styrke i noen stor grad.

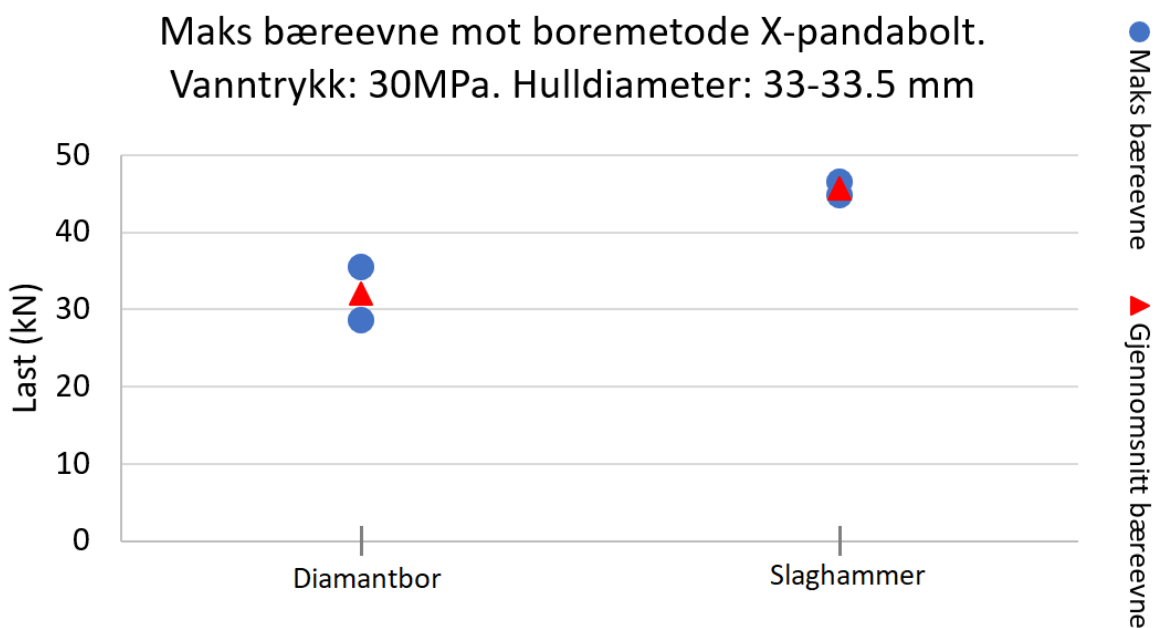
For en svært svak bergmasse fant Håkansson og Li 1997 (1997) at en økning av installeringstrykk fra 24 MPa og 32 MPa ga en nedgang i bæreevne. Det resultatet viser at et høyt vanntrykk ikke nødvendigvis gir en bedre bæreevne i en svak bergart. Generelt vil et økt pumpetrykk gi en økt bæreevne, men i svake bergarter kan høyt vanntrykk føre til full utvidelse av boltens eller strekkbrudd i borehullet (Li, 2016). For svært harde bergarter derimot kunne Soni (2000) vise til forsøk der en økning av pumpetrykk fra 30 MPa til 40 MPa ga en økning av boltens prestasjon på 25%.

5.2.3. Påvirkning av bæreevne fra borehullruhet

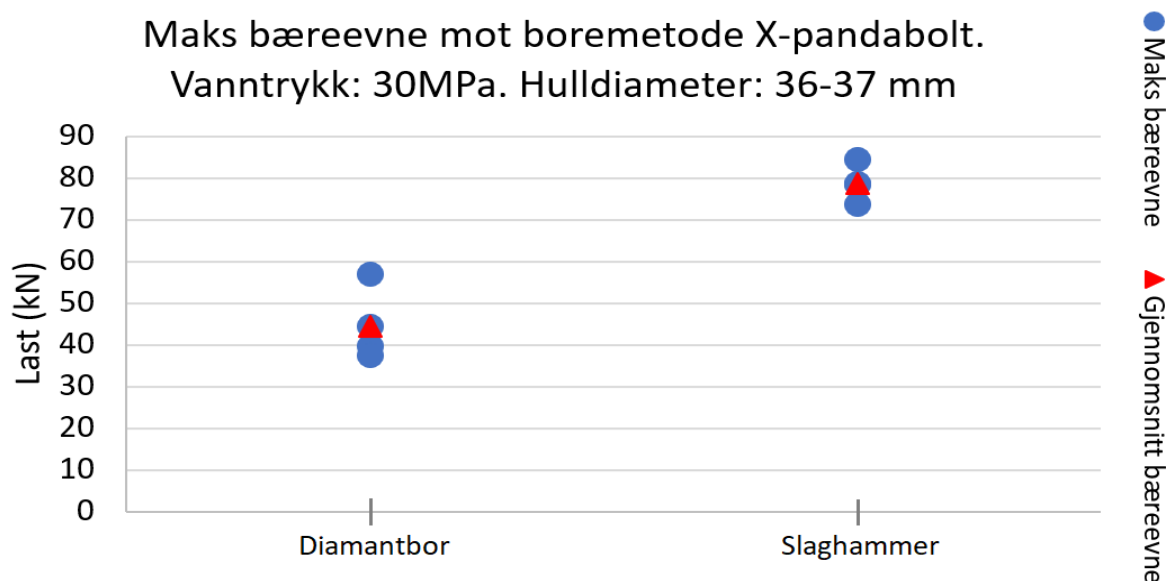
For å observere endringen i bæreevne basert på borehullets ruhet sammenlignes resultater fra de to ulike boremetodene. Boringen med slaghammer gir en klart høyere ruhet. I Figur 5. 3 til Figur 5. 5 sammenlignes de to boremetodene for hver av borehulldiameterne.



Figur 5. 3: Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 30-31 mm. Også oppgitt er gjennomsnittsverdier for hver kategori.



Figur 5. 4: Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 33-33,5 mm. Også oppgitt er gjennomsnittsverdier for hver kategori.



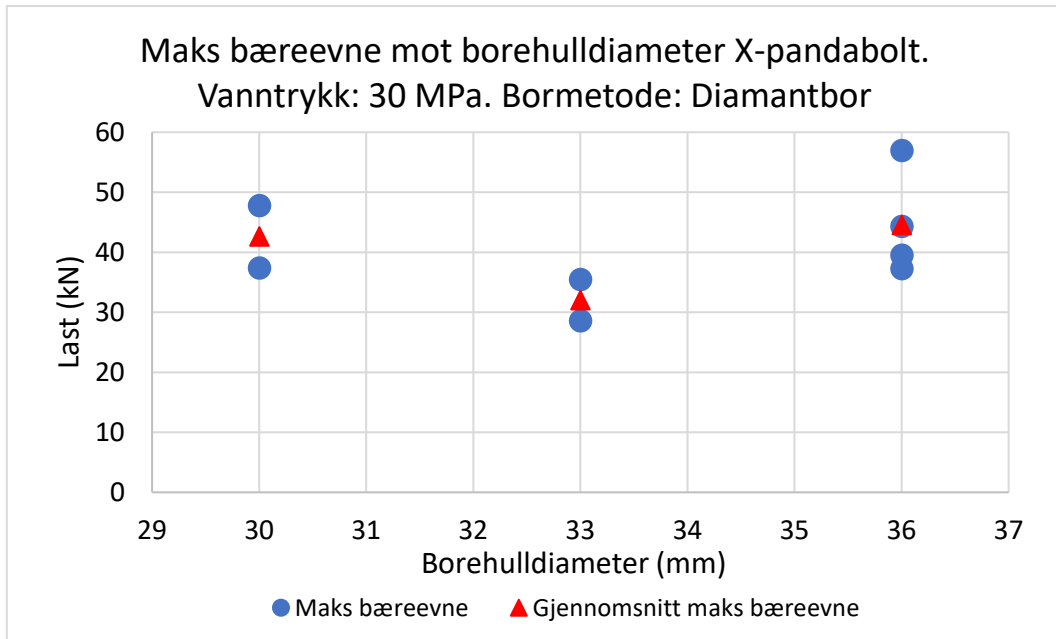
Figur 5. 5: *Maksimal bæreevne plottet mot boremetode for hulldiameter 36-37 mm. Også oppgitt er gjennomsnittsverdier for hver kategori.*

Det kan ikke opprettes en trendlinje, men samtlige resultater viser at borehullene med høy ruhet ga høyere bæreevne. Dette stemmer for alle de benyttede borehulldiameterne. Bæreevnene for de tre diameterne 30-31mm, 33-33,5mm og 36-37mm falt henholdsvis 25,0kN, 13,7kN og 34,2kN fra slagghammer til diamantbor. Som prosent av bæreevnen ved slaghammer tilsvarer dette fallet ca. 37%, 30% og 43 % for de respektive diameterne. Altså vil en endring til lav ruhet føre til et stort tap av bæreevne.

Disse resultatene samsvarer med den analytiske teorien som gir at den sekundære kontaktspenningen (q_2) er direkte avhengig av borehullets ruhet i ligning 2.3. Denne ruheten tillater boltene å formes etter borehullet og gir en mekanisk sammenlåsning. I de glatte borehullene boret med diamantbor forsvinner denne effekten og q_2 går mot 0. Ligning 2.1 gir at boltens bæreevne er avhengig av borehullets ruhet (i), selv uten bidraget fra q_2 . Li (2016) argumenterer også at et glatt borehull vil gi en høy koeffisient λ , og dermed en lavere q_1 , på grunn av mangel på mekanisk låsing. Det lyktes ikke å finne andre eksempler på testing av denne typen friksjonsbolter med hensyn til borehullets ruhet. Dermed står disse resultatene som antydning for at de teoretiske antagelsene medfører riktighet. Bruk av diamantbor til boltehull er ikke utbredt, men hvis et slikt hull skulle være tilgjengelig bør det altså ikke benyttes til friksjonsbolter om man ønsker en høy bæreevne.

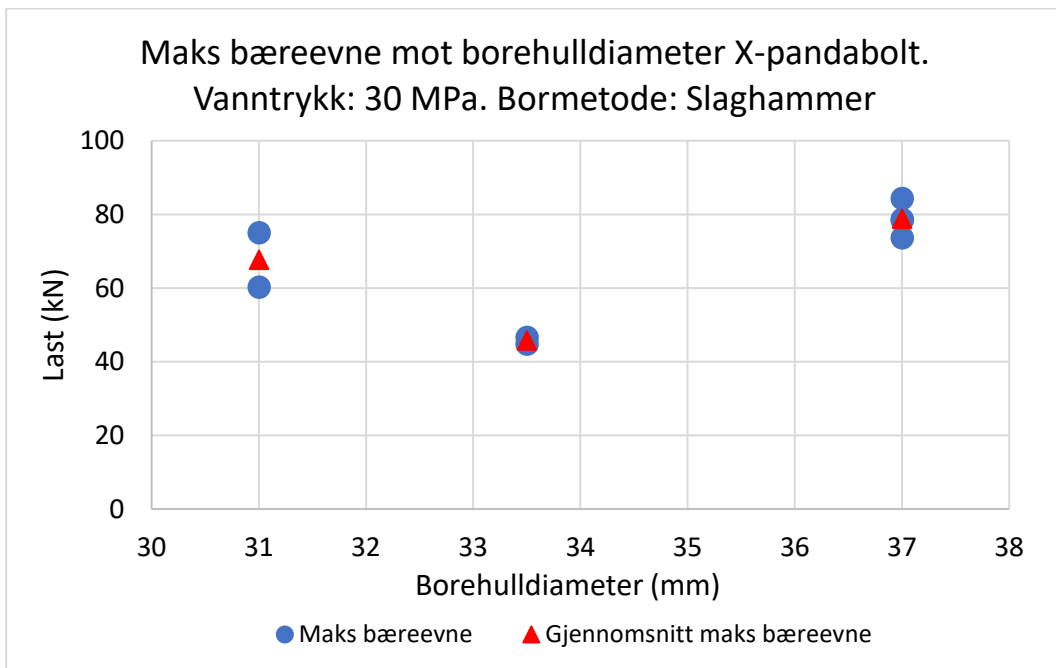
5.2.4. Påvirkning av bæreevne fra borehullstørrelse.

For å se på endringen av den primære kontaktspenningen (q_1) som funksjon av boltens utfoldingsgrad vil tester ved ulike borehulldiameterer sammenlignes. Gitt antagelsen om at diamantborhullene har en ruhet tilnærmet null vil sekundærspenningen være neglisjerbar i de diamantborede hullene. Merk dog at endringen av kontaktareal også vil påvirke bæreevnen. Figur 5. 6 gjengir de maksimale bæreevnene fra diamantborede hull med tre ulike diameterer.



Figur 5. 6: Maksimal bæreevne plottet mot borehulldiameter for diamantborede hull. Også oppgitt er gjennomsnittsverdier for hver kategori.

Tilsvarende vil også boltens bæreevne som funksjon av diameter på borehull observeres. Dette vises ved å plote 3 ulike hulldiameterer boret med slaghammer i Figur 5. 7.

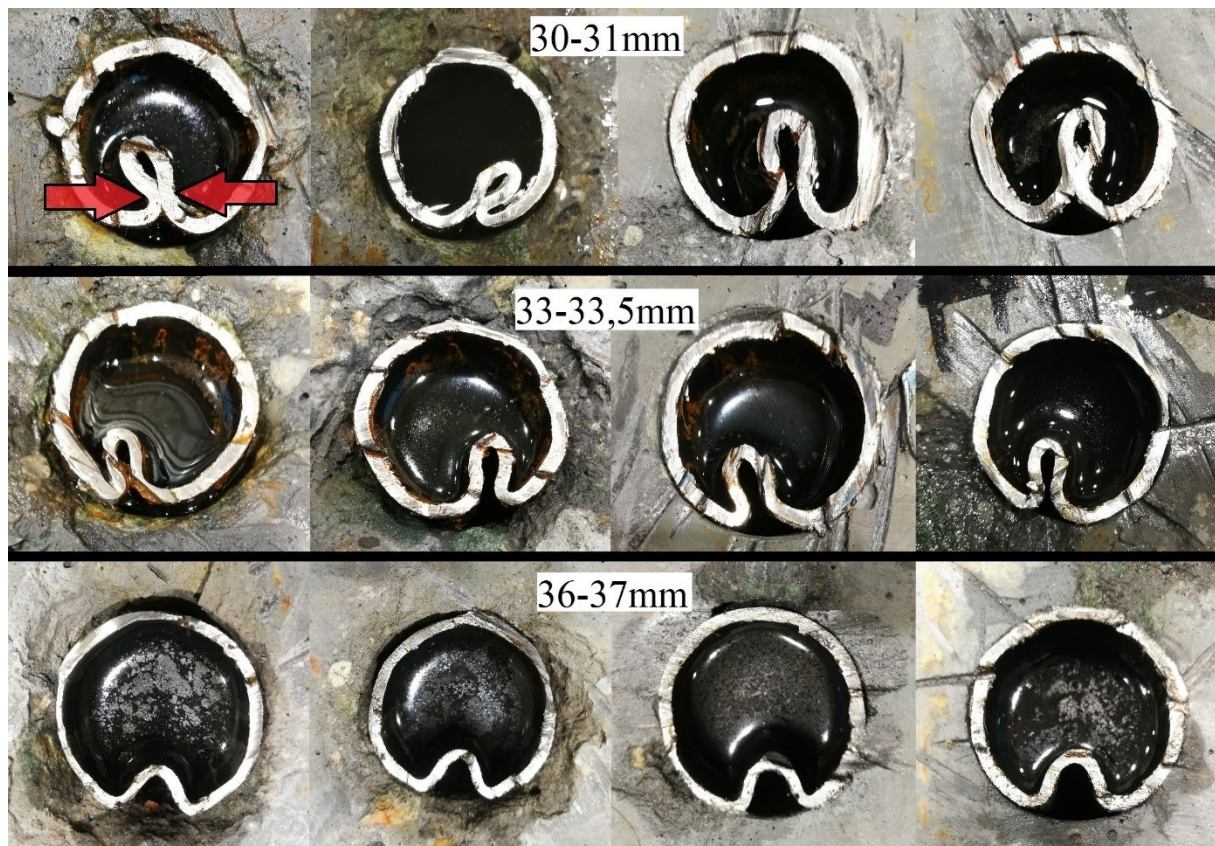


Figur 5. 7: Maksimal bæreevne plottet mot borehulldiameter for slaghammerborede hull. Også oppgitt er gjennomsnittsverdier for hver kategori.

Både Figur 5. 6 og Figur 5. 7 viser at den høyeste bæreevnen oppnås av bolten installert i det største borehullet. Dette er i samsvar med den analytiske modellen i ligning 2.1 og 2.2 som angir økt bæreevne ved økt borehull diameter. Bæreevnen øker både på grunn av det økte kontaktarealet og på grunn av økt radiell stivhet i bolten. Motstridene med den analytiske teorien er dog resultatene som gir at den laveste diameteren oppnår den midterste

bæreevnen. I både testing på diamantborede og slaghammerborede hull oppnås den laveste bæreevnen ved borehullene av midterst størrelse (33-33,5 mm). Bæreevnepåfallet fra 36 mm til 33 mm er på 12 kN som tilsvarer 28% av bæreevnen ved 36 mm. For slaghammerhullene er det tilsvarende påfallet 33 kN som utgjør 42% av bæreevnen ved 37 mm. Dette viser at borehullstørrelse her har en stor betydning for boltens bæreevne. Merk at den anbefalte borehulldiameteren for den benyttede boltene her er 32 – 36 mm. Den laveste borehulldiameteren på 30 mm til 31 mm er altså utenfor produsentens anbefaling. Grunnet boltens bredde i bunn på 29 mm er de benyttede hullene så små som praktisk gjennomførbart.

Li (2016) påpeker at Gramström fant en lineær sammenheng mellom borehullets diameter og boltens bæreevne. Soni (2000) fant at boltens bæreevne økte med hulldiameteren innenfor det anbefalte spekteret for boltene. Soni fant videre at boltens bæreevne var lavere for borehulldiameterer over og under den anbefalte størrelsen. Soni sitt datagrunnlag var 183 bolter testet in situ i varierende bergforhold. Innenfor de anbefalte diameterene stemmer funnene gjort i denne teksten med Soni og den analytiske teorien. Bæreevnen påvirkes her av kontaktarealet og størrelsen på tungen. En stor tunge utgjør en radiell svakhet og fungerer som en fjær som lett kan bøyes. Når tungen blir mindre, blir boltens form mer sirkulær og oppnår en høyere radiell stivhet. For den minste diameteren her benyttet oppstår et annet fenomen som illustrert i Figur 5. 8.



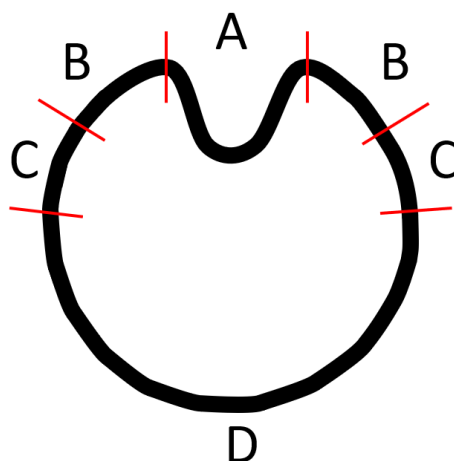
Figur 5. 8: Tverrsnitt av bolter installert i tre ulike hullstørrelser. Tre av fire bolter installert i 30-31 mm viser tydelig kontakt mellom boltetungens «skuldre», eksemplifisert øverst til venstre med røde piler.

Figuren gir som forventet en lang tunge for 33mm og en kortere bred tunge for 36mm. For bolten installert i 30 mm borehull er endringen i diameter ved oppblåsing så liten at det oppnås en kontakt mellom de to sidene av tungen (angitt ved rød pil). Denne kontakten ser ut til å opprette en sirkulær form med høyere radiell stivhet enn når tungen åpnes. De to «skuldrene» til tungen kan støtte hverandre og gjør dermed resten av tungen neglisjerbar.

Selv om den minste hull diameteren ser ut til å gi god bæreevne bemerkes det at denne hullstørrelsen er upraktisk. Eksempelvis vil en oppsprukken bergart ha nedfall fra borehullveggene som lett kunne stoppe innføringen av en bolt i denne diameteren. Det er også ikke anbefalt siden en liten endring av borehulldiameter raskt vil medføre tap av kontakt mellom tungen og skuldrene og dermed føre til et stort fall i bæreevne.

5.3. Diskusjon boltens kontakt med hullveggen

Slipemerkene på boltene etter uttrekning viste at det ikke oppnås fullstendig kontakt mellom boltene og borehullet, vist i Figur 4. 10 og Vedlegg B: Slipemerker på et utvalg bolter. Det kan forekomme tre tilfeller av mangel på kontakt mellom boltene og hullveggen. Det første er den åpenbare mangelen på kontakt der tungen bøyer innover mot sentrum av boltene. Denne går langs hele boltens lengde og utgjør her ca. 10 mm til 20 mm. Det observeres en bredere tungeseksjon i hullene med større diameter. Hvis boltene utvides fullstendig, forsvinner denne mangelen på kontakt. Det andre tilfellet er mangelen på kontakt ved overgangen fra den utvidbare seksjonen til endene av boltene. Siden pakningene i endene er smalere enn den ferdig utvidede boltene gir geometrien at overgangen ikke oppnår kontakt. Her utgjør dette ca. 15 mm til 30 mm i hver ende. Det tredje tilfellet er seksjoner langs boltene som ikke oppnår kontakt. Ved å se på alle boltene er det klare mønstre på hvor disse oppstår. Figur 5. 9 deler boltetverrsnittet opp i seksjoner som typisk oppnår ulik grad av kontakt.

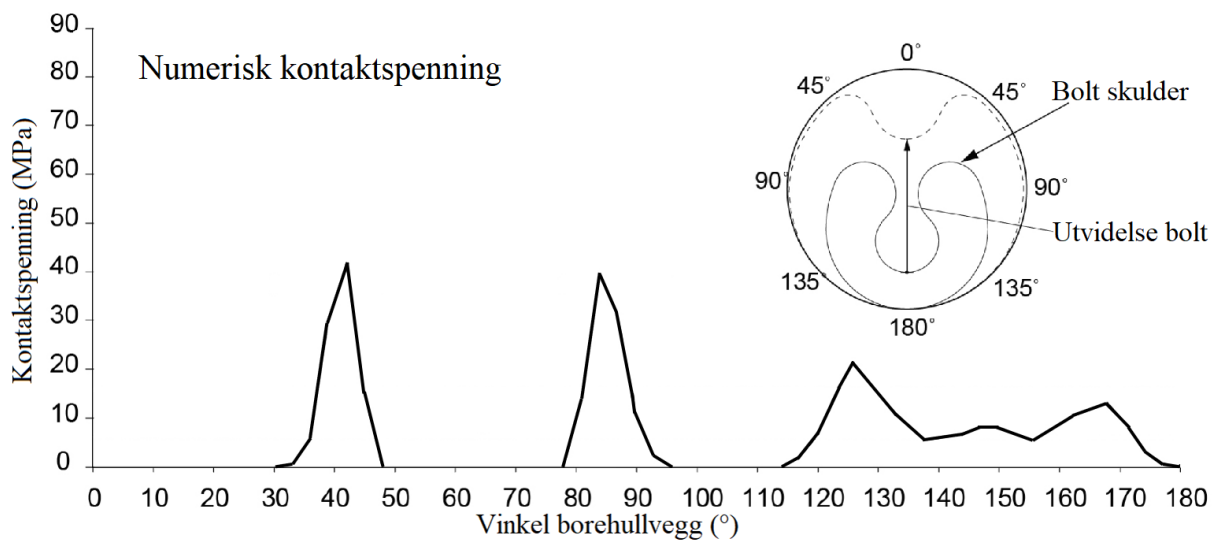


Figur 5. 9: Tverrsnitt av utvidet bolt inndelt i seksjoner A-D med ulik grad av kontakt med hullveggen. Basert på slipemerker på uttrukne bolter.

Seksjon A er tungen som aldri oppnår kontakt her. Seksjon B er skuldrene til tungen som alltid oppnår en god kontakt i varierende bredde. Seksjon C oppnår nesten aldri kontakt.

Bredden til seksjon C kan variere. Seksjon D oppnår kontakt, men denne kontakten er gjerne ujevn og kan ha striper uten kontakt. Generelt sett øker kontakten mot midten av boltens lengde. Merk at disse observasjonene er gjort på de første 120 mm av en total 360 mm lengde.

Den benyttede teorien i ligning 2.1 som beskriver maksimal bæreevne antar et areal som skjærkraften virker over. Dette arealet er gitt som den utvidbare lengden multiplisert med borehullets omkrets. Altså er antagelsen at kontaktflaten tilsvarer hele borehullets overflate. De overnevnte resultatene gir at dette er en forenkling. Dette fenomenet ble også diskutert av Kim et al. (2017) ved deres numeriske modellering. I Figur 5. 10 gis den radielle kontaktspenningen etablert med den numeriske modellen fra Kim et al. (2017).



Figur 5. 10: Fordeling av kontaktspenning mellom en installert bolt og hullvegg. Figur modifisert fra (Kim, et al., 2017).

Figuren gir at den numeriske modellen produserer lignende resultater som de observert i laboratorieforsøkene. Den første spenningstoppen ved 30-50° stemmer godt med seksjonen «B» der den beste kontakten observeres. Modellen gir også mangel på kontakt i seksjon «A» 0-30° og «C» 50-80°. I tillegg viser modellen en mer detaljert fordeling i seksjon «D» med en spenningstopp ved 85° etterfulgt av mangel på kontakt og til slutt en seksjon med jevn, lavere spenning. Totalt sett stemmer de observerte slitmerkene godt med den numeriske modellen.

5.4. Usikkerhet og ukontrollerte variabler

For de fleste testoppsettene ble det trukket ut to bolter. Et høyere antall tester vil gi en høyere sikkerhet for representative resultater. Her godtas det lave antallet tester da formålet er å observere forskjellene mellom ulike testoppsett heller enn å etablere nøyaktige gjennomsnittsverdier av bæreevne for det enkelte testoppsett. Det bemerkes at hvis man likevel ønsker en høyere nøyaktighet og sikkerhet vedrørende resultatene i denne teksten bør forsøkene gjentas.

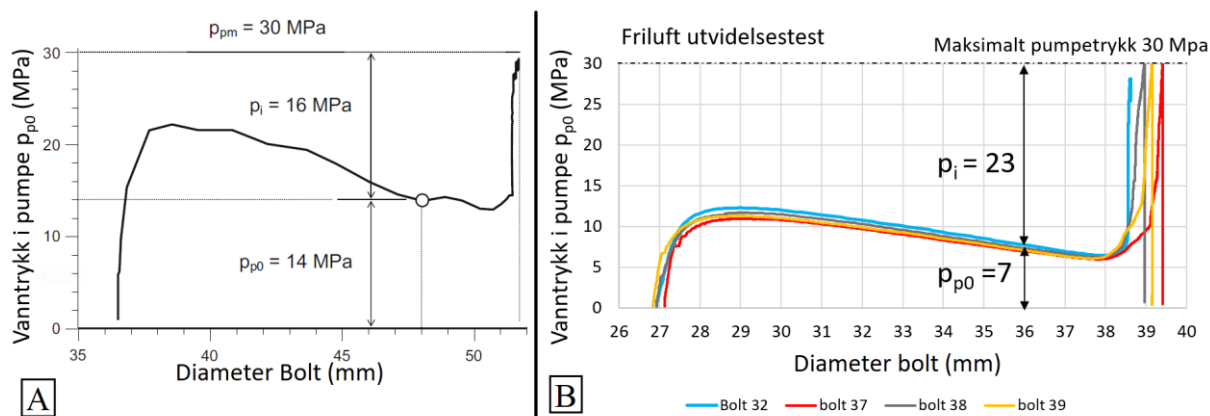
Ved utførelse av testene ble det forsøkt å minimere andre variabler så mye som mulig. Likevel gir last -deformasjonskurvene fra uttrekkstestene noe variasjon for tester med likt utgangspunkt. Et eksempel på dette er endringen fra maks bæreevne til bæreevne ved testslutt for bolt nr. 9 og 18. Bolt 9 går fra 57 kN til 10,8kN mens Bolt 18 går fra 37,3 kN til 27,8 kN, begge med det samme testoppsettet. Andre bolter som Bolt 7 og Bolt 8 oppfører seg svært likt. Det må altså innrømmes at det ikke ble oppnådd identiske forhold for testene. Et klart bidrag til dette er den overnevnte kontakten mellom bolten og borehullet. Kontakten følger visse mønstre, men innehar også en naturlig variasjon som gir variasjon i de oppnådde bæreevnene.

Et annet potensielt bidrag kommer fra tid mellom installasjon og uttrekning. De fleste boltene ble trukket 5-7 dager etter installasjon, men bolt nr. 15-18 ble trukket etter 21 dager. Det observeres at disse boltene ga en gjennomsnittlig 8,9 kN lavere maksimal bæreevne enn boltene trukket etter 5-7 dager. Det er usikkert om dette skyldes kryp-deformasjon over tid eller andre variabler. Soni (2000) fant at utvidbare bolter installert in situ ga dårligere bæreevne over tid, men dette var over en periode på opptil 3300 dager. Det gjennomsnittlige fallet i bæreevne representerte bare ca. 0.01% pr. dag, og er ikke tilstrekkelig til å justere resultatene fra denne teksten. For en kort periode som er relevant her gir ikke Soni sine data en tydelig trend.

Tabell 4. 1 gir også at ruheten til borehullene varierte noe innenfor den samme boremetoden. Kommentarene i tabellen er subjektive og basert på øyemål, men representerer likevel tydelige ulikheter i ruhet og bølgegrad i borehullene. Hull med høyere grad av ruhet og bølget overflate kan oppnå en høyere sekundær spenning når bolten formes etter borehullet. En siste mulig bidragsyter til usikkerhet i resultatene er vann i borehullene. Som gitt av Tabell 4. 1 lykkes det ikke å holde de fleste borehullene tørre. Dermed har noen av boltene tørrere omgivelser enn andre. Over lengre tid kan vann føre til korrosjon og dermed svekke bolteoverflaten. I tidsrommet som her benyttes er det usikkert hvor mye dette kan påvirke bæreevnen. Potensielt kan vannet også påvirke betongen i borehullet. Avslutningsvis bemerkes det at alle disse variablene vil være til stede i en bolt installert in situ. Det bør altså forventes at bolter installert i tilsynelatende like omstendigheter vil gi noe ulik bæreevne.

5.5. Diskusjon friluft utvidelsestest

Kurvene som angir vanntrykk mot tid i Figur 4. 11 viser en god overenstemmelse med de tidligere erfaringene gitt av Li (2016). En sammenligning gis i Figur 5. 11.

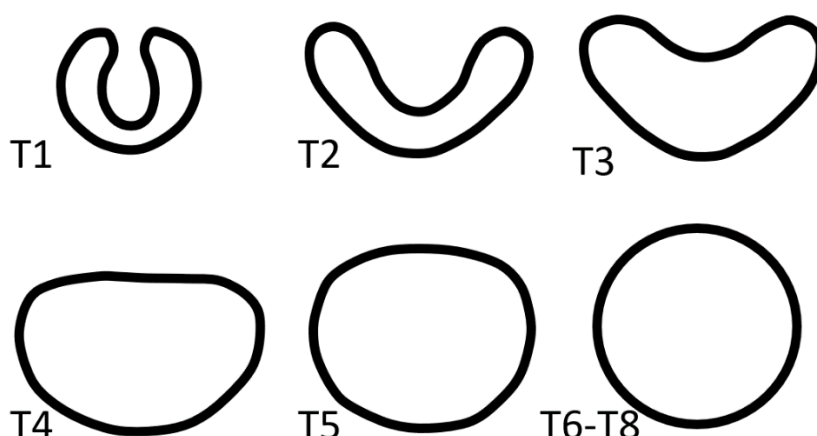


Figur 5. 11: Vanntrykk mot bolt diameter fra Li (2016) (A) og tester utført ved denne oppgaven (B). Også vist er eksempler for p_i og p_{p0} for de to boltene.

I figuren fra Li angis et eksempel på p_i for en borehulldiameter på 48mm (16 MPa). En tilsvarende verdi for X-Pandaboltene ved diameter på 36 mm vil være 23 MPa. Det observeres at vanntrykket som behøvedes i testene utført på X-Pandabolten er lavere enn de av Li (Li, 2016). Grunnen til dette er forskjellen i størrelsen på boltene. Boltene benyttet av Li hadde en originaldiameter på 54 mm og en ståltykkelse på 3 mm, mot 39 mm og 2 mm for X-Pandabolten. Den tynne bolten er lettere å deformere og gis dermed en høyere p_i verdi. Ifølge ligning 2.2 vil en slik høy p_i gi en høy q_1 .

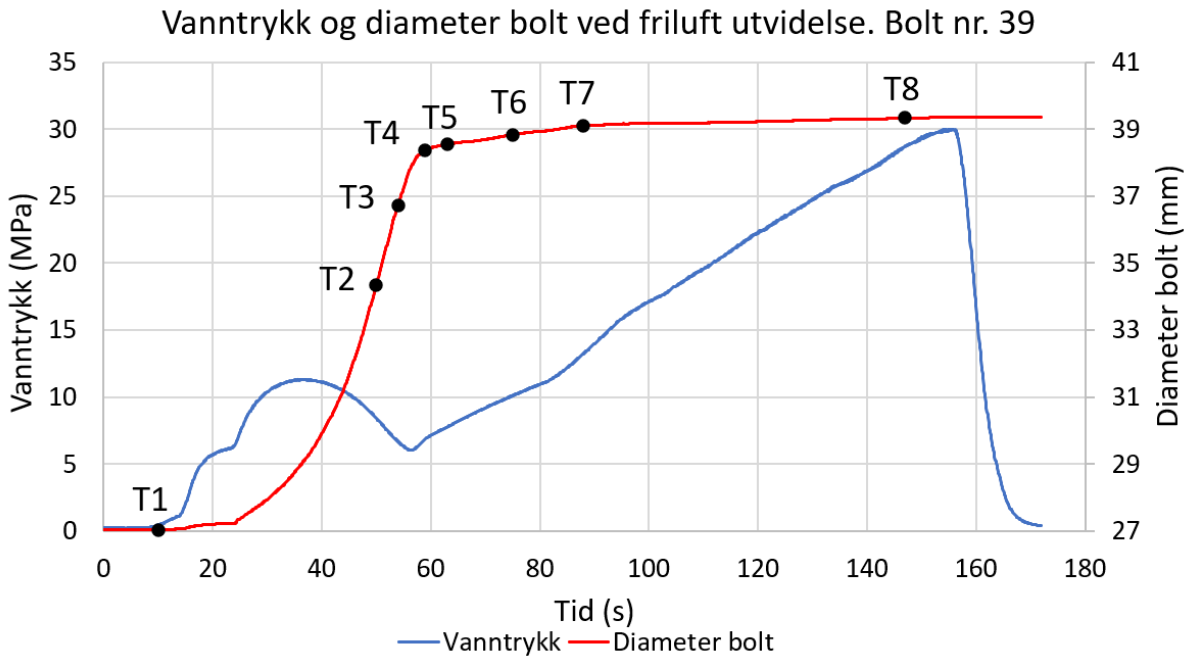
Fra formen på kurvene gir teorien også at et større borehull fører til en høyere p_i og dermed gir nok et bidrag til høyere bæreevne fra økning av borehulldiameter. Dette er dog en antagelse som til dels baseres på at bolten oppfører seg likt i friluft og i et borehull. Under vil boltens utvidelse i friluft illustreres.

Bildeserien i Figur 4. 12 til Figur 4. 15 viser hvordan bolten utvides i friluft. Skisser av tverrsnittet til bolten i de ulike stadiene gis i Figur 5. 12.

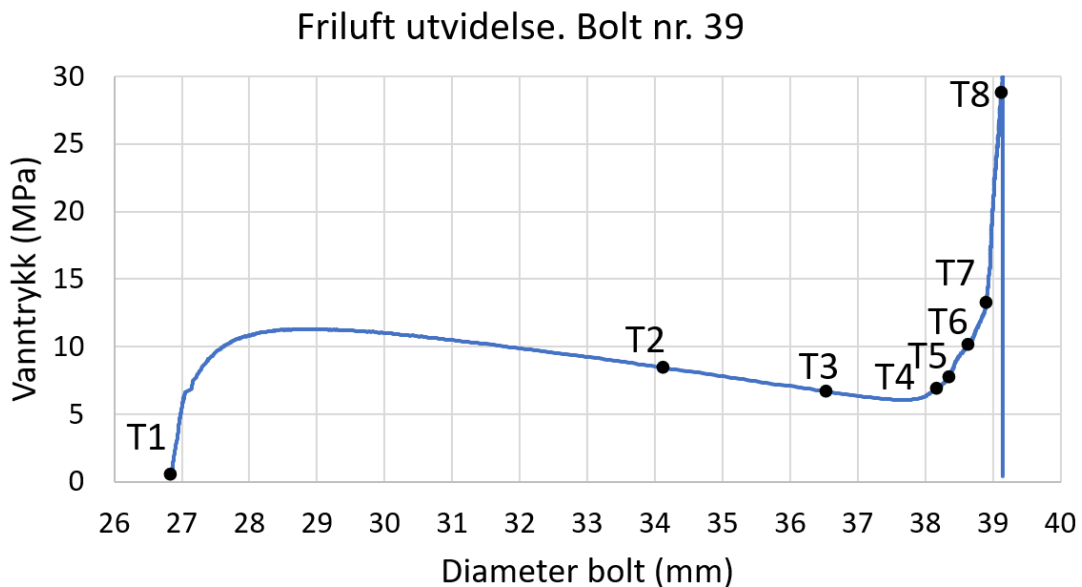


Figur 5. 12: Skisser av tverrsnitt ved ulike stadier (T1-T8) i friluft utvidelse.

Figur 5. 13 og Figur 5. 14 viser T1-T8 på kurvene over de målte verdiene.



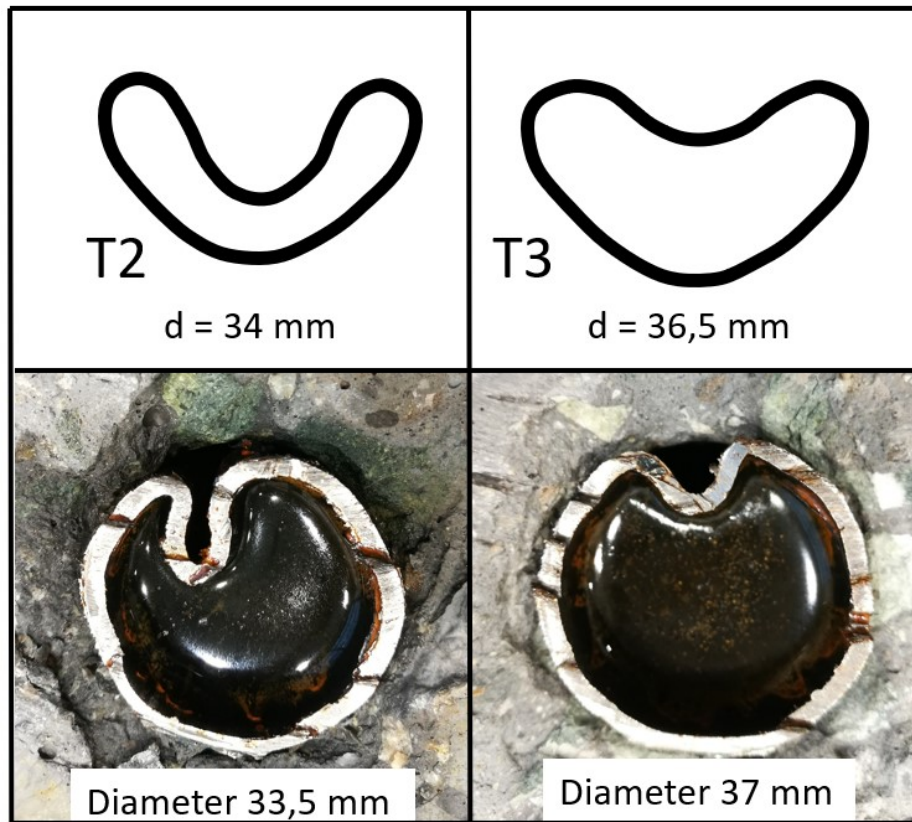
Figur 5. 13: Vanntrykk og estimert diameter mot tid. T1-T8 angitt på diameter-kurven.



Figur 5. 14: Vanntrykk mot estimert diameter. T1-T8 angitt på kurven.

Vi ser av Figur 5. 12 at antagelsen i ligning 2.4 om at boltens form er sirkulær er en forenkling. I stedet får bolten først en bredde som er større enn den utregnede diameteren d . Denne bredden blir også større enn boltens originaldiameter. Hvis bolten hadde blitt installert i et borehull ville hullveggene påvirket formen til bolten allerede før T3. Ved T4 er størsteparten av den målbare deformasjonen inntruffet. Fra T4 til T8 endres den observerte deformasjonen lite, men boltens form endres fra halv- til helsirkelformet og boltens bredde synker fra ca. 45 mm til 39 mm. Dette illustrerer forskjellen på boltbredde og utregnet diameter i forsøket. Siden bolten får utvides fritt i bredden er formen ved en gitt utregnet diameter en dårlig tilnærming til formen oppnådd i et borehull av tilsvarende

diameter. Dette illustreres i Figur 5. 15 der tverrsnitt ved T2 og T3 sammenlignes med tverrsnitt i borehull med 33,5 mm og 37 mm.



Figur 5. 15: Skisser av tverrsnitt ved estimerte diametere fra friluft utvidelse sammenlignet med tverrsnitt av bolter installert i tilsvarende borehulldiametere.

Testoppsettet innehar noe friksjon og treghet. Dette ble illustrert i Figur 4. 20 med avlastninger gjort etter T3, der den utregnede diameteren er over 37mm. For denne seksjonen er friksjonen mellom tråden og bolten for stor til å plukke opp de små deformasjonene. Paradoksalt nok er altså den forventede økningen i stivhet ikke målbar siden den medfører en lav deformasjon som testoppsettet ikke kan registrere.

Oversikten over de utregnede stivhetene K_b viser en synkende lineær trendlinje. Dette er i utgangspunktet motsatt av det forventede økningen av stivhet fra den analytiske teorien. Merk dog at den analytiske teorien omfatter boltens stivhet ferdig installert, og ikke endring av stivhet under installering. Merk også at polynom-trendlinjen angir en svak økning av stivhet mot slutten av det målbare området. Det er mulig at boltens radielle stivhet følger kurven for vanntrykk mot diameter i Figur 5. 14: Vanntrykk mot estimert diameter. T1-T8 angitt på kurven. som synker fra ca. 29 mm til 38 mm og deretter stiger. Samlet sett virker det dermed som at testen ikke gir en særlig god estimering av K_b for en bolt ferdig installert. Videre gir den bare gode resultater når bolten ikke er semisirkulær eller sirkulær. Det oppnås en mulig observasjon av økende stivhet, men testen er for unøyaktig til å måle lave deformasjoner tilhørende høy stivhet.

5.6. Diskusjon tilt test og enaksialt trykkforsøk

Tilt testen ga en friksjonsvinkel på $15,97^\circ \pm 2,79^\circ$. Sammenlignet med tester utført med bare steinkjerner er dette en relativt lav friksjonsvinkel. Dette forekommer på grunn av den svært glatte overflaten til boltstålet. Ved å justere vinkelen oppnås den grunnleggende friksjonsvinkelen på $13,97^\circ \pm 2,79^\circ$ (Li, et al., 2019). Merk at denne justeringen er etablert for testing på steinprøver og er relativt stor i forhold til den lave friksjonsvinkelen.

Den målte aksielle styrken ved de enaksiale trykktestene ble i overkant av 100 MPa. Dette tilsvarer en «sterk» bergart, eksempelvis en kompetent gneis eller en middels magmatisk bergart (Attewell & Farmer, 1976). Prøvens stivhet (E_t) på ca. 35 GPa, tilsvarer middels stivhet og sammenfaller godt med forventet stivhet til en betong med den målte aksielle styrken (Attewell & Farmer, 1976). Betongen kan altså godt representere en uniform bergart av middels stivhet og styrke.

6. Konklusjon

For å sammenligne analytiske teorier med fysiske observasjoner ble det utført uttrekkstester på utvidbare friksjonsbolter med 360 mm forankret lengde. Uttrekkstestene ble utført i laboratoriet med en homogen betongkloss med UCS på 110 MPa og Youngs modulus på 35 GPa. Boltene bæreevne ble observert med hensyn til variablene: installasjonstrykk, borehullruhet og borehullstørrelse.

De to benyttede vanntrykkene på 24 MPa og 30 MPa ga en klart økende bæreevne ved økende installasjonstrykk. Den gjennomsnittlige bæreevnen ble henholdsvis 62,8 kN og 72,8 kN for de to pumpetrykkene. Som prosent av bæreevnen ved 30 MPa tilsvarer dette en forskjell på ca. 20%. For en hard bergart er dette i god overenstemmelse med den analytiske teorien presentert av Li (2016) samt med resultater fra in situ testing presentert av Soni (2000). Dermed anbefales det, spesielt i harde bergarter, å benytte høyt vanntrykk for å oppnå høy bæreevne.

I alle de tre benyttede borehulldiameterne ga hullene boret med slaghammer en høyere bæreevne enn hullene boret med diamantbor. Dermed støttes den teoretiske konklusjonen om økt bæreevne ved økt borehullruhet. Fra slaghammer til diamantbor falt bæreevnen 25,0kN, 13,7kN og 34,2kN for den minste, mellomste og største diameteren. Som prosent av bæreevnen ved slaghammer tilsvarer dette fallet ca. 37%, 30% og 43 %. Dette resultatet understreker viktigheten av høy ruhet i borehullet for å oppnå høy bæreevne.

Innenfor de anbefalte borehulldiameterne ga økende diameter en økende bæreevne. For borehullene boret med diamantbor gir dette at den primære spenningen q_1 øker ved økende utfoldingsgrad. Fra 36 mm til 33 mm falt bæreevnen fra 44,6 kN til 32,0 kN, som tilsvarer et fall på ca. 28%. Dette er hovedsakelig på grunn av økningen i kontaktareal og boltens radielle stivhet som øker når den svake tungen blir mindre. For borehull boret med slaghammerboring gir også resultatene at boltens generelle bæreevne øker ved økende utfoldingsgrad. Fra 37 mm til 33,5 mm falt bæreevnen fra 78,8 kN til 45,7 kN som tilsvarer et fall på 42%. Dette er i samsvar med den analytiske teorien og funnene til Soni (2000) for bolter installert i anbefalte diameterer.

Derimot for svært små borehulldiameterer gikk bæreevnen her opp. Dette går mot Soni som fant lave verdier i små borehull, og mot teorien som angir lavere bæreevne ved mindre borehulldiameter. Grunnen til dette avviket ser ut til å være kontakten som oppsto mellom skuldrene til boltens tunge. De svært små borehullene skapte en situasjon der boltens sammenbrettede form kunne støtte seg mot seg selv istedenfor å åpne en svak tungestruktur. Det anbefales likevel ikke å benytte slike små borehull siden de er upraktiske og boltene lett kan miste kontakten mellom tungen og skuldrene hvis borehullet er for stort eller bergarten for svak. Dermed støtter funnene fra denne studien at borehullets diameter bør være i det øvre sjiktet av den anbefalte størrelsen for å oppnå størst bæreevne i harde

bergarter. Hvis bergarten er svak, kan store hulldiameterer føre til fullstendig utvidelse av bolten, og tap av kontakt mellom bolt og hullvegg.

For å estimere boltens radielle stivhet ved ulike diameterer ble omkretsen målt på bolter utvidet i friluft. Ved å utføre på- og avlastningssykluser ble den elastiske endringen av diameteren estimert. Resultatene ga en synkende trend for den radielle stivheten K_b ved økende diameter, med en svak antydning til økende stivhet ved de høyeste målbare diameterne. Testmetoden viste seg å være dårlig egnet til å måle den høye radielle stivheten som forventes ved semisirkulær og sirkulær tverrsnittform. Det konkluderes dermed at den teoretiske antagelsen om økende stivhet stemmer, men at det benyttede testoppsettet ikke egnes til å observere dette.

Det observeres også at boltens kontakt med bergveggen ikke er uniform. Slipemerker på uttrukket bolt viser at overgangen fra utvidet seksjon til den smale bolteenden gir mangel på kontakt. Videre gir utsiden av boltetungens skuldre klart best kontakt. Langs boltens lengde kan det også oppstå striper med lite eller ingen kontakt. Hvis nøyaktige bæreevner skal beregnes bør dette tas høyde for, eksempelvis ved bruk av numeriske metoder som presentert av Kim et al. (2017).

Referanser

Alejano, L. R. et al., 2018. ISRM suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(12), pp. 3853-3859.

ASTM, 2008a. D7401-08. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Rock Anchor Capacities by Pull and Drop Tests*.

ASTM, 2008b. D 4435 – 08. *Standard Test Method for Rock Bolt Anchor Pull Test*.

Attewell, P. B. & Farmer, I. W., 1976. 4: Rock as a material. I: *Principles of engineering geology*. London: Chapman and Hall.

Ayres, N. L. & Gardner, L. J., 2014. Testing tendon support units under a combination loading scenario. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(10), pp. 829-834.

Bieniawski, Z. T. & Bernede, M. J., 1979. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 16(2), pp. 137-140.

Bjurholt, J., 2007. *Drag-och skjuvtester på bergbultar*. Masteroppgave, Luleå tekniska universitet, Sverige.

Carranza-Torres, C., 2009. Analytical and numerical study of the mechanics of rockbolt reinforcement around tunnels in rock masses. *Rock mechanics and rock engineering*, 42(2), pp. 175-228.

Grasselli, G., 2005. 3D behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 42(1), pp. 13-24.

Hadjigeorgiou, J., Savguira, Y. & Thorpe, S. J., 2019. Comparative susceptibility to corrosion of coated expandable bolts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(8), pp. 2665-2680.

Hadjigeorgiou, J. & Tomasone, P., 2018. *Characterising the behaviour of rockbolts based on in situ pull tests*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, pp. 727-734.

Hagen, S. A., Larsen, T., Berghorst, A. & Knox, G., 2019. Laboratory full-scale rock bolt testing: Analysis of recent results. *Deep Mining 2019: Proceedings of the Ninth International Conference on Deep and High Stress Mining*, 24-25 juni, pp. 217-230.

Håkansson, U. & Li, C. C., 1997. Swellex in weak and soft rock - design guidelines. *International symposium on rock support - Applied solution for underground structures*, 22-25 juni, pp. 555-568.

Jennmar, 2022. *M3 Expandable Rock Bolt*. [Internett]
Available at: <https://www.jennmar.com/products/m3-expandable-rock-bolt>
[Funnet 11 mars 2022].

Kim, K. C., Kim, H. J., Jung, Y. H. & Shin, J. H., 2017. Anchorage mechanism of inflatable steel pipe rockbolt depending on rock stiffness. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 31 mars, pp. 249-263 (På koreansk).

Li, C. C., 2010. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), pp. 396-404.

Li, C. C., 2016. Analysis of inflatable rock bolts. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), pp. 273-289.

Li, C. C., 2017. *Rockbolting: principles and applications*. s.l.:Butterworth-Heinemann.

Li, C. C., Kristjansson, G. & Høyen, A. H., 2016. Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volum 59, pp. 16-23.

Li, C. C., Zhang, N. & Ruiz, J., 2019. Measurement of the basic friction angle of planar rock discontinuities with three rock cores. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), pp. 847-856.

Li, C. & Håkansson, U., 1999. Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks. *Proceedings of the international conference on: Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*, pp. 103-108.

NCM, 2021a. *New Concept Mining, X-Pandabolt*. [Internett]
Available at: <https://www.ncm.co.za/x-pandabolt.html>
[Funnet 12 mars 2022].

NCM, 2021b. *New Concept Mining, RS-Bolt*. [Internett]
Available at: <https://www.ncm.co.za/rs-bolt.html>
[Funnet 11 mars 2022].

NCM, 2021c. *New Concept Mining, Accessories: High Pressure Airpump*. [Internett]
Available at: <https://www.ncm.co.za/accessories.html#highPressureAirpump>
[Funnet 9 mars 2022].

Norsk Standard, 2019. *NS-EN 12390-3: Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*. [Internett]
Available at:
<https://www.standard.no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=1107001>

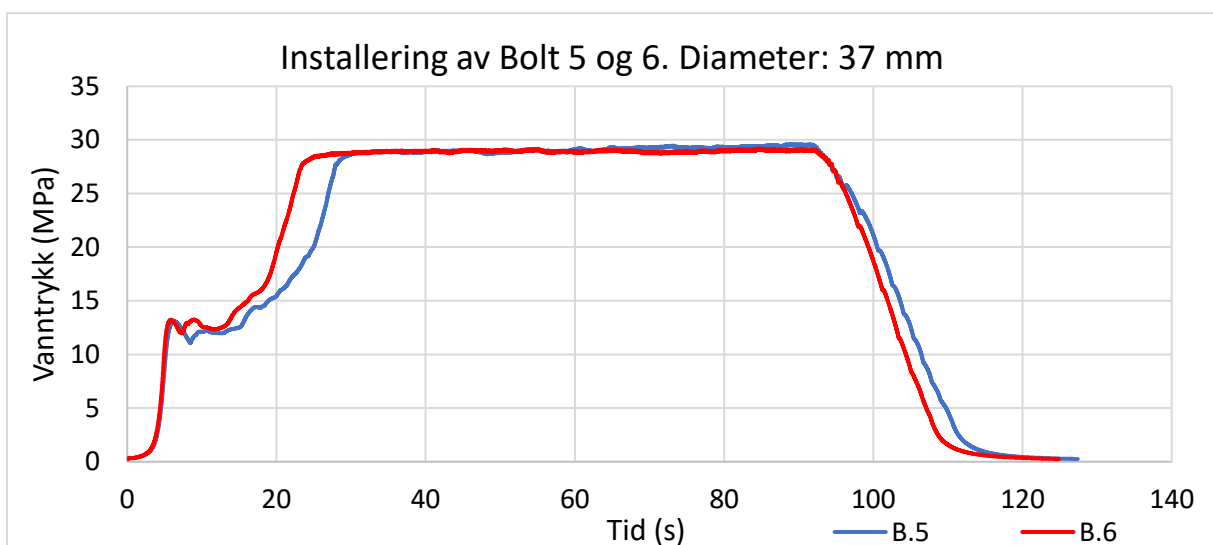
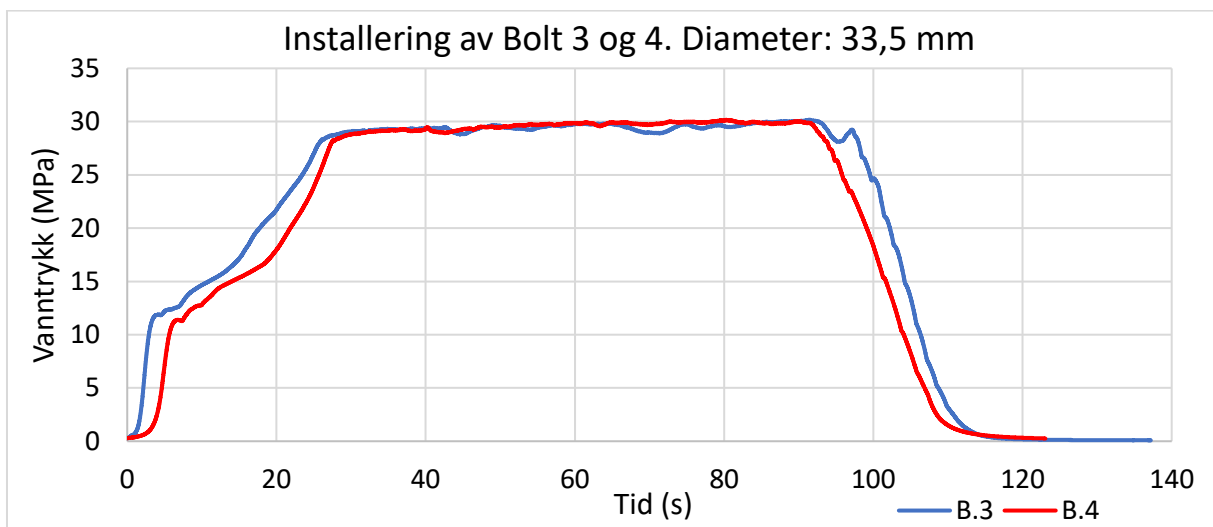
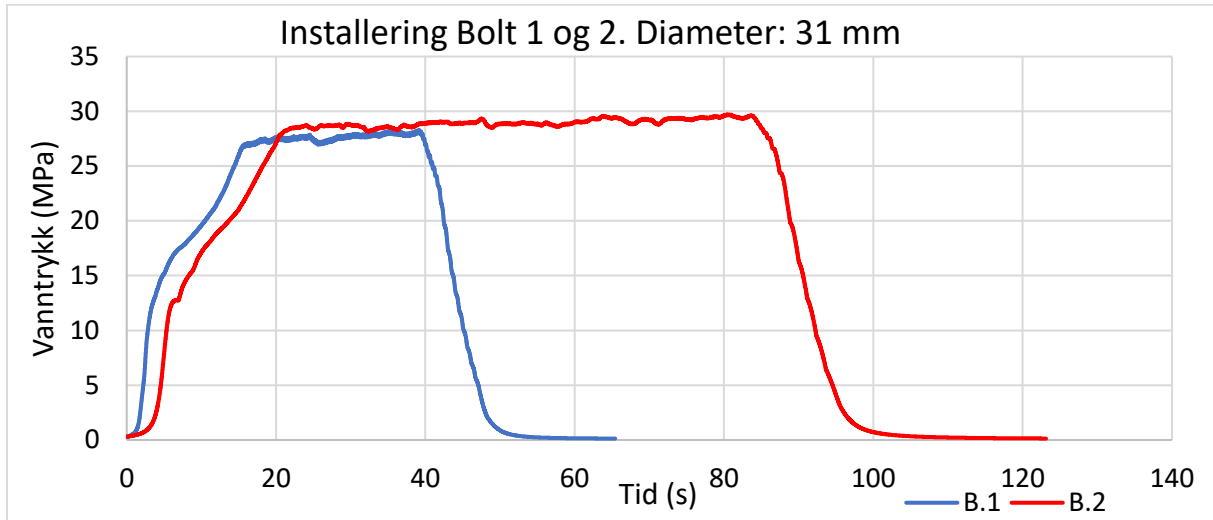
Norsk Standard, 2021. *NS-EN 12390-1. Prøving av herdnet betong — Del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former*. [Internett]
Available at:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1365544>

- Player, J. R., V. E. & Thompson, A. G., 2009. Dynamic testing of friction rock stabilisers. *Proceedings of the 3rd Canada-US Rock Mechanics Symposium and 20th Canadian Rock Mechanics Symposium*, mai.
- Scolari, F., Brandon, M. & Krekula, H., 2017. Dynamic inflatable, friction rockbolt for deep mining. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, mars, pp. 763-772.
- Scott, J. J., 1976. Friction rock stabilizers-a new rock reinforcement method. *American Rock Mechanics Association*, Volum In The 17th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- SINTEF, u.d. *SINTEF: Fullskala testing av bergsikringsbolter*. [Internett]
Available at: <https://www.sintef.no/alle-laboratorier/fullskala-testing-av-bergsikringsbolter/>
[Funnet 12 Mars 2022].
- Soni, A., 2000. *Analysis of Swellex bolt performance and a standardized rockbolt pull test datasheet and database*. Masteroppgave , University of Toronto, Canada.
- SSAB, 2022. *SSAB ERB – expandable rock bolt for instant rock reinforcing*. [Internett]
Available at: <https://www.ssab.com/brands-and-products/expandable-rock-bolts>
[Funnet 12 mars 2022].
- Turner, M. H. & Green, T., 2007. Inflatable Rockbolts at Otter-Juan Mine, Kambalda. *Deep Mining 2007: Proceedings of the Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining Australian Centre for Geomechanics*, November, pp. (pp. 313-323).
- Wijk, G. & Skogberg, B., 1982. The Swellex rock bolting system. *14th Canadian Rock Mechanics Symposium, Vancouver, British Columbia*, 13-14 May, pp. 106-115.

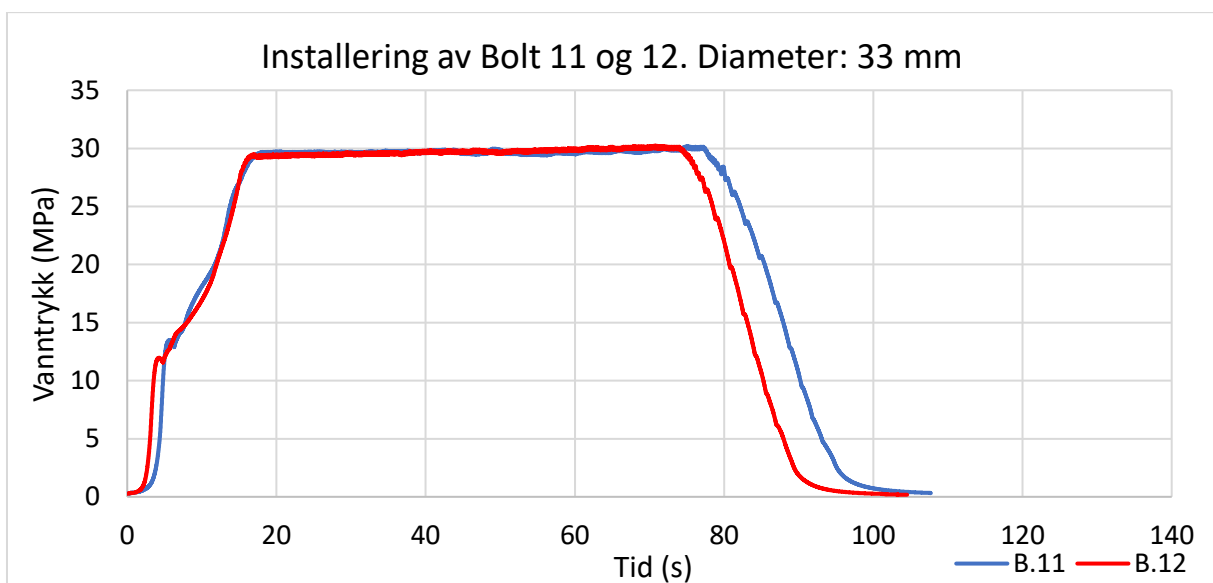
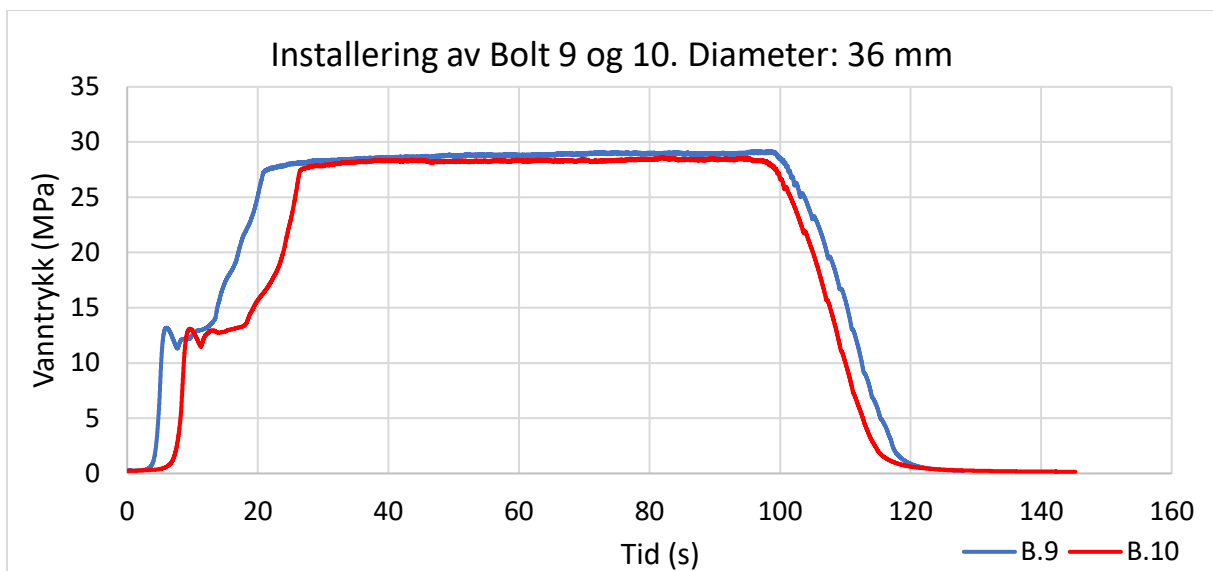
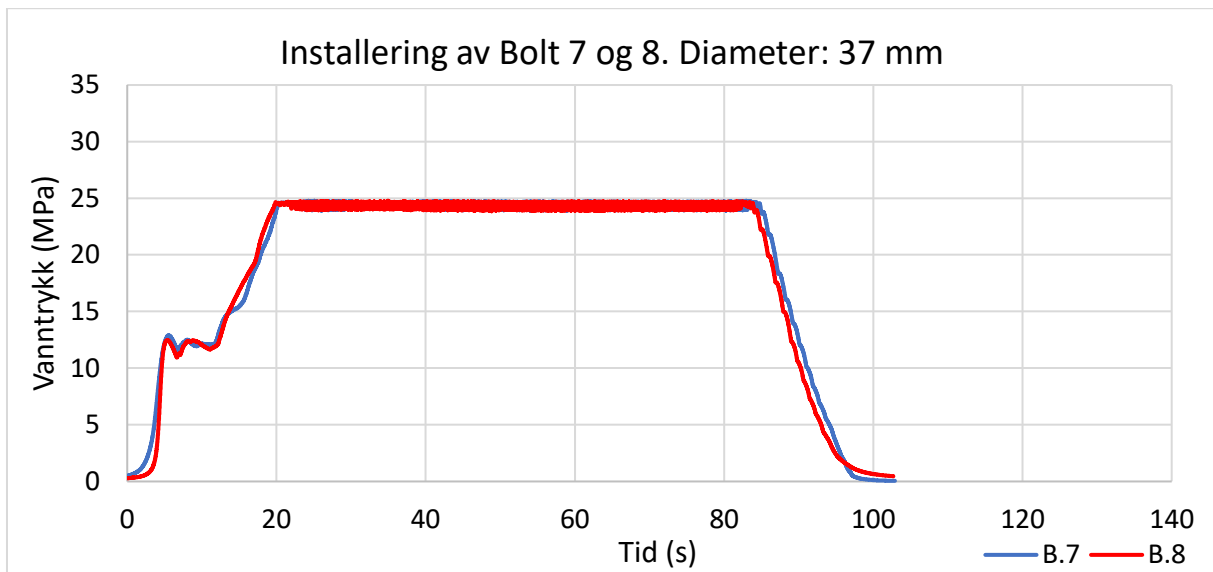
Vedlegg

Vedlegg A: Installering av bolter

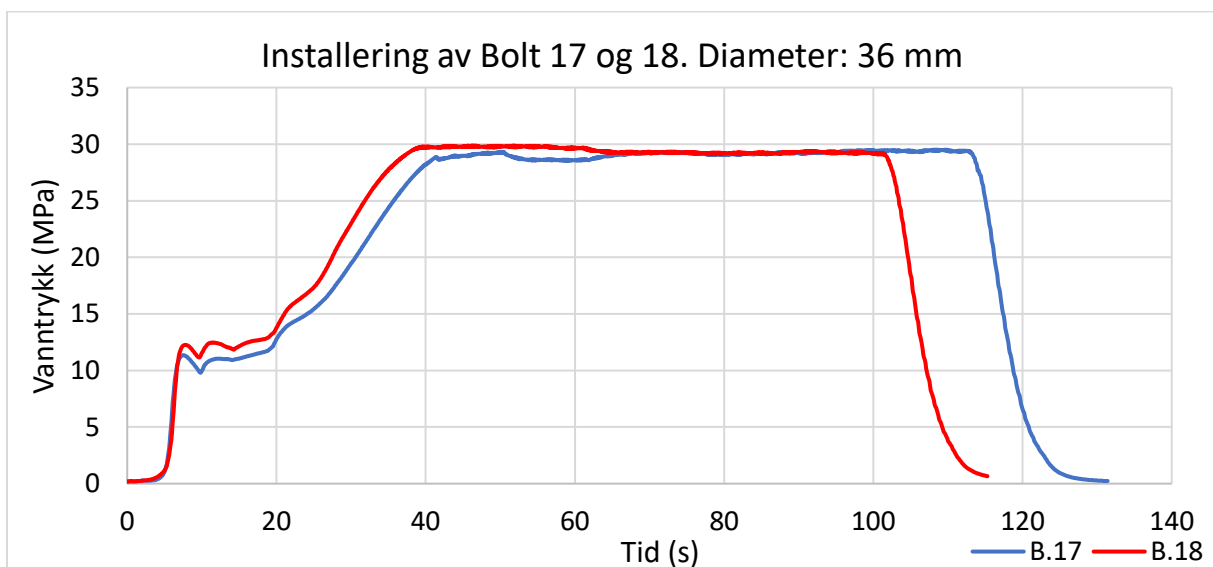
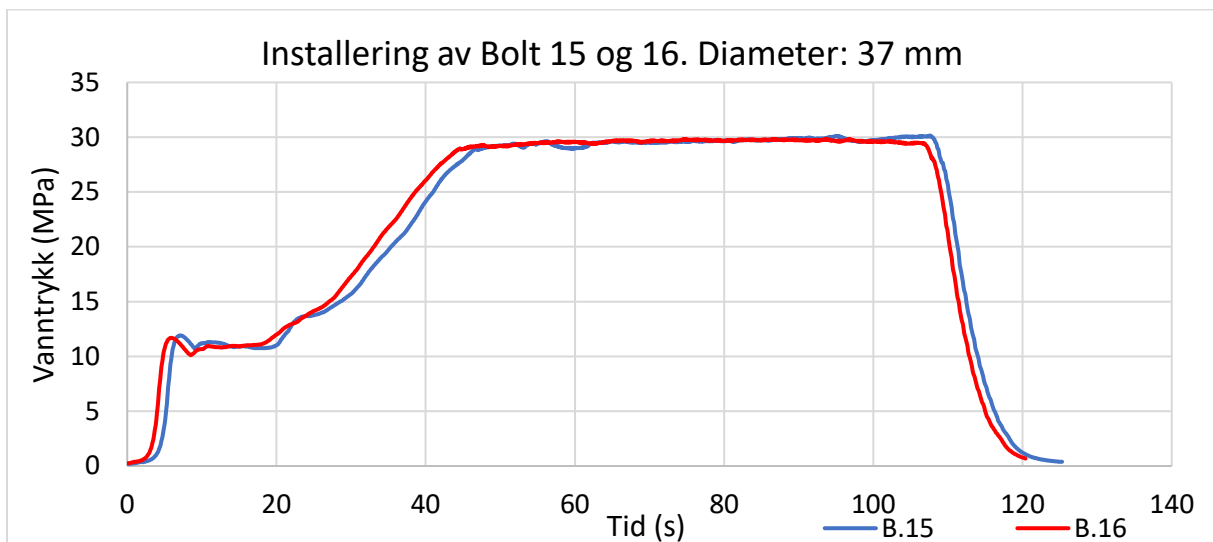
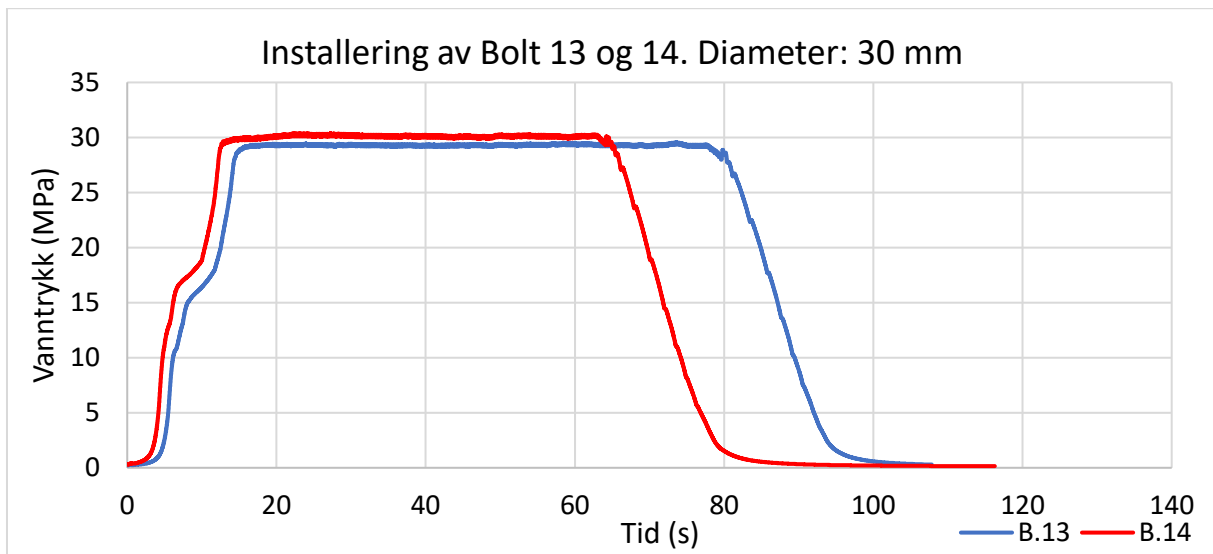
Vedlegg A.1: Installering av bolter: Vanntrykk mot tid for Bolt 1-6



Vedlegg A.2: Installering av bolter: Vanntrykk mot tid for Bolt 7-12



Vedlegg A.3: Installering av bolter: Vanntrykk mot tid for Bolt 12-18



Vedlegg B: Slipemerker på et utvalg bolter

Vedlegg B.1: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 3

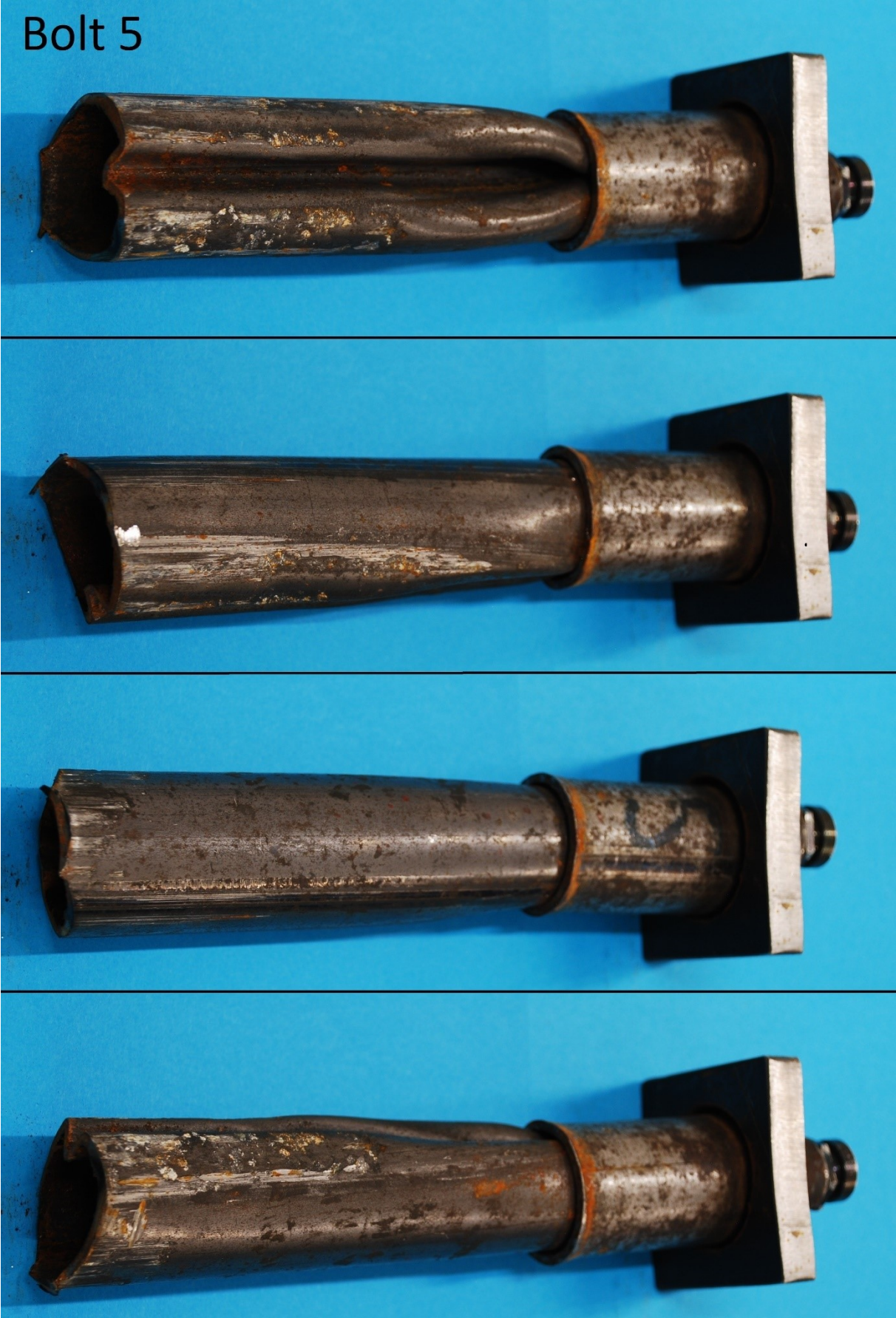
Bolt 3



Vedlegg B.2: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 4



Vedlegg B.3: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 5



Vedlegg B.4: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 7

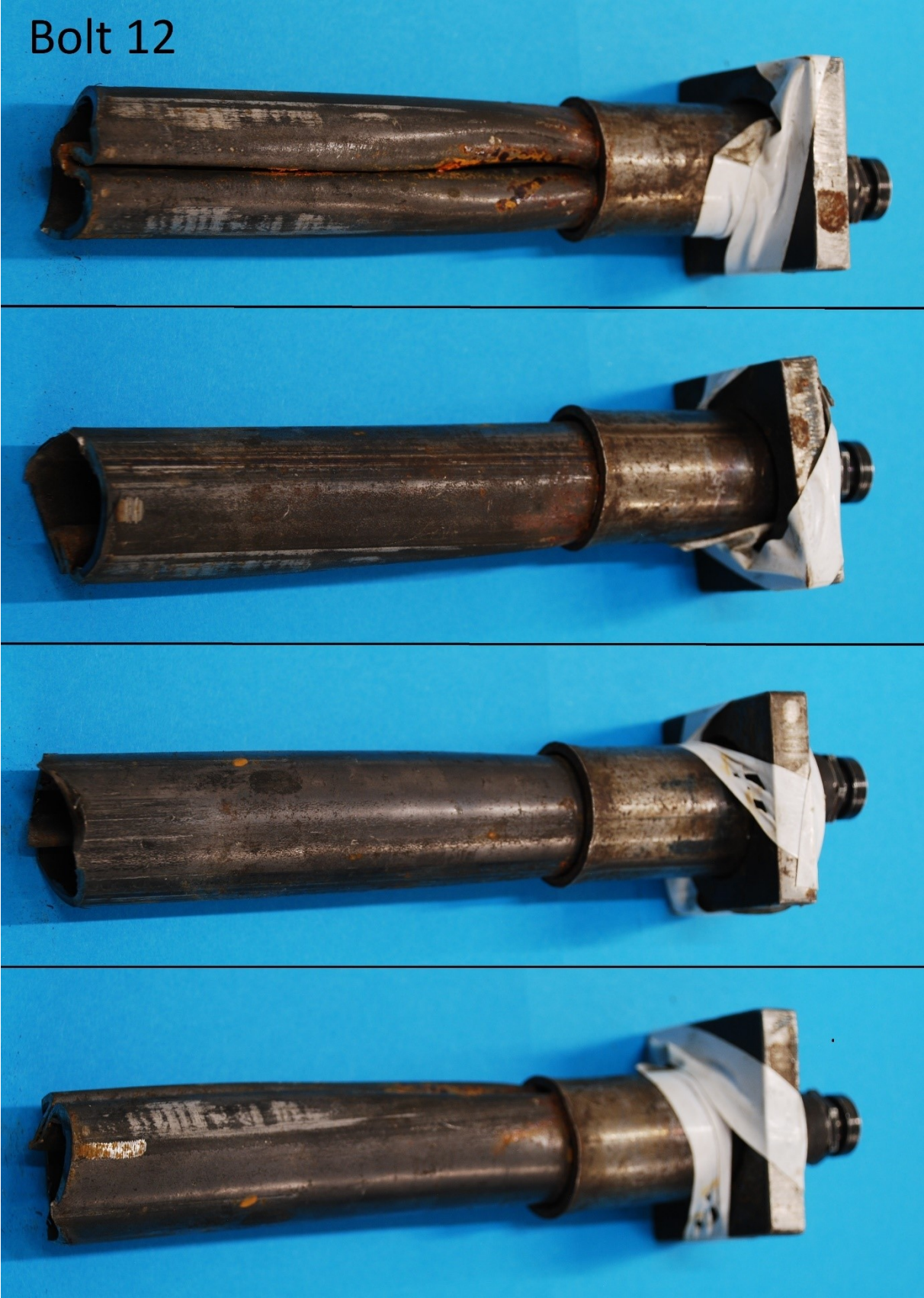
Bolt 7



Vedlegg B.5: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 9



Vedlegg B.6: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 12

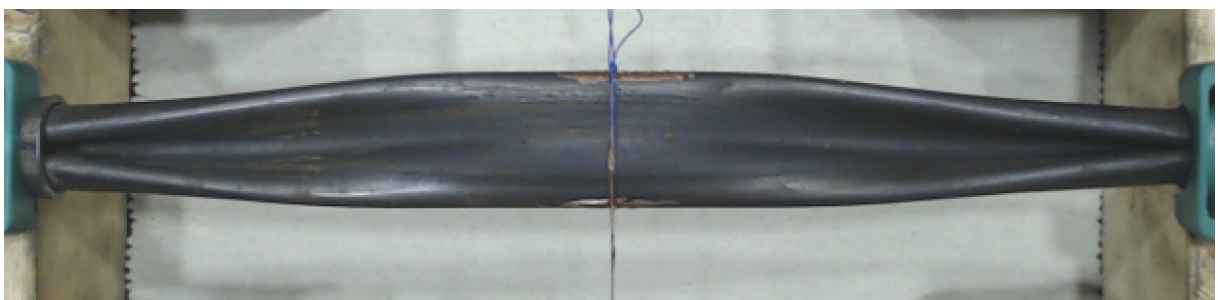
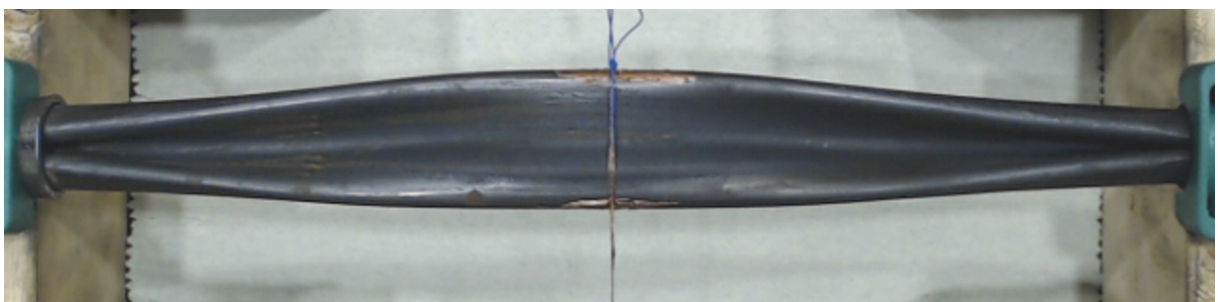
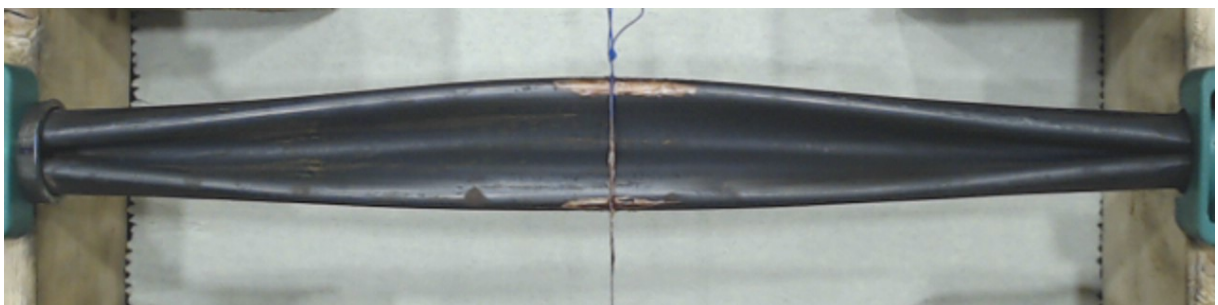
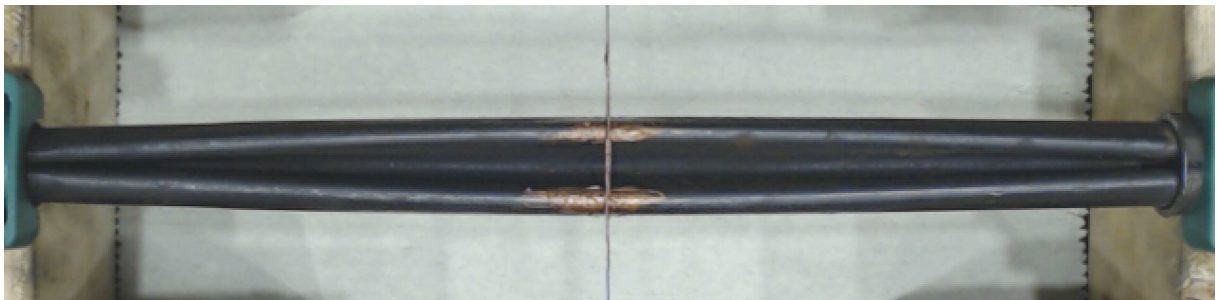
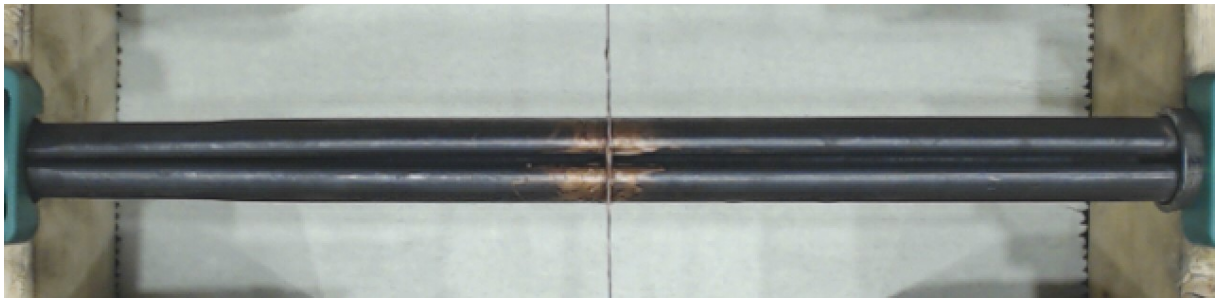


Vedlegg B.7: Slipemerker på et utvalg bolter: Slipemerker på Bolt 14

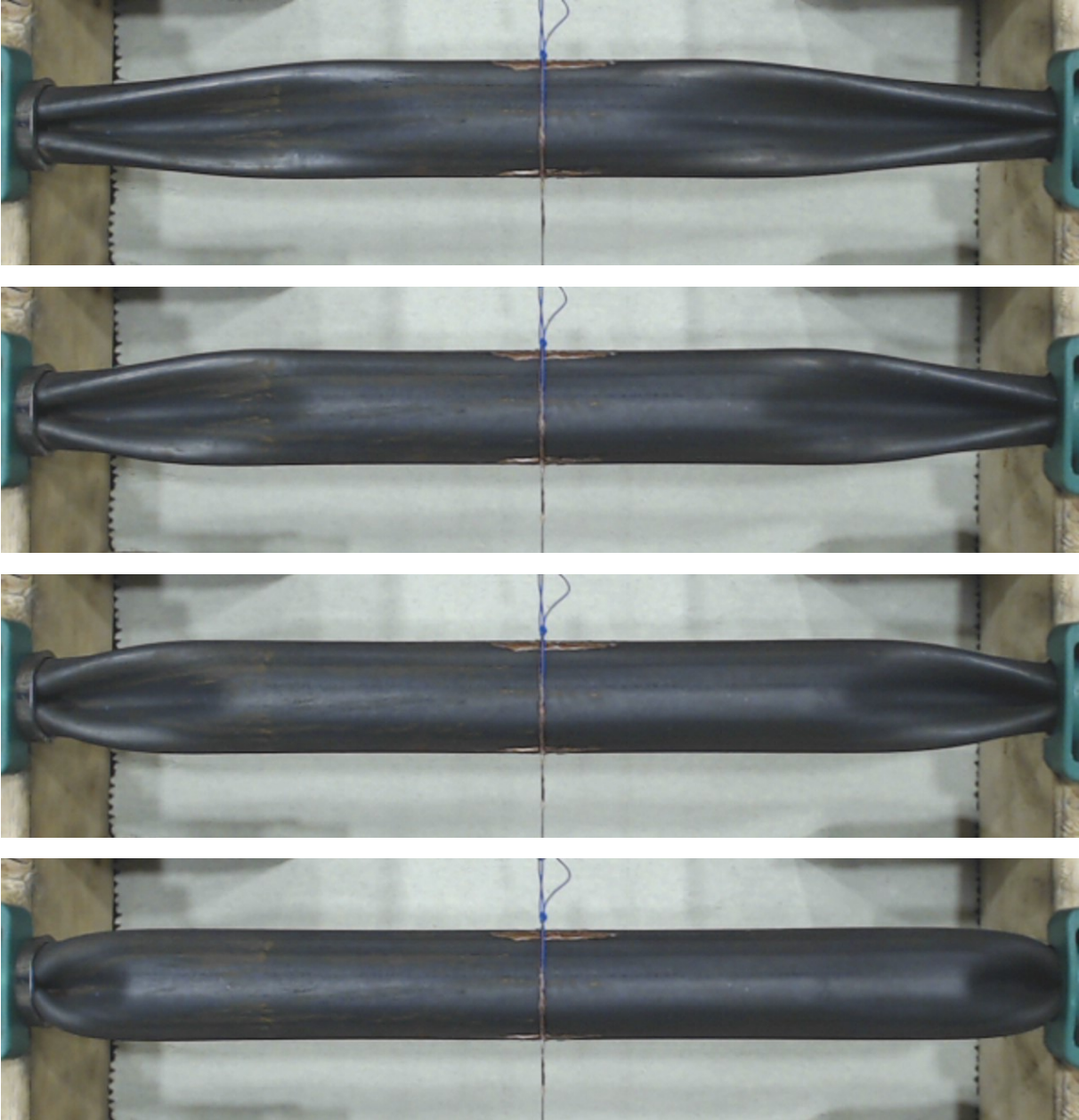


Vedlegg C: Friluft utvidelse bildeserie

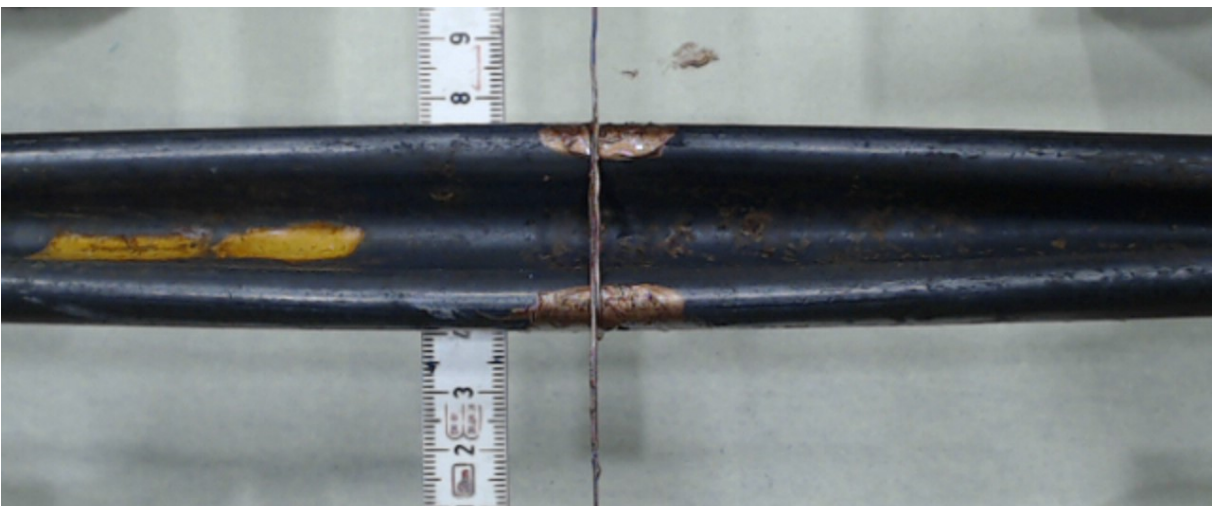
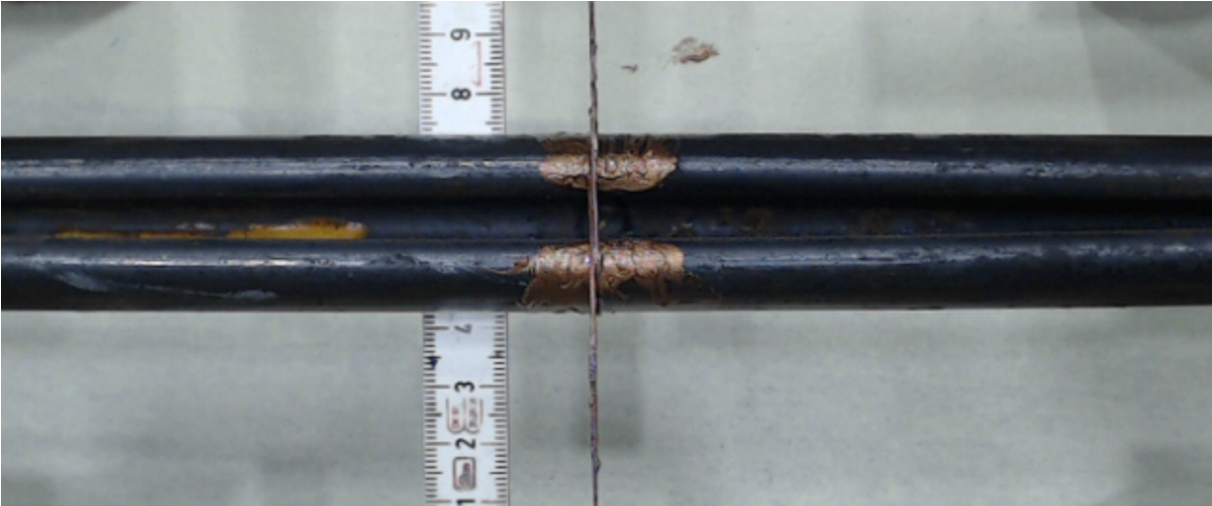
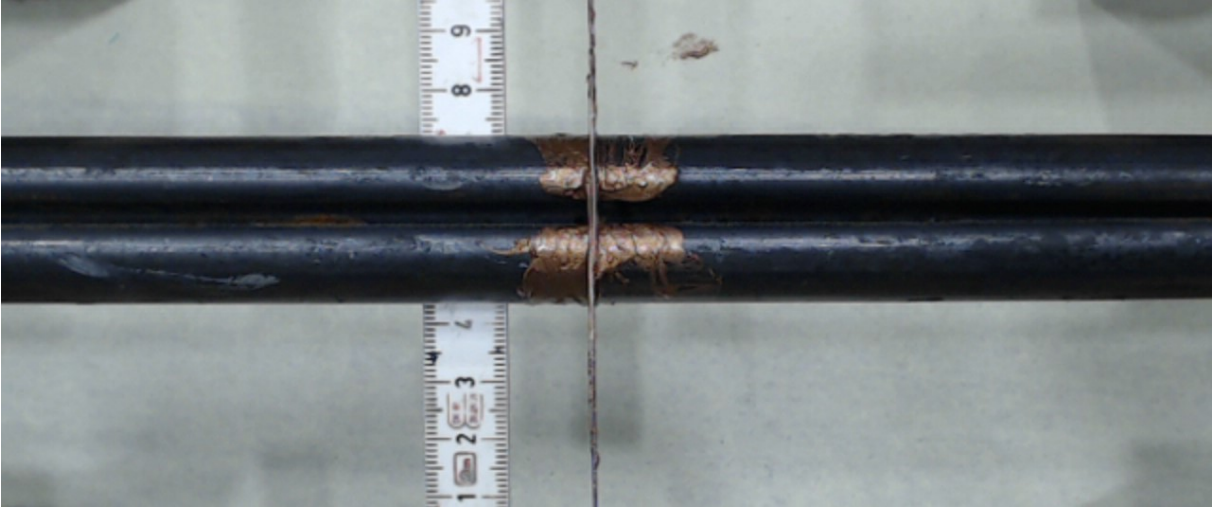
Vedlegg C.1: Friluft utvidelse bildeserie: Bolt 37 del 1



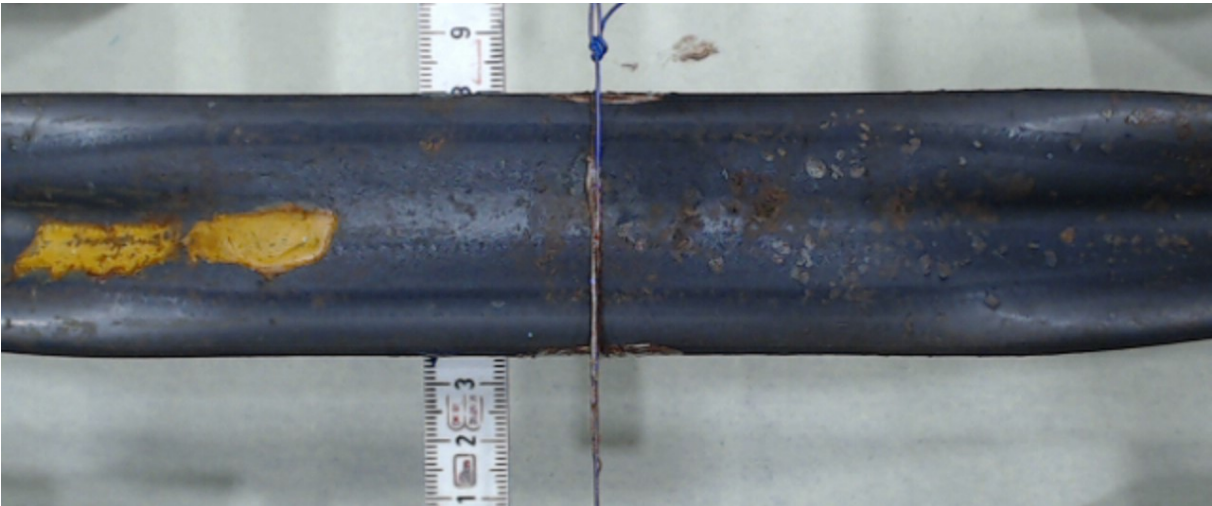
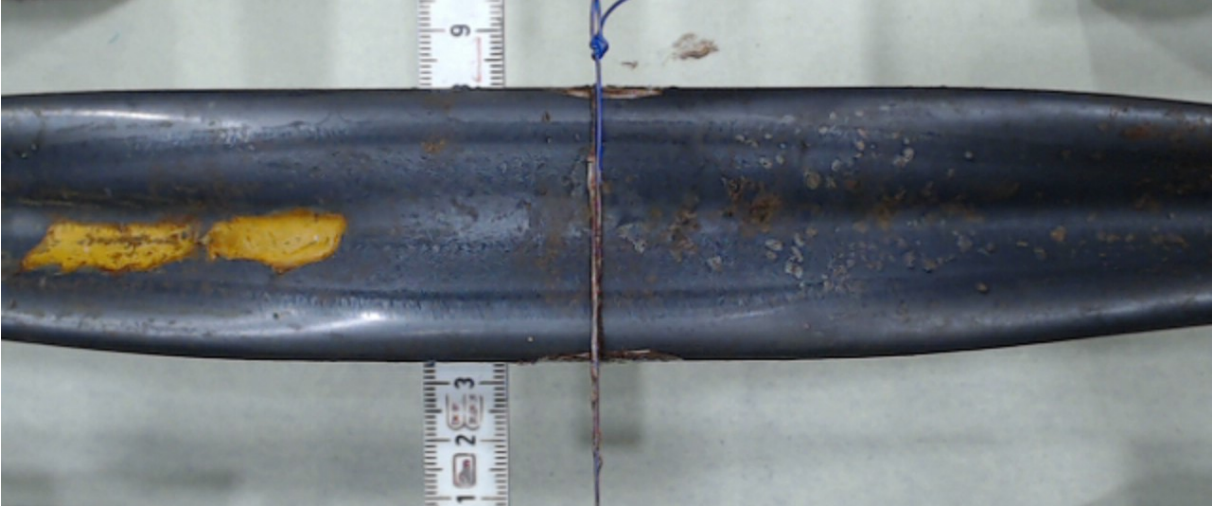
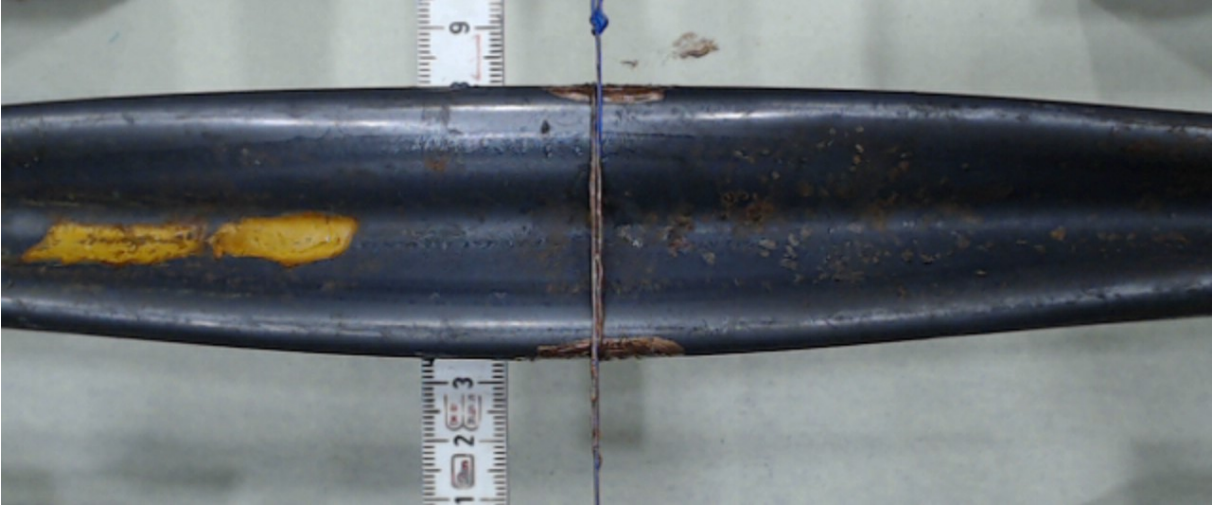
Vedlegg C.2: Friluft utvidelse bildeserie: Bolt 37 del 2



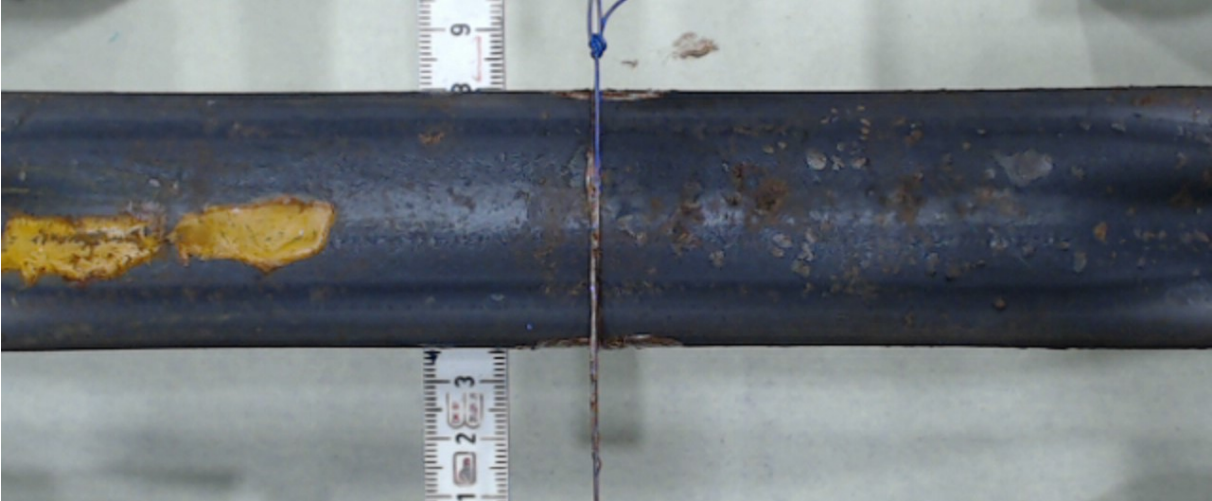
Vedlegg C.3: Friluft utvidelse bildeserie: Bolt 38 del 1



Vedlegg C.4: Friluft utvidelse bildeserie: Bolt 38 del 2



Vedlegg C.5: Friluft utvidelse bildeserie: Bolt 37 del 3



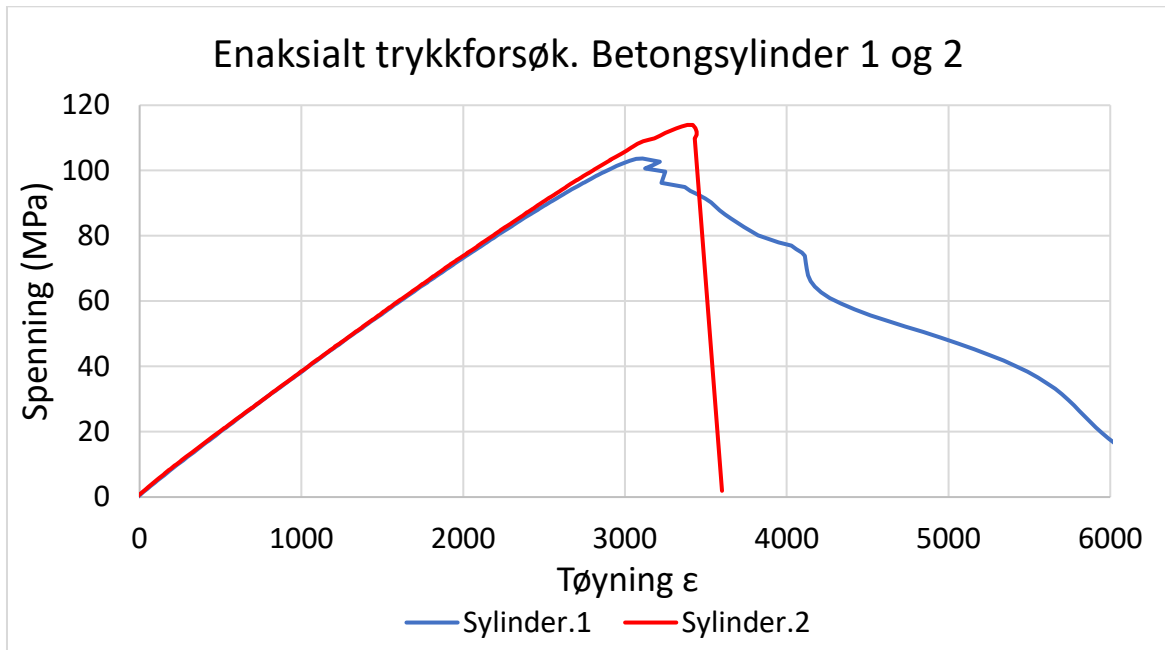
Vedlegg D: Tilt test

Vedlegg D.1: Tilt test: Vekt, lengde og diameter for boltseksjoner og betongsylindre

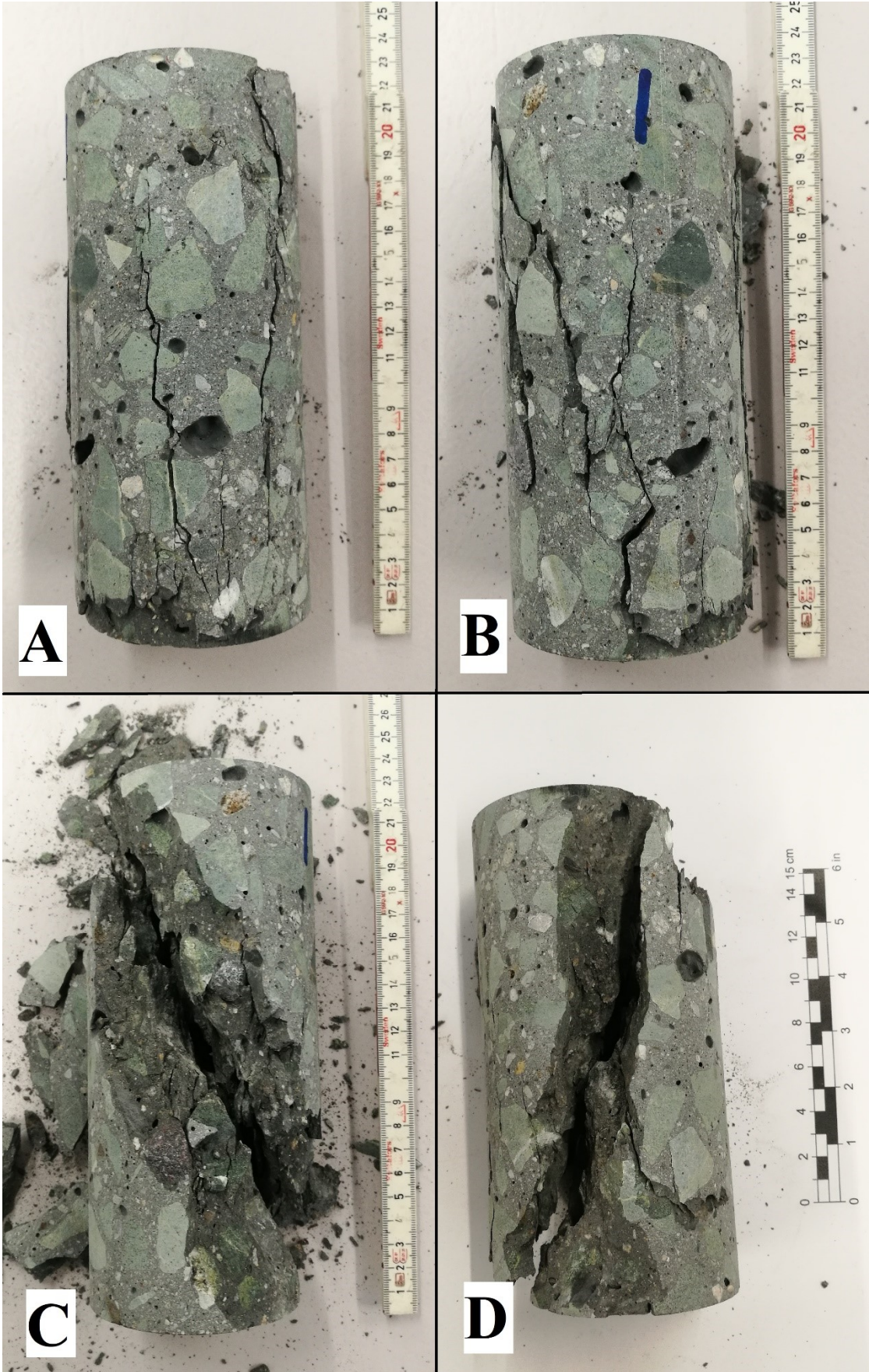
Objekt	Lengde (mm)	Vekt (g)	Mål	Punkt 1 (mm)	Punkt 2 (mm)	Punkt 3 (mm)
Boltseksjon 2	126.2	210	D2	26.58	26.53	26.49
Boltseksjon 2	126.2	210	D3	26.44	26.63	26.63
Boltseksjon 2	126.2	210	D1	27.34	27.44	27.54
Boltseksjon 3	128.1	209.4	D2	26.94	26.75	26.67
Boltseksjon 3	128.1	209.4	D3	26.48	26.72	26.72
Boltseksjon 3	128.1	209.4	D1	27.52	27.61	27.44
Bolt seksjon 4	127.2	208.5	D2	26.74	26.76	26.79
Bolt seksjon 4	127.2	208.5	D3	26.69	26.44	26.65
Bolt seksjon 4	127.2	208.5	D1	27.28	27.56	27.47
Betongsylinder 1	132.66	180.6	Diameter 1	26.6	26.65	26.64
Betongsylinder 1	132.66	180.6	Diameter 2	26.57	26.65	26.58
Betongsylinder 2	132.94	179.4	Diameter 1	26.62	26.62	26.6
Betongsylinder 2	132.94	179.4	Diameter 2	26.6	26.54	26.59

Vedlegg E: Enaksialt trykkforsøk

Vedlegg E.1: Enaksialt trykkforsøk: Spenning mot tøyning 2 betongsyndre



Vedlegg E.2: Enaksialt trykkforsøk: Betongprøve 1 etter trykkforsøk



Vedlegg E.3: Enaksialt trykkforsøk: Betongprøve 2 etter trykkforsøk

