

Forankring av rørgater i bratt terreng

Forsøk med materialer og metoder

Hans Eirik Anders Bossel
Mats Breien Haugen

Bygg- og miljøteknikk (2 årig)

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Arne Aalberg, KT
Gudmund Eiksund, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Studentar: EIRIK BOSSEL OG MATS BREIEN

**Tittel: FORANKRING AV RØYRGATER I BRATT TERRENG –
FORSØK MED MATERIALAR OG METODAR**

1 BAKGRUNN

Det er i det siste 1 ½ året utført to prosjektoppgåver og ei masteroppgåve som undersøker forankringskreftene til nedgravde røyr-gater. I rapportane drøftast litteraturstudie, forsøk i laboratorium og forsøk i felt som viser både mekanismar og storleiken på spenning og krefter. Vidare arbeid må til for å kunne dokumentere samanhengane på vitskapleg vis og for å finne signifikante verdiar for kva slag krefter som kan reknast med rundt røyr og røyr-gater. Rapportane frå prosjekt- og masteroppgåvene dannar grunnlaget for arbeidet i denne masteroppgåva.

Forsøka som er utført tidlegare må reknast som innleiande, like mykje for å teste forsøksmetoden som for å finne verdiar. Derfor må det gjennomførast forsøk som kan gje oss eit sikrere grunnlag for verdiane for berekning og bygging av røyr-gater. Målet med denne oppgåva er å utføre forsøk og analyse som verifiserer ein berekningsmetode og danne grunnlag for rett utforming og bygging av nedgravde røyr-gater for kraftverk.

2 NVE

Det finnst i dag ei eiga ”Retningslinje for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter”. Retningslinja dannar grunnlag for planlegging og bygging av røyr-gater. Det er eit mål at retningslinja skal formidle eit rett sikkerhetsnivå og ei optimal utnytting av materialar på nedgravde røyr-gater. Dette arbeidet vil derfor vere knytt til innhaldet i retningslinja, utan at det er gitt at retningslinja skal endrast. NVE finansierer hovuddelen av forsøka som skal utførast i masteroppgåva.

3 GJENNOMFØRING AV OPPGÅVA

Arbeidet med oppgåva kan delast inn i fire fasar:

3.1 Bakgrunnsmateriale og planlegging

Gjennomgang av tidlegare rapportar, berekningsgrunnlag m.m. må gjerast med tanke på forsøk i laboratorium og i felt. Materialet skal leie fram mot arbeidet med forsøksplanen for masteroppgåva.

Det skal utarbeidast ein plan for forsøka som skal utførast. Planen skal ta omsyn til kva som skal undersøkast og dei fysiske forholda i laboratorium og felt.

3.2 Modelltesting

Det skal utførast modellforsøk i sand for å bestemme materialparametrar som påverkar resultatata i feltforsøka. Det skal også gjerast forsøk i laboratorium for å kunne finne skalaeffektane mellom laboratorium og felt. Som utgangspunkt bør det testast:

1. Friksjon mellom ulike røyrtypar og omfyllingsmasse
2. Studie av friksjonsmekanismane mellom røyr og omfyllingsmasse
3. Innverknad frå komprimering
4. Fordeling av krefter mellom friksjon og opptak i røyrstrengen
5. Variasjon i kraftopptak som funksjon av helling på røyrsgata

Det kan også vere aktuelt for kandidatane å utføre fleire forsøk enn det som ligg i det føreslegne programmet.

3.3 Forsøk i fullskala

Det skal utførast eksperiment med fullskala røyr i Ekle sandtak. I 2012 vart det testa ut ein testrigg som framleis kan nyttast for feltforsøka. Feltforsøka skal i størst mogeleg grad verifisere laboratorieforsøka og det må derfor takast utgangspunkt i desse.

Forsøka må rapporterast som vitskapelege forsøk.

3.4 Analyse

Forsøka i laboratorium og i felt vil gje verdiar og innsikt som er nyttig for verifisering, vurdering og eventuell justering av modellar. Arbeidet skal leie fram mot ein konklusjon om korleis røyrsgater i bratt terreng tek opp kreftene langs røyrret. Resultata ifrå forsøka må stillast saman med resultat ifrå andre tilsvarande forsøk.

4 KONTAKTPERSONAR

NTNU	Leif Lia, Professor, rettleiar Arne Aalberg, Professor, medrettleiar Konstruksjonsteknikk Gudmund Eiksund, Professor medrettleiar Geoteknikk
NVE	Dag Norum og Dag Bachke
Brødrene Dahl AS	Bjarte Skaar
Norconsult	Bjørn Vadholm

Det vil i tillegg vere aktuelt å knytte kontakt med fagmiljø som er aktive innanfor forskning, utforming og bygging av røyrsgater Sintef, EnergiNorge, andre leverandørar, entreprenørar, utanlandske universitet m.fl.

5 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast som *ein* rapport i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei liste over figurer og tabellar, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som leverast faglærer/institutt.

Samandraget skal ikkje ha meir enn 450 ord og skal være eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn mandag 10. juni 2013.

Trondheim, 14. januar 2012

Leif Lia
Professor

Forord

Denne oppgaven er det avsluttende arbeidet for to studenter og er skrevet ved Institutt for vann- og miljøteknikk (IVM) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), våren 2012.

Arbeidet har vært preget av mange praktiske forsøk, noe begge studentene har satt veldig pris på. Selv om det tidvis har vært hardt fysisk arbeid og lange dager, har forsøkene gitt oss en unik innsikt i forankring av rørgater i bratt terreng, på en helt annen måte enn noen lærebok har klart. Vi har også fått ansvaret for å lage våre egne forsøksrigger, noe som har vært et både utfordrende og spennende arbeid.

En stor takk rettes til våre hovedveiledere, førsteamanuensis Arne Aalberg, ved Institutt for konstruksjonsteknikk, professor Gudmund Eiksund, ved Institutt for bygg, anlegg og transport, og professor Leif Lia, ved Institutt for vann- og miljøteknikk, for innspill og inspirasjon til oppgaven. Det rettes også en takk til Norges vassdrags- og energidirektorat for finansiell støtte til forsøkene.

Det må også rettes en stor takk til Bjarte Skar, ved Brødrene Dahl AS for leveranse av rør til forsøkene, og for en spennende studietur til Østerrike som var veldig inspirerende.

De ansatte ved konstruksjonslaboratoriet ved Institutt for konstruksjonsteknikk har også vært til stor hjelp under de ulike forsøkene, og fortjener derfor også en stor takk.

Forskningsassistent Samuel Vingerhagen ved Institutt for vann- og miljøteknikk og Stig Morten Berg Faaren ved Park og Anleggstjenester AS fortjener også en stor takk for god hjelp under feltforsøkene.

Til slutt vil vi også takke hverandre for et godt samarbeid.

Trondheim, 10. juni, 2013

Mats Breien Haugen

Eirik Fredheim Bossel

Sammendrag

Denne masteroppgaven omhandler forankring av nedgravde rørgater i bratt terreng. Oppgaven er en fortsettelse av et samarbeidsprosjekt mellom NVE og Institutt for vann- og miljøteknikk ved NTNU. Det siste året er det skrevet en masteroppgave og tre prosjektoppgaver om samme tema.

Teorien er basert på arbeidet i de nevnte oppgavene. Det er presentert fem ulike beregningsmodeller for å beregne stabiliteten for en rørgate forankret på friksjon. Modellene blir evaluert med to ulike typer av forsøk, modellforsøk utført i laboratorium og fullskala forsøk i felt. Forsøkene er utført med rørsegmenter på 3 – 6 m, og med diameter, $d = 100, 300$ og 500 mm. I tillegg er det utført laboratorieforsøk (friksjonsforsøk) for å bestemme friksjonskoeffisienten (μ) mellom rør og omfyllingsmasser (pukk).

Modellforsøk i laboratorium viser at friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasse reduseres som en funksjon av helningen på røret. Alle beregningsmodeller ser ut til å underestimere friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasse for forsøk utført med horisontalt rør. En av modellene gir imidlertid gode resultater for forsøk utført med rør i 35° helning. Dette viser at en justering av beregningsmodellene med $\sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)}$, hvor φ er friksjonsvinkelen til omfyllingsmassen og α er helningen av røret, er en god justering for å kalkulere friksjonen internt i omfyllingsmassen.

Fullskala forsøk viser at beregningsmodellene overestimerer friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasser.

Resultater fra modellforsøkene utført med horisontalt rør viser godt samsvar med resultater fra feltforsøkene når de skaleres opp med en faktor, $k = 2 * \frac{D_{fullskala}}{D_{modell}}$, hvor D er diameteren til rørene benyttet i de ulike forsøkene.

Resultater fra friksjonsforsøk viser at friksjonskoeffisienten (μ) mellom rør og pukk er, $\mu > 0.60$, hvilket er en høyere verdi enn hva som er vanlig å benytte i bransjen.

Det er vist at fullskala forsøk, med oppsettet som er benyttet under arbeidet med denne oppgaven, kan gi usikre resultat. Det er derfor foreslått at fullskala forsøk som foretas på senere tidspunkt, utføres med samme oppsett som er benyttet i modellforsøkene.

Det viktigste videre arbeidet som kan utføres ved en videreføring av oppgaven er arbeid for å undersøke skala- og laboratorieeffekter, både for modellforsøk utført i laboratorium og fullskala forsøk. En god metode for å skalere modellforsøk vil være av stor verdi for å fortsette arbeidet med å kalibrere beregningsmodellene.

Abstract

The subject of this master thesis is anchoring of buried penstocks for small hydropower plants. It is an extension of a collaboration project between the Norwegian Water Resources and Energy Directorate and the Department of Hydraulic and Environmental Engineering at the Norwegian University of Science and Technology in Trondheim, Norway. In the past year it has been written one master thesis and three smaller theses in the same topic.

The theory is based on earlier work in the above- mentioned theses. Five different models for calculating friction forces between buried penstocks and backfill material is presented. These models are evaluated with two different types of experiments, model experiments conducted in a laboratory and full scale experiments. The experiments are conducted with pipe segments in the range of 3-6 m, and with a diameter of 100, 300 and 500 mm. In addition there have been conducted laboratory experiments to determine the factor of friction (μ) between pipe- and backfill material (gravel).

Experiments conducted in the laboratory show that the friction forces between the penstock and backfill material is reduced as a function of the angle of the pipe. All calculation models tend to underestimate the friction forces between the buried penstock and the backfill material for the experiments conducted with a horizontal pipe, whereas one of the models show good results for the experiments conducted with a pipe lying in an angle of 35° . This suggests that an adjustment for calculating internal friction in the backfill material with, $\sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)}$, where φ is the internal angle of friction in the backfill material and α is the angle of the pipe, is a good adjustment for the calculation models.

Full scale experiments show that the calculation models are overestimating the friction forces between the penstock and backfill material.

The model experiments conducted with the horizontal pipe show good compliance with the full scale experiments when up scaled with a factor, $k = 2 * \frac{D_{full\ scale}}{D_{model}}$, where D is the diameter of the two different pipes.

Results from the experiments suggests that the factor of friction between pipe- and backfill material is, $\mu > 0.60$, which is more than normally estimated in calculations performed by consultant companies.

It is shown that full scale experiments, with the setup used in this thesis, has a lot of uncertainties. It is thus suggested that any later full scale experiments are conducted with the same setup as used in the model experiments.

The most valuable work to be done later on, if this project is to be extended, is work to fully understand the scale- and laboratory effects, both in model experiments conducted in laboratory and full scale experiments. A good method for scaling the model experiments would be invaluable to further calibrate the calculation models.

Innhold

Forord	VII
Sammendrag	IX
Abstract	XI
Figurliste	XV
Tabelliste	XIX
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål.....	2
1.3 Oppbygging av oppgaven	2
1.4 Begrensninger og omfang av oppgaven.....	2
2. Tidligere arbeider	3
2.1 “Nedgravde rørgater i bratt terreng”, prosjektoppgave av Håkon Bergsager	3
2.2 “Rørgater i bratt terreng”, prosjektoppgave av Erlend Hillestad Bårgard	3
2.3 “Forankring av rørgater i bratt terreng”, masteroppgave av Erlend Hillestad Bårgard og Håkon Bergsager	4
2.4 “Stabilitet av nedgravde rørgater”, prosjektoppgave av Eirik Bossel og Mats Breien Haugen6	6
3. Teori.....	11
3.1 Gjeldende regler og retningslinjer.....	11
3.2 Definisjon av friksjonskoeffisienten	12
3.3 Beregningsmodeller	14
3.4 Statistikk	24
3.5 Ruhet	25
4. Modellforsøk	27
4.1 Forsøksoppsett	27
4.2 Egenskaper til rør	30
4.3 Egenskaper til pukk	31
4.4 Utstyr.....	32
4.5 Fremgangsmåte for modellforsøk.....	34
4.6 Resultater fra modellforsøk.....	35
4.7 Deformasjon i forsøksrigg	47
5. Friksjonsforsøk.....	51
5.1 Forsøksoppsett.....	51
5.2 Utstyr.....	53

5.3	Fremgangsmåte for forsøk	58
5.4	Resultater fra forsøk.....	60
6.	Feltforsøk.....	67
6.1	Forsøksoppsett.....	67
6.2	Egenskaper til rør	71
6.3	Egenskaper til pukk	71
6.4	Utstyr.....	72
6.5	Fremgangsmåte for feltforsøk.....	75
6.6	Resultater	76
7.	Diskusjon	85
7.1	Modellforsøk	85
7.2	Friksjonsforsøk.....	97
7.3	Feltforsøk.....	103
7.4	Sammenligning mellom forsøk og beregningsmodeller.....	112
7.5	Sammenligning av modell- og feltforsøk.....	119
8.	Konklusjon	123
9.	Videre arbeid	125
10.	Kilder.....	127
11.	Vedlegg.....	129

Figurliste

Figur 1.1 Forankring av rør: (a) Oppstrøms forankring, (b) nedstrøms forankring, (c) forankring på friksjon (Bårgard og Bergsager, 2012).....	2
Figur 2.1 Fastkiling av omfyllingskorn i røroverflaten (Bossel og Haugen, 2012).....	7
Figur 2.2 Spenningsfordelingen rundt et nedgravd rør ved (a) - ukomprimerte masser og (b) - komprimerte masser (Wijewickreme, 2009).....	8
Figur 3.1 Krav fra NVE til rør i løsmassegrøft og definisjoner av høyder i grøft (Bårgard og Bergsager, 2012).....	12
Figur 3.2 Eksempel på last- og forskyvningsdiagram, med definisjon av hvile- og glidefriksjon (Bossel og Haugen, 2012).....	13
Figur 3.3 Vertikal bruddflate (Bårgard, 2011).....	14
Figur 3.4 Bruddflate rundt rør (Bårgard, 2011).....	14
Figur 3.5 Forklaring av overdekning over rør i helning.....	15
Figur 3.6 (a) - Trykkfordeling og (b) - krefter som virker på en nedgravd rørgate (Bårgard og Bergsager, 2012).....	16
Figur 3.7 (a) - Trykkfordeling og (b) - krefter som virker på et nedgravd rør med bruddflate rundt rør (Bårgard og Bergsager, 2012).....	17
Figur 3.8 Definisjoner av størrelser for beregningsmodeller med kvadratisk rør.....	19
Figur 3.9 Profilometer.....	25
Figur 3.10 Definisjoner av størrelser for å regne ut R_a	26
Figur 4.1 Forsøkskasse brukt i modellforsøk.....	27
Figur 4.2 Oppsett for måling av kraft og forskyvning.....	28
Figur 4.3 Oppsett for kasse i helning.....	28
Figur 4.4 Oppsett for kasse med stort rør.....	29
Figur 4.5 Omfyllingsmasser brukt i modellforsøk, detalj kornform.....	31
Figur 4.6 Siktekurve til omfyllingsmasser brukt i modellforsøk.....	32
Figur 4.7 Aktuator benyttet for uttrekking av rør.....	33
Figur 4.8 Lastcelle benyttet i modellforsøk.....	33
Figur 4.9 Forskyvningsmåler benyttet i modellforsøk.....	34
Figur 4.10 Verdier hentet ut fra hvert modellforsøk.....	35
Figur 4.11 Oppsett av rigg for aktuator.....	47
Figur 4.12 Fritt opplagt bjelke påvirket av kraft fra aktuator.....	48
Figur 4.13 Deformasjon av bjelke ved varierende lastpåføring fra aktuator.....	48
Figur 4.14 Tøyning av røret ved tre ulike scenarioer.....	49
Figur 4.15 Kombinasjon av bjelkedeformasjon og de tre ulike scenarioene for rørtøyning sammen med målt deformasjon.....	50
Figur 5.1 Oppsett av friksjonsforsøk.....	51
Figur 5.2 Oppsett av kasse for friksjonsforsøk.....	52
Figur 5.3 Aktuator benyttet for trekking av kasse.....	53
Figur 5.4 Lastcelle benyttet i friksjonsforsøk.....	54
Figur 5.5 Forskyvningsmåler benyttet i friksjonsforsøk.....	54
Figur 5.6 Detalj kornform, pukktipe 1 og 2 (Bossel og Haugen, 2012).....	56
Figur 5.7 Siktekurve, pukktipe 1.....	57
Figur 5.8 Siktekurve, pukktipe 2.....	57
Figur 5.9 Verdier hentet ut fra hvert friksjonsforsøk.....	60

Figur 5.10 Friksjonskraft ved første glidning mot normalkraft, pukktpe 1.....	63
Figur 5.11 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 1	64
Figur 5.12 Friksjonskraft ved første glidning mot normalkraft, pukktpe 2.....	65
Figur 5.13 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 2	66
Figur 6.1 Oppsett for uttrekking av rør i horisontal grøft	68
Figur 6.2 Gjennomsnittsbredden i grøftetverrsnitt for horisontal grøft.....	69
Figur 6.3 Utforming av skrå rørgrøft	69
Figur 6.4 Oppsett for uttrekking av røret i skrå grøft	70
Figur 6.5 Hydraulisk jekk med tilkoblet håndpumpe (Bossel og Haugen, 2012).....	72
Figur 6.6 Lastcelle benyttet i feltforsøk (Bossel og Haugen, 2012).....	73
Figur 6.7 Optisk forskyvningsmåler benyttet i feltforsøk (Bossel og Haugen, 2012)	73
Figur 6.8 Komprimering av omfyllingsmasser i skrå grøft.....	76
Figur 6.9 Oppsett for uttrekking av rør, uten jekk	77
Figur 6.10 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, komprimert (overvintret rør)	78
Figur 6.11 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, komprimert	79
Figur 6.12 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, ukomprimert, skrå grøft.....	80
Figur 6.13 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, ukomprimert, skrå grøft.....	81
Figur 6.14 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 3.0, ukomprimert, skrå grøft.....	82
Figur 6.15 Løfting av hjullasterens bakhjul ved forsøk, H/D = 3.0.....	83
Figur 7.1 Vanlig vater.....	86
Figur 7.2 Beregning av deformasjon, bakre bjelke i forsøksrigg	86
Figur 7.3 Eksempel fra forsøksserie 3, H/D=2, ukomprimert, horisontal kasse	90
Figur 7.4 Illustrasjon av at røret drar med seg massene, før og etter uttrekk av røret	91
Figur 7.5 Eksempel fra forsøksserie H/D=2, ukomprimert, i 35° helning.....	92
Figur 7.6 Eksempel fra forsøksserie H/D = 1.5 med rør, d = 300mm, i 35° helning	93
Figur 7.7 Sammenligning av bruddlast for modellforsøk med horisontal kasse	94
Figur 7.8 Sammenligning av bruddlast for modellforsøk i 35° helning	95
Figur 7.9 Sammenligning av bruddlast ved økende helning	96
Figur 7.10 Rotasjon av forsøkskassen under friksjonsforsøk	97
Figur 7.11 Last- og forskyvningsdiagram, pukktpe 1, forsøk 1	98
Figur 7.12 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 1	101
Figur 7.13 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 2	101
Figur 7.14 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, komprimert	104
Figur 7.15 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 2.0, komprimert (Bårgard og Bergsager, 2012)	104
Figur 7.16 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, ukomprimert, 34° helning	106
Figur 7.17 Illustrasjon av hvordan hjullasterens fjærsystem påvirker forsøksresultatene	107
Figur 7.18 Resultater fra alle feltforsøk utført i horisontal grøft, fremstilt grafisk	109
Figur 7.19 Resultater fra alle feltforsøk utført i bratt grøft, fremstilt grafisk	110
Figur 7.20 Sammenligning av horisontale modellforsøk, rør d = 100, med beregningsmodeller.....	112
Figur 7.21 Sammenligning av modellforsøk i 35° helning, rør d=100, med beregningsmodeller.....	113
Figur 7.22 Sammenligning av modellforsøk med horisontal kasse, rør d = 300, med beregningsmodeller	114
Figur 7.23 Sammenligning av modellforsøk i 35 helning, rør d = 300, med beregningsmodeller	115
Figur 7.24 Sammenligning av modellforsøk med varierende helning, rør d = 100, med beregningsmodeller	116

Figur 7.25 Sammenligning av feltforsøk i horisontal grøft med beregningsmodeller	117
Figur 7.26 Sammenligning av feltforsøk i skrå grøft med beregningsmodeller	118
Figur 7.27 Bruddlaster ved geometrisk skalering.....	120

Tabelliste

Tabell 1 Sikkerhetsfaktorer og lastforutsetninger for grensetilstandene	11
Tabell 2 Geometri- og materialdata GRP-rør	30
Tabell 3 Ruhetsmålinger for rør	30
Tabell 4 Oversikt over modellforsøk, horisontal kasse og $d=100\text{mm}$	36
Tabell 5 Kraft ved a), $H/D=1.5$ ukomprimert	37
Tabell 6 Kraft ved b), $H/D=1.5$ ukomprimert	37
Tabell 7 Kraft ved a), $H/D=2.0$ ukomprimert	37
Tabell 8 Kraft ved b), $H/D=2.0$ ukomprimert	38
Tabell 9 Kraft ved a), $H/D=3.0$ ukomprimert	38
Tabell 10 Kraft ved b), $H/D=3.0$ ukomprimert	39
Tabell 11 Kraft ved a), $H/D=1.5$ komprimert	39
Tabell 12 Kraft ved b), $H/D=1.5$ komprimert	39
Tabell 13 Kraft ved a), $H/D=2.0$ komprimert	40
Tabell 14 Kraft ved b), $H/D=2.0$ komprimert	40
Tabell 15 Oversikt over modellforsøk, kasse i 35° og $d=100\text{mm}$	41
Tabell 16 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 35°	41
Tabell 17 Kraft ved a) og b), $H/D=2.0$ ukomprimert, 35°	42
Tabell 18 Kraft ved a) og b), $H/D=3.0$ ukomprimert, 35°	42
Tabell 19 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ komprimert, 35°	43
Tabell 20 Kraft ved a) og b), $H/D=2.0$ komprimert, 35°	43
Tabell 21 Oversikt over modellforsøk, varierende helning på kasse og $d=100\text{mm}$	44
Tabell 22 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 15°	44
Tabell 23 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 20°	44
Tabell 24 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 25°	45
Tabell 25 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 30°	45
Tabell 26 Oversikt over modellforsøk, varierende helning på kasse og $d=300\text{mm}$	46
Tabell 27 Kraft ved a) og b) med stort rør, $H/D=1.5$, 0°	46
Tabell 28 Kraft ved a) og b) med stort rør, $H/D=1.5$, 35°	46
Tabell 29 Geometri- og materialdata GRP-rør (Bårgard og Bergsager, 2012)	55
Tabell 30 Ruhetsmålinger for rør	55
Tabell 31 Oversikt over utførte friksjonsforsøk	58
Tabell 32 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 1 og ukomprimerte masser	61
Tabell 33 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 1 og komprimerte masser	61
Tabell 34 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 2 og ukomprimerte masser	62
Tabell 35 Resultater fra forsøkene med pukktpe 2 og komprimerte masser	62
Tabell 36 Geometri- og materialdata GRP-rør (Bårgard og Bergsager, 2012)	71
Tabell 37 Oversikt over feltforsøk og værddata	75
Tabell 38 Resultater trekkeforsøk, $H/D = 1.5$, komprimert (overvintret rør)	78
Tabell 39 Resultater trekkeforsøk, $H/D = 1.5$, komprimert	79
Tabell 40 Resultater fra trekkeforsøk, $H/D = 1.5$, ukomprimert, skrå rørgrøft	80
Tabell 41 Resultater fra trekkeforsøk, $H/D = 3.0$, ukomprimert, skrå rørgrøft	82
Tabell 42 Korrelasjon mellom modellforsøkene med samme forsøksnummer, ukomprimerte omfyllingsmasser	88

Tabell 43 Korrelasjon mellom modellforsøkene med samme forsøksnummer, komprimerte omfyllingsmasser.....	89
Tabell 44 Oppsummering av resultater ved gjennomsnittlig trekkekraft, ukomprimert og komprimert, pukktpe 1.....	100
Tabell 45 Oppsummering av resultater ved gjennomsnittlig trekkekraft, ukomprimert og komprimert, pukktpe 2.....	100
Tabell 46 Resultater fra alle feltforsøk utført i horisontal grøft.....	108
Tabell 47 Resultater fra alle feltforsøk utført i bratt grøft.....	110

1. Innledning

Denne oppgaven er skrevet som en del av et samarbeidsprosjekt mellom Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Institutt for vann- og miljøteknikk (IVM). Prosjektet startet høsten 2011, og det er tidligere skrevet tre prosjektoppgaver og en masteroppgave som en del av prosjektet. Det langsiktige målet med prosjektet er å danne grunnlag for for rett utforming og bygging av nedgravde rørgater for kraftverk.

1.1 Bakgrunn

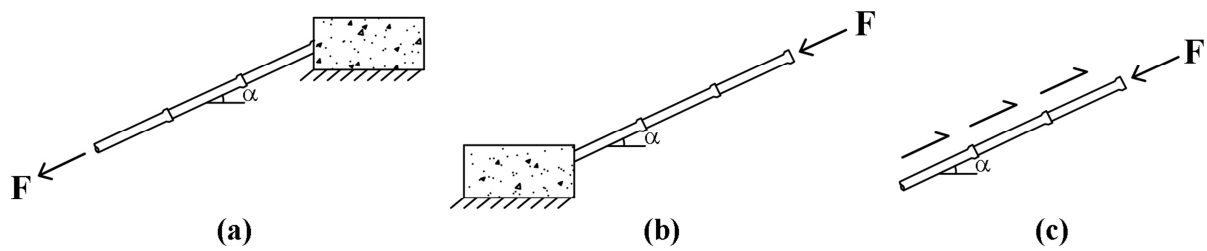
Bakgrunnen for oppgaven er en stor utbygging av ny, fornybar energi i Norge frem mot 2020. Norge har forpliktet seg ovenfor EU å bygge ut 13.2 TWh innen denne tidsfristen. En stor del av den nye energien som er planlagt å bygges ut, vil bygges i form av småkraftverk, der nedgravde rørgater ofte er den mest benyttede vannveien. Det er derfor viktig at rørgatene blir prosjektert og utført på en sikker og trygg måte, samtidig som de tekniske løsningene skal være økonomisk forsvarlige. De "enkle" prosjektene blir det færre og færre av, da de allerede er realisert. Ved bygging av nye prosjekter stilles det derfor høyere krav til løsningene, både økonomisk og teknisk.

Selv om det er stort fokus på sikkerhet ved prosjekteringen av småkraftverk, er det, på grunn av flere tilfeller av rørbrudd den senere tid, grunn til å tro at utførelsen og/ eller beregningsgrunnlaget ikke alltid holder mål.

Det er hovedsakelig tre rørtypen som brukes i vannveien i småkraftverk i dag: Rør av polyetylen (PE-rør), duktile støpejernsrør og GRP-rør.

Rørene kan hovedsakelig forankres på tre måter (Figur 1.1) :

- a) Forankring i topp av skråning, med strekkfaste skjøter som tar opp kreftene nedover i rørgaten. Forankring i topp kan utføres som en forankringskloss, eller friksjon mellom rør og omfyllingsmasser over en tilstrekkelig lengde.
- b) Forankring i bunn av skråning, hvor rørene ligger butt i butt. Kreftene blir overført til forankringen som trykkrefter i rørskjøtene.
- c) Forankring ved friksjon mellom rør og omfyllingsmasser rundt røret.



Figur 1.1 Forankring av rør: (a) Oppstrøms forankring, (b) nedstrøms forankring, (c) forankring på friksjon (Bårgard og Bergsager, 2012)

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å verifisere beregningsmodellene som beregner stabilitet av rørgater som ligger forankret på friksjon (Figur 1.1 c). Verifiseringen gjøres ved å utføre fysiske forsøk i laboratorium og i felt. Det er utført tre typer forsøk, modellforsøk i kasse, forsøk for å finne friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser (friksjonsforsøk) og til slutt fullskala forsøk i felt.

1.3 Oppbygging av oppgaven

Oppgaven innledes med en oversikt over de tidligere arbeidene utført i samarbeidsprosjektet mellom NVE og IVM. Deretter følger et teorikapittel, hvor fem ulike beregningsmodeller blir presentert, sammen med krav fra NVE. Oppsett og resultater fra de tre ulike forsøkene blir deretter presentert. Oppgaven blir avsluttet med en diskusjon av resultatene fra forsøkene, hvor beregningsmodellene tilslutt sammenlignes med resultatene fra forsøkene.

1.4 Begrensninger og omfang av oppgaven

Oppgaven er begrenset til 30 studiepoeng, og hovedvekten ligger på arbeidet med å skaffe resultater og analyse av disse. Tidsbruken er begrenset til 20 uker + 1 uke på grunn av påskeferie.

2. Tidligere arbeider

I dette kapittelet presenteres en kort oppsummering av de tidligere oppgavene utført, som nevnt i innledningen.

2.1 “Nedgravde rørgater i bratt terreng”, prosjektoppgave av Håkon Bergsager

I oppgaven til Håkon Bergsager er hovedfokuset på modeller for knekking av rørgater. Knekkning av rørgater skjer hovedsakelig når røret ligger forankret på aksielle trykkrefter. Når de aksielle kreftene overgår knekklasten til rørstrengen, vil rørgaten løftes opp av omfyllingsmassene. Knekkning er ikke bare tilfelle for trykkforankrede rørgater, knekkingen kan også oppstå i rørgater hvor rørene etter glidning, får kontakt med hverandre, slik at aksielle trykkrefter ufrivillig overføres mellom rørsegmenten.

I oppgaven ble knekkingen simulert i Focus Konstruksjon 2D og Abaqus. Det ble utført simuleringer av rørgater både med og uten skjøter, for å se på hvordan dette påvirket utknekkingsformen. Det ble i tillegg sett på hvordan ulik stivhet i omfyllingsmassene påvirker knekkingsformen.

Arbeidet med knekkingsmodellene blir ikke nærmere beskrevet i detalj fordi hovedfokuset ligger på forankring på friksjon mellom rør og omfyllingsmasser for årets oppgave. Det må likevel legges til at hvis friksjonskapasiteten blir overgått, så kan, som tidligere nevnt knekking av rørgaten oppstå. Så det er to mekanismer som ikke bare skjer hver for seg, men sammen kan føre til et rørbrudd.

2.2 “Rørgater i bratt terreng”, prosjektoppgave av Erlend Hillestad Bårgard

I oppgaven til Bårgard (2011) ligger hovedfokuset på beregningsmodeller som beregner forankringskraften i form av friksjon mellom rør og omfyllingsmasser, for en nedgravd rørgate.

Formålet med oppgaven var å gi en oversikt over hvilke parametre som virker inn når man regner på forankringskraften i form av friksjon, sammen med hvilke krav som NVE stiller til beregningene. Det ble presentert tre ulike regnemodeller. To av regnemodellene ble hentet fra tekniske planer godkjent av NVE. Den siste ble utformet ved å tolke kravene til NVE direkte. Det ble også presentert tre ulike bruddformer alle beregningsmodellene har som utgangspunkt når de beregner forankringskapasiteten.

Regnemodellene ble testet ut ved å variere skråningshelningen og overdekningen for to ulike rørdimensjoner. De tre modellene ga ulike resultater, og det ble ikke funnet noen felles øvre

grense for regnemodellene, med tanke på hvor bratt man kan legge en rørgate. Det er likevel interessant å nevne at man ved å ha tilstrekkelig høy overdekning, beregningsmessig kan ha en stabil rørgate i opptil 55 graders helning, med sikkerhetsfaktor 1.5. Den store variasjonen i resultatene fra de tre beregningsmodellene, viser at det i bransjen i dag hersker stor tvil om hvilke krefter som faktisk virker på en nedgravd rørgate.

Beregningsmodellene fra oppgaven til Bårgard (2011) er tatt med videre i denne oppgaven.

2.3 “Forankring av rørgater i bratt terreng”, masteroppgave av Erlend Hillestad Bårgard og Håkon Bergsager

Arbeidet i masteroppgaven til Bårgard og Bergsager (2012) gikk hovedsakelig ut på å verifisere de ulike beregningsmodellene, som Bårgard og Bergsager hver for seg hadde presentert og analysert i prosjektoppgavene sine, med resulater fra fysiske forsøk. Det ble utført både fullskala feltforsøk i et grustak utenfor Trondheim og modellforsøk i laboratorium. Det ble utført fire typer forsøk:

1. Trekkeforsøk (i laboratorium og felt)
2. Oppløftsforsøk (i laboratorium og felt)
3. Nedtrykksforsøk (i laboratorium)
4. Knekkingsforsøk (i laboratorium)

Nedtrykks- og knekkingsforsøk ble hovedsakelig utført for å verifisere regnemodellene for knekking av rørgaten, presentert av Bergsager (2011). Modellene for knekking ble også videreutviklet i denne oppgaven. Oppløftsforsøkene ble utført for se hvilken motstand grøfta holder igjen med, hvis den blir påvirket av en vanntrykk som ikke virker aksielt med røret. Oppløft kan skje både som en konsekvens av knekking, eller at trykket fra vannet får en flate å presse på i avvinklingen mellom rørsegmentene.

Hovedfokuset for årets masteroppgave ligger på modellene som regner på friksjon mellom rør og omfyllingsmasser. Derfor blir bare arbeidet med trekkeforsøkene presentert i det følgende. Erfaringene fra trekkeforsøkene i laboratorium og felt er tatt med videre i årets oppgave for å sette opp og videreutvikle forsøkene. Formler og oppsett fra beregningsmodellene for forankring ved friksjon mellom rør og omfyllingsmasser tatt med videre for å videreutvikles, og å sammenlignes med nye forsøk.

2.3.1 Trekkeforsøk i laboratorium

Trekkeforsøkene i laboratorium ble utført i en forsøkskasse fylt med sand. Bredden og lengden av kassen ble dimensjonert for å simulere en nedskalert rørgrøft. Her ble et lite PVC-rør gravd ned og dratt eller dyttet ut av enden på kassen. Kassen kunne løftes i bakkant, slik at ulike skråningshelninger kunne simuleres.

Forsøkene ble hovedsakelig utført for å kunne bestemme et oppsett for samme type forsøk utført fullskala i felt. Det var også tenkt at forsøkene direkte kunne sammenlignes med beregningsmodellene.

Først ble det utført forsøk for å sjekke om det var stor forskjell i kraften som skulle til for å enten dytte eller trekke røret ut av kassen. Resultatene fra forsøkene viste liten forskjell. Det ble derfor besluttet ved videre forsøk å trekke ut røret, fordi det ville være en enklere metode i fullskala feltforsøk.

Videre ble det utført forsøk hvor kassen stod i helning. Her ble det undersøkt om det var forskjell på å trekke røret i nedre eller øvre ende av kassen. Resultatene viste at bruddlasten økte ved trekk i øvre ende. Det ble antatt at dette skyldtes at den drivende kraften, på grunn av rørets tyngde, må overvinnes når røret trekkes oppover. På grunnlag av dette ble det besluttet å trekke røret fra øvre ende ved fullskala feltforsøk, siden det var lettere å gjennomføre i praksis.

Det ble også undersøkt om kassens ender hadde innvirkning på resultatene. For de horisontale trekkeforsøkene ble det konkludert med at det ikke var særlig store endeeffekter. Ved trekkeforsøkene der kassen stod i helning viste det seg derimot at endeeffektene var noe som måtte tas hensyn til. Det ble antatt at endeeffektene skyldtes at det bygget seg opp et passivt jordtrykk mot nedre ende av forsøkskassen.

2.3.2 Trekkeforsøk i felt

Feltforsøkene ble hovedsakelig gjennomført for å kunne sammenligne resultatene fra forsøkene med beregningsmodellene. I tillegg kunne resultatene fra feltforsøkene sammenlignes med resultatene fra modellforsøkene, for å finne ut om modellforsøkene kunne sammenlignes med feltforsøkene.

Oppsettet til feltforsøkene ble bestemt ut fra erfaringene som ble gjort i trekkeforsøkene i laboratorium. Røret ble dermed trukket ut av omfyllingsmassene. Et GRP-rør ble valgt til forsøkene på grunn av dets lette egenvekt. Det ble gravd to ulike grøfter, en horisontal og en skrå med en helning på 35 grader. Under forsøkene i den horisontale grøften, ble skuffen på en hjullaster satt ned i bakkken som mothold mot kraften som skulle til for å trekke ut røret. I den skrå grøften viste det seg derimot vanskelig å bygge opp et tilstrekkelig stivt mothold. Det var bestemt å trekke røret i øvre ende, ettersom det ville vært en mer tidkrevende prosess å

lage et forsøksoppsett som dro røret i nedre ende. Et problem med det valgte forsøksoppsettet var at hjullasterskuffen ikke kunne forankres i bakken, men måtte løftes for at røret skulle dras ut samme vinkel som grøften. Løftingen av skuffen førte til at hjullasteren fjæret når det ble trukket i røret.

Resultatene fra feltforsøkene ble tilslutt sammenlignet med resultater fra beregningsmodellene. Sammenligningen viste at beregningsmodellene overvurderte friksjonskapasiteten mellom omfyllingsmassene og røret. Beregningsmodellene viste heller ikke samme trend som forsøksresultatene. At kapasiteten blir overvurdert betyr at man i oppnår en mindre sikkerhetsfaktor på rørgaten enn det den er blitt dimensjonert med. Denne oppdagelsen gjorde at det ble viktig å utføre flere forsøk, for å kunne finne en bedre tilnærming til beregningsmodellene.

2.4 “Stabilitet av nedgravde rørgater”, prosjektoppgave av Eirik Bossel og Mats Breien Haugen

Formålet med oppgaven til Bossel og Haugen (2012), var hovedsakelig å videreføre arbeidet med trekkeforsøkene i felt, introdusert av Bårgard og Bergsager (2012). I tillegg ble det utviklet et nytt forsøksoppsett for å finne friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser. Grunnen til at det ble innført forsøk for å bestemme friksjonskoeffisienten er at friksjonskoeffisienten en viktig parameter i beregningsmodellene. Ved å bestemme friksjonskoeffisienten for omfyllingsmassene brukt i feltforsøkene, ville sammenligningen mellom forsøk og beregningsmodeller bli mer nøyaktige.

I løpet av prosjektoppgaven ble det gjort to forsøk i felt, begge i en horisontal grøft. Det ble også lagt opp til et tredje forsøk, men uttrekkingen av røret måtte avbrytes på grunn av kraftig snøvær. Røret ble derfor liggende igjen nedgravd over vinteren. Det ble konkludert med at resultatene fra de to forsøkene var sammenlignbare med tidligere forsøk utført av Bårgard og Bergsager.

Forsøkene for å finne friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser viste at friksjonskoeffisienten var høyere enn antatt i oppgaven til Bårgard og Bergsager (2012). Det ble funnet en gjennomsnittlig verdi på friksjonskoeffisienten (μ) på $\mu = 0.55$. Det ble konkludert med at feil verdi for friksjonskoeffisienten ikke var årsaken til at regnemodellene overestimerte kapasiteten til rørgaten.

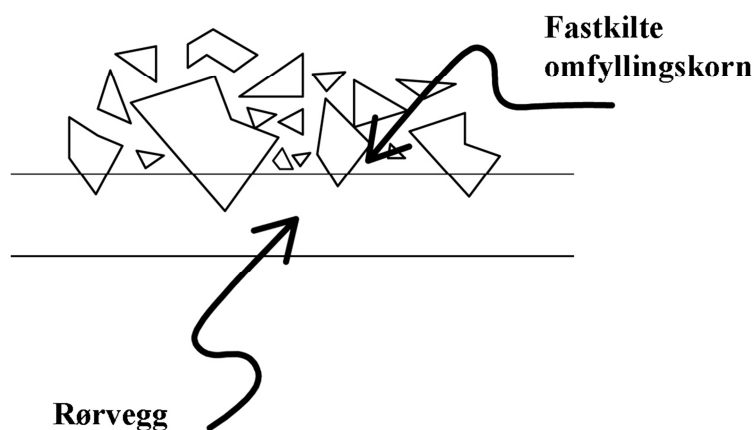
I oppgaven ble det også, ved forsøk, vurdert hva slags virkning komprimering av omfyllingsmassene har å si for friksjonskapasiteten mellom rør og omfyllingsmasser. Feltforsøkene viste at forsøkene hvor massene ble komprimert rundt røret, hadde en større friksjonskapasitet enn ukomprimerte masser. Det ble i den sammenheng fremlagt tre hypoteser på hva som kunne være årsaken til den økte kapasiteten ved komprimering. De tre hypotesene er videre tatt med fordi de har relevans også i årets oppgave.

1. Omfordeling av korn og kornstruktur rundt rørperiferien.
2. Endring i volum når pakningsgraden økes
3. Endring av spenningene fra omfyllingsmassene rundt røret.

Omfordeling av korn og kornstruktur rundt rørperiferien

Med kornstruktur menes her den måten enkeltkorn i omfyllingsmassen legger seg i forhold til hverandre. Ved komprimering vil det skje en omfordeling av kornene. Denne omfordelingen antas å føre til to mekanismer som gjør at friksjonskapasiteten øker.

1. Omstruktureringen vil kunne føre til at enkeltkorn får et større kontaktareal med røret. Økningen i kontaktareal vil kunne gjøre at normalkraften lettere overføres på røret, noe som fører til at friksjonskraften øker.
2. Omstruktureringen fører til at enkeltkorn enten blir banket inn i røret, eller at spisse ender på kornene legger seg inn i ruheten på røroverflaten. Dette vil skape en form for “kileeffekt” videre innover i omfyllingsmassene som igjen fører til at friksjonskraften øker (Figur 2.1).



Figur 2.1 Fastkiling av omfyllingskorn i røroverflaten (Bossel og Haugen, 2012)

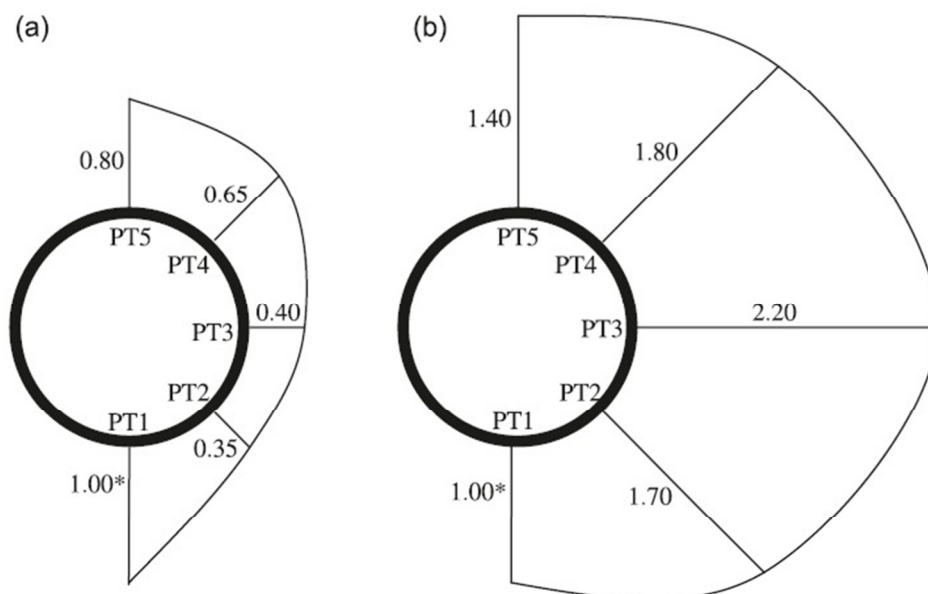
Endring i volum når pakningsgraden endres

Når en porøs masse komprimeres med en ytre kraft, pakkes massene bedre sammen og det blir mindre luft mellom kornene. Massene vil da ta opp et mindre ytre volum, og volumdifferansen mellom ukomprimert og komprimert masse, kan igjen fylles med omfyllingsmasser, i det samme ytre volumet. I praksis, for en nedgravd rørgate, vil dette bety at man vil få en større vekt oppå røret ved en gitt overdekning (H')

Endring av spenningene fra omfyllingsmassene rundt røret

Når omfyllingsmassene rundt røret komprimeres ovenfra trykkes massene mer sammen ned i grøften og rundt røret, noe som fører til at spenningene rundt røret øker. Komprimeringen vil også medføre et økt horisontaltrykk mot grøfteveggen, som igjen fører til et økt mottrykk mot rørveggen.

Wijewickreme (2009) har utført forsøk for å finne friksjonskoeffisienten mellom rør og sand. Forsøkene ble gjort ved å begrave røret i en kasse, for så å trekke røret ut av enden på forsøkskassen. Rundt røret ble det montert fem trykksensorer for å finne spenningen rundt røret under forsøkene. Det ble gjort forsøk med komprimerte og ukomprimerte omfyllingsmasser. Forskjellen på spenningsfordelingen mellom rør med ukomprimerte og komprimerte masser, er vist i Figur 2.2.



Figur 2.2 Spenningsfordelingen rundt et nedgravd rør ved (a) - ukomprimerte masser og (b) - komprimerte masser (Wijewickreme, 2009)

I oppgaven til Bossel og Haugen (2012), ble effekten av komprimering diskutert. Det ble konkludert med at det var endringen av spenningene fra omfyllingsmassen rundt røret som var den viktigste bidragsyteren til at de stabiliserende kreftene fra friksjon mellom rør og omfyllingsmasser økte ved komprimering av omfyllingsmassene.

3. Teori

I det følgende presenteres teori som vil benyttes under diskusjon og analyse av resultatene.

3.1 Gjeldende regler og retningslinjer

Det er NVE som setter krav til utforming og dimensjonering av rør og rørtrase. Regelverket er presentert i “Retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter” (Elstad et. al., 2011).

Retningslinjen sier at det, for nedgravde rørgater som ligger på friksjon mellom rør og omfyllingsmasser, i terreng brattere enn 20° , skal utføres beregninger etter anerkjente beregningsmetoder som viser hvordan sikkerheten er ivarettatt. Retningslinjene sier også at beregningene av stabilitet skal utføres langs en bestemt bruddflate, bestemt av NVE. Bruddflaten er hvordan man tenker at røret kan gli aksielt nedover rørgroften, og bruddflaten som NVE krever at det blir utført kontroll for er senere vist i Figur 3.3.

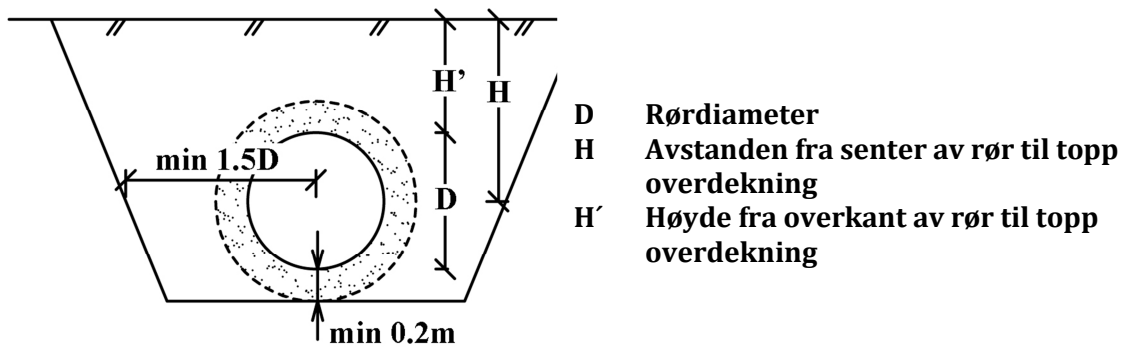
Under beregningene krever NVE at det skal regnes med en sikkerhetsfaktor (S_f), i både bruddgrense- og ulykkesgrensetilstand. Tabell 1 viser krav til sikkerhetsfaktor og lastforutsetninger for de to grensetilstandene.

Tabell 1 Sikkerhetsfaktorer og lastforutsetninger for grensetilstandene

Tilstand	S_f	Lastforutsetning
Bruddgrense	1.5	Drenert grøftetrasé
Ulykkesgrense	1.1	Vannfylt grøft opp til topp rør

Sikkerhetsfaktorene vist i Tabell 1 skal være tilfredsstillt både ved vannfylt og tomt rør. I tillegg skal det, der det kan reises tvil om skråningen med rørgaten er stabil, gjennomføres en sikkerhetsvurdering av selve skråningen, av en geoteknisk sakkyndig. Skråningen skal dimensjoneres med samme sikkerhetsfaktor som rørgaten. Sikkerhetsfaktoren for skråningen er gitt ved, $S_f = \tan(\varphi) / \tan(\alpha)$, hvor φ er friksjonsvinkelen til massene rundt røret og α er skråningshelningen.

Retningslinjen stiller også krav til dimensjonering av rørgroft og omfylling som vist i Figur 3.1. De graderte omfyllingsmassene inn mot rørvæggen skal minimum ha en tykkelse på 0.3 m. Sålen i en grøft som er gravd i løsmasser skal ha en tykkelse på minimum 0.2 m. Hvis grøfta er sprengt i fjell, skal såletykkelsen være minimum 0.3 m. Både grøftesåle og omfyllingsmasser skal komprimeres slik at rør og fundament ikke fører til deformasjoner på rørgaten. I tillegg skal overdekningen, H' fra Figur 3.1, være minimum 0.8 m og gå $1.5 * D$ til hver side for røraksen. Forventes det trafikklast over rørgaten skal overdekningen bestemmes spesielt.



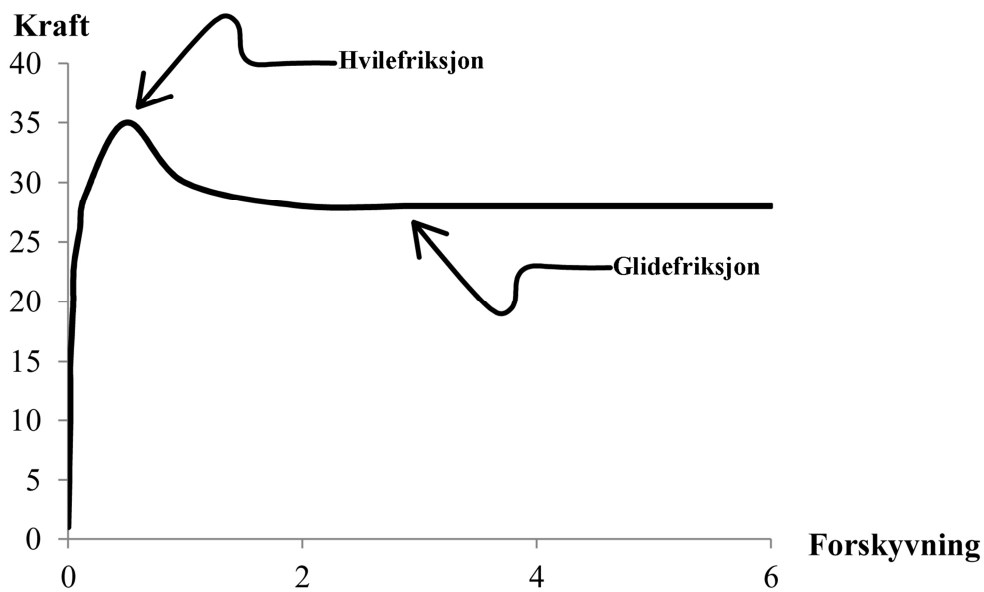
Figur 3.1 Krav fra NVE til rør i løsmassegrøft og definisjoner av høyder i grøft (Bårgard og Bergsager, 2012)

Forholdet H/D , som er definert som overdekningen ned til senter av røret dividert på diameteren til røret, blir videre i oppgaven brukt for å beskrive overdekningen til en rørgate. For eksempel gir minstekravet til NVE, med en overdekning på $H' = 0.8$ m et overdekningsforhold, $H/D = (0.8+0.15)/0.3 = 3.2$ for et rør med diameter, $D = 0.3$ m.

3.2 Definisjon av friksjonskoeffisienten

Friksjonskoeffisienten, er forholdet mellom friksjonskraften og normalkraften som virker mellom to flater som enten er i ro eller i bevegelse. Forholdet er gitt som $F = \mu * N$, der F er friksjonskraften og N er normalkraften som virker mellom flatene. Det er vanlig å skille mellom to typer friksjon, hvilefriksjon og glidefriksjon.

Hvilefriksjonen er definert som den kraften som skal til for å sette i gang en bevegelse mellom to flater. Glidefriksjonen er den friksjonen som virker mellom flatene i det de er i bevegelse i forhold til hverandre. Vanligvis er hvilefriksjonen noe høyere enn glidefriksjonen. Hvilefriksjonen kommer til syne i det høyeste punktet i en graf hvor kraft er plottet mot forskyvning (Figur 3.2).



Figur 3.2 Eksempel på last- og forskyvningsdiagram, med definisjon av hvile- og glidefriksjon (Bossel og Haugen, 2012)

Denne teorien kan også benyttes når man har gravd ned et rør i en grøft, hvor massene i grøften hindrer røret i å bevege seg. Det er da spenningene fra vekten av massene rundt røret som bygger opp en normalkraft mot røret. Friksjonskoeffisienten mellom rør og masser avgjør deretter hvor stor kraft som skal til for å trekke ut røret.

Friksjonskoeffisienten kan variere ved ulik normalkraft (N). Derfor kan friksjonskoeffisienten leses av som stigningstallet til en kurve hvor friksjonskraften er plottet mot varierende normalkraft.

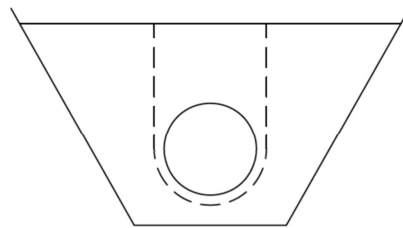
3.3 Beregningsmodeller

I det følgende blir teorigrunnlaget for beregningsmodellene presentert. Til sammen blir det presentert fem beregningsmodeller, hvorav to er hentet fra Bårgard og Bergsager (2012). En er hentet fra Eiksund et. al (2012). De to siste er utviklet under arbeidet med årets oppgave. Alle modellene som er fremlagt regner kun på friksjonskapasiteten til rørgaten i bruddgrensetilstanden, med forutsetning om drenert grøftetrasé.

3.3.1 Bruddflater

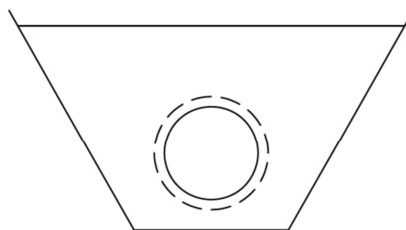
Felles for alle beregningsmodellene er at de tar utgangspunkt i at aksiell glidning av røret foregår langs en av to ulike bruddflater. Bruddflatene er tenkte flater hvor omfyllingsmassen går til brudd i det røret begynner å bevege seg.

Den første typen bruddflate antar brudd vertikalt gjennom omfyllingsmassene, og rundt underkanten av røret mellom rør og omfyllingsmasser. Bruddflaten vil videre bli omtalt som vertikal bruddflate. Bruddflaten er illustrert av den stiplede linjen i Figur 3.3.



Figur 3.3 Vertikal bruddflate (Bårgard, 2011)

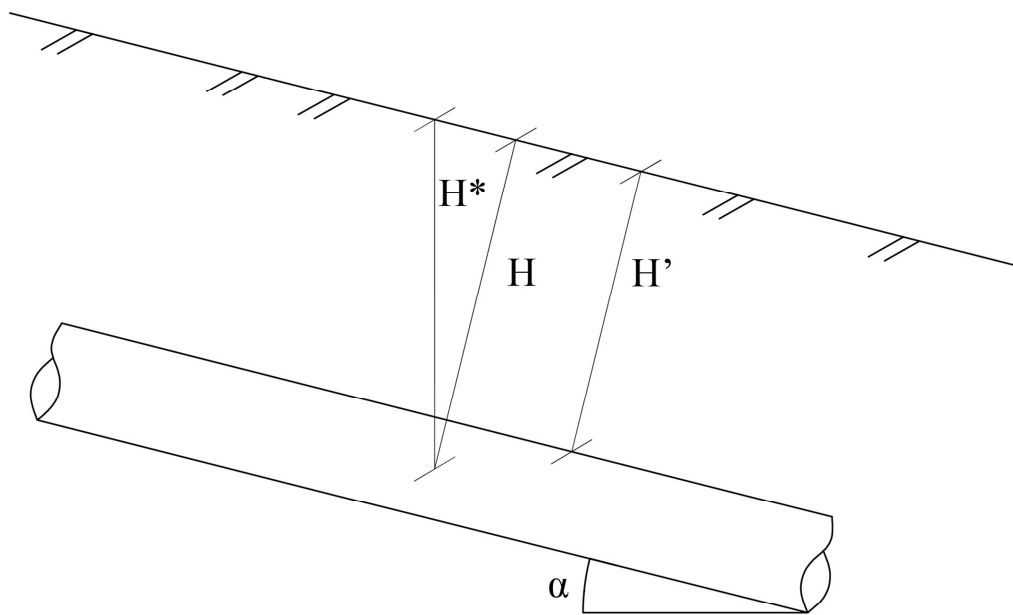
Den andre typen bruddflate antar at det kun er røret som vil gli ut av massene ved brudd. Bruddet vil gå i et snitt rundt røret, og røret vil bevege seg aksielt langs grøfteretningen. Bruddflaten er illustrert av den stiplede linjen i Figur 3.4. Bruddflaten vil videre bli omtalt som bruddflate rundt rør.



Figur 3.4 Bruddflate rundt rør (Bårgard, 2011)

3.3.2 Overdekning

I tilfeller med rørgater i helning er det viktig å holde kontroll på hva som defineres som overdekning. Overdekningen kan måles som høyden vertikalt fra røret og opp til overflaten, men kan også som høyden normalt fra røret og opp til overflaten, henholdsvis H^* og H i Figur 3.5. Benyttes H^* som utgangspunkt for beregningene, må vekten av omfyllingsmassene over røret dekomponeres normalt på og parallelt med helningen på røret. Benyttes H som utgangspunkt for beregningene må vekten av omfyllingsmassene kun dekomponeres parallelt med røret.

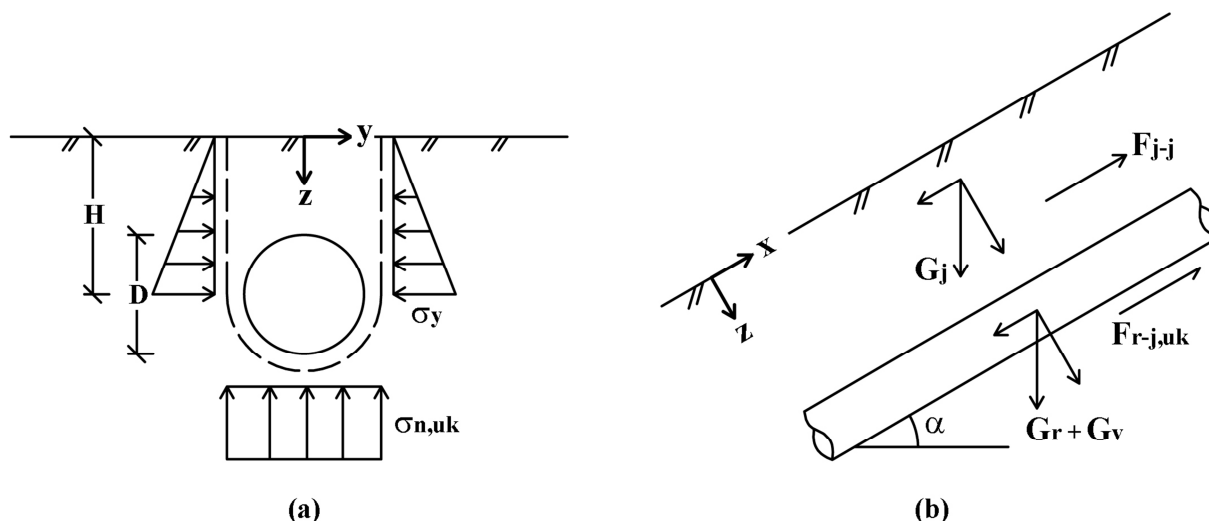


Figur 3.5 Forklaring av overdekning over rør i helning

3.3.3 Beregningsmodell med vertikal bruddflate, Bårgard og Bergsager (2012)

I denne modellen definerer man overdekningen vertikalt opp fra røret (H^*), og må derfor dekomponere kreftene som virker på rør og omfyllingsmasser når rørgaten ligger i helning.

Figur 3.6 viser trykkfordeling og krefter som virker på rør og omfyllingsmasser hvor man antar vertikal bruddflate rundt det nedgravde røret.



Figur 3.6 (a) - Trykkfordeling og (b) - krefter som virker på en nedgravd rørgate (Bårgard og Bergsager, 2012)

De kreftene som virker på røret er vekt av jord (G_j), vekt av rør (G_r) og vekt av vann (G_v) dersom røret er vannfylt. I følge Bårgard og Bergsager (2012) er det vanlig praksis i bransjen å anta at vannet ikke har noen drivende krefter, noe som kan forklares ved at det statiske vanntrykket alltid vil balansere opp kraften fra tyngden av vannet i ethvert snitt langs rørgaten.

De stabiliserende kreftene beregnes som summen av friksjonskraften i omfyllingsmassene (F_{j-j}) langs de to vertikale bruddflatene og friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasse ($F_{r-j,uk}$) langs bruddflaten i underkant av røret.

Friksjonskraften i omfyllingsmassene (F_{j-j}) beregnes ved å innføre Mohr- Coloumb- kriteriet, og man finner at:

$$F_{j-j} = \int_0^{H^*} \sigma_y * \tan(\varphi) * dz = \gamma_j * [1 - \sin(\varphi)] * \frac{H^{*2}}{2} * \tan(\varphi) \quad (3.1)$$

Her er H^* jordtrykkshøyden. Jordtrykkshøyden antas å være den samme som overdekningen. γ_j er tyngdetettheten til massene og σ_y horisontalspenningen i massene. σ_y blir antatt å være vertikalspenningen i massene (σ_z) multiplisert med en hviletrykkskoeffisient (K_0). K_0 er forholdet mellom vertikal- og horisontalspenningen til omfyllingsmassene, og antas å kunne beregnes som:

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi) \quad (3.2)$$

Der φ er friksjonsvinkelen til massene.

Friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasse beregnes ved å dekomponere de kreftene som virker på røret (G_j , G_r og G_v) normalt på røraksen og multiplisere med friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasse (μ):

$$F_{r-j} = D * \mu * \sigma_{uk} * \cos(\alpha) = \mu * (G_j + G_r + G_v) * \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

Der D er rørdiameteren, σ_{uk} er vertikalspenningen i underkant av røret og α er helningen til røret. Det er her antatt at spenningen virker på en projeksjon av rørets diameter.

Den stabiliserende kraften kan da skrives som:

$$F_{stab} = 2 * F_{j-j} + F_{r-j} \quad (3.4)$$

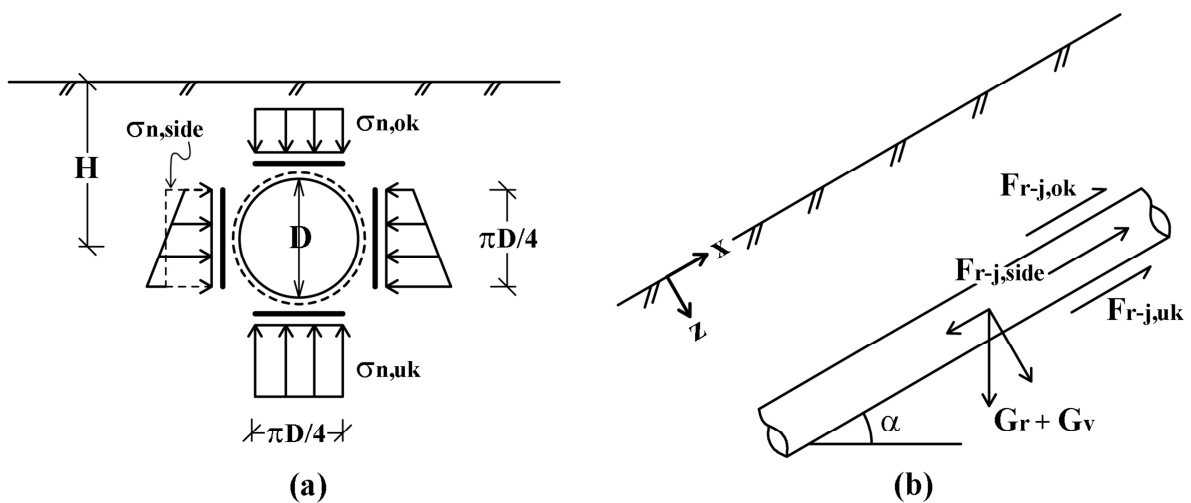
De drivende kreftene vil være tyngden av jord og rør dekomponert parallelt med røraksen, og kan skrives som:

$$F_{driv} = (G_j + G_r) * \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

3.3.4 Beregningsmodell med bruddflate rundt rør, Bårgard og Bergsager (2012)

I denne modellen definerer man overdekningen vertikalt opp fra røret (H^*), og må derfor dekomponere kreftene som virker på rør og omfyllingsmasser når rørgaten ligger i helning.

Figur 3.7 viser trykkfordeling og krefter som virker på rør og omfyllingsmasser hvor man antar en bruddflate rundt det nedgravde røret.



Figur 3.7 (a) - Trykkfordeling og (b) - krefter som virker på et nedgravd rør med bruddflate rundt rør (Bårgard og Bergsager, 2012)

De fire spenningene (over, under og på begge sider av røret) er antatt å virke over en fjerdedel av røromkretsen hver. Den stabiliserende kraften er her angitt som summen av friksjonskrefter mellom rør og omfyllingsmasse for hver av de fire delene av røromkretsen.

Friksjonskreftene langs toppen av røret beregnes etter:

$$F_{r-j,ok} = \frac{\pi * D}{4} * \mu * \sigma_{n,ok} = \mu * \gamma_j * \left(H^* - \frac{D}{2}\right) * \frac{\pi * D}{4} * \cos(\alpha) \quad (3.6)$$

$\sigma_{n,ok}$ er her normalspenningen i overkant av røret.

På rørets sider beregnes friksjonskreftene som:

$$F_{r-j,side} = \frac{\pi * D}{4} * \mu * \sigma_{n,side} = \mu * \gamma_j * K_0 * H^* * \frac{\pi * D}{4} \quad (3.7)$$

Der $\sigma_{n,side}$ er normalspenningen i senter av røret og K_0 er hviletrykkskoeffisienten, beregnet etter (3.2).

I underkant av røret beregnes friksjonskreftene etter:

$$F_{r-j,uk} = \frac{\pi * D}{4} * \mu * \sigma_{n,uk} = \mu * (G_j + G_r + G_v) * \cos(\alpha) \quad (3.8)$$

Der $\sigma_{n,uk}$ er normalspenningen i underkant av røret.

Den stabiliserende kraften kan da skrives som:

$$F_{stab} = 2 * F_{r-j,side} + F_{r-j,ok} + F_{r-j,uk} \quad (3.9)$$

I denne modellen er det bare tyngden av røret som gir en drivende komponent, slik at de drivende kreftene i dette tilfellet kan skrives som:

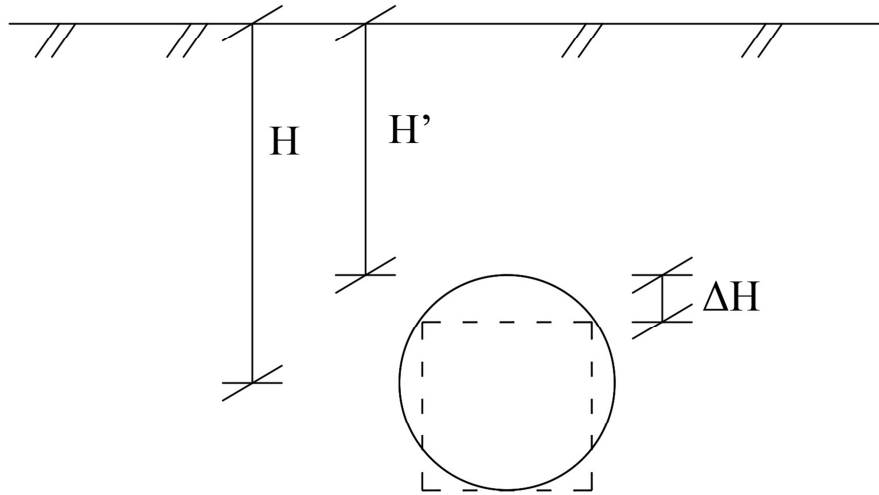
$$G_r * \sin(\alpha) \quad (3.10)$$

3.3.5 Beregningsmodeller med antagelse om kvadratisk rørtverrsnitt

Erfaringer fra Bårgard og Bergsager (2012) og Bossel og Haugen (2012) viser at de to tidligere presenterte beregningsmodellene virker å overestimere motstanden mot aksiell forskyvning av røret utført ved trekkeforsøk. Det er derfor, under arbeidet med oppgaven, utarbeidet to nye modeller basert på grunnleggende geotekniske beregningsprinsipper. Disse modellene baserer seg på de samme bruddflatene som nevnt i kapittel 3.3.1

I de nye modellene antas det at rørets tverrsnitt er kvadratisk i stedet for sirkulært. For å bestemme størrelsen på kvadratet er det tatt utgangspunkt i at omkretsen på røret skal være den samme som omkretsen på kvadratet. Grunnen til dette er at det her undersøkes rørets kapasitet mot glidning. Friksjon mellom rør og jord er derfor den viktigste parameteren, og det er derfor viktig at overflaten er lik i begge tilfeller. Kvadratet får da fire like sider hvor

$B = \frac{\pi * D}{4}$. Dette medfører at høyden på kvadratet blir noe lavere enn den opprinnelige diameteren på røret. Dette blir det kompensert for i modellen ved at det regnes ut en $\Delta H = D - B$. Dette er illustrert i Figur 3.8. I de nye modellene er det valgt å definere overdekningen som høyden normalt fra røret og opp til overflaten (H i Figur 3.5).



Figur 3.8 Definisjoner av størrelser for beregningsmodeller med kvadratisk rør

I samråd med veileder ble det diskutert hvorvidt omfyllingsmassen beholder sin kapasitet mot glidning når helningen på skråningen økes. Det er usikkert hvorvidt massene beholder sin fulle kapasitet mot brudd innad når skråningshelningen blir så bratt at den nærmer seg friksjonsvinkelen til massene. I den nye modellen med vertikal bruddflate er dette derfor tatt høyde for ved å multiplisere med $\sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)}$, i stedet for bare å multiplisere med $\tan(\varphi)$ som i formel (3.1). Dette vil bety at kapasiteten gradvis reduseres etter hvert som helningen på røret øker frem til helningen er så bratt at den har nådd friksjonsvinkelen til massene. Økes helningen på røret ytterligere er modellen ugyldig, ettersom det antas at omfyllingsmassene da vil rase ut.

3.3.6 Modell med vertikal bruddflate og kvadratisk rørtverrsnitt

Her beregnes først jordspenningen over, på siden og under det nedgravde røret. Dette gjøres i tråd med vanlige, enkle geotekniske betraktninger, og er hentet fra Emdal (2008). Følgende formler tas i bruk:

Vertikalspenning på rørets overside:

$$\sigma_{v,over} = \gamma * (H' + \Delta H) \quad (3.11)$$

Horisontalspenning på rørets sider:

$$\sigma_{h,side} = \gamma * K_0 * (H + \Delta H) \quad (3.12)$$

Vertikalspenning på rørets underside:

$$\sigma_{v,under} = \sigma_{v,over} + \frac{G_{rør}}{B} \quad (3.13)$$

Der $G_{rør}$ er vekten av røret og B er lengden på sidene av kvadratet.

De stabiliserende kreftene langs de vertikale bruddflatene beregnes ved å finne horisontalkraften i midterste snitt langs de vertikale bruddflatene, og multiplisere denne med friksjonen innad i massene (Mohr- Coulombs bruddkriterie), korrigert for skråningshelningen. Horisontalspenningen antas å kunne beregnes som vertikalspenningen multiplisert med hviletrykkskoeffisienten, K_0 . Følgende formel benyttes:

$$F_{j-j} = K_0 * \frac{\sigma_{v,over}}{2} (H' + \Delta H) * \sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)} \quad (3.14)$$

Formel (3.11) innsatt i formel (3.14) gir:

$$F_{j-j} = K_0 * \gamma * \frac{(H' + \Delta H)^2}{2} * \sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)} \quad (3.15)$$

De stabiliserende kreftene rundt rørperiferien beregnes ved å multiplisere med lengden på sidene av kvadratet og friksjonskoeffisienten mellom omfyllingsmasser og rør. Langs rørets sider beregnes de stabiliserende kreftene ved:

$$F_{j-r,side} = \mu * \sigma_{h,side} * B \quad (3.16)$$

Formel (3.12) innsatt i formel (3.16) gir:

$$F_{j-r,side} = \mu * K_0 * (H + \Delta H) * B \quad (3.17)$$

De stabiliserende kreftene under røret blir beregnet som:

$$F_{j-r,under} = \mu * \sigma_{v,under} * B \quad (3.18)$$

Formel (3.13) innsatt i formel (3.18) gir

$$F_{j-r,under} = \mu * (\gamma * (H' + \Delta H) * B + G_{r\theta r}) \quad (3.19)$$

Dette gir en total stabiliserende kraft på:

$$F_{stab} = F_{j-r,under} + 2 * (F_{j-j} + F_{j-r,side}) \quad (3.20)$$

Drivende krefter i dette tilfellet vil være komponenten fra tyngden av jorda over røret som virker parallelt med røret. I tillegg kommer den drivende komponenten fra vekten av røret.

Drivende krefter fra jord:

$$F_{driv,jord} = \gamma * (H' + \Delta H) * B * \tan(\alpha) \quad (3.21)$$

Og fra rør:

$$F_{driv,r\theta r} = G_{r\theta r} * \sin(\alpha) \quad (3.22)$$

3.3.7 Modell med bruddflate rundt rør og kvadratisk rørtverrsnitt

Denne beregningsmodellen har de samme beregningsprinsippene som modellen med vertikale bruddflater, men stabiliteten beregnes med utgangspunkt i bruddflate rundt rør.

De stabiliserende kreftene i overkant av røret beregnes etter følgende formel:

$$F_{j-r,over} = \mu * \sigma_{v,over} * B \quad (3.23)$$

Formel (3.11) innsatt i formel (3.23) gir:

$$F_{j-r,over} = \mu * \gamma * (H' + \Delta H) * B \quad (3.24)$$

De stabiliserende kreftene på siden og under røret beregnes på samme måte som for modellen med vertikal bruddflate, slik at:

$$F_{j-r,side} = \mu * K_0 * \gamma * (H + \Delta H) * B \quad (3.25)$$

$$F_{j-r,under} = \mu * \gamma * (H' + \Delta H) * B + G_{r\theta r} \quad (3.26)$$

Den stabiliserende kraften blir dermed:

$$F_{stab} = F_{r-j,ok} + F_{r-j,uk} + 2 * F_{r-j,side} \quad (3.27)$$

I denne modellen er det bare tyngden av røret som gir en drivende komponent, slik at de drivende kreftene i dette tilfellet kan skrives som:

$$F_{driv} = G_{r\theta r} * \sin(\alpha) \quad (3.28)$$

I begge de nye modellene er det tatt utgangspunkt i å benytte overdekningen normalt på røret. Ved å benytte seg av overdekningen normalt på røret er det ikke nødvendig å dekomponere de

stabiliserende kreftene. For å illustrere dette kan man ta utgangspunkt i normalspenningen som virker på rørets side (formel (3.12)). Den stabiliserende kraften som utøves mot røret må nå beregnes med overdekningen vertikalt over røret for deretter å dekomponeres. Vertikalt fra røret vil man nå ha overdekningen, H^* , som er illustrert i Figur 3.5. Man kan ta utgangspunkt i formel (3.25), og bytte ut H med H^* for å finne den stabiliserende kraften på siden av røret. Man får da følgende ligning:

$$F_{j-r,side} = \mu * K_0 * \gamma * (H^* + \Delta H^*) * B \quad (3.29)$$

Denne kraften må nå dekomponeres normalt på røret, dette gjøres ved å benytte seg av formlikhet, som illustrert i Figur 3.5. Man multipliserer med faktoren $\cos(\alpha)$, slik at man får:

$$F_{j-r,side} = \mu * K_0 * \gamma * (H^* + \Delta H^*) * B * \cos(\alpha) \quad (3.30)$$

Formlikhet kan også benyttes for å se på forholdet mellom H^* og H . Dette forholdet har følgende relasjon:

$$H = H^* * \cos(\alpha) \quad (3.31)$$

Ved å sette (3.31) inn i (3.30) finner man at

$$F_{j-r,side} = \mu * K_0 * \gamma * (H + \Delta H) * B$$

Som er den samme formelen som formel (3.25).

3.3.8 Beregningsmodell med full integrasjon over et sirkulært rørtverrsnitt

For å se om det er forenklingene i regnemodellene tidligere presentert som gjør at de overvurderer kapasiteten til rørgaten er det tatt med en mer komplisert modell som integrerer spenningene over hele overflaten til røret. Modellen er hentet fra Eiksund et. al. (2013), og tar utgangspunkt i de samme geotekniske prinsippene som foregående modeller, bare at spenningen langs rørperiferien integreres med utgangspunkt i Mohr-Coulomb- kriteriet. Modellen tar utgangspunkt i bruddflate rundt rør.

Eiksund et. al. (2012) gir følgende fordeling av horisontal- og vertikalspenningen langs rørperiferien:

$$\sigma_v = \gamma * (H' + R(1 - \cos\theta)) \quad (3.32)$$

$$\sigma_h = \sigma_v * K_0 \quad (3.33)$$

Der R er radius til røret og θ er retningen normalt på rørets overflate ($\theta = 0$ ved toppen av røret).

Normalspenningen ved rørets overflate kan beregnes som:

$$\sigma_n = \sigma_v * \cos^2(\theta) + \sigma_h * \sin^2(\theta) \quad (3.34)$$

Normalkraften, F_N , som virker på øvre halvdel av røret over en lengde L kan da uttrykkes ved integralet av normalspenningen:

$$F_N = 2 * L \int_0^{\pi/2} \sigma_n * R * d\theta \quad (3.35)$$

Ved å sette inn (3.32), (3.33) og (3.34) inn i (3.35) og løse integralet finner man at:

$$F_N = 2 * L * \gamma * R * [(H' + R) * \frac{\pi}{4} * (1 + K_0) - \frac{R}{3} * (2 + K_0)] \quad (3.36)$$

Den stabiliserende kraften blir dermed:

$$F_{stab} = \mu * (2 * F_N + G_{rør}) \quad (3.37)$$

De drivende kreftene blir som i formel (3.28), i tilfellet med bruddflate rundt rør og kvadratisk tverrsnitt

$$F_{driv} = G_{rør} * \sin(\alpha)$$

3.3.9 Sikkerhetsfaktor mot glidning

For alle fem modeller beregnes sikkerhetsfaktoren som summen av stabiliserende krefter dividert med summen av drivende krefter. Det er denne sikkerhetsfaktoren NVE stiller krav til at skal være minimum 1.5 i bruddgrensetilstanden.

$$S_f = \frac{\sum F_{stab}}{\sum F_{driv}} \quad (3.38)$$

3.4 Statistikk

I analysen av forsøksresultatene, er det benyttet ulike statistiske metoder. Metodene er presentert i det følgende, og er hentet fra Walpol et. al. (2007).

3.4.1 Gjennomsnitt og standardavvik

Gjennomsnittsverdien, \bar{x} , er beregnet ved å summere alle verdier og dividere på antall forsøk etter følgende formel:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Videre er standardavviket, s , definert som kvadratroten av forsøkene varians:

$$s = \sqrt{s^2}$$

Variansen i forsøkene beregnes etter formel:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Årsaken til at det divideres med $n-1$ og ikke n , der n er antall forsøk, er at forsøkene utført i denne oppgaven er antatt å kunne representeres med én frihetsgrad. Antallet frihetsgrader i et forsøk varierer med antall variable representert i forsøket. Det er for alle forsøk utført i denne oppgaven antatt at kun en variabel er representert i forsøket.

3.4.2 Korrelasjon

For å sammenligne likheten av to datasett kan man benytte seg av korrelasjonsteori.

Korrelasjonsverdien r_{xy} , mellom de to datasettene, er definert som:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Der hvor n er antall verdier av X og Y skrevet som x_i og y_i , hvor $i = 1, 2, \dots, n$. \bar{x} og \bar{y} er gjennomsnitt for henholdsvis serie X og Y .

Korrelasjonsverdien, varierer fra -1 til 1, hvor 1 betyr at det er total likhet mellom verdiene, imens -1 betyr at verdiene er omvendt proporsjonale.

I grafiske fremstillinger senere i denne oppgaven, er det i noen tilfeller lagt til lineære trendlinjer til datasettene. Da vil som regel en R^2 -verdi presenteres. R^2 -verdien beskriver da hvor god korrelasjon det er mellom verdiene i datasettet og verdiene for trendlinjen. R^2 er da lik $(r_{xy})^2$, hvor x og y er verdiene for datasettet og trendlinjen.

3.5 Ruhet

For å kvantifisere overflaten til rørene brukt i de ulike forsøkene i denne oppgaven er det benyttet et profilometer (Figur 3.9). Profilometeret fungerer på den måten at en liten nål trekkes langs overflaten og registrerer den vertikale høydefordelingen over en gitt lengde av det utvalgte materialet.

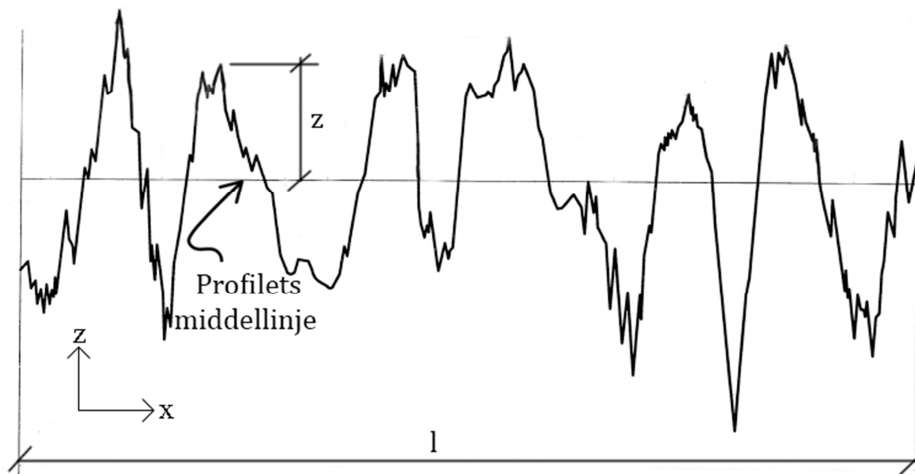


Figur 3.9 Profilometer

Det finnes flere parametere som brukes for å karakterisere overflateruheten, men den vanligste er midlere profilhøyde R_a . R_a er etter NS-EN ISO 4287:1998, definert som:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$

Hvor l er den horisontale lengden på den målte overflaten og $z(x)$ er høyden til ruhetsprofilen fra middellinjen. R_a oppgis som regel i mikrometer (μm). Størrelsene er definert i Figur 3.10.



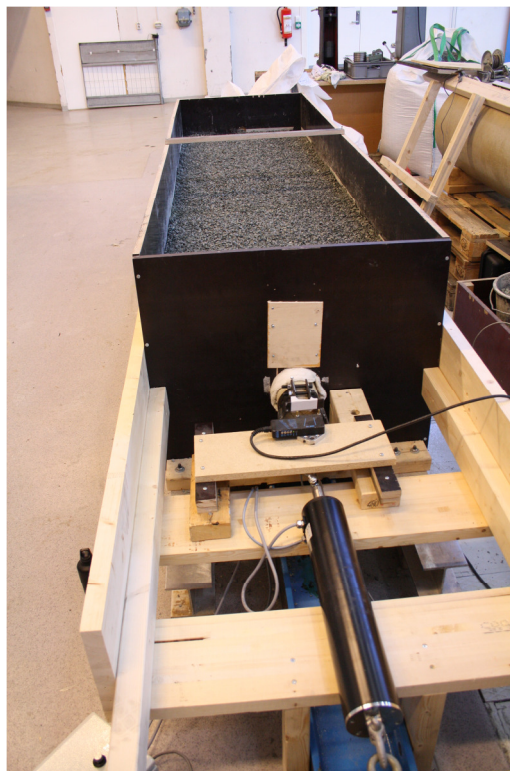
Figur 3.10 Definisjoner av størrelser for å regne ut R_a

4. Modellforsøk

For å videreføre arbeidet med å verifisere beregningsmodeller ble det besluttet å utføre modellforsøk i kasse. Formålet med forsøkene var, i første omgang, å undersøke om modellforsøkene kunne sammenlignes med feltforsøkene. Modellforsøkene er mindre tid- og kostnadskreven enn feltforsøkene og vil derfor kunne gi et stort sammenligningsgrunnlag med regnemodellene, forutsatt at modellforsøkene kan sammenlignes med feltforsøkene.

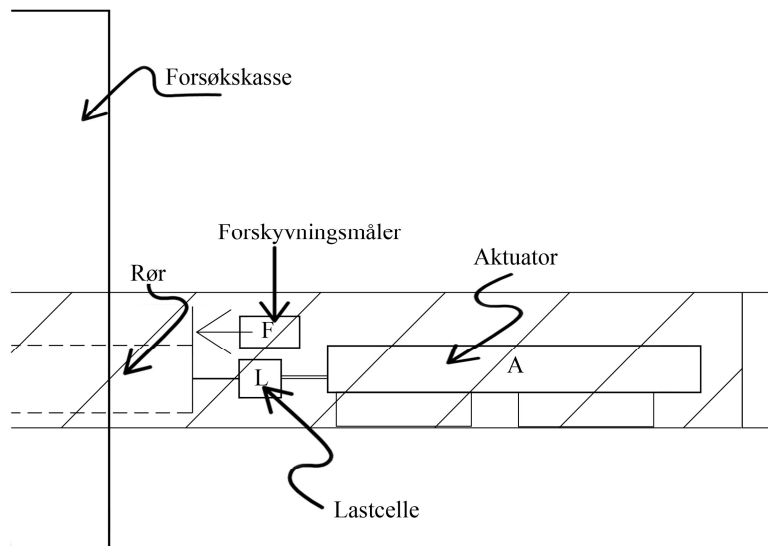
4.1 Forsøksoppsett

Trekkeforsøkene ble utført ved å trekke et nedgravd rør ut av et hull i kassen (Figur 4.1). Kassen har dimensjoner h x b x l på 0.7 x 0.8 x 3.0 m. I enden av røret er det skrudd på en festeanordning for å gjøre det mulig å trekke røret ut av kassen. I den ene enden av kassen er det satt opp en rigg av treverk. På riggen er det festet en aktuator som trekker røret ut av kassen.



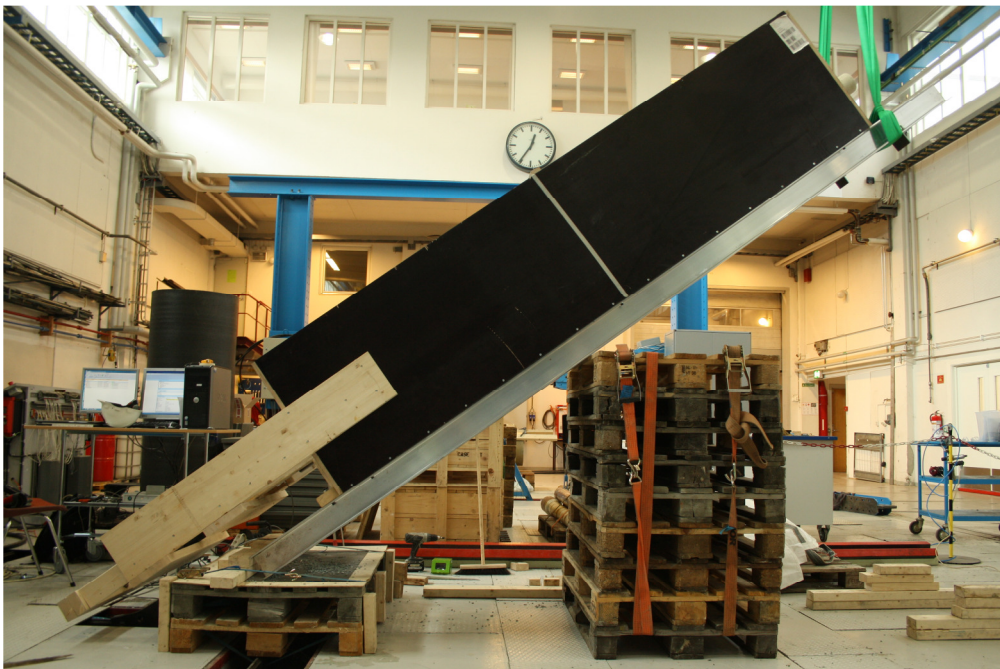
Figur 4.1 Forsøkskasse brukt i modellforsøk

For å måle kraften som aktuatoren påfører røret under forsøkene er en lastcelle montert mellom festet på røret og aktuatorarmen. For å måle forskyvningen under forsøkene er en optisk lasermåler montert på samme rigg, uavhengig av resten av oppsettet (Figur 4.2).



Figur 4.2 Oppsett for måling av kraft og forskyvning

Det ble utført forsøk med rør $d = 100$ mm og $d = 300$ mm, med kassen horisontalt og i helning. Figur 4.3 viser oppsettet for kassen i helning. Kassen ble løftet i bakkant for å oppnå ønsket helning.



Figur 4.3 Oppsett for kasse i helning

På grunn av at lengden på røret med $d = 300$ mm var kortere enn røret med $d = 100$ mm, måtte lengden på kassen kortes ned. Kassen ble kortet inn ved å flytte den bakre platen i kassen, slik at kassen fikk en lengde på 2.5 meter (Figur 4.4).



Figur 4.4 Oppsett for kasse med stort rør

4.2 Egenskaper til rør

I forsøkene ble det valgt å benytte et GRP-rør i diameter 100 mm og 300 mm. Grunnen til at GRP-rørene ble valgt, er at de er antatt å ha samme overflate som rørene som ble benyttet til feltforsøk høsten 2012, og som blir benyttet i praksis ved småkraftverk. Rørene er produsert av Flowtite Technology AS, og egenskapene til rørene er oppsumert i Tabell 2.

Tabell 2 Geometri- og materialdata GRP-rør

		DN100 PN10	DN300 PN10
Ytre diameter	D [mm]	116	325
Godstykkelse	e [mm]	3.4	5.7
Lengde rør kontinuerlig	L [m]	3.5	3.0
Masse	m_r [kg/m]	2.4	11.3
E-modul	E [N/mm ²]	8500	7000

For å sammenligne overflatene til de to rørene ble det utført ruhetsmålinger med et profilometer. Det ble utført tre målinger for hvert av rørene. Midlere profilhøyde (R_a) fra målingene er vist i Tabell 3.

Tabell 3 Ruhetsmålinger for rør

Måling	R_a D=100 [μm]	R_a D=300 [μm]
1	4.25	2.46
2	6.57	2.54
3	4.69	1.79
Gjennomsnitt	5.17	2.26

Tabellen viser at røret med $d = 100$ mm, har en midlere profilhøyde på 5.17 mikrometer (10^{-6} m) og røret med $d = 300$ mm, har en midlere profilhøyde på 2.26 mikrometer.

4.3 Egenskaper til pukk

Det ble besluttet å benytte pukk med gradering 4/8 mm, bestilt fra Franzefoss Pukk AS. Grunnen til at pukk ble valgt, var at man ville at forsøkene skulle simulere virkeligheten best mulig og at de kunne sammenlignes med feltforsøkene. Detaljert kornform for pukken er presentert i Figur 4.5.

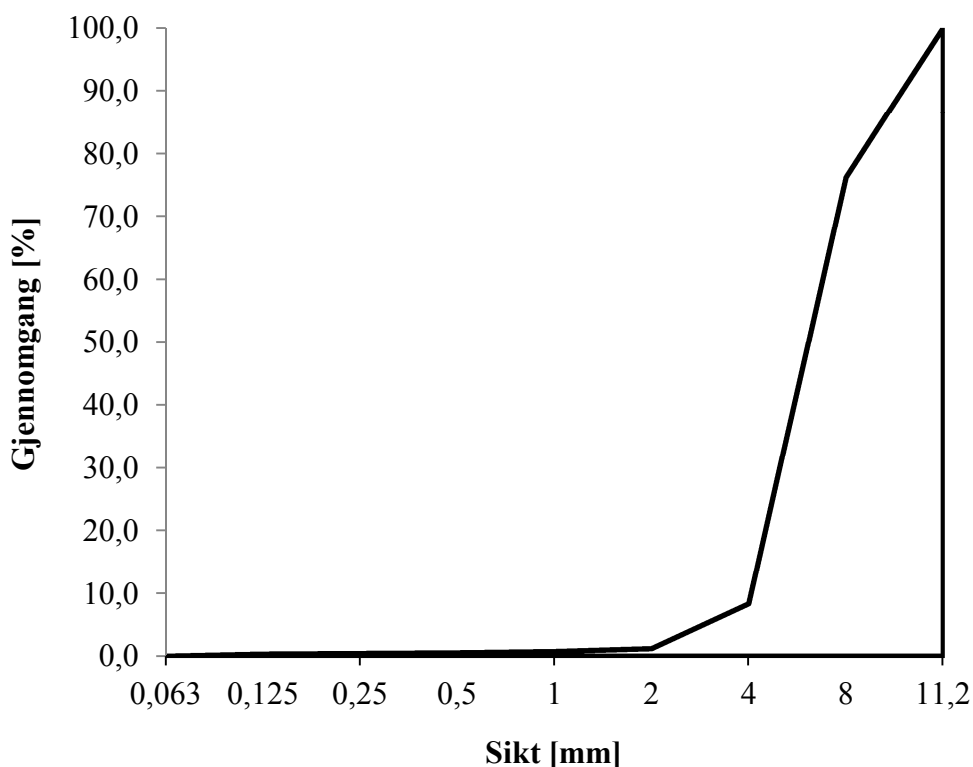


Figur 4.5 Omfyllingsmasser brukt i modellforsøk, detalj kornform

Det bør også nevnes at pukken som er benyttet i modellforsøkene ble fuktet. Dette skyldes praktiske forhold i laboratoriet, da den tørre pukken støvet veldig under arbeidene. Pukken benyttet under uttrekksforsøkene kan derfor kategoriseres som «jordfuktig».

Det ble også tatt en sikteprøve av pukken, hvor resultatet er vist i Figur 4.6.

Siktingen ble utført med et siktesett, med siktestørrelser fra 0.063 til 8 mm. Først ble det tatt ut en representativ prøve på 2.5 kg fra pukkleveransen. Denne prøven ble så tørket ved 105 °C i 24 timer. Det ble så gjennomført to sikteprøver med 1 kg hver av den opprinnelige prøven. Gjennomsnittet av de to prøvene er presentert i Figur 4.6, hvor prosentvis gjennomgang er vist som funksjon av tilhørende siktestørrelse.



Figur 4.6 Siktekurve til omfyllingsmasser brukt i modellforsøk

Figur 4.6 viser at mesteparten av massene er i området fra 4 til 8 mm, som er innenfor spesifikasjonene pukken ble bestilt etter. Det er riktignok ca. 20 % av massene som er større enn 8 mm, og ca. 10 % av massene som er mindre enn 4 mm.

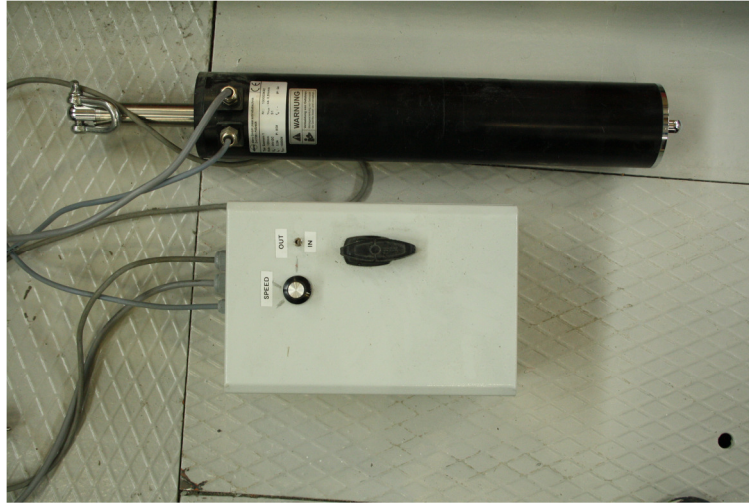
Det ble også forsøkt å måle friksjonsvinkelen til massene, ved å forsiktig helle pukken ned på en jevn flate og måle vinkelen i forhold til horisontalplanet på haugen som ble dannet av massene. Forsøkene viste en friksjonsvinkel, φ , på ca 40°.

4.4 Utstyr

Videre følger en oversikt over utstyret benyttet under forsøkene.

4.4.1 Aktuator

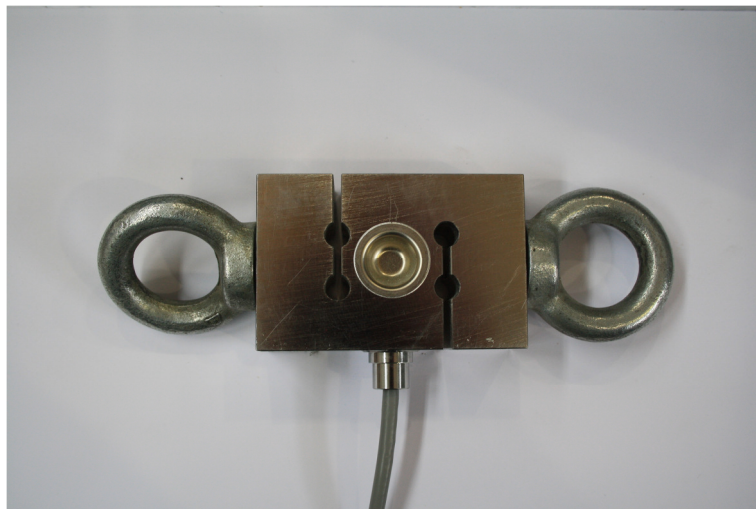
For å trekke ut røret under forsøkene ble det brukt en modifisert elektrisk aktuator av typen Econom 1, produsert av Elero (Figur 4.7). Aktuatorene er toveisvirkende og kan dra eller skyve med en kraft opp til 10 kN. Hastigheten til aktuatoren er justerbar og den trekker med en hastighet ned mot ca 1 mm/min, avhengig av hvor mye kraft den utøver.



Figur 4.7 Aktuator benyttet for uttrekking av rør

4.4.2 Lastcelle

Lastcellen har en kapasitet på 10 kN og registrerer last ned til 0.0002 kN (Figur 4.8). Unøyaktigheten til lastcellen er garantert av Institutt for konstruksjonsteknikk til å være mindre enn 2 %, men er erfaringsmessig langt under denne garanterte verdien.



Figur 4.8 Lastcelle benyttet i modellforsøk

4.4.3 Forskyvningsmåler

Det ble brukt en optisk forskyvningsmåler av type ODS 70, produsert av DSE (Figur 4.9). Den har fokuspunkt 70 mm fra sin overflate og måler ± 20 mm til hver side fra fokuspunktet. Når den stilles slik at den starter målingen i ytterstilling (90 mm) fra sin overflate, har den dermed 40 mm måleområde tilgjengelig.



Figur 4.9 Forskyvningsmåler benyttet i modellforsøk

4.4.4 Utstyr for logging av data

For logging av last og forskyvning under forsøkene ble det benyttet en PC med Catman Easy AP programvare, med en Spider 8 måleforsterker. Dataene ble logget med en frekvens på 50 målinger per sekund (50 Hz).

4.5 Fremgangsmåte for modellforsøk

Under alle forsøkene ble det komprimert en såle for røret i bunnen av kassen. Komprimeringen ble gjort i henhold til Flowtites (2013) leggeanvisninger, ved å fottrække sålen i to omganger. Tykkelsen av sålen ble, for røret med $d = 100$ mm, valgt til 200 mm etter NVEs krav (Elstad et. al., 2011). For røret med $d = 300$ mm ble tykkelsen av sålen 80 mm, på grunn av begrensninger i høyden til kassen.

Under forsøkene ble røret belastet til det begynte å gli ut av omfyllingsmassene. Røret ble så påført en deformasjon på 10 mm, noe som ble gjentatt tre ganger for hver gang røret ble gravd ned. En nedgravning vil videre bli omtalt som en forsøksserie, og en uttrekking blir omtalt som et forsøk.

Under alle forsøkene ble røret dratt ut med en hastighet på ca 1 mm/min. Det tok litt tid å finne frem til denne hastigheten for aktuatoren, noe som gjorde at de første forsøksseriene, $H/D = 2.0$ med ukomprimerte omfyllingsmasser, ble utført med en annen hastighet

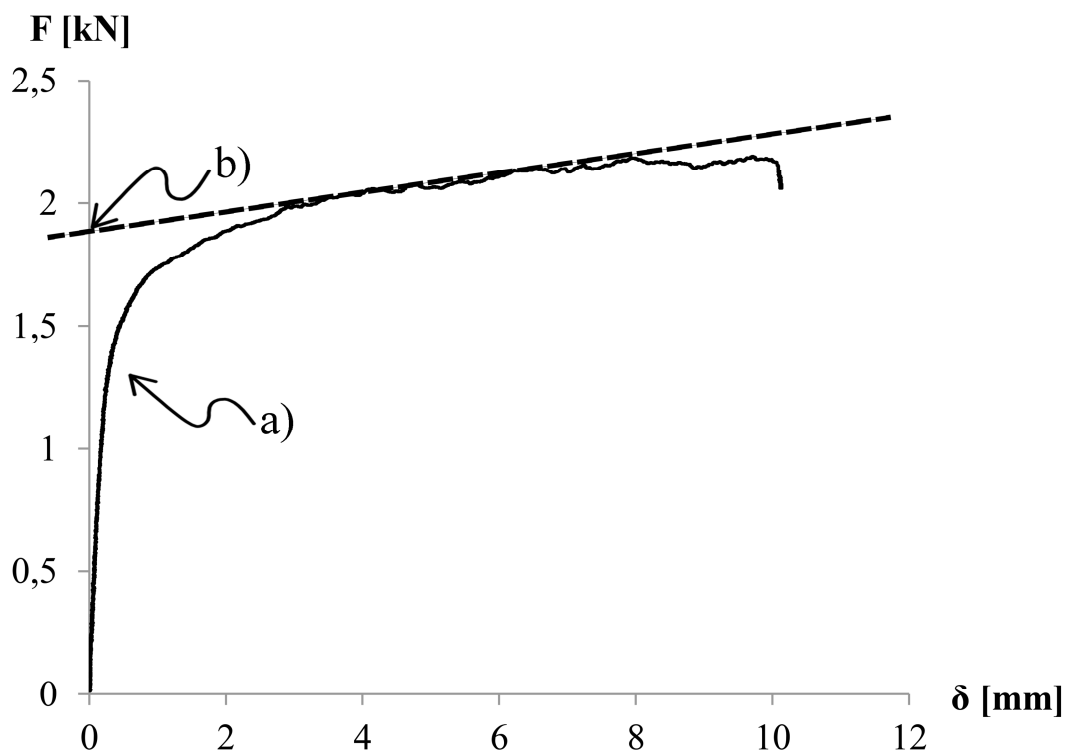
Det ble utført forsøk med både ukomprimerte og komprimerte omfyllingsmasser. I forsøkene hvor omfyllingsmassene rundt røret ble komprimert, ble komprimeringen utført i to

omganger. Første komprimering ble gjennomført med omfyllingsmasser opp til toppen av røret. Deretter ble det gjennomført en ny komprimering ved full overdekning. Det ble prøvd ut to ulike metoder for å komprimere massen. En metode var å slå med en slegge på en treplate lagt oppå massene. Den andre metoden var å gjennomføre komprimering ved fottråkk. Begge metoder ble gjentatt over hele flaten, frem og tilbake, to ganger. Det ble funnet ut at begge metoder for komprimering ga omtrent det samme resultatet. Det ble dermed besluttet å komprimere massene med fottråkk for resten av forsøkene, siden dette var en lettere og mindre tidkrevende fremgangsmåte.

I forsøkene hvor kassen ble løftet opp i helning, ble komprimeringen utført før kassen ble løftet.

4.6 Resultater fra modellforsøk

Under følger resultatene fra modellforsøkene. Resultatene fra forsøkene er fremstilt ved å hente ut to verdier fra hvert enkelt forsøk. Figur 4.10 viser et typisk last- og forskyvningsdiagram for modellforsøkene, hvor de to verdiene er illustrert.



Figur 4.10 Verdier hentet ut fra hvert modellforsøk

- Er kraften i den kurven går over fra lineær-elastisk oppførsel til permanent deformasjon. Det er på dette punktet man kan tenke seg at røret er ferdig med å tøyes, og rørenden nærmest aktuatoren begynner å gli. Heretter kalt begynnende rørglidning.

- b) Er kraften som bygger seg opp etter at hele røret har begynt å gli, heretter kalt kraften ved full rørglidning. Kraften leses av på last- og forskyvningsdiagrammet, der hvor en tangent, langs den delen av kurven hvor man ser for seg at hele røret glir, krysser y-aksen. Dette er kraften man kunne sett for seg at hadde blitt målt, ved første deformasjon av et uendelig stivt rør.

For fullstendige last- og forskyvningsdiagrammer, se vedlegg A.

4.6.1 Modellforsøk med horisontal kasse

Under følger resultatene fra modellforsøkene med horisontal kasse og rør med diameter 100 mm. Tabell 4 viser en oversikt over forsøkene som ble utført.

Tabell 4 Oversikt over modellforsøk, horisontal kasse og $d=100\text{mm}$

H/D	Komprimering	Antall forsøksserier
1.5	Nei	3
2.0	Nei	3
3.0	Nei	3
1.5	Ja	3
2.0	Ja	3

Ut fra tabellen ser man at det ikke ble utført forsøk med komprimerte omfyllingsmasser, for forsøkene med overdekning $H/D = 3.0$. Grunnen til at det ikke ble utført, er at det i feltforsøkene ikke er utført forsøk med samme overdekningsforhold med komprimerte masser.

Ukomprimerte omfyllingsmasser, $H/D = 1.5$

Tabell 5 viser kraften ved begynnende rørglidning, for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og $H/D=1.5$. Ved serie 1 stiger kraften fra første til andre forsøk, men er den samme ved andre og tredje forsøk. Serie 2 viser at kraften stiger for hvert forsøk. Ved serie 3 er kraften derimot større i første forsøk, enn i de to påfølgende forsøkene, hvor kraften er den samme for begge forsøkene.

Tabell 5 Kraft ved a), H/D=1.5 ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	1.20	1.40	1.40	
2	1.30	1.45	1.50	[kN]
3	1.50	1.45	1.45	
Gjennomsnitt	1.33	1.43	1.45	

Tabell 6 viser kraften ved full rørglidning for de samme forsøkene. Ved serie 1 stiger kraften fra første til andre forsøk, men er den samme for andre og tredje forsøk. Serie 2 viser at kraften stiger for hvert forsøk. Ved serie 3 stiger kraften fra første til andre forsøk, men reduseres fra andre til tredje forsøk.

Tabell 6 Kraft ved b), H/D=1.5 ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	1.45	1.65	1.65	
2	1.55	1.60	1.70	[kN]
3	1.70	1.75	1.70	
Gjennomsnitt	1.57	1.67	1.68	

Ukomprimerte omfyllingsmasser, H/D = 2.0

Tabell 7 viser kraften ved begynnende rørglidning, for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og H/D = 2.0. Ved serie 1 øker kraften fra første til andre forsøk, men er den samme ved andre og tredje forsøk. Serie 2 og 3 viser at kraften stiger for hvert forsøk.

Tabell 7 Kraft ved a), H/D=2.0 ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	2.00	2.25	2.25	
2	1.65	1.95	2.05	[kN]
3	1.55	1.85	1.90	
Gjennomsnitt	1.73	2.02	2.10	

Tabell 8 viser kraften ved full rørglidning, for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og $H/D = 2.0$. Alle seriene viser at kraften stiger fra første til andre forsøk. Fra andre til tredje forsøk øker kraften i serie 2 og 3, men er konstant i serie 1.

Tabell 8 Kraft ved b), $H/D=2.0$ ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	2.40	2.70	2.70	
2	2.20	2.40	2.50	[kN]
3	2.10	2.40	2.55	
Gjennomsnitt	2.23	2.50	2.58	

Sammenligner man gjennomsnittsverdiene i Tabell 7 og Tabell 8 med verdiene i Tabell 5 og Tabell 6 kan man se at kraften som skal til for å dra ut røret, øker med 30-50 %, i forhold til forsøkene med overdekning $H/D = 1.5$.

Ukomprimerte omfyllingsmasser, $H/D = 3.0$

Tabell 9 viser kraften ved begynnede rørglidning for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og $H/D = 3.0$. Kraften fra første til andre forsøk øker i alle tre seriene. Mellom andre og tredje forsøk er kraften den samme i serie 1 og 3, men øker i serie 2.

Tabell 9 Kraft ved a), $H/D=3.0$ ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	3.10	3.40	3.40	
2	2.60	3.05	3.40	[kN]
3	2.15	3.10	3.10	
Gjennomsnitt	2.62	3.18	3.30	

Tabell 10 viser kraften ved full rørglidning for forsøkene med overdekning $H/D = 3.0$ og ukomprimerte omfyllingsmasser. Fra første til andre forsøk stiger kraften i alle seriene. Mellom andre og tredje forsøk stiger kraften i serie 1 og 2, men reduseres i serie 3.

Tabell 10 Kraft ved b), H/D=3.0 ukomprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	3.75	4.00	4.15	
2	3.25	3.65	3.90	[kN]
3	2.85	3.60	3.55	
Gjennomsnitt	3.28	3.75	3.87	

Sammenligner man gjennomsnittsverdiene i Tabell 9 og Tabell 10 med verdiene i Tabell 7 og Tabell 8, ser man at kraften som skal til for å dra ut røret er større for overdekning $H/D = 3.0$ enn for overdekning $H/D = 2.0$. Kraften har steget med 50-60 % når overdekningen har økt.

Komprimerte omfyllingsmasser, H/D = 1.5

Tabell 11 viser kraften ved begynnende rørglidning for forsøkene med komprimerte omfyllingsmasser og $H/D = 1.5$. Kraften mellom forsøk 1 og 2 øker i alle seriene. Mellom forsøk 2 og 3 synker kraften i serie 2, men er den samme i serie 1 og 3.

Tabell 11 Kraft ved a), H/D=1.5 komprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	1.45	1.80	1.80	
2	1.45	1.70	1.65	[kN]
3	1.70	1.75	1.75	
Gjennomsnitt	1.53	1.75	1.73	

Tabell 12 viser kraften ved full rørglidning for forsøkene med overdekning $H/D = 1.5$ og komprimerte omfyllingsmasser. Kraften fra første til andre forsøk stiger i alle tre seriene. Mellom andre og tredje forsøk stiger kraften i serie 2 og 3, men er den er den samme i serie 1.

Tabell 12 Kraft ved b), H/D=1.5 komprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	1.95	2.05	2.15	
2	1.95	2.10	2.15	[kN]
3	2.00	2.10	2.10	
Gjennomsnitt	1.97	2.08	2.13	

Sammenligner man gjennomsnittsverdiene i Tabell 11 og Tabell 12 med verdiene i Tabell 5 og Tabell 6, ser man at kraften øker med 20-30 % når massene er komprimert.

Komprimerte omfyllingsmasser, H/D = 2.0

Tabell 13 viser kraften ved begynnende rørglidning for forsøkene med komprimerte omfyllingsmasser og H/D = 2.0. Kraften fra forsøk 1 til forsøk 2 øker i serie 1 og 2, men reduseres i serie 3. Fra forsøk 2 til forsøk 3, øker kraften i serie 1 og 2, men holder seg konstant i serie 3. Serie 3 skiller seg ut fordi kraften ved begynnende rørglidning er størst ved første forsøk.

Tabell 13 Kraft ved a), H/D=2.0 komprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	1.90	2.45	2.55	
2	2.30	2.65	2.70	[kN]
3	2.50	2.40	2.40	
Gjennomsnitt	2.23	2.50	2.55	

Tabell 14 viser kraften ved full rørglidning for forsøkene med komprimerte omfyllingsmasser og H/D = 2.0. I serie 1 og serie 2 øker kraften for hvert forsøk. I serie 3 er kraften den samme for alle forsøkene.

Tabell 14 Kraft ved b), H/D=2.0 komprimert

Forsøk	1	2	3	
Forsøksserie				
1	2.75	2.95	3.15	
2	2.90	3.05	3.20	[kN]
3	2.85	2.85	2.85	
Gjennomsnitt	2.83	2.95	3.07	

Sammenligner man gjennomsnittsverdiene i Tabell 13 og Tabell 14 med verdiene i Tabell 7 og Tabell 8 ser man at kraften for å dra ut røret øker med 20-30 % når massene er komprimert.

4.6.2 Modelforsøk med kasse i 35° helning

Under følger resultatene fra modelforsøk med kasse i 35° helning, og rør med $d = 100$ mm. Tabell 15 viser en oversikt over forsøkene som ble utført.

Tabell 15 Oversikt over modelforsøk, kasse i 35° og $d=100$ mm

H/D	Komprimering	Antall nedgravninger
1.5	Nei	1
2.0	Nei	1
3.0	Nei	1
1.5	Ja	1
2.0	Ja	1

Tabellen viser at det bare ble utført en nedgravning for hver overdekning. Grunnen til dette var tids- og arealbegrensninger i laboratoriet.

Ukomprimerte omfyllingsmasser, $H/D = 1.5$

Tabell 16 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og $H/D = 1.5$. Kraften ved både begynnende- og full rørglidning stiger fra første til andre forsøk, men holder seg konstant mellom andre og tredje forsøk. Kraften ved full rørglidning er den samme som kraften ved begynnende rørglidning i forsøk 2 og 3, noe som betyr at kurvene for disse to forsøkene indikerer en stiv oppførsel av systemet rør-pukk.

Tabell 16 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.35	0.60	0.60	
b)	0.45	0.60	0.60	[kN]

Hvis man sammenligner verdiene i Tabell 16 med gjennomsnittsverdiene fra Tabell 5 og Tabell 6, ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret er redusert når det er helning på kassen. Kraften er ca 30-40 % av hva den var når kassen lå horisontalt og med samme overdekning.

Ukomprimerte omfyllingsmasser, H/D = 2.0

Tabell 17 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og H/D = 2.0. Kraften ved både begynnende- og full rørglidning stiger for hvert forsøk.

Tabell 17 Kraft ved a) og b), H/D=2.0 ukomprimert, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.55	1.10	1.25	
b)	0.95	1.15	1.30	[kN]

Hvis man sammenligner verdiene i Tabell 17 med verdiene i Tabell 16, hvor kassen har samme helning, men overdekning H/D = 1.5, øker kraften som skal til for å trekke ut røret med 60-120 %.

Ukomprimerte omfyllingsmasser, H/D = 3.0

Tabell 18 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser og H/D = 3.0. Kraften ved både begynnende- og full rørglidning stiger for hvert forsøk.

Tabell 18 Kraft ved a) og b), H/D=3.0 ukomprimert, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.90	2.10	2.25	
b)	1.90	2.30	2.50	[kN]

Hvis man sammenligner verdiene i Tabell 18 med verdiene i Tabell 17 fra forsøket med samme helning, men overdekning H/D = 2.0, ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret øker med 60-100 %.

Komprimerte omfyllingsmasser, H/D = 1.5

Tabell 19 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene med komprimerte omfyllingsmasser og H/D = 1.5. Kraften ved begynnende rørglidning stiger for hvert forsøk. Kraften ved full rørglidning stiger fra første til andre forsøk, men holder seg konstant fra andre til tredje forsøk.

Tabell 19 Kraft ved a) og b), H/D=1.5 komprimert, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.60	0.95	1.00	
b)	0.95	1.05	1.05	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 19 med verdiene i Tabell 16 med samme overdekning, $H/D = 1.5$ og helning 35° , men ukomprimerte omfyllingsmasser, ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret øker med 60-110 %, når omfyllingsmassene er komprimert.

Komprimerte omfyllingsmasser, H/D = 2.0

Tabell 20 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning, for forsøkene med komprimerte omfyllingsmasser og $H/D = 2.0$. Kraften for både begynnende- og full rørglidning stiger for hvert forsøk.

Tabell 20 Kraft ved a) og b), H/D=2.0 komprimert, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.95	1.50	1.55	
b)	1.30	1.60	1.65	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 20 med verdiene i Tabell 17 med samme overdekning, $H/D = 2.0$ og helning 35° , men ukomprimerte omfyllingsmasser, ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret øker med 20-70 % når omfyllingsmassene er komprimert.

4.6.3 Modellforsøk med varierende helning

Under følger resultater fra modellforsøk med varierende helning på kassen og rør med diameter 100 mm. Overdekningen er konstant $H/D = 1.5$, og omfyllingsmassene er ikke komprimert. Tabell 21 viser en oversikt over forsøkene som ble utført.

Tabell 21 Oversikt over modellforsøk, varierende helning på kasse og $d=100\text{mm}$

Helning på kasse [°]	Antall nedgravninger
15	1
20	1
25	1
30	1

Forsøk med helning 15°

Tabell 22 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning, for forsøkene i 15° helning. Kraften for både begynnende- og full rørglidning, stiger for hvert forsøk.

Tabell 22 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 15°

Forsøk	1	2	3	
a)	1.00	1.20	1.30	
b)	1.25	1.40	1.45	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 22, med verdiene i Tabell 5 og Tabell 6, fra forsøkene med samme overdekning $H/D = 1.5$, men med kassen liggende horisontalt, ser man at kraften som skal til for å dra ut røret er redusert. Kraften er 80-90 % av hva den var når kassen lå horisontalt.

Forsøk med helning 20°

Tabell 23 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene i 20° helning. Kraften for både begynnende- og full rørglidning, stiger for hvert forsøk.

Tabell 23 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 20°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.65	1.05	1.15	
b)	0.85	1.15	1.25	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 23 med verdiene i Tabell 22, fra forsøkene med samme overdekning $H/D = 1.5$, men med 15° helning ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret er redusert . Kraften er 70-90 % av hva den var ved 15° helning.

Forsøk med helning 25°

Tabell 24 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning, for forsøkene i 25° helning. Kraften for både begynnende- og full rørglidning stiger for hvert forsøk.

Tabell 24 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 25°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.65	1.15	1.20	
b)	0.95	1.20	1.30	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 24, med verdiene i Tabell 23, fra forsøkene med samme overdekning, men med 20° helning, stiger faktisk kraften som skal til for å trekke ut røret ved alle forsøk. Unntaket er kraften ved begynnende rørglidning i forsøk 1 som er den samme i både 20 og 25 graders helning.

Forsøk med helning 30°

Tabell 25 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene i 30° helning. Fra forsøk 1 til 2 stiger kraften ved begynnende rørglidning, men er den samme ved forsøk 2 og forsøk 3. Den samme utviklingen vises for kraften ved full rørglidning.

Tabell 25 Kraft ved a) og b), $H/D=1.5$ ukomprimert, 30°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.75	1.00	1.00	
b)	0.95	1.05	1.05	[kN]

Sammenligner man verdiene i Tabell 25 med verdiene i Tabell 24, fra forsøkene med samme overdekning, men med 25° helning, ser man at kraften ved første forsøk ikke viser noen tendens til reduksjon. Ved andre og tredje forsøk er derimot kraften som skal til for å dra ut røret mindre enn for forsøkene i 25° helning.

4.6.4 Modellforsøk med stort rør

Under følger resultater fra modellforsøk med varierende helning på kassen og rør med diameter, $d = 300$ mm. Overdekningen er konstant, $H/D=1.5$, og omfyllingsmassen er ikke komprimert. Tabell 26 viser en oversikt over forsøkene som ble utført.

Tabell 26 Oversikt over modellforsøk, varierende helning på kasse og $d=300$ mm

H/D	Komprimering	Antall nedgravninger	Helning på kasse
1.5	Nei	1	0°
1.5	Nei	1	35°

Stort rør, $H/D = 1.5$, horisontal kasse

Tabell 27 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning for forsøkene hvor kassen ligger horisontalt. Kraften for både begynnende og full rørglidning øker fra forsøk til forsøk.

Tabell 27 Kraft ved a) og b) med stort rør, $H/D=1.5$, 0°

Forsøk	1	2	3	
a)	4.20	5.90	6.40	
b)	6.00	6.40	7.20	[kN]

Hvis man sammenligner verdiene i Tabell 27 med verdien i Tabell 5 og Tabell 6, fra forsøkene samme overdekningsforhold $H/D = 1.5$, men med rør $d = 100$ mm, ser man at kraften som skal til for å trekke ut røret øker betydelig. Kraften er 3-4 ganger så stor som for røret med $d = 100$ mm.

Stort rør, $H/D=1.5$, i 35° helning

Tabell 28 viser kraften ved begynnende- og full rørglidning, for forsøkene i 35° helning. Kraften ved både begynnende og full rørglidning stiger for hvert forsøk.

Tabell 28 Kraft ved a) og b) med stort rør, $H/D=1.5$, 35°

Forsøk	1	2	3	
a)	0.8	3.00	4.00	
b)	1.60	3.20	4.30	[kN]

Sammenligner man resultatene fra Tabell 28 med resultatene fra Tabell 27, for forsøkene med rør, $d = 300$ mm, men med kassen horisontalt, ser man at kraften som skal til for å trekke ut

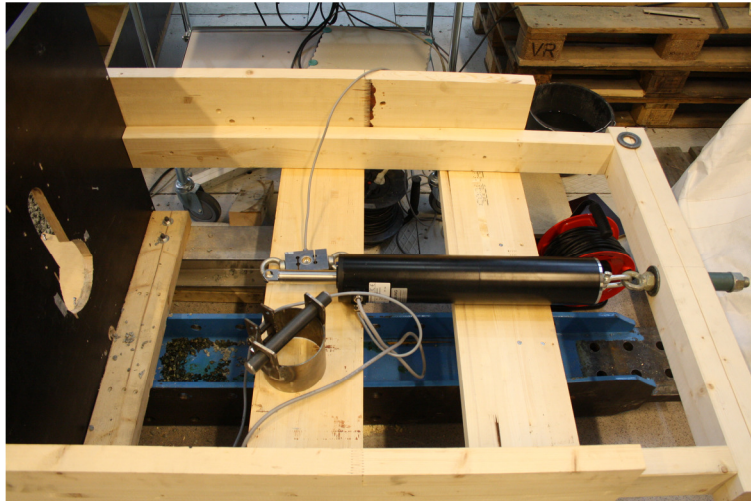
røret er betydelig redusert. Kraften ved både begynnende og full rørglidning for første forsøk er 20-30 % av hva den var med kassen horisontalt. Ved andre og tredje forsøk er kraften 50-60 % av hva den var med kassen horisontalt.

4.7 Deformasjon i forsøksrigg

Videre presenteres beregninger av deformasjon på forsøksrigg og rør under forsøkene.

4.7.1 Deformasjon av bjelke

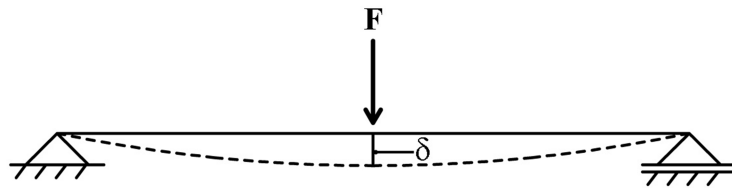
Oppsettet av riggen aktuatoren lå på, gjorde at den bakre bjelken ble belastet med samme kraft som aktuatoren påførte røret til enhver tid (Figur 4.11). Kraften førte til en deformasjon av bjelken i retning mot kassen.



Figur 4.11 Oppsett av rigg for aktuator

Bjelken er satt sammen av to 48 x 98 mm planker. Plankene er skrudd sammen på tre steder, så hele bjelken, som da får en størrelse på $b \times h = 96 \times 98$ mm, kan antas å virke som ett legeme.

Deformasjon (δ) av trebjelken i bakre kant, kan forenklet betraktes som nedbøyning av en fritt opplagt bjelke (Figur 4.12). Bjelken blir påvirket av kraften (F), som aktuatoren påfører røret.



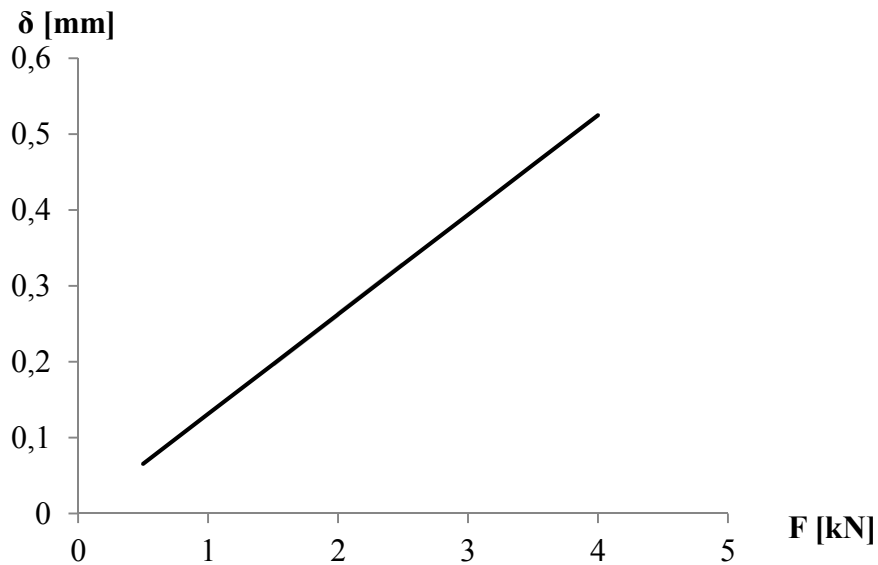
Figur 4.12 Fritt opplagt bjelke påvirket av kraft fra aktuator

Deformasjonen regnes ut etter følgende formel:

$$\delta = \frac{F * L^3}{48EI}$$

Der hvor E er E-modulen til bjelken, I er annet arealmoment til bjelken og L er lengden til bjelken (Irgens, 1999).

Figur 4.13 viser deformasjon av bjelken ved varierende lastpåføring fra aktuatoren.



Figur 4.13 Deformasjon av bjelke ved varierende lastpåføring fra aktuator

Figuren viser at deformasjonen varierer fra ca 0.1 mm med en last på 1 kN til ca 0.5 mm ved en last på 4 kN.

4.7.2 Deformasjon av rør

Når røret blir påført en ytre kraft i aksial retning fra aktuatoren, blir røret deformert. Deformasjonen skjer ved at det oppstår spenninger aksielt i rørveggen. Strekkspenningene fører til at røret vil tøyes aksielt, noe som kan antas skjer i henhold til Hookes lov:

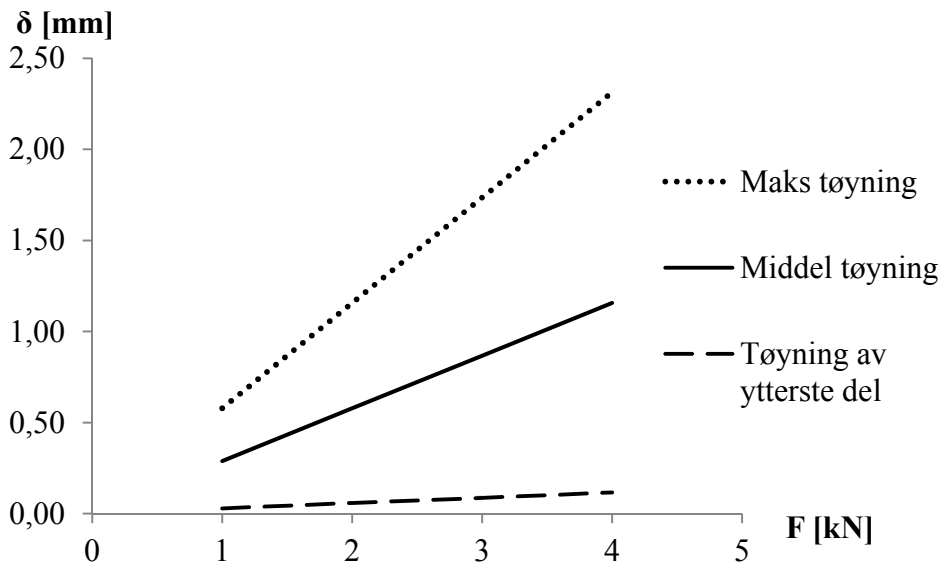
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

E er da den askielle E-modulen. Spenningen (σ) er kraften som blir påført røret dividert på arealet av rørveggen

Det er usikkert hvor mye av røret som tøyes før røret glir ut av omfyllingsmassene. Det blir her presentert tre ulike, forenklete scenarier for hvordan tøyningen kan foregå:

- 1) Det antas full tøying, konstant over hele rørlengden, kalt maks tøying.
- 2) Tøyningen er antatt å være lineært synkende, fra full tøying i enden hvor røret er festet til aktuatoren, til ingen tøying i motsatt ende av røret, kalt middel tøying.
- 3) Det antas at røret kun tøyes i området som stikker utenfor kassen, på samme side som aktuatoren, kalt tøying av ytterste del.

Tøyningen for de tre ulike scenarioene er vist i Figur 4.14. Det er bare regnet ut tøying for røret med $d = 100$ mm.



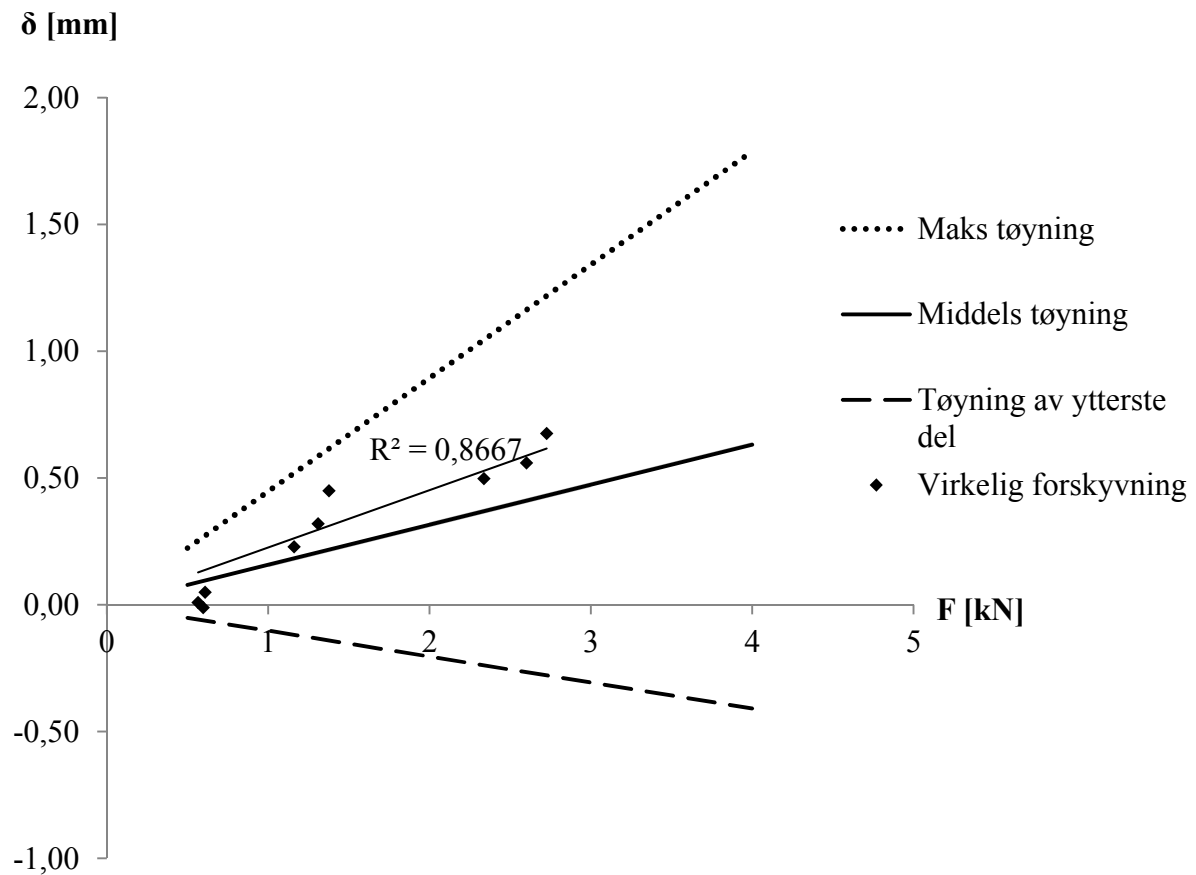
Figur 4.14 Tøying av røret ved tre ulike scenarier

Ved maks tøying øker deformasjonen fra ca 0.5 mm ved 1 kN til ca 2.5 mm ved 4 kN. Ved middel tøying øker deformasjonen fra 0.3 mm ved 1 kN til ca 1.2 mm ved 4 kN. Ved tøying av ytterste del er deformasjonen ca 0.1 mm ved 4 kN.

4.7.3 Kombinasjon av rørtøyning og bjelkeformasjon

Deformasjonene fra bjelken vil føre til at forskyvningen som blir målt av forskyvningsmåleren reduseres. Tøyning av røret skjer i motsatt retning og vil føre til at forskyvningen økes. Denne kombinasjonen av bjelkeformasjonen og de forskjellige scenarioene for rørtøyning er vist i Figur 4.15.

Under forsøkene med kassen i 35° helning, ble forskyvningen under avlastning av røret, etter røret var trukket ut, logget. Det viste seg at forskyvningen som forskyvningsmåleren målte ble redusert når røret ble avlastet. Figuren viser også reduksjonen av forskyvningen som funksjon av lastnivået før røret ble avlastet.



Figur 4.15 Kombinasjon av bjelkeformasjon og de tre ulike scenarioene for rørtøyning sammen med målt deformasjon

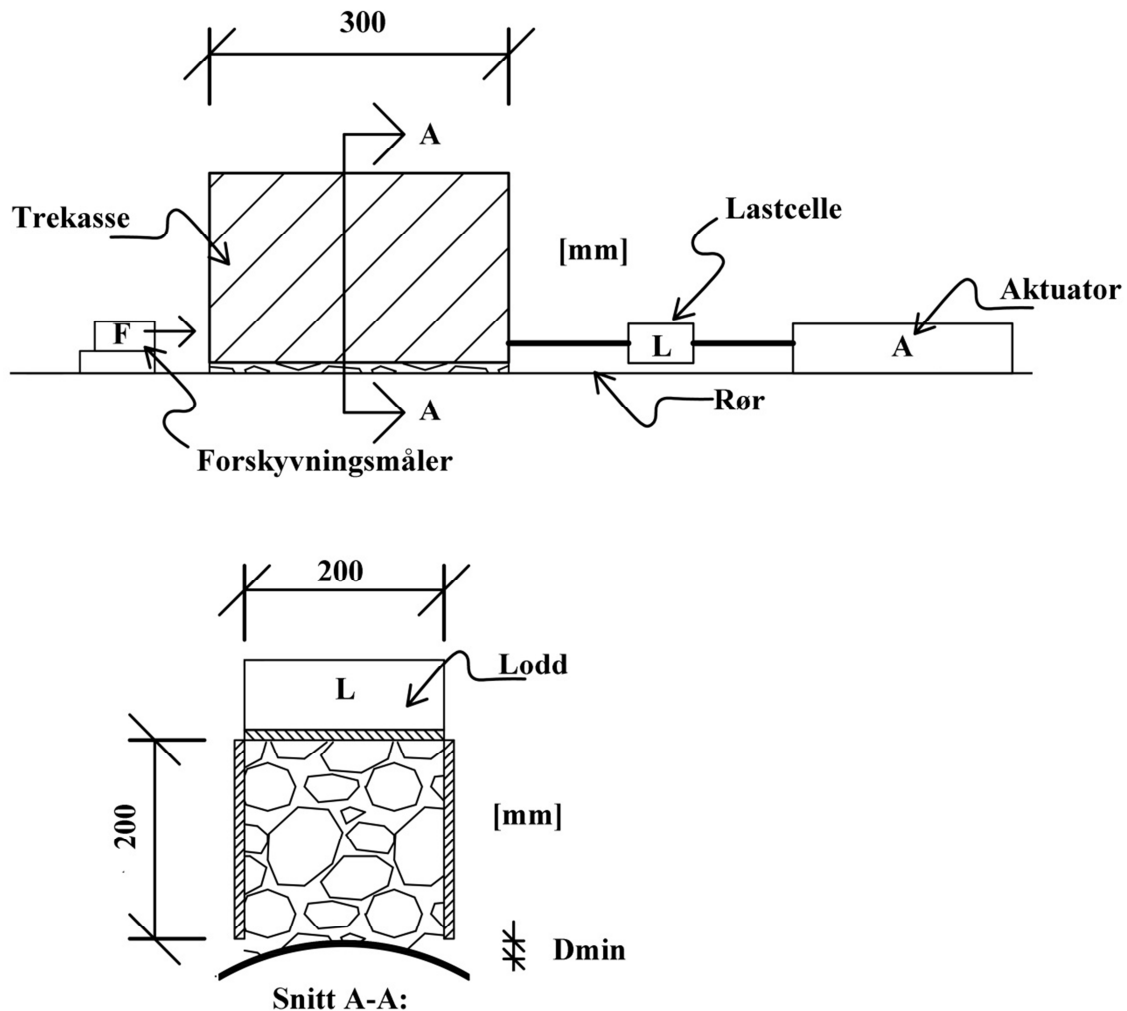
Figuren viser at røret tøytes mer enn bjelken deformeres. Figuren viser også at den målte deformasjonen hovedsaklig ligger i området mellom scenarioene for maks og middels rørtøyning. Ut fra resultatene kan det, med rimelig sikkerhet, konstateres at røret ikke tøytes i kun ytterste del.

5. Friksjonsforsøk

Friksjonsforsøkene er en videreføring av arbeidet utført av Bossel og Haugen (2012). Grunnen til at arbeidet ble videreført til denne oppgaven var at man ville ha mer nøyaktige data, som ga et bedre bilde av forholdet mellom hvile- og glidefriksjon. Bossel og Haugen (2012) anbefalte i sin oppgave at forsøkene burde utføres med lastcelle og forskyvningsmåler, samt en anordning for å trekke forsøkskassen med jevn hastighet.

5.1 Forsøksoppsett

Forsøksoppsettet og mål på kassen er vist i Figur 5.1. Oppsettet som er valgt er det samme som under tilsvarende forsøk utført av Bossel og Haugen (2012), med enkelte justeringer.



Figur 5.1 Oppsett av friksjonsforsøk

- I stedet for å bruke en håndsveiv (med vaier) er det benyttet en aktuator som kan påføre kassen forskyvninger med en jevn hastighet. Aktuatoren er boltet fast til røret.
- Mellom aktuatorarmen og selve kassen er det montert en lastcelle for å måle kraften aktuatoren påfører kassen.
- Gjengestangen gjennom kassen er flyttet litt opp på grunn av aktuatorarmens høyde over røret. Aktuatoren påfører dermed forskyvningen normalt på kassen.
- Det er plassert to plater inntil kassen for å unngå at kassen roterer sideveis. Platene er dekket med teflonpapir for å gi minst mulig friksjon mellom kassen og platene, som vist i Figur 5.2.
- Forskyvningsmåleren er plassert bak kassen.
- For å simulere større overdekninger er det benyttet vekter av ulik tyngde. Vektene er plassert på et lokk på toppen av kassen.



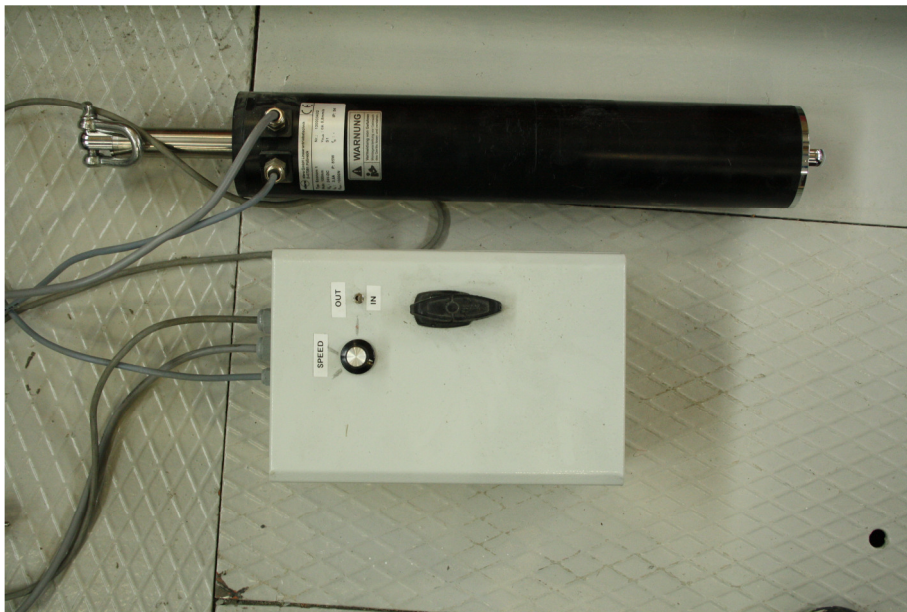
Figur 5.2 Oppsett av kasse for friksjonsforsøk

5.2 Utstyr

I det følgende presenteres en oversikt over utstyret benyttet under forsøkene.

5.2.1 Aktuator

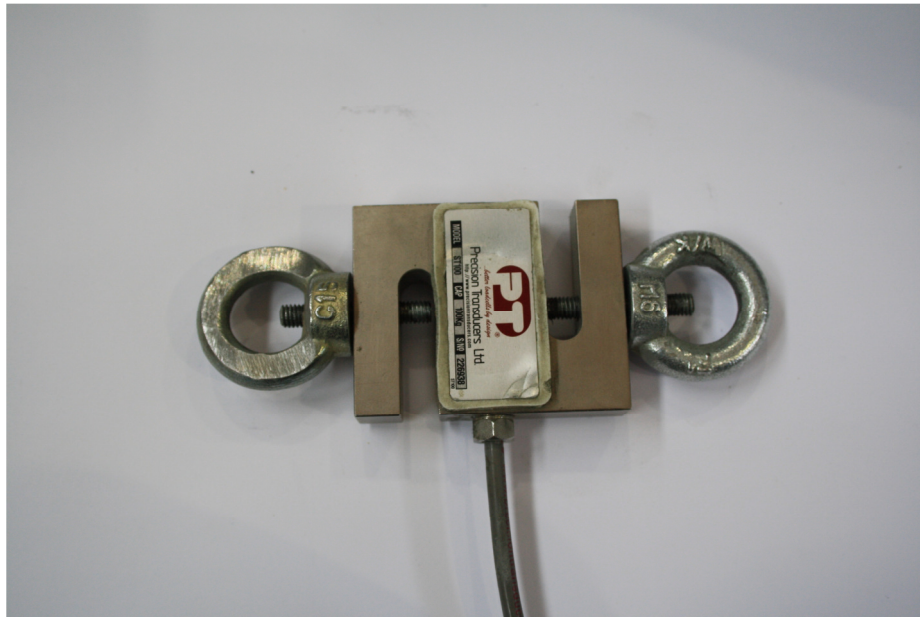
Til forsøkene er det brukt en modifisert, elektrisk, lineær aktuator med typenavn Econom 1 (Figur 5.3), produsert av Elero. Aktuatoren har en kapasitet på 10 kN, og påfører en deformasjon med hastighet ned mot 1 mm/min, avhengig av drakraft.



Figur 5.3 Aktuator benyttet for trekking av kasse

5.2.2 Lastcelle

Det er brukt en lastcelle for å måle lasten aktuatoren påfører kassen (Figur 5.4). Lastcellen har en kapasitet på 1000 N og registrerer last ned til 0.01 N. Unøyaktigheten til lastcellen er garantert av Institutt for konstruksjonsteknikk til å være mindre enn 2 %, men er erfaringsmessig langt mindre enn denne verdien.



Figur 5.4 Lastcelle benyttet i friksjonsforsøk

5.2.3 Forskyvningsmåler

For å logge forskyvningen av kassen er det benyttet en optisk forskyvningsmåler av type ODS 70, produsert av DSE (Figur 5.5). Forskyvningsmåleren har et fokuspunkt 70 mm fra sin overflate og måler forskyvning i området 70 ± 20 mm.



Figur 5.5 Forskyvningsmåler benyttet i friksjonsforsøk

5.2.4 Utstyr for logging av data

For logging av kraft og forskyvning under forsøkene ble det benyttet en PC med Catman Easy AP programvare og en Spider 8 måleforsterker. Dataene ble logget med en frekvens på 50 målinger pr. sekund (50 Hz).

5.2.5 Egenskaper til rør

Røret som er benyttet er et GRP- rør, produsert av Flowtite Technology AS. Røret er det samme som ble benyttet til tilsvarende forsøk av Bossel og Haugen (2012). Egenskapene til røret er oppsummert i Tabell 29.

Tabell 29 Geometri- og materialdata GRP-rør (Bårgard og Bergsager, 2012)

DN500 PN6		
Ytre diameter	D [mm]	530.1
Godstykkelse	e [mm]	8.7
Lengde rør kontinuerlig	L [m]	6.0
Strekkfasthet	f [N/mm ²]	29.2
Tverrkontraksjon	ν	0.23
Masse	m_r [kg/m]	29.2
Aksiell E- modul	E [N/mm ²]	6100

For å sammenligne overflaten til røret med de to rørene benyttet under modellforsøkene, ble det utført ruhetsmålinger med et profilometer.

Det ble utført tre målinger av ruheten til røret. Midlere profilhøyde, R_a , fra de tre målingene er vist i Tabell 30.

Tabell 30 Ruhetsmålinger for rør

Måling	R_a D=500 [μm]
1	2.72
2	2.31
3	2.62
Gjennomsnitt	2.55

Tabellen viser at røret har en midlere profilhøyde på 2.5 mikrometer (10^{-6} m).

5.2.6 Egenskaper til pukk

Det er utført forsøk med to ulike typer pukk. Den ene pukken er den samme som ble benyttet av Bårgard og Bergsager (2012) under deres feltforsøk, og er den samme pukken Bossel og Haugen (2012) brukte under tilsvarende friksjonsforsøk. Videre omtales denne som «Pukktype 1».

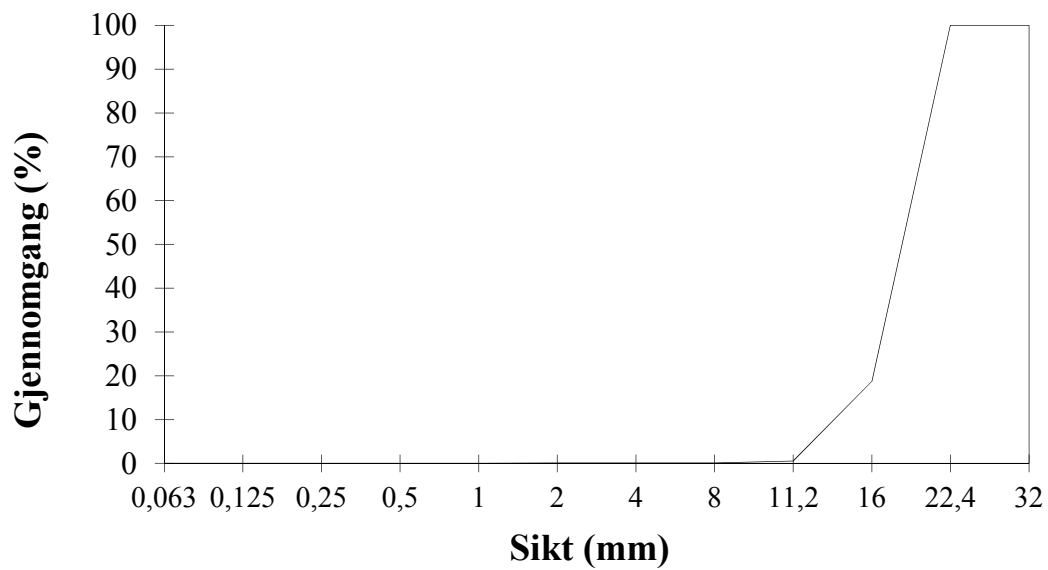
Den andre typen pukk, er den pukken Bossel og Haugen (2012) benyttet i deres feltforsøk. Denne pukken vil videre bli omtalt som «Pukktype 2».

Figur 5.6 viser kornformen til pukktype 1 og pukktype 2.



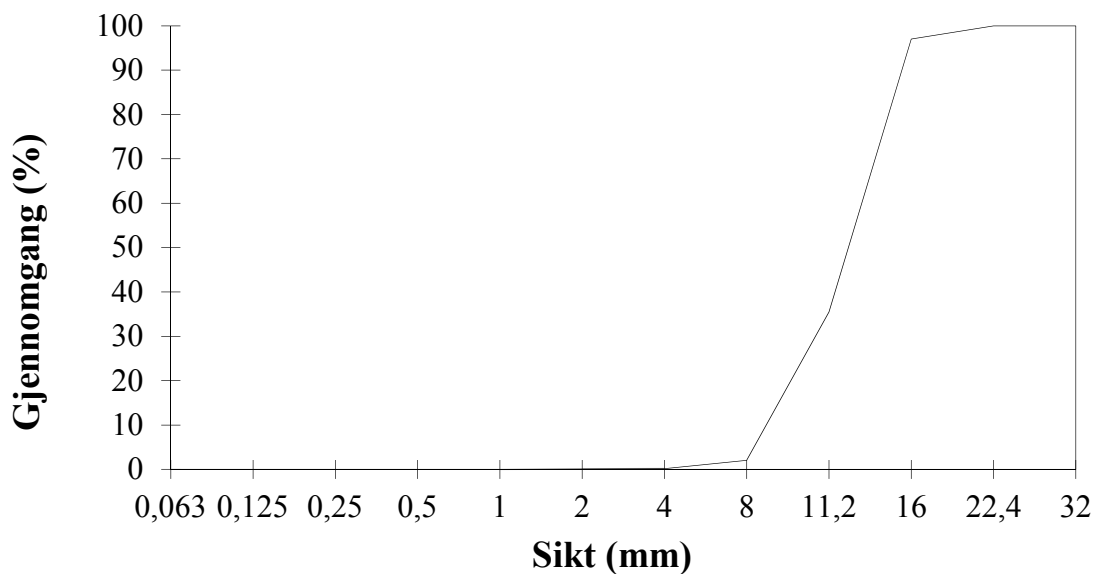
Figur 5.6 Detalj kornform, pukktype 1 og 2 (Bossel og Haugen, 2012)

Det ble tatt sikteprøver av begge pukktyper. Siktingen ble utført med et siktesett med siktestørrelser fra 2 til 16 mm. Først ble det tatt ut to representative prøver på 10 kg fra hver pukktype. Prøvene ble ansett som tørre ettersom de hadde ligget i laboratoriet over et halvt års tid. Det ble så gjennomført to sikteprøver med 5 kg av hver av de to opprinnelige prøvene. Gjennomsnittet av de to prøvene for hver pukktype er presentert i Figur 5.7 og Figur 5.8, hvor prosentvis gjennomgang er vist som funksjon av tilhørende siktestørrelse.



Figur 5.7 Siktekurve, pukktpe 1

Figur 5.7 viser siktekurven til pukktpe 1. Diagrammet viser at hovedfraksjonen av pukken er større enn 16 mm. Det er ikke mulig å si noe om fordelingen av fraksjonene større enn 16 mm, siden 16 mm var den største sikten som ble benyttet under sikteprøven.



Figur 5.8 Siktekurve, pukktpe 2

Figur 5.8 viser siktekurven til pukktipe 2. Diagrammet viser at hovedfraksjonen av pukken er 8-16 mm.

Sammenligner man Figur 5.7 med Figur 5.8 ser man at pukktipe 1 er noe større enn pukktipe 2. Begge pukktipene ble bestilt som 4/16 mm av Franzefoss Pukk AS i forbindelse med feltforsøk. Siktekurvene kan tyde på at det har vært enkelte variasjoner i leveransene av pukken.

5.3 Fremgangsmåte for forsøk

Under forsøkene ble kassen først løftet opp slik at det bare var pukken og rørets overflate som var i kontakt med hverandre. Det ble utført forsøk både med ukomprimerte og komprimerte masser i kassen. Formålet med å komprimere massene er å se på komprimeringens innvirkning på friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasse.

Kassen ble gradvis påført en kraft fra aktuatoren helt til den begynte å gli. Lastpåføringen fortsatte helt til kassen var trukket 10 mm langs røret. Dette ble gjentatt tre ganger for hver gang kassen ble tømt og fylt på nytt. I det følgende vil en tømning og ny fylling av kassen være definert som en forsøksserie. Hver trekking av kassen er definert som et forsøk.

Kassen ble i tillegg belastet med ekstra lodd for hver forsøksserie, for å kunne se på hvordan friksjonen utvikler seg med økende normalkraft. Vekten av loddene ble valgt for å simulere realistiske overdekninger for røret i felt.

En oversikt over gjennomførte forsøk er vist i Tabell 31.

Tabell 31 Oversikt over utførte friksjonsforsøk

Pukk	Ekstra last [kg]	Komprimering	Antall forsøksserier	Antall forsøk i hver serie	Tilsvarende H/D i felt
Type 1	0	Nei	1	3	0.99
	40	Nei	1	3	1.88
	80	Nei	1	3	2.76
	0	Ja	1	3	0.99
	40	Ja	1	3	1.88
	80	Ja	1	3	2.76
Type 2	0	Nei	1	3	0.99
	40	Nei	1	3	1.88
	80	Nei	1	3	2.76
	0	Ja	1	3	0.99
	40	Ja	1	3	1.88
	80	Ja	1	3	2.76

5.3.1 Friksjonsforsøk med ukomprimerte masser

For de ukomprimerte forsøkene med pukktipe 1 ble kassen fylt opp til toppen for hvert forsøk. Det betyr at vekten av pukken i kassen var bestemt ut fra kassens volum og pukkens romvekt. Det viste seg at dette var et noe usikkert mål. Det ble derfor bestemt å veie pukken før hvert forsøk, slik at man alltid hadde samme vekt av pukk i kassen under hvert forsøk, for forsøkene med pukktipe 2.

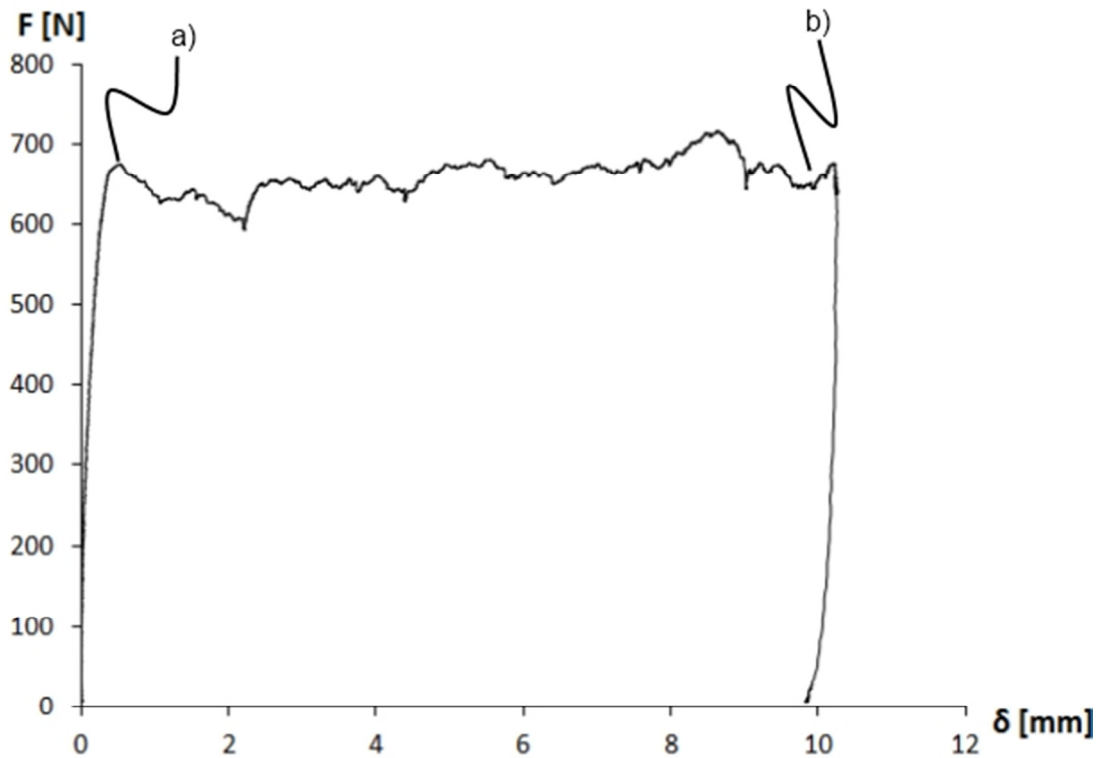
5.3.2 Friksjonsforsøk med komprimerte masser

Forsøkene med komprimerte masser ble utført på samme måte som forsøkene med ukomprimerte masser. Massene ble veid opp for hvert forsøk, slik at vekten av pukken i kassen var den samme for alle forsøk.

For å komprimere massen ble det lagt et lokk oppå pukken og banket bestemt med en hammer 20 ganger. Dette ble utført i to omganger, ved halvfull- og full kasse. Fremgangsmåten er den samme som ble benyttet av Bossel og Haugen (2012).

5.4 Resultater fra forsøk

I det følgende blir resultatene fra forsøkene presentert. Det er hentet ut to ulike resultater fra last- og forskyvningsdiagrammet for hvert forsøk. De to resultatene er illustrert i Figur 5.9.



Figur 5.9 Verdier hentet ut fra hvert friksjonsforsøk

- 1) Er kraften som er påført kassen i det den begynner å gli langs røret (Punkt a) i Figur 5.9), heretter kalt F_b .
- 2) Er den gjennomsnittlige kraften som er påført kassen mellom punkt a) og punkt b). Punkt b) (Figur 5.9) er det lastnivået hvor påføringen av deformasjon på kassen er stoppet (lastnivå ved 10 mm deformasjon), heretter kalt F_g .

Resultatene i det etterfølgende er gjengitt som gjennomsnittet av de tre forsøkene i hver forsøksserie. F_b og F_g er antatt å tilsvare motstanden mot bevegelse, altså friksjonskraften mellom rør og omfyllingsmasse. En fullstendig oversikt over last- og forskyvningsdiagrammene for alle forsøk kan finnes i vedlegg B.

5.4.1 Pukktype 1, forsøk med ukomprimerte masser

Resultatene fra forsøkene med ukomprimerte masser og pukktpe 1 er oppsummert i Tabell 32. Tabellen viser forsøksserien, normalkraft mot røret og friksjonskoeffisientene (μ), tilhørende gjennomsnittsverdiene av F_b og F_g .

Tabell 32 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 1 og ukomprimerte masser

Forsøksserie	Normalkraft,		μ	$\overline{F_g}$ [N]	μ
	N [N]	$\overline{F_b}$ [N]			
1	218	127	0.585	140	0.641
2	621	340	0.548	386	0.621
3	1013	565	0.558	582	0.574
Gjennomsnitt			0.563		0.612
Standardavvik			0.019		0.034

Resultatene viser at kraften ved begynnende glidning generelt ligger noe lavere enn den gjennomsnittlige påførte kraften. Det samme kan man også se ut fra gjennomsnittsverdiene for friksjonskoeffisienten (μ), som er $\mu = 0.56 \pm 0.02$ ved begynnende glidning og $\mu = 0.61 \pm 0.03$ for gjennomsnittlig påført kraft. Her er 0.02 og 0.03 standardavviket for friksjonskoeffisienten ved henholdsvis begynnende glidning og gjennomsnittlig påført kraft. For den gjennomsnittlige påførte kraften reduseres friksjonskoeffisienten når normalkraften øker. For kraften ved begynnende glidning er det derimot liten variasjon i friksjonskoeffisienten når normalkraften øker.

5.4.2 Pukktype 1, forsøk med komprimerte masser

Resultatene fra forsøkene med komprimerte masser og pukktpe 1 er oppsummert i Tabell 33.

Tabell 33 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 1 og komprimerte masser

Forsøksserie	Normalkraft,		μ	$\overline{F_g}$ [N]	μ
	N [N]	$\overline{F_b}$ [N]			
1	231	124	0.537	130	0.564
2	624	408	0.654	395	0.633
3	1018	650	0.639	666	0.654
Gjennomsnitt			0.610		0.617
Standardavvik			0.064		0.047

Resultatene viser en friksjonskoeffisient på $\mu = 0.61 \pm 0.06$ ved begynnende glidning og $\mu = 0.62 \pm 0.05$ ved gjennomsnittlig påført kraft.

Sammenligner man Tabell 32 med Tabell 33 kan man se at den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten øker ved begynnende glidning når massen er komprimert.

5.4.3 Pukktype 2, forsøk med ukomprimerte masser

Resultatene fra forsøkene med ukomprimerte masser og pukktpe 2 er oppsummert i Tabell 34.

Tabell 34 Resultater fra friksjonsforsøk med pukktpe 2 og ukomprimerte masser

Forsøksserie	Normalkraft,		μ	\overline{F}_g [N]	μ
	N [N]	\overline{F}_b [N]			
1	171	130	0.761	131	0.768
2	610	387	0.634	398	0.653
3	1003	636	0.634	646	0.644
Gjennomsnitt			0.676		0.688
Standardavvik			0.073		0.069

Resultatene viser en friksjonskoeffisient på $\mu = 0.68 \pm 0.07$ ved begynnende glidning og $\mu = 0.69 \pm 0.07$ ved gjennomsnittlig påført kraft.

Sammenligner man Tabell 32 med Tabell 34 kan man se at den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten øker både ved begynnende glidning og ved gjennomsnittlig påført kraft for pukktpe 2, i forhold til pukktpe 1.

5.4.4 Pukktype 2, forsøk med komprimerte masser

Resultatene fra de forsøkene med komprimerte masser og pukktpe 2 er oppsummert i Tabell 35.

Tabell 35 Resultater fra forsøkene med pukktpe 2 og komprimerte masser

Forsøksserie	Normalkraft,		μ	\overline{F}_g [N]	μ
	N [N]	\overline{F}_b [N]			
1	171	140	0.818	137	0.801
2	610	383	0.628	386	0.633
3	1003	654	0.652	661	0.659
Gjennomsnitt			0.699		0.698
Standardavvik			0.104		0.091

Resultatene viser en friksjonskoeffisient på $\mu = 0.70 \pm 0.10$ ved begynnende glidning og $\mu = 0.70 \pm 0.09$ ved gjennomsnittlig påført kraft.

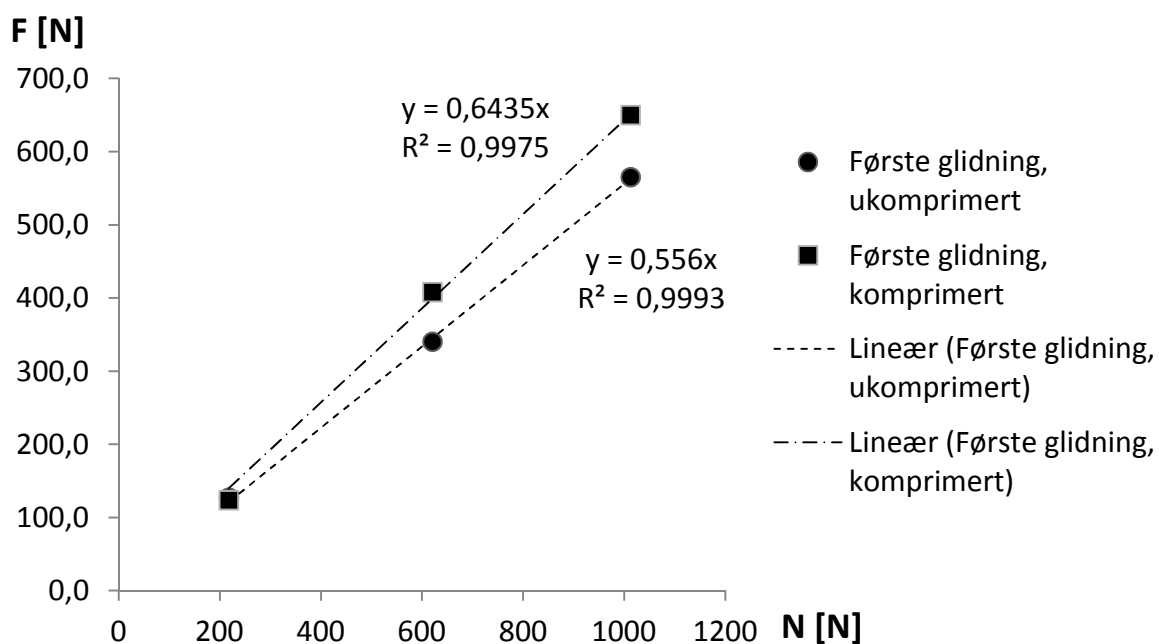
Sammenligner man Tabell 33 med Tabell 35 kan man se at den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten ikke øker i like stor grad for pukktpe 2 når massene er komprimert, slik som resultatene viste for pukktpe 1.

5.4.5 Grafisk sammenligning av resultatene

For å se hvordan friksjonskraften varierer med økende overdekning er resultatene for de to ulike pukktypene fremstilt grafisk.

Figur 5.10 til Figur 5.13 viser friksjonskraften som funksjon av normalkraften for de ulike pukktypene. For hver figur er det lagt på to lineære trendlinjer, en for komprimerte forsøk og en for ukomprimerte forsøk. Trendlinjene er bestemt til å krysse origo, ettersom pukken er antatt å være ikke- kohesiv. Stigningstallet til trendlinjene vil representere verdien for friksjonskoeffisientene.

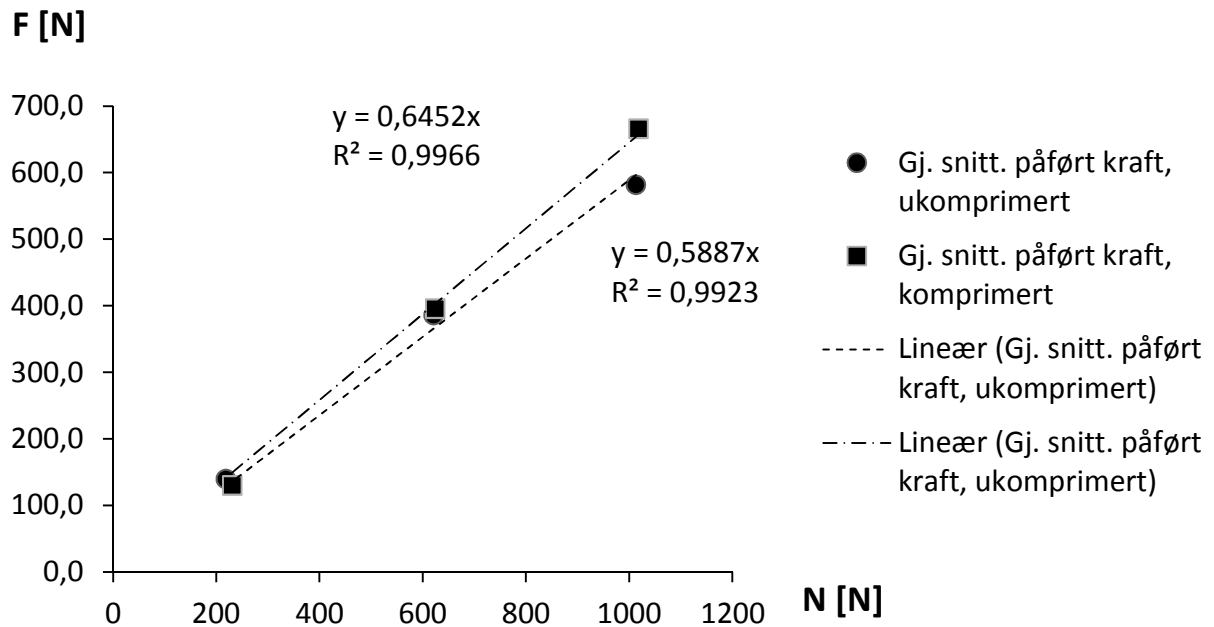
Pukktype 1, første glidning



Figur 5.10 Friksjonskraft ved første glidning mot normalkraft, pukktipe 1

Trendlinjene fra Figur 5.10 indikerer en god lineær sammenheng mellom friksjonskraften og normalkraften både for komprimerte og ukomprimerte masser. Den lineære sammenhengen bekreftes av R^2 - verdiene mellom trendlinjene og forsøksresultatene, som er svært nær 1 både for komprimerte og ukomprimerte masser. Stigningstallet for trendlinjene tilsier en friksjonskoeffisient for ukomprimerte masser, $\mu = 0.56$, og for komprimerte masser, $\mu = 0.64$.

Pukktype 1, gjennomsnittlig påført kraft

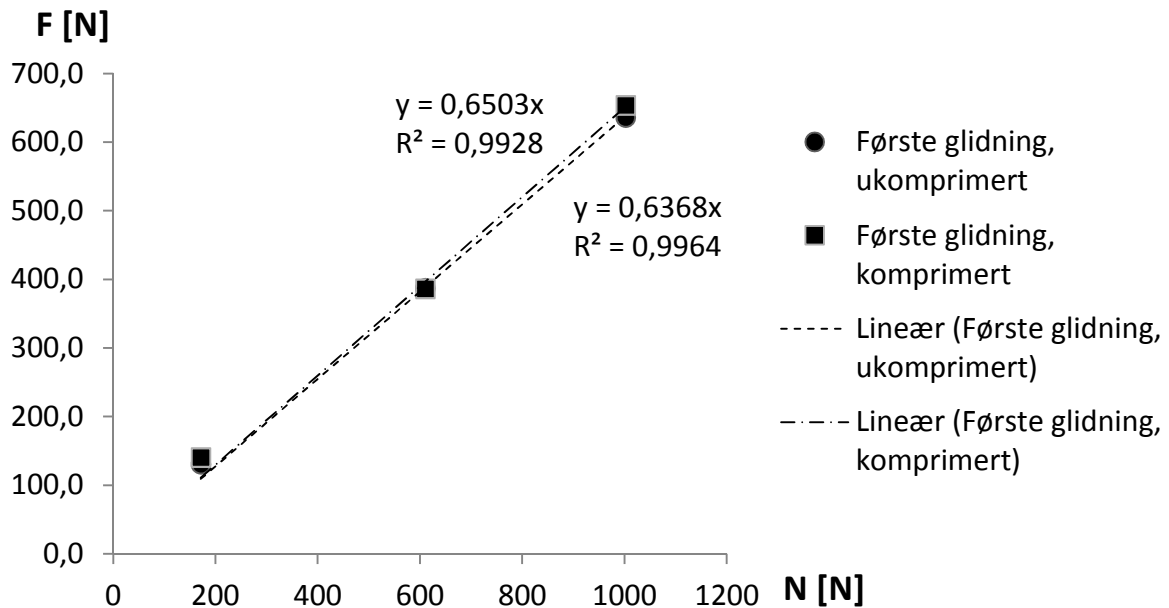


Figur 5.11 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 1

Trendlinjene fra Figur 5.11 indikerer en god lineær sammenheng mellom friksjonskraften og normalkraften både for komprimerte og ukomprimerte masser. Den lineære sammenhengen bekreftes av R^2 - verdiene mellom trendlinjene og forsøksresultatene, som er svært nær 1 både for komprimerte og ukomprimerte masser. Stigningstallet for trendlinjene tilsier en friksjonskoeffisient for ukomprimerte masser, $\mu = 0.59$, og for komprimerte masser, $\mu = 0.65$.

Sammenligner man Figur 5.10 med Figur 5.11 ser man at friksjonskoeffisienten øker for gjennomsnittlig påført kraft sammenlignet med friksjonskoeffisienten for begynnende glidning.

Pukktype 2, første glidning

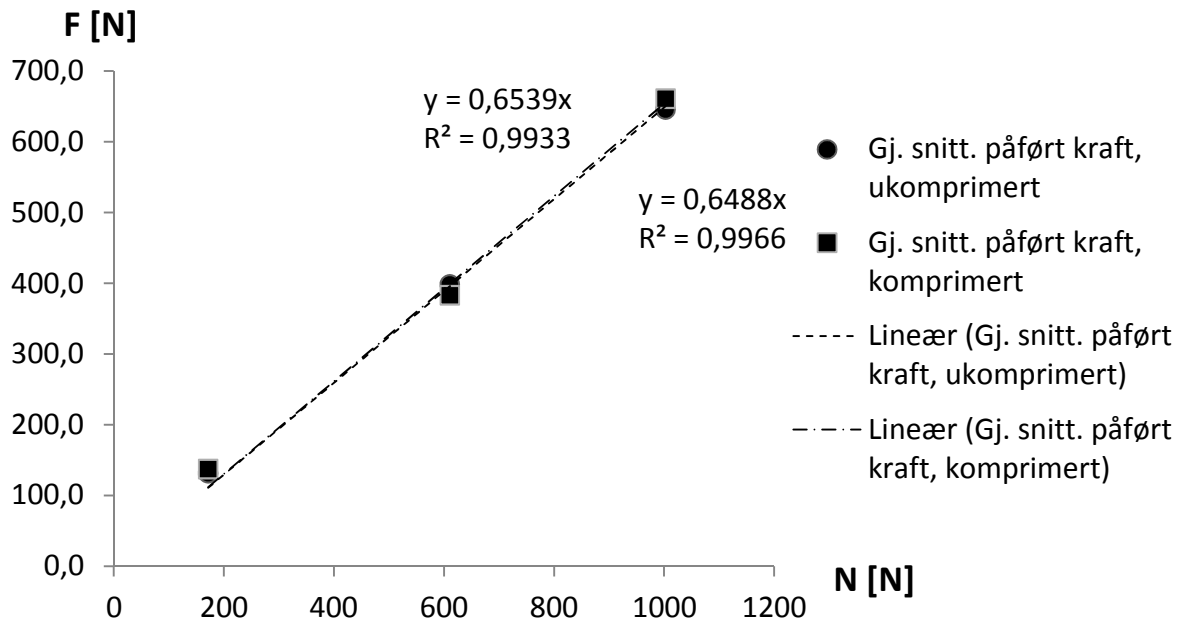


Figur 5.12 Friksjonskraft ved første glidning mot normalkraft, pukktype 2

Trendlinjene fra Figur 5.12 indikerer en god lineær sammenheng mellom friksjonskraften og normalkraften både for komprimerte og ukomprimerte masser. Den lineære sammenhengen bekreftes av R^2 - verdiene mellom trendlinjene og forsøksresultatene, som er svært nær 1 både for komprimerte og ukomprimerte masser. Stigningstallet for trendlinjene tilsier en friksjonskoeffisient for ukomprimerte masser, $\mu = 0.64$, og for komprimerte masser, $\mu = 0.65$.

Sammenligner man Figur 5.10 med Figur 5.12 ser man at friksjonskoeffisienten ved første glidning er høyere for pukktype 2 sammenlignet med pukktype 1.

Pukktype 2, gjennomsnittlig påført kraft



Figur 5.13 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktpe 2

Trendlinjene fra Figur 5.13 indikerer en god lineær sammenheng mellom friksjonskraften og normalkraften både for komprimerte og ukomprimerte masser. Den lineære sammenhengen bekreftes av R^2 - verdiene mellom trendlinjene og forsøksresultatene, som er svært nær 1 både for komprimerte og ukomprimerte masser. Stigningstallet for trendlinjene tilsier en friksjonskoeffisient for ukomprimerte masser, $\mu = 0.65$, og for komprimerte masser, $\mu = 0.65$.

Sammenligner man Figur 5.12 med Figur 5.13 er friksjonskoeffisienten omtrent den samme for både komprimerte og ukomprimerte masser både ved gjennomsnittlig påført kraft og begynnende glidning for pukktpe 2.

Sammenligner man Figur 5.11 med Figur 5.13 ser man at friksjonskoeffisienten ved gjennomsnittlig påført kraft er høyere for pukktpe 2 sammenlignet med pukktpe 1 når pukken er komprimert.

6. Feltforsøk

Det ble besluttet å videreføre feltforsøkene utført av Bårgard og Bergsager (2012) og Bossel og Haugen (2012). Det er to årsaker til dette. Den ene årsaken er interessen av å skaffe et større datagrunnlag for å sammenligne beregningsmodeller og den virkelige oppførselen av en nedgravd rørgate. Den andre årsaken er interessen av å se om modellforsøkene kan sammenlignes med en virkelig rørgate.

Forsøkene ble planlagt og gjennomført på bakgrunn av de tidligere oppgavene. Hovedfokuset for denne oppgaven ble derfor å utføre så mange forsøk som mulig i skrå grøft, siden det ikke var blitt utført så mange forsøk av den typen tidligere. Bossel og Haugen (2012) rakk ikke å gjennomføre sine forsøk grunnet dårlig vær. Det lå derfor igjen et rør nedgravd i den horisontale grøfta, som ble trukket ut før forsøkene planlagt for årets oppgave ble påbegynt.

Forsøkene ble utført samme sted som de tidligere nevnte oppgavene, i Ekle Sandtak, lokalisert på Brattsberg ca. 8 km sør for Trondheim Sentrum.

6.1 Forsøksoppsett

I denne delen vil oppsettet av forsøkene presenteres. Det er delt opp i to deler, der den første delen omhandler oppsettet for forsøkene utført i horisontal rørgrøft. Den andre delen omhandler oppsettet for forsøkene utført i skrå rørgrøft.

6.1.1 Horisontal rørgrøft

Som tidligere nevnt lå det allerede et rør gravd ned i Ekle Sandtak da forsøkene ble påbegynt. Oppsettet for den horisontale grøfta ble derfor eksakt det samme som oppsettet benyttet av Bossel og Haugen (2012).

Figur 6.1 viser oppsettet for uttrekking av forsøksrøret. I rørets bakre ende er det skrudd på en treplate for å sikre at det ikke blir liggende pukk inne i røret. Lengst bak i grøfta står en treplate vertikalt ned i grøfta. Treplaten har som funksjon å sørge for at enden av røret ikke blir utsatt for horisontalt jordtrykk. I fremkant av grøfta er det plassert en stålplate vertikalt som avslutter grøfta. Stålplaten har en sirkulær utsparring som forsøksrøret legges gjennom. For å tette glippen mellom røret og utsparringen i stålplaten benyttes mineralull, slik at omfyllingsmassene ikke kiler seg fast under forsøkene. Stålplaten holdes på plass av et armert betongrør. Betongrøret er, med dets høye egenvekt, med på å holde igjen stålplaten og omfyllingsmassene rundt røret. Inne i betongrøret monteres en optisk forskyvningsmåler for å måle deformasjonen som påføres røret.

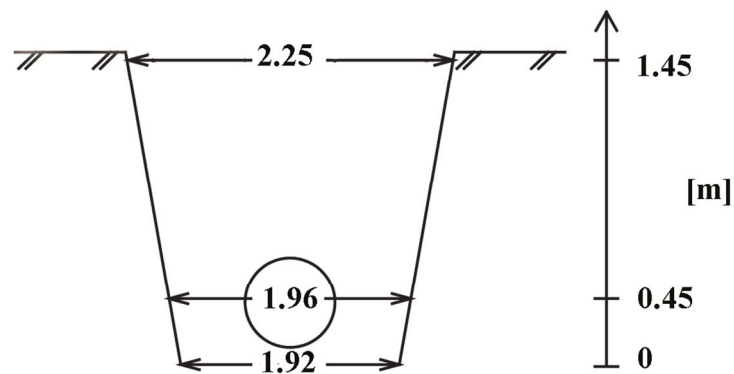
I rørets fremre ende er det en flens med et påmontert blindlokk med en fastmontert krok. I denne kroken monteres en kjetting. Kjettingen monteres videre i en hydraulisk jekk som

brukes til å påføre deformasjonen som fører til at røret trekkes ut av grøften. Til jekken festes en lastcelle som måler kraften jekken påfører systemet. Videre fra lastcellen går en ny kjetting som festes i skuffen på en hjullaster. Hjullasteren fungerer som mothold mot kraften jekken påfører.



Figur 6.1 Oppsett for uttrekking av rør i horisontal grøft

Den horisontale grøften har en lengde på 5.65 m fra treplaten i bakenden, til stålplaten foran. Tverrsnittet til grøften, med gjennomsnittlige mål, er vist i Figur 6.2.

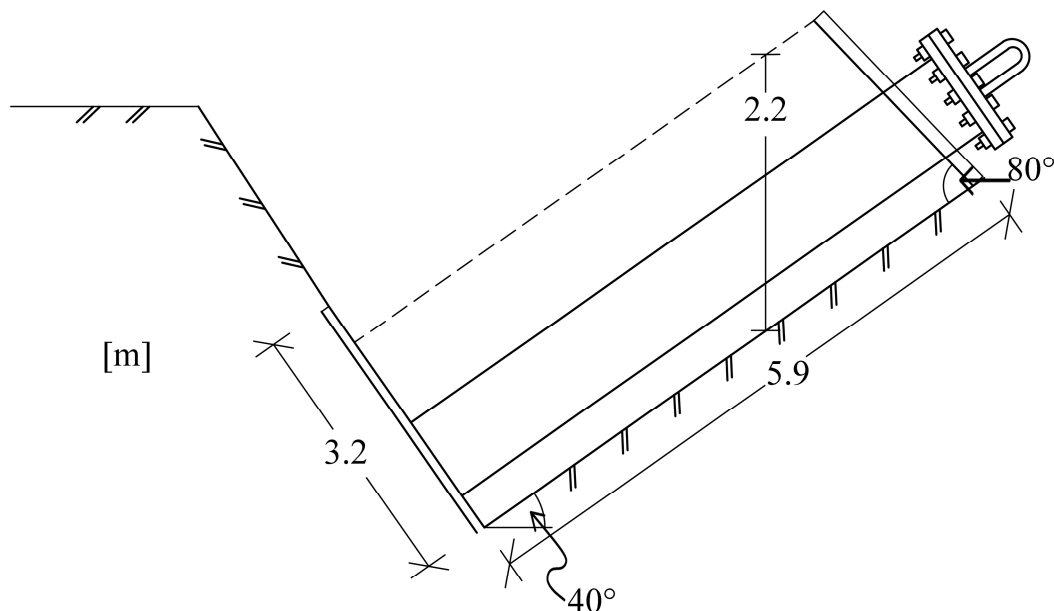


Figur 6.2 Gjennomsnittsbredder i grøftetverrsnitt for horisontal grøft

6.1.2 Skrå rørgrøft

Som utgangspunkt for forsøkene utført i skrå rørgrøft ble det valgt å bruke samme oppsett som Bårgard og Bergsager (2012) benyttet i sine forsøk med noen justeringer.

Figur 6.3 viser oppsettet, med mål, for den skrå rørgrøften.

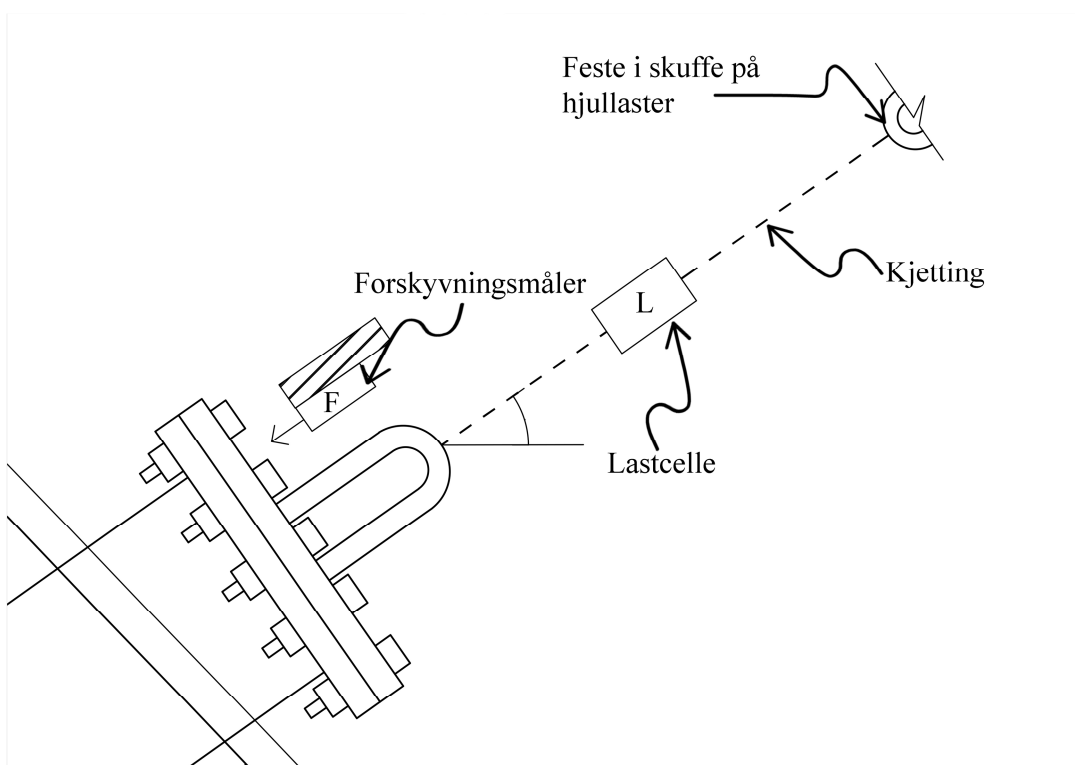


Figur 6.3 Utforming av skrå rørgrøft

På samme måte som i forsøksoppsettet i den horisontale grøfta er det skrudd en treplate i rørets bakre ende for å unngå at pukk legger seg i røret. I bakkant av grøfta er det satt ned en treplate for å unngå at enden av røret blir utsatt for jordtrykk. Det skal nevnes at jordtrykket mot rørets ende i dette oppsettet ville vært minimale da røret trekkes oppover grøften. I grøftens fremkant er det satt ned en stålplate med en utsparring hvor røret legges gjennom. Stålplaten ble forsøkt å legges ned normalt på grøften støttet opp av en trebjelke. Det var utfordrende å plassere stålplaten normalt på grøften, og den ble derfor lagt ned med en vinkel på ca 80° i forhold til grøften. Også i dette forsøksoppsettet benyttes mineralull til å tette glippen mellom røret og stålplatens utsparring.

Dimensjonene på rørgrøften ble bestemt ut fra kravene til NVE (Elstad et. al., 2011). Grøften ble imidlertid noe bredere enn dimensjonert på grunn av utrasinger i grøfteveggene og at skuffen på gravemaskinen var bredere enn hva som var nødvendig. Som vist i Figur 6.3 ble den endelige lengden på grøften 5.90 m, og bredden i bunn av grøften ca 1.30 m. Bredden i bunnen økte noe mot den fremre enden av grøften på grunn av utrasinger av masser. Helningen av grøften ble ca. 40° .

Figur 6.4 viser i detalj oppsettet for uttrekking av røret.



Figur 6.4 Oppsett for uttrekking av røret i skrå grøft

I kroken på blindløkket i rørets fremre ende er det montert en kjetting. Kjettingen ble montert direkte i lastcellen og deretter direkte i hjullasterens skuff. Årsaken til at den hydrauliske jekken ikke ble benyttet er at erfaringer fra Bårgard og Bergsager (2012) viste at kraften den

den påførte ville gå med på å trekke fjæringene i hjullasteren nedover. Dette skyldes at skuffen til hjullasteren, med dette oppsettet, ikke kan forankres i bakken, men må heves over bakkenivå. På denne måten vil bare en del av kraften gå med til å faktisk trekke i røret. Det ble derfor besluttet å benytte hjullasterens hydraulikksystem direkte for å påføre røret deformasjon.

Foran stålplaten ble det lagt ned en trebjelke vinkelrett på røret. Den optiske forskyvningsmåleren ble så festet direkte til denne trebjelken for å måle rørets forskyvning.

6.2 Egenskaper til rør

Samme GRP-rør som tidligere er benyttet av Bårgard og Bergsager (2012) og Bossel og Haugen (2012) er også benyttet under feltforsøkene i denne oppgaven. Røret er produsert av Flowtite Technology AS, og egenskapene til røret er oppsummert i Tabell 36.

Tabell 36 Geometri- og materialdata GRP-rør (Bårgard og Bergsager, 2012)

DN500 PN6		
Ytre diameter	D [mm]	530.1
Godstykkelse	e [mm]	8.7
Lengde rør kontinuerlig	L [m]	6.0
Strekfasthet	f [N/mm ²]	29.2
Tverrkontraksjon	ν	0.23
Masse	m_r [kg/m]	29.2
Aksiell E- modul	E [Gpa]	6.1

6.3 Egenskaper til pukkk

Pukken som ble benyttet i den horisontale grøfta var en blanding av pukkktype 1 og pukkktype 2, presentert i kapittel 5.2.6. Grunnen til dette er at det hadde vært ryddet på stedet hvor forsøkene ble utført, slik at de to haugene med pukkk hadde blitt skjøvet sammen.

Blandingen av pukkktype 1 og pukkktype 2 ble også brukt i den skrå grøften. Her trengtes det imidlertid mer pukkk, så ca 12 m³ ekstra med 4/16 mm pukkk ble levert av Franzefoss Pukk AS. For den nye pukken ble det ikke utført sikteprøver eller tatt bilder, men sammenligninger av pukken i felt viste at den nye pukken lignet mest på pukkktype 2.

Friksjonsvinkelen til massene er ikke målt på nytt under arbeidet med denne oppgaven. Årsaken er at Bårgard og Bergsager (2012) opplevde en stor variasjon under målingen av friksjonsvinkelen i sin oppgave (40-44°). Friksjonsvinkelen ble målt ved å forsiktig helle masser ned på en jevn flate og måle vinkelen i forhold til horisontaltplanet på haugen som ble dannet av massene. Det er ikke grunn til å tro at en ny måling, med samme metode, ville gitt et bedre og mer nøyaktig estimat av friksjonsvinkelen.

6.4 Utstyr

I det følgende presenteres en detaljert beskrivelse av utstyret benyttet under forsøkene.

6.4.1 Hydraulisk jekk med tilhørende håndpumpe

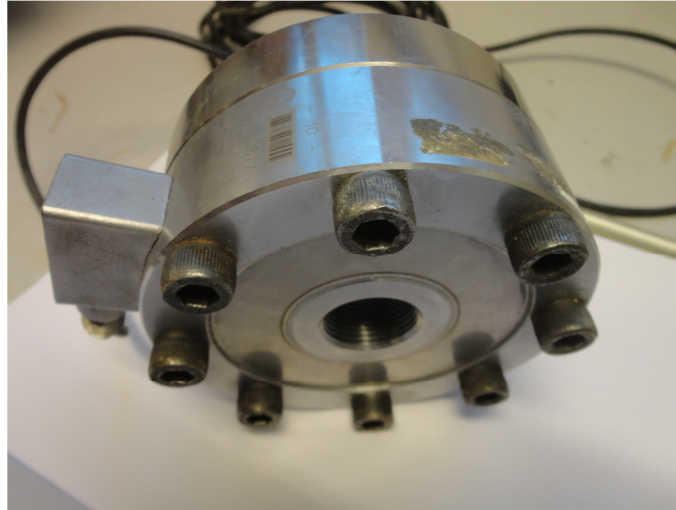
Det ble benyttet en hydraulisk jekk, drevet av en håndpumpe, til forsøkene (Figur 6.5). Jekken har en kapasitet på 160 kN.



Figur 6.5 Hydraulisk jekk med tilkoblet håndpumpe (Bossel og Haugen, 2012)

6.4.2 Lastcelle

Lastcellen benyttet under forsøkene er vist i Figur 6.6. Den har en kapasitet på 100 kN, og registrerer last helt ned til 0.001 kN. Det er ikke funnet noen data for usikkerheten til lastcellen, men Institutt for konstruksjonsteknikk oppgir en garantert øvre grense for usikkerheten på 2 %. Erfaringer fra Institutt for konstruksjonsteknikk viser imidlertid at usikkerheten ligger langt under denne garanterte verdien.



Figur 6.6 Lastcelle benyttet i feltforsøk (Bossel og Haugen, 2012)

6.4.3 Forskyvningsmåler

Figur 6.7 viser den optiske forskyvningsmåleren benyttet under forsøkene. Den er av typen ODS 200 og er produsert av DSE. Forskyvningsmåleren har fokuspunkt 200 mm fra sin overflate og måler i et område ± 100 mm til hver side av fokuspunktet. Når forskyvningsmåleren stilles i ytterstilling (300 mm fra sin overflate) har den dermed et måleområde på 200 mm tilgjengelig. Måleren har en målefrekvens opp mot 2 kHz.



Figur 6.7 Optisk forskyvningsmåler benyttet i feltforsøk (Bossel og Haugen, 2012)

6.4.4 Utstyr for logging av data

For logging av målingene registrert av lastcelle og forskyvningsmåler ble det benyttet en bærbar datamaskin med Catman Easy AP programvare. Det ble i tillegg benyttet en Spider 8 måleforsterker. Under forsøkene ble dataene logget med en frekvens på 50 målinger pr. sekund (50 Hz).

6.4.5 Øvrig utstyr

- Det ble benyttet en hjullaster av typen Volvo L60E med en vekt på 12.2 tonn. Hjullasteren ble benyttet både som mothold for kraften som ble påført røret, og til å direkte trekke i røret.
- Gravemaskin av typen Takeuchi TB153FR med sideforskyvbar bom. Maskinen veier ca. 6 tonn og er benyttet til utgraving av grøftene.
- Vibrasjonsstamper for komprimering av typen MT – 55, produsert av Mikasa. Produsenten oppgir en vekt på 57 kg på vibrasjonsstamperen, og den utøver en kraft på 9.8 kN mot underlaget.

6.5 Fremgangsmåte for feltforsøk

Tabell 37 viser hvilke forsøk som ble planlagt og gjennomført under feltforsøkene. Det ble i tillegg utført et prøveforsøk i den skrå rørgrøfta for å teste forsøksoppsettet før man satte i gang med selve forsøkene.

For hvert forsøk ble det lagt en komprimert såle i bunnen av grøften. Sålen har en tykkelse på 0.2 m i henhold til krav fra NVE (kapittel 3.1). Leggingen av sålen var lett å gjennomføre i den horisontale grøften. I den skrå grøften var det vanskelig å måle opp en nøyaktig tykkelse på sålen for hvert forsøk. Tykkelsen på sålen var derfor varierende for hvert forsøk, men ble for alle forsøk komprimert med skuffen på gravemaskinen.

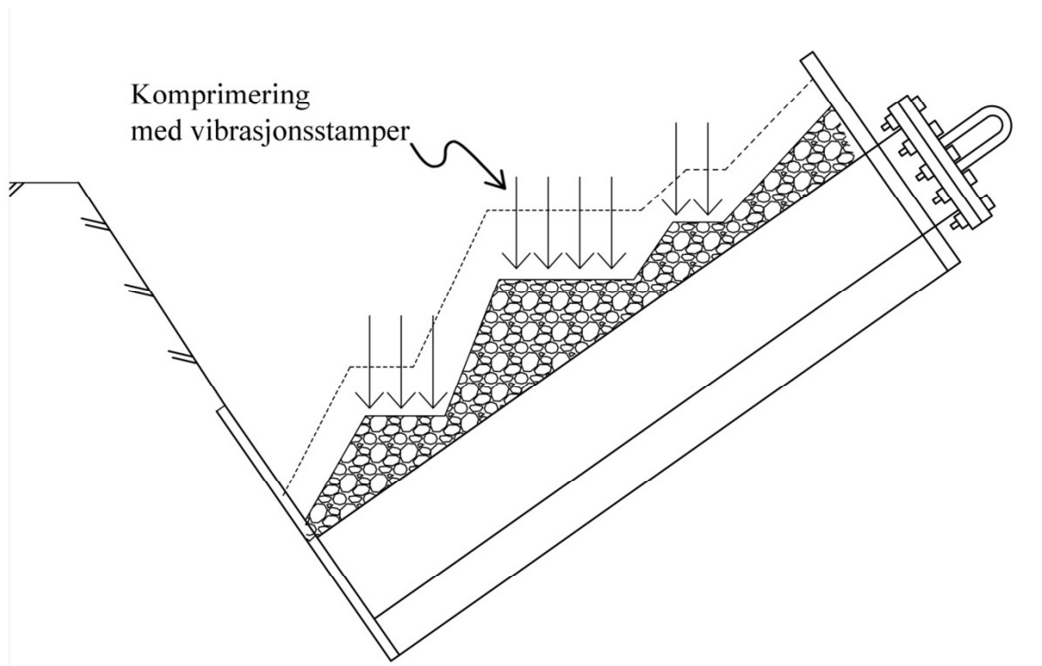
Det ble først gjennomført et trekkeforsøk på røret som allerede lå i grøften. Røret var blitt gravd ned høsten 2012, og omfyllingsmassene komprimert ved hjelp av en vibrasjonsstamper. Ved å grave ned røret på nøyaktig samme måte rett etterpå og gjennomføre et nytt forsøk, kunne man observere komprimeringsens langtidseffekt, da røret hadde ligget i grøften gjennom vinteren.

Tabell 37 Oversikt over feltforsøk og værdato

	H/D	Komprimering	Dato	Vær	Middel lufttemp. [°C]
Horisontal rørgrøft ($\alpha = 0^\circ$)	1.5	Ja	08.05	Sol og skyfritt	7.0
	1.5	Ja	08.05	Sol og skyfritt	18.0
Skrå rørgrøft ($\alpha = 30-35^\circ$)	1.5	Nei	14.05	Lett overskyet	9.0
	1.5	Ja	15.05	Lett overskyet	10.0
	3.0	Nei	15.05	Overskyet	12.0

I forsøkene hvor massen ble komprimert ble dette utført etter rørleverandørens leggeanvisninger (Flowtite, 2013). Komprimeringen ble gjort ved å føre en vibrasjonsstamper to ganger over massene. Komprimeringen ble utført i tre omganger, hvor første komprimering ble gjennomført med omfyllingsmasser halvveis opp på røret. Andre komprimering ble gjennomført med omfyllingsmasser 0.3 m over røret. Til slutt ble det gjennomført en komprimering ved full overdekning.

I den skrå grøften viste det seg bortimot umulig å utføre komprimeringen etter rørleverandørens leggeanvisninger. Komprimeringen ble derfor utført som vist på Figur 6.8.



Figur 6.8 Komprimering av omfyllingsmasser i skrå grøft

Løsningen ble å komprimere gradvis etter hvert som omfyllingsmassen ble lagt i grøfta og raste mot bunnen. Det ble brukt krafse for å danne horisontale hyller i omfyllingsmassene. Vibrasjonsstamperen ble så ført over omfyllingsmassene i de horisontale hyllene. Til slutt ble det gjennomført en siste komprimering ved at det ble banket lett på omfyllingsmassen med skuffen på gravemaskinen.

6.6 Resultater

Under forsøkene ble rørene gradvis påført større aksialkraft helt til til de gled ut av omfyllingsmassene. Glidning er her definert som det punktet hvor røret har fått en vesentlig deformasjon samtidig som aksialkraften avtok. Den største aksialkraften som ble målt er antatt å representere den maksimale friksjonskraften som skal til for å hindre røret i å gli ut av omfyllingsmassene. Denne kraften vil videre omtales som bruddlasten (F_{maks}).

Trekkeforsøkene ble repetert opptil flere ganger uten å grave ned røret på nytt. Kun ved én anledning ble det gjennomført kun én trekking. Dette skyldes at røret da hadde glidd så langt at det var fare for å ødelegge forskyvningsmåleren hvis det ble trukket en gang til.

Videre vil bruddlast og forskyvninger bli presentert i kurver og tabeller der F er påført aksialkraft, δ er forskyvning, δ_1 er total forskyvning til glidning oppstår og δ_2 er total forskyvning til røret igjen er stabilt.

6.6.1 Komprimerte masser, H/D = 1.5, horisontal rørgrøft

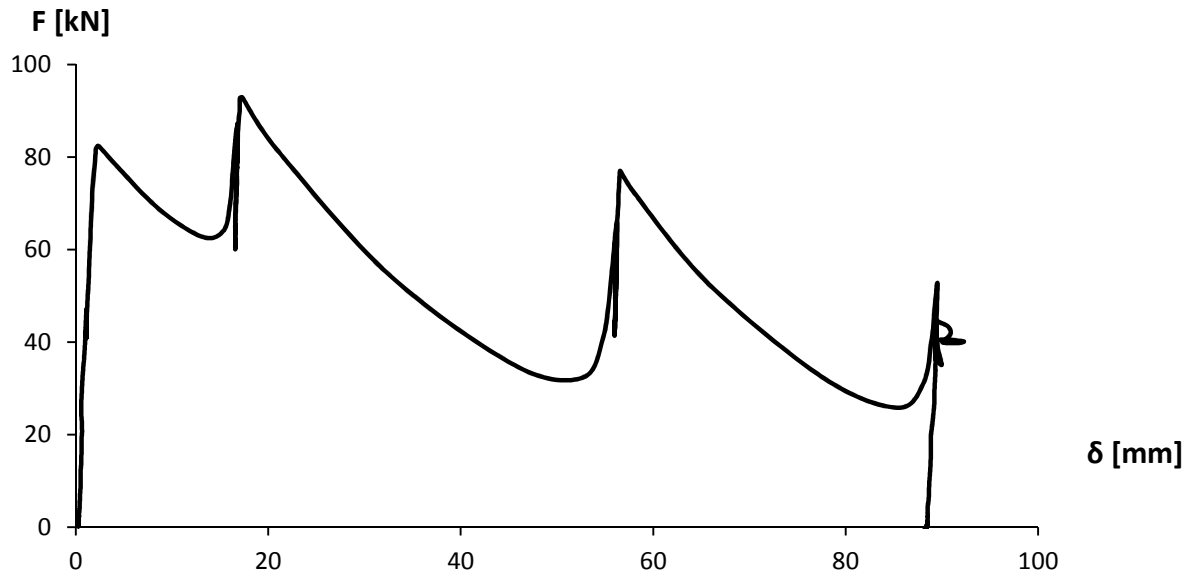
Resultatene som er presentert i det følgende er fra forsøket som ble utført på røret som hadde ligget nedgravd gjennom vinteren. Som tidligere nevnt ble dette røret gravd ned høsten 2012, og ble under nedgravningen komprimert ved hjelp av en vibrasjonsstamper. Komprimeringen ble, i følge Bossel og Haugen (2012), utført som anbefalt i rørprodusentens leggeanvisninger.

Det ble først forsøkt å trekke ut røret ved å benytte den hydrauliske jekken. Trekkingen var mislykket, da kapasiteten til jekkens håndpumpe ikke var tilstrekkelig. Det ble derfor besluttet å bytte ut jekken og heller trekke ut røret med hjullasterens hydraulikksystem. Jekken ble dermed erstattet av to lastestropper som begge ble lagt dobbelt (Figur 6.9).



Figur 6.9 Oppsett for uttrekking av rør, uten jekk

Figur 6.10 viser last- og forskyvningsdiagrammet for forsøket. Maksimalverdier fra forsøket er gjengitt i Tabell 38.



Figur 6.10 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, komprimert (overvintret rør)

Tabell 38 Resultater trekkeforsøk, H/D = 1.5, komprimert (overvintret rør)

	F_{maks} [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]
Første glidning	82.3	2.4	16.8
Andre glidning	92.9	17.3	56.1
Tredje glidning	77.0	56.6	89.4

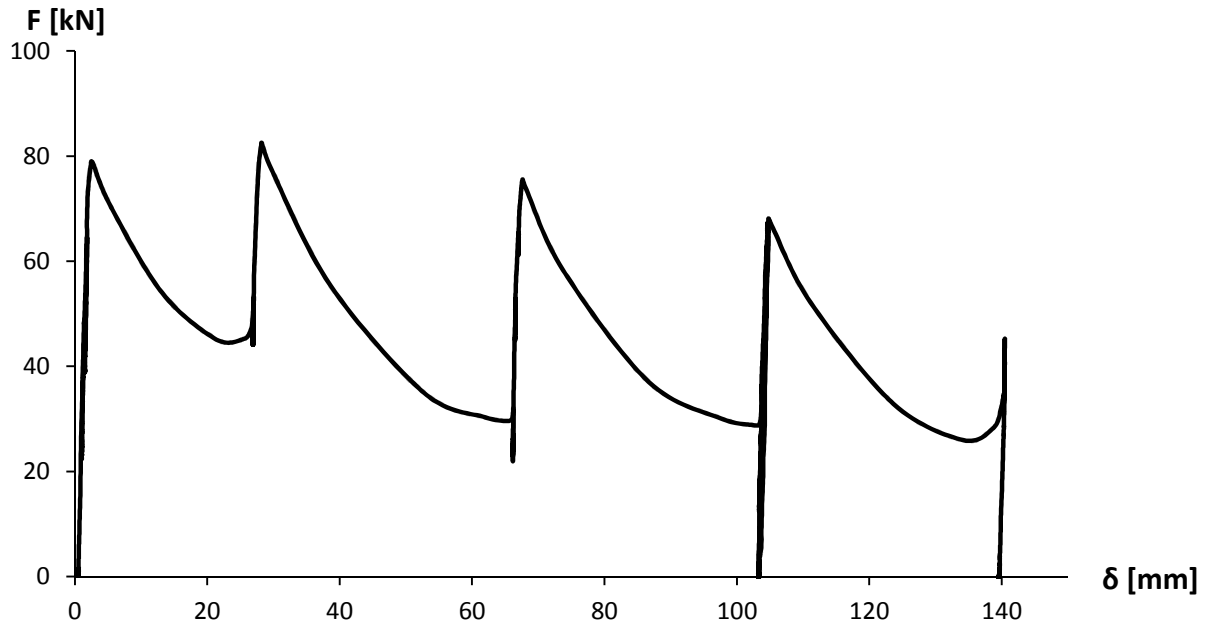
Som Figur 6.10 viser, ble røret belastet til brudd tre ganger. Kurven viser en relativt stiv oppførsel for alle forsøkene med en forskyvning i området 0.5 – 2.4 mm før brudd. Den største forskyvningen oppstår etter andre glidning da det også er høyest målt bruddlast. Forskyvningen er da 38.8 mm, og bruddlasten er 92.9 kN.

6.6.2 Komprimerte masser, H/D = 1.5, horisontal rørgrøft

Da røret som hadde ligget over vinteren var gravd ut ble det så lagt ned igjen på samme måte som var blitt gjort under høsten 2012.

Det ble først forsøkt å benytte den hydrauliske jekken for å trekke ut røret, men i likhet med det tidligere forsøket viste det seg at det hydrauliske jekkesystemet ikke kunne benyttes på grunn av pumpens begrensede kapasitet. Jekken ble derfor erstattet av to lastestropper lagt dobbelt.

Figur 6.11 viser last- og forskyvningsdiagrammet til forsøket. Maksimalverdier fra forsøket er gjengitt i Tabell 39.



Figur 6.11 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 1.5, komprimert

Tabell 39 Resultater trekkeforsøk, H/D = 1.5, komprimert

	F_{maks} [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]
Første glidning	79.0	2.5	26.9
Andre glidning	82.5	28.2	66.2
Tredje glidning	75.5	67.7	103.8
Fjerde glidning	68.1	104.8	140.4

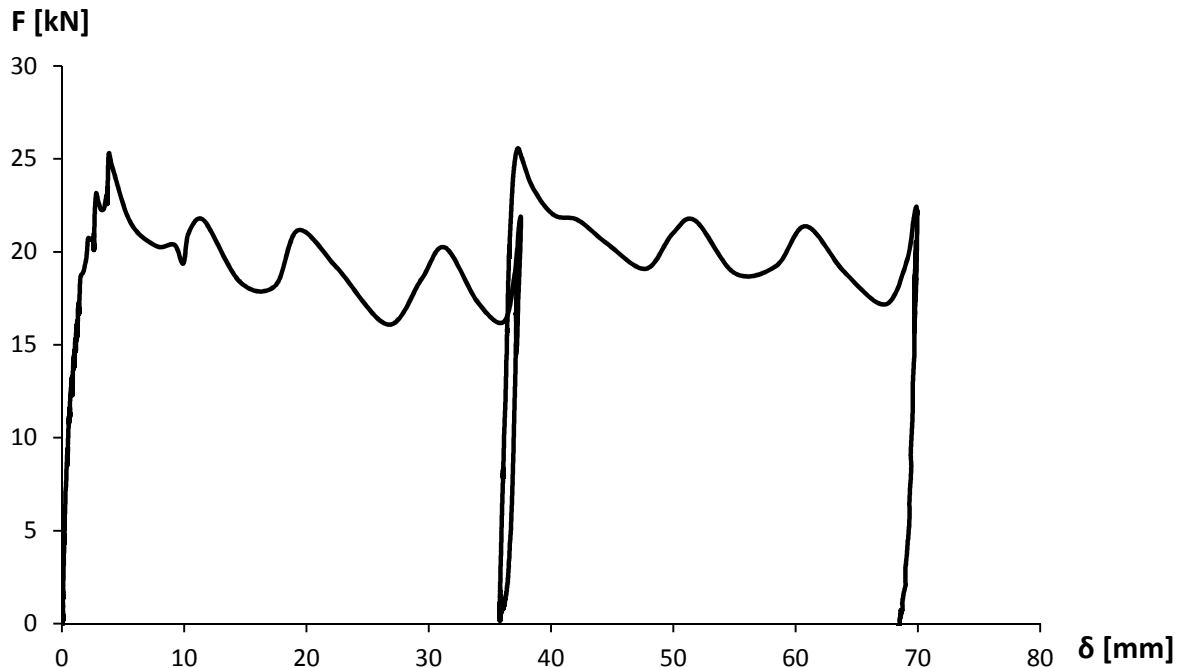
Figur 6.11 viser at forsøkene oppfører seg veldig likt som forsøkene utført på røret som overvintret. Forskjellen er at kraften, jevnt over er litt lavere i forsøkene for det nylig nedgravde røret. Størst bruddlast og deformasjon observeres ved andre glidning og er henholdsvis på 82.5 kN og 38.0 mm. Kurven viser en stiv oppførsel, med deformasjon før brudd fra 1.0 – 2.5 mm.

Årsaken til at lastnivået før fjerde glidning går helt tilbake til null, er at hjullasteren ikke greide å trekke røret til glidning uten å først sette opp en ny forankring med skuffen. Kjettingen ble heftet av, slik at skuffen kunne forankres på nytt, før røret ble trukket til brudd en siste gang.

6.6.3 Ukomprimerte masser, $H/D = 1.5$, skrå rørgrøft

Da røret var plassert i grøften ble det målt til å ligge med en helning på ca. 34° .

Figur 6.12 viser last- og forskyvningsdiagrammet til forsøket. Maksimalverdier fra forsøket er gjengitt i Tabell 40.



Figur 6.12 Last- og forskyvningsdiagram, $H/D = 1.5$, ukomprimert, skrå grøft

Tabell 40 Resultater fra trekkforsøk, $H/D = 1.5$, ukomprimert, skrå rørgrøft

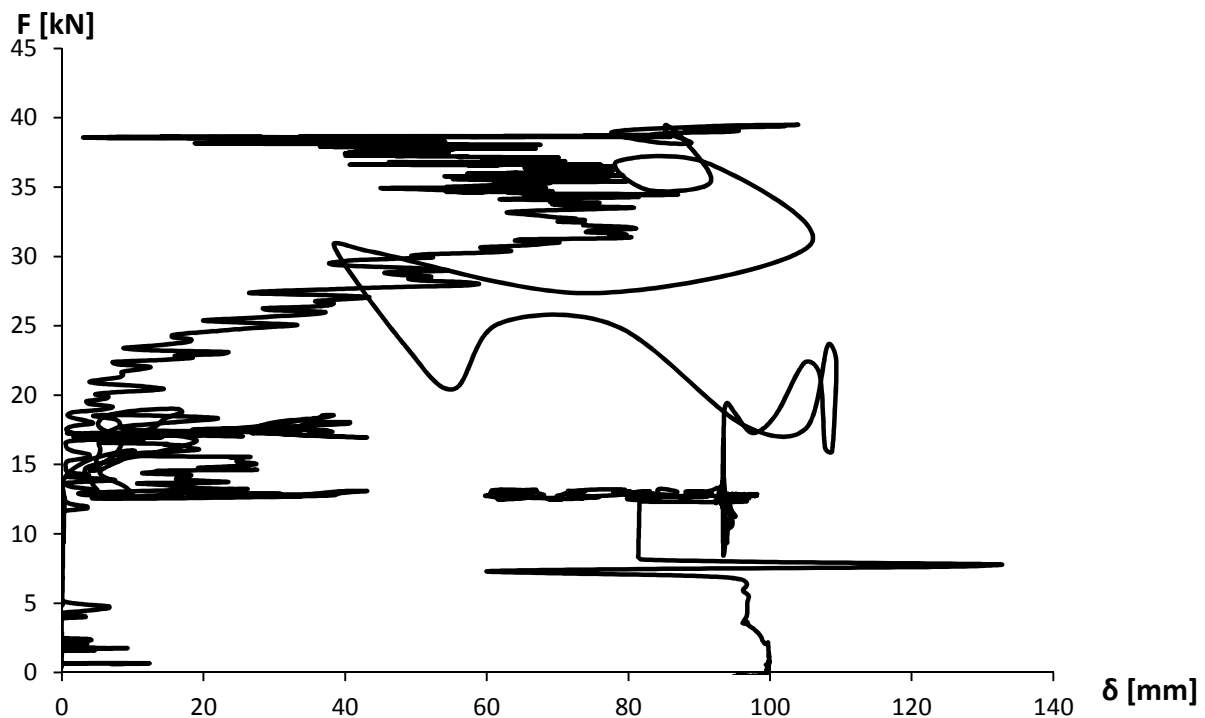
	F_{maks} [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]
Første glidning	25.3	3.9	37.2
Andre glidning	25.6	37.3	69.8

Figur 6.12 viser samme tendens som forsøkene utført i horisontal rørgrøft omtalt tidligere, der kraften øker ved andre glidning. Økningen er imidlertid mye lavere. Kurven viser fortsatt en stiv oppførsel, men er langt mindre stiv ved første glidning enn i tilfellene med horisontal rørgrøft og komprimering. Før første glidning er deformasjonen på hele 3.9 mm. Årsaken til at lastnivået går tilbake til null før andre glidning er at skuffen på hjullasteren ble senket før røret ble trukket på nytt. Bruddlasten og deformasjonen etter brudd er størst ved andre glidning og er målt til henholdsvis 25.6 kN og 32.5 mm.

6.6.4 Komprimerte masser, $H/D = 1.5$, skrå rørgrøft

Da røret var plassert i grøften ble det målt til å ligge med en helning på ca. 32° . Grunnen til at helningen ble redusert fra forrige forsøk, var at det var vanskelig og tidkrevende å opprettholde en stabil såle, da pukken hadde en tendens til å rase nedover skråningen ved utgravning.

Figur 6.13 viser last- og forskyvningsdiagrammet til forsøket.



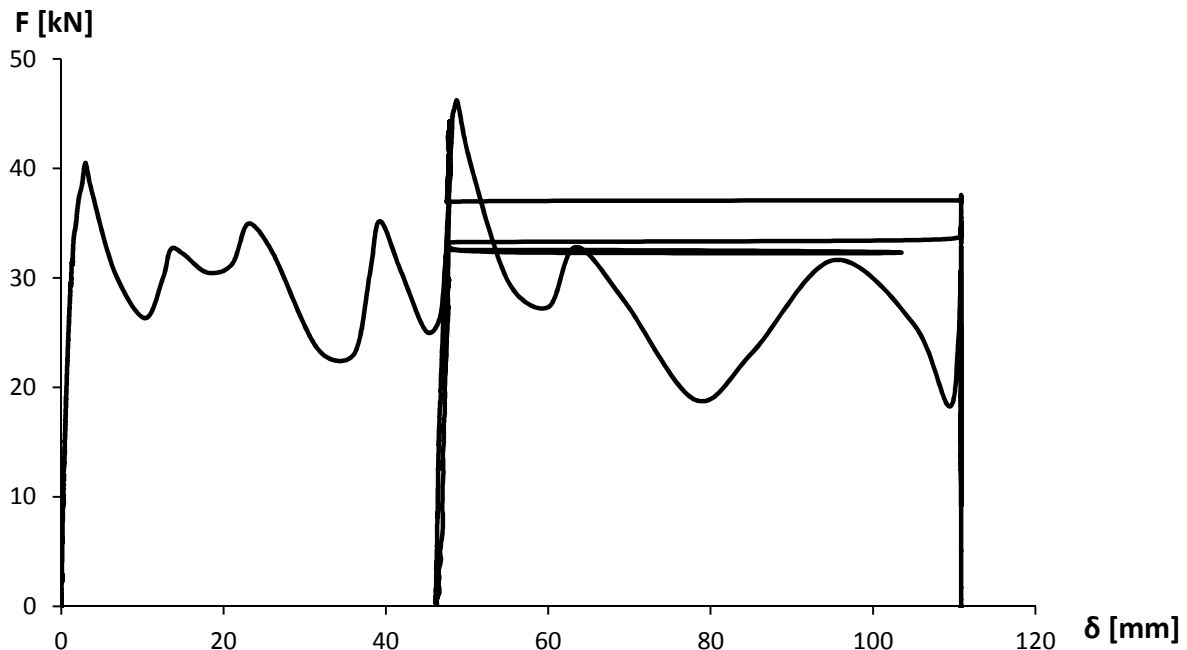
Figur 6.13 Last- og forskyvningsdiagram, $H/D = 1.5$, ukomprimert, skrå grøft

Dette last- og forskyvningsdiagrammet bærer preg av å være veldig rotete. Det er tydelig at det har oppstått en feil ved målingen av forskyvningen av røret. Det kan ha oppstått en form for målestøy under utførelsen av forsøket. Dette kan skyldes dårlig kontakt i loggeutstyret, støv og annet som har virvlet opp foran laseren og forstyrret målingene, eller det kan være andre strømkretser som har påvirket loggeutstyret. Svigningene i forskyvningen kan også skyldes at lasermåleren har blitt montert helt eller delvis utenfor måleområdet. Det er derfor umulig å få fornuftige tall for forskyvningen. Det ble i tillegg bare utført ett forsøk under denne nedgravningen, da røret ved glidning hadde så stor forskyvning at det var fare for å ødelegge loggeutstyret ved å trekke i røret enda en gang. Siden forskyvningsmåleren ble montert uavhengig av resten av forsøksoppsettet er det antatt at det er mulig å benytte data fra lasten som er målt under forsøkene. I dette forsøket ble bruddlasten målt til 39.5 kN, altså har komprimeringen ført til en økning i bruddlasten på ca. 54 % i forhold til forsøkene med samme overdekning, men hvor omfyllingsmassene ikke var komprimert.

6.6.5 Ukomprimerte masser, H/D = 3.0, skrå rørgrøft

Helningen på røret ble ytterligere noe redusert fra tidligere forsøk, og ble nå målt til ca. 30°.

Figur 6.14 viser last- og forskyvningsdiagrammet til forsøket. Maksimalverdier fra forsøket er gjengitt i Tabell 41.



Figur 6.14 Last- og forskyvningsdiagram, H/D = 3.0, ukomprimert, skrå grøft

Tabell 41 Resultater fra trekkeforsøk, H/D = 3.0, ukomprimert, skrå rørgrøft

	F_{maks} [kN]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]
Første glidning	40.5	3.0	47.3
Andre glidning	46.2	48.7	110.9

Figur 6.14 viser at det også har oppstått forstyrrelser ved logging av forskyvningen under dette forsøket. Siden forstyrrelsene først kommer til syne etter andre glidning er det sannsynlig at forstyrrelsene skyldes at røret er trukket utenfor forskyvningsmålerens måleområde. Før andre glidning har systemet blitt avlastet ned til null. Avlastningen skyldes at da det ble forsøkt å trekke røret på nytt, hang skuffen til hjullasteren så høyt at bakhjulene ble løftet til værs (Figur 6.15). Skuffen ble derfor senket, slik at hjullasteren kunne få nytt grep før røret ble trukket på nytt. Kurven viser en relativt stiv oppførsel, med en forskyvning før brudd på 1.4 – 3.0 mm. Bruddlasten og deformasjonen etter brudd er størst ved andre glidning, og er målt til henholdsvis 46.2 kN og 62.2 mm.



Figur 6.15 Løfting av hjullasterens bakhjul ved forsøk, $H/D = 3.0$

7. Diskusjon

I det følgende vil resultatene fra de ulike forsøkene utført i oppgaven diskuteres og analyseres. Først vil modell-, friksjons-, og feltforsøkene diskuteres hver for seg. Deretter vil forsøksresultatene sammenlignes med beregningsmodellene presentert i kapittel 3.3. Til slutt blir felt- og modellforsøk sammenlignet.

7.1 Modellforsøk

I det følgende blir resultatene fra modellforsøkene analysert og feilkilder fra forsøksoppsettet drøftet. Deretter blir oppførselen til last- og forskyvningsdiagrammene diskutert, noe som leder fram til en anbefaling av hvilken kraft som skal representere bruddlasten i forsøkene. Til slutt sammenlignes bruddlasten fra forsøkene i forhold til helning, overdekning og komprimering.

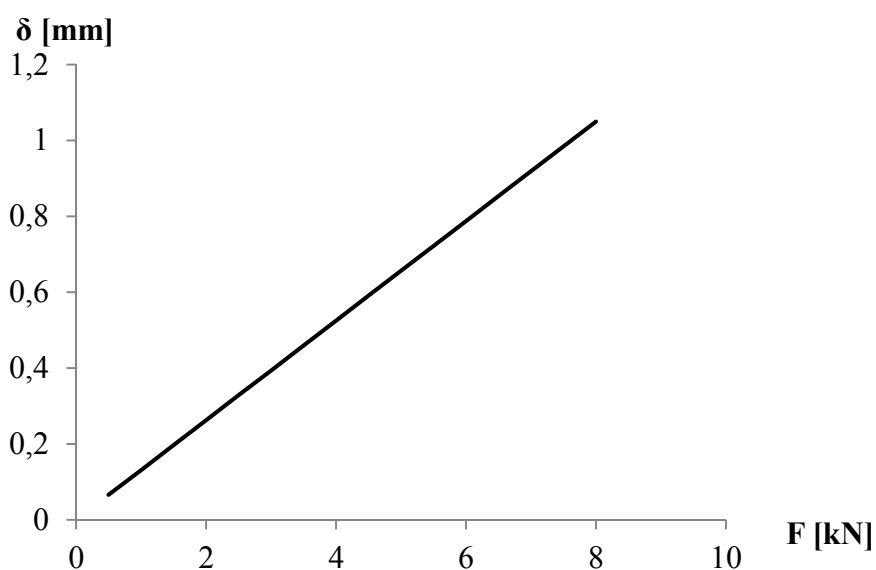
7.1.1 Feilkilder fra forsøksoppsettet

Oppsettet til modellforsøkene kan sies å være rimelig nøyaktig, fordi geometrien til kassen er lik for alle forsøk. Likevel er det noen variabler som gjør at forsøkene kan avvike fra hverandre.

- Overdekningen over røret kan variere for hver nedgravning
- For forsøkene med ukomprimerte omfyllingsmasser kan det tenkes at omfyllingsmassen rundt røret, til en viss grad, har blitt komprimert. Dette er på grunn av at man måtte stå oppi kassen under arbeidet med å legge masser oppå røret. På denne måten kan man ha kommet til å komprimere massene i ulik grad fra forsøk til forsøk.
- Helningen av kassen kan ha vært noe usikker for forsøkene utført med kassen i helning. Dette er på grunn av at det var vanskelig å lese av en nøyaktig verdi på vateret som ble brukt for å måle helningen av kassen (Figur 7.1). I de siste forsøkene, utført i helning, ble det benyttet et digitalt vater for å måle vinkelen til kassen. Selv om dette vateret gav eksakte verdier, var vateret så kort at helningen ble målt over en begrenset lengde. Lengden på det digitale vateret kan ha medført at vinkelen ble målt på lokale ujevnheter, eller deformasjoner på kassen.
- Deformasjoner i oppsettet for uttrekking av røret, kan ha gitt unøyaktige data for forskyvningen. Det er hovedsaklig bjelken aktuatoren er festet til som er blitt deformert, slik som omtalt i kapittel 4.7. Deformasjon ved økende lastpåføring er vist i Figur 7.2.



Figur 7.1 Vanlig vater



Figur 7.2 Beregning av deformasjon, bakre bjelke i forsøksrigg

Grafen viser at man ved en kraft på ca 8 kN oppnår en deformasjon av bjelken på ca 1 mm. Dette er den høyeste registrerte kraften under forsøkene, og ble oppnådd under forsøkene med rør med diameter, $d = 300$ mm og kassen horisontalt. For alle andre forsøk er det ikke registrert krefter over 4.5 kN, noe som etter beregningene fører til en deformasjon av bjelken på ca 0.6 mm. Deformasjonen av bjelken antas å være lineær-elastisk og vil derfor ikke påvirke lasten som leses av ved verken begynnende eller full rørglidning.

Tøyningen av røret, som også er presentert i kapittel 4.7, er mer usikkert om faktisk er en feilkilde fordi det er sannsynlig at en virkelig rørgate også vil tøyes før glidning.

7.1.2 Gjentakelsesverdi for modellforsøkene

Det ble gjennomført tre forsøksserier for hver overdekning med horisontal kasse. Det er i det følgende utført en analyse av forsøkene for å se på variasjonen mellom forsøkene.

Hastigheten ved uttrekking er omtrent den samme for hvert forsøk, slik at korrelasjonen mellom kraften i hvert forsøk kan antas å gi et godt estimat for gjentakelsesverdien i forsøkene. Gjentakelsesverdi er her definert som hvor like resultater forsøksoppsettet gir for hver nye forsøksserie med samme forutsetninger.

Resultatene fra kapittel 4.6 viser at det er en tendens til at kraften for å trekke ut røret, øker fra forsøk til forsøk i samme forsøksserie. Det er derfor valgt å se på korrelasjonen mellom kraftforløpet i forsøkene med samme forsøksnummer, for de tre forsøksseriene utført med samme overdekning. Korrelasjonen mellom kraften som er påført røret under hele forsøket, for ukomprimerte masser, er vist i Tabell 42. Forsøkene er benevnt $a.b$, hvor a er nummeret på serien og b er nummeret på forsøket. Hastigheten røret er trukket med i hvert forsøk er også tatt med, for å illustrere hvor likt forskyvningen er påført fra forsøk til forsøk. Verdiene for forsøkene med $H/D = 2.0$ er ikke tatt med på grunn av store variasjoner i hastighetene mellom forsøkene.

Tabell 42 Korrelasjon mellom modellforsøkene med samme forsøksnummer, ukomprimerte omfyllingsmasser

H/D	Forsøk	x-y	Korrelasjons- Koeffisienten (r_{xy})	Hastighet for forsøk:	Hastighet [mm/min]
1.5	1	1.1-2.1	0.962	1.1	1.18
		1.1-3.1	0.947	2.1	1.07
		2.1-3.1	0.996	3.1	1.07
	2	1.2-2.2	0.996	1.2	1.17
		1.2-3.2	0.812	2.2	1.17
		2.2-3.2	0.820	3.2	1.15
	3	1.3-2.3	0.997	1.3	1.26
		1.3-3.3	0.953	2.3	1.16
		2.3-3.3	0.961	3.3	1.17
3.0	1	1.1-2.1	0.997	1.1	0.91
		1.1-3.1	0.948	2.1	0.92
		2.1-3.1	0.925	3.1	0.80
	2	1.2-2.2	0.998	1.2	0.88
		1.2-3.2	0.894	2.2	0.91
		2.2-3.2	0.879	3.2	0.82
	3	1.3-2.3	0.999	1.3	0.87
		1.3-3.3	0.998	2.3	0.83
		2.3-3.3	0.997	3.3	0.83
Gjennomsnitt			0.950		

Ut fra Tabell 42 kan man se at korrelasjonen mellom de ukomprimerte forsøkene generelt er høy, med en gjennomsnittlig korrelasjonskoeffisient på 0.95 for alle de ukomprimerte forsøkene. Likevel er det fire verdier som er nærmere 0.80.

Korrelasjonen i kraftforløpet for forsøkene utført med komprimerte masser, er vist i Tabell 43.

Tabell 43 Korrelasjon mellom modellforsøkene med samme forsøksnummer, komprimerte omfyllingsmasser

H/D	Forsøk	x-y	Korrelasjons- Koeffisienten (r_{xy})	Hastighet for forsøk:	Hastighet [mm/min]
1.5	1	1.1-2.1	0.972	1.1	1.03
		1.1-3.1	0.950	2.1	0.94
		2.1-3.1	0.992	3.1	1.13
	2	1.2-2.2	0.921	1.2	1.10
		1.2-3.2	0.793	2.2	1.05
		2.2-3.2	0.954	3.2	1.15
	3	1.3-2.3	0.918	1.3	1.23
		1.3-3.3	0.896	2.3	1.08
		2.3-3.3	0.998	3.3	1.16
2.0	1	1.1-2.1	0.992	1.1	0.84
		1.1-3.1	0.916	2.1	0.99
		2.1-3.1	0.958	3.1	0.91
	2	1.2-2.2	0.991	1.2	0.92
		1.2-3.2	0.986	2.2	1.03
		2.2-3.2	0.999	3.2	1.00
	3	1.3-2.3	0.999	1.3	0.95
		1.3-3.3	0.996	2.3	0.93
		2.3-3.3	0.996	3.3	0.99
Gjennomsnitt			0.960		

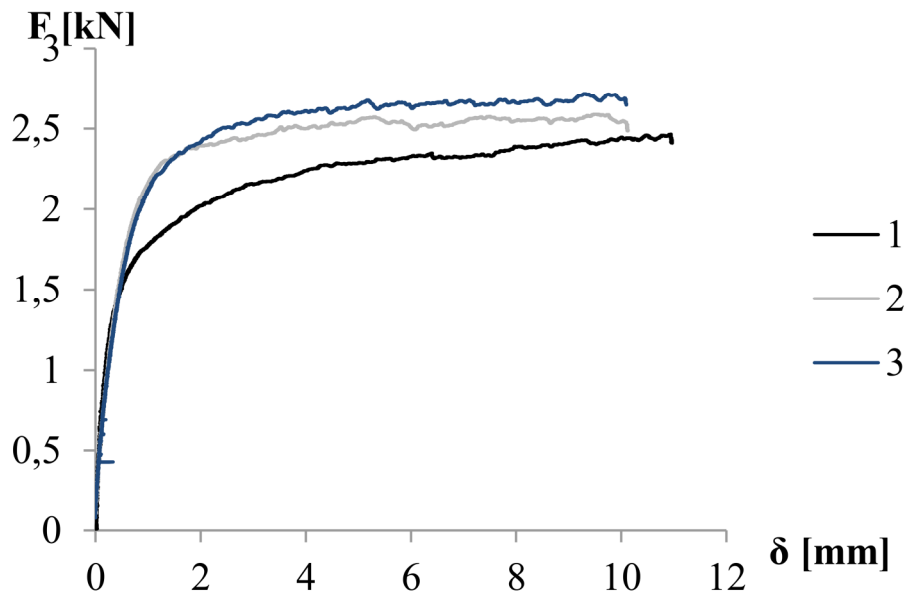
Ut fra Tabell 43 kan man se at korrelasjonen mellom de komprimerte forsøkene generelt er høy, med en gjennomsnittlig korrelasjonskoeffisient på 0.96 for alle de komprimerte forsøkene. Likevel er det en verdi som er under 0.80.

Det er vanskelig å vite hva de enkelte lave verdiene av korrelasjonskoeffisienten kommer av, men sannsynligvis skyldes dette en eller flere av feilkildene nevnt i kapittel 7.1.1.

De høye verdiene av de gjennomsnittlige korrelasjonskoeffisientene viser likevel at det er god korrelasjon mellom hvert forsøk for både de komprimerte og ukomprimerte forsøkene. Man kan altså slå fast at forsøkene har god gjentagelsesverdi. Siden det kun ble utført en forsøksserie for forsøkene med kassen i helning, er det vanskelig å fastslå hvor god gjentagelsesverdien er for disse forsøkene. Likevel tyder den gode gjentagelsesverdien for forsøkene med horisontal kasse at forsøksriggen er så stabil at gjentagelsesverdien også vil være god for forsøkene hvor kassen står i helning.

7.1.3 Oppførsel av last og forskyvningskurver

Resultatene fra modellforsøkene viser en tendens til at lasten som er nødvendig for å trekke ut røret stiger for hvert forsøk etter røret er gravd ned. Figur 7.3 illustrerer dette, hvor de tre last- og forskyvningskurvene for forsøksserie 3 av forsøkene med $H/D = 2.0$ med ukomprimerte masser er vist.

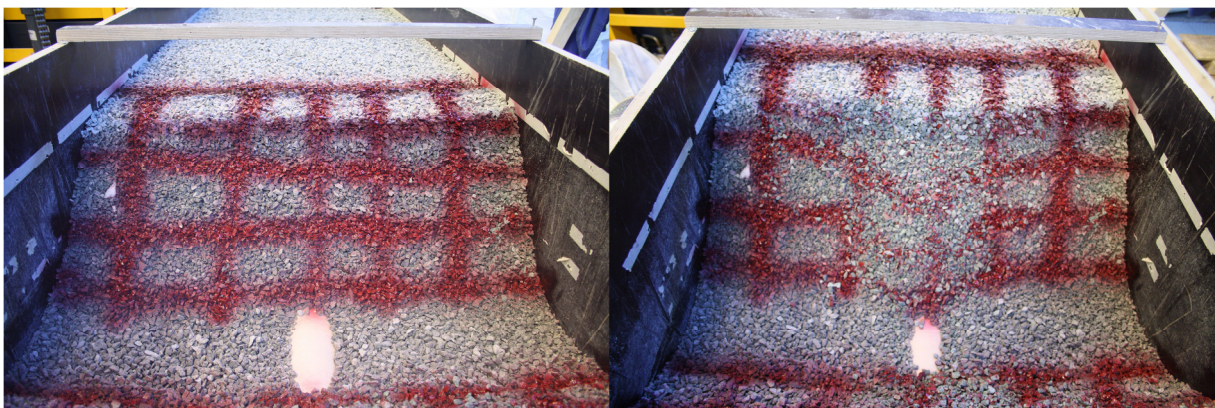


Figur 7.3 Eksempel fra forsøksserie 3, $H/D=2$, ukomprimert, horisontal kasse

Det er fremlagt to hypoteser på hva som kan være årsaken til dette:

1. Omfyllingsmassene omstruktureres rundt røret. Omstruktureringen gjør at:
 - a) Massene får et større kontaktareal med røret, noe som fører til at normalkraften lettere overføres på røret og friksjonskraften øker.
 - b) Massene “ruller” slik at de spisse endene på massens enkeltkorn kiler seg fast i de mikroskopiske “gropene” på rørets overflate. Dette fører til en slags form for kileeffekt videre utover i massen, som igjen fører til at kraften som skal til for å trekke ut røret øker.(Bossel og Haugen, 2012)
2. Røret drar med seg omfyllingsmassene over røret og komprimerer massene i aksial retning, mot kassens endevegg. Dette fører etter hvert til at det samles mer pukk i området foran kassens fremre vegg, der hvor røret blir trukket ut. Dette vil også lede til et økt trykk mot kassens langvegger, som da vil presse med et større normaltrykk tilbake på røret. At røret drar med seg massene er illustrert i Figur 7.4.

For de horisontale forsøkene, illustrert av Figur 7.3, er det vanskelig å si hvilken av effektene som har mest å si for den økte kraften.

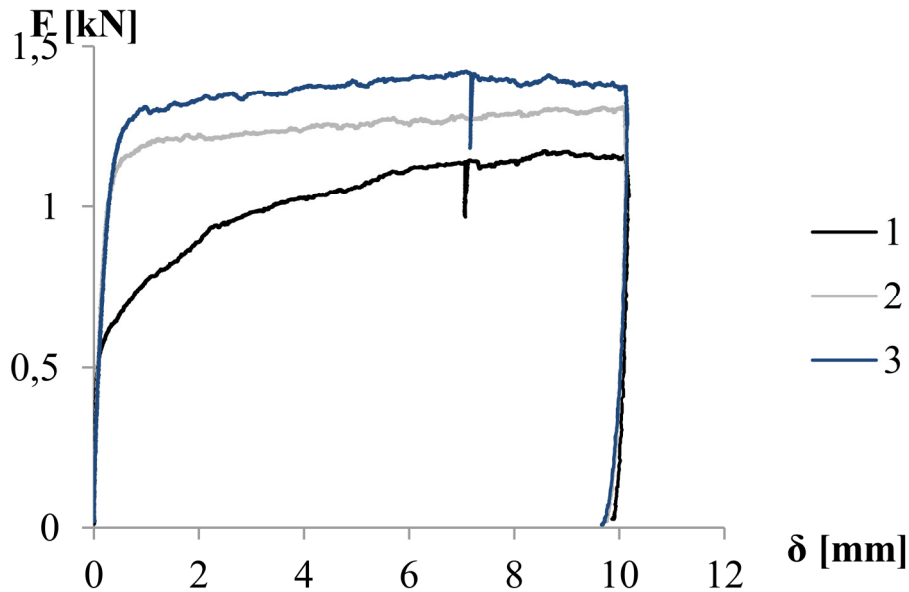


Figur 7.4 Illustrasjon av at røret drar med seg massene, før og etter uttrekk av røret

Hvis man ser på resultatene for forsøkene som ble gjennomført i helning, ser man at den relative økningen av friksjonskraften er større fra første til tredje forsøk, enn for forsøkene hvor kassen lå horisontalt. Figur 7.5 viser et eksempel fra forsøkene hvor røret ble lagt i 35° helning med $H/D = 2.0$ og ukomprimerte omfyllingsmasser. Figuren viser at den begynnede rørglidningskraften stiger fra 0.55 kN i første til 1.25 kN i tredje forsøk, noe som tilsier at kraften øker med ca 130 %. For forsøkene med horisontal kasse øker kraften med ca 30 %, fra 1.55 til 2.00 (Figur 7.3).

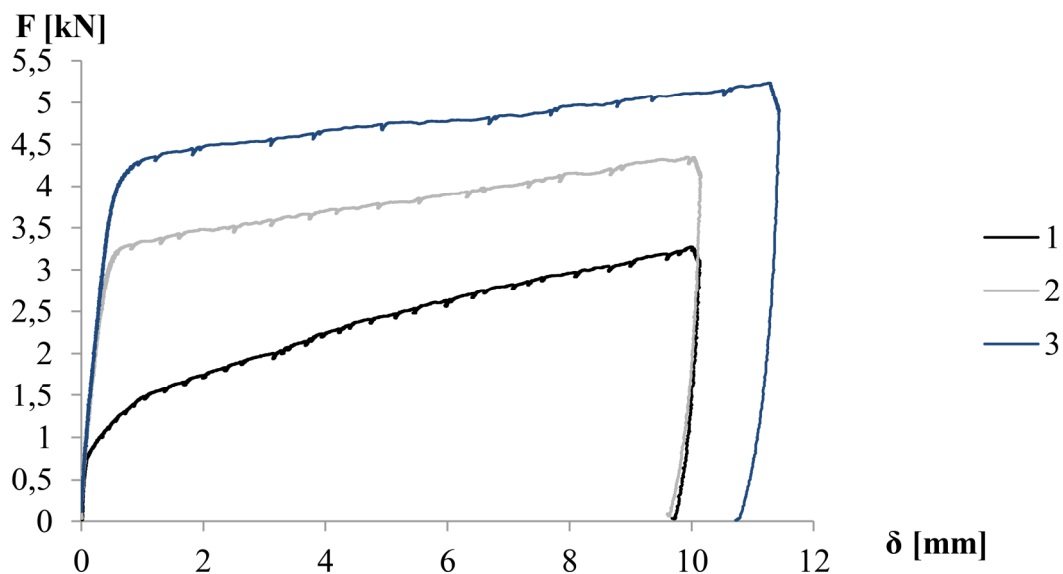
Det er rimelig å tro at den økte forskjellen kommer av at røret i større grad klarer å trekke med seg omfyllingsmassene (hypotese 2), når kassen står i 35 graders helning. Det vil allerede være trykk mot fremre enden av kassen på grunn av de drivende kreftene fra tyngden av omfyllingsmassene, men det er tydelig, ved å se på last- og forskyvningskurvene, at det bygges opp et større trykk etter hvert som forsøkene utføres. Trykkøkningen i fremre ende av

kassen under forsøkene, er en effekt av at rørgrøften er avgrenset i kassens fremre ende, noe som kan kalles en endeffekt.



Figur 7.5 Eksempel fra forsøksserie $H/D=2$, ukomprimert, i 35° helning

Hvis man ser på forsøksserien som ble utført med det store røret ($d = 300$ mm), med kassen i 35° helning (Figur 7.6) ser man at den relative økningen er enda større i forhold til forsøksserien med rør $d = 100$ mm. I forsøkene med det store røret øker kraften ved begynnende rørglidning med 400 % fra første til tredje forsøk. Det er nærliggende å tro at røret, på grunn av dets større overflateareal, klarer å flytte med seg en større andel av massene fremover i kassen. Dette gjør at det bygger seg opp et større trykk i kassens fremkant, som igjen fører til den større forskjellen i påført kraft mellom forsøk 1 og forsøk 3, sammenlignet med røret med $d = 100$ mm. At det bygges opp et større trykk i fremre ende av kassen, under forsøkene med det store røret, kan underbygges av observasjoner gjort under forsøkene. Det ble observert at kasseveggene ble trykket ut normalt fra røret, etter hvert som røret ble trukket.



Figur 7.6 Eksempel fra forsøksserie $H/D = 1.5$ med rør, $d = 300\text{mm}$, i 35° helning

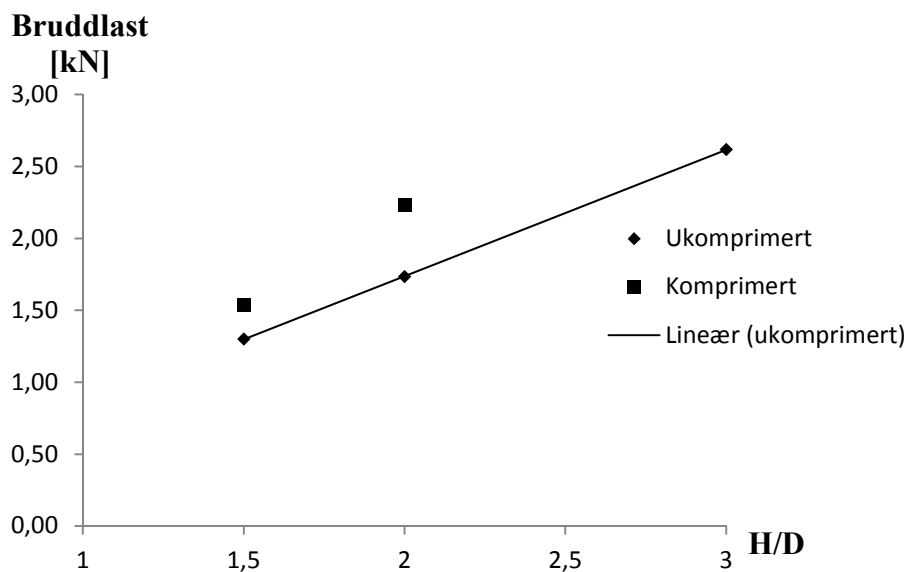
7.1.4 Hvilken kraft skal benyttes for å beskrive rørets kapasitet mot glidning?

Som forklart tidligere, øker kraften for hver trekking i alle forsøkene, noe som antas å forårsakes, enten av at røret drar med seg massene, eller en omstrukturering av kornene rundt røret. For en nedgravd rørgate er det nærliggende å anta at en omstrukturering av massene i kontakt med røret ikke vil skje før rørgaten har gått til brudd. Det vil derfor være mest realistisk å bruke oppførselen til det første forsøket i hver forsøksserie for å beskrive friksjonskraften til en rørgate. Ved å bruke resultatet fra det første forsøket ser det også ut som man minimerer endeeffekten observert i forsøkene, spesielt ved forsøkene med kassen i helning.

Så kommer spørsmålet om hvilken last fra det første forsøket man skal benytte for å beskrive bruddlasten til rørgaten. Dette blir et spørsmål om hvor mye aksiell deformasjon man kan tillate på rørgaten før det er kritisk for rørgatens sikkerhet. Bare en liten forskyvning kan føre til at rørsegmentene butter mot hverandre i rørskjøtene. Dette kan føre til knekking, eller i værste fall oppløfting av deler av rørgaten. Det er derfor nærliggende å tro at man ønsker så liten deformasjon som mulig. Videre er det derfor valgt å la kraften ved begynnende rørglidning i første forsøk i hver forsøksserie representere bruddlasten til rørgaten.

7.1.5 Sammenligning av begynnende rørglidning for horisontale modellforsøk og rør, $d = 100 \text{ mm}$

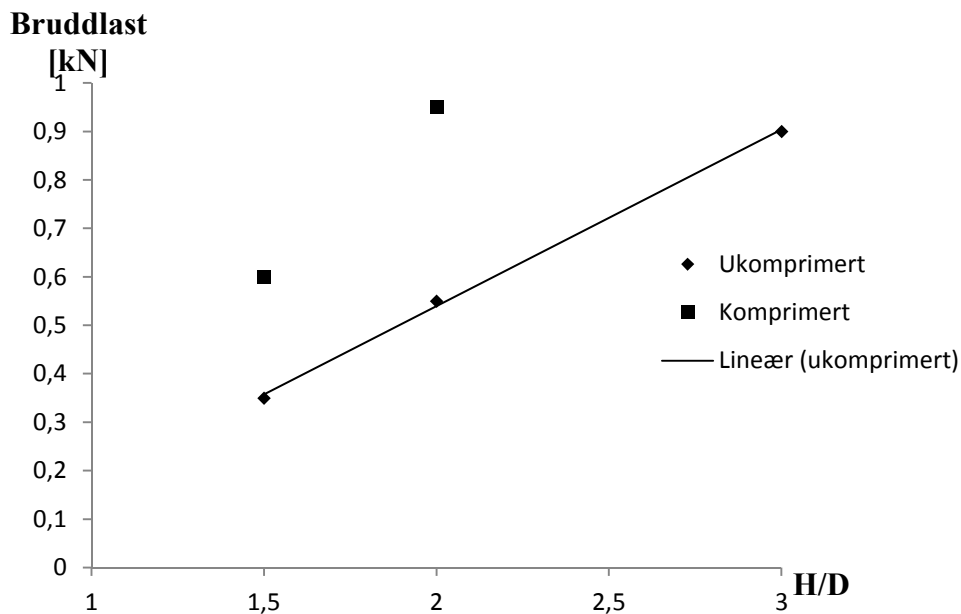
Figur 7.7 viser bruddlasten fra modellforsøkene som ble utført med horisontal kasse. Den viser kraften ved begynnende rørglidning som funksjon av overdekningen, H/D , for både ukomprimerte og komprimerte forsøk. Resultatene for de ukomprimerte forsøkene viser en lineært økende trend med økende overdekning. Figuren viser også at komprimeringen gir økt kapasitet. Man kan derimot ikke si med sikkerhet om komprimering gir samme, lineære økende trend, fordi det bare er utført forsøk med komprimerte masser ved to ulike overdekninger.



Figur 7.7 Sammenligning av bruddlast for modellforsøk med horisontal kasse

Figur 7.8 viser bruddlasten for modellforsøk i 35° helning. Resultatene fra de ukomprimerte forsøkene viser en lineært økende trend ved økende overdekning. Relativt sett øker kraften fra $H/D = 1.5$ til 3.0 med ca 200 % for forsøkene med horisontal kasse. Med kassen i 35° helning øker bruddlasten med ca 260 % i samme intervall. Resultatene viser dermed en tendens til at økt overdekning har mer å si for kapasiteten med horisontal kasse enn med skrå kasse.

Ut fra resultatene ser det også ut som effekten av komprimering er større for røret i 35° helning.

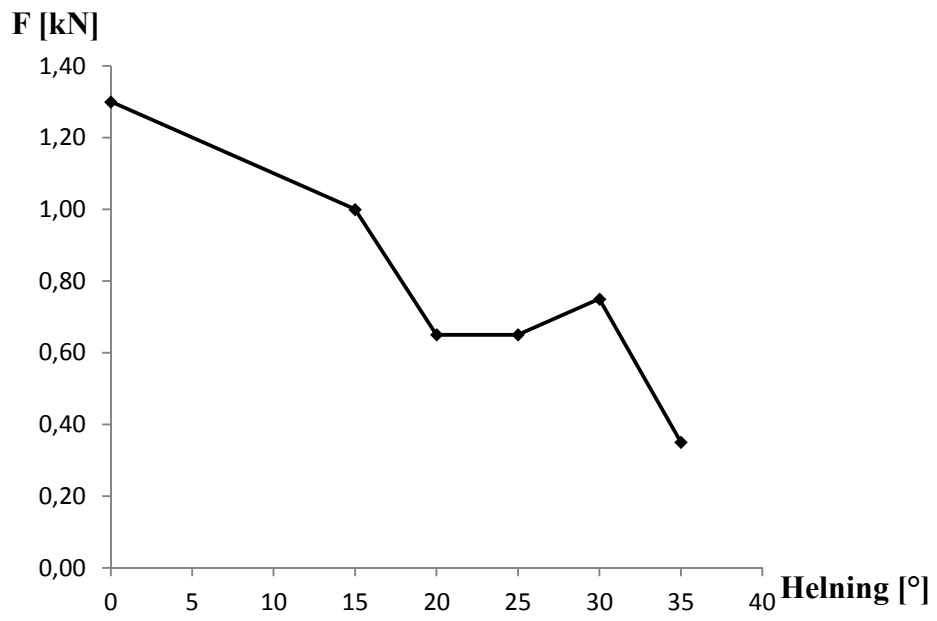


Figur 7.8 Sammenligning av bruddlast for modellforsøk i 35° helning

7.1.6 Sammenligning av bruddlast ved økende helning

Figur 7.9 viser hvordan at hovedsaklig reduseres med økende helning. Unntaket er verdiene for 25° og 30°. Disse verdiene viser at bruddlasten er konstant fra 20° til 25°, for så å øke til 30°.

Med tanke på at det bare er utført en forsøksserie ved hver helning, kan det være at de avvikende verdiene kun er ekstremalverdier, som ville falt bort hvis antall forsøk hadde økt. Det er også mulig at feilkilder, diskutert i kapittel 7.1.1, kan ha påvirket resultatene. Likevel er det interessant å observere at verdien av bruddlasten, fra 0° til 30°, reduseres med 40 %, mot verdien av bruddlasten, fra 30° til 35°, hvor bruddlasten reduseres med hele 50 %.



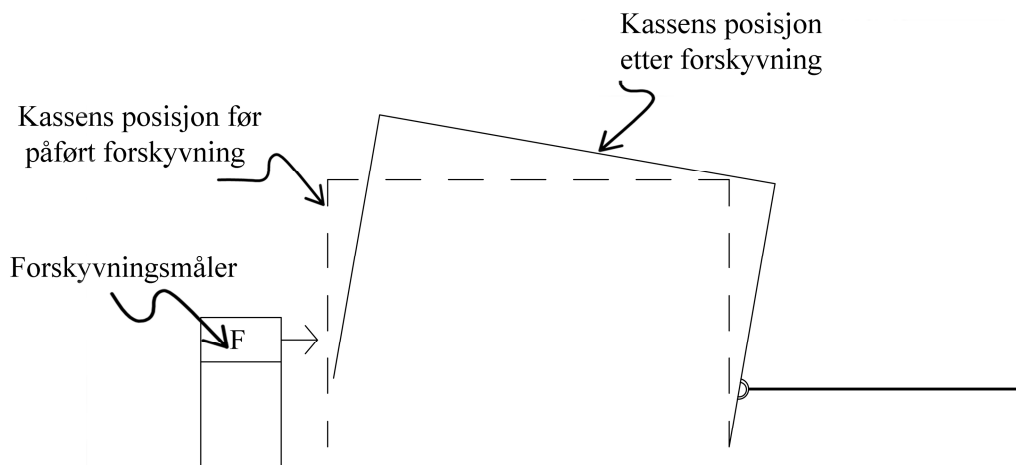
Figur 7.9 Sammenligning av bruddlast ved økende helning

7.2 Friksjonsforsøk

I dette kapittelet diskuteres feilkilder og resultater fra friksjonsforsøkene presentert i kapittel 5.4. Oppførselen til last- og forskyvningsdiagrammene og interaksjonen mellom rør og pukk under forsøkene vil også bli drøftet.

7.2.1 Diskusjon av feilkilder

Som nevnt i kapittel 5.1 ble gjengestangen gjennom kassen flyttet litt høyere opp på kassen i forhold til plasseringen under Bossel og Haugens (2012) forsøk. Dette førte til en økt eksentrisitet i lasten som ble påført fra aktuatoren. Når aktuatoren så begynte å trekke kassen langs røret, førte dette til at kassen, i starten av forsøkene, roterte litt fremover. Det var vanskelig å plassere forskyvningsmåleren mot bunnen av kassen, slik at denne målte forskyvningen et stykke opp på kassens bakre vegg. Forskyvningsmåleren registrerte derfor rotasjonen av kassen som en forskyvning vekk fra sin egen posisjon, slik som illustrert i Figur 7.10. Rotasjonen av kassen anses som den største feilkilden i forsøksoppsettet.



Figur 7.10 Rotasjon av forsøkskassen under friksjonsforsøk

Rotasjonen av kassen fortsatte helt til det oppsto en likevekt mellom momentet fra kraften påført fra aktuatoren og momentet fra den stabiliserende kraften (normalkraften). Dette kom tydelig frem i en tidlig fase av forsøkene. Før hver trekking ble gjennomført, ble kassen justert til horisontal posisjon (parallelt med røret). Rotasjonen fortsatte imidlertid hver gang kassen ble trukket. Rotasjonen var aldri så stor at kassens fremkant kom i kontakt med røret, og resten av forsøkene ble derfor gjennomført uten at det ble forsøkt å rette opp kassen mellom hver trekking. Vektene som ble lagt oppå kassen under noen av forsøkene ble plassert mot bakkant av kassen, slik at det stabiliserende momentet økte, og problematikken med rotasjon av kassen ble redusert.

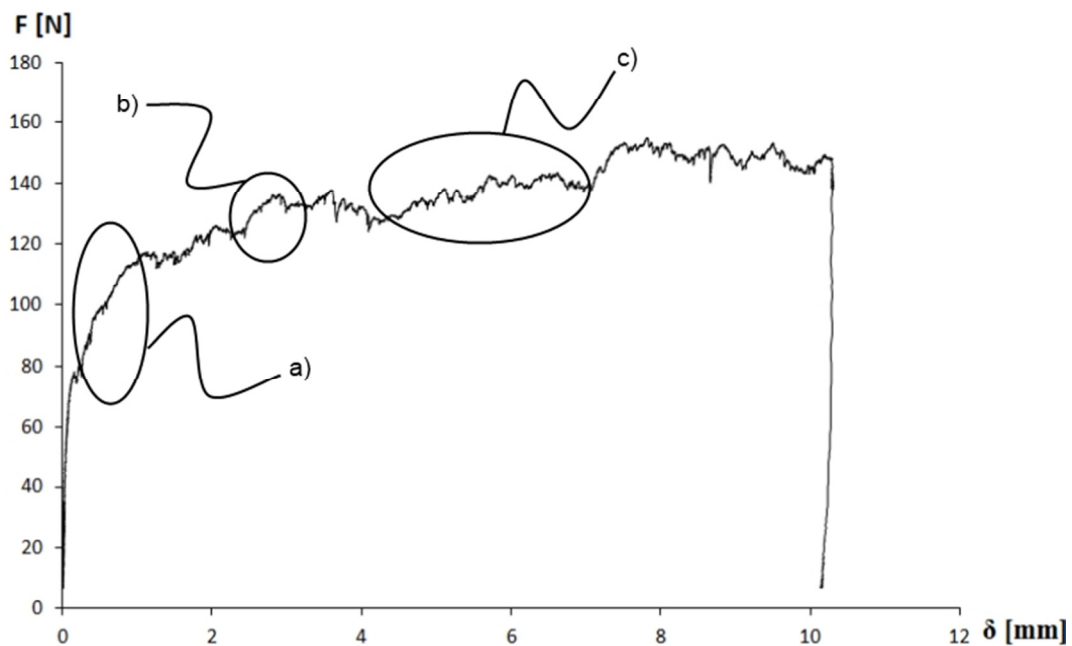
En annen potensiell feilkilde kan være kiling av enkeltkorn mellom undersiden av kassens kanter og rørflaten. Fastkiling ble imidlertid ikke observert under noen av forsøkene.

Forbedring av den valgte forsøksriggen er fortsatt mulig. Man kunne tenke seg at man kledde undersiden av alle kassens kanter med teflonpapir og lot både kassen og pukken gli langs røret uten klaring mellom kasse og rør. Man ville da redusere problematikken med rotasjon av kassen. Videre kan man se for seg en løsning hvor man monterer «støttehjul» til kassen som rullet, tilnærmet friksjonsfritt, langs skinner, og på denne måten motvirket trekkekraftens eksentrisitet.

Løsningen som er valgt antas å gi en god representasjon av hvordan systemet med omfyllingsmasser (pukk) og rør oppfører seg, og hva slags samvirke de to materialene har. Oppsettet gir også gode estimat for friksjonskoeffisienten, som et slags «gjennomsnitt» i kontaktarealet.

7.2.2 Oppførsel av last- og forskyvningsdiagram

Figur 7.11 viser last- og forskyvningsdiagrammet for forsøk nr. 1 med pukktpe 1 uten ekstra vekt oppå kassen, og er vist for å illustrere oppførselen til kassen under forsøkene.



Figur 7.11 Last- og forskyvningsdiagram, pukktpe 1, forsøk 1

Det er sannsynlig at forskyvningen som er oppstått ved område a) i diagrammet delvis er forårsaket av rotasjon av kassen. Her er det en stadig jevn økning i kraften uten at kassen ser ut til å bryte hvilefriksjonen, selv om deformasjonen er forholdsvis stor.

Figur 7.11 viser at systemet ikke oppfører seg slik som beskrevet i kapittel 3.2. Selv om kassen blir påført en jevn forskyvning ser man at når hvilefriksjonen blir brutt første gangen,

fører ikke dette til en jevn deformasjon med konstant kraft til forsøket er endt. Det ser ut til at kassen gjør små «rykk» gjennom forsøket, slik at kassen noen ganger helt eller delvis har stoppet opp, slik at hvilefriksjonen brytes på nytt før glidning fortsetter. Dette vises av toppene i kraft- og forskyvningsdiagrammene, som i område b) i Figur 7.11. Man kan også observere at selv der kassen har en mer jevn bevegelse ser kraften ut til å gradvis øke. Dette er illustrert ved område c) i Figur 7.11.

Det er nærliggende å tro at dette skulle sett mer ut som Figur 3.2, at det er et markant skille mellom glide- og hvilefriksjonen. En årsak til at oppførselen ikke er den samme kan være at pukkk ikke er å regne som kohesive masser. Man kan f. eks. sammenligne med et akebrett belastet med tyngde, som blir dratt langs snøen med en jevn kraft. Det kan være tungt å komme i gang, men når man først får fart på akebrettet kreves mindre kraft for å holde det i bevegelse. Dette skyldes at det oppstår et slags «sug» mellom den finkornede snøen og akebrettet. Dette suget må overvinnnes for å sette akebrettet i bevegelse, men så lenge akebrettet holdes i jevn bevegelse rekker ikke suget å oppstå på nytt. Når massene ikke er kohesive vil ikke et slikt sug oppstå, og dermed vil man ikke få en utpreget forskjell på hvile- og glidefriksjon.

To sannsynlige årsaker til at friksjonen til tider øker med økende påsatt forskyvning er omtalt i kapittel 7.2.1. Det kan tenkes at pukken i kassen omfordeles og at kiling oppstår. Med omfordeling av kornene menes det her at kornene i kontakt med rørets overflate ruller eller velter om hverandre, slik at det stadig blir større samlet kontaktflate mot røret. Med kiling menes at skarpe kanter på enkeltkorn blir låst fast i bestemte posisjoner. Dette gir en kileeffekt videre innover i massen, og gjør at kornene i større grad skrapes mot røret. Det kan også tenkes at enkeltkorn låses i mikrogroper i røret.

7.2.3 Diskusjon av resultater

I kapittel 5.4 er det presentert to ulike resultater. Det ene er kraften målt ved begynnende glidning av kassen, og det andre er gjennomsnittlig påført kraft. Som nevnt i kapittel 3.2 er friksjonskoeffisienten definert som forholdet mellom normalkraft og påført kraft, enten for å sette en gjenstand i bevegelse (hvilefriksjon) eller når gjenstanden er i bevegelse (glidefriksjon). Ved begge tilfeller benyttes forholdet $\mu = F/N$. Som det er diskutert tidligere er dette ofte enkelt å avgjøre når man har med kohesive masser å gjøre. I dette tilfellet er ikke massene kohesive, og det er derfor vanskelig å avgjøre hva som er hvilefriksjon og hva som er glidefriksjon. Det er derfor valgt å basere de endelige resultatene på den gjennomsnittlige påførte kraften som er målt fra kassen først er satt i bevegelse, til forsøket er endt (som under forsøkene er i det kassen har glidd 10 mm langs røret).

Tabell 44 og 45 oppsummerer resultatene ved gjennomsnittlig trekkekraft for begge typene av pukkk, der pukkktype 1 er pukken benyttet under feltforsøk av Bårgard og Bergsager (2012) og pukkktype 2 er pukken benyttet under feltforsøk av Bossel og Haugen (2012).

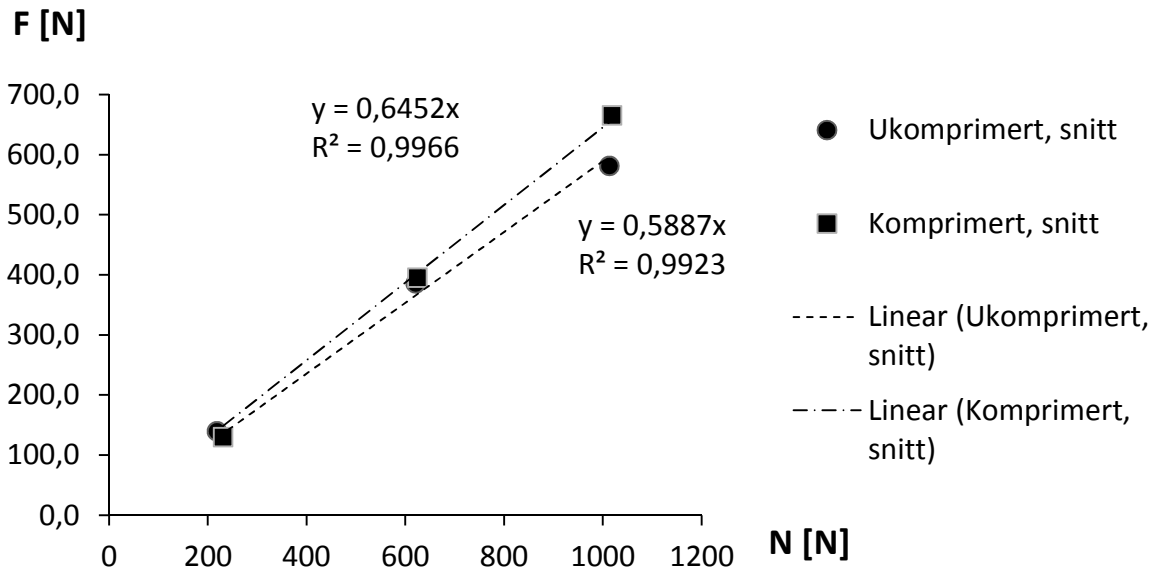
Tabell 44 Oppsummering av resultater ved gjennomsnittlig trekkekraft, ukomprimert og komprimert, pukktpe 1

Forsøksserie	Antall forsøk	Komprimert	Normalkraft, N [N]	$\overline{F_g}$ [N]	μ
1	3	nei	218	140	0.64
2	3	nei	621	386	0.62
3	3	nei	1013	582	0.57
Gjennomsnitt					0.61
Standardavvik					0.03
1	3	ja	231	130	0.56
2	3	ja	624	395	0.63
3	3	ja	1018	666	0.65
Gjennomsnitt					0.62
Standardavvik					0.05

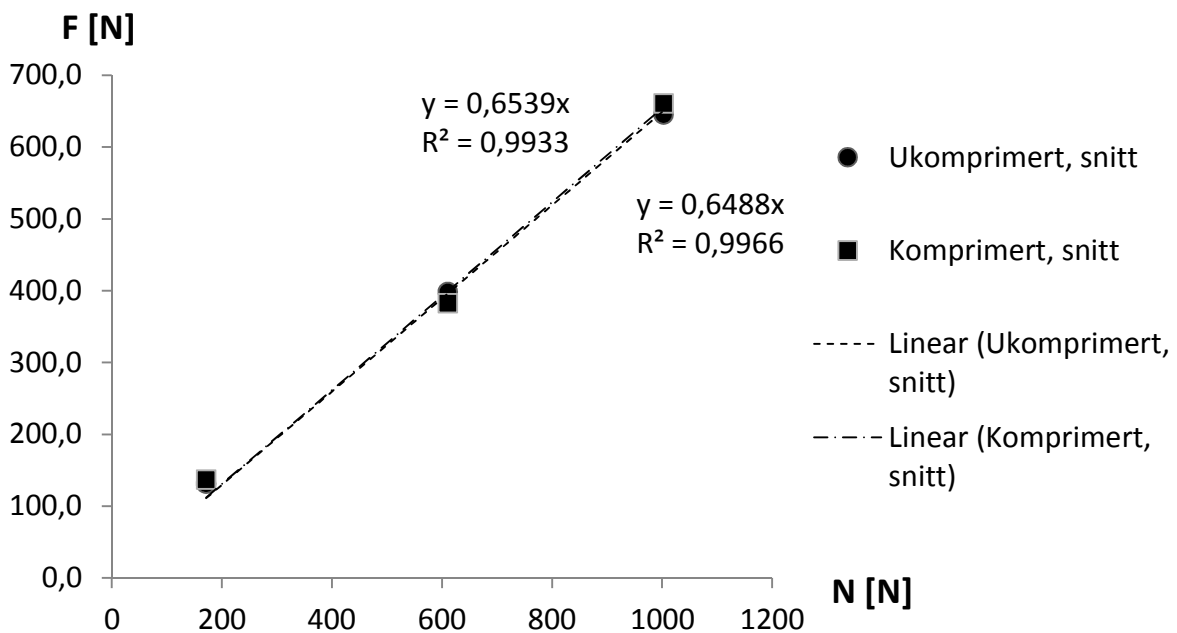
Tabell 45 Oppsummering av resultater ved gjennomsnittlig trekkekraft, ukomprimert og komprimert, pukktpe 2

Forsøksserie	Antall forsøk	Komprimert	Normalkraft, N [N]	$\overline{F_g}$ [N]	μ
1	3	nei	171	131	0.77
2	3	nei	610	398	0.65
3	3	nei	1003	646	0.64
Gjennomsnitt					0.69
Standardavvik					0.07
1	3	ja	171	137	0.80
2	3	ja	610	383	0.63
3	3	ja	1003	661	0.66
Gjennomsnitt					0.70
Standardavvik					0.09

Resultatene tyder på at komprimeringen har svært lite å si for friksjonskoeffisienten for begge typene av pukk. I tillegg er friksjonskoeffisienten for pukken med den minste kornstørrelsen (pukktpe 2) noe høyere enn pukken med den største kornstørrelsen. Som nevnt i kapittel 3.2, vil den gjennomsnittlige friksjonskoeffisienten gjengitt i tabellene representere stigningstallet til en lineær trendlinje, i et diagram hvor friksjonskraften er vist som funksjon av normalkraften. Siden pukk er et ikke- kohesivt materiale vil derfor det beste målet for friksjonskoeffisienten være stigningstallet til den trendlinjen som ligger så nært som mulig alle punkter i grafen og samtidig krysser origo. Disse trendlinjene er vist i Figur 7.12 og 13.



Figur 7.12 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktipe 1



Figur 7.13 Gjennomsnittlig friksjonskraft mot normalkraft, pukktipe 2

Ut fra graftene kan man se en litt annen trend enn ut fra tabellverdiene. For pukktipe 1 kan man nå tydelig se en forskjell i friksjonskoeffisienten der pukken er komprimert og der den er ukomprimert. Friksjonskoeffisienten er nå $\mu = 0.59$ når pukken ikke er komprimert og $\mu = 0.65$ når pukken er komprimert.

For pukktipe 2 er friksjonskoeffisienten, $\mu = 0.65$ både i tilfellene hvor pukken er ukomprimert og komprimert.

Resultatene kan tyde på at interaksjonen mellom pukk og rør ikke påvirkes like mye av komprimering, når kornstørrelsen er minker. Ser man derimot nærmere på Figur 7.12 ser man at det kun er i tilfellet med høyest normalkraft at det blir en stor forskjell mellom resultatet for komprimert og ukomprimert pukk. Siden det bare er utført en forsøksserie for hver pukk, med og uten komprimering, kan dette resultatet skyldes tilfeldigheter. I tillegg er verdien for normalkraften i de ukomprimerte forsøkene for pukktipe 1 basert på volumet av pukk i kassen, og ikke den nøyaktige vekten, slik som i tilfellet med komprimert pukk. Det kan derfor tenkes at verdien for normalkraften ikke er like nøyaktig i forsøkene hvor pukken var ukomprimert. Bossel og Haugen (2012) er usikre på om pukk som blir komprimert vil kunne bli «banket» inn i GRP- røret og dermed oppnå en høyere friksjonskoeffisient.

Ut fra resultatene er det altså lite som tilsier at verdien for friksjonskoeffisienten mellom rør og pukk endres i tilfeller hvor pukken blir komprimert.

Å fastslå et nøyaktig tall for friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasse er fremdeles vanskelig uten å gjennomføre større forsøksserier med flere forsøk. Resultatene tyder på at en pukktipe med mindre korn gir en litt høyere friksjonskoeffisient enn en pukktipe med større korn, forutsatt at røret har samme ruhet. For å finne en endelig friksjonskoeffisient for pukktipe 1 midles verdiene for ukomprimert og komprimert pukk, og friksjonskoeffisienten mellom pukktipe 1 og rør settes til $\mu = 0.62$. Denne verdien er innenfor standardavvikene fra Tabell 44 og burde derfor være et godt estimat. Friksjonskoeffisienten til pukktipe 2 og rør settes til $\mu = 0.65$. Denne verdien er også innenfor standardavvikene fra Tabell 45 og burde derfor være et godt estimat.

Bårgard og Bergsager (2012) sier i sin oppgave at det er vanlig praksis i bransjen å benytte en verdi for friksjonskoeffisienten på $\mu = 0.50$. Resultater fra friksjonsforøkene tyder på at verdien for friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser i realiteten vil være litt høyere.

7.3 Feltforsøk

I det følgende drøftes forsøksmetoden, feilkilder og resultatene fra feltforsøkene som er utført under arbeidet med oppgaven.

7.3.1 Diskusjon av feilkilder

I feltforsøkene utført i denne oppgaven må den største feilkilden sies å være selve utførelsen av forsøkene. Det er svært vanskelig å få like forutsetninger for alle forsøk. Noen av forutsetningene som vil variere kan oppsummeres som:

- Overdekningshøyden
- Graden av komprimering
- Fjæring i hjullasteren benyttet som mothold
- Ulike graderinger på pukken for hver leveranse
- Varierende helning på rør i skrå rørgrøft
- Varierende vinkel på kraften påført røret

I enkelte av forsøkene utført i skrå grøft ble det observert at den optiske forskyvningsmåleren ble forstyrret. Forstyrrelsene kan være forårsaket av:

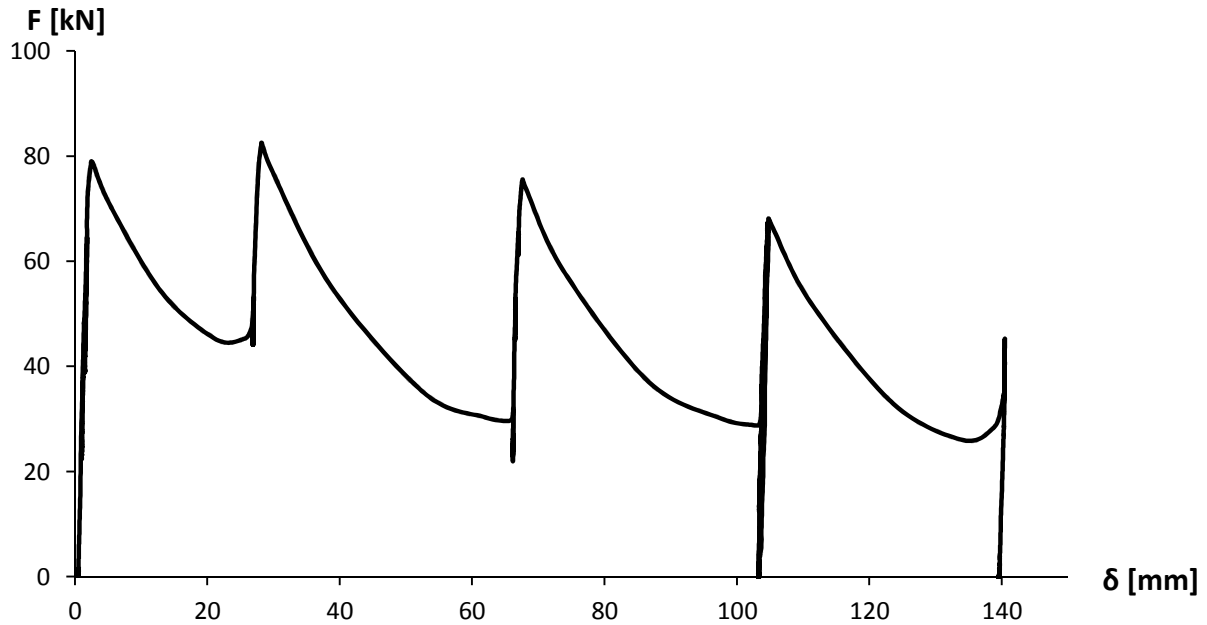
- Elektronisk støy fra andre elektriske apparater
- Støy fra ytre påvirkninger direkte på forskyvningsmåleren
- Forskyvningsmåleren er montert slik at røret blir dratt ut av måleområdet under forsøkene
- Bevegelser i bjelken forskyvningsmåleren er montert på

Alle feilkildene tilsier at det er en svakhet i forsøksriggen som kan gjøre resultatene usikre. I tillegg er røret, under forsøk med skrå grøft, trukket oppover. Det er usikkert hva slags påvirkning dette har på resultatene.

Selv om det er mange momenter som kan skape variasjon i resultatene, er det antatt at riggen benyttet for feltforsøkene i denne oppgaven gir en god representasjon av systemet med rør og omfyllingsmasse i fullskala.

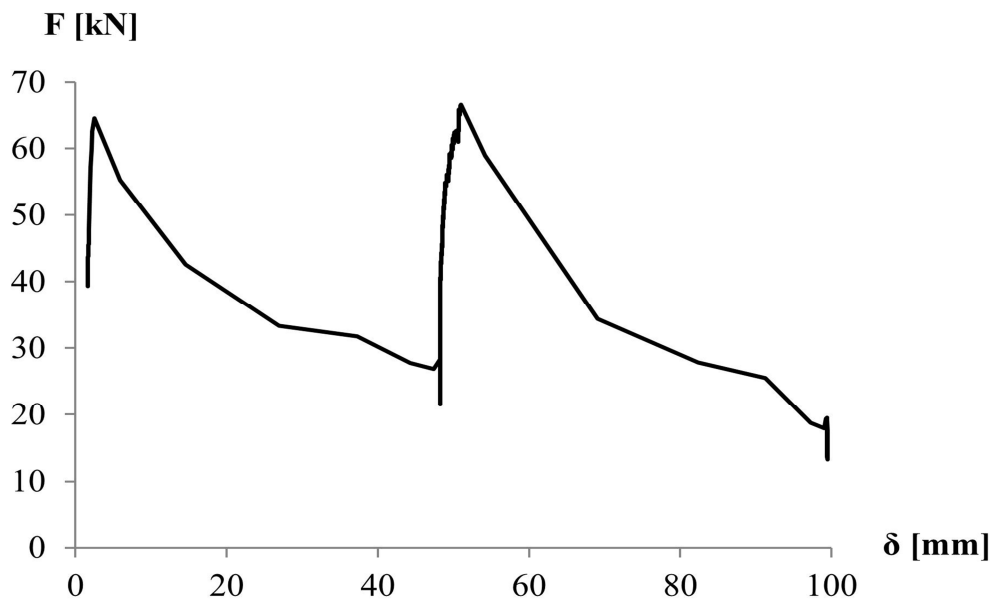
7.3.2 Oppførsel av last- og forskyvningsdiagram fra forsøk utført i horisontal grøft

I denne oppgaven ble det, i den horisontale grøften, kun utført forsøk med komprimerte masser. Figur 7.14 viser last- og forskyvningsdiagrammet til forsøket med, $H/D = 1.5$ og komprimerte masser. Forsøket er utført på røret som ikke overvintret.



Figur 7.14 Last- og forskyvningsdiagram, $H/D = 1.5$, komprimert

Diagrammet viser en økning i bruddlasten fra første til andre glidning. Det samme opplevde også Bårgard og Bergsager (2012) under sine tilsvarende forsøk. Bårgard og Bergsager hadde imidlertid en overdekning, $H/D = 2.0$, i tillegg til at de bare hadde to utglidninger i sine forsøk. Figur 7.15 viser last- og forskyvningsdiagrammet til Bårgard og Bergsagers forsøk.



Figur 7.15 Last- og forskyvningsdiagram, $H/D = 2.0$, komprimert (Bårgard og Bergsager, 2012)

Sammenligner man bruddlasten fra første og andre glidning i Figur 7.14 med bruddlasten fra første og andre glidning i Figur 7.15, ser man at bruddlasten er betraktelig lavere i forsøkene

med høyere overdekning. Sammenlignet med modellforsøkene, er dette motsatt av hva man kunne forvente. Bruddlasten i modellforsøkene med horisontal kasse og hvor massene var komprimert viser at bruddlasten øker med økende overdekning og komprimerte masser. For feltforsøkene viser figurene at bruddlasten reduseres med ca 20 % når massene er komprimert og overdekningen øker. Det er usikkert hva som er årsaken til reduksjonen i bruddlasten, men det kan tenkes at systemet pukk og omfyllingsmasser blir mer påvirket ved lavere overdekning. Det er i tillegg usikkert hvordan Bårgard og Bergsager utførte sin komprimering, slik at komprimeringen kan ha blitt utført på en annen måte når de gjennomførte sine forsøk våren 2012, noe som kan ha påvirket resultatene.

Det er tydelig at bruddlasten i Figur 7.15 er lavere, men samtidig er forskyvningen etter brudd vesentlig større. På grunn av fjæreeffekten som skyldes elastisiteten i mothold, kjetting, sjakler, blindlokk etc., omtalt av Bossel og Haugen (2012), skulle man tro at forskyvningen skulle ha økt når bruddlasten økte. Sammenligner man Figur 7.14 og Figur 7.15 ser man derimot det motsatte. Det er vanskelig å si hva som er årsaken til at forskyvningen ikke øker når bruddlasten øker, når man sammenligner de to figurene. Forsøkene er utført på samme måte, men under forsøk utført i denne oppgaven ble den hydrauliske jekken byttet ut med hjullasterens hydraulikksystem for å påføre deformasjon. Det kan tenkes at bruken av hjullasteren som direkte kraftpåføring har redusert elastisiteten i systemet noe. I tillegg kan lastestroppene som ble satt inn i stedet for jekken ha ført til en reduksjon av elastisiteten i systemet.

Sammenlignet med modellforsøkene utført i laboratorium er det også merkelig å se at bruddlasten i Figur 7.14 avtar etter andre glidning. I modellforsøkene ble det observert at bruddlasten økte for hver glidning. Deformasjonene er imidlertid langt større under feltforsøkene enn under modellforsøkene. Det er derfor vanskelig å sammenligne oppførselen av last- og forskyvningsdiagrammene fra feltforsøkene med last- og forskyvningsdiagrammene fra modellforsøkene.

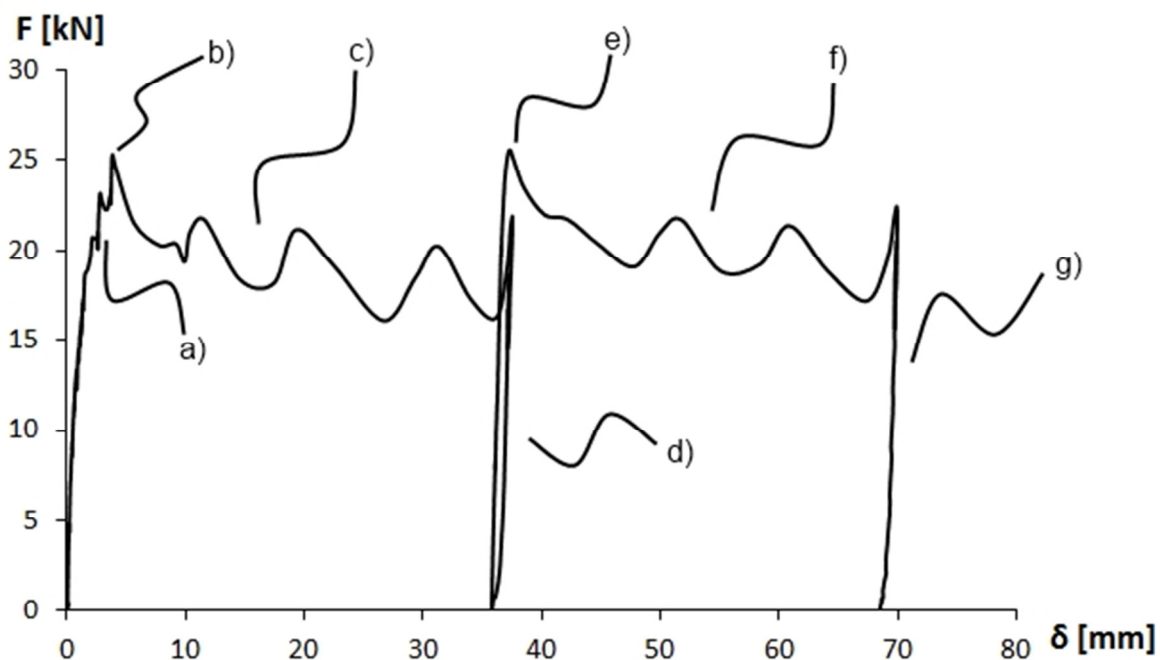
På grunn av deformasjonen for hver glidning, vil lengden normalkraften virker over bli gradvis redusert under feltforsøkene. Dette kan også gi en reduksjon av bruddlasten. Hvis det antas at de tre første målte bruddlastene er representative for forsøket (Figur 7.14), finner man en gjennomsnittlig bruddlast på 13.6 kN/m. Før fjerde forsøk, er nedgravd rørlengde redusert til 5.54 m, dette skulle altså tilsi at bruddlasten skulle ligge i området rundt 75 kN, altså 7 kN høyere enn hva som er målt. Årsaken kan altså neppe være et redusert virkeområde for normalkraften alene. Det er sannsynlig at hjullasteren ikke har påført kraften med samme vinkel under alle fire forsøk. At vinkelen kan ha blitt endret kommer spesielt godt til syne før fjerde glidning, da det har foregått en avlastning før røret er dratt til glidning på nytt. Avlastningen ble forårsaket av at hjullasteren ikke greide å trekke røret til nytt brudd uten først å forankre skuffen på nytt. Dette har sannsynligvis ført til en endring av vinkelen hjullasteren har trukket røret med.

Bossel og Haugen (2012) drøfter i sin oppgave om lastnivået etter at glidningen er stoppet, kunne representere systemets glidefriksjon. I Bossel og Haugens forsøk virket glidningen å stoppe opp ved omtrent samme lastnivå i hvert forsøk. Det samme virker ikke å skje under

forsøkene utført i denne oppgaven. Ut fra modell- og friksjonsforsøk som er utført virker det derimot som at det ikke er noe vesentlig skille mellom glide- og hvilefriksjon, kraften virker tvert i mot å bygge seg opp etter hvert som røret glir. Det er derfor lite trolig at lastnivået, observert når glidningen er stoppet (i feltforsøkene), representerer en glidefriksjon for systemet.

7.3.3 Diskusjon av last og forskyvningsdiagram fra forsøk utført i skrå grøft

Figur 7.16 viser last- og forskyvningsdiagrammet for trekkeforsøket utført i 34° helning med $H/D = 1.5$ og ukomprimerte masser.

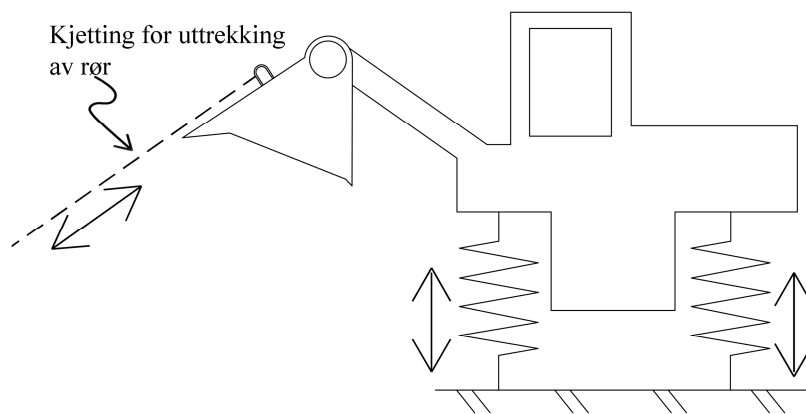


Figur 7.16 Last- og forskyvningsdiagram, $H/D = 1.5$, ukomprimert, 34° helning

Last- og forskyvningsdiagrammet er her delt opp i deler, a) – g) som er med på å illustrere forløpet til forsøket. Røret er to blitt trukket to ganger til glidning. I last- og forskyvningsdiagrammet kan bruddlasten for de to gjennomførte trekkingene av røret leses av som punkt b) og e). Det kan imidlertid se ut til at røret kan ha foretatt noen små rykk før første glidning (område a) i diagrammet). Det er usikkert om dette kommer av at røret faktisk har foretatt små rykk ut av omfyllingsmassen, eller om det er trebjelken hvor forskyvningsmåleren er montert som har beveget seg. I de fleste forsøk ble det ikke observert bevegelse av bjelken med forskyvningsmåleren, men i tilfellet med overdekning, $H/D = 1.5$, skrå rørgrøft og ukomprimerte masser ble det observert en forskyvning mellom stålplaten og bjelken på 0.5 – 1.5 mm (det ble kontrollmålt to steder på bjelken). Friksjonsforsøkene viser også mer «rykkete» oppførsel, så det kan være en effekt av at systemet gradvis gir etter før brudd. Det er imidlertid mer sannsynlig at rykkene i område a) i grafen skyldes effekter av å

bruke hjullasterens hydraulikksystem for å påføre deformasjonen, siden det var vanskelig å få en jevn lastpåføring ved å bruke hjullasteren.

Område c) og f) i diagrammet er glideområdene. I disse områdene glir røret ut av omfyllingsmassen, samtidig som lasten avtar. Årsaken til at dette glideområdet er preget av å gå i bølger, i motsetning til forsøkene i horisontal grøft, skyldes at skuffen til hjullasteren var hevet under forsøkene i den skrå grøften. Når hjullasteren hever skuffen og begynner å påføre last på røret, vil den samtidig presse fjærene til forhjulene nedover og avlaste fjærene til bakhjulene. Når røret glir, avlastes kraften i kjettingen og hjullasterens fjæresystem settes i svingninger. Figur 7.17 illustrerer hvordan svingningene fører til at hjullasteren gradvis spenner og slakker i kjettingen. Forskyvningen måles uavhengig av systemet, og rett på røret, og er derfor upåvirket av svingningene i lasten.



Figur 7.17 Illustrasjon av hvordan hjullasterens fjæresystem påvirker forsøksresultatene

Områdene d) og g) er avlastningsdelene av diagrammet. Skuffen på hjullasteren har da blitt senket, slik at kraften har avtatt. Systemet har altså gått igjennom en avlastning før det er påført deformasjon på nytt.

7.3.4 Diskusjon av resultater fra forsøk utført i horisontal grøft

I Tabell 46 er resultater fra forsøkene utført av både Bårgard og Bergsager (2012), Bossel og Haugen (2012) og resultater fra denne rapporten sammenstilt.

Tabell 46 Resultater fra alle feltforsøk utført i horisontal grøft

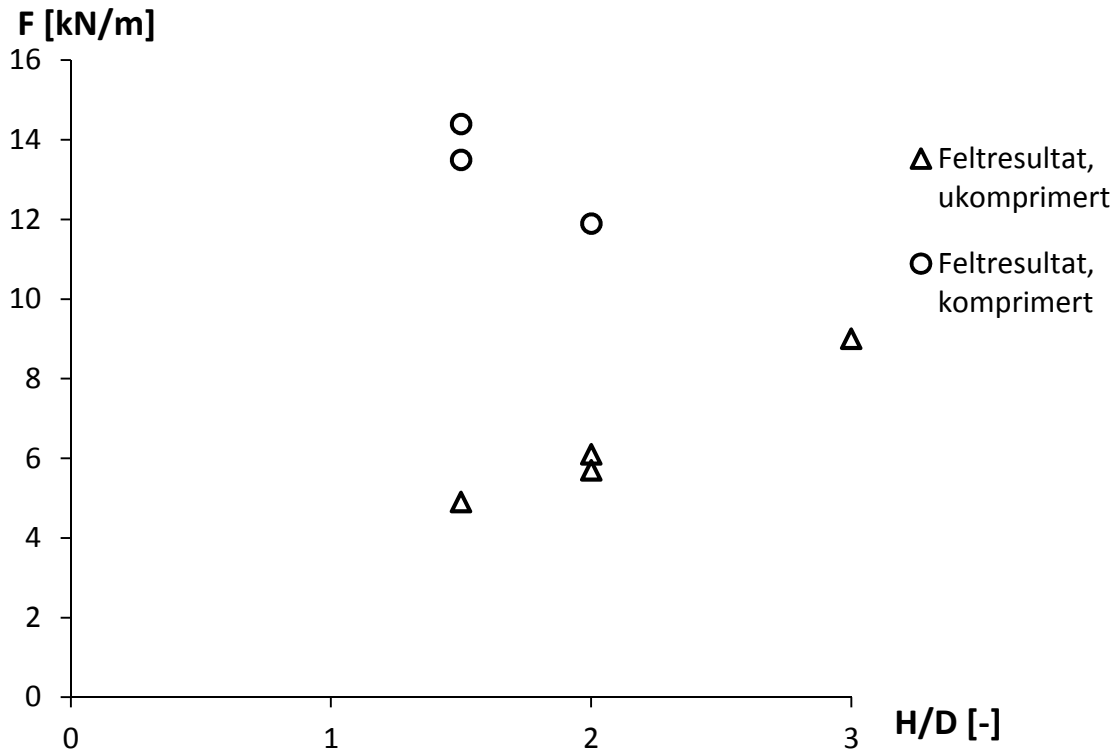
	H/D	Komprimering	Utført	Kapasitet mot glidning [kN/m]
Flatt terreng ($\alpha = 0^\circ$)	1.5	Nei	Høst 2012	4.9
	1.5	Ja	Vår 2013*	14.4
	1.5	Ja	Vår 2013	13.5
	2.0	Nei	Vår 2012	5.7
	2.0	Nei	Høst 2012	6.1
	2.0	Ja	Vår 2012	11.9
	3.0	Nei	Vår 2012	9.0

* Røret er gravd ned høsten 2012, men trukket først våren 2013.

Bruddlasten har variert for hver glidning i alle forsøk. I Tabell 46 er derfor gjennomsnittsverdien for bruddlasten i hvert forsøk beregnet. Unntaket er forsøk nr. 2 med $H/D = 1.5$, komprimerte masser utført våren 2013. Her er bruddlasten fra fjerde glidning utelatt, siden den skiller seg vesentlig ut fra bruddlasten i de tre andre glidningene.

Siden lengden på rørgrøften våren 2012 var ulik lengden på rørgrøften høsten 2012 og våren 2013, er gjennomsnittsverdien for bruddlasten dividert på lengden av rørgrøften. Bruddlasten pr. løpemetere er antatt å være direkte sammenlignbar for alle forsøk.

Figur 7.18 viser alle resultatene fra feltforsøk utført i horisontalt grøft, fremstilt grafisk.



Figur 7.18 Resultater fra alle feltforsøk utført i horisontal grøft, fremstilt grafisk

Fra diagrammet kan man se en tydelig lineær økning i bruddlasten, som funksjon av overdekningen, for ukomprimerte masser. Dette stemmer godt overens med modellforsøkene, hvor samme trend ble observert. De to forsøkene med ukomprimerte masser, $H/D = 2.0$ er diskutert av Bossel og Haugen (2012). I deres oppgave er det konkludert med at avviket mellom disse to forsøkene er innenfor hva man kan forvente med den usikkerheten man har i forsøksoppsettet. Hvis man studerer de to forsøkene utført med komprimering, $H/D = 1.5$ så er bruddlasten målt til henholdsvis 14.4 kN/m og 13.5 kN/m , altså en forskjell på 0.9 kN/m , eller 6.7% . Dette er mindre enn avviket mellom de to forsøkene utført med ukomprimerte masser og $H/D = 2.0$ der avviket var 9% . Det er altså mer trolig at avviket mellom røret som har ligget nedgravd en vinter og røret som har blitt trukket umiddelbart etter nedgravning, skyldes usikkerhet i forsøksoppsett og rigg, enn at tele og frost har gitt endringer i kapasiteten. Det ble heller ikke observert iskrystaller i omfyllingsmassen når røret ble gravd ut, slik at det er lite trolig at røret var frosset fast i omfyllingsmassen og derfor hadde en større kapasitet. Det kan derfor tyde på at komprimeringen faktisk holder seg godt, selv over en vinter. Det skal sies at dette kun er basert på én overvintring, noe som er veldig liten tid i forhold til en rørgate med en dimensjonert levetid på for eksempel 40 år.

7.3.5 Diskusjon av resultater fra forsøk utført i skrå grøft

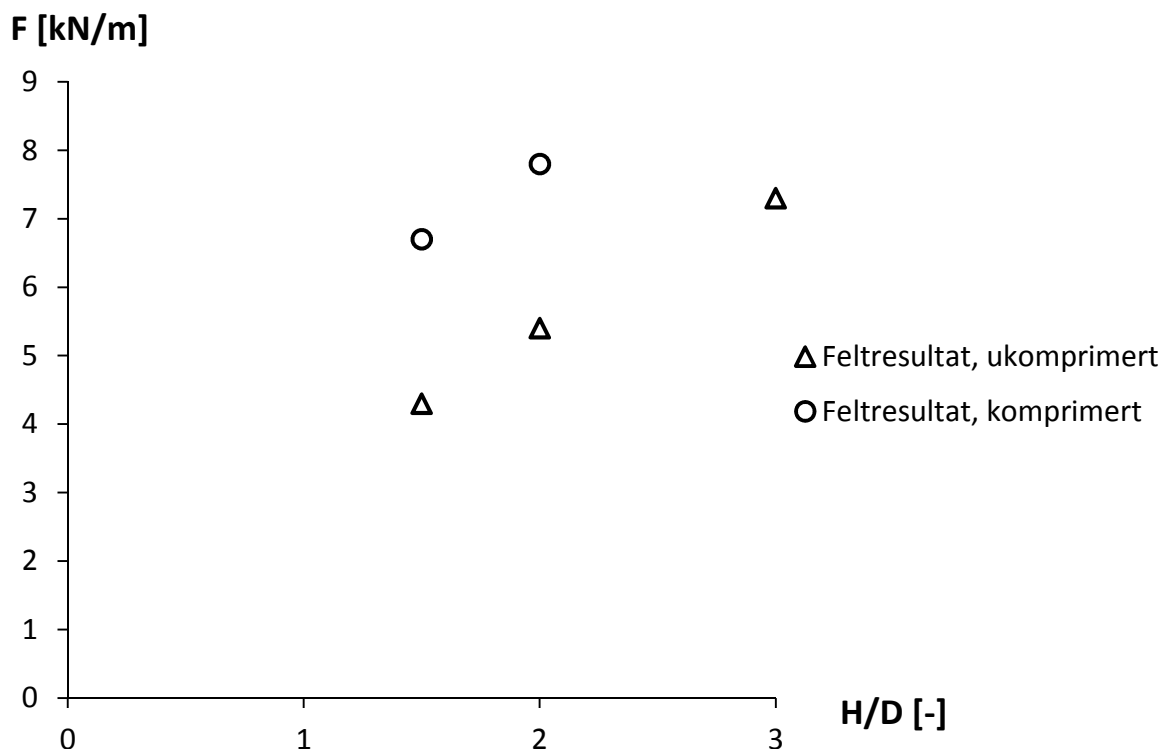
I Tabell 47 er resultater fra forsøkene utført av Bårgard og Bergsager (2012) og resultater fra denne rapporten sammenstilt.

Tabell 47 Resultater fra alle feltforsøk utført i bratt grøft

	H/D	Komprimering	Utført	Kapasitet mot glidning [kN/m]
Bratt terreng ($\alpha = 30 - 34^\circ$)	1.5	Nei	Vår 2013	4.3
	1.5	Ja	Vår 2013	6.7
	2.0	Nei	Vår 2012	5.4
	2.0	Ja	Vår 2012	7.8
	3.0	Nei	Vår 2013	7.3

For å kunne sammenligne resultatene, er gjennomsnittsverdien for bruddlasten i hvert forsøk dividert på grøftelengden for å finne bruddlasten pr. løpemeter. I tillegg er bruddlasten justert for den drivende komponenten fra tyngden av røret, siden røret, i alle forsøk, har blitt trukket oppover i grøften.

Figur 7.19 viser resultatene fra alle trekkeforsøkene utført i skrå grøft fremstilt grafisk.



Figur 7.19 Resultater fra alle feltforsøk utført i bratt grøft, fremstilt grafisk

Fra diagrammet kan man se den samme tendensen som forsøkene utført i horisontal grøft. Bruddlasten pr. løpemeter virker å stige lineært med overdekningen i de tilfellene hvor omfyllingsmassen er ukomprimert. Dette stemmer godt overens med modellforsøkene, hvor

samme trend ble observert. Sammenlignet med forsøkene utført i horisontal grøft, kan man se at kapasiteten er noe redusert for alle forsøkene hvor omfyllingsmassen er ukomprimert. Bruddlasten er f. eks. 0.6 kN lavere ved $H/D = 1.5$, altså en reduksjon på ca 12.2 % sammenlignet med tilsvarende forsøk i horisontal grøft.

Bårgard og Bergsager (2012) foreslår å benytte et forholdstall mellom bruddlast i horisontal og skrå grøft, korrigert for tyngden av røret, som en en forenklet måte å sammenligne forsøkene på. Forholdstallet kan skrives som:

$$\xi = \frac{F_{skrått}}{F_{horisontalt}}$$

(Bårgard og Bergsager, 2012)

Bårgard og Bergsager bruker imidlertid forholdstallet som et sammenligningsgrunnlag for den gjennomsnittlige bruddlasten registrert under forsøkene, og ikke den gjennomsnittlige bruddlasten pr. løpemeter rør. De påpeker selv at dette er unøyaktig siden de to grøftene har ulik lengde. Hvis man benytter bruddlasten pr. løpemeter rør og sammenligner alle forsøkene, finner man et gjennomsnittlig forholdstall på $\xi = 0.86$, hvilket betyr at kapasiteten mot aksiell glidning i skrå grøft er 86 % av kapasiteten mot aksiell glidning i horisontal grøft. Denne måten å sammenligne forsøkene på er fortsatt noe unøyaktig, siden alle forsøk i skrå grøft er utført med ulike helninger. Det er tidligere drøftet at feilkildene i det benyttede forsøksoppsettet kan gi rom for en del usikkerheter i resultatene. Til sammenligning er den tilsvarende verdien for modellforsøkene utført i denne oppgaven på $\xi = 0.33$.

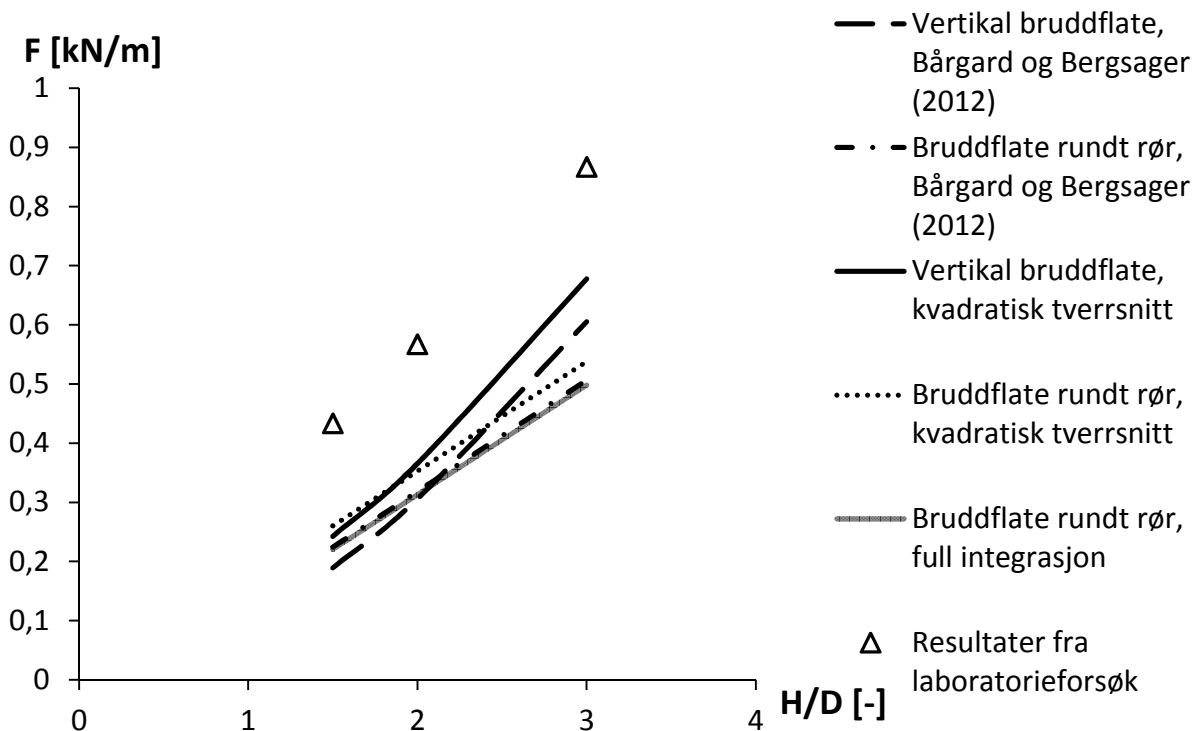
Figur 7.19 viser også at bruddlasten øker når omfyllingsmassene komprimeres. Økningen er imidlertid ikke så høy som ved forsøkene utført i horisontal grøft. Komprimering av omfyllingsmassene viser heller ikke at bruddlasten øker mer ved lav overdekning enn ved høy overdekning, slik som tilfellet var for forsøkene i horisontal grøft. For forsøkene gjennomført med $H/D = 1.5$ i horisontal grøft økes bruddlasten, i snitt, med hele 185 % når omfyllingsmassen komprimeres. Sammenlignet med tilsvarende forsøk utført i skrå grøft er det målt en økning i bruddlasten på 56 % når omfyllingsmassen komprimeres. Den store forskjellen i kapasitetsøkningen kan skyldes utfordringen med å utføre en god komprimering, i tråd med leggeanvisningene, når grøften blir så bratt. Man får kanskje fordelt og ristet omfyllingsmassen bedre på plass rundt røret, men det er vanskelig å komprimere så godt at man øker normalspenningen rundt røret (altså etablerer et passivt jordtrykk) i den skrå rørgrofta.

7.4 Sammenligning mellom forsøk og beregningsmodeller

I dette kapitlet sammenlignes og drøftes resultater fra modell- og feltforsøk med beregningsmodellene presentert i kapittel 3.3.

7.4.1 Sammenligning av modellforsøk med horisontal kasse og beregningsmodeller

Figur 7.20 viser bruddlasten fra modellforsøkene utført med rør med diameter, $d = 100$ mm og ukomprimerte masser som funksjon av overdekningen, H/D . Kapasiteten gitt fra beregningsmodellene er vist med linjer. Bruddlasten ved komprimering av omfyllingsmassene er tidligere diskutert, og vil ikke bli drøftet videre. Ved beregning av kapasiteten av nedgravde rørgater er det, i henhold til retningslinjer fra NVE, ikke lov å regne med passivt jordtrykk, slik at beregningsmodellen antar løst lagrede (ukomprimerte) masser.



Figur 7.20 Sammenligning av horisontale modellforsøk, rør $d = 100$, med beregningsmodeller

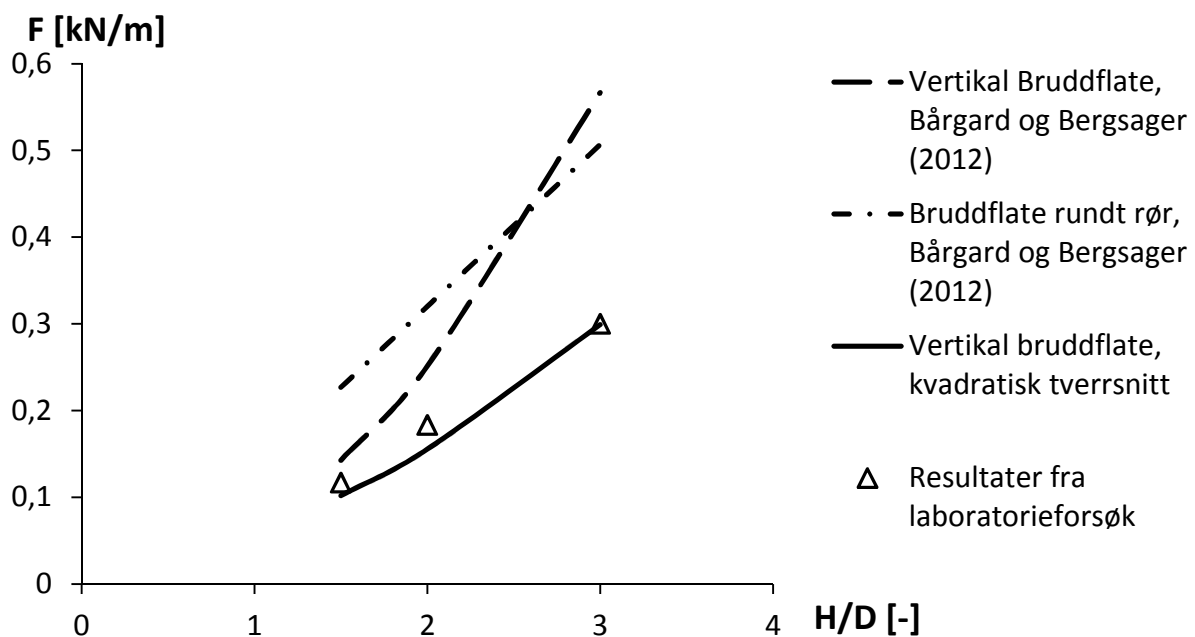
Figur 7.20 viser at samtlige beregningsmodeller underestimerer kapasiteten målt i modellforsøkene, med forutsetningene som nevnt innledningsvis (linjene ligger konsekvent under bruddlasten fra forsøkene). I beregningsmodellene er det antatt en friksjonskoeffisient på $\mu = 0.60$ og en friksjonsvinkel for massene på $\varphi = 40^\circ$. Friksjonskoeffisienten ble ikke målt for massene benyttet under modellforsøkene, men det er valgt å benytte en verdi for friksjonskoeffisienten, $\mu = 0.60$ på bakgrunn av friksjonsforsøk utført med omfyllingsmassen benyttet i feltforsøkene. Det er beregningsmodellen med vertikal bruddflate og kvadratisk

tverrsnitt som gir et mest korrekt estimat, men modellen underestimerer likevel kapasiteten med en kraft på ca. 0.25 kN/m for alle overdekninger.

Beregningsmodellen fra Eiksund et. al. (2013) gir omtrent de samme resultatene som beregningsmodellene med bruddflate rundt rør fra Bårgard og Bergsager (2012), og videre i sammenligningene vil derfor kun én av dem benyttes. Beregningsmodellen med bruddflate rundt rør og kvadratisk tverrsnitt gir et litt høyere estimat for bruddlasten enn bruddflate rundt rør fra Bårgard og Bergsager (2012). Forskjellen mellom estimatene fra de to modellene er imidlertid så små at bruddflate rundt rør og kvadratisk tverrsnitt er utelatt i de videre sammenligningene.

7.4.2 Sammenligning av modellforsøk med kasse i 35° helning og beregningsmodeller

Figur 7.21 viser bruddlasten fra modellforsøkene utført med rør med diameter, $d = 100$ mm og ukomprimerte masser som funksjon av overdekningen, H/D . Kapasiteten gitt fra tre av beregningsmodellene vist sammen med resultatene.



Figur 7.21 Sammenligning av modellforsøk i 35° helning, rør $d=100$, med beregningsmodeller

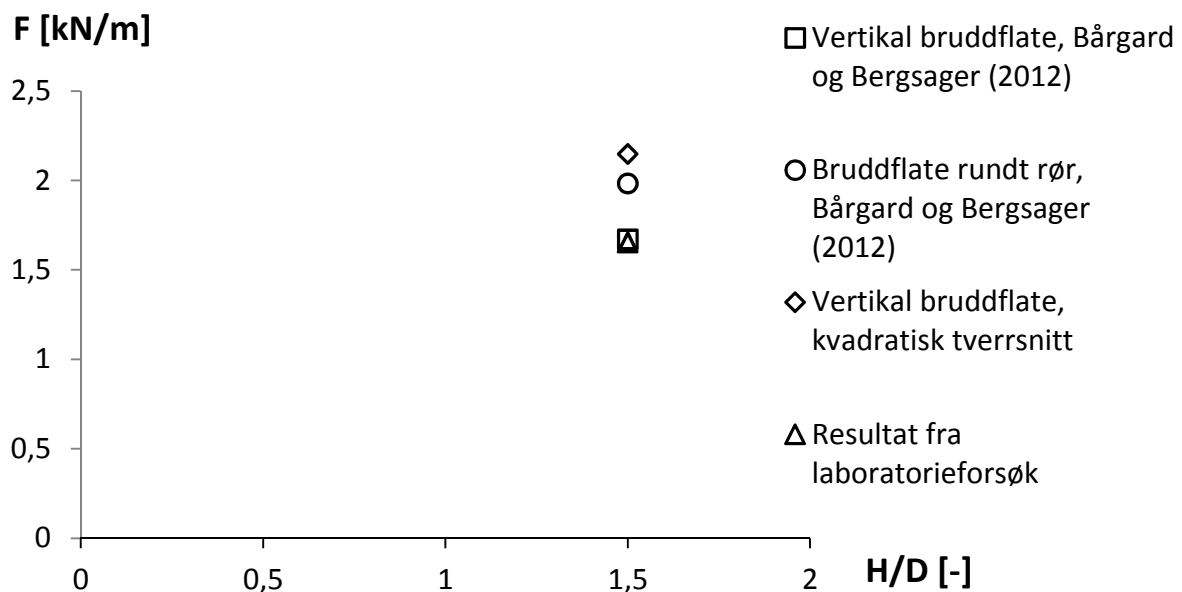
Figur 7.21 viser at beregningsmodellen med vertikale bruddflater fra Bårgard og Bergsager (2012) gir et godt estimat ved den laveste overdekningen, men for de høyere overdekningene overestimerer beregningsmodellen kapasiteten betraktelig. Det er beregningsmodellen med vertikal bruddflate og kvadratisk tverrsnitt som gir desidert best estimat for bruddlasten. Dette skyldes justeringen nevnt i kapittel 3.3, der beregningsmodellen med vertikal bruddflate og kvadratisk tverrsnitt multipliseres med faktoren $\sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)}$ i beregningen av

friksjonskraften innad i massene, langs de to vertikale bruddflatene. Figur 7.21 viser dermed at omfyllingsmassene vil miste evnen til å etablere god friksjon mot en nedgravd rørgate når skråningshelningen øker.

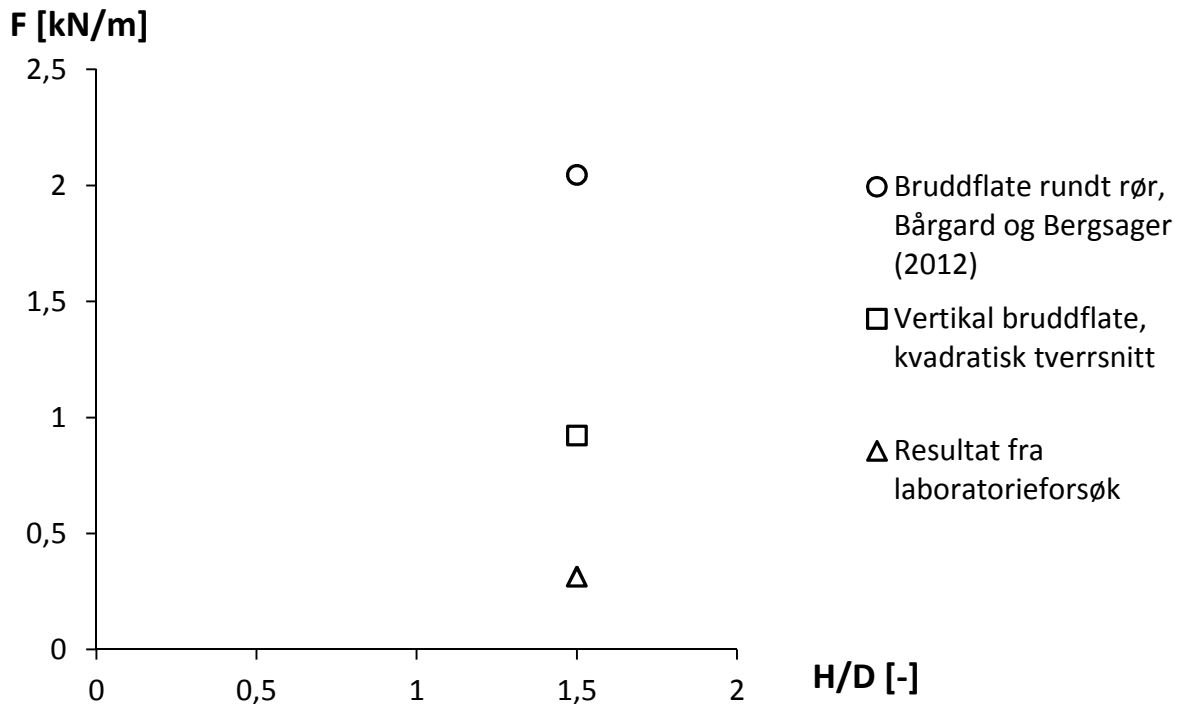
Bårgard (2011) viser at enkelte av beregningsmodellene brukt i dagens bransje vil kunne gi en tilstrekkelig kapasitet ved hele 55° helning av rørgaten. Med den nye antagelsen vil dette være umulig, da beregningsmodellen ikke kan benyttes for helninger større enn friksjonsvinkelen til massene. Dette er en veldig fornuftig antagelse, siden omfyllingsmassen i rørgrøften vil rase ut i det helningen blir større enn friksjonsvinkelen til massene.

7.4.3 Sammenligning av modellforsøk med rør, d = 300 mm, og beregningsmodeller.

Figur 7.22 og Figur 7.23 viser bruddlasten fra modellforsøkene utført med rør med ukomprimerte masser som funksjon av overdekningen, H/D. Figur 7.22 viser resultat fra forsøkene utført med horisontal kasse, og Figur 7.23 fra forsøkene utført med kassen i 35° helning. Kapasiteten gitt fra noen av beregningsmodellene er vist sammen med resultatene.



Figur 7.22 Sammenligning av modellforsøk med horisontal kasse, rør d = 300, med beregningsmodeller



Figur 7.23 Sammenligning av modellforsøk i 35 helning, rør d = 300, med beregningsmodeller

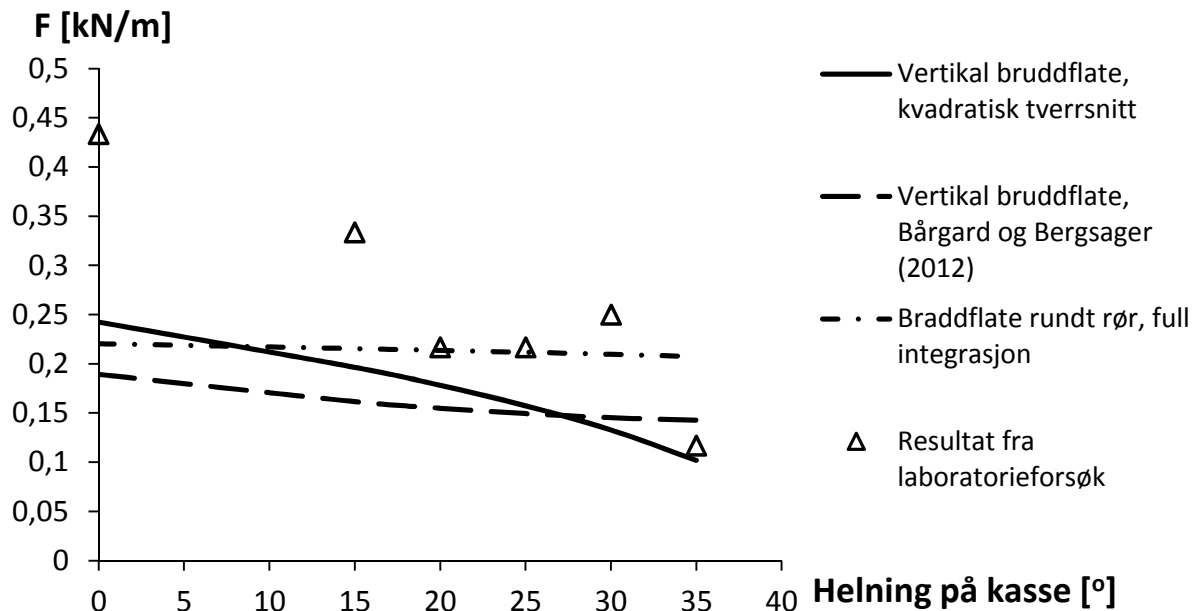
Figur 7.22 viser at beregningsmodellen med vertikal bruddflate fra Bårgard og Bergsager (2012) gir et meget godt estimat for bruddlasten for forsøket utført med horisontal kasse. Resten av beregningsmodellene overestimerer kapasiteten med 25 – 50 %.

Figur 7.23 viser at samtlige beregningsmodeller overestimerer kapasiteten når forsøket utføres med røret i 35° helning. Beregningsmodellen med vertikal bruddflate og kvadratisk tverrsnitt gir best estimat, men gir likevel en kapasitet på over 150 % av det som virkelig er målt.

Det ble kun utført én forsøksserie både med horisontal kasse og kasse i helning med dette røret, så det er vanskelig å konkludere med hvilken beregningsmodell som gir best estimat.

7.4.4 Sammenligning av modellforsøk med varierende helning og beregningsmodeller

Figur 7.24 viser bruddlasten fra modellforsøkene utført med rør med diameter, $d = 100$ mm og ukomprimerte masser som funksjon av helningen på kassen. Kapasiteten gitt fra tre av beregningsmodellene er vist sammen med resultatene.

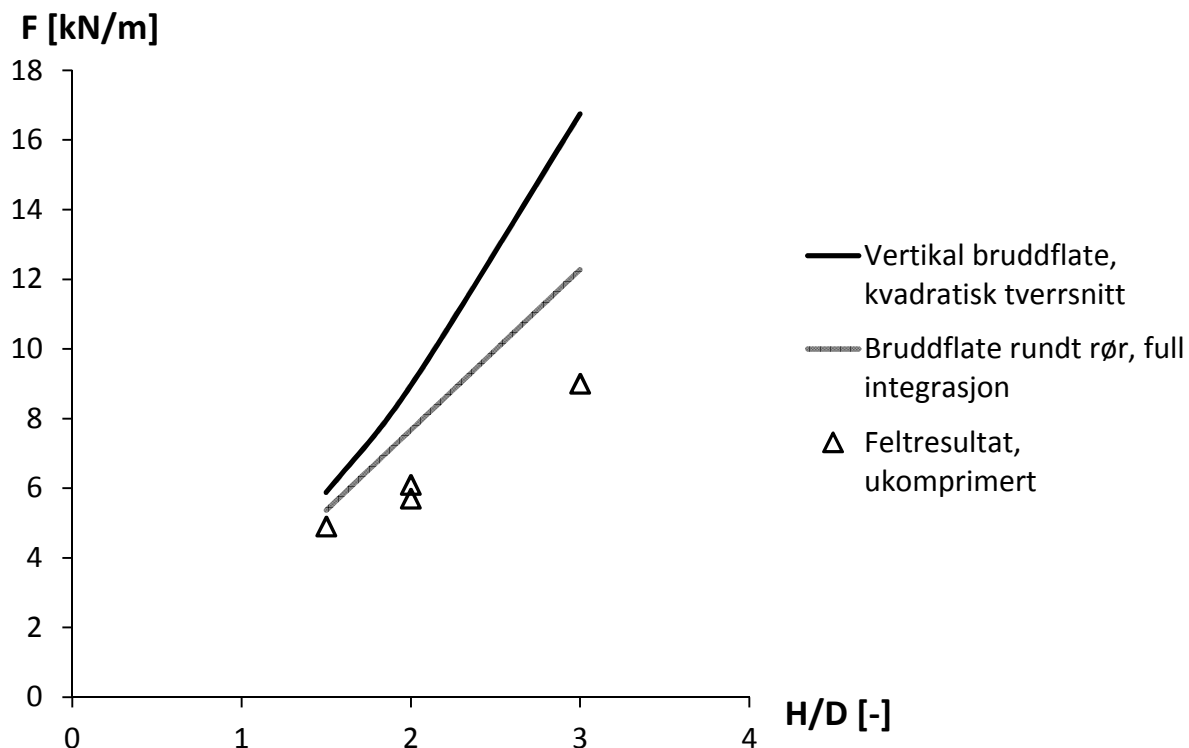


Figur 7.24 Sammenligning av modellforsøk med varierende helning, rør $d = 100$, med beregningsmodeller

Figur 7.24 viser at bruddlasten avtar etter hvert som helningen på kassen øker. Resultatene fra de ulike beregningsmodellene viser at det er modellen med vertikal bruddflate og kvadratisk tverrsnitt som gir det beste bildet av variasjonen i bruddlasten som funksjon av helningen.

7.4.5 Sammenligning av feltforsøk i horisontalt grøft og beregningsmodeller

Figur 7.24 viser bruddlasten fra feltforsøkene i horisontal grøft med ukomprimerte masser som funksjon av overdekningen, H/D . Kapasiteten gitt fra to av beregningsmodellene er vist sammen med resultatene. I beregningsmodellene er det antatt en friksjonskoeffisient, $\mu = 0.62$, i henhold til resultatene fra friksjonsforsøkene omtalt tidligere. Friksjonsvinkelen til massene er antatt, $\phi = 42^\circ$, som er målt av Bårgard og Bergsager (2012).

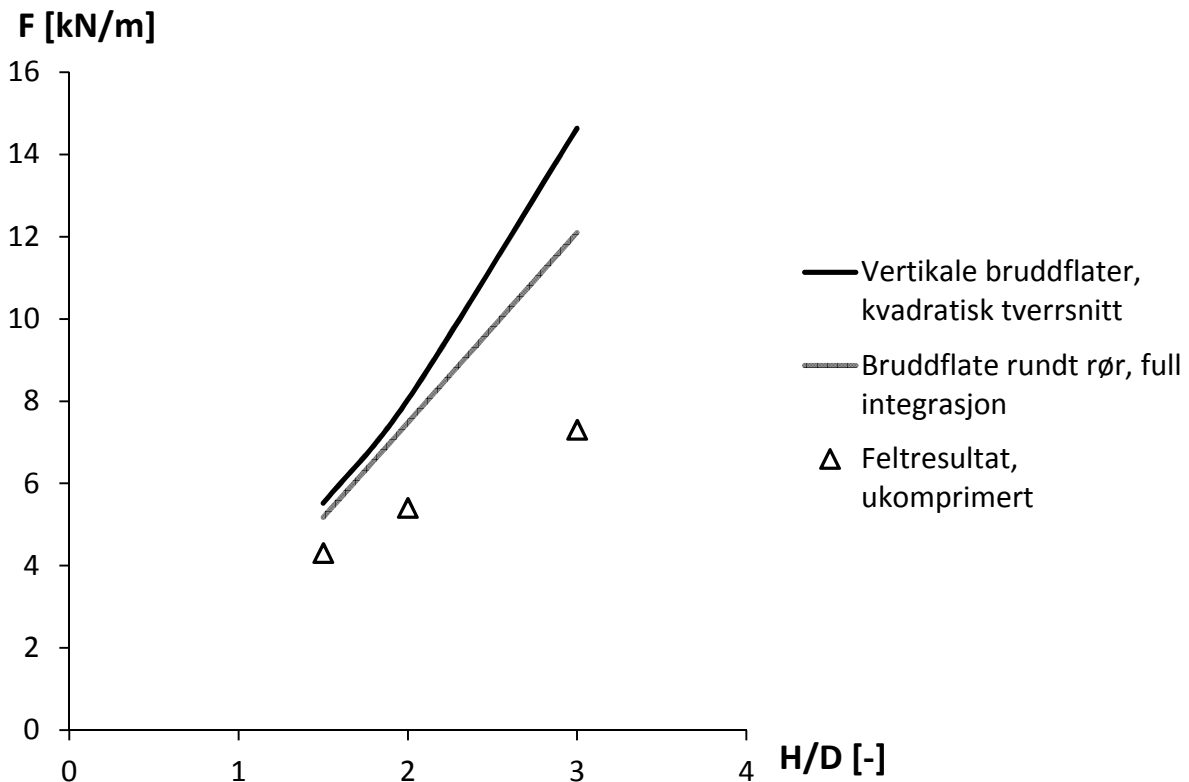


Figur 7.25 Sammenligning av feltforsøk i horisontal grøft med beregningsmodeller

Figur 7.25 viser at beregningsmodellene overestimerer bruddlasten fra forsøkene utført i felt med horisontal grøft. Fra figuren er det tydelig at det er beregningsmodellen med bruddflate rundt rør og full integrasjon som gir best estimat for bruddlasten, selv om det skal legges til at den fortsatt overestimerer kapasiteten betraktelig. Feilmarginen øker i tillegg med økende overdekning. Dette er den samme trenden som tidligere er vist av Bårgard og Bergsager (2012) og Bossel og Haugen (2012). Det er vanskelig å si om det er usikkerhet i forsøksmetoden i felt eller feil antagelser i beregningsmodellene som er årsaken til avviket i resultatene. Forklaringen kan være at beregningsmodellene ikke er i stand til å gjenspeile betydningen av rørets diameter. Beregningsmodellene underestimerer kapasiteten for modellforsøkene med horisontal kasse og et relativt lite rør, og overestimerer kapasiteten for feltforsøkene utført i horisontalt rørgroft og større rør.

7.4.6 Sammenligning av feltforsøk i bratt grøft med beregningsmodeller

Figur 7.26 viser bruddlasten fra feltforsøkene i skrå grøft for ukomprimerte masser som funksjon av overdekningen, H/D . Kapasiteten gitt fra to av beregningsmodellene er vist sammen med resultatene.



Figur 7.26 Sammenligning av feltforsøk i skrå grøft med beregningsmodeller

Som Figur 7.26 viser, overestimerer beregningsmodellene bruddlasten også for feltforsøkene utført i skrå rørgroft. I likhet med feltforsøkene utført i horisontalt rørgroft er det beregningsmodellen med bruddflate rundt rør og full integrasjon som gir best estimat av bruddlasten.

Beregningsmodellen med vertikale bruddflater og kvadratisk tverrsnitt stemte godt for modellforsøkene med kasse i 35° helning, så det er usikkert hva som gjør at den overestimerer bruddlasten i feltforsøkene. Dette kan tyde på at forsøksoppsettet i feltforsøkene i skrå grøft kan gi noe usikre resultater, og kanskje ikke gjenspeiler oppførselen av en reell rørgate like godt som man kanskje skulle tro. Det kan også tenkes at avviket mellom beregningsmodellen, modellforsøkene og feltforsøkene kan skyldes ukjente skalaeffekter.

Som nevnt under kapittel 7.3.5 er det valgt å trekke fra vekten av røret i resultatene fra forsøkene utført i skrå grøft, siden røret ble trukket oppover grøften. Det kan tenkes at denne antagelsen har ført til noe av avviket mellom beregningsmodeller og resultater. I beregningsmodellene med vertikal bruddflate kan det tenkes at man også burde trukket fra

den drivende kraften fra vekten av omfyllingsmassene, men dette hadde ført til et enda større avvik mellom modellene med vertikal bruddflate og resultater.

7.5 Sammenligning av modell- og feltforsøk

Det er av stor interesse å se på hvor godt bilde modellforsøkene kan gi for en virkelig rørgate. Det er tidligere drøftet hvor godt estimat feltforsøkene egentlig gir av en reell rørgate, men det er likevel feltforsøkene som må benyttes som sammenligningsgrunnlag for modellforsøkene.

For å sammenligne modell- og feltforsøkene er det forsøkt å skalere opp resultatene for bruddlasten i modellforsøkene og sammenligne med resultatene for bruddlasten oppnådd i feltforsøkene.

Det er forsøkt å skalere opp modellforsøkene geometrisk, med rørdiameteren som utgangspunkt etter følgende formel:

$$\frac{F_{felt}}{F_{modell}} = \frac{D_{felt}}{D_{modell}}$$

Ved å snu om på ligningen finner man at:

$$F_{felt} = \frac{D_{felt}}{D_{modell}} * F_{modell}$$

Forholdet mellom D_{felt} og D_{modell} blir da en skaleringsfaktor, k , i sammenligningen:

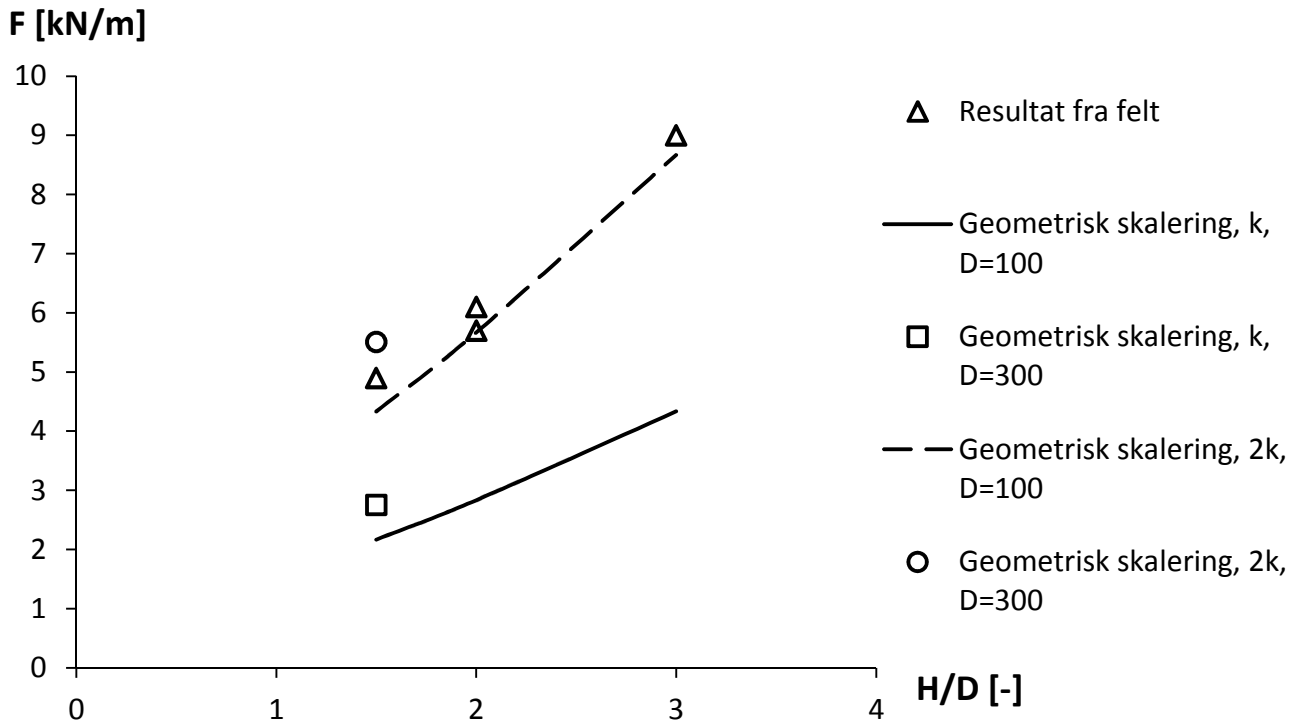
$$F_{felt} = k * F_{modell}$$

Der:

$$k = \frac{D_{felt}}{D_{modell}}$$

Verdien av k blir $k = 5.0$ for forsøkene utført med rør, $d = 100$ mm, og $k = 5/3$ for forsøkene utført med rør, $d = 300$ mm.

Figur 7.27 viser bruddlasten fra modellforsøkene med horisontal kasse oppskalert med en verdi av henholdsvis k og $2 * k$, sammenlignet med bruddlasten fra feltforsøkene utført i horisontal grøft.



Figur 7.27 Bruddlaster ved geometrisk skalering

Figur 7.27 viser at en direkte skalering av modellforsøkene med en geometrisk skaleringsfaktor gir dårlig samsvar med feltforsøkene. Derimot gir en skalering med den doble verdien av skaleringsfaktoren ($2k$) et relativt godt resultat. Det kan være flere årsaker til at en direkte skalering med en geometrisk skaleringsfaktor gir et dårlig resultat.

Modellforsøkene i laboratorium er gjort med samme type rør og samme type omfyllingsmasser (pukk) som feltforsøkene. Resultatene er derfor udiskutabelt viktige for de inngående komponentene. At oppskalering derfor ikke kan gjøres direkte med en geometrisk faktor kan derfor skyldes andre faktorer som skala- og laboratorieeffekter.

I modellforsøkene er det valgt å benytte et mindre rør ($d = 100$ mm). I feltforsøkene er det benyttet et større rør ($d = 500$ mm). Det er benyttet en mindre pukk i modellforsøkene for å sikre et godt kontaktareal mellom rør og omfyllingsmasser. Det kan tenkes at dette vil gi skalaeffekter man ikke har tenkt over. Det er svært vanskelig å nedskalere omfyllingsmassen etter samme prinsipp som diameteren, siden en nedskalering av omfyllingsmassen vil gjøre at man må ned på fraksjoner som kan endre egenskapene av omfyllingsmassen fra ikke- kohesiv til kohesiv. Modellforsøkene ville ikke kunne representere en reell rørgate på samme måte hvis det hadde blitt benyttet kohesive masser. Forskjellen i fraksjonen på pukken vil kunne føre til skalaeffekter som kan tenkes å påvirke resultatene.

Det kan også tenkes at resultatene fra feltforsøkene er påvirket av laboratorieeffekter. For eksempel er det benyttet en hjullaster til å trekke røret ut av grøften. Lastpåføringen av røret har dermed foregått mye raskere og neppe med helt jevn hastighet. I modellforsøkene har

lastpåføringen foregått med en jevn og rolig hastighet. Det kan tenkes at dette har påvirket resultatene i begge retninger, slik at en skalering blir vanskelig.

Det skal sies at man skal være svært forsiktig ved bruk av den målte skaleringsfaktoren ($2 * k$). Faktoren er kun basert på modellforsøkene utført i denne oppgaven, og det burde gjennomføres forsøk med flere rørdiameterer før man konkluderer med at dette er den gjeldende faktoren.

Det har også blitt forsøkt å finne en skaleringsfaktor etter samme metode for modellforsøkene utført med kassen i helning. Skaleringsfaktoren ble imidlertid meget høy (opp mot $5 * k$), og gav ikke den samme utviklingen som funksjon av overdekningen som resultatene fra feltforsøkene. En grunn til dette kan være at røret har blitt trukket i ulik retning i modellforsøkene og feltforsøkene. Selv om det er tatt hensyn til dette i drøftingen av resultatene fra feltforsøkene, kan det tenkes at det å trekke røret i ulike retninger påvirker resultatene i så stor grad at det gjør skaleringen vanskelig.

Røret som er benyttet under feltforsøkene har også fått en hardere påkjenning etter flere opp- og nedgravninger. Det kan tenkes at dette kan ha påvirket overflaten til røret. Friksjonskoeffisienten målt i friksjonsforsøkene er gjort på et rør som ikke kan sies å være like slitt som røret benyttet under feltforsøkene. Det er usikkert om dette har hatt noen innvirkning på friksjonskoeffisienten.

8. Konklusjon

Det er drøftet om oppsettet benyttet under modellforsøkene gir gode og nøyaktige verdier for bruddlasten. Gjentakelsesverdien i forsøkene utført med kassen horisontalt, er ansett som meget god. For forsøkene utført med kassen i helning, er det påvist at kassens ende påvirker resultatene etter hvert som forsøkene utføres. Bruddlasten er hentet ut fra det første forsøket i hver forsøksserie, da endeeffektene anses å ikke påvirke resultatene i særlig grad. Forsøksoppsettet er derfor vurdert å gi realistiske verdier for bruddlasten til en rørgate med samme rørdiameter som er benyttet i modellforsøkene.

Resultater fra modellforsøk med varierende helning viser at omfyllingsmassen rundt røret mister sin evne til å etablere en god forankring for rørgaten når skråningshelningen øker. Kapasiteten reduseres drastisk jo nærmere skråningshelningen kommer friksjonsvinkelen til massene. Dette viser at en justering, av beregningsmodellene med vertikal bruddflate, med en faktor $\sqrt{\tan^2(\varphi) - \tan^2(\alpha)}$, der φ er friksjonsvinkelen til massene og α er helningen på røret, vil gi beregningsmodellene en mer realistisk forutsetning for beregningene av friksjonskapasiteten når helningen øker.

Resultater fra friksjonsforsøk utført i laboratorium tyder på at verdien for friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser i svært liten grad blir påvirket av at omfyllingsmassene komprimeres. Det er utført forsøk med to ulike pukktyper, og friksjonskoeffisienten mellom rør og omfyllingsmasser er, for begge pukktypene, målt til å være, $\mu > 0.60$. Feilkildene i forsøksoppsettet for friksjonsforsøkene er ansett å ha liten betydning for resultatene.

Samlede resultater fra forsøk utført i felt, viser at beregningsmodellene som benyttes for å beregne stabiliteten av en nedgravd rørgate forankret på friksjon fra omfyllingsmasser, overestimerer bruddlasten, både for forsøk utført i horisontal og bratt rørgroft. Det er antatt at overestimeringen kommer av at beregningsmodellene ikke klarer å simulere det komplekse spenningsbildet rundt røret. Ved komprimering av omfyllingsmassene øker kapasiteten betraktelig, og den øker i større grad ved lav overdekning enn ved høyere overdekninger. Det drøftes flere mulige årsaker, hvor en økning av normalspenningen rundt røret anses å være hovedårsaken til den økte kapasiteten.

Bruddlasten fra modellforsøk utført med horisontal kasse kan, med relativt godt resultat, oppskaleres til bruddlasten målt i feltforsøkene, ved bruk av en skaleringsfaktor, $k = 2 * D_{felt}/D_{modell}$. For modellforsøk utført med kasse i helning, har det ikke lyktes å oppskalere bruddlasten for å simulere bruddlasten målt i bratt terreng i feltforsøk.

9. Videre arbeid

Det antas at forskjellen mellom beregningsmodeller og feltforsøk skyldes at beregningsmodellene ikke klarer å beskrive spenningsfordelingen rundt røret godt nok, verken for komprimerte eller ukomprimerte omfyllingsmasser. Forsøk, både i fullskala og modell, hvor spenningene mot røret måles med sensorer, er derfor et forslag til videre arbeid, hvor resultatene kan brukes for å justere beregningsmodellene. Forsøkene vil også kunne avdekke om tilnærmingen med hviletrykkskoeffisienten, K_0 , i beregningsmodellene virkelig beskriver forholdet mellom horisontal- og vertikalspenningene mot røret i en rørgroft.

Det anbefales også at det utføres flere modellforsøk med varierende helning for å sikre et bedre datagrunnlag, slik at det, med større sikkerhet, kan konkluderes hvordan bruddlasten endres med økende helning.

For å bedre brukbarheten av modellforsøkene må det utarbeides en metode for å kunne skalere opp forsøkene, både med horisontal og skrå forsøkskasse, slik at de kan gi gode og entydige resultater for en reell rørgate. Dette kan i første omgang tenkes gjennomført som et litteraturstudie for å finne ut av hvordan faktorer som rørets ruhet, omfyllingsmassenes fraksjoner og andre faktorer påvirker skaleringen.

I et mer langsiktig perspektiv kan det også tenkes å modifisere riggen brukt under feltforsøkene og utføre flere fullskala forsøk, spesielt i bratt terreng, for å sikre resultater med bedre kvalitet. Det kunne for eksempel benyttes en hydraulisk semitipp med høyere og forsterkede karmen som utgangspunkt for grøften. På denne måten kunne man lagt ned røret i flatt terreng for deretter å løfte det opp til ønsket helning. Ved en slik løsning kan man også montere på en aktuator som sørger for at røret trekkes ut av omfyllingsmassen med en jevn hastighet. En slik løsning vil ha flere fordeler:

- Raskere fylling og tømning av omfyllingsmasse i grøften
- Større sikkerhet i helningen av grøft og grøftesåle
- Røret kan trekkes nedover i grøften
- Utførelse med varierende helning uten at det trengs å grave ny grøft
- Enklere å utføre komprimering
- Unngå fjæreeffekter fra hjullasterens fjærer og elastisitet i tilkoblingen mellom rør og mothold.

10. Kilder

- Bergsager, H. (2011) *Nedgravde rørgater i bratt terreng, beregningsmetoder*, Prosjektoppgave. Institutt for konstruksjonsteknikk, Trondheim.
- Bossel, E. og Haugen, M. (2012) *Stabilitet av nedgravde rørgater*, Prosjektoppgave. Institutt for vann- og miljøteknikk, Trondheim.
- Bårgard, E. (2011) *Rørgater i bratt terreng*, Prosjektoppgave. Institutt for vann- og miljøteknikk, Trondheim.
- Bårgard, E. og Bergsager, H. (2012) *Forankring av rørgater i bratt terreng*, Institutt for konstruksjonsteknikk, Trondheim.
- Eiksund et. al. (2013) 'Full-Scale Tests of Axial Friction on Pipelines in Rock Berms', *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(1).
- Elstad, I. et. al. (2011) *Retningslinjer for stenge- og tappeorganer, rør og tverrslagsporter*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)
- Emdal, A. (2008) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim: Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Flowtite (2013) *Installation Guide for Buried Pipes* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.flowtite.no/Installation-General-installation-Buried.aspx> (Hentet: Januar 2013)
- Irgens, F. (1999) *Formelsamling, mekanikk*. 3. utg. Trondheim: Tapir akademisk forlag.
- Standard Norge (1998) *NS-EN ISO 4287:1998 - Geometriske produktspesifikasjoner (GPS)*. Oslo: Standard Norge (1-1999)
- Wijewickreme, D. et. al. (2009) 'Response of buried steel pipelines subjected to relative axial soil movement', *Canadian Geotechnical Journal*, volum (46), s. 735 – 752
- Walpol et. al. (2007) *Probability & Statistics for Engineers and Scientists*. 8. utg. NJ, US: Pearson Prentice Hall.

11. Vedlegg

A: Last- og forskyvningsdiagrammer modellforsøk.....	130
B: Last- og forskyvningsdiagrammer friksjonsforsøk.....	143

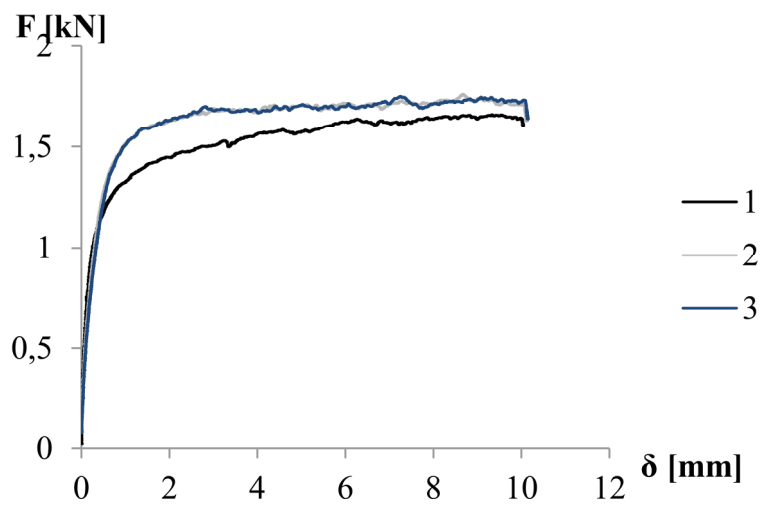
Vedlegg A- Last og forskyvningsdiagram modellforsøk

Horisontal kasse

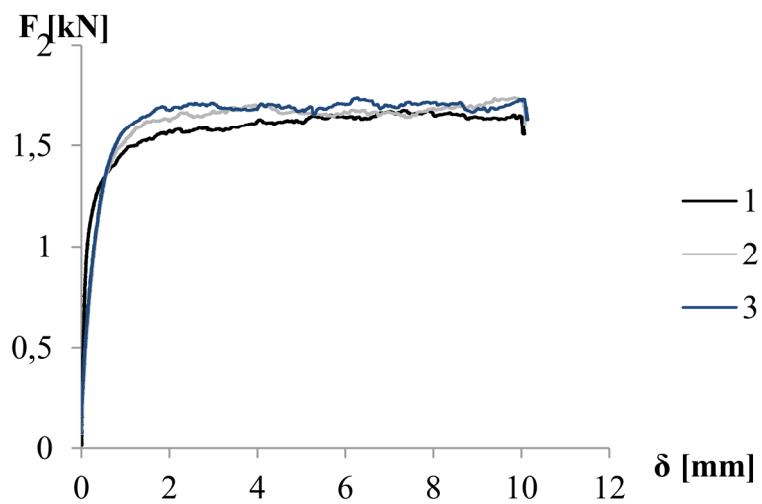
Ukomprimert

H/D = 1.5

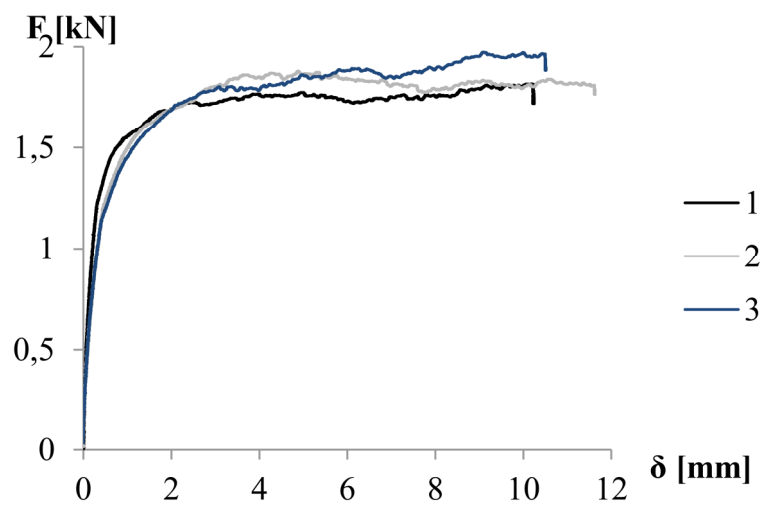
Serie 1



Serie 2

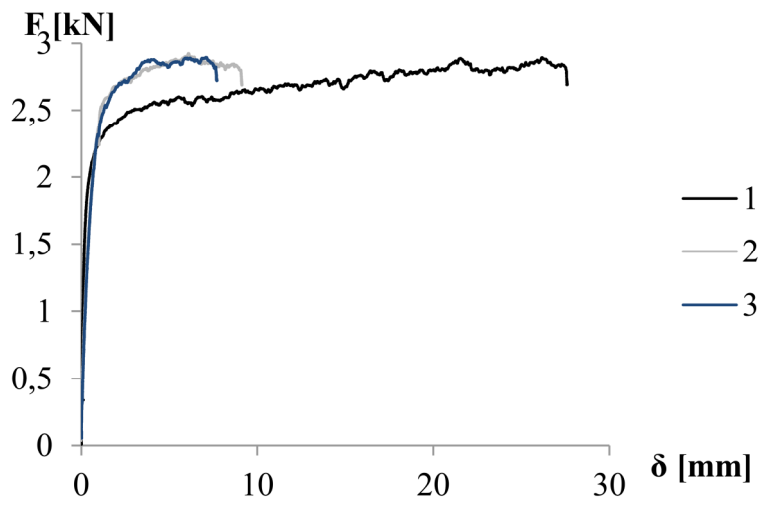


Serie 3

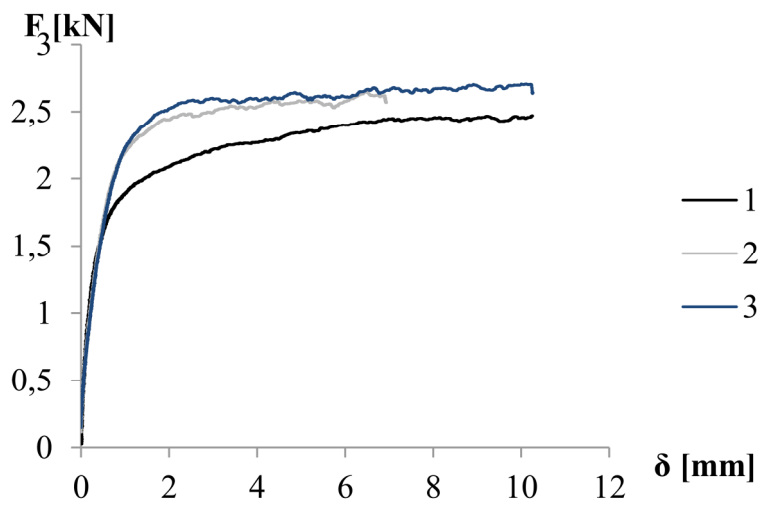


H/D = 2.0

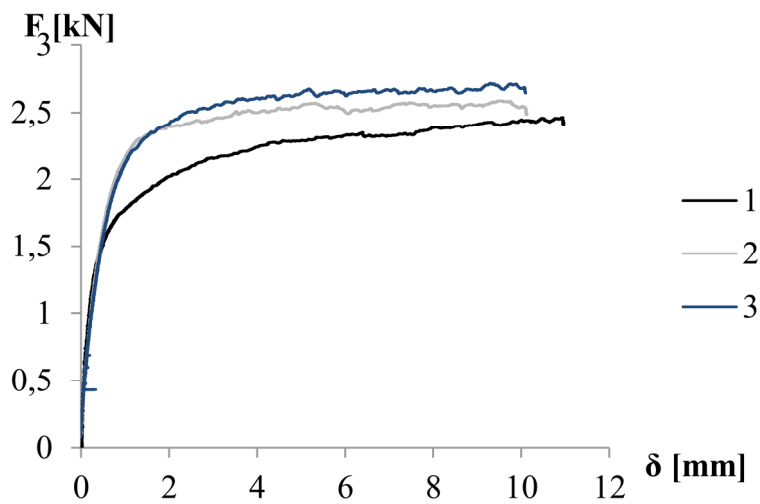
Serie 1



Serie 2

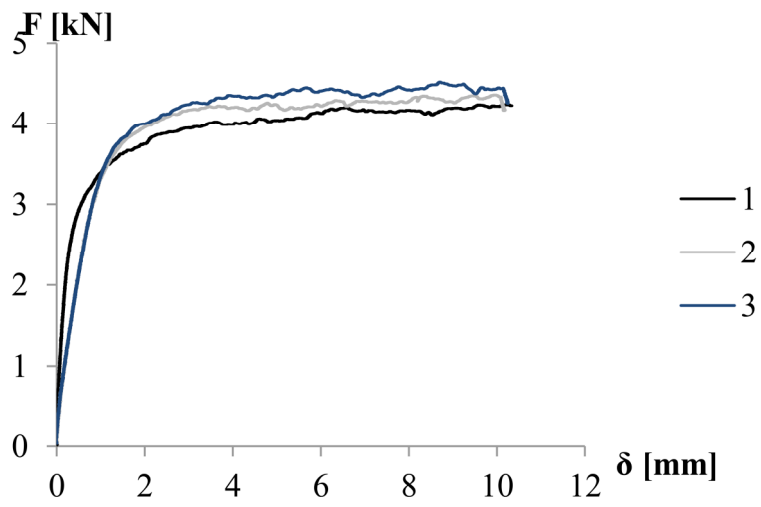


Serie 3

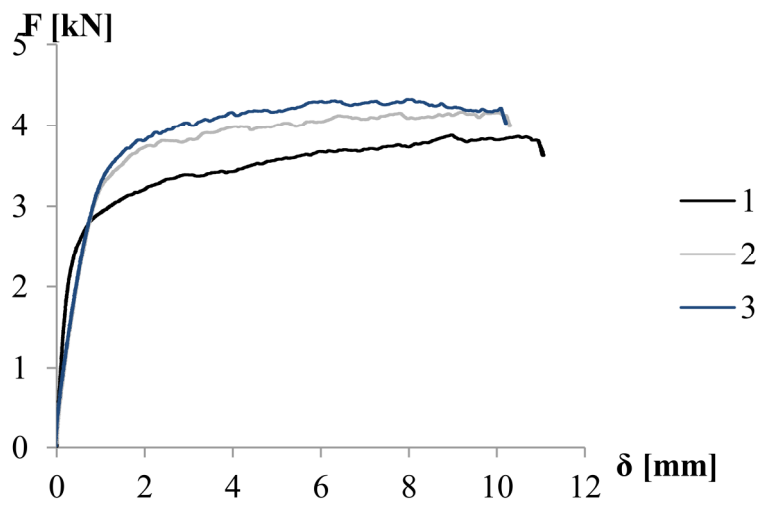


H/D = 3.0

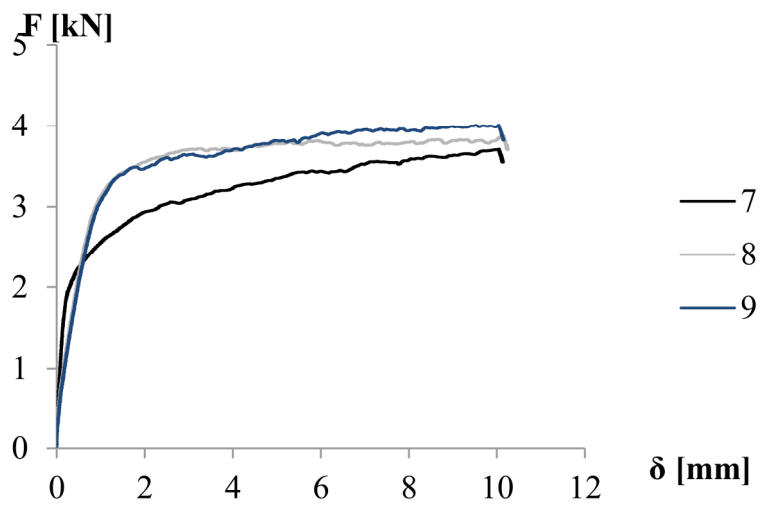
Serie 1



Serie 2



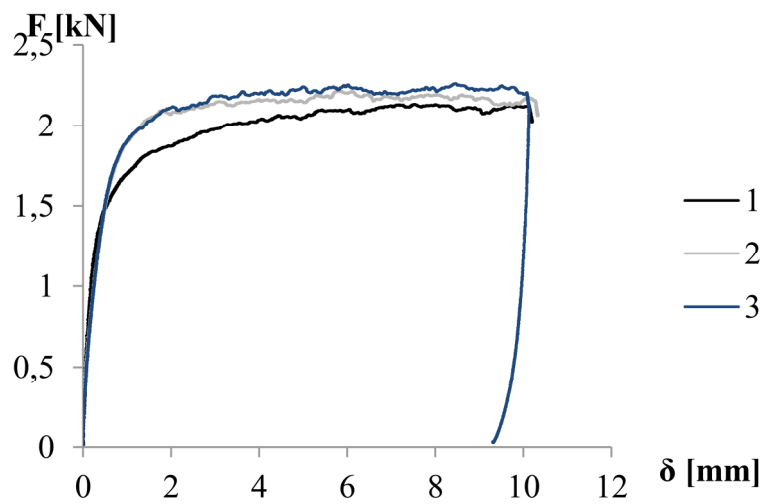
Serie 3



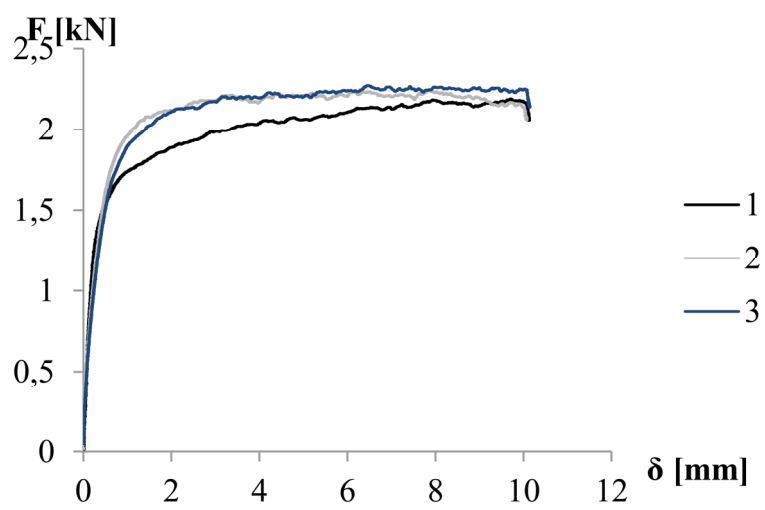
Komprimiert

$H/D = 1.5$

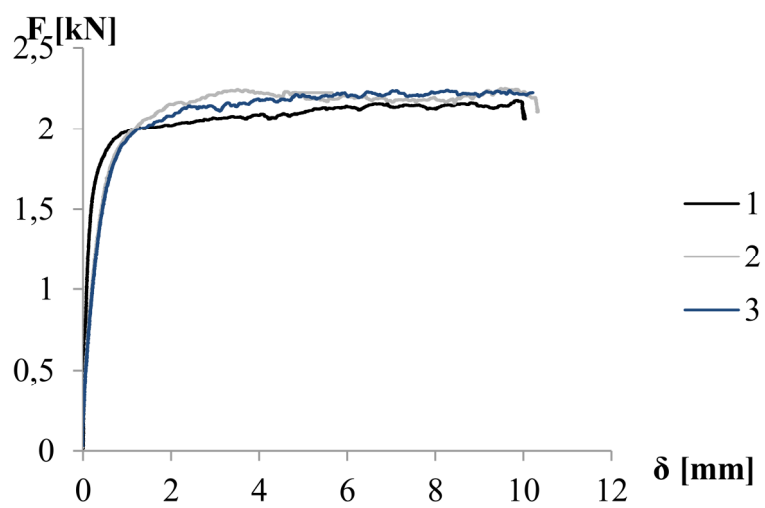
Serie 1



Serie 2

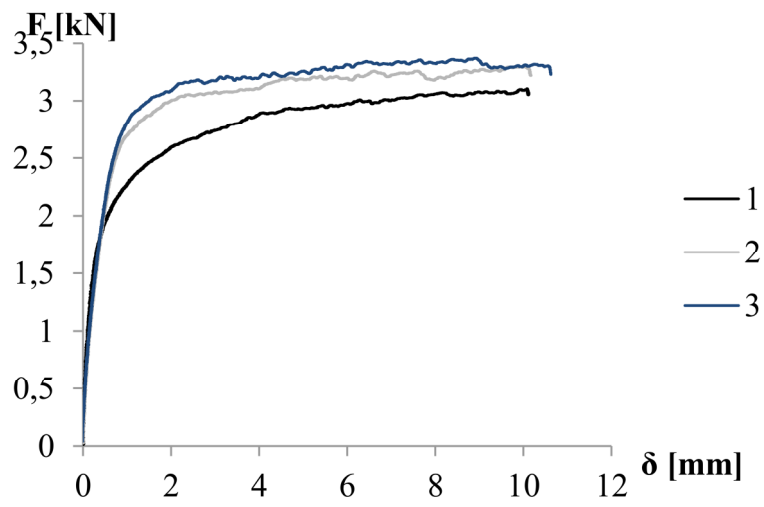


Serie 3

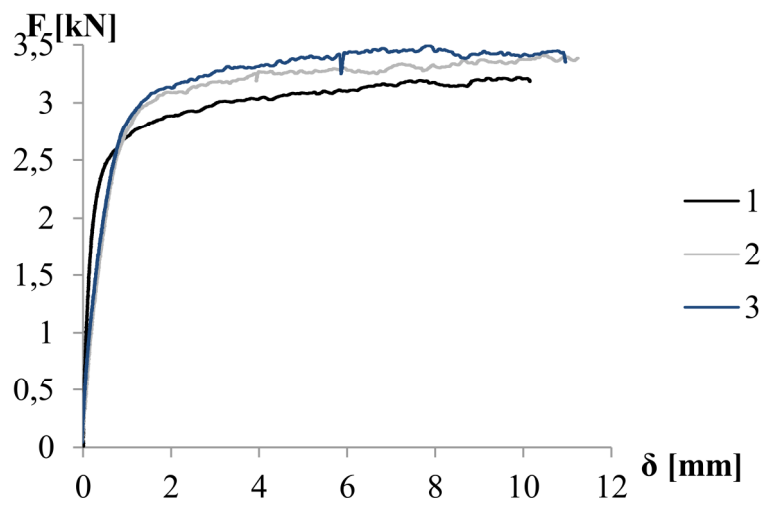


H/D = 2.0

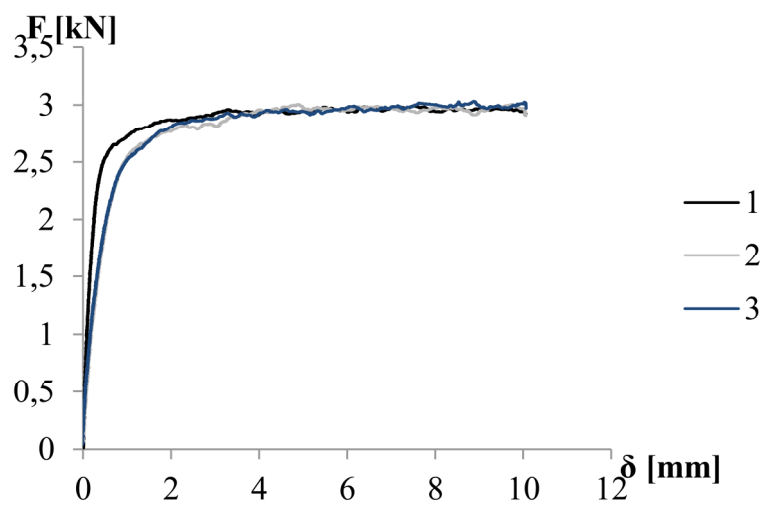
Serie 1



Serie 2



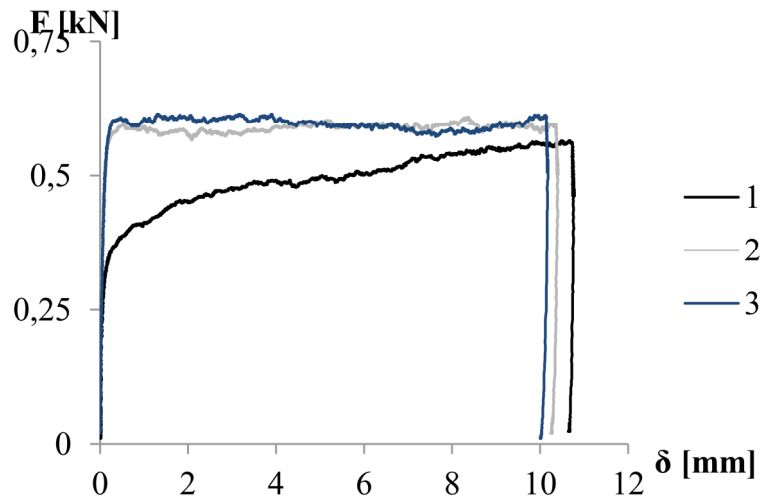
Serie 3



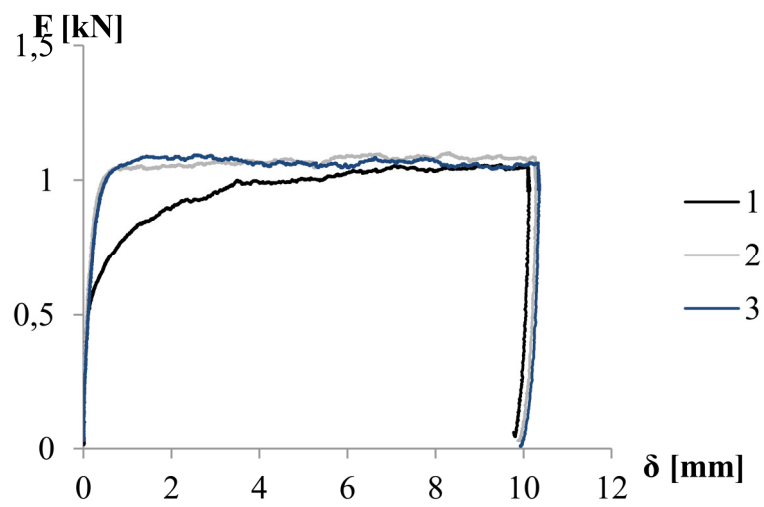
Modellforsøk, kasse i 35° helning

H/D = 1.5

Ukomprimert

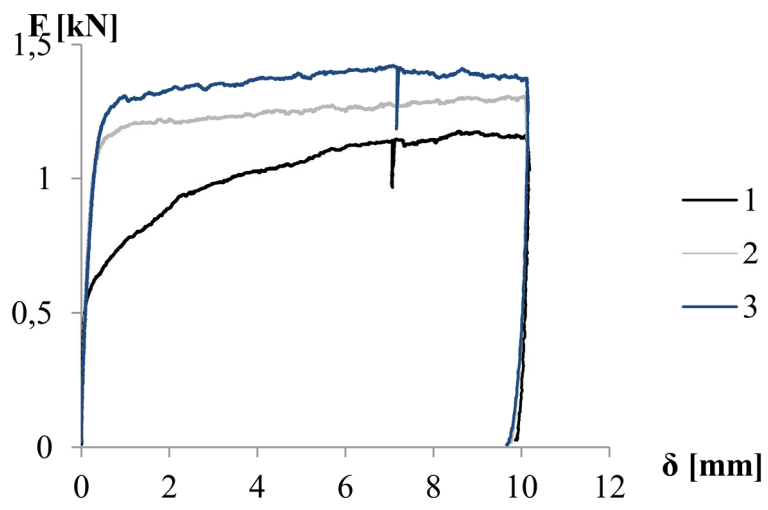


Komprimert

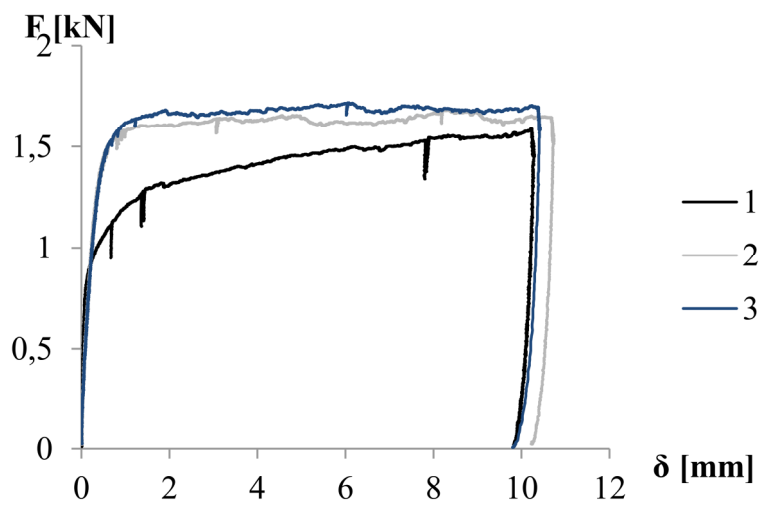


H/D = 2.0

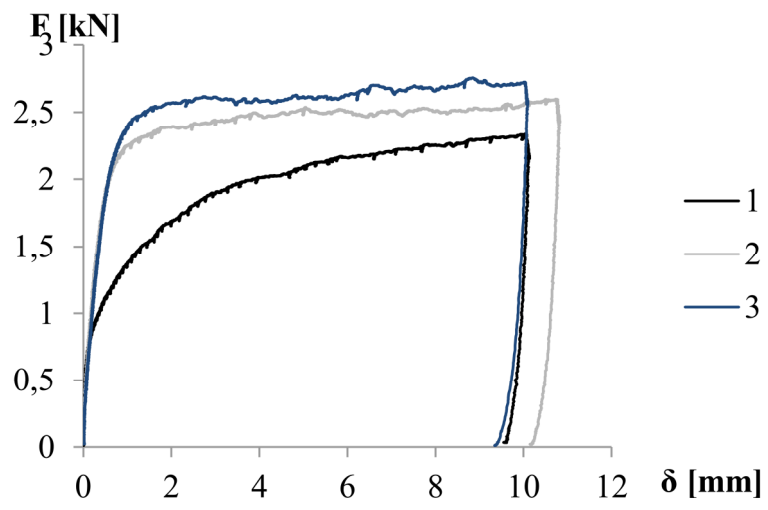
Ukomprimert



Komprimert

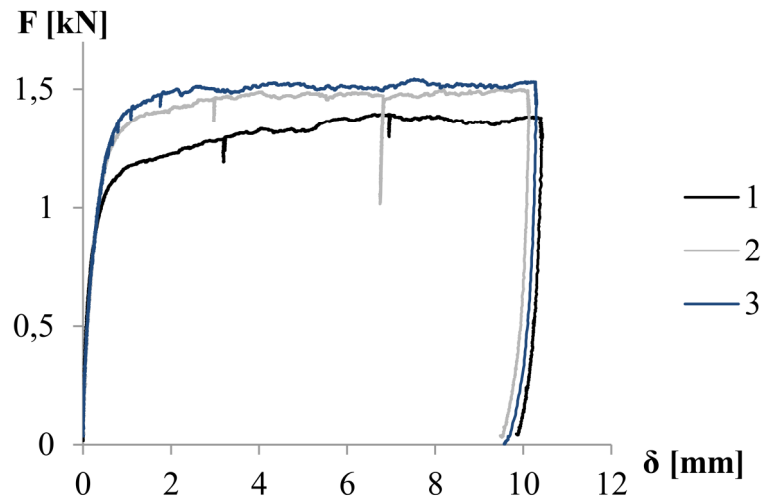


H/D = 3.0
Ukomprimert

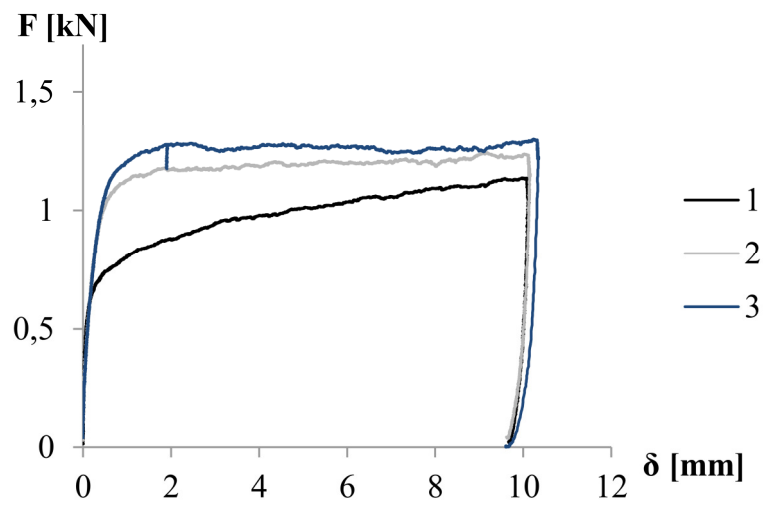


Modellforsøk, kasse med varierende helning, $H/D = 1.5$, ukomprimert

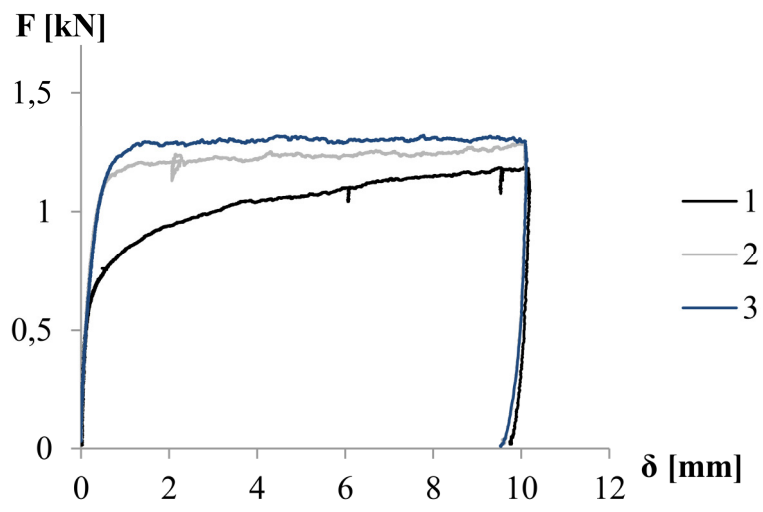
Kasse i 15°



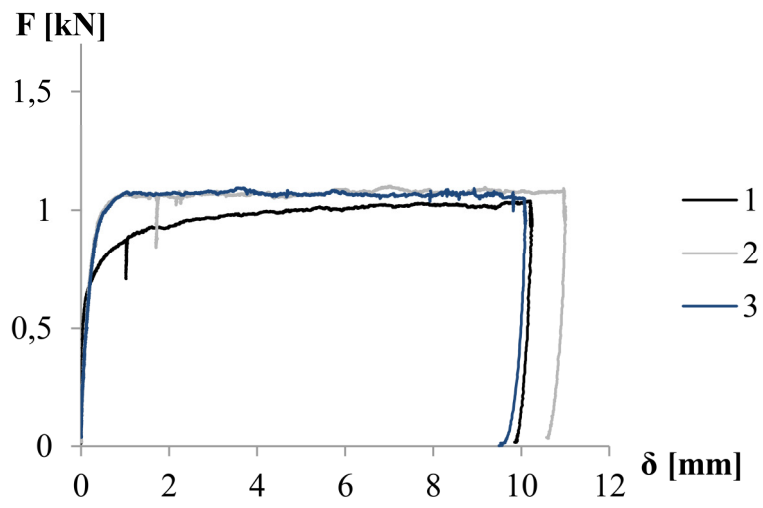
Kasse i 20°



Kasse i 25°

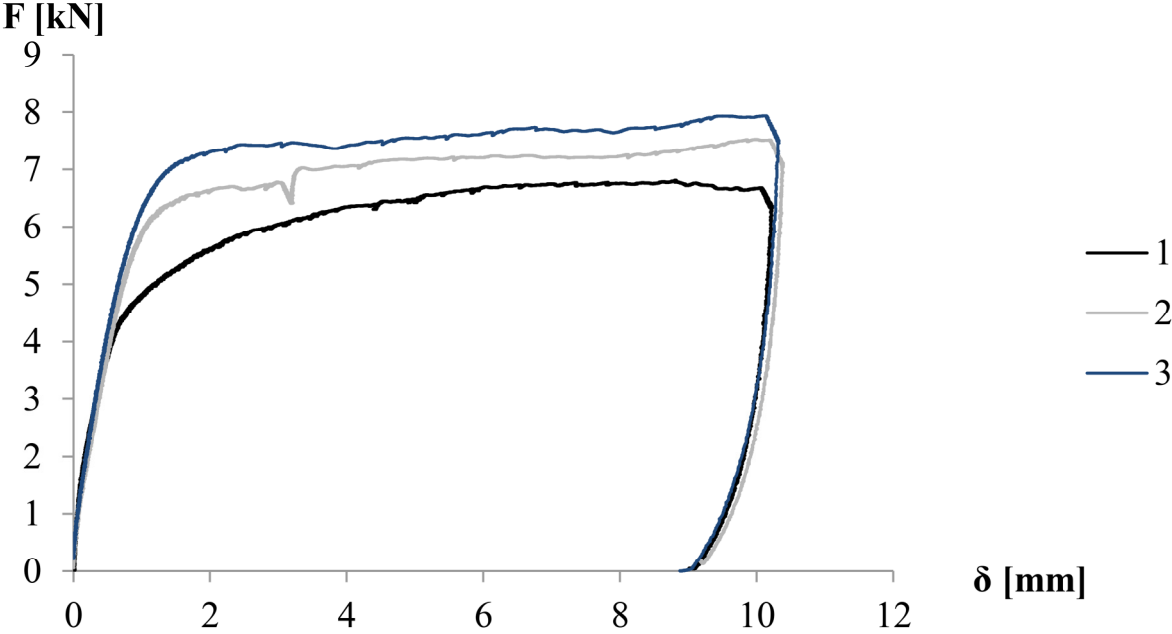


Kasse i 30°

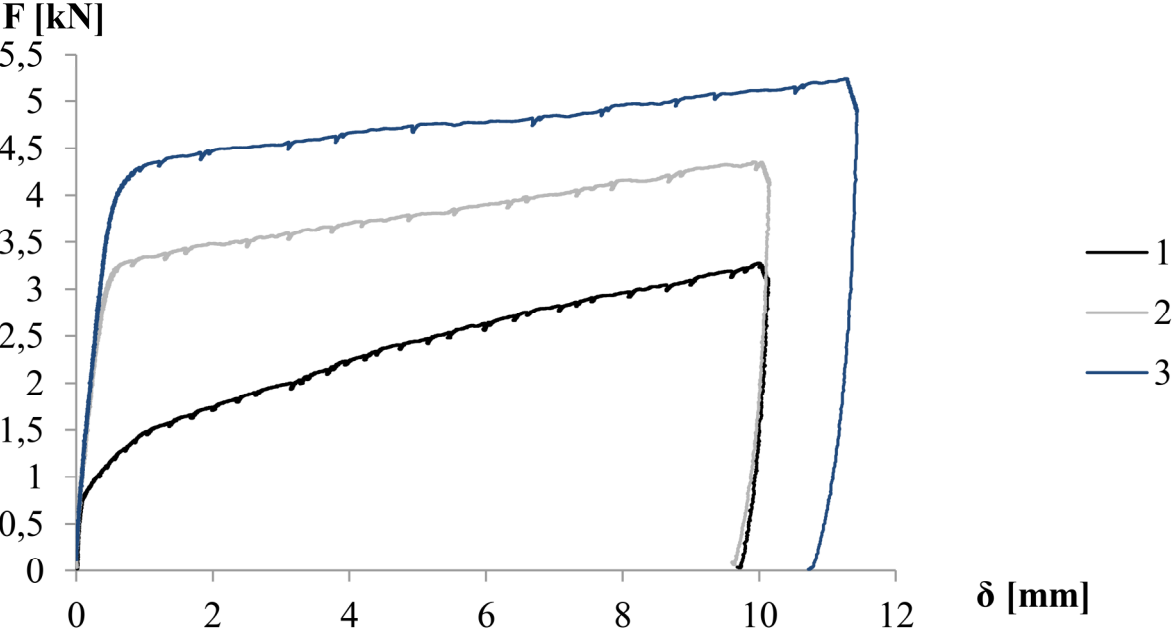


Modellforsøk med rør, d=300 mm

Kasse i 0°



Kasse i 35°

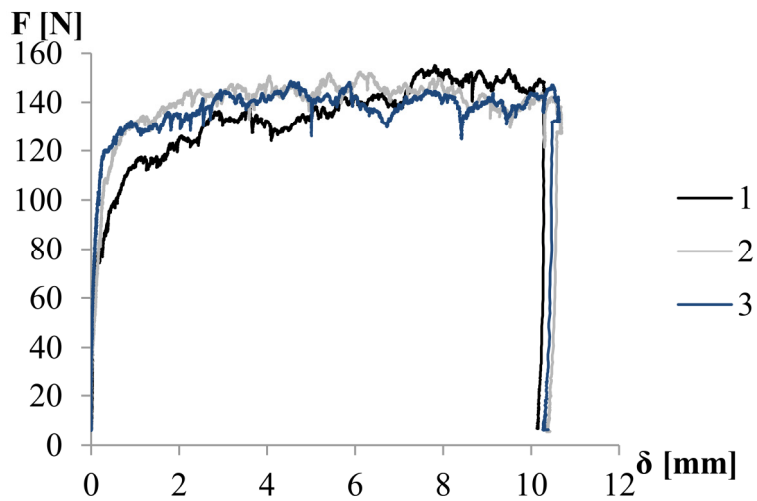


Vedlegg B- Last og forskyvningsdiagram, friksjonforsøk

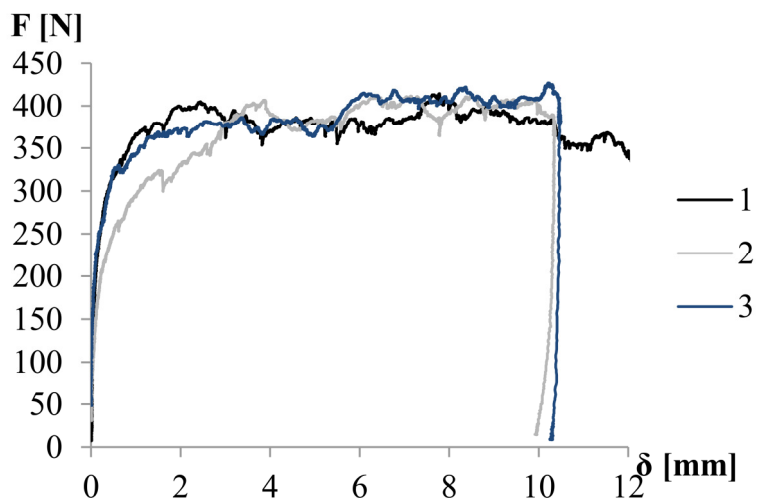
Pukk brukt under Bårgard og Bergsager (2012) (Type 1)

Forsøk med ukomprimert masse

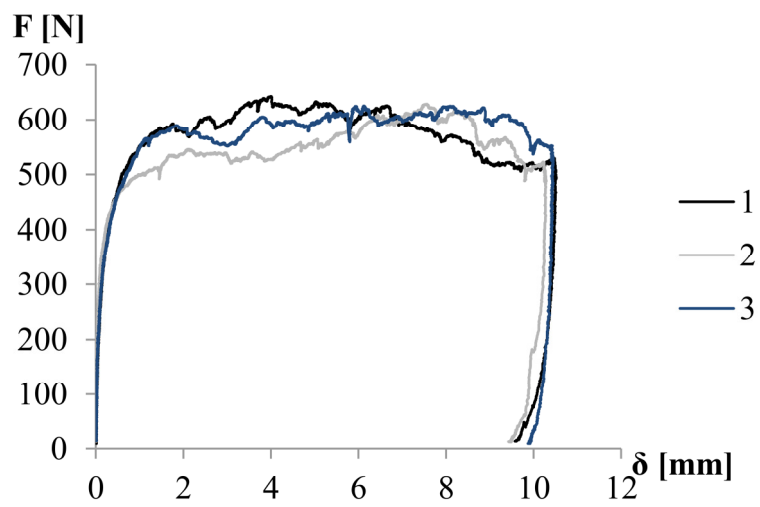
0 kg vekt på kassen



40kg vekt på kassen

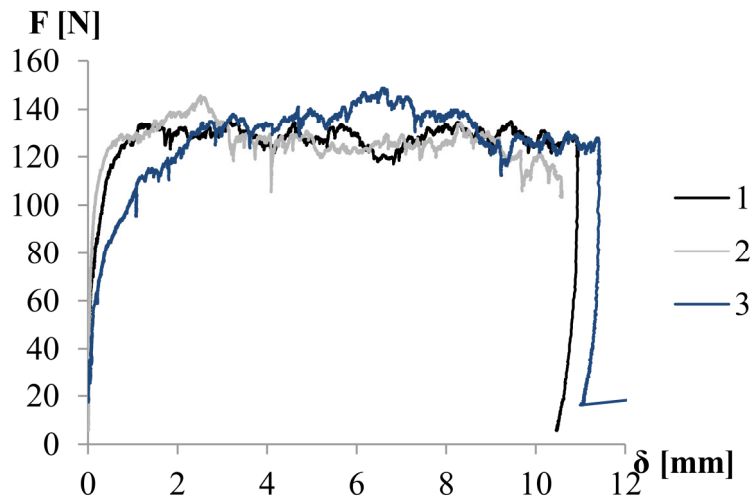


80 kg vekt på kassen

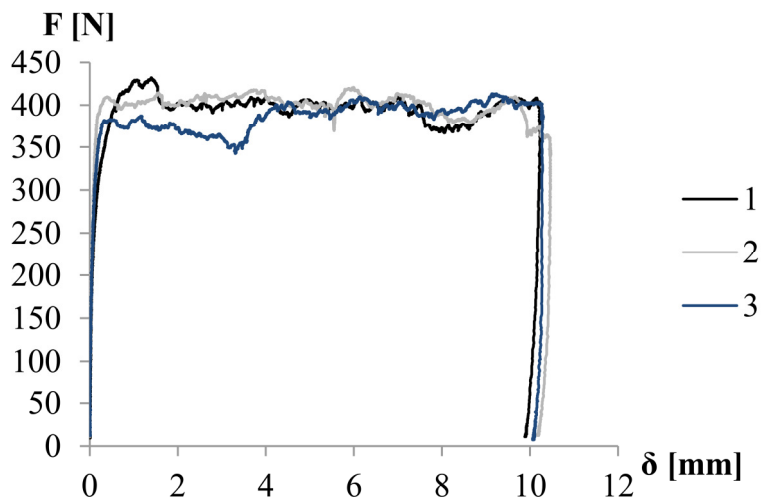


Forsøk med komprimert masse

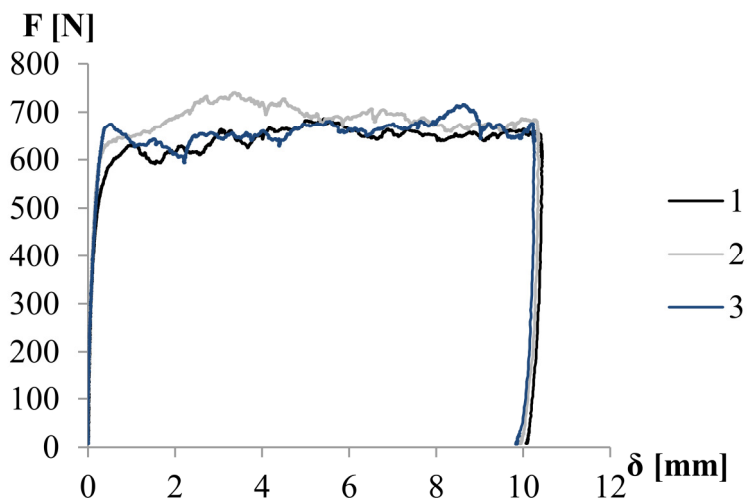
0 kg vekt på kassen



40kg vekt på kassen



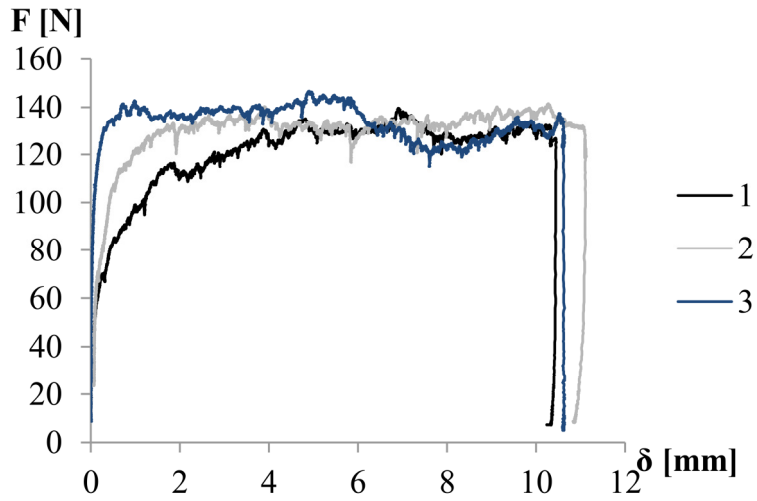
80kg vekt på kassen



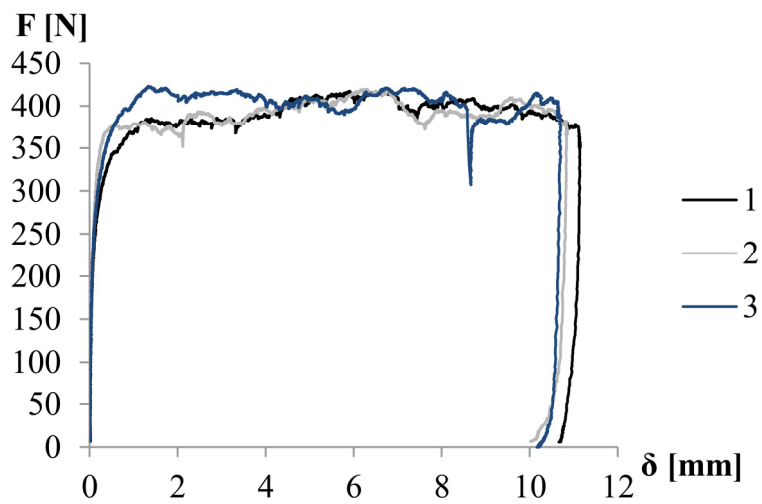
Pukk brukt under Bossel og Haugen (2012) (type 2)

Forsøk med ukomprimert masse

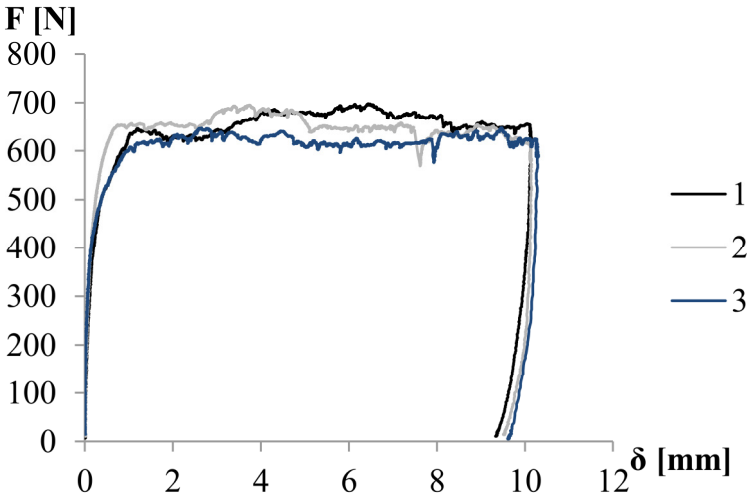
0 kg vekt på kassen



40kg vekt på kassen

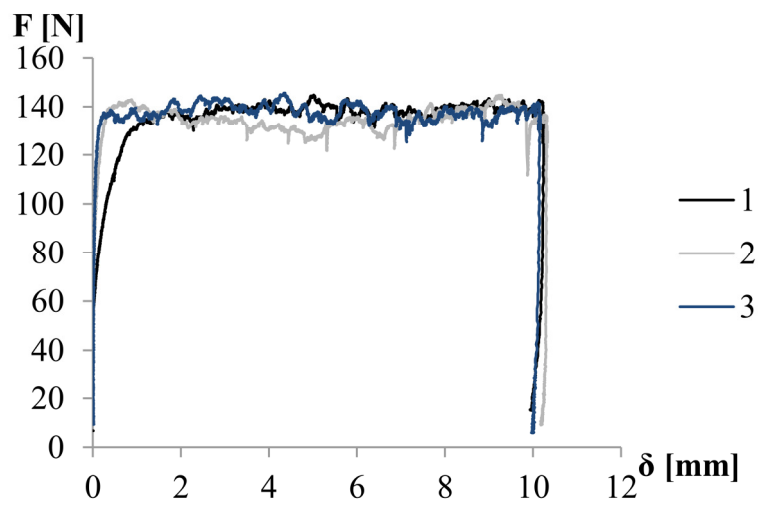


80kg vekt på kassen

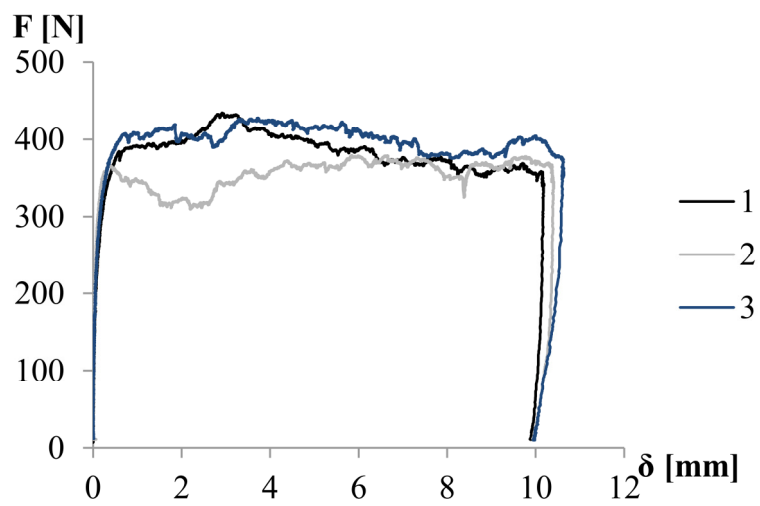


Forsøk med komprimert masse

0 kg vekt på kassen



40kg vekt på kassen



80kg vekt på kassen

